

# Control IMC de la Presión de los Pozos de Petróleo durante la Perforación Modelado como un Proceso Integrativo con Tiempo de Retraso

IMC Control of Oil Wells Pressure during Drilling Modeled as an Integrative Process with Time Delay

Controle IMC da Pressão de Poços Petrolíferos durante a Perfuração Modelado como um Processo Integrativo com Tempo Morto

37

**Carlos Alexis Alvarado Silva<sup>a</sup>**  
**Victor Orlando Gamarra Rosado<sup>b</sup>**

<sup>a</sup> Ingeniería Mecánica Eléctrica

Universidad Señor de Sipán

calvarados@crece.uss.edu.pe

<sup>b</sup> Faculdade de Engenharia Mecânica

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho",

victor.rosado@unesp.br

**Resumen**— Controlar la presión de los pozos de petróleo durante la perforación puede ser una de las etapas operativas de los procesos más complejos y peligrosos. Este estudio propone el diseño de un controlador de modelo interno (IMC) para controlar la presión en el fondo de los pozos durante las operaciones de perforación basadas en Manage Pressure Drilling (MPD). MPD agrega una válvula de control en el sistema de perforación para tener otra variable de manipulación en la presión del pozo. En la primera parte de este trabajo se obtuvo un modelo matemático del proceso, que se fundamenta en la mecánica de fluidos (ecuación de estado, ecuación de transporte de Reynolds: continuidad y momento). El proceso dinámico presenta un elemento integrador, lo que dificulta el manejo de la dinámica del proceso porque cualquier perturbación puede alterar su estabilidad. Aún así, se vuelve más complejo en presencia de un tiempo de retraso en el modelo del sistema. En la segunda parte, se diseñó un controlador IMC para controlar el proceso integrativo con el agregado de retardo de tiempo buscando la mejor estabilidad y robustez del proceso. Finalmente, el controlador propuesto se desarrolla mediante simulaciones que muestran su factibilidad ante la presencia de problemas comunes durante la perforación, los cuales fueron probados como perturbaciones en sistema de circuito cerrado (pérdida de circulación de fluido, afluencias, adición de tubería y pérdida de potencia de la bomba). El rendimiento del proceso en lazo cerrado se compara con un PI clásico.

**Palabras clave**— Control de la Presión en Pozos de Petróleo, Control IMC, Gestionar la perforación a presión, Perforación de Pozos.

**Abstract**— Controlling the pressure of oil wells during drilling can be one of the most complex and dangerous processes operating stage. This study proposes the design of an internal model controller (IMC) to control the pressure at the bottom of wells during drilling operations based Manage Pressure Drilling (MPD). MPD adds a control valve in the drilling system to have another manipulate variable on the well pressure. In the first part of this work, there was obtained a mathematical model of the process, which is founded on fluid mechanics (state equation, the Reynolds transport equation: continuity and momentum). The dynamic process presents an integrating element, which makes the process dynamics difficult to handle because any disturbance may alter its stability. Still it becomes more complex in the presence of a delay time in the system model. In the second part, was designed an IMC controller for controlling the integrative process with the addition of time delay looking for the best stability and robustness of the process. Finally, the proposed controller is performed by simulations that show its feasibility in the presence of common problems during drilling, which were tested as disturbances in closed loop system (loss circulation fluid, influxes, pipe addition and loss of pump power). The performance of the process in closed loop is compared with a classical PI.

**Keywords**— Pressure Control in Oil Wells, IMC Control, Manage Pressure Drilling, Well Drilling.

**Resumo** — Controlar a pressão de poços petrolíferos durante a perfuração pode ser um dos processos mais complexos e perigosos da etapa de exploração. Este estudo propõe o projeto de um controlador do tipo Modelo Interno (IMC) no controle da pressão no fundo de poços durante o processo de perfuração baseado na técnica de Manage Pressure Drilling (MPD). O MPD adiciona uma válvula de controle na saída do sistema de perfuração a fim de ter uma outra variável manipulável na pressão do poço. Na primeira parte do trabalho, obteve-se um modelo matemático do processo o qual se fundamenta na mecânica dos fluidos (equação de estado, equação de transporte de Reynolds: continuidade e quantidade de movimento). O processo dinâmico apresentou um elemento integrador o qual faz que a dinâmica do processo seja difícil de manipular devido a que qualquer distúrbio pode alterar a sua estabilidade. Ainda se torna mais complexo na presença de um tempo de atraso no modelo do sistema. Na segunda parte, projetouse o controlador IMC para controlar o processo integrativo com a adição do tempo morto procurando a melhor estabilidade e robustez do processo. Finalmente, o controlador proposto é avaliado mediante simulações que mostram a sua viabilidade na presença de problemas comuns durante a perfuração, as quais, foram testadas como distúrbios no processo de malha fechada (perdas de circulação de fluido, influxos, conexão de tubos e perda de potência da bomba). O desempenho do processo em malha fechada é comparado com um PI clássico.

**Palavras chave**— Control IMC, Controle da Pressão no Poços Petrolíferos, Manage Pressure Drilling, Perfuração de Poços.

## I. INTRODUÇÃO

Uma das etapas mais importantes da exploração de jazidas de petróleo é a perfuração de poços, na qual, se investem grandes somas de dinheiro para seu aperfeiçoamento. Durante a sua realização podem ocorrer catástrofes ambientais, perdas econômicas e até acidentes mortais devido geralmente a falhas operacionais. O controle da pressão no poço prevê estes inconvenientes e faz com que o funcionamento do sistema e dos equipamentos evitando problemas como influxos, perdas de potência, perdas de circulação entre outros. Nos últimos anos se desenvolveram muitos novos avanços tecnológicos nesta rama. O 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 (devido à profundidade). Esta nova pressão é produzida pela manipulação da válvula de estrangulamento na saída do sistema e/ou pela modificação da vazão da bomba de contrapressão. Durante a perfuração de poços existem certos limites de pressão que devem ser tomados em consideração, pressões dependentes da geologia da região a ser perfurada. O desejo de manter a pressão entre estes limites gera a necessidade de um controle mais robusto preciso e confiável [1]

Na atualidade, os tipos de controle em sistemas de perfuração estão sendo estudados consideravelmente devido aos benefícios que implicariam o ótimo controle do sistema global, não só em custos econômicos, mas também em

avanços de seguridade, e sustentabilidade. Se bem existem diversos trabalhos que envolvem controle de pressão de poços; [2], [3], [4], [5], [6], os modelos dos processos presentes nestes trabalhos foram modelados como funções de transferência de primeira ordem sem tempo morto.

Um dos mais atraentes técnicas de controle com retroalimentação é o PID, devido à simplicidade estrutural e à fácil implementação no campo de trabalho. Entretanto, o PID precisa de uma boa sintonização dos seus parâmetros [4]. Uma sintonização dos parâmetros PID pode ser muito efetivo em casos no que o processo seja linear, invariante no tempo e sem tempo morto, o qual, na prática não ocorre. A adição de um tempo de atraso entre a aquisição dos dados reais e a ação do controlador pode ser de muita relevância para conseguir um bom controle do sistema. O projeto do controlador, ainda torna-se mais complicado devido à instabilidade do processo em malha aberta. Processos que apresentam um integrador são chamados de integrativos e a característica principal deles é que não conseguem enxergar à estabilidade em tempo nenhum quando são excitados por uma função degrau em malha aberta.

Fisicamente, um processo integrativo ocorre em sistemas fechados no controle de nível, pressão e temperatura. No controle da pressão ocorre um armazenamento de massa, por exemplo,

se é feita alguma ação sobre a válvula sem controlador, o razoável seria que numa primeira instancia exista um aumento devido à acumulação de massa no processo, caso contrário uma diminuição progressiva da pressão, fazendo que a dinâmica se torne instável para ambas situações. [7]

Em aplicações de controle industrial, o principal interesse é a boa rejeição de distúrbios por carga no sistema. Para processos integrativos, é muito importante prestar atenção à rejeição por distúrbio de carga desde que a existência do termo integrativo no modelo de processo pode causar uma resposta lenta na presença de distúrbios. Quando se considera a rejeição de distúrbios de carga no projeto do controlador, o desempenho da resposta transitória pode ser degradado. No entanto, devido às variações nas condições de operação do processo, uma boa resposta transitória também é exigido. [8]

O presente trabalho visa a sintonização dos parâmetros PID no controle da pressão do poços de petróleo cujo processo real é modelado como um processo de primeira ordem com a adição de um termo integrativo e tempo de atraso para uma determinada profundidade de perfuração usando o método de modelo interno (IMC) e comparando-o com um PI clássico.

Uma das vantagens que apresenta a aplicação do método IMC é que utiliza o erro entre o processo real e do modelo na retroalimentação. Nesse sentido, o modelo do processo pode diferir do processo real em certa medida e ainda atingir a estabilidade. A sintonização dos parâmetros PID usando o método IMC apresenta só um parâmetro ajustável que

pode ser calculado mediante os parâmetros do modelo do processo e o tempo de atraso. Uma outra vantagem ocorre na implementação física, na presença de restrições do atuador, pode-se utilizar a estrutura IMC para evitar problemas de saturação, sem a necessidade de medidas especiais de anti-windup [9].

## II. MODELAGEM

O sistema de perfuração MPD é conformado por tubos de perfuração, dois 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 no fundo do poço. Na parte superior do sistema (na superfície da plataforma) se encontra a bomba principal de lama conectada à coluna de perfuração. Durante a perfuração de poços se criam duas zonas ou regiões; uma dentro do tubo de perfuração e outra chamada de anular fora do tubo. A região anular e a zona do fluido dentro do tubo de perfuração (tubo de rotação) são concêntricos. A segunda bomba, chamada de contra pressão, não é conectada ao tubo de perfuração, mas, diretamente à região anular; pode ser utilizado para aumentar a pressão do poço e manter o grau de circulação do poço durante a conexão de tubulação [10].

Nesta seção apresenta-se uma serie de modelos matemáticos fundamentados na mecânica dos fluidos (equação de

estado, equação de transporte de Reynolds: continuidade e quantidade de movimento) para a obtenção de equações diferenciais que relacionam à pressão no fundo do poço e a vazão da válvula de controle. O modelo foi proposto por [11]. Este é um modelo simples que unicamente considera uma fase do fluido de perfuração (líquido) e que despreza a influência da temperatura. As equações obtidas foram as seguintes:

$$V_c P_p = \beta_c (q_p - q_b) \tag{1}$$

$$V_a P_e = \beta_a (q_b + q_r + q_c - q_e) \tag{2}$$

$$q_b M = P_p - P_e - F_a (q_b + q_r)^2 - F_c q_b^2 + (\rho_c - \rho_a) g h_b \tag{3}$$

$$P_b M = M_c P_e + M_a P_p + M_c F_a (q_b + q_r)^2 - M_a F_c q_b^2 + (M_a \rho_c - M_c \rho_a) g h_b \tag{4}$$

A tabela 1 mostra a denominação de cada simbologia das equações. Para aplicar o método de controle de Modelo interno o processo deve ser modelado como uma series de equações lineares. 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 de determinação diversas 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.

A linearização de modelos não lineares é uma prática muito comum, importante e útil na engenharia. O processo de linearização, 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 [12].

O processo linearizado é representada em função da transformada de Laplace na Eq. (5), a qual, relaciona o vazão de saída da válvula de estrangulamento com a pressão no fundo do poço. A entrada  $u(s)$  é a soma da vazão da válvula de estrangulamento e a vazão produzida pela bomba de contra pressão.

$$u(s) = \frac{\frac{\partial P_b}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial u} s^2 + \left( \frac{\partial P_b}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial u} + \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial u} \right) s + \frac{\partial P_b}{\partial P_p} \frac{\partial P_p}{\partial u} \frac{\partial P_e}{\partial q_b} \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial u}}{s \left( s^2 - s \frac{\partial q_b}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_p} \frac{\partial P_p}{\partial q_b} - \frac{\partial q_b}{\partial P_e} \frac{\partial P_e}{\partial q_b} \right)} \tag{5}$$

Tabela 1. Nomenclatura

Sím.	Denominação
$V_a$	Volume da região anular
$V_c$	Volme da região da coluna de perfuração
$P_p$	Presso da bomba principal
$P_e$	Presso da válvula de estrangulamento
$P_b$	Pressão na broca
$q_e$	Vazão da válvula de estrangulamento
$q_b$	Vazão da saída da broca
$q_p$	Vazão da bomba principal
$q_r$	Vazão do reservatório para o poço
$\beta_a$	Modulo de compressibilidade da região anular
$\beta_c$	Modulo de compressibilidade da região da coluna
$q_c$	Vazão da bomba de contra pressão
$M_a$	Massa da região anular
$M_c$	Massa da região da coluna de perfuração
$M$	Soma de $M_b$ e $M_c$
$\rho_a$	Densidade da região anular
$\rho_c$	Densidade da região da coluna de perfuração
$h_b$	Profundidade da broca
$g$	Gravidade
$F_a$	Força de atrito da região anular
$F_c$	Força de atrito da região da coluna de perfuração

Fonte: Autor

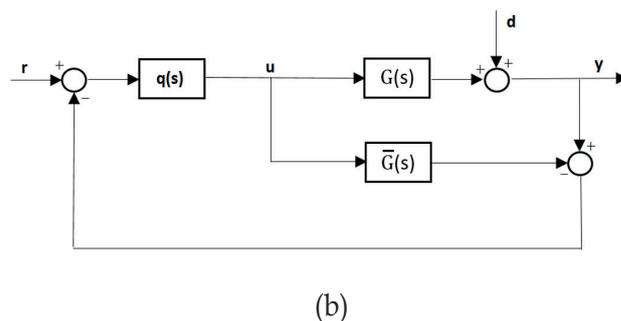
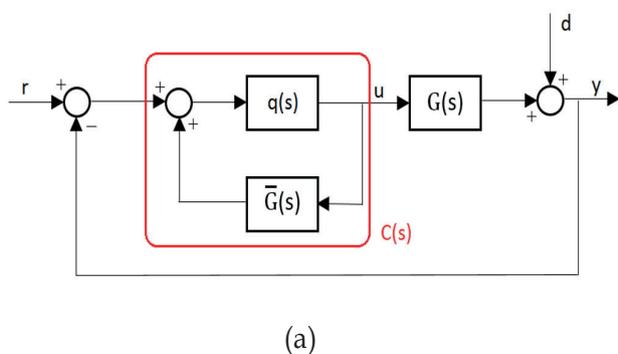
Contudo, para projetar o controlador IMC deve-se modelar o processo da Eq. (5) em função de uma estrutura predeterminada. O modelo que se aproxima da melhor maneira ao modelo linear representado

$$\frac{(P_b(s))}{(u(s))} = \frac{K}{(s(\tau s+1))} \quad (6)$$

### III. CONTROLE IMC

O controlador IMC foi apresentado por primeira vez por [13]. O controle IMC 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 mostra a estrutura do controlador IMC que é composto pelo processo real  $G(s)$ , o modelo do processo  $(s)$  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  $q(s)$  afeita a  $G(s)$  e  $(s)$  e a diferencia entre a saída de estas sinais é restado da sinal de referência, o que gera o erro de retroalimentação.

A parte (b) da Fig. 2 é obtida utilizando um arranjo de diagrama de blocos. O relacionamento entre  $q(s)$  e  $(s)$  gera a função de transferência do controlador  $C(s)$  tornando-se uma estrutura de retroalimentação mais conhecida.



**Fig. 2.** (a) Estrutura de um sistema com controlador (b) Estrutura retroalimentada clássica mediante arranjo de diagrama de blocos. Fonte: Rivera, 1986.

A relação entre a função de referência, a função distúrbio e a saída do sistema é representada pela Eq. (7).

$$y = \frac{qG}{(1+q(G-\bar{G}))} r + \frac{(1-qG)}{(1+q(G-\bar{G}))} d \quad (7)$$

$$y = \eta r + \epsilon d \quad (8)$$

Sendo  $\eta$  a sensibilidade complementar e  $\epsilon$  a função da sensibilidade. A função de sensibilidade no diagrama de bode dá informação sobre a robustez do sistema. Quando o modelo e a planta coincidem ( $G = \bar{G}$ ) as expressões  $\eta$  e  $\epsilon$  se simplificam nas Eq. (9) e (10).

$$\bar{\eta} = q\bar{G} \quad (9)$$

$$\bar{\epsilon} = 1 - q\bar{G} = 1 - \bar{\eta} \quad (10)$$

Para assegurar que o sistema não apresente problemas de offset devido a mudanças de referência ou distúrbios no processo deve-se cumprir que: Para entradas degrau (tipo 1):

$$\lim_{s \rightarrow 0} qG = \eta(0) = 1 \quad (11)$$

Para entradas rampa (tipo 2):

$$\lim_{s \rightarrow 0} qG \frac{d}{ds} (q\bar{G}) = \left. \frac{d\eta}{ds} \right|_{(s=0)} = 0 \quad (12)$$

O cenário ideal do comportamento do sistema se apresenta quando  $y$  é igual que  $r$  na Eq. (8); para isso, deve-se cumprir que  $\eta=1$  e  $\varepsilon=0$ . Então, procura-se um  $q$  que seja o inverso do modelo do processo que garanta a igualdade. O sistema retroalimentado com controlador é estável se apenas  $\bar{G}$  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 definido pelos polos da função  $q$ .

Um processo com elemento integrativo é instável mas considerar-se 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 Eq. (12).

Por outro lado, há certos requerimentos que a função  $q$  deve cumprir para assegurar a capacidade de realização 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 uma 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 de sinais, deve-se exigir que  $q$  seja Própria, o que significa que:

$$\lim_{s \rightarrow \infty} |q| \geq 0 \quad (13)$$

O último requerimento chama-se de causalidade,  $q$  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  $q$ ; para isso, o modelo do processo se divide em duas partes, a primeira contém todos os elementos que são de fase não mínima  $\bar{G}_-$  e a outra, de fase mínima  $\bar{G}_+$ ,  $G = \bar{G}_- \bar{G}_+$ .

Nesse sentido, o valor de  $q$  fica definido como  $q = \bar{G}_-^{-1}$  para garantir com os requerimentos.

A outra parte (fase mínima) pode ser fatorizado pela Eq. (14) ou (15)

$$\bar{G}_+ = e^{-\theta} \prod_i (-B_i s + 1); \text{Re}(B_i) > 0 \quad (14)$$

$$\bar{G}_+ = e^{-\theta} \prod_i \left( \frac{-B_i s + 1}{B_i s + 1} \right); \text{Re}(B_i) > 0 \quad (15)$$

Sendo  $\theta$  o valor do tempo morto e  $\beta$  a constante de tempo de uma equação com polo do lado direito do plano  $s$ . O segundo passo irá exigir que  $q$  seja Própria, ou seja que cumpra com a Eq. (13). Da Eq. (9) obtém-se a relação de  $\bar{\eta} = q \bar{G}_- \bar{G}_+$ . 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  $\bar{q}$ . Assim,  $q = \bar{q}f$  obtém-se o seguinte relacionamento:

$$\bar{\eta} = \bar{q}f(s) \bar{G}_- \bar{G}_+ \quad (16)$$

Uma estrutura de filtro comum que elimina o offset para entradas passos ou rampas é:

$$f(s) = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (17)$$

O ordem do denominador  $n$  é escolhido da maneira em 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 a Eq. (16) na Eq. (12) obtém-se:

$$\left. \frac{d}{ds} (\bar{q}f(s)\bar{G}_- \bar{G}_+) \right|_{s=0} = \left. \frac{d}{ds} (f(s)\bar{G}_+) \right|_{s=0} = 0 \quad (18)$$

Para cumprir com a Eq. (18) o filtro é representado mediante a Eq. (19):

$$f(s) = \frac{(2\lambda - \bar{G}_+(0))s + 1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (19)$$

Sendo  $\bar{G}_+(0)$  a fase mínima do processo quando  $s$  tende a zero. Finalmente, os parâmetros do controlador podem-se resumir nas Eq.(20), (21) e (22).

$$K_p = \frac{(\theta + 2\lambda + \tau)}{(\theta + \lambda)^2} \quad (20)$$

$$T_I = \theta + 2\lambda + \tau \quad (21)$$

$$T_D = \frac{((\theta + 2\lambda)\tau)}{(\theta + 2\lambda + \tau)} \quad (22)$$

#### IV. PROJETO DO CONTROLADOR

##### A) Modelo do Processo

O projeto do controlador começa com a determinação do modelo do processo apresentado com a Eq. (5). A Tabela 1 mostra valores reais que foram utilizados em muitos trabalhos [2], [14], [15], [16].

**Tabela 2.** Parâmetros constantes do sistema de perfuração.

Símbolo	Valor	Unidade
$\beta_a$	7000	Bar
$\beta_c$	11000	Bar
$F_a$	15831	$10^{-5}$ (m <sup>7</sup> /Kg)
$F_c$	176640	$10^{-5}$ (m <sup>7</sup> /Kg)
$M_a$	1600	$10^{-5}$ (Kg/m <sup>4</sup> )
$M_c$	5720	$10^{-5}$ (Kg/m <sup>4</sup> )
$\rho_a$	0,0119	$10^{-5}$ (Kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_c$	0,0125	$10^{-5}$ (Kg/m <sup>3</sup> )
$V_a$	96,13	m <sup>3</sup>
$V_c$	28,27	m <sup>3</sup>
$q_p$	0,015	m <sup>3</sup> /s
$q_r$	0,001	m <sup>3</sup> /s
$h_b$	2000	m

**Fonte:** Breyholtz, 2008; Pedersen, 2009; Yilmaz et al., 2011; Godhav et al., 2015

Substituindo estes valores na Eq. (5) obtém-se:

$$\frac{P_b(s)}{u(s)} = \frac{(56.85s^2 + 52.65s + 3.872)}{s(s^2 + 0.7931s + 0.0632)} \quad (23)$$

A segunda parte do projeto consiste no ajuste deste modelo para um modelo de primeira ordem com elemento integrador. Se montou a estrutura no linguagem do programa usando os dados apresentados na Tab. 1. As simulações foram feitas usando o algoritmo de Dorman Prince com um amostragem de 0,01 segundo no linguagem de Simulink.

Uma vez montado o processo a função  $u(t)$  foi excitada pela função degrau. A resposta desta excitação será ajustada à Eq. (6) mediante o aplicativo de Matlab R2014a, *Curve Fitting*. O ajuste teve um coeficiente de determinação de 0,99. O modelo do processo é definido pela seguinte função de transferência:

$$\frac{P_b(s)}{u(s)} = \frac{62.22}{s(0.008s+1)} \quad (24)$$

## B) Tempo de Atraso

Existe uma diferencia relevante entre o estado atual da pressão do fundo do poço e a ação corretiva. Em algum instante  $t_0$  a pressão do poço 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

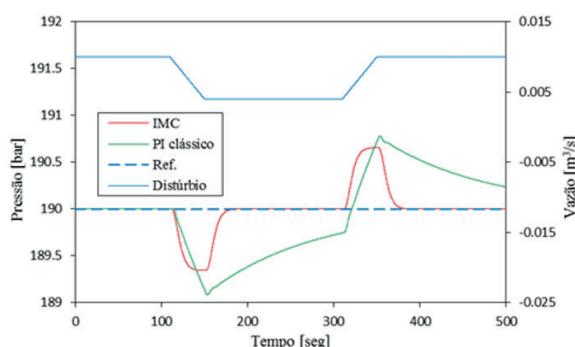
arranque da válvula. Esta é a saída do motor de arranque no tempo  $t_2$ . A válvula começa-se mover, e a abertura de estrangulamento correto é alcançado ao tempo  $t_3$ . No trabalho [3], se apresentou tempo  $t_2$ . A válvula começa-se mover, e a abertura de estrangulamento correto é alcançado ao tempo  $t_3$ . No trabalho [3], se apresentou experimentalmente o efeito que se produz devido ao tempo de atraso, o qual, se considerou de 2 segundos.

$$\frac{P_b(s)}{u(s)} = \frac{62.22}{s(0.008s+1)} e^{-2s} \quad (24)$$

## C) Controladores

Se adicionou um distúrbio de carga na sinal de controle  $u(t)$  com a finalidade de testar os comportamentos dos controladores. A medição de este distúrbio é representado pelo valor de  $IEA_d$ . O distúrbio foi representado por uma função de grau de valor 0.01. Para medir o desempenho da resposta transitória se consideraram a sobressinal o tempo de subida e o tempo de acomodação. A entrada de referência é representada como uma função de grau de valor 1. Primeiro, se desenvolveu o controlador IMC, se obtiveram resultados para diferentes  $\lambda$  mostrando diferentes comportamentos. Uma primeira observação do gráfico, é que existe um comportamento indireto entre a resposta transitória e a resposta devido à distúrbio. Isto quer dizer que; quanto melhor

desempenho transitório exista o sistema não atuará corretamente na presença de distúrbios, o qual, é muito comum em controladores PID, nos controladores convencionais 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 ( $M_s$ ) maior a robustez. A Tabela 3 mostra que a robustez melhora quando os valores de  $\lambda$ , e a rejeição ao distúrbio aumentam com aumento de tal parâmetro. (Figura 3)



**Figura 3.** Desempenho do sistema na entrada degrau e rejeição aos distúrbios para diferentes valores de  $\lambda$ . Fonte: Autor

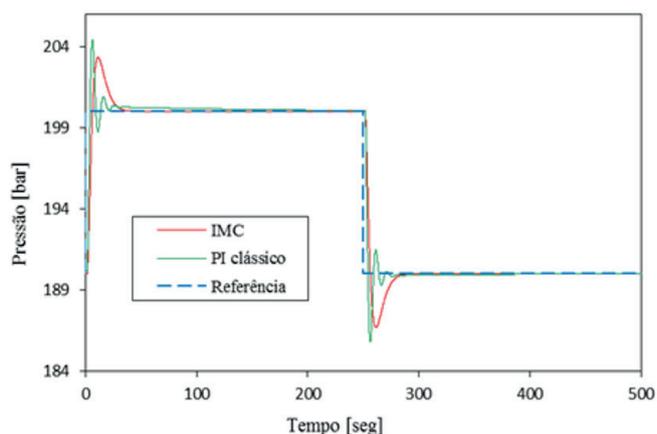
## V. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Durante a perfuração de poços, eventualmente ocorrerão distúrbios que causam flutuações na pressão. Podem ser citadas 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.

Os resultados apresentados a seguir se compararam com um controlador tipo PI clássico. O controlador PI clássico foi obtido mediante sintonização do seus parâmetros pelo aplicativo de Matlab "Control System Designer". Estes valores são:  $K_P = 0.008$  e  $T_I = 6.15$ . O comparativo baseia-se na igualação da Robustez dos dois controladores, nesse sentido, se escolheu trabalhar com os parâmetros do controlador IMC para  $\lambda=5.5$  devido a que apresenta um valor de robustez igual à robustez do PI clássico.

### A) Rastreamento do Sinal

Numa primeira instancia, tentou-se testar os controladores projetados para ver como se comportavam as saídas do sistema para o caso de rastreamento do sinal. As faixas de pressão de perfuração podem ser muito grandes e variáveis. Neste trabalho se considerou uma faixa de 190 – 200 bar. (Figura 4)



**Figura 4.** Resposta do sistema com controlador IMC e PI clássico no rastreamento do sinal  
Fonte: Autor

**Tabela 3.** Desempenho quantificado do sistema e obtenção dos parâmetros PID para diferentes valores de  $\lambda$ 

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

Fonte: Autor

## B) Conexão de Tubos

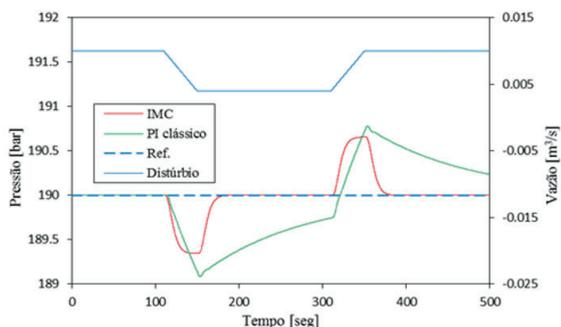
A conexão de tubos é o procedimento de adição de um novo tubo ou pedaço de cano, na coluna de perfuração. Um tubo é de aproximadamente entre 9 metros de comprimento. Três tubos formam o que se chama de stand, estes 27 metros de tubulação são utilizados na perfuração e são inseridos com uma velocidade 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 de vazão de 0.015 m<sup>3</sup>/s deve ser desacelerada até chegar a vazão de zero e o excesso de fluido na coluna de perfuração é retirado a través de uma duto e voltado para os tanques de lama 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 do fundo do poço. No entanto, na perfuração MPD age aumentando a vazão da bomba de contrapressão de 0.002 m<sup>3</sup>/s até 0.004 m<sup>3</sup>/se manipulando a válvula de estrangulamento. O procedimento é concluído em aproximadamente dez minutos, e então a bomba de lama é ligada novamente [2],[14].

Na Figura 5 se mostra a simulação do distúrbio da conexão de tubulação mediante a queda de vazão na bomba principal. Se utilizou uma função rampa de 20 até 60 segundos para logo no segundo 130 se ligue novamente.

A perda de potência é definida como uma completa perda de poder da bomba principal de lama, onde a vazão de estrangulamento e a bomba de contrapressão assumem a operação do sistema para manter a pressão desejada de maneira separada e independente [17]. A simulação de perda de potência pode ser considerado também para este tipo de situação.

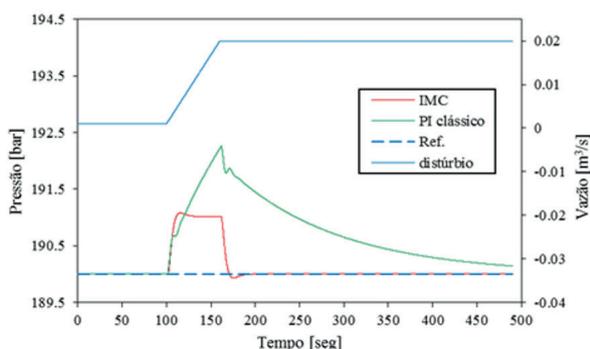


**Figura 5.** Resposta do sistema com controlador IMC e PI clássico na conexão de tubos. Fonte: autor

### C) Influxo

Durante as operações de perfuração, é comum encontrar zonas que apresentam fluido preso. Quando a broca entra em contato com essas regiões o fluido, seja gás u óleo, flui para o poço. Em geral, um influxo ocorrerá quando a pressão de formação se torna maior que a pressão induzida a partir do fluido de perfuração [18].

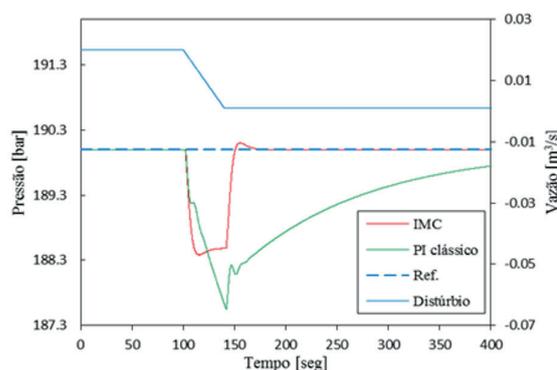
Um influxo é produzido pelo aumento da variável de vazão do reservatório desde 0.001 m<sup>3</sup>/s até 0.02 m<sup>3</sup>/s em um minuto. Para fines de simulação, o influxo pode ser representado com uma função rampa positiva com duração de 40 segundos.



**Figura 6.** Resposta do sistema com controlador IMC e PI clássico no influxo. Fonte: Autor

### D) 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 [17]. A perda de lama é representada por uma queda da vazão do reservatório que pode-se considerar o inverso do influxo para este caso a queda é de 0.02 m<sup>3</sup>/s até 0.001 m<sup>3</sup>/s.



**Figura 7.** Resposta do sistema com controlador IMC e PI clássico na perda de lama. Fonte: Autor

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho se desenvolveu um modelo linear com elemento integrador e com a adição de um tempo morto ou de atraso para determinar os parâmetros de um controlador do tipo IMC.

Os controladores tiveram um comportamento robusto e estável na presença de distúrbios, eles conseguiram a estabilidade apesar dos distúrbios.

O sistema com controlador PI clássico a despeito de estabilizar-se num determinado tempo mostrou um desempenho fraco. Para o caso de rastreamento do sinal, o sistema com PI apresentou maior rapidez de resposta. No entanto, o sistema com controlador IMC mostrou uma resposta mais suave. Para as demais situações (influxo, conexão de tubos e perda de lama) o sistema com controlador IMC desenvolveu melhor rejeição às distúrbios atingindo rapidamente o sinal de referência.

## V. AGRADECIMENTOS

Este trabalho recebeu o financiamento do Programa de Recursos Humanos PRH48 da Agência Nacional de Petróleo – Brasil.

## VI. REFERENCIAS

- [1] Rehm, B et al., 2008, "Managed Pressure Drilling", Ed. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 369 p.
- [2] Pedersen, T., 2009, "L1 Adaptive Control in Managed Pressure Drilling", M-Sc. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [3] Landet, I. S., 2011, "Modeling and Control for Managed Pressure Drilling from Floaters", M.Sc. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [4] Siahaan, H. B., Jin, H., Safonov, F. G., 2012, "An Adaptive PID switching Controller for Pressure Regulation in Drilling", IFAC Workshop on Automatic Control in Offshore Oil and Gas. Norway, Vol. 1, pp. 90-94.
- [5] Magzoub, M. A., Saad, N. B., Ibrahim, R. B., 2013, "Managed Pressure Drilling System Using Adaptive Control", First International Conference on Artificial Intelligence, Modelling & Simulation, Vol. 1. Malasya.
- [6] Karimi, A. V., Buranaj, B. H., Van oort, E., 2014, "Automated Well control Decision-Making during Managed Pressure Drilling Operations", Society of Petroleum Engineers, Galveston, Texas.
- [7] Åström, K. J., Hägglund, T., 1995, "PID Controllers: Theory, Design and Tuning", Ed. Instrument Society of America, North Carolina, 343 p.
- [8] Jin, Q. B., Liu, Q., 2014, "Analytical IMC-PID design in terms of performance/robustness tradeoff for integrating processes: From 2-Dof to 1-Dof", Journal of Process Control, Vol. 24, pp. 22-32.
- [9] Wang, Q., Lu, C., Pan, W., 2015, "IMC PID controller tuning for stable and unstable process with time delay", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 105, pp. 120-129.
- [10] Corrêa, O. L. S., 2003, "Petróleo: Noções sobre exploração, perfuração, produção e microbiologia", Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 86 p.

- [11] Kaasa, G. O., 2007, "A Simple Dynamic Model of Drilling for Control", StatoilHydro Resarch Center Porsgrunn. Norway.
- [12] Ogata, K., 2010, "Modern Control Engineering", Ed. Pearson Education, New Jersey, 894 p.
- [13] Rivera, D. E., Morari, M., Skogestad, S., 1986, "Internal Model Control. 4. PID Controller Design", Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, Vol. 25, pp. 252-265.
- [14] Breyholtz, Ø., 2008, "Nonlinear Model Predictive Pressure Control during Drilling Operations", M.Sc. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
- [15] Yilmaz, M., Dhansri, N. R., Mujeeb, S., 2011, "An Intelligent Control Approach for Oil Drilling Processes", Procedia Computer Science, Vol. 6, pp. 106-111.
- [16] Godhavn, J-M., Pedersen, T., Schubert, J., 2015, "Supervisory control for underbalanced drilling operations", IFAC -PapersOnLine, Vol. 48, No. 6, pp. 120-127.
- [17] Azar, J. J., Samuel L, G. R. , 2007, "Drilling Engineering", Ed. PennWell Corporation, Tulsa, Oklahoma, 486 p.
- [18] Gabaldon, O., Culen, M., Brand, P., 2014, "Enhancing Well Control Through Managed Pressure Drilling", Offshore Technology Conference, Vol. 10, Houston, Texas.