

MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM CHOCADÉIRAS UTILIZANDO CONTROLADOR PID

TEMPERATURE MEASUREMENT IN HATCHERS USING PID CONTROLLER

Luiz Gustavo Sagrilo

Faculdade de Engenharias e Arquitetura, Maringá, PR, Brasil

Guilherme Américo Rosa

Faculdade de Engenharias e Arquitetura, Maringá, PR, Brasil

Jackson Tsukada

Faculdade de Engenharias e Arquitetura, Maringá, PR, Brasil

DOI: <http://dx.doi.org/10.31512/missioneira.v25i1.1484>

Recebido em: 19.08.2023

Aceito em: 01.11.2023

Resumo: O presente estudo, desenvolveu um protótipo de chocadeira com objetivo controlar a estabilidade da temperatura dentro do ambiente por meio do fornecimento de calor, utilizando para isso o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo). Para sintonizar os parâmetros do controlador, foi empregado métodos de calibração baseados em modelo, especificamente em modelos de primeira ordem. Desta forma, foi possível encontrar três ajustes distintos para o controlador. Para o desenvolvimento do processo extraiu-se o modelo que representava a dinâmica do sistema, que neste caso é de primeira ordem. A partir disso, foram feitas simulações via software afim de confrontar os resultados. Para mesurar seu comportamento foram empregados índices de desempenho encontrados na literatura de sistemas de controle. Desta forma, pode-se concluir que a aplicação do controlador PID em chocadeiras pode fornecer um controle de temperatura eficaz, além de agregar ao processo um menor consumo de energia, garantindo qualidade ao produto final e aumentando a vida útil dos componentes que integram o aparelho.

Palavras-chave: Controlador PID. Chocadeira. Qualidade. Temperatura e Sintonia.

Abstract: Today's production processes demand speed and quality of the final product. In order to meet this demand, technological resources need to be renewed and adapted according to the needs that arise. In this direction, many studies are developed in order to improve technologies capable of meeting the new objectives. The present study developed a brooder prototype whose objective is to maintain temperature stability within the eggs environment by means of controlled heat supply through the application of the PID (Proportional Integral and Derivative) temperature controller theory. With the use of specific methods that pointed to the best responses to the simulation, the equation and the tuning that direct the control operation were extracted. The PID was written in the form of the C++ language and implemented in the arduino that assumed, in the prototype, the function of "brain" in the functioning of the system. The discussions and the results showed that the application of the PID controller in the incubators can, unlike the On / Off device, avoid the interruptions and resumption of electric power supply, bringing to the process a guarantee of temperature stability, avoiding damages, increase in the life of the components that integrate the device, reducing the consumption of electricity, reducing costs, and above all optimizing the quality of the final product.

Keywords: PID Control. Brooder. Quality. Temperature and Tuning.



A Revista Missioneira está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional.

1 Introdução

No cenário da tecnologia, diversos estudos vêm sendo realizados no sentido de encontrar formas de otimizar a produção de frangos de corte. No início desta atividade comercial, raças rústicas eram comercializadas vivas em feiras. A partir de 1970, perceberam-se inovações tecnológicas voltadas a este setor como novas linhagens de matrizes e modernos equipamentos nos setores tanto de criação, como no abate e processamento (Espíndola, 2012).

Todos os fatores formam um conjunto que precisa estar em harmonia para que o produto final ofereça qualidade ao consumidor. Neste sentido, a tecnologia foi desenvolvida em função de economizar tempo, acelerando a produção e visando a qualidade. Nesta linha de pensamento, o presente estudo utilizou um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) para ajuste de temperatura como forma de otimizar a utilização de energia elétrica em chocadeiras, gerando estabilidade de temperatura oferecida pelo controle constante.

No caso das aves, Nakage et al. (2002) afirma que “a temperatura é o principal fator físico que determina o sucesso da incubação. Conseqüentemente, é essencial determinar uma temperatura que promova uma eclodibilidade mais elevada, garantindo a qualidade da incubação”. No caso de chocadeiras, portanto, é o fator fundamental para o sucesso.

Chocadeiras ou incubatórios são dispositivos que induzem, pelo fornecimento de temperatura, a quantidade de calor adequada para que o desenvolvimento dos embriões dentro dos ovos ocorra de forma saudável. Portanto, o controle rigoroso de temperatura é um dos fatores decisivos para a qualidade do produto final.

Grande parte das chocadeiras é automática, e, em sua maioria, o controle de temperatura trabalha em um sistema de liga e desliga (On/Off). O controlador PID aplicado a uma incubadora tem como princípio evitar que ocorram variações na temperatura interna. Ao contrário do dispositivo *On/Off*, controladores PID fornecem a quantidade de potência adequada, objetivando suprir a temperatura no ambiente dos ovos, independente do clima externo a chocadeira, visto que as interrupções e retomadas de fornecimento de energia elétrica podem ser consideradas como um ruído para o sistema.

Sendo assim, o controlador PID traz para o processo uma garantia de qualidade do produto final, gerado pela estabilidade da temperatura, evitando perdas na germinação dos ovos, além de garantir um aumento na vida útil dos componentes que compõe a incubadora e redução no consumo de energia. Para o estudo foi desenvolvido um protótipo de chocadeira, com o objetivo de garantir a estabilidade térmica necessária ao desenvolvimento de embriões de frango em seu período de maturação.

Para determinar a sintonia do controlador PID, utilizou-se os métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e IMC (*Internal Model Control*), com o intuito de assegurar o melhor tempo de resposta e menor sobressinal. Além disso, foi utilizado índices de desempenho para mensurar o desempenho do controlador.

2 Sintonia de controladores PID

Esta seção descreve de forma sucinta a estrutura matemática do controlador PID. Além disso, é apresentado os métodos de sintonia baseado em modelos para ajustar os parâmetros do

controlador.

3 Controlador PID

O controlador PID apresenta diferentes estruturas de implementação, ou seja, os métodos de sintonia, equação recursiva e topologia, por exemplo, variam de acordo com o fabricante (Garcia, 2017). No entanto a estrutura padrão de um controlador PID ideal contínuo é descrito pela expressão (Åström e Hägglund, 2006):

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (1)$$

No qual $e(t)$ representa o erro gerado pela diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída, K_p é o ganho proporcional, T_i constante de tempo integral e T_d constante de tempo derivativo.

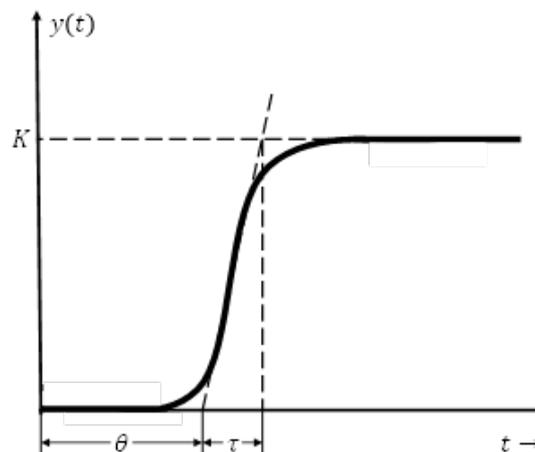
Os parâmetros do controlador dever ser ajustados até que o sistema alcance seu objetivo de controle, conhecida como sintonia do controlador. Uma alternativa para ajustar os parâmetros PID, é utilizar a sintonia baseada em modelo, aproximado o processo por equações matemáticas de primeira ou segunda ordem, utilizando variáveis contínuas e discretas (Garcia, 2017; Coelho e Coelho, 2015).

4 Método de Ziegler-Nichols

Dois métodos clássicos para determinar os parâmetros do PID foram apresentados por Ziegler e Nichols em 1942 e, nos dias atuais, alguns fabricantes ou usuários de controladores ainda utilizam este método, ou suas variações, para ajuste de controladores (Coelho, Jeronymo e Araújo, 2019).

No primeiro método, deve-se excitar o sistema para que o mesmo reposta de forma oscilatória e amortecida promovendo uma taxa de decaimento de 0,25. O segundo método é conhecido como curva de reação, onde é feito um teste experimental com o sistema em malha aberta, onde deve-se aplicar uma entrada em degrau no processo, gerando uma curva de reação (resposta em S), como ilustrado na Fig. 1 (Garcia, 2017; Franklin, Powell e Emami-Vaeini, 2013).

Figura 1 - Curva de reação em formato S.



sendo θ o atraso de transporte, τ a constante de tempo e K o ganho estático do sistema. A representação matemática que descreve a curva de reação, Fig. 1, é dada por uma função de transferência de primeira ordem, isto é, (Coelho e Coelho, 2015):

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2)$$

A sintonia do controlador PID utilizando o método da curva de reação é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros de sintonia pela curva de reação

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1,2 \frac{\tau}{\theta}$	2θ	$0,5\theta$

5 Método de Cohen-Coon

Outra técnica conhecida para ajuste de controladores foi apresentada por Cohen-Coon. Este método é aplicável a processos modelados por sistemas de primeira ordem (2) e utiliza um procedimento de posicionamento de polos dominantes. A localização dos polos promove uma taxa de decaimento de $\frac{1}{4}$ (Normey-Rico e Camacho, 2007). A Tabela 2, apresenta os ajustes do controlador.

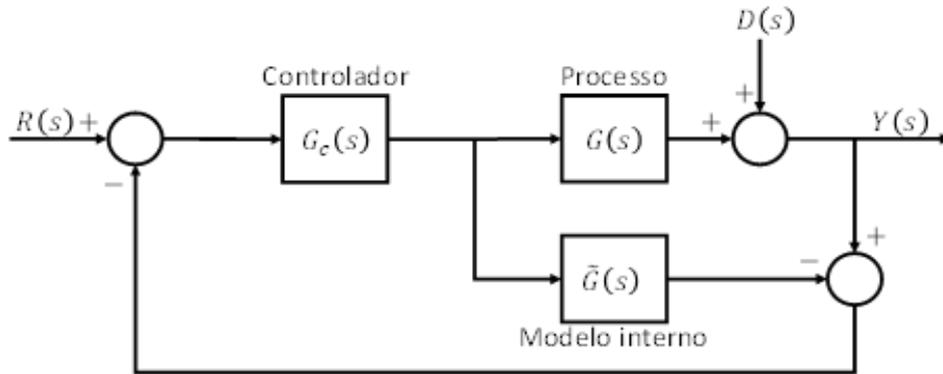
Tabela 2 - Sintonia proposta por Cohen-Coon

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{4\tau}{3\theta} + \frac{1}{4} \right)$	$\theta \frac{32 + \frac{6\theta}{\tau}}{13 + \frac{8\theta}{\tau}}$	$\frac{4\theta}{11 + \frac{2\theta}{\tau}}$

6 Controle por modelo interno (IMC – *Internal Model Control*)

O método do IMC é uma técnica de controle baseado em modelo. Sua estrutura pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura de malha do controlador IMC



Partindo da Fig. 2, Riviera, Morari e Skogstad (1986) desenvolveram um método que utiliza o modelo interno para projetar controladores que apresentem dinâmicas desejadas, no qual dependem apenas da complexidade do modelo da planta e dos parâmetros de projeto estabelecido pelo usuário. Processos com dinâmicas de primeira ordem, Fig. 1, podem ser empregados para ajustar os parâmetros do controlador, como pode ser observado na Tabela 3 (GARCIA, 2017).

Tabela 3 - Sintonia do controlador PID pelo método IMC

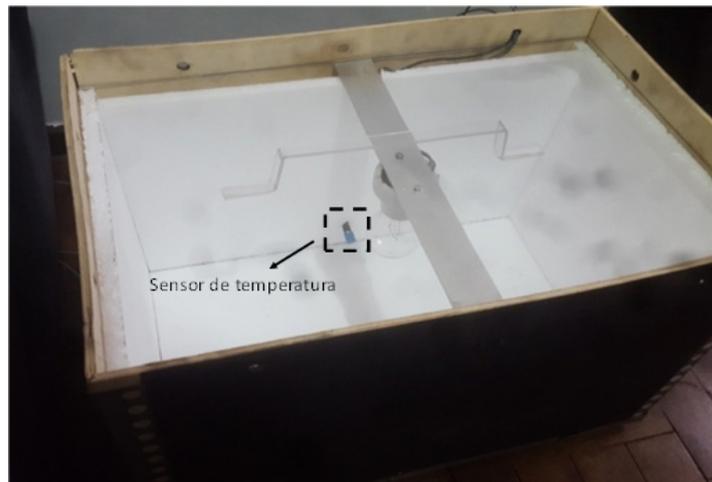
Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{2\tau + \theta}{2\tau_c + \theta} \right)$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau\theta}{2\tau + \theta}$

7 Resultados e discussões

Para o protótipo da chocadeira foi utilizada uma caixa de madeira revestida com isopor na parte interna objetivando a retenção do calor no ambiente, conforme ilustrado na Fig. 3. Além disso, instalou-se um suporte de alumínio para fixação do soquete da lâmpada incandescente a fim de aquecer o interior da chocadeira.

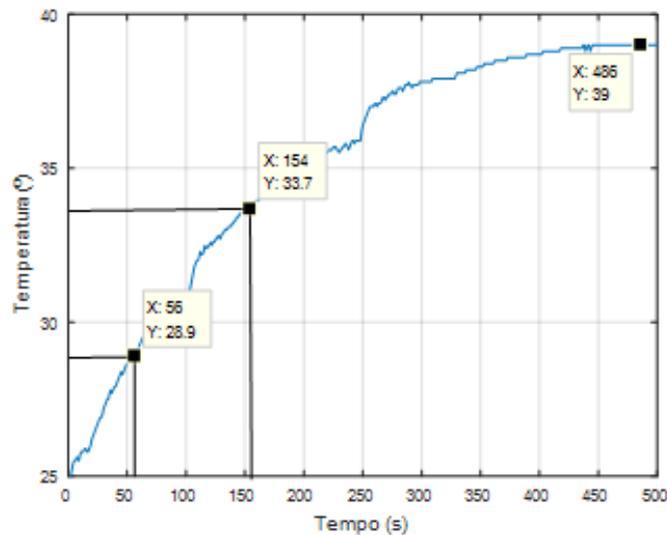
Próximo à base da estrutura, fixou-se o sensor DHT11 para aferir a temperatura ambiente fornecida aos ovos em seu processo de maturação. Uma tampa de policarbonato transparente, foi instalada na parte superior vedando o ambiente contra a oscilação de temperatura e possibilitando a visão do interior da chocadeira.

Figura 3 - Ilustração da estrutura interna da estufa



Após a montagem da estufa, o próximo passo foi ligar o sistema para obter a dinâmica do processo, ou seja, uma relação tempo x temperatura. O sensor DHT11 aferiu a temperatura em intervalos de um segundo, limitando em 39°C. A Fig. 4 ilustra a curva de reação do sistema obtido através do software MATLAB.

Figura 4 - Curva de reação da chocadeira.



De acordo com a Fig. 4, a temperatura iniciou-se em 25°C levando 464 segundos para atingir os 39°C. A curva de reação do processo apresenta uma característica de primeira ordem, ou seja, pode-se encontrar o modelo utilizando (2). Na literatura, existem diversas técnicas para identificação de K , τ e θ . Neste caso, adotou-se o método de Smith, no qual sobre a curva de reação do processo são observados os instantes de tempo t_1 e t_2 correspondente à 28,3% e 63,2% da resposta, respectivamente, como observado na Fig. 4. Desta forma, os parâmetros são obtidos pelas relações:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{39-25}{1-0} = 14 \quad (3)$$

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1) = 1.5(154 - 56) = 148.5 \quad (4)$$

$$\theta = t_2 - \tau = 1.5t_1 - 0.5t_2 = 154 - 148.5 = 6.5 \quad (5)$$

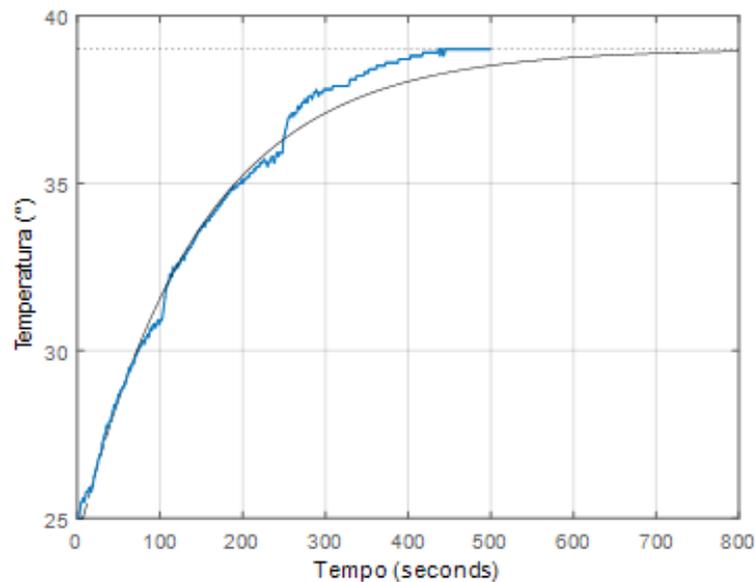
Portanto o modelo que representa esse sistema é descrito por,

$$G(s) = \frac{14e^{-6.5s}}{148.5s+1} \quad (6)$$

Comparando o processo real com o modelo de primeira ordem (6), observa-se que existe uma boa estimação em relação ao processo original, como pode ser visto na Fig. 5.

Com base na equação (6) desenvolveu-se a sintonia do controlador PID, utilizando os métodos de Ziegler-Nichols, Cohen-Coon e IMC, apresentados na seção anterior. O objetivo de processo é encontrar qual sintonia retorna o melhor tempo de resposta com o menor sobressinal (*overshoot*). Para tal, foi realizado a simulação do sistema com as três técnicas. Os pontos de operação são: 35, 39 e 37, que representam três variações de temperatura para o sistema. Além disso, no instante 320 s, é aplicada uma perturbação do tipo degrau (10% da magnitude em relação ao sinal de referência), simulando uma possível abertura da tampa.

Figura 5 - Comparação entre o processo real e seu modelo.



A Tabela 4 apresenta os valores de K_p , T_i e T_d fornecidos por cada método.

Tabela 4 - Ganhos do controlador PID

Métodos	K_p	T_i	T_d
Ziegler-Nichols	1.8	14	3.5
Cohen-Coon	1.115	16.8897	2.5236
IMC	0.99	150.5	3.4186

Na primeira simulação, foi utilizado os parâmetros fornecidos através do método de Ziegler-Nichols. O comportamento do sistema para este método é mostrado na Fig. 6.

Observa-se que o controlador garante seguimento de referência e rejeição de perturbação. A Tabela 5, mostra o tempo de resposta (T_r) e o tempo de assentamento (T_s) do processo nos diferentes pontos de operação, assim como, seu desempenho através dos índices: IAE (*Integral of Absolute Error*) e TVC (*Total Variation of Control*).

Figura 6 - Sintonia por Ziegler-Nichols

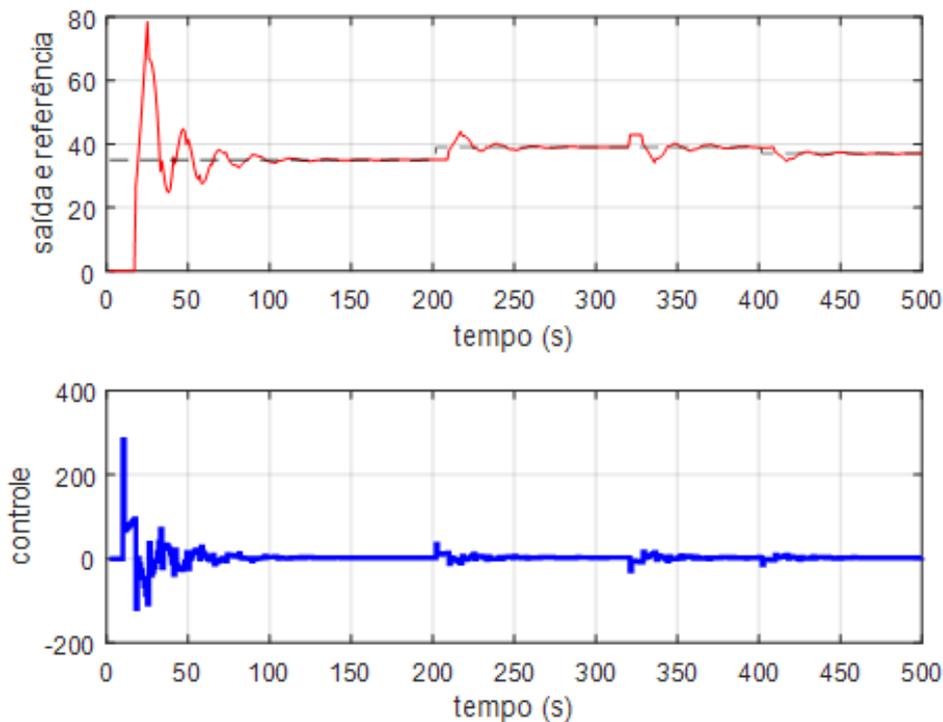
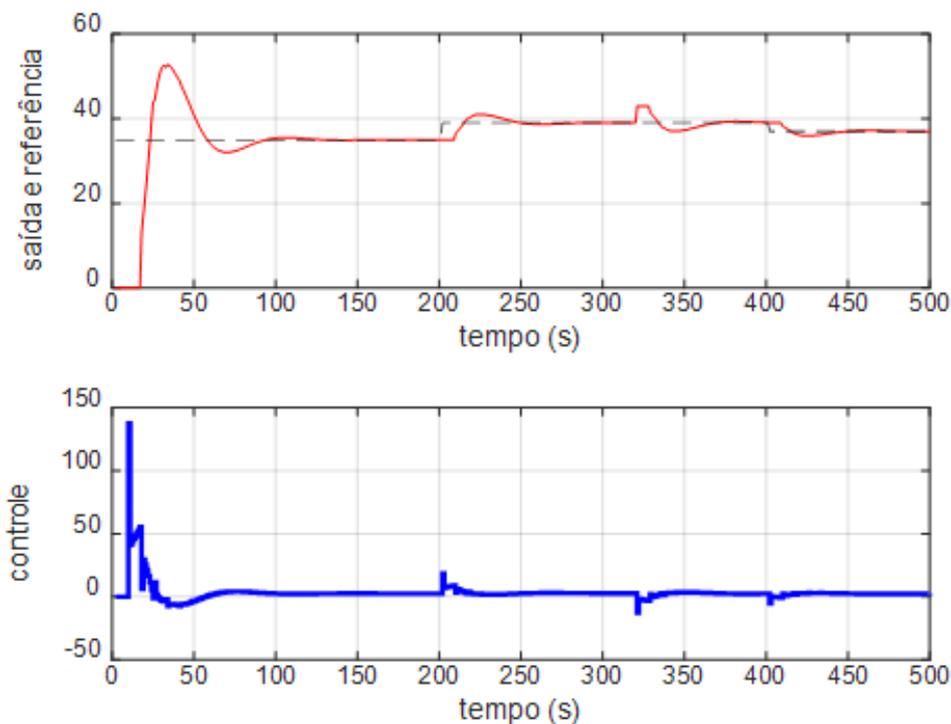


Tabela 5 - Comportamento dinâmico do sistema e índice de desempenho da sintonia por Ziegler-Nichols.

Referên cia	T_r (s)	T_s (s)	IAE	TVC
35°C	19	100	241.78	2521.40
39°C	210	244		
37°C	411	423		

Para a segunda simulação foi empregado o método de sintonia por *Cohen-Coon*, como mostrado na Fig. 6. Para este método observa-se que o controlador PID novamente garante seguimento de referência e rejeição de perturbação, além de apresentar menor sobressinal e esforço de controle no início da simulação.

Figura 6 - Sintonia por *Cohen-Coon*



A Tabela 6, apresenta o desempenho do sistema nos diferentes pontos de operação.

Tabela 6. Comportamento dinâmico do sistema e índice de desempenho da sintonia por *Cohen-Coon*

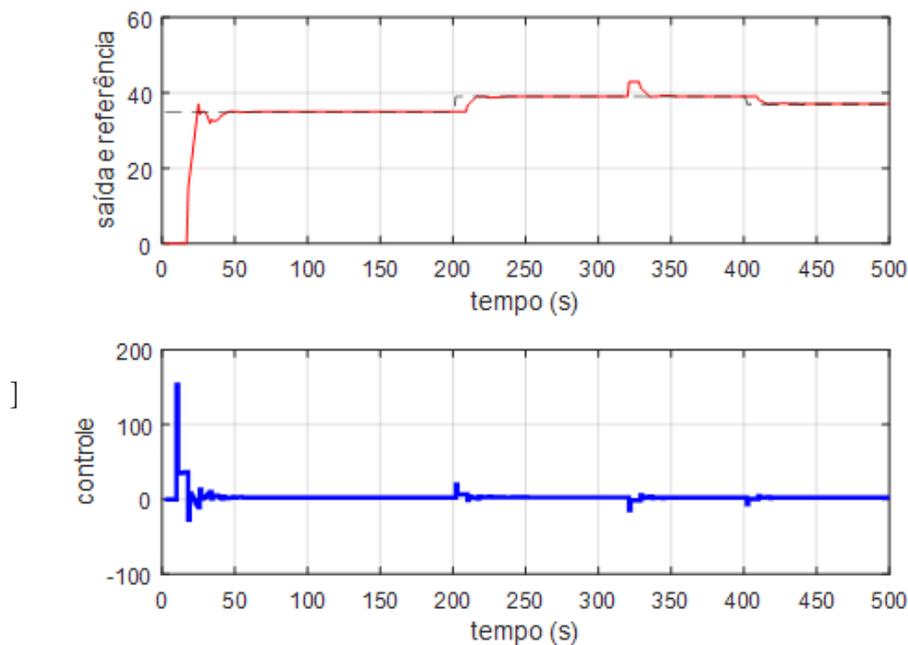
Referência	T_r (s)	T_s (s)	IAE	TVC
35°C	23	88	233.76	514.43
39°C	212	241		
37°C	410	412		

Na última simulação empregou-se o controlador PID ajustado através do método IMC, no qual seu desempenho é mostrado na Fig. 7. Nesta simulação, adotou-se $\tau_c = 0.005$. Por meio desse procedimento, observa-se que o sistema apresenta o menor sobressinal e melhor rejeição da perturbação, além de continuar garantindo o seguimento de referência. A Tabela 7, apresenta o desempenho do processo.

Tabela 7 - Comportamento dinâmico do sistema e índice de desempenho da sintonia por IMC

Referência	T_r (s)	T_s (s)	IAE	TVC
35°C	24	39	109.46	591.03
39°C	210	215		
37°C	410	411		

Figura 7 - Sintonia por IMC



Com base nas simulações apresentadas, concluiu-se que o método de sintonia por IMC resulta no melhor comportamento, garantindo menor sobressinal e menor erro para o sistema.

8 Conclusões

Na atualidade exige rapidez nos processos produtivos a fim de atender à demanda do mercado, bem como a garantia de um produto de qualidade. Estes fatores apontam que o ingresso no mundo empresarial é um desafio que não pode ser vencido sem o investimento em tecnologias. Em todos os setores produtivos, as pesquisas são fundamentais para os avanços no processo, no entanto, quando a produção envolve seres vivos, os pesquisadores precisam concentrar-se no desenvolvimento de instrumentos que ofereçam o mínimo de riscos possíveis.

Dentro do contexto desse estudo, a garantia de um produto final de qualidade significa um processo de maturação em incubadoras que proporcione um ambiente, acima de tudo, saudável aos embriões de frango que serão destinados ao consumo humano. Considerando esta preocupação, este estudo desenvolveu um protótipo de uma chocadeira com um controlador PID para controle de temperatura, objetivando proporcionar um fornecimento constante e equilibrado de calor, a fim de que a temperatura no ambiente do equipamento não apresentasse variações que efetivamente causassem prejuízo ao processo de maturação dos embriões de frango, o que aponta para a perda na qualidade do produto final e variação no tempo de finalização do processo produtivo. Destacando que a variação no tempo de produção implica em um consumo de energia elétrica instável.

A estrutura do modelo (chocadeira) foi desenvolvida em madeira, isopor e chapas de alumínio com dimensões proporcionais ao estudo. Realizou-se a discussão em torno da teoria de controlador PID de temperatura e teorias afins. O processo seguiu alguns passos a fim de que a discussão teórica chegasse ao resultado desejado.

Inicialmente, extraiu-se o modelo da equação na qual a temperatura mostrasse sua variação em função do tempo, dentro da estufa. A equação foi determinada por meio do método de Smith. Para a determinação da sintonia do controlador PID, utilizaram-se alguns métodos, em específico os métodos IMC, Ziegler-Nichols e Cohen-Coon. Através de índices de desempenho, conclui-se que o controlador ajustado através do método IMC apresentou o melhor comportamento em relação à sobressinal e rejeição de perturbação, além de apresentar o menor do sistema.

Assim foi possível alcançar a harmonia desejada do incubatório, através da simulação, a fim de que os embriões se desenvolvessem em condições favoráveis para que o produto final possa oferecer qualidade ao consumidor. Neste sentido, o apoio tecnológico garante ao empresário a economia de tempo, acelerando a produção e com vistas à qualidade total do produto.

Agradecimentos

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação Profissional, Científica Tecnológica de São Paulo do Câmpus Avançado de Tupã e a Faculdade de Engenharia e Inovação Técnico Profissional - FEITEP.

Referências

Åström, K. J.; Hagglund, T. (2006). **Advanced PID Control**. ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society.

Coelho, A. A. R.; Coelho, L. S. (2015). **Identificação de sistemas dinâmicos lineares**. 2. ed. UFSC. Florianópolis, SC.

Coelho, A. A. R.; Jeronymo, D. C.; Araújo, R. B. (2019). **Sistemas dinâmicos: controle clássico e preditivo discreto**. UFSC. Florianópolis, SC.

Espíndola, C. J. (2012). **Trajетórias do progresso técnico na cadeia produtiva de carne de frango do Brasil**. Revista Geosul. vol. 27. n. 53, p. 89-113. Florianópolis, SC.

Franklin, G. F.; Powell J. D.; Emami-Naeini, A. (2013). **Sistemas de controle para engenharia**. Bookman Editora. Porto Alegre, RS.

Garcia, C. (2017). **Controle de processos industriais: estratégias convencionais**. Blucher. São Paulo, SP.

Riviera, D. E.; Morari, M.; Skogestad, S. (1986). **Internal model control: PID controller design**. Industrial & engineering chemistry process design and development

Normey-Rico, J. E.; Camacho, E. F. (2007). **Control of dead-time processes**. Springer Science & Business Media.

Nakage, E. S.; Tollon, P.; Queiroz, S. A.; Boleti, I.C. (2001). **Efeito de incubação sobre a duração da mesma e a eclodibilidade em ovos de perdiz** (*Rhynchotus rufescens*). Revista Brasileira de Ciência Avícola (Suplemento), vol. (3), n. 03.