



Brazil Automation 2014

04 a 06 de novembro de 2014

Transamerica Expo Center | São Paulo / SP | Brasil



**COMPARAÇÃO ENTRE
SISTEMAS DE CONTROLE
PARA FORNOS INDUSTRIAIS**

Realização

Organização e Promoção



www.brazilautomation.com.br

COMPARAÇÃO ENTRE SISTEMAS DE CONTROLE PARA FORNOS INDUSTRIAIS.

Paulo Roberto Veloso Franco

prfranco@gmail.com

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

Alexandre Baratella Lugli

baratella@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações - Inatel

João Paulo Carvalho Henriques

joao.paulo@inatel.br

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel

Abstract

The temperature control in industrial ovens cooking, it is extremely important to ensure the quality of processed foods. Today in the industry, there are several techniques of control, for their ease of deployment, the On-Off control is the most applied and may be electromechanical thermostats and electronic controllers.

This article proposes a comparison between the On-Off controller with hysteresis control Proportional-Integral (PI) and Proportional-Integral-Derivative (PID), analyzing the parameters of temperature stability and power consumption. Is presented although the tuning method of PI and PID controllers by the second method of Ziegler-Nichols.

Keywords — energy consumption, temperature control, tuning.

Resumo

O controle de temperatura em fornos industriais de convecção, é de extrema importância para garantir a qualidade dos alimentos processados. Hoje na indústria, existem várias técnicas de controle de temperatura, pela sua facilidade de implantação, o controle *On-Off* é o mais aplicado, podendo ser termostatos eletromecânicos ou controladores eletrônicos.

Esse artigo propõe um comparativo entre o controlador *On-Off* com histerese, controle Proporcional-Integral (PI) e o Proporcional-Integral-Derivativo (PID), analisando os parâmetros de estabilidade de temperatura e consumo de energia. É apresentado ainda o método de sintonia dos controladores PI e PID através do segundo método de *Ziegler-Nichols*.

Palavras chave — Consumo de energia, controle de temperatura, sintonia

1. INTRODUÇÃO

A medição de temperatura é uma das variáveis mais medidas dos processos industriais. Assim, erros podem causar prejuízos aos processos produtivos, principalmente alimentícios. [1]

Os sistemas de controle de temperatura estão presentes em vários processos industriais. O forno industrial é um dos principais equipamentos de fornecimento de calor de uma planta industrial. [2] Nas indústrias de alimentação, destacam-se os fornos de convecção forçada.

Estes equipamentos trabalham movimentando um fluido (ar) artificialmente através de uma bomba, ventilador ou dispositivo semelhante. [2] Os fornos que trabalham com a tecnologia de convecção forçada, utilizam um ventilador para aumentar a circulação de ar na câmara de cocção, tornando o fluxo de calor maior^[1] e reduzindo de 25% a 75% a temperatura ajustada, quando comparado a um forno de convecção natural. [3]

O objetivo desse trabalho consiste em sintonizar corretamente os parâmetros de um controlador PI (Proporcional/Integral) e PID (Proporcional/Integral/ Derivativo) para um forno elétrico de convecção forçada e comparar os seus desempenhos com um controlador de temperatura *On-Off*, comparando os parâmetros de estabilização de temperatura e economia de energia elétrica.

2. TIPOS DE CONTROLE

2.1. Controle Liga-Desliga (On-Off)

Ogata define o Controle Liga-Desliga como: Sistema de duas posições, este apresentam os estados: "ligado" (On) e "desligado" (Off). Esse controle é amplamente utilizado em sistemas de industriais e domésticos, devido a sua simplicidade e baixo custo.^[4]

Considerando $u(t)$ o sinal de saída e $e(t)$ o erro atuante, o sinal $u(t)$ alterna entre um valor máximo ou um valor mínimo, dependendo do sinal de erro (positivo ou negativo), conforme ilustra a equação (1):

$$\begin{aligned} u(t) &= U_1, \text{ para } e(t) > 0 \\ &= U_2, \text{ para } e(t) < 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde U_1 e U_2 são constantes.

Os controladores On-Off possuem um intervalo diferencial, conforme ilustra a Figura 1, que faz com que o controlador mantenha o seu valor presente até que o erro atuante tenha se movido ligeiramente até o valor de zero^[4]. Esse intervalo é projetado para impedir um alto ciclo de operação do mecanismo de comutação, conforme ilustra a figura 1.^[4]

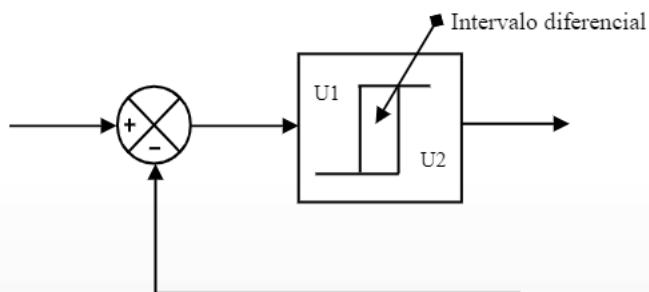


Fig. 1 - Diagrama de blocos de um controlador On-Off com intervalo diferencial [4]

Em um controle de temperatura *On-Off*, o acionamento do sistema de aquecimento é acionado quando a variável de processo (PV) é inferior a temperatura de *set-point* (SP) e desligado quando PV torna-se maior que SP. Para evitar acionamentos repetitivos, utiliza-se o intervalo diferencial, também chamado de histerese, para o retorno do acionamento do sistema de aquecimento, quando PV for menor que SP. Considerando o sinal de saída como $u(t)$, tem-se a equação (2):

$$\begin{aligned} u(t) &= 1, && \text{para } PV < (SP - \text{Histerese}) \\ u(t) &= 0, && \text{para } PV > SP \end{aligned} \quad (2)$$

A curva de temperatura de um sistema On-Off pode ser exemplificada conforme a Figura 2:

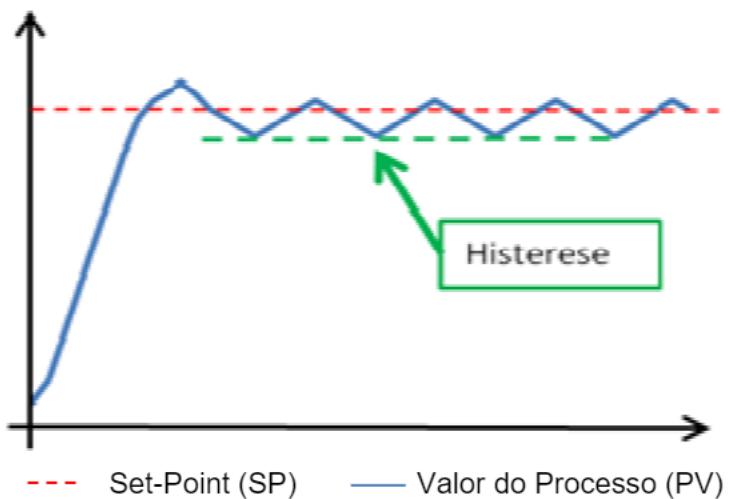


Fig. 2 - Gráfico da curva de temperatura de um controlador On-Off com Histerese. [4]

2.2. Controle PID

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é uma técnica de controle que calcula inicialmente o “erro” entre a sua variável controlada (PV ou valor de processo) e seu valor desejado SP (set-point). Em função deste “erro” gera um sinal de controle, que tem como objetivo eliminar este desvio [2].

O algoritmo PID é composto pela junção de três módulos distintos, estes são: Proporcional (P), Integral (I) e Derivativo (D). Cada um desses módulos atua na correção do erro do processo, ao unir as três técnicas, obtém-se o Controlador PID.

2.3. Controlador Proporcional (P)

Gera a sua saída proporcionalmente ao erro ($e(t)$). O fator (K_p) é conhecido como ganho do controlador [2]. A equação (3) demonstra o funcionamento do controlador P.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + u_0 \quad (3)$$

onde u_0 é o valor inicial.

A Figura 3 mostra a estrutura de um controlador tipo P. Pode-se observar que quanto maior o ganho, maior será a ação do controlador para um mesmo desvio ou erro na variável de processo. [2]

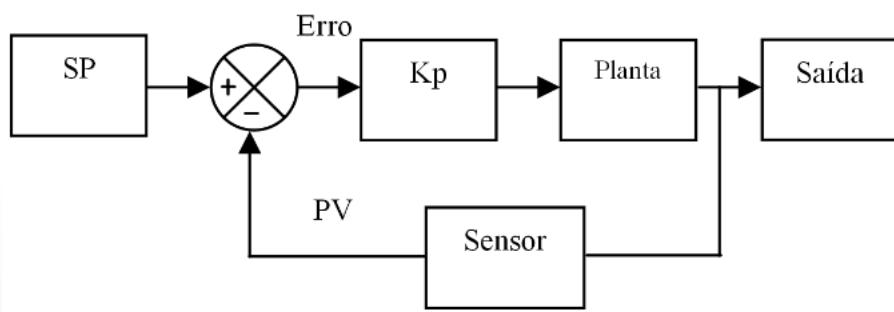


Fig. 3 - Diagrama em blocos do Controlador Proporcional (P) [2]

Assim, o erro do controlador pode ser definido como a diferença entre a variável de processo (PV) e o set-point (SP). [2]

2.4 Controlador Proporcional-Integral (PI)

Gera, em sua saída, um sinal proporcional ao erro (K_p) e à integral do erro (T_i). Segundo Ogata, o tempo integral ajusta a ação do controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional como a integral da ação de controle, e o inverso do tempo integral mede o numero de vezes por minuto que a parte proporcional da ação de controle é duplicada, essa medida é chamada de *taxa de restabelecimento*.^[4]

Assim, a função do controle PI é definida conforme a equação (4).

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4)$$

2.5 Controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Combinando as três técnicas: Proporcional, Integral e Derivativo, obtém-se o Controle Proporcional-Integral-Derivativo, também conhecido como Controlador de três termos, possui a vantagens de cada uma das três ações de controle individuais.^{[4] [8]} A equação (5) do controle PID está ilustrada a seguir.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (5)$$

Onde K_p é o ganho proporcional, T_i o tempo integral e T_d o tempo derivativo. Combinando os três controles de forma paralela, obtemos o diagrama em blocos, conforme a Figura 4.

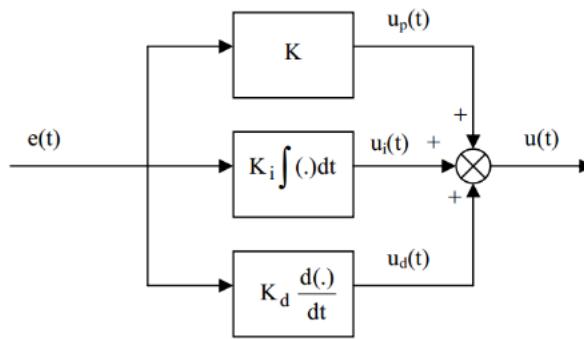


Fig. 4 - Diagrama em blocos do Controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) [4]

2.6 Método de Sintonia de Controladores

Ziegler e Nichols propuseram uma técnica onde é possível determinar os valores dos parâmetros do controlador, como: ganho proporcional K_p , tempo de integral T_i e o tempo derivativo T_d , com base nas características de resposta transitória do processo a controlar.^[4] Essa sintonia pode ser obtida através de experimentos sobre o processo.

Para a determinação dos parâmetros do controlador, o primeiro método de Ziegler-Nichols, propõe a avaliação da resposta do processo a controlar, através da aplicação de um degrau unitário.^[4] Segundo Ogata [4], se o processo a controlar não envolver integradores nem polos dominantes complexos-conjugados, a curva de resposta ao degrau unitário pode se assemelhar a uma curva em S^[4], como é mostrado na Figura 5. A Tabela 1 ilustra os parâmetros dos controladores em função das constantes obtidas do processo.

Tabela 1: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (primeiro método). [4]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

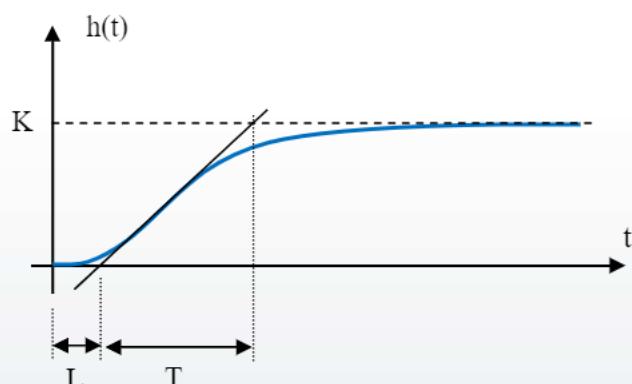


Fig. 5 - Curva de resposta em forma de “S” [4]

De acordo com Ogata [4], traçando uma reta tangente à curva em forma de S, no ponto de inflexão, e determinando as interseções com o eixo dos tempos e com a reta $c(t) = K$, é possível obter as constantes de tempo de retardo (L) e a constante de tempo (T). Assim, é possível ajustar os valores de ganho do controlador, conforme ilustrado na Tabela 1. [4]

No segundo método de sintonia de Ziegler-Nichols, são ajustados os valores de $T_i = \infty$ e $T_d = 0$, e o valor de K_p é aumentado gradativamente de 0 até o valor de critico K_{cr} , onde o sinal de saída apresentará oscilações constantes, conforme ilustra a Figura 6. Através da medição do período critico P_{cr} , é possível determinar os parâmetros PID, conforme Tabela 2.

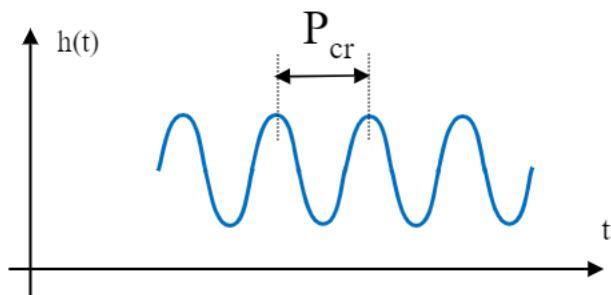


Figura 4 – Oscilação mantida com período P_{cr} . [4]

Tabela 2: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols (segundo método). [4]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0,5 K_{cr}$	∞	0
PI	$0,45 K_{cr}$	$\frac{1}{1,2} P_{cr}$	0
PID	$0,6 K_{cr}$	$0,5 K_{cr}$	$0,125 P_{cr}$

3. DESENVOLVIMENTO

3.1 Identificação do Sistema

O objetivo da aplicação prática é a realização do comparativo dos controladores On-Off, PI e PID aplicados a fornos industriais, afim de verificar qual seria a melhor opção de utilização. Para a realização desse comparativo, é necessário o levantamento dos parâmetros K_p , T_i e T_d do forno de convecção forçada de um determinado fabricante. [7] A Figura 7 ilustra o forno utilizado no ensaio. A potência elétrica da resistência de aquecimento do forno é de 3,6kW.

Com o auxilio de um *varivolt*, um degrau de 50Vac foi aplicado na entrada de energia do forno e através de um medidor de temperatura, foi medido a curva de resposta da temperatura, conforme demonstrado na Figura 8.



Fig. 7 - Forno de Convecção forçada da empresa Prática [7]

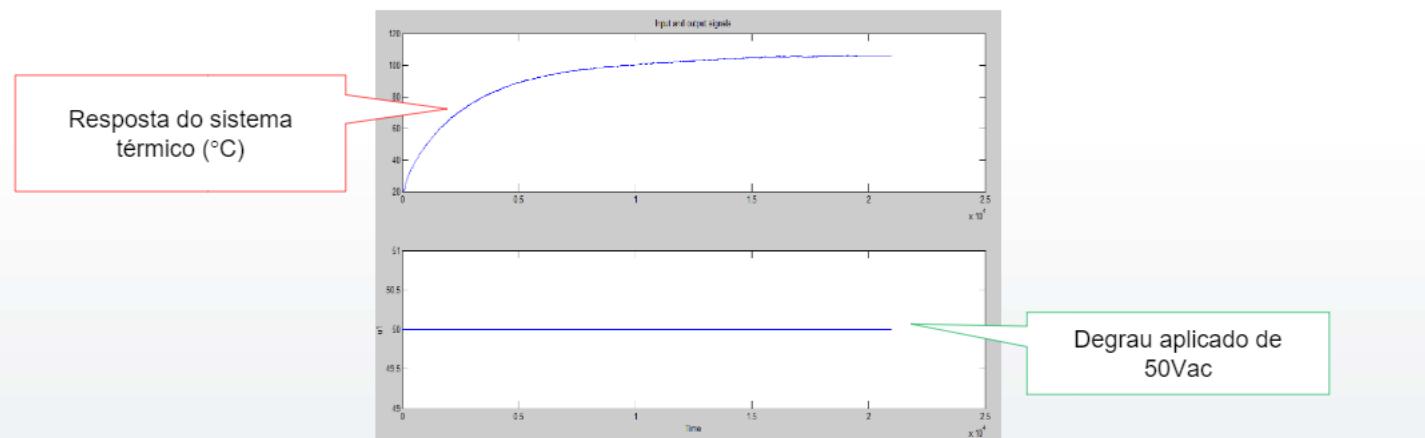


Fig. 8 - Degrau aplicado de 50Vac e resposta do sistema térmico

Através das informações obtidas, utilizou-se um software matemático para levantamento da função de transferência do sistema. A equação (6) do sistema é mostrada a seguir e descreve a função obtida.

$$H(s) = \frac{2}{2500s+1} \quad (6)$$

Com a função de transferência conhecida, foi realizada a simulação do sistema. A figura (9) mostra o diagrama de blocos utilizado para a simulação, que tem com o objetivo, determinar o valor do ganho crítico K_{cr} . O atraso de transporte de 20s, medido na resposta do sistema térmico, foi inserido no bloco "Transport Delay" no diagrama em blocos, a fim de modelar corretamente o sistema. Esse valor foi levantado através da medição do tempo de resposta ao degrau aplicado.

Para o levantamento do valor de K_{cr} , foram inseridos de forma empírica, vários números e observados a resposta de saída do sistema. O objetivo era que a saída apresentasse oscilações constantes, conforme ilustrado na figura (10). Com esse método o valor de K_{cr} encontrado foi de 98,5.

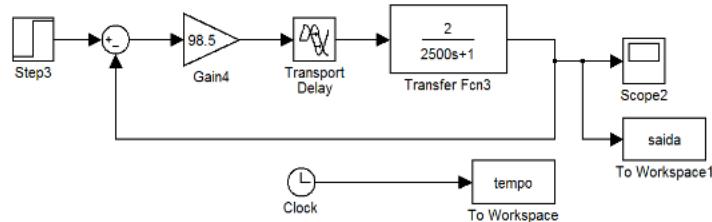


Fig. 9 - Diagrama em blocos utilizado na simulação.

Medindo o período crítico P_{cr} , presente nas oscilações constantes do sistema, o valor encontrado foi de: 79,5, conforme mostrado na Figura 11.

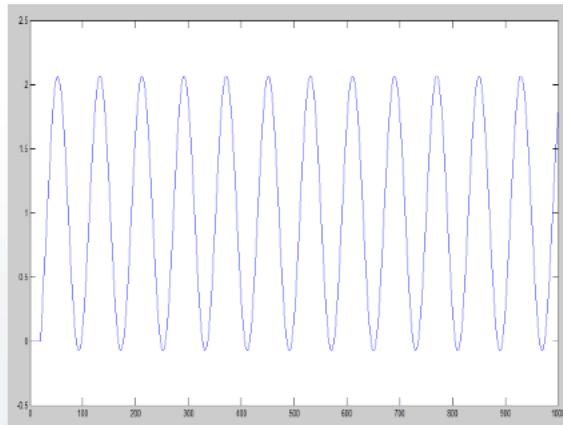


Fig. 10 - Gráfico com oscilações constantes.

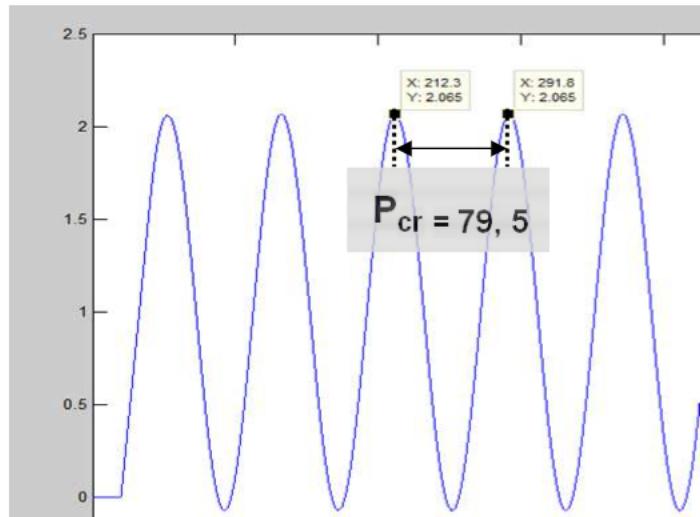


Fig. 11 - Período crítico P_{cr} medido no gráfico.

Utilizando o segundo método de Ziegler-Nichols, os valores encontrados para K_p , T_i e T_d foram calculados conforme Tabela 3:

Tabela 3: Valores calculados usando segundo método de Ziegler-Nichols [4]

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	49,25	∞	0
PI	44,325	66,25	0
PID	59,1	39,75	9,9375

3.2 Componentes utilizados nos ensaios

Para os ensaios comparativos entre os controles *On-Off*, PI e PID foi utilizado o mesmo forno de convecção forçada usado no levantamento dos parâmetros PID, através de um controlador de temperatura eletrônico [5], ilustrado na Figura 12. Com esse modelo, é possível o inserir manualmente os parâmetros do controle PI e PID e em seguida, configurá-lo para *On-Off*.

O controlador possui uma saída para *PWM* (Modulação por largura de pulso) sendo possível modular a potência da resistência de aquecimento através de um Rele de Estado Sólido. Para os ensaios do controle *On-Off* foi considerado uma histerese assimétrica de 2°C, igual ao controle original do forno.



Fig. 12 - Controlador de temperatura. [5]

O método para os ensaios de comparação dos controladores foi realizado com a temperatura ajustada em 250°C, durante 1 hora. Nesse período, através de um sensor de temperatura termopar tipo K, ligado na entrada de um registrador gráfico (*data logger*), ilustrado na Figura 13, levantou-se a curva de temperatura do forno. O consumo de energia foi medido através de um Analisador Qualidade de Energia [9], ilustrado na Figura 14.



Fig. 13- Registrador [6]



Fig. 14.- Analisador de Qualidade de Energia [9]

3.3 Ensaios comparativos entre controles *On-Off*, *PI* e *PID*

Foram ensaiados os sistemas PI, PID e *On-Off* durante 2 horas, com a temperatura ajustada em 250°C e o forno a vazio, simulando uma rotina de pré-aquecimento e *stand-by*.

A Figura 15 demonstra o gráfico das temperaturas levantadas. O controle PID apresentou um *overshoot* de 257,9°C (+3,16%), o controle PI 255°C (+2%) e o *On-Off* 254°C (+1,6%). Entretanto, a temperatura média na câmara com o sistema PID permaneceu mais estável. A média encontrada foi de 241,6°C, contra 240,4°C no sistema PI e 239,6°C no *On-Off*, conforme demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Comparativo entre *Overshoot* e Temperatura média.

Overshoot entre os controles			
	PID (°C)	PI (°C)	On-Off (°C)
Overshoot	257,9	255,0	252,0
Temperatura Média	241,6	240,4	239,7

A Tabela 5 mostra a medição de consumo de energia com 1 hora e com 2 horas entre os três controles utilizados. A Figura 15 ilustra os gráficos de saída (PV) para os três controladores e o *set-point* de 250°C.

Tabela 5: Comparativo do consumo de energia elétrica

Consumo acumulado entre os controles			
Tempo	PID (kW.h)	PI (kW.h)	On-Off (kW.h)
1h	1,870	1,916	1,934
2h	3,000	3,062	3,095

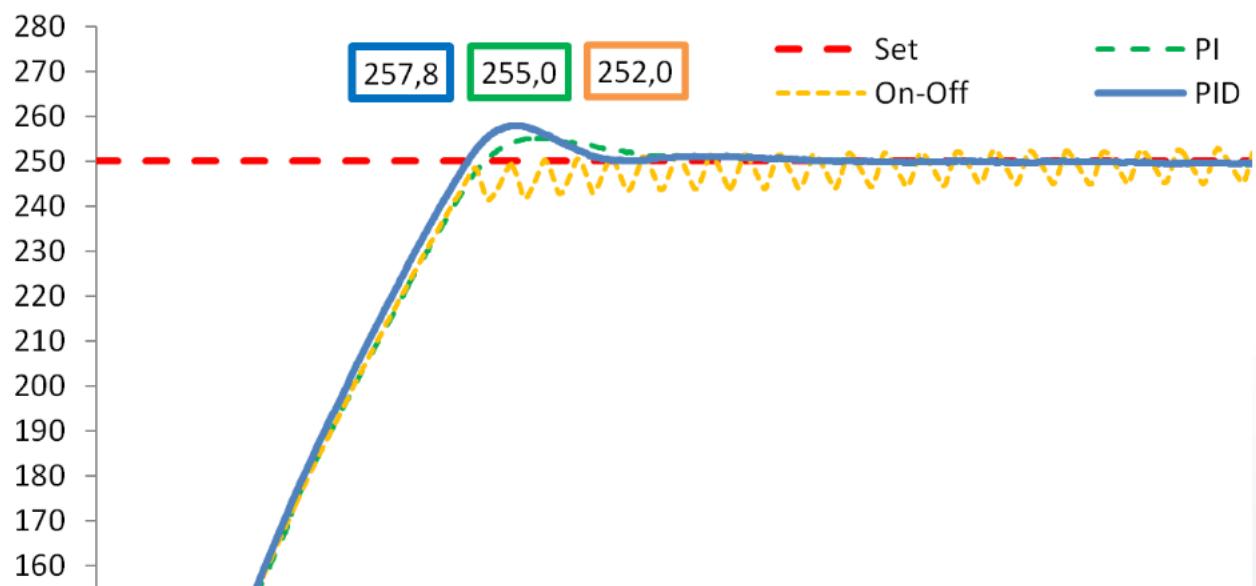


Fig. 15 - Gráfico comparativo das temperaturas

Comparando os tipos de controles utilizados, o PID foi o que apresentou o menor consumo de energia elétrica, sendo 95W.h menor que o controle *On-Off* e 62W.h menor do que o PI, durante as duas horas de testes. Essa redução representa uma economia de 3,2% de consumo de energia elétrica, quando comparado com o atual controle *On-Off* e 2% comparando com o PI, durante o intervalo das duas horas de teste.

O *overshoot* do controle PID de 7,9°C (aproximadamente 3%) não significa nenhum problema para a aplicação, pois acontece apenas durante o tempo de acomodação do sistema no primeiro ciclo.

4. CONCLUSÃO

O trabalho proposto visa a comparação entre três técnicas de controle de temperatura (PI, PID e *On-Off*) em um forno elétrico industrial de convecção forçada, visando analisar a oscilação de temperatura e o consumo de energia elétrica.

Para a sintonia dos controladores PI e PID, foi levantado a função de transferência do sistema, e utilizado o segundo método de sintonia de *Ziegler-Nichols*, definindo-se assim, os parâmetros K_p , T_i e T_d . Os parâmetros calculados servem somente para o modelo de equipamento ensaiado. Para outros fornos de convecção forçada, devem-se realizar os testes e obter novos parâmetros através da função de transferência do sistema.

Para os ensaios, foi escolhida a temperatura de 250°C (*set-point*), utilizada na rotina de pré-aquecimento e *stand-by* do forno. Essa rotina mantém o forno vazio, aguardando a utilização do operador. Em média, o forno permanece quatro horas por dia nessa função, separados por dois períodos de duas horas por dia com pré-aquecimento.

O controle PID apresentou uma economia de 95W.h (3,2%) no consumo de energia. Esse valor multiplicado por duas vezes o ciclo diário, representa uma economia de 190W.h por dia. Mensalmente, essa economia é de 5,7kW.h e anualmente 68,4kW.h, por equipamento.

Os resultados obtidos durante os ensaios podem ser considerados satisfatórios, pois de acordo com os objetivos desse trabalho, a sintonia dos parâmetros dos controladores PI e PID, e comparativos de estabilização de energia e economia de energia elétrica, foram obtidos com êxito. A técnica de controle PID foi aplicada ao projeto do equipamento ensaiado. Outros fornos de convecção forçada poderão ser ensaiados futuramente, visando a comparação entre as técnicas de controle apresentadas e a melhor aplicação delas, de acordo com cada produto.

Os resultados obtidos durante os ensaios podem ser considerados satisfatórios, pois de acordo com os objetivos desse trabalho, a sintonia dos parâmetros dos controladores PI e PID, e comparativos de estabilização de energia e economia de energia elétrica, foram obtidos com êxito. A técnica de controle PID foi aplicada ao projeto do equipamento ensaiado. Outros fornos de convecção forçada poderão ser ensaiados futuramente, visando a comparação entre as técnicas de controle apresentadas e a melhor aplicação delas, de acordo com cada produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. B. Lombardi Jr., P. U. Ávila, **Termometria: Conceitos e Aplicações** 1^a edição. Rio de Janeiro-RJ, Editora Érica, 2010, 120 pag.
- [2] M. C. M. M. de Campos, H. C. G. Teixeira, **Controles Típicos de Equipamentos e Processos industriais**, 1^a edição. São Paulo –SP, Editora Edgard Blücher, 2006, 380 pag.
- [3] J. Stevens, C. Scriven, **Food Equipment Facts**. Welmar-Texas, Chips Books, 1999, 435 pages.
- [4] K. Ogata, **Engenharia de Controle Moderno**, 3^a edição. São Paulo –SP, Editora LTC, 2000, 828 pag.
- [5] Coel – Automação Industrial – Manual de Instruções HW4300, disponível em:
http://www.coel.com.br/wpcontent/uploads/2013/07/m_HW4300_r2_IR.pdf, acessado em 21/05/2014.
- [6] Novus - Manual de Instruções FieldLogger, disponível em:
http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/v15x_manual_fieldlogger_portuguese_a4.pdf, acessado em 21/05/2014.
- [7] Prática Produtos S/A – disponível em: <http://www.praticaforros.com.br/>, acessado em 21/05/2014.
- [8] R. C. Dorf, R. H. Bishop, **Sistemas de Controle Modernos**, 8^a edição. Rio de Janeiro-RJ, Editora LTC, 2001, 680 pag.
- [9] Minipa – disponível em: <http://www.minipa.com.br/>, acessado em 03/06/2014.

DADOS DOS AUTORES

Paulo Roberto Veloso Franco.

Pós-Graduando em Engenharia de Sistemas Eletroeletrônicos, Controle e Automação Industrial.

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel.

Av. João de Camargo, Número 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG.

CEP 37540-000 - Fone: (35) 9192 9859.

prvfranco@gmail.com

Prof. Dr. Alexandre Baratella Lugli.

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel.

Coordenador e professor de curso superior e professor da pós graduação.

Av. João de Camargo, Número 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG.

CEP 37540-000 - Fone: (35) 3471 9262 - Fax: (35) 3471 9314.

baratella@inatel.br

Prof. Msc. João Paulo Carvalho Henriques.

Instituto Nacional de Telecomunicações – Inatel.

Professor de curso superior e professor da pós graduação.

Av. João de Camargo, Número 510 - Santa Rita do Sapucaí – MG.

CEP 37540-000 - Fone: (35) 8701.1450.

joao.paulo@inatel.br