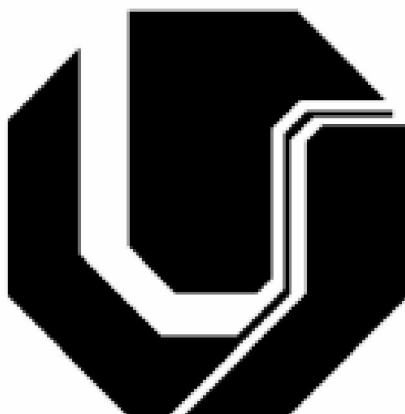


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



**PROJETO E SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES DIGITAIS TIPO PID:
CONTROLE AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA EM UMA UNIDADE DE
SECAGEM**

FERNANDO OSMARINI DADALTO

Uberlândia - MG

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**PROJETO E SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES DIGITAIS TIPO PID:
CONTROLE AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA EM UMA UNIDADE DE
SECAGEM**

FERNANDO OSMARINI DADALTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique.

Uberlândia - MG

2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA *PROJETO E SINTONIZAÇÃO DE CONTROLADORES DIGITAIS TIPO PID: CONTROLE AUTOMÁTICO DE TEMPERATURA EM UMA UNIDADE DE SECAGEM*, DE FERNANDO OSMARINI DADALTO, APRESENTADO À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA EM 03 DE SETEMBRO DE 2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Humberto Molinar Henrique
Orientador (FEQUI/UFU)

Prof. Dr. Luís Cláudio Oliveira Lopes
(FEQUI/UFU)

Profa. Dra. Marina Seixas Pereira
(FEQUI/UFU)

Em dedicação à família e amigos que me apoiaram até aqui

RESUMO

Nas indústrias, a técnica de controle PID na operação de diversos equipamentos e rotinas da planta vem se tornando frequente. A implementação desta técnica possibilita manter um alto rendimento nas operações, além de menores custos. Porém, para essa técnica de controle ser viável, o controlador deve: ser ágil em sua resposta, evitar grandes perturbações no sistema durante seu ajuste e garantir a estabilidade da variável controlada com o *setpoint* desejado. Para isso, faz-se necessário que a sintonia de controle seja feita adequadamente e que os indicadores do sistema estejam calibrados devidamente. O trabalho em questão é o estudo de uma unidade de secagem presente nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Ele visa a calibração de seus sensores a partir de curvas de tendência dos dados coletados em experimentos de bancada e a realização da sintonia do controlador de temperatura na entrada do sistema baseando-se no método da curva de reação do processo. Foi utilizado os métodos conhecidos na literatura, como o de Ziegler- Nicholson, Chien-Hrones-Reswick, Cohen-Coon, integral do erro e o modelo de controle interno para a realização da sintonia do sistema. O trabalho também teve como objetivo estudar a unidade experimental para propor melhorias em seu funcionamento e gerar um manual de operação adequado, visando a sua utilização pelos alunos da Faculdade nas disciplinas do Laboratório de Engenharia Química.

Palavras-chave: controle, calibração, sintonia, secagem.

ABSTRACT

In industries, the technique of PID control in the operation of various equipment and industrial routines has become frequent. The implementation of this technique enables a highly efficient process, in addition to lower costs. However, for the sake of the viability of the control technique, the controller must have a quick response to the process disturbances, avoid large oscillations in the system during its adjustment and guarantee the stability of the controlled variable with the desired setpoint. Therefore, the control's tuning must be done properly and the system's indicators must be properly calibrated. The work presented is the study of a drying unit present in the Faculty of Chemical Engineering's laboratories from the Federal University of Uberlândia. It aims to calibrate its sensors with trend lines from the data collected from the experiment and perform the temperature controller tuning based on the process reaction curve method in openloop. The tuning methods known in the literature, such as Ziegler-Nicholson, Chien-Hrones-Reswick, Cohen-Coon, integral of the absolute error and the internal model control were used in this study. Lastly, this research also studied the experimental unit to propose improvements in its operation and generate an appropriate operation manual, with the purpose at its use by the Faculty students in the disciplines applied in the laboratory.

Keywords: control, calibration, tuning, drying.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Representação da bancada experimental de controle e secagem	2
Figura 3.2- Instalação da bancada nos laboratórios	2
Figura 4.1 - Interface do <i>software</i> Labview® para leitura dos valores de voltagem.....	5
Figura 5.1 - Representação do controle por realimentação da saída	6
Figura 5.2 - Curva de reação do processo de primeira ordem em malha aberta	7
Figura 5.3 - Representação gráfica dos critérios de desempenho.....	13
Figura 6.1 - Curva de tendência entre voltagem e temperatura de entrada	14
Figura 6.2 - Curva de tendência entre voltagem x temperatura de saída.....	14
Figura 6.3 - Curva de tendência entre voltagem e umidade relativa do ar	15
Figura 6.4 - Curva de reação do processo em malha aberta	16
Figura 6.5 - Aproximação sigmoidal da curva de reação e determinação de θ e τ	17
Figura 6.6 - Resposta simulada do sistema para a sintonia ZN.....	18
Figura 6.7 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CHR-0%	19
Figura 6.8 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CHR-20%	19
Figura 6.9 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CC	20
Figura 6.10 - Resposta simulada do sistema para a sintonia IAE.....	20
Figura 6.11 - Resposta simulada do sistema para a sintonia ITAE	21
Figura 6.12 - Resposta simulada do sistema para a sintonia IMC	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 - Parâmetros do modelo de Ziegler-Nichols (ZN)	9
Tabela 5.2 - Parâmetros do modelo de Chien-Hrones-Reswick sem sobrevalor (CHR-0%)	9
Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo de Chien-Hrones-Reswick com 20% do sobrevalor (CHR-20%)	10
Tabela 5.4 - Parâmetros do modelo de Cohen-Coon (CC)	10
Tabela 5.5 - Parâmetros do método da integral do módulo do erro absoluto (IAE)	11
Tabela 5.6 - Parâmetros do método da integral do módulo do erro absoluto vezes o tempo (ITAE) ...	11
Tabela 5.7 - Parâmetros do Modelo do Controle Interno (IMC)	12
Tabela 6.1 - Parâmetros das equações de tendência resultantes da calibração	15
Tabela 6.2 - Parâmetros da curva de razão do processo em malha aberta.....	17
Tabela 6.3 - Parâmetros calculados para os métodos de sintonia estudados	18
Tabela 6.4 - Resultado da avaliação dos métodos de sintonia de controle PID	22
Tabela A.1 – Dados obtidos dos experimentos de calibração	26
Tabela A.2 - Comparação das temperaturas no sistema de secagem.....	27

SUMÁRIO

1 - Introdução.....	1
2 - Objetivos	1
3 - Unidade experimental.....	2
4 - Calibração.....	4
5 - Controle PID	5
5.1 Sintonia de controle	7
5.2 Método da curva de reação	7
5.3 Métodos de sintonia de controle	8
5.3.1 Método Ziegler-Nichols (ZN)	8
5.3.2 Método de Chien-Hrones-Reswick (CHR)	9
5.3.3 Método Cohen-Coon (CC)	10
5.3.4 Método da integral do erro	11
5.3.5 Modelo de controle interno (IMC)	11
5.4 Critérios de desempenho.....	12
6 - Resultados e discussões.....	13
6.1 Resultados da calibração.....	14
6.2 Resultados sintonia.....	16
7 - Conclusão	22
Referências bibliográficas	24

1. INTRODUÇÃO

Na indústria moderna, a automação de processos fabris tornou-se fundamental para a competitividade no mercado. A prática da automação possibilitou uma produção mais eficiente graças à uma produção mais estável, padronizada, com menores desperdícios de matéria prima e energia e, ao mesmo tempo, favorecendo segurança na operação da planta.

Diversas técnicas podem ser empregadas na automação industrial. De acordo com Rubaai *et al.* (2008), estima-se que 96% dos controladores industriais são do tipo proporcional, integral e derivativo (PID). O controle PID têm como características a fácil implementação, arquitetura simples e seu ajuste pode ser feito por métodos igualmente simples e consolidados. Além disso, os controladores PID são aplicados à maioria dos sistemas de controle, em particular, quando o modelo matemático da planta não é conhecido e os métodos de projeto analítico não podem ser utilizado (Ogata, 2010).

Os processos industriais englobam diferentes operações, equipamentos e produtos, por isso, conhecer as principais variáveis do processo e controlá-las é essencial para uma operação eficiente e segura do processo (Favaro, 2012). Assim, um ajuste adequado de seus parâmetros, ou sintonia do controlador, pode garantir uma rápida resposta dos atuadores frente as mudanças do processo, baixos índices de oscilação durante o controle e rápida obtenção de estabilidade com erros aproximadamente nulos.

Assim, este trabalho visa estudar os diferentes métodos de sintonia de controle e escolha da metodologia que melhor represente uma unidade experimental de secagem. Serão levados em consideração a aplicabilidade do método, juntamente com critérios baseados na resposta gerada pelo processo e análise gráfica.

2. OBJETIVO

O objetivo do trabalho foi a reativação da unidade experimental de secagem presente nos Laboratórios da Faculdade de Engenharia Química (FEQUI) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) para que a unidade seja utilizada em aulas práticas e para futuras pesquisas.

Para atingir esse objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Realizar a calibração dos sensores da unidade experimental;

- Sintonizar os controladores de temperatura de entrada do sistema por meio de métodos conhecidos tais como Ziegler-Nichols, Chien-Hrone-Reswick (CHR), Cohen-Coon (CC), Integral do erro (IAE e ITAE) e método do modelo interno (IMC) baseados na metodologia da curva de reação do processo.

3. UNIDADE EXPERIMENTAL

A unidade experimental utilizada neste trabalho é destinada à secagem e ao controle da temperatura de entrada do ar na câmara de secagem.

A Figura 3.1 mostra uma representação gráfica da bancada, indicando seus principais componentes, enquanto a Figura 3.2 representa a instalação da bancada nos laboratórios.

Figura 3.1 - Representação da bancada experimental de controle e secagem

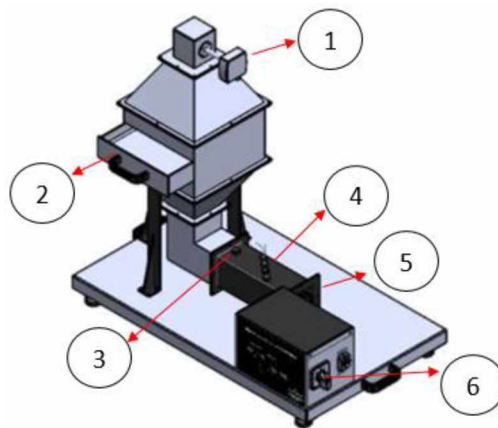
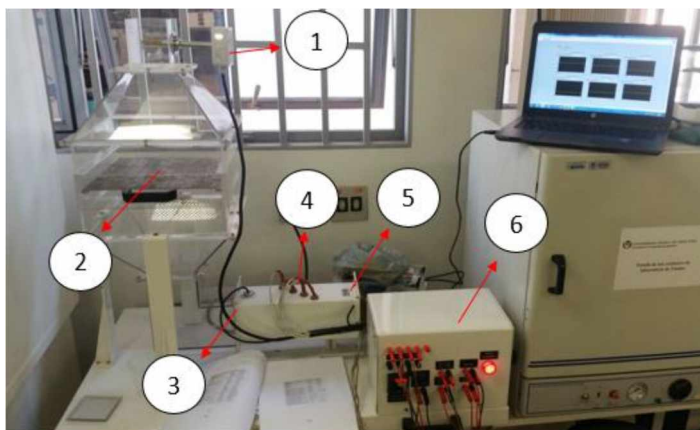


Figura 3.2- Instalação da bancada nos laboratórios



Na qual, os números representados são respectivamente:

1. Sensor de temperatura e umidade da saída do sistema;
2. Câmara de secagem;
3. Termopar tipo J;
4. Sistema de resistências;
5. Ventilador;
6. Painel de controle.

A bancada possui dimensões, em metros, de 0,96x1,1x0,6 (altura, largura e comprimento respectivamente). Em operação, o ar é ventilado (5) para um túnel contendo um sistema de resistências para aquecimento (4). O ar aquecido é direcionado para a câmara de secagem (2) onde é possível ter acesso ao material de estudo por uma bandeja perfurada mostrado na Figura 3.2. Esta bandeja permite uma melhor distribuição do ar aquecido dentro da câmara e favorece a passagem do ar entre os grãos.

A unidade também conta com um sensor de temperatura do ar de alimentação (3) (termopar tipo J) e outro sensor de temperatura e umidade do ar de saída (1) (transmissor de temperatura e umidade S501). É possível ajustar a temperatura de alimentação pelo painel de controle da própria unidade (6) (controlador Contemp C704).

No entanto, inicialmente não possível de realizar a operação de secagem na unidade de bancada. Após inspeções nos circuitos internos do painel de controle, notou-se que não haviam as conexões do termopar com o controlador e não haviam as ligações do controlador com a chave estática que alimenta o sistema de resistências. Foi constatado também que não haviam as rotas para transmitir os dados do sensor de umidade e temperatura de saída do ar.

Com isso, foi necessário fazer manutenções no circuito interno do painel de controle para conectar corretamente o termopar ao controlador. Porém, o modelo do controlador (Contemp C704) não permite que o sensor de temperatura e umidade (S501) seja conectado para a obtenção dos dados coletados. Desta forma, ambos os sensores de entrada e saída do sistema foram conectados a uma placa de aquisição de dados. A partir disso, os dados coletados eram transmitidos para um computador periférico que possibilitava a leitura das três voltagens, sendo elas correspondentes à temperatura do ar de alimentação, temperatura do ar de saída do sistema e umidade relativa do ar na saída do sistema.

Por fim, para que a unidade experimental estivesse pronta para a operação, foi necessário realizar a calibração dos sensores e a sintonia do controlador de temperatura. Estes tópicos serão abordados nos seguintes capítulos deste trabalho.

4. CALIBRAÇÃO

A calibração é uma operação que estabelece a relação de valores indicados por instrumentos de medida com valores correspondentes aos padrões utilizados. Esta operação é necessária para se garantir a precisão, reprodutividade e confiabilidade dos sensores em questão.

Neste trabalho, foi feita a relação entre a voltagem gerada pelo instrumento com sua medida equivalente (temperatura ou umidade). Assim, para a coleta destes dados, foram realizadas rampas de operação alterando-se gradualmente a temperatura da alimentação.

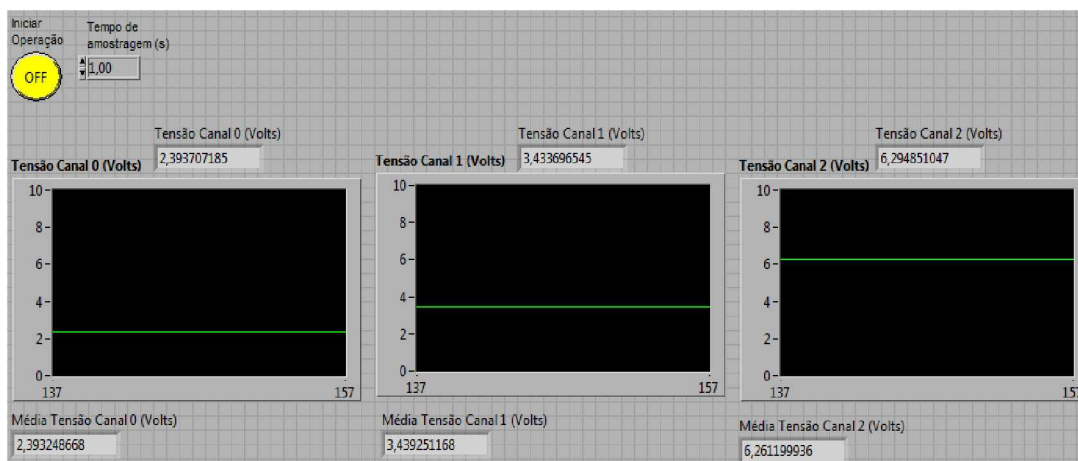
A operação geralmente era iniciada à temperatura ambiente e incrementada gradualmente. A coleta dos dados foi realizada em intervalos regulares pouco tempo após a estabilização das leituras de cada sensor.

Para obter as medidas, foram utilizados um termohigrômetro para a leitura de temperatura (precisão de $\pm 0,1$ °C) e umidade relativa do ar de saída (precisão de $\pm 1\%$). As leituras de temperatura de alimentação do termopar foram feitas no painel de controle, indicadas no controlador C704 (precisão de $\pm 0,1$ °C).

Os sensores foram conectados a uma placa de aquisição de dados para transmitir dados de voltagem para um computador periférico. Os sinais eram transmitidos para uma interface criada no *software* Labview® onde é possível ler a voltagem do sinal para a coleta de dados.

Para melhorar a precisão do dado coletado, o programa realiza a média das leituras de voltagem nos últimos 10 segundos para cada medida. A Figura 4.1 mostra a interface do programa utilizado.

Figura 4.1 - Interface do software Labview® para leitura dos valores de voltagem.



Onde, o canal 0 é destinado à leitura dos dados de temperatura de alimentação, o canal 1 para a leitura dos dados de temperatura de saída e o canal 2 para os dados de umidade relativa.

Também foi inserido um termômetro à álcool (precisão ± 1 °C) no interior da câmara de secagem para acompanhar a mudança de temperatura no interior da unidade. O valor da temperatura deste termômetro era coletado juntamente com as leituras dos sensores da bancada.

Por fim, os dados foram compilados para obter-se a curva de tendência juntamente com a equação da curva gerada. A equação gerada é o resultado da calibração que faz a correlação entre a voltagem obtida pelo instrumento com sua medida equivalente (temperatura ou umidade).

5. CONTROLE PID

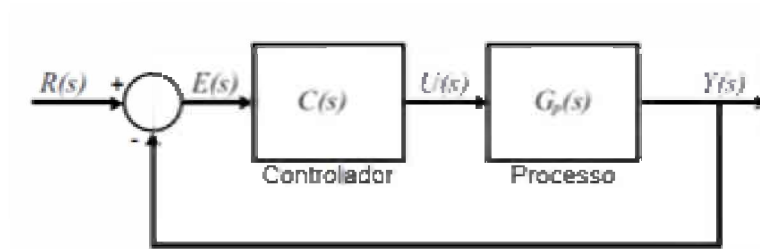
O controle PID é uma técnica de simples implementação capaz de satisfazer os objetivos mais comuns da automação, sendo eles redução de sobrelevação de valor ou *overshoot*, erro nulo em estado estacionário e um breve regime transiente.

Um sistema de controle é definido por Murray *et al.* (2003) como uma peça onde uma variável medida é usada para alterar o sistema por meio de computação e atuação. De maneira simples, a automação usa a realimentação como uma ferramenta de gerenciamento de incertezas, sejam elas paramétricas, de condições de funcionamento, de limites práticos ou advindas de alteração de sianis externos (ruído, perturbação) não controlados. Justamente esta visão, de sistemas de controle como uma maneira de conferir robustez frente a uma incerteza,

explica o porquê do controle realimentado estar disseminado por todas as tecnologias do mundo moderno.

A Figura 5.1 apresenta o diagrama padrão para controle por realimentação da saída.

Figura 5.1 - Representação do controle por realimentação da saída



Dada sua simplicidade, cerca de 90 a 95% de todos os problemas de automação podem ser resolvidos por este controlador (Levine, 1996). Segundo Cardoso (2002), mesmo com o surgimento de novas técnicas de controle, os controladores PID ainda dominarão os parques industriais por muito tempo.

Um controlador PID calcula a diferença entre sua variável controlada (medida do processo) e o seu valor desejado (*setpoint*). Assim, o controlador PID gera uma saída proporcional, integral e derivativa ao erro obtido de forma a eliminar este desvio. De acordo com Åström e Hägglund (1995), a equação característica do controle PID pode ser descrita pela Equação 1:

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

Onde $u(t)$ representa a saída do controle, K_p é o ganho proporcional (erro definido pela diferença entre o valor do *setpoint* com a variável de processo), T_i é o ganho integral, T_d é o ganho derivativo e $e(t)$ é o erro da variável.

Aplicando a transformada de Laplace à Equação 1, considerando nulas as condições iniciais, obtém-se a função de transferência $G_c(S)$ do controlador PID, apresentado pela Equação 2:

$$G_C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (2)$$

Diante disso, é necessário determinar os parâmetros do controlador (K_p , T_i e T_d) para obter-se uma resposta satisfatória que atenda as necessidades do processo. Então, o próximo passo é a escolha de métodos empíricos para resolver este problema.

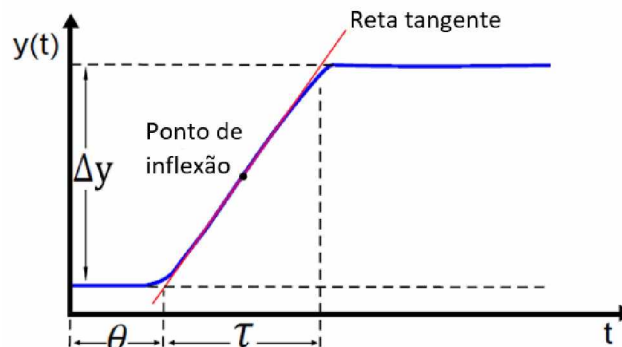
5.1 Sintonia de controle

Para garantir a eficiência do controle PID, foi preciso determinar os parâmetros K_p , T_i e T_d adequados ao sistema em questão. Existem vários métodos utilizados para a determinação destes parâmetros e cada um possui suas particularidades. Cabe ressaltar que, apesar dos diversos métodos existentes, frequentemente é utilizado o ajuste manual, onde os parâmetros ideais alcançados são ajustados na forma de tentativa e erro.

5.2 Método da curva de reação

Dentre as várias metodologias para sintonia, foi utilizada como base para este trabalho a metodologia de curva de reação do processo, proposta por Cohen e Coon (1953). Esta metodologia, segundo Coughanowr e Koppel (1978), consiste, com o sistema em malha aberta, aplicar uma perturbação do tipo degrau na variável manipulada para obter-se uma curva de reação do processo em formato sigmoidal, mostrado na Figura 5.2. Esta metodologia aproxima o modelo do processo em uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto (*First Order Plus Dead Time*, FOPDT) mostrado pela Equação 3.

Figura 5.2 - Curva de reação do processo de primeira ordem em malha aberta



$$G_P(s) = \frac{ke^{(-\theta s)}}{(\tau s + 1)} \quad (3)$$

Onde θ é o tempo morto do processo, τ é a constante de tempo do processo e k é o ganho do processo. Estes parâmetros serão utilizados nos métodos de sintonia de controle.

Para obter-se os parâmetros θ e τ , primeiramente, traça-se uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de reação. O valor de θ é determinado pela intersecção da reta tangente com o eixo do tempo e o valor de τ é dada pelo tempo equivalente à intersecção da reta tangente com a assintota do *setpoint*, como demonstrado na Figura 5.2 anteriormente.

O valor de k é obtido pela razão entre a variação gerada no sistema (Δu) pela mudança no *setpoint* (Δy), mostrada na Equação 4:

$$k = \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (4)$$

5.3 Métodos de sintonia de controle

Com os parâmetros k , θ e τ em mãos, pode-se calcular os parâmetros K_p , T_i e T_d pelos diferentes métodos de sintonia propostos. A seguir, serão apresentados os métodos de sintonia utilizados neste trabalho.

5.3.1 Método Ziegler-Nichols (ZN)

O método de Ziegler-Nichols (J. G. Ziegler e N. B. Nichols, 1942) foi o primeiro método de sintonia a ser publicado. É caracterizado pela simplicidade, fácil implementação e resultado satisfatório. A Tabela 5.1 a seguir apresenta o método para o cálculo dos parâmetros de controladores P, PI e PID:

Tabela 5.1 - Parâmetros do modelo de Ziegler-Nichols (ZN)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{k \theta}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$3,33 * \theta$	-
PID	$\frac{1,2}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$2 * \theta$	$0,5 * \theta$

Fonte: Ziegler e Nichols, 1942

Segundo Rivera *et al.* (1986), o valor ideal para a relação θ/τ , também conhecido como fator de incontrolabilidade do processo, deve estar entre 0,2 e 0,4. Vale ressaltar que o método apresenta instabilidades para valores de θ/τ maiores que 4.

5.3.2 Método de Chien-Hrones-Reswick (CHR)

O método de Chien-Hrones-Reswick (K. L. Chien, J. A. Hrones e J. B. Reswick, 1952) propõe regras de ajuste diferentes para problemas do tipo servo (mudanças no *setpoint*) e para problemas do tipo regulador (perturbações externas com *setpoint* constante). Também são propostos dois critérios de desempenho, sendo eles a resposta mais rápida sem sobrevalor (CHR – 0%) e a resposta mais rápida com 20% do sobrevalor (CHR-20%). Como o controle tratado neste trabalho é do tipo servo, na Tabela 5.2 e Tabela 5.3 são apresentados os parâmetros para o método CHR-0% e CHR-20%, respectivamente, para o problema do tipo servo:

Tabela 5.2 - Parâmetros do modelo de Chien-Hrones-Reswick sem sobrevalor (CHR-0%)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,3}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	-	-
PI	$\frac{0,35}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{1,16}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	-
PID	$\frac{0,65}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	τ	$0,5 * \theta$

Fonte: Chien, Hrone e Reswick (1952)

Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo de Chien-Hrones-Reswick com 20% do sobrevalor (CHR-20%)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,7}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	-	-
PI	$\frac{0,6}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	τ	-
PID	$\frac{0,95}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$1,357 * \tau$	$0,473 * \theta$

Fonte: Chien, Hrone e Reswick (1952)

5.3.3 Método Cohen-Coon (CC)

O método Cohen-Coon (G. H. Cohen e G. A. Coon, 1953) foi proposto para processos com tempo morto mais elevado. Segundo Riveira *et al.* (1986), para que o método tenha validade, o valor ideal para a relação θ/τ deve estar entre 0,6 e 4,5. A Tabela 5.4 apresenta os parâmetros para o método CC.

Tabela 5.4 - Parâmetros do modelo de Cohen-Coon (CC)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{0,35}{k} + \frac{1,03}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	-	-
PI	$\frac{0,083}{k} + \frac{0,9}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$\theta * \frac{(0,9 + 0,083 * \theta/\tau)}{(1,27 + 0,6 * \theta/\tau)}$	-
PID	$\frac{0,25}{k} + \frac{1,35}{k} * \frac{\tau}{\theta}$	$\theta * \frac{(1,35 + 0,25 * \theta/\tau)}{(0,54 + 0,33 * \theta/\tau)}$	$\frac{0,5 * \theta}{(1,35 + 0,25 * \theta/\tau)}$

Fonte: Cohen e Coon (1953)

5.3.4 Método da integral do erro

O método da integral do erro no tempo foi desenvolvido por pesquisadores da *Louisiana State University*. Proposto por Rovira *et al.* (1969) para problemas do tipo servo, o método é caracterizado por uma sensibilidade menor a erros que ocorrem logo após as perturbações, reduzindo *offset*. O método apresenta bons resultados para θ/τ entre 0 e 1. As Tabelas 5.5 e 5.6 apresentam, respectivamente, o método da integral do módulo do erro absoluto (IAE) e o método da integral do módulo do erro absoluto vezes o tempo (ITAE).

Tabela 5.5 - Parâmetros do método da integral do módulo do erro absoluto (IAE)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	-	-	-
PI	$\frac{0,758}{k} * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,861}$	$\frac{\tau}{(1,02 - 0,323 * \theta/\tau)}$	-
PID	$\frac{1,086}{k} * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,866}$	$\frac{\tau}{(0,74 - 0,13 * \theta/\tau)}$	$0,348 * \tau \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,861}$

Fonte: Rovira *et al.* (1969)

Tabela 5.6 - Parâmetros do método da integral do módulo do erro absoluto vezes o tempo (ITAE)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	-	-	-
PI	$\frac{0,586}{k} * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,916}$	$\frac{\tau}{(1,03 - 0,165 * \theta/\tau)}$	-
PID	$\frac{0,965}{k} * \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,85}$	$\frac{\tau}{(0,796 - 0,147 * \theta/\tau)}$	$0,308 * \tau \left(\frac{\theta}{\tau}\right)^{-0,929}$

Fonte: Rovira *et al.* (1969)

5.3.5 Modelo de controle interno (IMC)

Primeiramente proposto por Garcia e Morari (1982), também conhecido como sintonia- λ , foi demonstra por D. E. Rivera, M. Morari e S. Skogestad (1986) a partir do método da síntese

direta e de uma especificação do parâmetro λ . Para um processo do tipo FOPDT, foi sugerido por Luyben (2001) que o parâmetro λ fosse o maior valor entre $0,25*\theta$ e $0,2*\tau$. A tabela 5.7 apresenta os parâmetros do método IMC.

Tabela 5.7 - Parâmetros do Modelo do Controle Interno (IMC)

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	-	-	-
PI	$\frac{2 * \tau + \theta}{2 * k * \lambda}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	-
PID	$\frac{2 * \tau + \theta}{2 * k * (\lambda + \theta)}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau * \theta}{(2 * \tau + \theta)}$

Fonte: Rivera *et al.* (1986)

5.4 Critérios de desempenho

Dadas as diversas técnicas de sintonia e parâmetros dos controles PID, é necessário definir critérios de qualidade do comportamento dinâmico de desempenhado por um processo. Os critérios darão clareza na escolha do método mais eficiente e que possa corresponder ao processo de forma coerente.

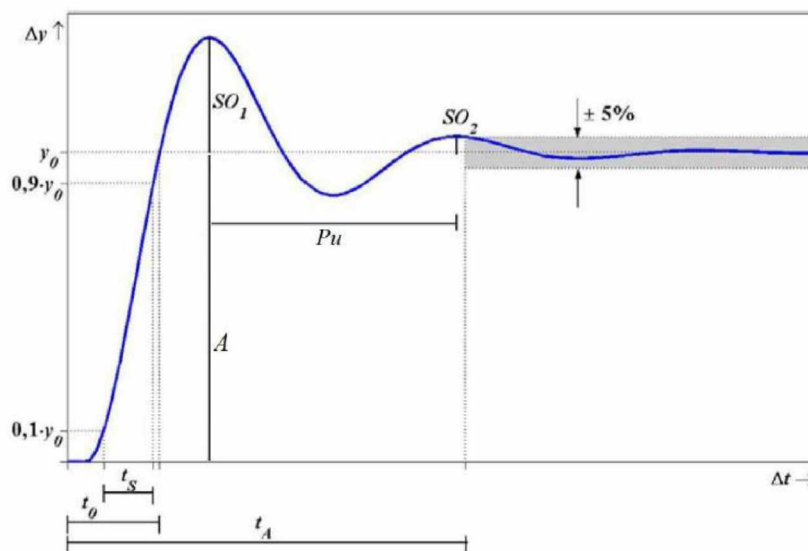
Visto isso, serão analisados:

- Erro em estado estacionário (e_∞): também chamado de *offset*, é a diferença entre o valor da variável controlada em regime permanente com o valor do *setpoint*. Para este critério, deseja-se o menor valor possível, caracterizado pela ação integral do controlador;
- Máxima sobrelevação (M_{so}): também chamada de *overshoot*, é a razão entre o maior pico atingido pela resposta do sistema e o valor de estado estacionário. É comum adotar-se $M_{so} < 20\%$;
- Período de oscilação (P_u): diferença entre o tempo de dois valores máximos consecutivos;
- Razão de decaimento (RD): razão entre dois valores máximos consecutivos do sinal de erro;

- Tempo de assentamento (t_A): tempo necessário para obter-se a resposta do controle dentro de uma faixa percentual de erro em estado estacionário. Será adotado um valor de 5% neste trabalho;
- Tempo de duplicação (t_0): tempo necessário até a variável de processo atingir o *setpoint* pela primeira vez;
- Tempo de subida (t_s): diferença entre os tempos da variável de processo a 90% e 10% do *setpoint*.

A Figura 5.3 a seguir representa os critérios apresentados graficamente.

Figura 5.3 - Representação gráfica dos critérios de desempenho



6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a manutenção da unidade, instalação dos sensores e configuração da malha de controle, foi possível realizar coleta de dados para a calibração dos sensores e realização da sintonia do controlador. Desde já, é possível afirmar que a unidade está operacional sendo capaz de gerar os dados de temperatura e umidade e realizar o controle da temperatura de alimentação.

6.1 Resultados da calibração

Os dados de voltagem e leitura foram compilados e geraram 3 curvas de calibração com suas respectivas equações características aproximadas por uma equação de primeiro grau, como indicado em (5). Os dados obtidos estão na Tabela A.1 do Apêndice A e as Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 mostram o resultado das calibrações para a temperatura de entrada, temperatura de saída e umidade relativa, respectivamente.

$$y = A * x + B \quad (5)$$

Figura 6.1 - Curva de tendência entre voltagem e temperatura de entrada

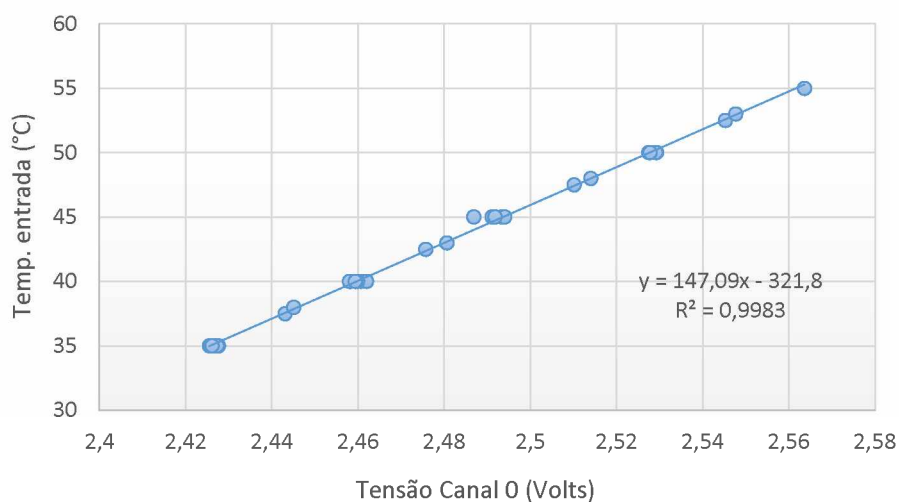


Figura 6.2 - Curva de tendência entre voltagem x temperatura de saída

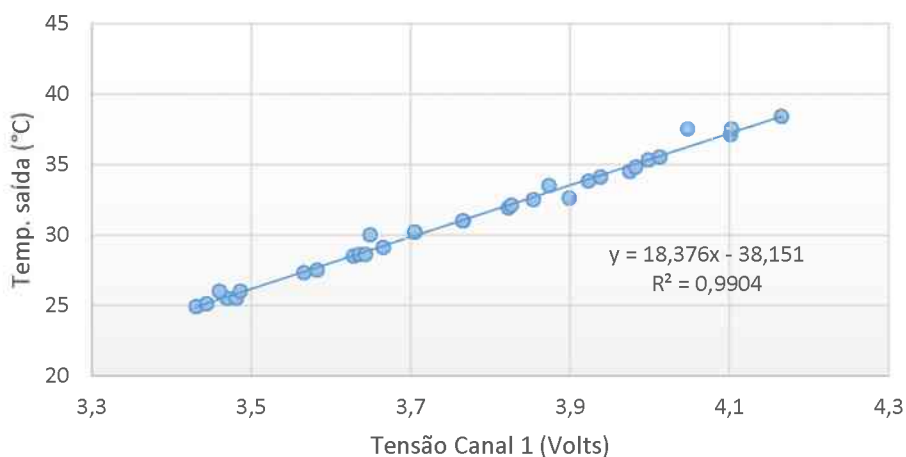
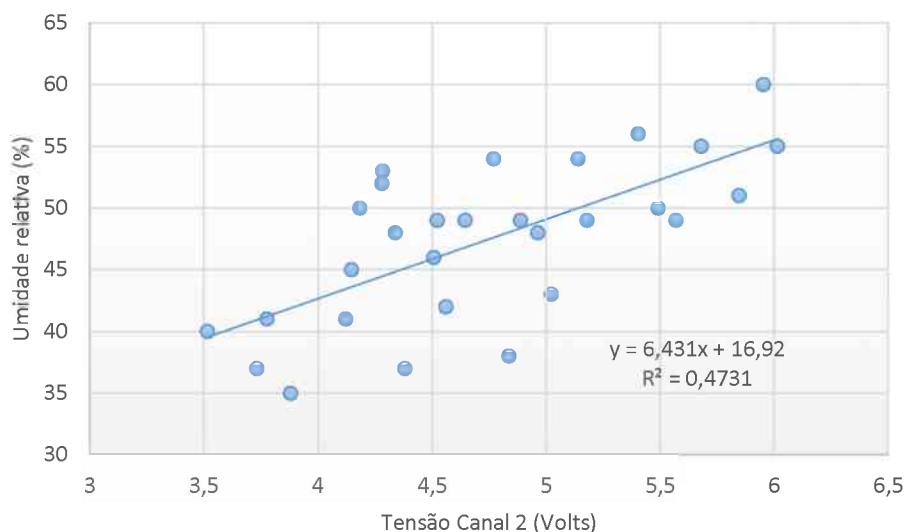


Figura 6.3 - Curva de tendência entre tensão e umidade relativa do ar



A Tabela 6.1 contém os parâmetros das equações de tendência obtidas de cada gráfico, para o formato em (5), equação do primeiro grau, e o coeficiente de determinação correspondente (R^2).

Tabela 6.1 - Parâmetros das equações de tendência resultantes da calibração

Medida	A	B	R^2
Temp. entrada	147,09	-321,8	0,9983
Temp. saída	18,376	-38,151	0,9904
Umidade	6,431	16,92	0,4731

Assim, os resultados da calibração mostraram-se satisfatórios para ambas as medidas de temperatura, representados pelo valor de R^2 próximo de 1 obtidos das equações das curvas de tendência. Porém, o resultado da umidade mostrou-se disperso e pouco reprodutivo e isto se deve à imprecisão do aparelho utilizado para sua medida.

Nota-se que há uma queda de até 28% no valor da temperatura de alimentação em relação à temperatura de saída. Com o auxílio de um termômetro colocado no interior da câmara de secagem, pode-se notar que a temperatura da câmara era mais próxima da temperatura medida na saída do sistema, variando em até 2%, enquanto que, comparado à temperatura de

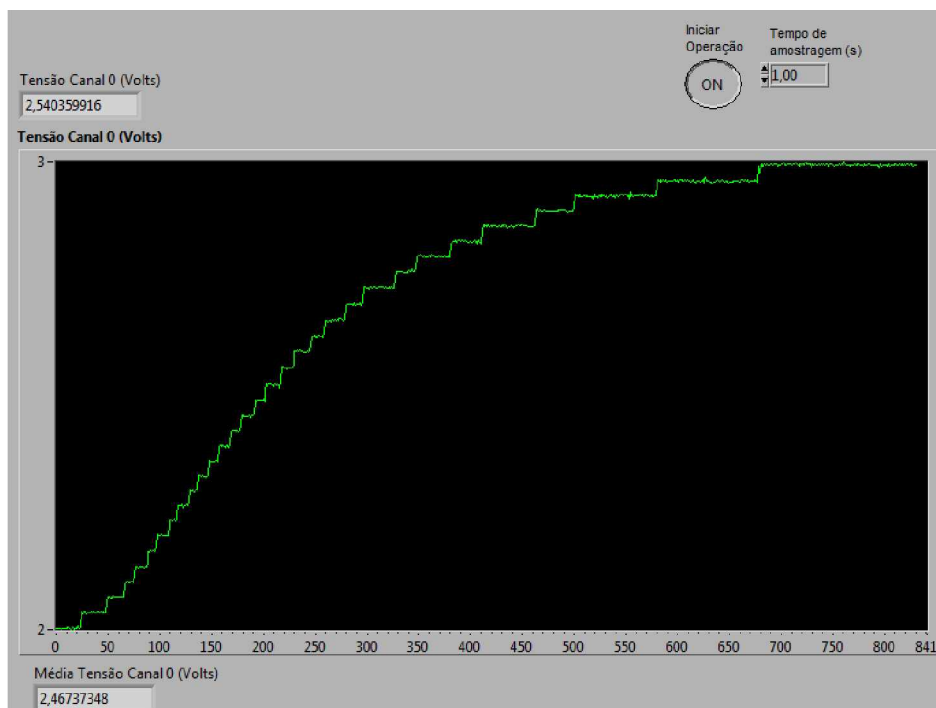
entrada este valor pode variar até 27%. As comparações dos valores podem ser encontradas na Tabela A.2 do Apêndice A.

A diferença entre os valores de temperatura pode ser justificado pelas perdas de calor para o ambiente e absorção de parte deste calor pelas paredes metálicas da unidade como observado durante os experimentos. Porém a diferença no valor da umidade podem ser justificados pelas imprecisões do termohigrometro utilizado. Assim, para obter melhores resultados em relação à umidade, um aparelho mais preciso é necessário.

6.2 Resultados sintonia

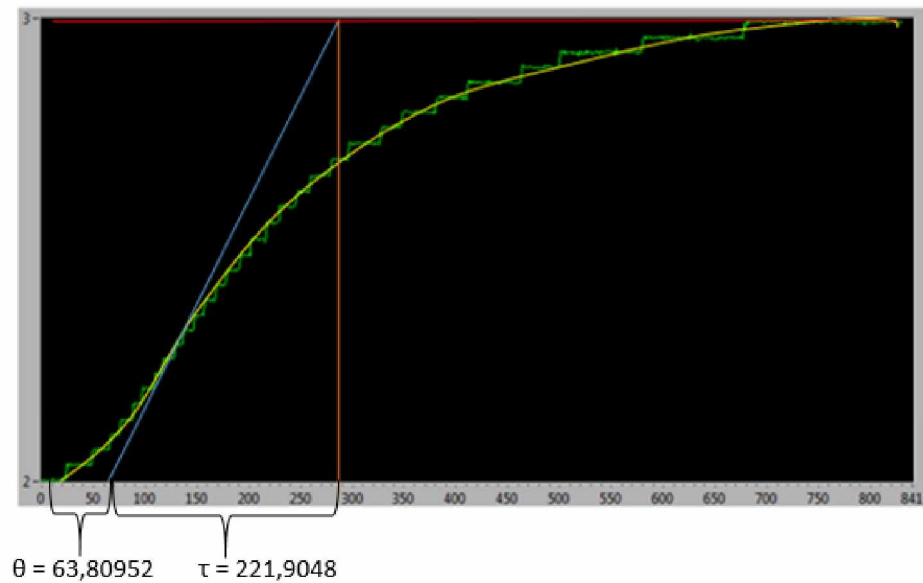
Para a obtenção da curva de reação do sistema, o controle da malha foi passado para o modo manual e, em seguida, foi aplicado um degrau de 30 unidades no processo. A Figura 6.4 detalha a curva de reação obtida. Após a estabilização do processo, notou-se um aumento de $10,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura de alimentação. De acordo com (4) pode-se determinar k igual a 0,353333.

Figura 6.4 - Curva de reação do processo em malha aberta



Dada a natureza da curva obtida, uma curva sigmoidal foi aproximada para facilitar a obtenção dos parâmetros θ e τ . O resultado desta aproximação e determinação dos parâmetros são mostrados na Figura 6.5.

Figura 6.5 - Aproximação sigmoidal da curva de reação e determinação de θ e τ



A Tabela 6.2 mostra o resultado da parametrização da curva de reação do processo e (6) apresenta a equação de transferência de primeira ordem resultante.

Tabela 6.2 - Parâmetros da curva de reação do processo em malha aberta

k	τ	θ
0,353333	221,9048	63,80952

$$G_P(s) = \frac{0,353333 * e^{(-63,80952 \cdot s)}}{(221,9048 * s + 1)} \quad (6)$$

Com os valores de k , τ e θ , pode-se obter os resultados das parametrizações dos métodos de sintonia apresentados. Os valores calculados das constantes para a sintonia em PID para cada método estão compilados na tabela 6.3.

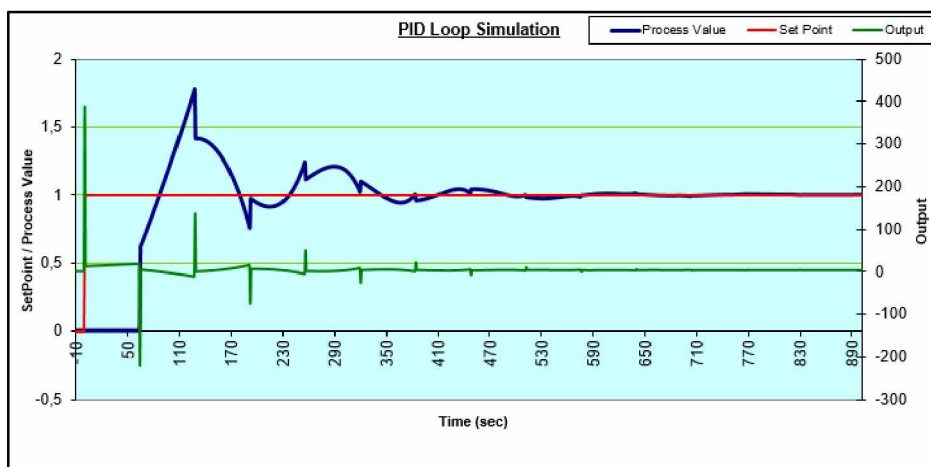
Tabela 6.3 - Parâmetros calculados para os métodos de sintonia estudados

Método	K_p	T_i	T_d
ZN	11,81076	127,619	31,90476
CHR-0%	5,90538	221,9048	31,90476
CHR-20%	9,350185	301,1248	30,1819
CC	13,40594	144,3785	22,71995
IAE	8,72801	307,0948	24,98943
ITAE	7,580578	286,3085	21,7222
IMC	12,02258	267,028	11,29496

Para comparar os diferentes modelos, serão utilizados os critérios de desempenho descritos no capítulo 4.4. Para uma visualização melhor, também serão apresentados gráficos simulados a partir dos resultados da sintonia de controle obtida para cada modelo.

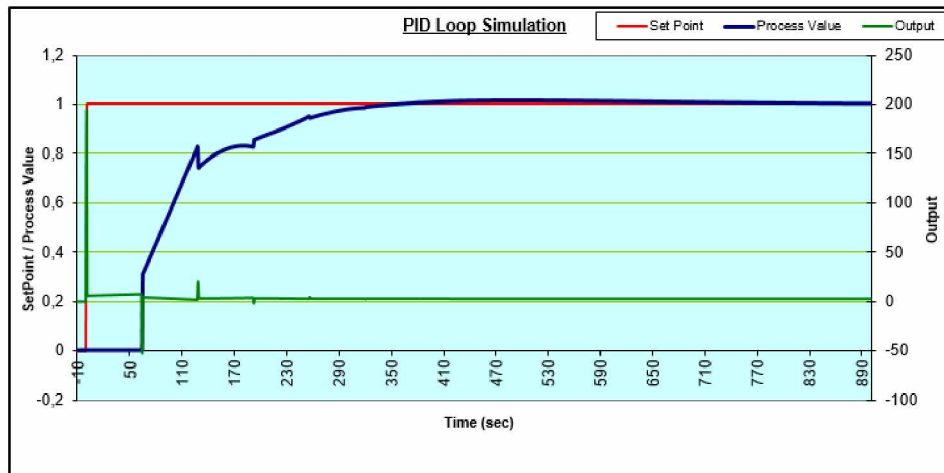
Primeiramente, para o método ZN a Figura 6.6 mostra a resposta obtida do sistema simulado. Pela análise do gráfico, pode-se notar uma grande estabilidade no estado estacionário, rápida reação, porém uma grande característica oscilatória.

Figura 6.6 - Resposta simulada do sistema para a sintonia ZN



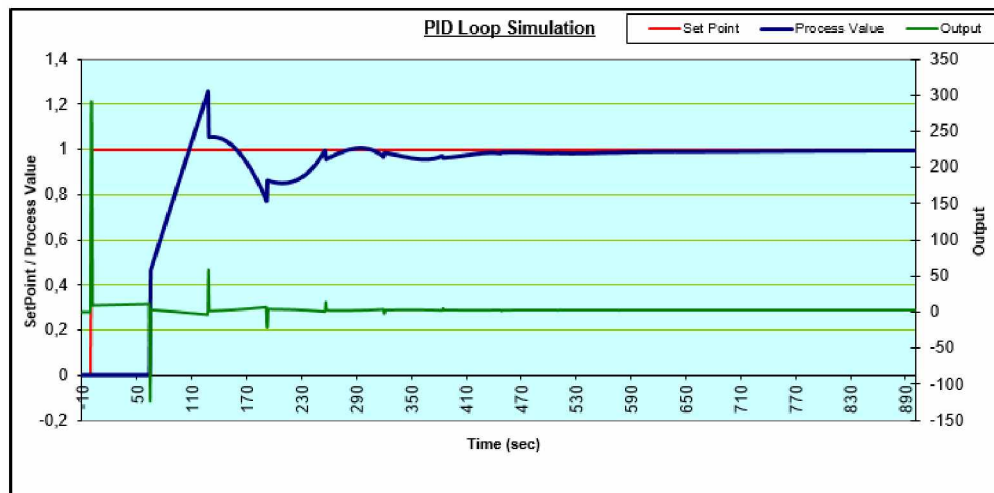
Em seguida, a Figura 6.7 representa a resposta simulada do sistema para o método CHR-0%. A análise gráfica mostra que o método possui uma oscilação praticamente nula, com uma resposta lenta mas com grande estabilidade ao atingir o *setpoint*.

Figura 6.7 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CHR-0%



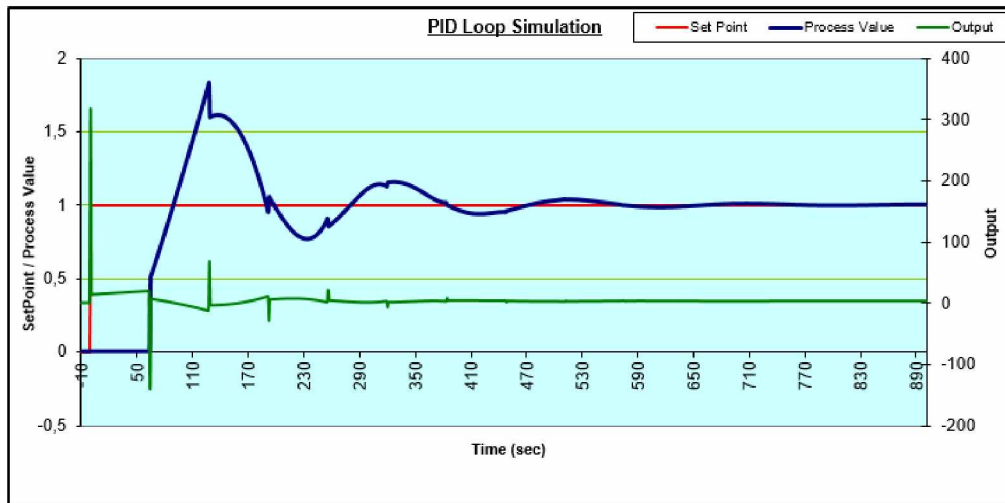
Para o método CHR-20%, o gráfico resultante desta sintonia mostra uma grande estabilidade no estado estacionário, um baixo comportamento oscilatório e rápida resposta como mostrado na Figura 6.8.

Figura 6.8 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CHR-20%



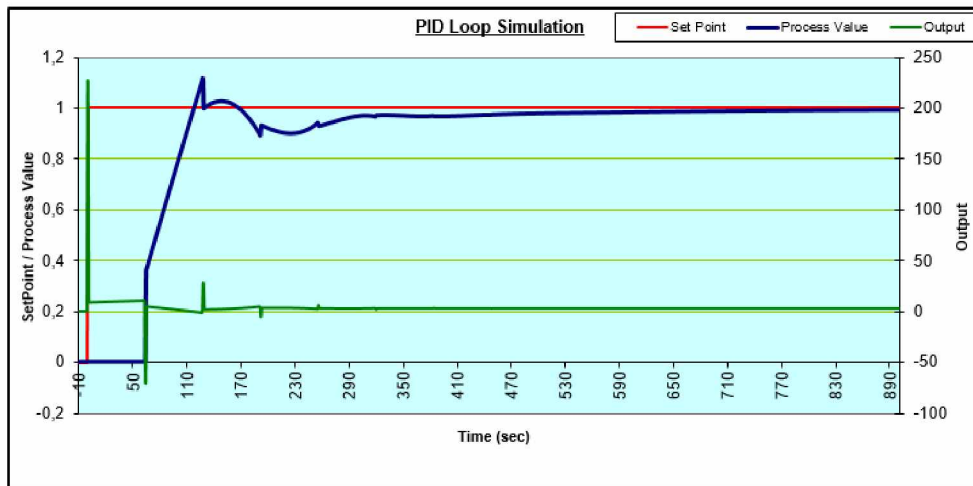
O uso do método CC apresenta uma característica oscilatória bem marcante, visto o alto valor no *overshoot* e o tempo do período, mostrado na Figura 6.9, levando o processo a atingir o estado estacionário em um tempo maior do que o esperado. Porém, o método consegue manter a estabilidade do processo no estado estacionário com erro praticamente nulo.

Figura 6.9 - Resposta simulada do sistema para a sintonia CC



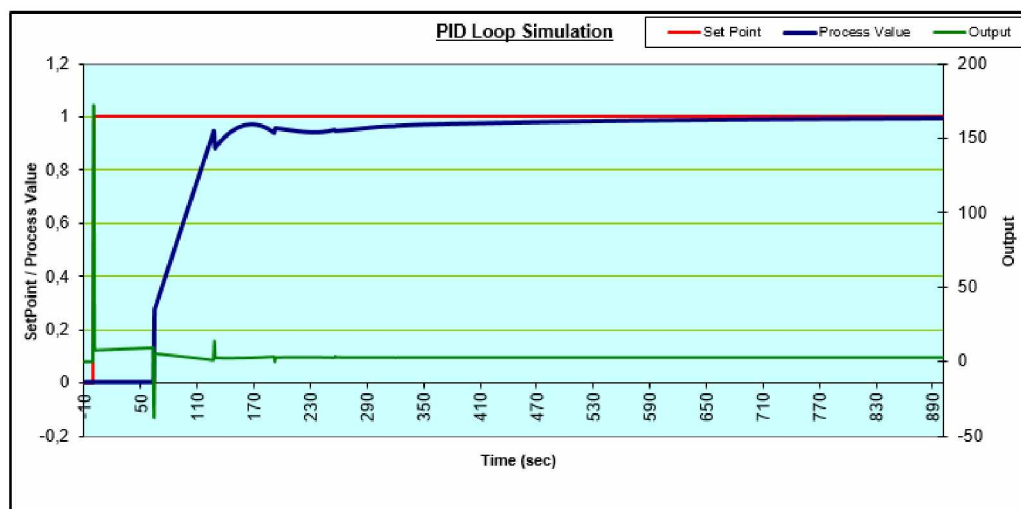
O modelo IAE apresenta uma sintonia suave com *overshoot* e oscilações mínimas e possui resposta rápida à mudança do processo e estabilização. Essas características podem ser observadas no gráfico da Figura 6.10.

Figura 6.10 - Resposta simulada do sistema para a sintonia IAE



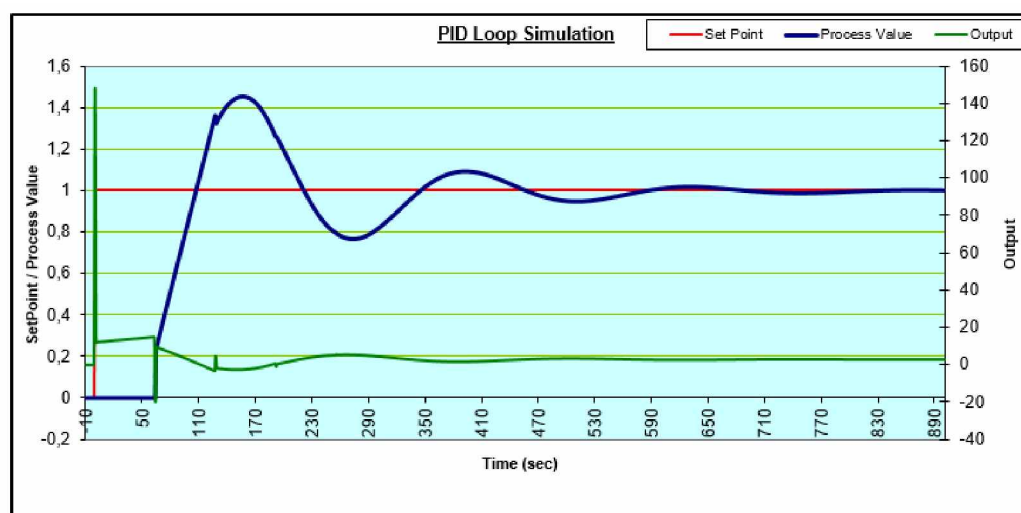
Por apresentar um *overshoot* nulo, o método ITAE apresenta um elevado tempo de assentamento, mas é um método com uma resposta rápida, apresenta mínimas oscilações e estabilidade com erro praticamente nulo, como mostrado na Figura 6.11.

Figura 6.11 - Resposta simulada do sistema para a sintonia ITAE



Por fim, o modelo IMC apresenta um aspecto oscilatório caracterizado por elevados valores no *overshoot* com um grande período de oscilação. Apesar de ter uma resposta rápida e ser capaz de manter a estabilidade com erro aproximadamente nulo no estado permanente, o método leva muito tempo até atingir a região de estabilidade como mostrado no gráfico da figura 6.12.

Figura 6.12 - Resposta simulada do sistema para a sintonia IMC



A Tabela 6.4 agrupa o resultado dos critérios avaliados para cada método. Assim, com estes valores e os gráficos apresentados, é possível determinar o melhor método de sintonia para descrever o controle do processo.

Tabela 6.4 - Resultado da avaliação dos métodos de sintonia de controle PID

Método	e_{∞} (%)	M_{so} (%)	P_U (s)	RD	t_A (s)	t_0 (s)	t_s (s)
ZN	-	75	165	0,685	375	85	21
CHR-0%	-	-	-	-	262	330	163
CHR-20%	-	24	173	0,024	245	105	35
CC	-	80	187	0,1875	447	88	21
IAE	-	10	-	-	275	117	45
ITAE	-	-	-	-	244	650	68
IMC	-	45	236	0,2	542	106	40

Nota-se que os resultados foram variados dentre os métodos, mas é importante ressaltar que todos eles foram capazes de manter um estado estacionário estável com erros praticamente nulos.

Então, é possível afirmar que o método ITAE é o mais adequado para descrever o sistema. Pois possui o melhor tempo de assentamento dentre todos os métodos, e não possui características oscilatórias visíveis. Apesar de ter um tempo de duplicação elevado, o método é capaz de atingir a região de estabilidade no menor tempo.

7. CONCLUSÃO

A manutenção realizada na unidade foi bem-sucedida uma vez que pode-se realizar a operação da mesma, podendo-se realizar o controle de temperatura e coletar os dados dos instrumentos com o auxílio do computador periférico.

Pode-se notar que em malha aberta, a temperatura de alimentação máxima atingida foi de 70 °C. Este fato pode estar limitado pela potência baixa do ventilador instalado na unidade, sendo incapaz de dissipar toda potência que as resistências fornecem.

As calibrações para as temperaturas de entrada e saída do sistema foram bem-sucedidas com valores de R^2 próximos a 1. Porém, será necessário realizar uma nova calibração para o sensor de umidade utilizando-se de um higrômetro mais preciso.

As equações de calibração serão exportadas para um arquivo em *software* Labview® onde será possível realizar, de maneira mais precisa, a leitura das medidas dos instrumentos em

questão e sua voltagem correspondente sem a necessidade de instrumentos de medidas auxiliares.

Os parâmetros da função de transferência do tipo FOPDT, puderam ser determinados de maneira satisfatória pelo método da curva de reação, podendo ser aplicados nos cálculos dos parâmetros do controle PID para diferentes métodos.

A aplicação dos métodos de sintonia para controle PID foram realizadas com sucesso, uma vez que todos os métodos utilizados puderam atingir erro praticamente nulo no estado estacionário. E, graças às análises gráficas e dos critérios de eficiência citados, pode-se concluir que o método mais adequado para descrever o processo é o método da integral do módulo do erro absoluto vezes o tempo (Rovira *et al.*, 1969). Uma vez que, o método é capaz de responder rapidamente às mudanças no *setpoint* e atingir a região de estado estacionário no menor tempo dentre os métodos estudados.

Por fim, no momento da publicação deste trabalho, a unidade experimental encontra-se operacional necessitando apenas de uma calibração mais precisa para a umidade e de testes práticos da sintonia de controle escolhida para consolidar sua escolha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. **“PID controllers: theory, design, and tuning”**, *Instrument society of America, North Carolina*, 1995.

BEQUETTE, B. W. **“Process control: modeling, design and simulation”**, Pearson Prentice Hall do Brasil, 2003.

CHIEN, K. L., HRONES, J. A.; RESWICH, I. B. **“On the Automatic Control of Generalized Passive Systems”**, *Transactions of ASME*, Vol. 74, 1952.

COHEN, G. H.; COON, G. A. **“Theoretical consideration of retarded control”**, *Transactions of ASME*, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.

CONTEMP **“Manual de instruções: Controladores de processos mod.: C704, C705 e C709”** São Caetano do Sul, São Paulo, Versão 1.02.

COUGHARNOWR, D. R.; KOPPER, L. B. **“Análise e controle de processos”**, Tradução de Carlos Augusto G. Perlingeiro e outros, Guanabara, Rio de Janeiro, 19478.

FAVARO, J. **“Controle preditivo aplicado à planta piloto de neutralização de pH”**, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2012

OGATA, K. **“Engenharia de Controle Moderno”**, Tradução Paulo Álvaro Maya, 4ª edição, Pearson Prentice Hall do Brasil, 2003.

RIVERA, D. E; MORARI, M.; SKOGESTAD, S. **“Internal model control, 4”**, *PID Controller Design*, Vol. 25, 1986.

ROVIRA, A.; MURRILL, P. W.; SMITH, C. L. **“Tuning controllers for setpoint changes”**, *Instrumentation and Control Systems*, Vol. 42, 67-69, 1969.

RUBAAI, A.; SITIRICHE, M. J. C.; OFOLI, A. R. **“Design and implementation of parallel fuzzy PID controller for high-performance brushless motor drives: An integrated environment for rapid control prototyping”**, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, 1090-1098, 2008

SEBORG, D. E; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A. **“Process dynamics and control”**, *New York, John Wiley & Sons*, 2ª edição, 2004

VIVACITY DIDACTIC **“Bancada de controle de temperatura”**, 1ª edição, 2013.

ZIEGLER, J. G.; NICHOLS, N. B. **“Optimum settings for automatic controllers”**, *Transactions of ASME*, 1942.

APÊNDICE A

Neste tópico serão apresentados os dados de temperatura e umidade obtidos durante os experimentos de calibração.

A Tabela A.1 compila todos os dados coletados de temperatura de alimentação, temperatura de saída e umidade relativa do ar de saída juntamente com a voltagem correspondente a cada medida.

Tabela A.1 – Dados obtidos dos experimentos de calibração

Temp.de aliment. (°C)	Tensão (V)	Temperatura de saída (°C)	Tensão (V)	Umidade relativa (%)	Tensão (V)
28	2,3277	22,3	3,24291	23	3,7412
31	2,35085	23	3,30103	29	4,34198
35	2,425575124	24,9	3,431916257	35	3,881200494
35	2,426069784	25,1	3,444747324	37	4,382481995
35	2,426164643	25,5	3,470366248	37	3,732621213
35	2,427141337	25,5	3,481764036	38	4,838702131
35	2,427391565	26	3,486742319	39	5,15842
35	2,427702999	26	3,460733352	40	3,517140299
37,5	2,443104659	27,3	3,566823977	41	4,122077327
38	2,445148629	27,5	3,58324962	41	3,777886241
40	2,458106828	28,5	3,628758935	42	4,562344542
40	2,458209871	28,6	3,636101733	43	5,023036641
40	2,459391497	28,6	3,643802041	44	5,40245
40	2,459938146	29,1	3,666441539	45	4,147634814
40	2,460663941	30	3,649895344	46	4,508674341
40	2,462045029	30,2	3,70586748	48	4,964437459
41	2,41422	30,4	3,64294	48	4,340716131
42,5	2,475796407	31	3,766662734	49	5,570117095
43	2,480649014	31	3,765947195	49	5,181017538
45	2,486941179	31,9	3,823255949	49	4,889078128
45	2,491150994	32,1	3,827065147	49	4,646119281
45	2,491855748	32,5	3,854524873	49	4,523899426
45	2,493433832	32,6	3,899744876	50	5,492462942
45	2,493945223	33,5	3,87443909	50	4,184496979
45	2,494082332	33,8	3,923667268	51	5,846603864
47,5	2,51015366	34,1	3,938841462	53	4,283656055
48	2,514052058	34,5	3,975520433	54	5,14134444
50	2,527494406	34,8	3,983060728	54	4,770700846
50	2,527809819	35,3	3,998888085	55	6,015583493
50	2,529036302	35,5	4,01317762	55	5,681566348
50	2,529135706	36,5	3,831292541	56	5,405247743

50	2,529279199	37,1	4,102106778	60	5,953831332
51	2,47658	37,5	4,04800754		
52,5	2,54523623	37,5	4,103283784		
53	2,547658485	37,7	3,95854		
55	2,563630049	38,4	4,165799866		
60	2,53173	44,2	4,26487		
64	2,55844	45,8	4,42641		

As duas primeiras colunas deram origem ao gráfico da Figura 6.1, as duas colunas do meio originaram o gráfico da Figura 6.2 e as duas ultimas colunas geraram o gráfico da Figura 6.3.

A Tabela A.2 a seguir mostra o comparativo entre as temperaturas de alimentação e temperatura da câmara de secagem.

Tabela A.2 - Comparação das temperaturas no sistema de secagem

Temperatura de alimentação (°C)	Temperatura de saída (°C)	Temperatura da câmara (°C)	Ta - Tc	Ts - Tc
40	30,2	30,5	9,5	-0,3
45	33,5	34	11	-0,5
35	26	26	9	0
40	30	29,5	10,5	0,5
45	36,5	32,5	12,5	4
50	37,5	37,5	12,5	0
35	26	25,5	9,5	0,5
40	28,6	29,5	10,5	-0,9
45	32,1	33	12	-0,9
50	35,3	36	14	-0,7
55	38,4	39,5	15,5	-1,1
35	24,9	25	10	-0,1
40	28,5	29	11	-0,5
45	32,6	34	11	-1,4
50	34,5	34,5	15,5	0
35	25,1	25,5	9,5	-0,4
40	28,6	29	11	-0,4
45	31,9	32,5	12,5	-0,6
50	34,8	39,5	10,5	-4,7
35	25,5	26	9	-0,5
38	27,5	28	10	-0,5
43	31	31	12	0
48	33,8	34	14	-0,2
53	37,1	36,5	16,5	0,6
35	25,5	26	9	-0,5

37,5	27,3	27,5	10	-0,2
40	29,1	29	11	0,1
42,5	31	30,5	12	0,5
45	32,5	32,5	12,5	0
47,5	34,1	34	13,5	0,1
50	35,5	35,5	14,5	0
52,5	37,5	37	15,5	0,5

Onde T_a é a temperatura de alimentação, T_s é a temperatura de saída e T_c é a temperatura no interior da câmara de secagem.