



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Interface para Sintonia de Controladores PID

Abril de 2009
Universidade Federal de Campina Grande
Diego Linhares de Azevedo - 20821116



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Interface para sintonia de controladores PID

Relatório apresentado à coordenação de estágios de Engenharia Elétrica da UFCG, como parte dos requisitos à obtenção de título de engenheiro eletricista.

ALUNO: Diego Linhares de Azevedo

MATRICULA: 20821116



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Trabalho Apresentado por: Diego Linhares de Azevedo.

Orientador: Péricles Rezende

Campina Grande – Paraíba

Aluno: Diego Linhares de Azevedo

Mat.: 20821116

Trabalho de Conclusão de Curso

Interface para Sintonia de Controladores PID

Julgado em ____ / ____ / ____

Nota: _____

BANCA EXAMINADORA:

Orientador

Convidado

CAMPINA GRANDE – PARAÍBA



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, familiares e amigos por todo o suporte fornecido durante o período da graduação.

Resumo

Este trabalho descreve brevemente os controladores PID, métodos de sintonia para os mesmos e o aplicativo criado para obter os parâmetros de sintonia. Para avaliar estes métodos serão utilizadas simulações de modelos criados no Matlab. A idéia é obter o melhor desempenho possível.

Abstract

This work describes a shortly the PID controllers, procedure for tuning PID controllers and the software created to obtain the parameters of PID tuning. To evaluate those method, Matlab models will be use. The main idea is obtain the best parameters.

Conteúdo

1	Introdução	9
2	Objetivos.....	10
2.1	Objetivos Gerais.....	10
2.2	Objetivos Específicos	10
3	Motivação	10
4	Referência Teórica	11
4.1	Identificação de processos.....	11
4.2	Controladores	12
4.2.1	Controlador Proporcional - P	12
4.2.2	Controlador Proporcional Integral – PI.....	14
4.2.3	Controlador Proporcional Derivativo - PD	16
4.2.4	Controlador Proporcional, Integral e Derivativo - PID.....	17
4.3	Sintonia de Controladores PID.....	20
4.3.1	Método Heurístico de Ziegler e Nichols	22
4.3.2	Método CHR – Chen, Hrones e Reswick	24
4.3.3	Método CC – Método Heurístico de Cohen e Coon	26
4.3.4	Método da Integral do Erro	27
5	Aplicativo	28
6	Conclusão.....	37
7	Referências Bibliográficas.....	38
8	Anexos	39

Índice de tabelas

Tabela 1 - Primeiro método de Ziegler e Nichols para sintonia	22
Tabela 2 - Segundo Método de Ziegler e Nichols	24
Tabela 3 - Sintonia modelo CHR (sem sobre-valor - problema servo).....	24
Tabela 4 - Sintonia modelo CHR (20% de sobre-valor - problema servo)	25
Tabela 5 - Sintonia modelo CHR (20% de sobre-valor - problema regulatório)	25
Tabela 6 - Sintonia segundo o método CC.....	27
Tabela 7 – Constantes obtidas por Lopez para cálculo da sintonia do PID	28
Tabela 8 – Constantes obtidas por Rovira para cálculo da sintonia do PID	28

Índice de Ilustrações

Figura 1 - Processo pré-aeração	11
Figura 4 - Sistema para controlador proporcional.....	12
Figura 5 - Ação Proporcional.....	14
Figura 6 - esquema do controlador PI	15
Figura 7 - Ação proporcional e Integral	15
Figura 8 - Diagrama de blocos do controlador PD.....	16
Figura 9 - Ação Proporcional e Derivativa	17
Figura 10 - PID Clássico	18
Figura 11- Diagrama do PID paralelo alternativo	20
Figura 12 - Diagrama do Algoritmo PID em série	20
Figura 13 - Sistema de Controle em malha fechada.....	21
Figura 14 - Degrau.....	23
Figura 15 - Resposta ao processo	23
Figura 16- Comparação entre as sintonias propostas por CHR e Z&N	26
Figura 17 - Tela do programa de sintonia PID	29
Figura 18 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab.....	30
Figura 19 - resposta ao degrau	31
Figura 20- Tela do aplicativo.....	31
Figura 21 - simulação do controle PID em malha fechada para o primeiro processo.....	32
Figura 22 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab para segundo processo	33
Figura 23 - resposta ao degrau	33
Figura 24 - parâmetros gerados pelo aplicativo	34
Figura 25 - simulação do controle PID em malha fechada para o segundo processo simulado	34
Figura 26 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab para o terceiro processo	35
Figura 27 - resposta ao degrau para sistema de segunda ordem	36
Figura 28 - parâmetros gerados pelo aplicativo para terceira simulação	36
Figura 29 - simulação do controle PID em malha fechada para o terceiro processo	37

1 Introdução

Desde os tempos mais remotos existe a necessidade de controlar processos físicos, a princípio utilizou-se o controle manual, mas este exigia do operador humano um largo conhecimento sobre o sistema e razoável experiência na sua atividade.

Com o aumento da complexidade dos processos industriais, surgiu a necessidade de automatizar ou semi-automatizar uma série de processos, o que é possível se contarmos o desenvolvimento científico e tecnológico existentes nos últimos anos.

Esses processos automáticos são regidos por leis de controles, como por exemplo, o controlador PID. Essas leis estão intrinsecamente ligadas a alguns parâmetros (como: Ganho Proporcional, Tempo Integrativo, Tempo derivativo) e o desempenho dos processos automatizados dependem da escolha correta destes parâmetros.

Existe um grande número de métodos para a sintonia de controladores, os quais requerem informações variadas sobre o processo. Entre os métodos de sintonia dos parâmetros de um controlador tem-se:

- Métodos de Ziegler e Nichols;
- Método de Cohen e Coon;
- Método da Sensibilidade Limite;
- Método do Relé;
- Método da Curva de Reação;
- Método do Lugar das Raízes.

O trabalho foi dividido em seis capítulos, sendo eles:

- Introdução – que apresenta um apanhado geral sobre os assuntos tratados neste trabalho;
- Objetivos – onde estão listados os objetivos do trabalho;
- Alunorte – apresentação sobre a empresa;
- Referência teórica – fornece a fundamentação teórica utilizada para desenvolver o trabalho;
- Aplicativo – fala sobre o software criado e as simulações utilizadas para verificar o funcionamento do mesmo;
- Conclusões – apresenta as conclusões geradas pelo trabalho e os trabalhos propostos;

2 Objetivos

2.1 Objetivos Gerais

Esse trabalho possui por objetivo criar um aplicativo para auxílio na sintonia de controladores PID.

2.2 Objetivos Específicos

O trabalho possui por objetivo utilizar diversos métodos de análise em malha aberta para verificar os parâmetros adequados para um melhor funcionamento do mesmo. Os métodos escolhidos foram:

- Métodos de Ziegler e Nichols;
- Método de Cohen e Coon;
- Método de CHR;
- Método do ITAE;
- Método do IAE;

3 Motivação

Durante o estágio na Alunorte, dentre as atividades realizadas, estava à sintonia de controladores PID. Um dos controladores foi o FIC-82C-001B, responsável pelo controle da quantidade de ácido misturado a água antes do processo de aeração, de forma a controlar o Ph do líquido.

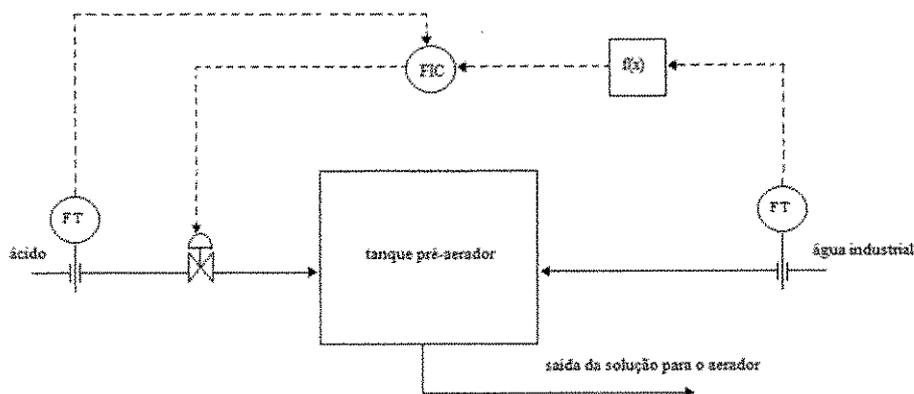


Figura 1 - Processo pré-aeração

A equipe técnica verificou que o Ph da água deve estar o mais próximo possível de 6,8. Assim, o nível de ferro precipitado no aerador torna-se o mais próximo possível do ponto ótimo encontrado na literatura.

A vazão de ácido inserido no processo é controlado por meio do valor da vazão de água industrial inserido no tanque de pré-aeração. Devido ao fato da não utilização de uma ferramenta para cálculo dos parâmetros de sintonia de controladores PID, foram necessárias várias tentativas, empíricas, antes de ser obtido um valor satisfatório. A existência de uma ferramenta que forneça valores iniciais poderia reduzir muito o tempo necessário para ser obtido um valor satisfatório.

4 Referência Teórica

4.1 Identificação de processos

A identificação de sistemas possui por objetivo construir modelos matemáticos de processos dinâmicos oriundos de dados obtidos de maneira experimental. Na maioria desses modelos só é de interesse as relações existentes entre as entradas e as saídas. Não sendo de importante conhecer os processos internos existentes.

A determinação do modelo matemático de um sistema, representando os seus aspectos essenciais de forma adequada, tem diversas utilizações, entre elas estão: diagnóstico, supervisão, otimização e controle.

“O modelo de um sistema é uma equação matemática utilizada para responder a questões sobre o sistema sem a realização de experimentações (através de um modelo pode-se calcular ou decidir como o sistema comporta-se sob determinadas condições operacionais). A utilização do

modelo para simulação do sistema constitui-se um procedimento de baixo custo e seguro para experimentar o sistema.

Entretanto, a validade (adequação) dos resultados de simulação depende completamente da qualidade do modelo matemático do sistema.¹

4.2 Controladores

4.2.1 Controlador Proporcional - P

A estrutura do controlador proporcional é ilustrada abaixo, para um sistema regulatório:

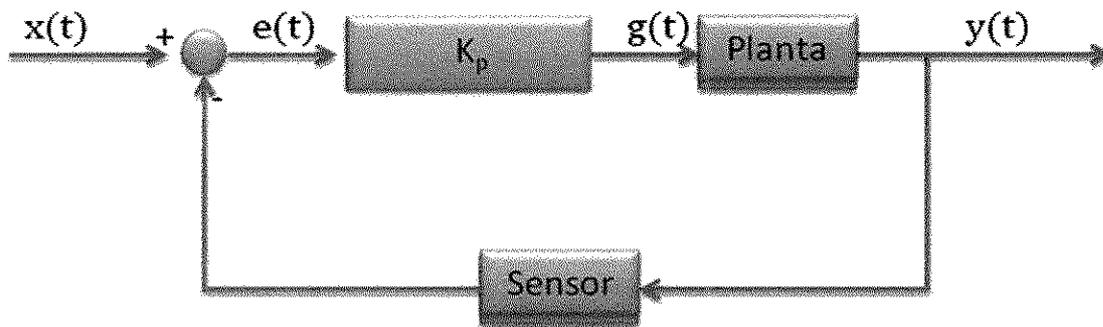


Figura 2 -Sistema para controlador proporcional

Onde:

- $y(t)$ -> saída do sistema;
- $e(t)$ -> erro;
- K_p -> ganho proporcional;
- $x(t)$ -> setpoint;
- $g(t)$ -> saída do controlador;

A equação referente ao modelo ilustrado é apresentada abaixo:

$$g(t) = K_p \cdot e(t) + g(0) \quad (1)$$

¹ Material retirado de <ftp://ftp.ppgeec.ufrn.br/Mestrado/M163.pdf> página 14, acessado em 03/03/2009

Sendo $g(0)$ o valor inicial da saída do controlador.

Considerando que trabalha-se com um sistema digital, pode-se utilizar o "algoritmo de velocidade", que calcula a variação de saída em função da variação do erro:

$$\Delta g(t) = K_p \cdot \Delta e(t) \quad (2)$$

Onde:

$$g(t) = K_p \cdot e(t) + g(0) \quad (3)$$

$$g(t-1) = K_p \cdot e(t-1) + g(0) \quad (4)$$

Onde II=III-IV.

Um outro ponto que deve ser observado é o tipo ação do controlador, esta pode ser:

- Direta: Quando a variável controlada é diretamente proporcional ao sinal de controle;
- Reversa: Quando a variável controlada é reversamente proporcional ao sinal de controle.

Com base nessa noção de ação, pode-se atuar no erro:

$$e(t) = e(t) \cdot ação \quad (5)$$

Onde:

- ação = 1, ação direta;
- ação = -1, ação inversa.

Pode-se concluir assim que o controlador proporcional consiste essencialmente de um amplificador com ganho ajustável. Uma característica importante é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorre uma alteração de carga, e o sistema que se pretende controlar seja do tipo 0.

A seguir tem-se o gráfico da resposta do controlador proporcional quando ocorre erro em degrau.

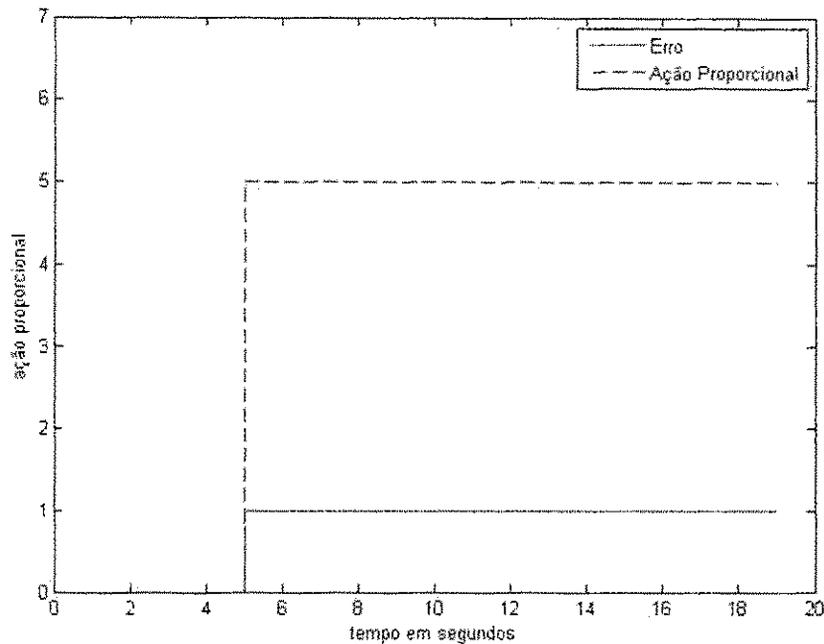


Figura 3 - Ação Proporcional

O erro estacionário que é dependente de K_p e da carga, pode ser minimizado por um aumento de K_p . No entanto deve-se notar que o aumento deste parâmetro conduz a um aumento do tempo de estabelecimento e eventualmente até à instabilidade.

Conclui-se assim que este tipo de controlador só pode ser usado, quando o ganho proporcional é suficientemente elevado para reduzir o erro estacionário a um nível aceitável ou quando não são freqüentes as alterações sofridas na carga.

4.2.2 Controlador Proporcional Integral - PI

A equação abaixo representa a ação do Controlador Proporcional Integral:

$$g(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + g(0) \quad (6)$$

Percebe-se que a saída, $g(t)$, possui influência de dois termos:

- O termo proporcional ao erro;
- O termo proporcional a integral do erro;

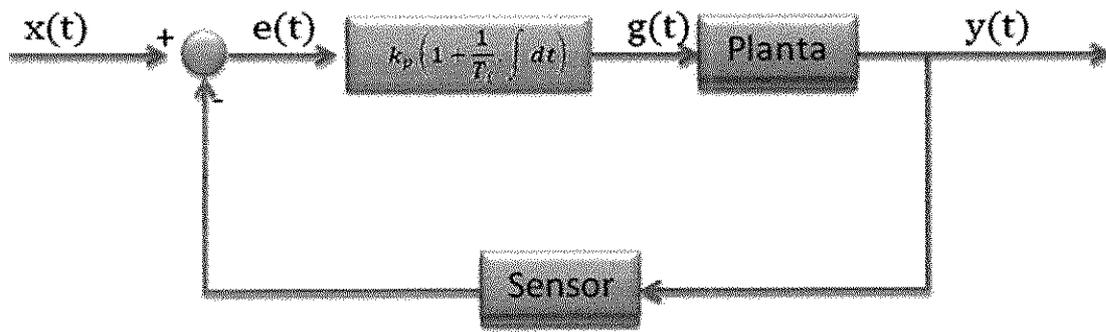


Figura 4 - esquema do controlador PI

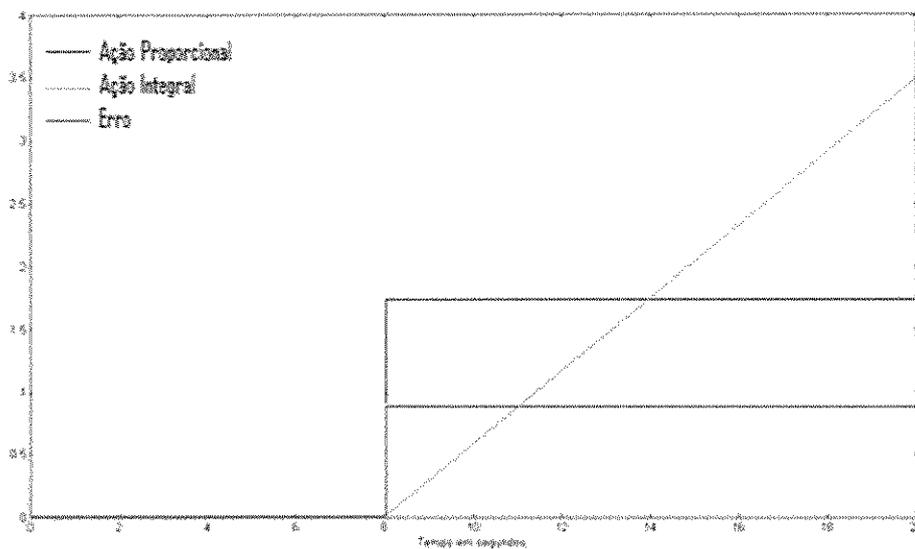


Figura 5 - Ação proporcional e Integral

Ao analisar a figura acima, vê-se o comportamento da ação proporcional e integral, dado um erro em degrau. O tempo integral (T_i) é o tempo necessário para que a contribuição da ação integral seja igual a da ação proporcional.

Assim, para um erro na saída, teremos uma atuação de K_p vezes o erro devido a componente proporcional e a cada T_i segundos têm-se o acréscimo de K_p vezes o erro, oriunda da ação integral.

Essa característica da ação integral pode gerar saturação na saída do controlador. Para evitar a saturação em sistemas digitais, faz-se uso do "algoritmo de velocidade". O uso deste algoritmo no controlador paralelo clássico, têm-se a seguinte equação:

$$\Delta g(t) = k_p \cdot \Delta e(t) + K_p \cdot e(t) \cdot \frac{1}{T_i} \cdot T_a \quad (7)$$

Onde T_a é o período de amostragem do controlador.

Para o algoritmo no controlador PI paralelo alternativo, têm-se:

$$\Delta g(t) = k_p \cdot \Delta e(t) + e(t) \cdot \frac{1}{T_i} \cdot T_a \quad (8)$$

Deve-se lembrar que para utilizar o PI, o sistema deve possuir alterações de carga lentas, de forma a evitar oscilações devido à ação integral.

4.2.3 Controlador Proporcional Derivativo - PD

Com a utilização deste tipo de controlador, o sinal de controle " $g(t)$ " possui influência de dois termos:

- A componente proporcional a derivada do erro;
- A componente proporcional ao erro.

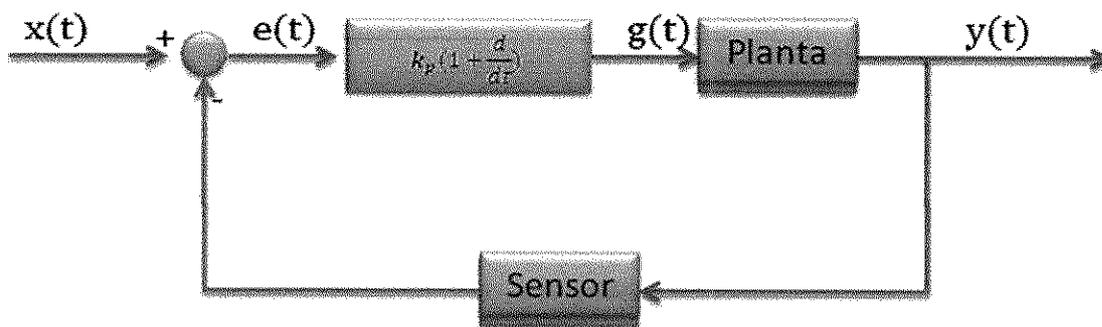


Figura 6 - Diagrama de blocos do controlador PD

A equação referente ao controlador PD é expresso a seguir:

$$g(t) = k_p \cdot e(t) + k_p T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + g(0) \quad (9)$$

Onde T_d , Tempo derivativo, antecipa a ação proporcional em T_d segundos depois.

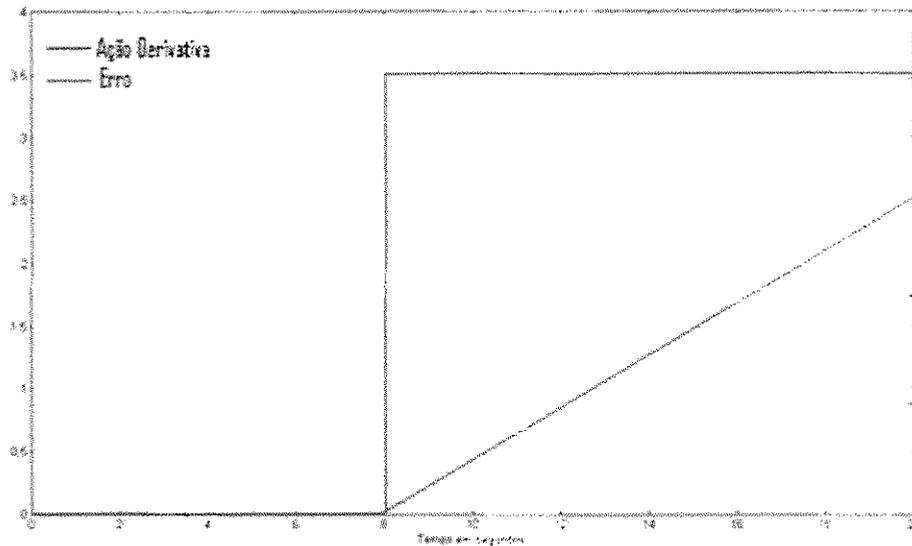


Figura 7 - Ação Proporcional e Derivativa

O acréscimo da componente derivativa à componente proporcional resulta em um controlador muito sensível, sendo eficiente para corrigir o erro em regime transitório. Este controlador aumenta o amortecimento do sistema, mas apresenta problemas com ruídos em altas frequências.

4.2.4 Controlador Proporcional, Integral e Derivativo - PID

No controlador PID, o sinal de controle "g(t)", possui influência da :

- Ação proporcional ao erro;
- Ação proporcional a integral do erro;
- Ação proporcional a derivada do erro;

O algoritmo de posição PID clássico é dado pela seguinte equação:

$$g(t) = k_p \cdot e(t) + k_p \cdot \left[\frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt + \frac{de(t)}{dt} \cdot T_d \right] + g(0) \quad (10)$$

$$g(t) = k_p \cdot e(t) + k_i \cdot \int e(t) dt + k_i \cdot \frac{de(t)}{dt} + g(0) \quad (11)$$

Resultando na seguinte função de transferência:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left[1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + s \cdot T_d \right] \quad (12)$$

O diagrama de blocos para o PID clássico é ilustrado a seguir:

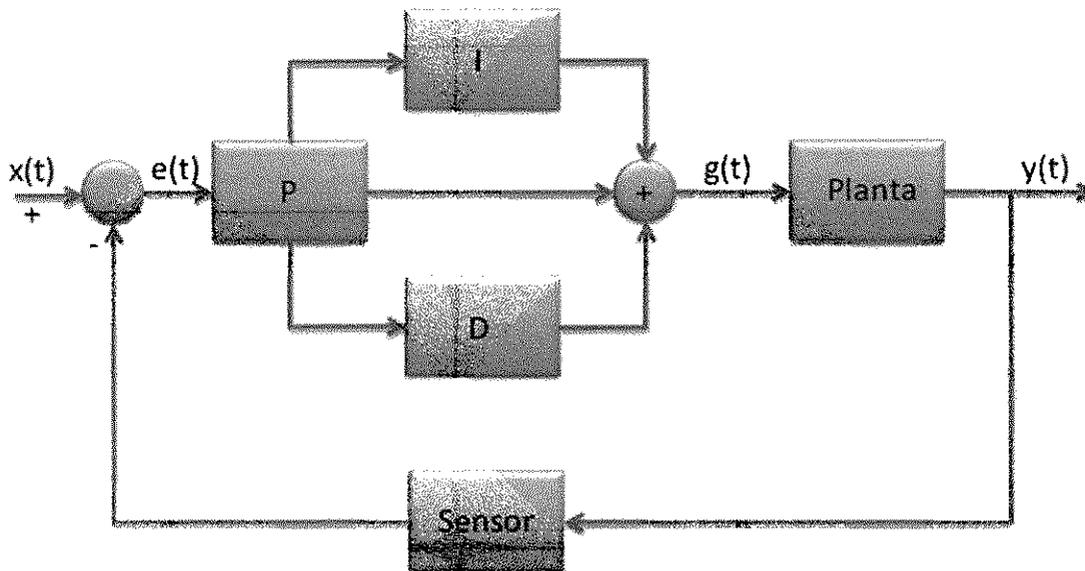


Figura 8 - PID Clássico

Onde:

- $P = K_p$;
- $I = K_i / s = K_p \cdot (1/T_i) \cdot (1/s)$;
- $D = K_d \cdot s = K_p \cdot T_d \cdot s$;

Uma vez que a função de transferência possui Numerador de ordem maior que a do Denominador, não pode ser implementado em sistemas analógicos. Para implementar fisicamente este sistema, devemos implementar um filtro na ação derivativa "D".

$$D \cong \frac{s.T_d}{(1 + \alpha.s.T_d)} \quad (13)$$

Desta forma a Erro! Fonte de referência não encontrada. torna-se:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{E(s)} = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i.s} + \frac{s.T_d}{(1 + \alpha.s.T_d)} \right] \quad (14)$$

O valor de "α" deve ser mantido muito baixo, com o intuito de tornar o numerador predominante sobre o denominador.

De forma análoga, pode-se implementar o algoritmo PID paralelo alternativo, através da expressão.

$$g(t) = K_p.e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + g(0) \quad (15)$$

Aplicando Laplace,

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{E(s)} = \left[K_p + \frac{1}{T_i.s} + s.T_d \right] \quad (16)$$

O diagrama de blocos do PID paralelo é ilustrado a seguir:

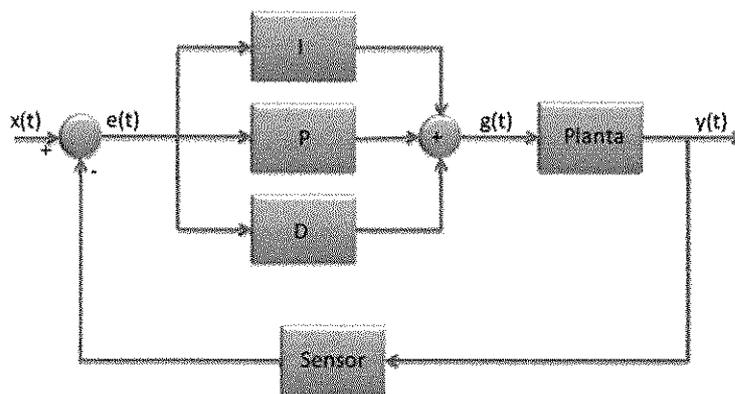


Figura 9- Diagrama do PID paralelo alternativo

Devido a dificuldade de implementar fisicamente o sistema acima, alguns fabricantes utilizam o algoritmo de PID em série, que é dado a seguir:

$$G_c(s) = \frac{G(s)}{E(s)} = \left[K_p + \frac{1}{T_i \cdot s} \right] + \left[\frac{1 + s \cdot T_d}{1 + \alpha \cdot s \cdot T_d} \right] \quad (17)$$

O diagrama ilustrativo é apresentado a seguir.

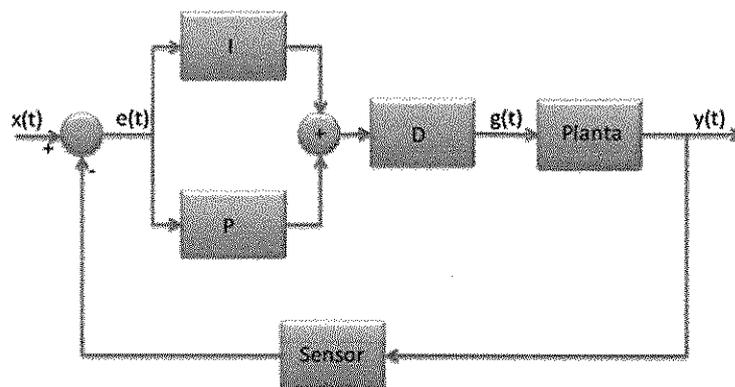


Figura 10 - Diagrama do Algoritmo PID em série

4.3 Sintonia de Controladores PID

O principal objetivo para ajuste de uma malha de controle é obter a estabilidade, desta forma, a sintonia deve ser realizada de forma que todos os pólos da função de transferência em malha fechada tenham seus pólos com valor real e negativo. A figura a seguir ilustra o diagrama de blocos de um sistema em malha fechada.

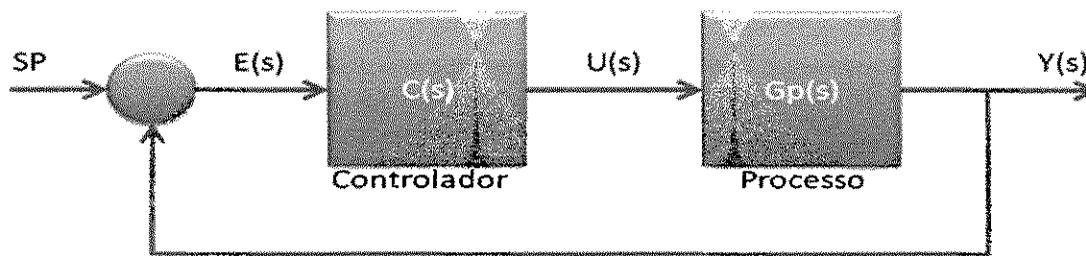


Figura 11 - Sistema de Controle em malha fechada

Efetuada uma análise do diagrama de blocos do Sistema de Controle em malha fechada acima, pode-se obter a função de transferência. Considerando que $E(s)$ (Erro) é a entrada do controlador, a saída do mesmo pode ser calculada como sendo:

$$U(s) = C(s).E(s) \quad (18)$$

A saída do processo será:

$$Y(s) = Gp(s).U(s) \quad (19)$$

Substituindo a Equação 18 na Equação 19, têm-se:

$$Y(s) = Gp(s).C(s).E(s) \quad (20)$$

Uma vez que $E(s) = SP(s) - Y(s)$:

$$Y(s) = Gp(s).C(s).[SP(s) - Y(s)] \quad (21)$$

$$Y(s)[1 + Gp(s).C(s)] = Gp(s).C(s).SP(s) \quad (22)$$

$$\frac{Y(s)}{SP(s)} = \frac{Gp(s).C(s)}{1 + Gp(s).C(s)} \quad (23)$$

Para ser estável, esse processo necessita que os pólos da função de transferência expressa na equação (23) sejam reais e negativos. Ou seja, os pólos da função de transferência de $Gp(s)$ e de $C(s)$. $C(s)$ é dado por:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (24)$$

4.3.1 Método Heurístico de Ziegler e Nichols

Ziegler e Nichols (1942) propuseram dois métodos clássicos para a sintonia de controladores PID (significando o ajuste dos valores de K_p , T_i e T_d) baseado na resposta experimental a uma excitação ou no valor de K_p que resulta em estabilidade marginal quando se utiliza unicamente a ação de controle proporcional.

As regras de Ziegler-Nichols são muito convenientes nos casos em que não se conhece o modelo matemático do processo. Com base nas características da resposta transitória de um determinado processo a controlar, Ziegler-Nichols propuseram regras para se determinar os valores do ganho proporcional K_p , constante de tempo integral T_i e a constante de tempo derivativo T_d . Há dois métodos de sintonia de Ziegler-Nichols. O objetivo pretendido ao utilizar qualquer um dos métodos é obter um sobre-sinal máximo de 25% na resposta a uma excitação em degrau.

4.3.1.1 Primeiro Método de Ziegler e Nichols

O primeiro Ziegler e Nichols consiste de reduzir os efeitos da ação integral e da ação derivativa ao máximo possível, e incrementar os valores do ganho proporcional até que a resposta obtida seja oscilatória e com amplitude constante.

Fazendo uso dos valores obtidos para K_c^2 e P_u^3 , pode-se utilizar a seguinte tabela para calcular os parâmetros de sintonia.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5 K_u$	-	-
PI	$0.45 K_u$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.6 K_u$	$P_u/2$	$P_u/8$

Tabela 1 - Primeiro método de Ziegler e Nichols para sintonia

² K_c – Ganho Crítico, ganho máximo proporcional antes do sistema torna-se instável.

³ P_u – Período de oscilação

O problema deste método é que ele pode levar o sistema a trabalhar fora de uma região segura, por isto deve-se ter cuidado ao fazer uso deste na indústria.

4.3.1.2 Segundo Método de Ziegler e Nichols

Neste método se obtém experimentalmente a resposta do processo a um degrau unitário. Se o processo a ser controlado não possuir pólos dominantes complexos e conjugados, a curva da resposta ao degrau possui uma forma semelhante a um S, como mostrado na próxima figura. Quando o processo a controlar não envolver integradores nem pólos dominantes complexos-conjugados, a curva da resposta ao degrau unitário pode se assemelhar a forma de um S, como é mostrado na próxima figura. (Se a resposta não apresentar esta curva em forma de S, o método não se aplica). Tais curvas de resposta ao degrau unitário podem ser geradas experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica do processo a controlar.

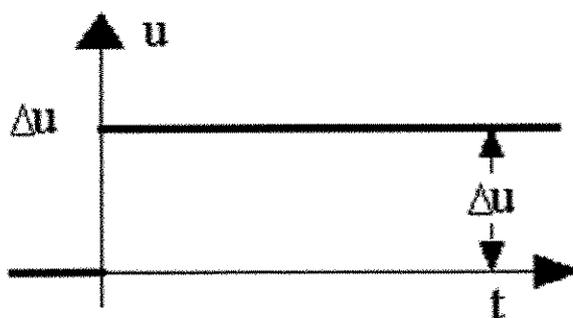


Figura 12 - Degrau

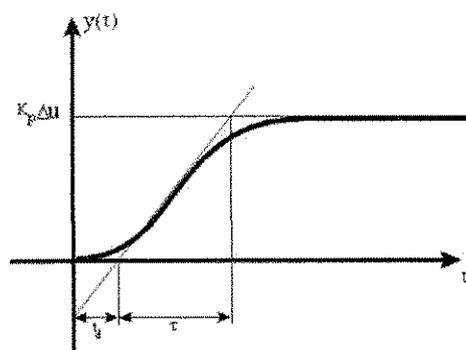


Figura 13 - Resposta ao processo

A curva em forma de S pode ser caracterizada por duas constantes, o tempo de retardo t_d e as constantes de tempo τ . O tempo de retardo e as constantes de tempo são determinados

traçando-se uma reta tangente à curva em forma de S no ponto de inflexão e determinando-se as interseções com o eixo dos tempos. Assim Ziegler e Nichols sugerem sintonizar os controladores conforme a próxima tabela.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$\tau/(K \cdot \square)$	-	-
PI	$0,9 \cdot \tau/(K \cdot \square)$	$3,33 \cdot \square$	-
PID	$1,2 \cdot \tau/(K \cdot \square)$	$2 \cdot \square$	$0,5 \cdot \square$

Tabela 2 - Segundo Método de Ziegler e Nichols

Algumas considerações importantes são:

- O ganho proporcional do controlador é inversamente proporcional ganho do processo, e a razão de incontrolabilidade do processo(\square/τ);
- Quanto mais lento o processo, maior o tempo integral;
- O tempo derivativo do controlador possui relação com a dinâmica do processo, quanto mais lento o processo maior será o tempo derivativo;

4.3.2 Método CHR – Chen, Hrones e Reswick

O método CHR foi idealizado por Chen, Hrones e Reswick em 1952 e consiste de uma variação do método de Ziegler e Nichols com o intuito de atender os seguintes critérios de desempenho:

- A resposta mais rápida possível sem sobre-valor;
- A resposta mais rápida possível com 20% de sobre-valor;

O método CHR é válido para processos regulatórios e servos, a próxima tabela possui valores de sintonia propostos para um controlador PID clássico utilizando como critério de desempenho a resposta mais rápida possível sem sobre-valor, em problemas de controle servo.

Controlador	Kp	Ti	Td
P	$0,3 \cdot \tau/(K \cdot \square)$	-	-
PI	$0,35 \cdot \tau/(K \cdot \square)$	$1,16 \cdot \tau$	-
PID	$0,6 \cdot \tau/(K \cdot \square)$	τ	$\square/2$

Tabela 3 - Sintonia modelo CHR (sem sobre-valor - problema servo)

Para o critério de desempenho que considera a resposta mais rápida possível com vinte por cento de sobre-valor em problemas de controle servos, utiliza-se a seguinte tabela:

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,7 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	-	-
PI	$0,6 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	τ	-
PID	$0,95 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	$1,357 \cdot \tau$	$0,473 \cdot \square$

Tabela 4 - Sintonia modelo CHR (20% de sobre-valor - problema servo)

Em problemas de controle regulatórios utiliza-se a seguinte tabela quando se deseja a resposta mais rápida possível sem sobre-valor.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,3 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	-	-
PI	$0,6 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	$4 \cdot \square$	-
PID	$0,95 \cdot \tau / (K \cdot \square)$	$2,375 \cdot \square$	$0,421 \cdot \square$

Tabela 5 - Sintonia modelo CHR (20% de sobre-valor - problema regulatório)

Chien, Hrones e Reswick fizeram uma análise para as sintonias propostas pelo método CHR para um Controlador Proporcional com o método de Ziegler e Nichols para perturbação na carga e traçaram a curva do ganho proporcional do controlador (K_p) multiplicado pelo ganho do processo (K) em função do inverso do fator de incontrolabilidade⁴ para diversas sintonias. O resultado é ilustrado no próximo gráfico.

Pode-se observar no gráfico que ao escolher o modelo mais rápido sem sobre-valor, obtêm-se o menor ganho proporcional para o controlador o que gera uma menor oscilação, tornando o sistema mais robusto, isto é, mais distante da instabilidade.

⁴ Fator de incontrolabilidade – razão entre o tempo morto(\square) e a constante de tempo do processo(τ).

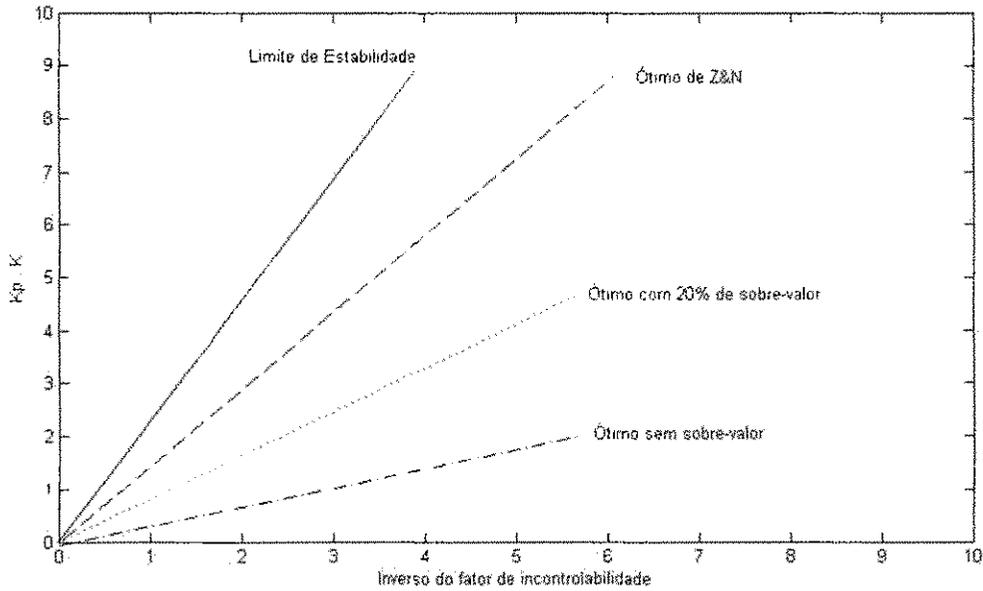


Figura 14- Comparação entre as sintonias propostas por CHR e Z&N

4.3.3 Método CC – Método Heurístico de Cohen e Coon

Em 1953, Cohen e Coon, desenvolveu um método de sintonia PID para processos com tempo morto muito elevado. Isto é, como fator de incontrolabilidade maior que 0,3. O método foi baseado no PID paralelo clássico:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (25)$$

Cohen e Coon disseram que a dinâmica do processo pode ser aproximada por um modelo de primeira ordem em série com um tempo morto.

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (26)$$

Cohen e Coon verificaram que o seu método apresenta um desempenho razoável para fator de incontrolabilidade presente na faixa de 0,6 a 4,5.

Controlador	Kp	Ti	Td
-------------	----	----	----

P	$\left(1,03 + 0,35 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \left(\frac{\tau}{K \cdot \theta}\right)$	-	-
PI	$\left(0,9 + 0,083 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \left(\frac{\tau}{K \cdot \theta}\right)$	$\frac{\left(0,9 + 0,083 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(1,27 + 0,6 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} \cdot \theta$	-
PID	$\left(1,35 + 0,25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right) \cdot \left(\frac{\tau}{K \cdot \theta}\right)$	$\frac{\left(1,35 + 0,25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}{\left(0,54 + 0,23 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)} \cdot \theta$	$\frac{0,5 \cdot \theta}{\left(1,35 + 0,25 \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)\right)}$

Tabela 6 - Sintonia segundo o método CC

4.3.4 Método da Integral do Erro

“Este método foi proposto no trabalho de [Lopez ET AL. 1967] para perturbações na carga (problema regulatório) e posteriormente no de [Rovira ET AL. 1969] para degrau no “setpoint”. Este método sugere utilizar como critério de desempenho a integral de uma função do erro dentro de uma janela de tempo, suficiente para eliminar o erro em regime permanente. A vantagem deste critério é considerar toda a curva de resposta do sistema, ao invés de apenas dois pontos, como na razão de declínio de ¼.”⁵

Como critério de desempenho foram escolhidos dois parâmetros:

- IAE - Integral do valor absoluto do erro entre a variável e o Setpoint em um horizonte de análises;
- ITAE - Integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro entre a variável e o SP em um horizonte de análise;

Lopez identificou as seguintes equações de sintonia, fazendo uso de métodos de regressão:

$$K_p = \frac{1}{K} \left(A \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^B \right) \quad (27)$$

$$T_i = \frac{\tau}{\left(C \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^D \right)} \quad (28)$$

$$T_D = \tau \cdot \left(E \cdot \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^F \right) \quad (29)$$

Para os critérios do IAE e ITAE existem as seguintes constantes:

⁵ Campos, Mario Cesar M Massa de. Teixeira, Herbert C. G. Controles Típicos de equipamentos e processos industriais – São Paulo: Edgard Blücher, 2006. p.56.

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.984	-0.986	0.608	-0.707	-	-
PI	ITAE	0.859	-0.977	0.674	-0.680	-	-
PID	IAE	1.435	-0.921	0.878	-0.749	0.482	1.137
PID	ITAE	1.375	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995

Tabela 7 – Constantes obtidas por Lopez para cálculo da sintonia do PID

Rovira, assim como Lopez também resolveu os problemas com otimização numérica e efetuou regressões para obter as próximas equações de sintonia.

$$K_P = \frac{1}{K} \left(A' \cdot \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{B'} \right) \quad (30)$$

$$T_i = \frac{\tau}{\left(C' + D' \cdot \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right)} \quad (31)$$

$$T_D = \tau \cdot \left(E' \cdot \left(\frac{\theta}{\tau} \right)^{F'} \right) \quad (32)$$

Para os critérios do IAE e ITAE existem as seguintes constantes:

Controlador	Critério	A	B	C	D	E	F
PI	IAE	0.758	-0.861	1.020	-0.323	-	-
PI	ITAE	0.586	-0.916	1.030	-0.165	-	-
PID	IAE	1.086	-0.869	0.740	-0.130	0.348	0.914
PID	ITAE	0.965	-0.850	0.796	-0.147	0.308	0.929

Tabela 8 – Constantes obtidas por Rovira para cálculo da sintonia do PID

5 Aplicativo

Durante o período de estágio na Alunorte – Alumina do Norte do Brasil S.A verificou-se a necessidade de ferramentas de auxílio na sintonia de controladores PID industriais. Para suprir esta necessidade foi criado um software que fornecesse os parâmetros iniciais para a sintonia.

Para implementar tal ferramenta fez-se uso da linguagem de programação C++ e do Matlab. No Matlab foi implementado uma rotina para aproximar os processos para modelos de primeira ordem com atraso. A interface visual que irá ser utilizado pelo usuário foi desenvolvida utilizando o Visual Studio C++ 2008.

A interface criada possui sete telas, sendo as seis primeiras utilizadas para ilustrar os resultados dos métodos e a última com um pequeno resumo teórico sobre os métodos utilizados no trabalho, as telas estão presente no Anexo A.

Um dos problemas identificados durante a elaboração do projeto foi não poder ler os dados em tempo real, uma vez que a política de segurança da Alunorte não permite instalar aplicativos não padronizados nas estações de trabalho, optou-se assim por utilizar a aquisição de dados por intermédio da escrita e leitura em arquivos texto.

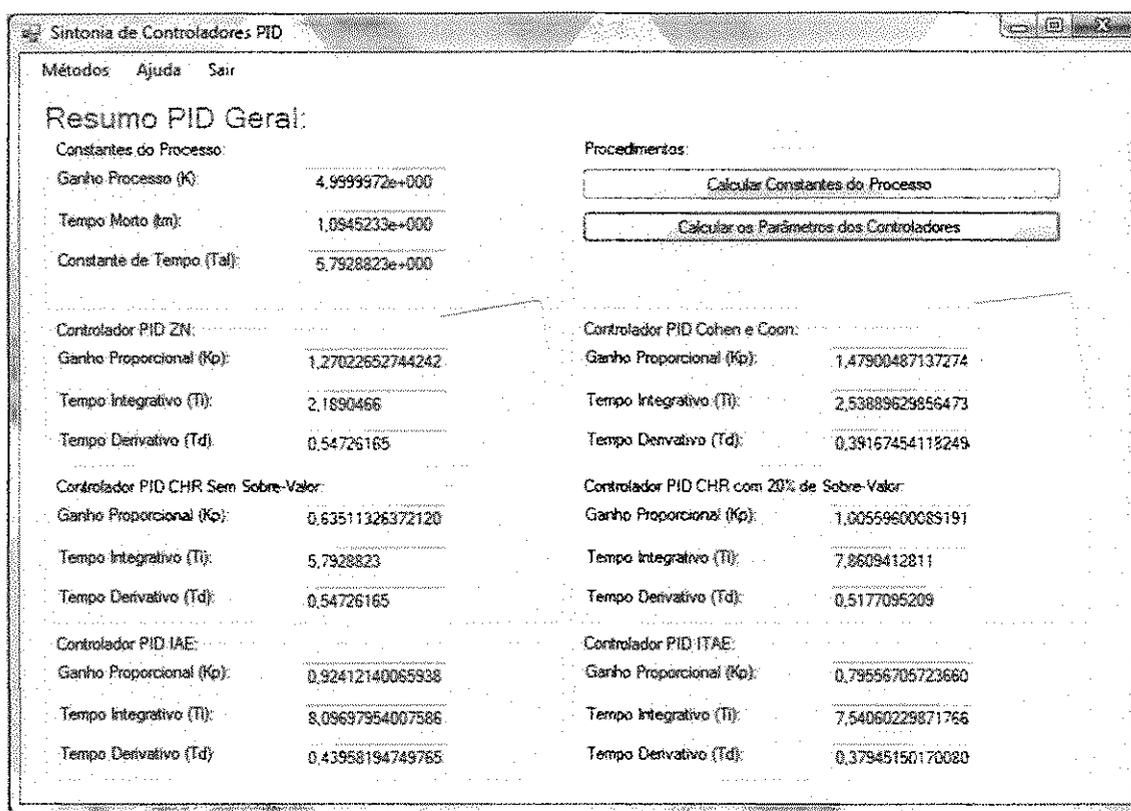


Figura 15 - Tela do programa de sintonia PID

Para verificar o funcionamento adequado do aplicativo, foram realizadas simulações com modelos de primeira e segunda ordem criados no Matlab.

O primeiro processo é um sistema de primeira ordem com a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{0.5}{(5s + 1)} e^{-1s}$$

(33)

Este processo possui como característica os seguintes dados:

- Constante de tempo: 5 s;
- Tempo Morto: 1 s;
- Ganho: 0.5;
- Degrau de entrada com variação de 2;

O seguinte diagrama foi utilizado no Matlab para gerar os dados da simulação:

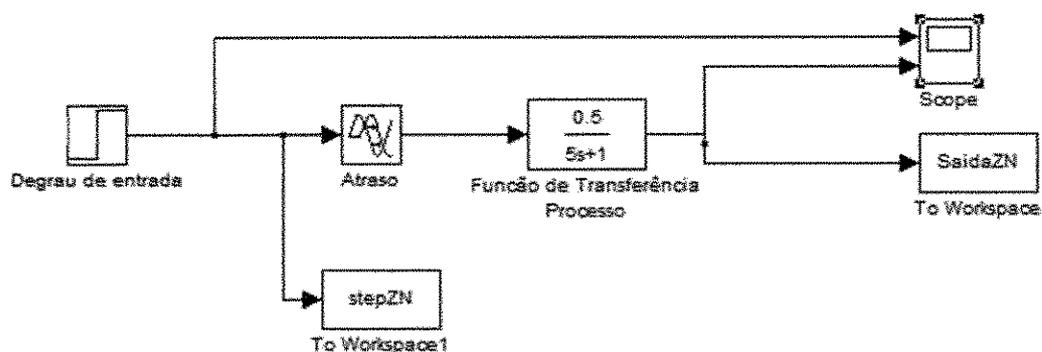


Figura 16 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab

O sistema teve a seguinte resposta ao degrau.

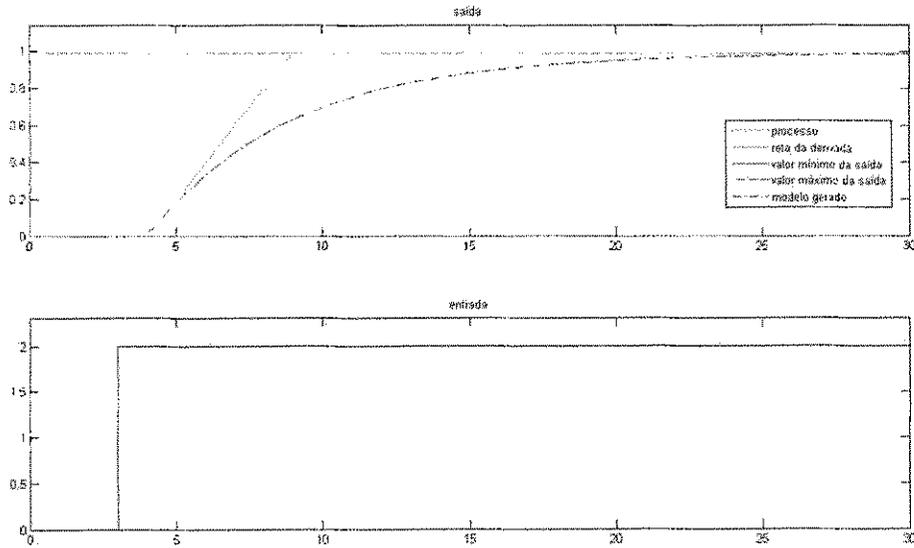


Figura 17 - resposta ao degrau

O aplicativo gerou os seguintes parâmetros para sintonia de controladores PID:

Sintonia de Controladores PID

Métodos Sair Ajuda Rodar Identificação do processo

Resumo PID Geral:

Constantes do Processo:		Procedimentos:	
Ganho Processo (K):	4,9999908e-001	<input type="button" value="Calcular Constantes do Processo"/>	
Tempo Morto (tm):	9,9998306e-001	<input type="button" value="Calcular os Parâmetros dos Controladores"/>	
Constante de Tempo (Tall):	4,9998824e+000		
Controlador PID ZN:		Controlador PID Cohen e Coon:	
Ganho Proporcional (Kp):	11,9999431185577	Ganho Proporcional (Kp):	13,9999369283751
Tempo Integrativo (Ti):	1,99996612	Tempo Integrativo (Ti):	2,31015077509722
Tempo Derivativo (Td):	0,49999153	Tempo Derivativo (Td):	0,35713672321375
Controlador PID CHR Sem Sobre-Valor:		Controlador PID CHR com 20% de Sobre-Valor:	
Ganho Proporcional (Kp):	5,99997155927887	Ganho Proporcional (Kp):	9,49995496885821
Tempo Integrativo (Ti):	4,9996824	Tempo Integrativo (Ti):	6,7848404168
Tempo Derivativo (Td):	0,49999153	Tempo Derivativo (Td):	0,47299198738
Controlador PID IAE:		Controlador PID ITAE:	
Ganho Proporcional (Kp):	8,7955513903754	Ganho Proporcional (Kp):	7,58019169237924
Tempo Integrativo (Ti):	7,0026380924923	Tempo Integrativo (Ti):	6,52216452876795
Tempo Derivativo (Td):	0,39965298545134	Tempo Derivativo (Td):	0,34527885064870

Figura 18- Tela do aplicativo

No próximo gráfico temos o resultado da simulação dos controladores para uma entrada em degrau em malha fechada.

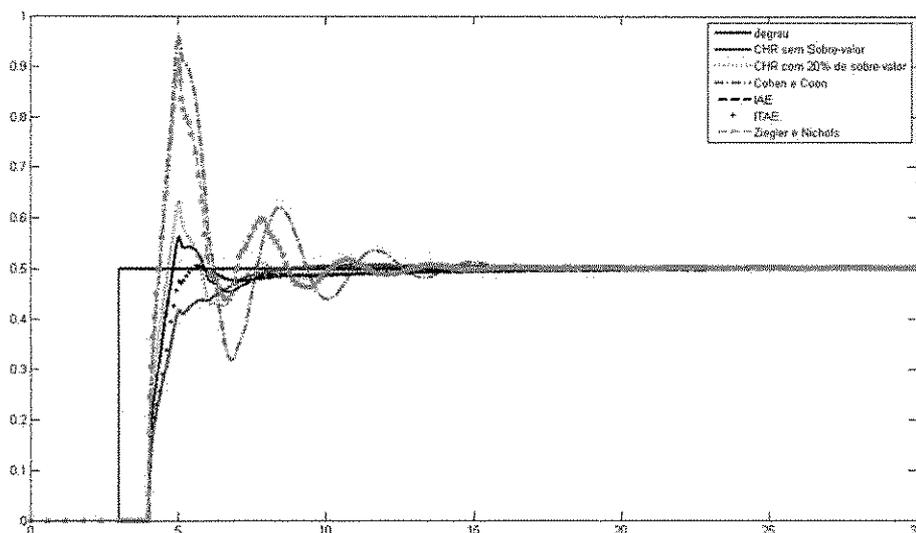


Figura 19 - simulação do controle PID em malha fechada para o primeiro processo

Como pode ser observado no gráfico acima o método que apresentou a melhor resposta foi o CHR sem sobre-valor. O pior desempenho ocorreu com o uso do método heurístico de Cohen e Coon.

O segundo processo é um sistema de primeira ordem com a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{0.5}{(5s + 1)} e^{-10s} \quad (34)$$

Este processo possui como característica os seguintes dados:

- Constante de tempo: 5 s;
- Tempo Morto: 10 s;
- Ganho: 0.5;
- Degrau de entrada com variação de 2;

Ou seja, o processo simulado possui um tempo morto duas vezes maior que a constante de tempo do processo.

O seguinte diagrama foi utilizado no Matlab para gerar os dados da simulação:

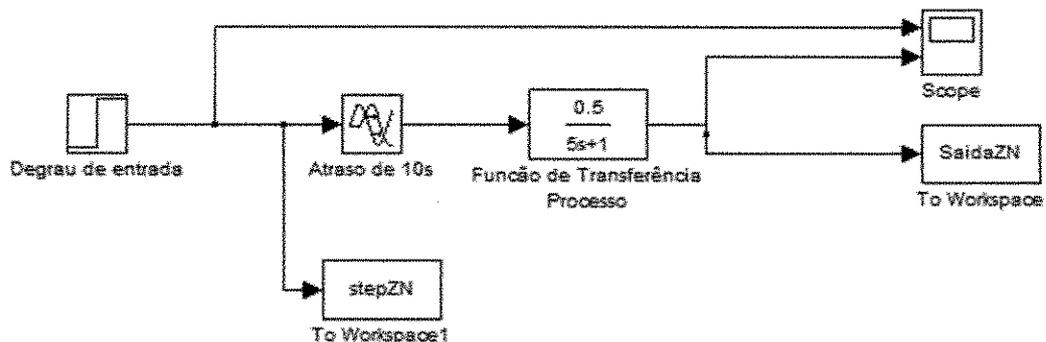


Figura 20 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab para segundo processo

O sistema teve a seguinte resposta ao degrau.

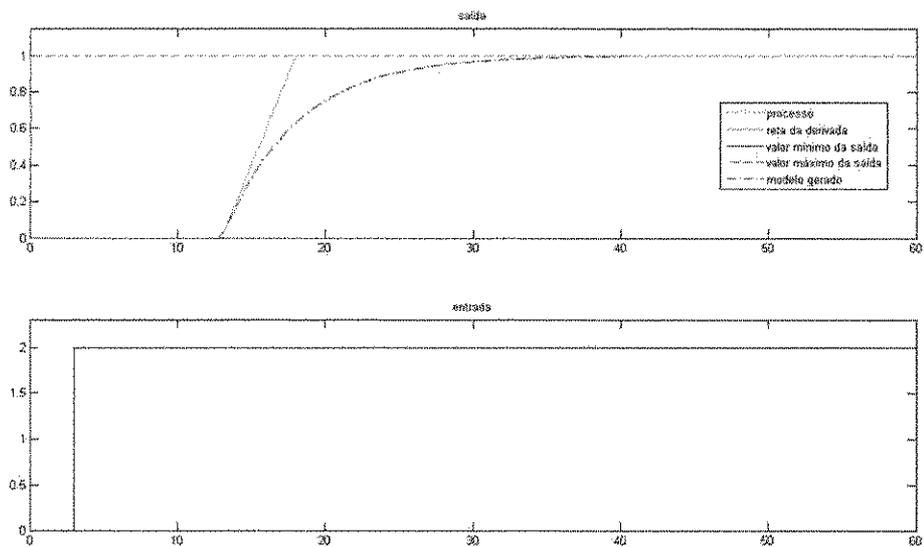


Figura 21 - resposta ao degrau

O aplicativo gerou os seguintes parâmetros para sintonia de controladores PID:

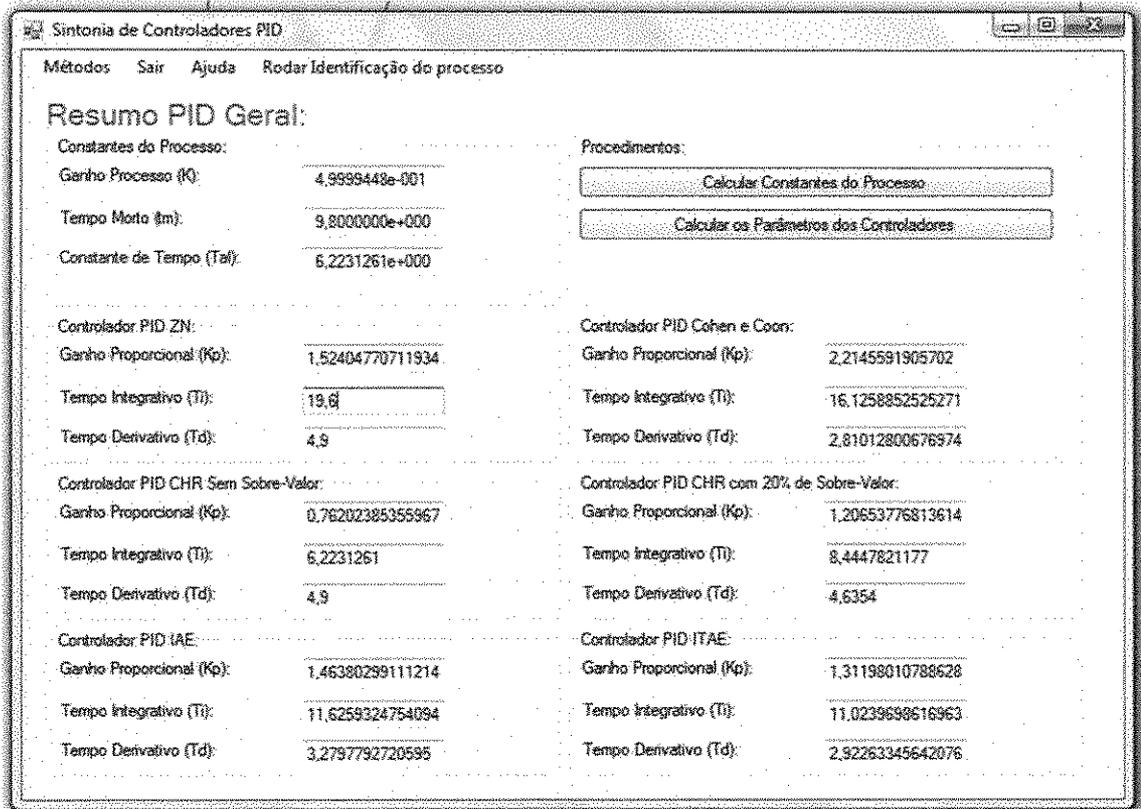


Figura 22 - parâmetros gerados pelo aplicativo

No próximo gráfico temos o resultado da simulação dos controladores para uma entrada em degrau em malha fechada.

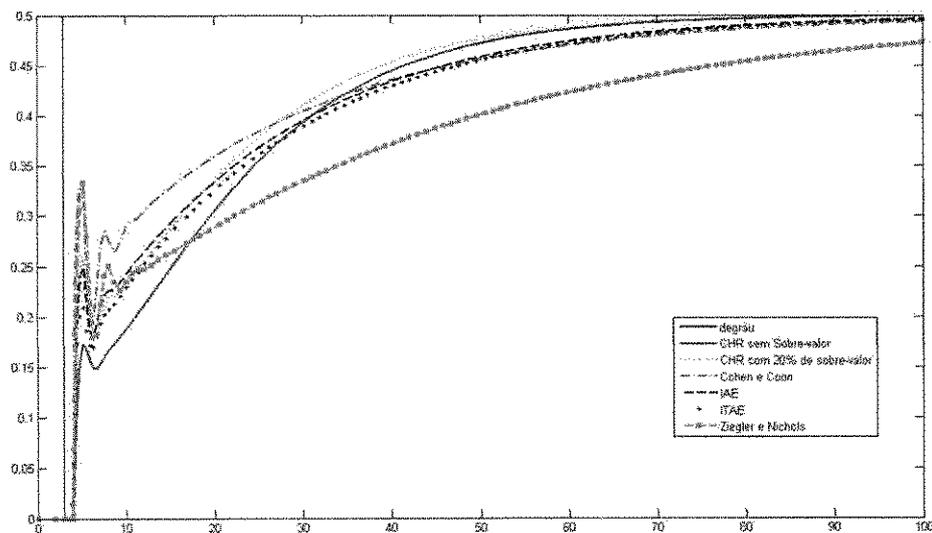


Figura 23 - simulação do controle PID em malha fechada para o segundo processo simulado

Como pode ser observado no gráfico acima o método que apresentou a melhor resposta foi o CHR com 20% de sobre-valor. O pior desempenho ocorreu com o uso do método de Ziegler e Nichols. Observou-se que quanto maior fica o tempo morto do sistema, mais difícil de controlar é o mesmo.

O terceiro processo é um sistema de segunda ordem com a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{s + 0.5}{(5s^2 + 5s + 2)} e^{-2s} \quad (35)$$

O processo aproximado de primeira ordem possui as seguintes características:

- Constante de tempo: 1.2493 s;
- Tempo Morto: 2 s;
- Ganho: 0.2498;
- Degrau de entrada com variação de 2;

O seguinte diagrama foi utilizado no Matlab para gerar os dados da simulação:

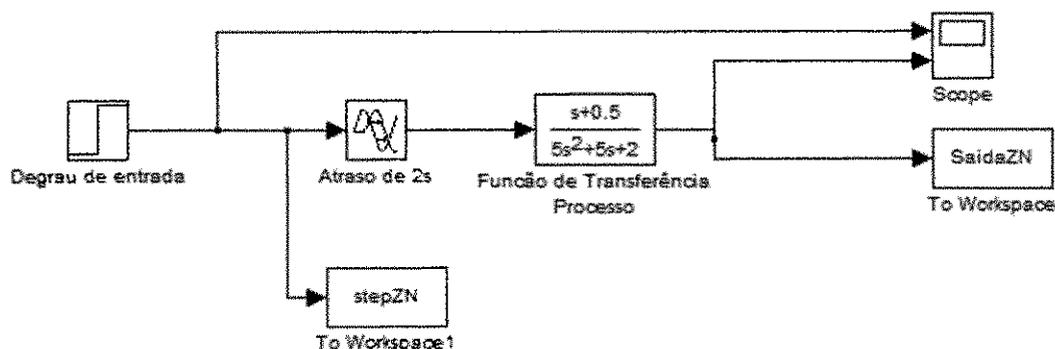


Figura 24 - Diagrama de blocos da simulação no Matlab para o terceiro processo

O sistema teve a seguinte resposta ao degrau.

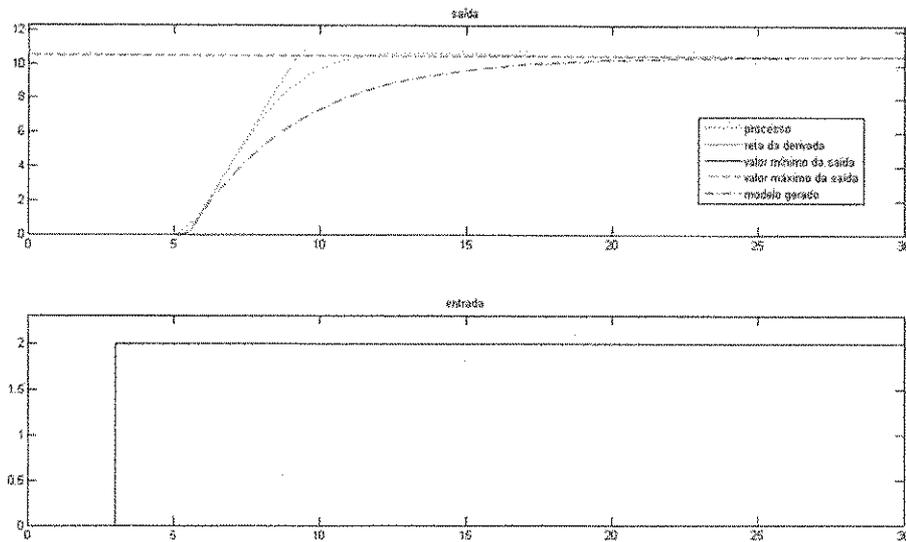


Figura 25 - resposta ao degrau para sistema de segunda ordem

O aplicativo gerou os seguintes parâmetros para sintonia de controladores PID:

Sintonia de Controladores: PID

Métodos Sair Ajuda Rodar Identificação do processo

Resumo PID Geral:

Constantes do Processo:		Procedimentos:	
Ganho Processo (K):	2,4982810e-001	<input type="button" value="Calcular Constantes do Processo"/>	
Tempo Morto (m):	1,9999829e+000	<input type="button" value="Calcular os Parâmetros dos Controladores"/>	
Constante de Tempo (Ta):	1,2495296e+000		
<hr/>			
Controlador PID ZN:		Controlador PID Cohen e Coon:	
Ganho Proporcional (Kp):	3,00096014075841	Ganho Proporcional (Kp):	4,37676823147341
Tempo Integrativo (Ti):	3,9999658	Tempo Integrativo (Ti):	3,27680511357399
Tempo Derivativo (Td):	0,99999145	Tempo Derivativo (Td):	0,57137563681699
<hr/>			
Controlador PID CHR Sem Sobre-Valor:		Controlador PID CHR com 20% de Sobre-Valor:	
Ganho Proporcional (Kp):	1,5004800703797	Ganho Proporcional (Kp):	2,37578011143453
Tempo Integrativo (Ti):	1,2495296	Tempo Integrativo (Ti):	1,6956116672
Tempo Derivativo (Td):	0,99999145	Tempo Derivativo (Td):	0,9459919117
<hr/>			
Controlador PID IAE:		Controlador PID ITAE:	
Ganho Proporcional (Kp):	2,88848057616524	Ganho Proporcional (Kp):	2,58969283059438
Tempo Integrativo (Ti):	2,34907775014261	Tempo Integrativo (Ti):	2,2284636832568
Tempo Derivativo (Td):	0,66840158220733	Tempo Derivativo (Td):	0,5957624650944

Figura 26 - parâmetros gerados pelo aplicativo para terceira simulação

No próximo gráfico temos o resultado da simulação dos controladores para uma entrada em degrau em malha fechada.

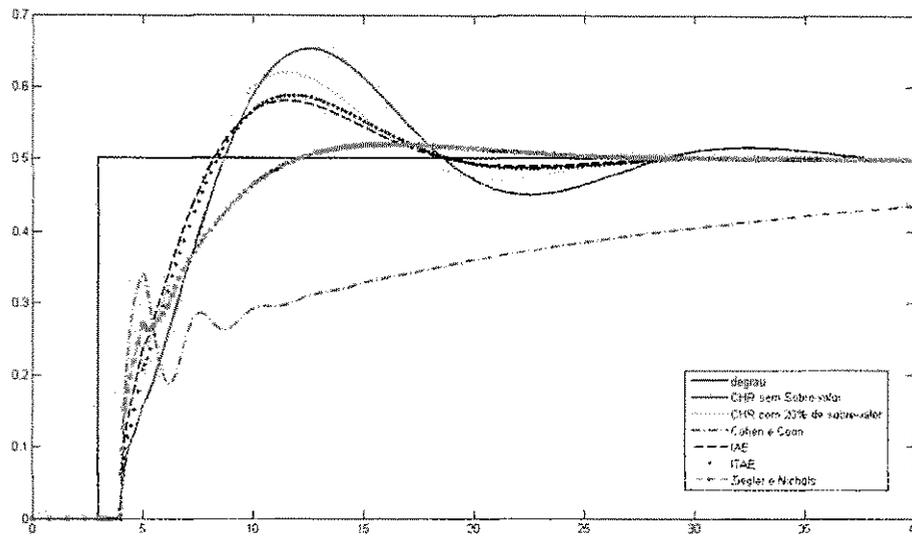


Figura 27 - simulação do controle PID em malha fechada para o terceiro processo

Como pode-se perceber os parâmetros gerados pelo aplicativo proposto obtiveram desempenho satisfatório para o processo de segunda ordem proposto. O método de Ziegler e Nichols obteve o melhor desempenho, enquanto que o método de Cohen e Coon apresentou o pior desempenho.

6 Conclusão

Este trabalho possui por objetivos principais apresentar uma visão geral sobre o controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID), efetuar uma breve descrição sobre os métodos de sintonia:

- Método Heurístico de Ziegler e Nichols;
- Método de Chien, Hrones e Reswick;
- Método Heurístico de Cohen e Coon;
- Métodos da Integral do erro;

Também encontra-se no escopo do trabalho efetuar uma breve descrição sobre o aplicativo criado para calcular os parâmetros de sintonia.

O software foi aplicado para fazer a sintonia dos parâmetros dos controladores PI e PID de processos de primeira e segunda ordem, apresentando bons resultados nas suas duas etapas.

A primeira etapa é a da identificação do sistema e a aproximação por um modelo de primeira ordem com atraso. Utilizamos para tanto a curva de reação apresentada pelo sistema para uma variação em degrau na entrada.

A segunda etapa foi utilizar o software para calcular os parâmetros PID e efetuar simulações no Matlab para verificar a eficiência do mesmo.

Podemos propor como continuação para este trabalho:

- Acrescentar outros métodos de sintonia no software;
- Desenvolver rotinas de verificação da eficiência;
- Utilização de outros algoritmos para a etapa de identificação de sistemas;

7 Referências Bibliográficas

- <http://lodi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf> - acessado em 15/01/2009
- http://www2.petrobras.com.br/tecnologia2/port/boletim_tecnico/v46_n3-4_jul-dez-2003/pdf/17_sintoniaPID2_GS.pdf - acessado em 15/01/2009
- <ftp://ftp.ppgeec.ufrn.br/Mestrado/M163.pdf> - acessado em 15/01/2009
- <http://www.atan.com.br/dados/artigos/0682-284-00%20-%20Isa%20show2002%20-%20Sintonia%20de%20Controladores%20PID%20em%20Sistema%20Multimalha.pdf> - acessado em 15/01/2009
- <http://mtc-m16.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2004/04.22.15.55/doc/publicacao.pdf> - acessado em 15/01/2009
- Controles Típicos de equipamentos e processos industriais/ Mario Cesar M. Massa de Campos, Hebert C. G. Texeira. – São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

8 Anexos