



MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE NUMA INCUBADORA DE OVOS

Alexsander Corrêa^{1,2*}; Edilberto Pereira Teixeira¹, Antonio Manoel Batista da Silva¹; Ana Paula Silva Capuci¹;

¹ Universidade de Uberaba, Programa de Mestrado em Engenharia Química

²Curso de Engenharia Química – UNIBH Centro Universitário de Belo Horizonte

Autor Correspondente: alexsandercorrea@hotmail.com

RESUMO

A avicultura em criações industriais é de extrema importância, por ser uma das proteínas mais baratas e mais presente na mesa do povo brasileiro. Com isso, tem máxima eficiência no nascimento de pintos é essencial para garantir a alimentação. O artigo teve como objetivo de modelar e simular o controle de temperatura e umidade de incubadoras industriais, em que a temperatura deverá ser controlada entre 37,5 e 38°C e a umidade entre 55 e 65%, variáveis fundamentais para uma boa incubação. O controle de umidade foi determinado que fosse controle tipo On/Off. Para o controle de temperatura, utilizamos o método Ziegles e Nichols para determinar os parâmetros de controle, demonstrou uma excelente qualidade na simulação, utilizando ferramenta computacional SciLab.

Palavras-chave: incubadora de ovos; controle; temperatura; umidade; Scilab.

ABSTRACT

Poultry farming in industrial settings is extremely important, as it provides one of the cheapest and most commonly consumed sources of protein for the Brazilian population. Therefore, achieving maximum efficiency in chick hatching is essential to ensure food supply. The objective of this article was to model and simulate the temperature and humidity control of industrial incubators, where the temperature must be maintained between 37.5 and 38°C and humidity between 55 and 65%—both of which are critical variables for successful incubation. The

humidity control was set to be an On/Off type. For temperature control, we used the Ziegler-Nichols method to determine the control parameters, which demonstrated excellent performance in simulation using the SciLab computational tool.

Keywords: egg incubator; control; temperature; humidity; Scilab.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a carne de frango está presente na dieta do brasileiro devido à sua qualidade nutricional e ao custo baixo. Segundo a Associação Brasileira de Proteína Animal – ABPA, em 2023, no Brasil, foram consumidos 45,1 kg de frango per capita por ano, foram produzidas 14.833 milhões de toneladas de carne de frango, quantidades significantes para que o setor produtivo inove com tecnologias para garantir eficiência em seus processos, podendo, assim, atender a demanda do mercado, cada vez mais crescente.

A incubação ovos é a primeira etapa desse processo de desenvolvimento do embrião até a eclosão do pinto, sendo assim, uma atividade que precisa de precisão e controle, pois uma pequena variação na temperatura do incubatório poderá afetar na qualidade do nascimento e até na mortalidade dos pintinhos, na pesagem, doenças, entre outros (Lauvers e Ferreira, 2011).

Os ovos de galinha são incubados durante 21 dias nas seguintes condições (Cobb, 2008):

- Ventilação constante 13,5 m³/h/1.000 ovos;
- Temperatura constante (37,5 a 37,8 °C);
- Umidade Relativa Interna (URI) de 55% a 65% no caso de chocadeiras (medida com termômetro de bulbo úmido de 28°C a 30°C);
- Viragem de ovos, frequente.

O controle da temperatura durante a incubação é crucial para que ocorra o desenvolvimento embrionário, pois determina o grau de velocidade do metabolismo do embrião. A temperatura é controlada em todas as etapas de manejo dos ovos até o transporte dos pintos nascidos.

O controle da umidade evita que ocorra o ressecamento do ovo, que durante a incubação perde umidade pelos poros da casca, um ovo deve ter perdido 12% do seu peso no 18º dia de incubação (Cobb, 2008).

A viragem ocorre continuamente independente de controle e tem por função de prevenir a aderência do embrião à membrana da casca do ovo.

Controlar a temperatura e a umidade adequadamente proporcionará uma maior produtividade do incubatório, medido em quantidade de pintos nascidos.

O objetivo desse projeto é aplicar os conhecimentos em sistemas de controle, para um simular um sistema de controle de malha fechada, que controlará a temperatura e a umidade no interior da incubadora de ovos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Compreender o manejo e os métodos utilizados para a incubação de ovos, foram necessários pesquisas em materiais disponibilizados pelas empresas e cooperativas de frango. Para discutir o sistema de controle, utilizou-se de ferramentas computacionais para modelar e analisar os dados, e de livro de engenharia específicos.

Incubação

O processo de incubação é realizado para aumentar a capacidade produtiva de pintinhos. O nascimento é influenciado por vários fatores inerente ao processo, como granjeiro, transporte, tempo de armazenamento, manuseio dos pintinhos, ovos danificados e desclassificados.

Conforme Lauvers e Ferreira, 2011, a duração da incubação é de 21 dias, sendo que os ovos passam 18 dias na incubadora e 3 dias no nascedouro, que se inicia a bicagem dos pintos nas cascas em processo de nascimento. Na Figura 1, o ciclo de desenvolvimento embrionário é demonstrado, nos dias 1, 7, 15 e 20 dias, na qual o pinto já devidamente formado começa a bicar a casca para eclodir.

Figura 1 – Ciclo embrionário de ovos fecundados - algumas fases

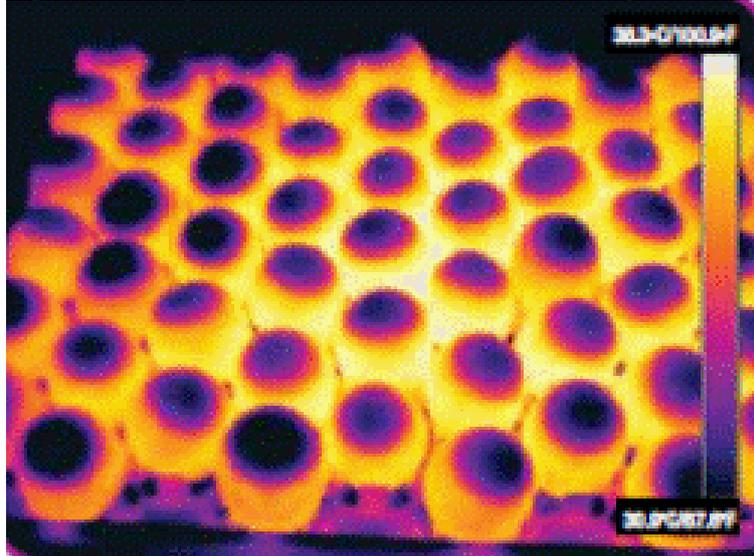


Fonte: COBB (2008).

Temperatura: no interior do incubatório não necessariamente a temperatura está uniforme em todos os pontos do equipamento, podendo haver variações nos hemisférios. Na figura 2, pode-se observar que os ovos da borda

estão com temperatura ligeiramente mais baixa, o que afeta o desenvolvimento embrionário.

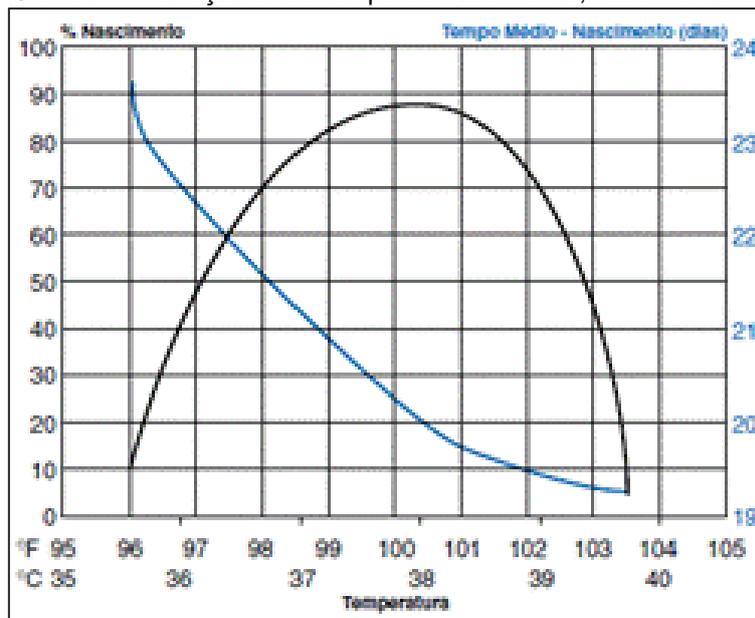
Figura 2 – Imagem térmica dos ovos em uma bandeja de incubação



Fonte: Aviação Group (2024).

A temperatura dentro do incubatório influenciará o crescimento embrionário, podendo reduzir ou aumentar os dias de nascimento, no que não significa que irá garantir pintos saudáveis, devendo estar entre 37,5 e 37,8 °C. A gráfico 1 demonstra que o percentual de nascimento de pintos chega a 80% a partir do 20 dia.

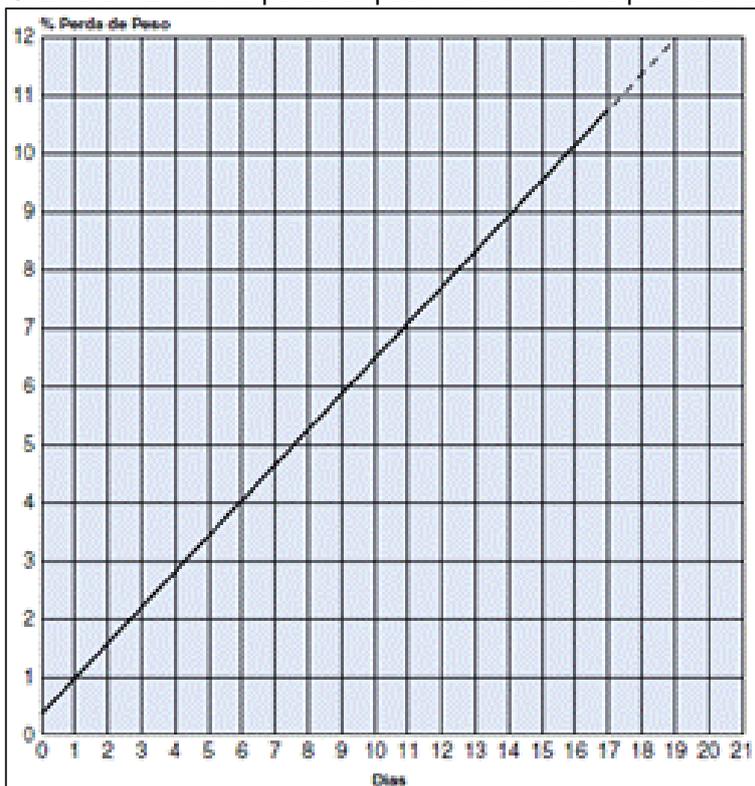
Gráfico 1 – Relação entre tempo de nascimento, nascimento e temperatura



Fonte: COBB (2008).

Umidade: a umidade é perdida pelo ovo durante a incubação. Para melhor taxa de nascimento, um ovo deve perder cerca de 12% de seu peso no 18º dia (COBB,2008). Devendo estar a umidade entre 55% e 65% no caso de chocadeiras (medida com termômetro de bulbo úmido de 28°C a 30°C). O gráfico 2, observamos a relação do percentual de perda de peso por dia de incubação, o que torna importante o controle de umidade durante a incubação.

Gráfico 2 – Limite de perda de peso do ovo durante processo de incubação



Fonte: COBB (2008).

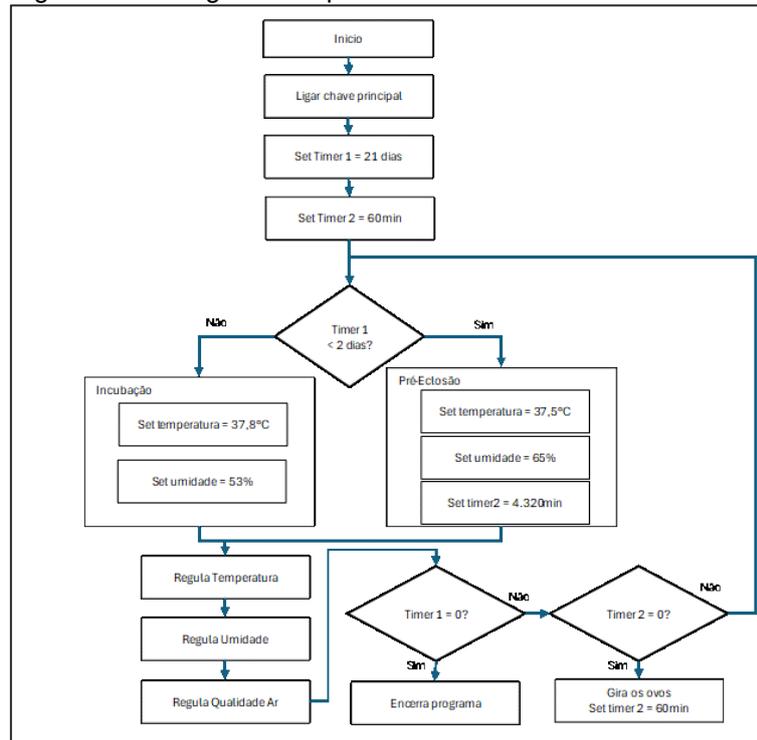
Processo incubatório e Fluxograma

Conforme Lauvers e Ferreira 2011, o processo de incubação tem duração de 21 dias, na qual 18 dias na incubadora e 3 dias no nascedouro, sendo assim, o processo incubatório terá duas etapas: Incubação e Pré-eclosão.

Fluxograma: o processo incubatório representado pelo fluxograma, Figura 2, possui “timers” para contagem dos dias e outro responsável pela viragem dos ovos.

A qualidade do ar requerida refere-se a concentração de O₂ e CO₂, na qual deve ser mantida durante toda a incubação em 23% e 3.000 a 5.000 ppm, respectivamente. A viragem dos ovos ocorre a cada 60 minutos. Esses parâmetros não requerem malha de controle, sendo necessário somente um sistema on/off.

Figura 3 – Fluxograma do processo incubatório



Fonte: Próprio autor.

Equipamento: um incubador industrial possui algumas características que serão essenciais para a compreensão e definição das equações de estado de cada controle do equipamento. Várias empresas possuem sistemas semelhantes ao apresentado a seguir, para produção industrial de incubação de ovos. O equipamento da empresa ONELYE para incubação de 20.000 ovos, potência de 5,7 kW. Conforme Figura 4, podemos observar que há sistema de troca de calor por serpentina, ventilador para circulação e distribuição do calor, tanque de água para evaporação de água e controle de umidade.

Figura 4 – Incubadora para 20.000 ovos



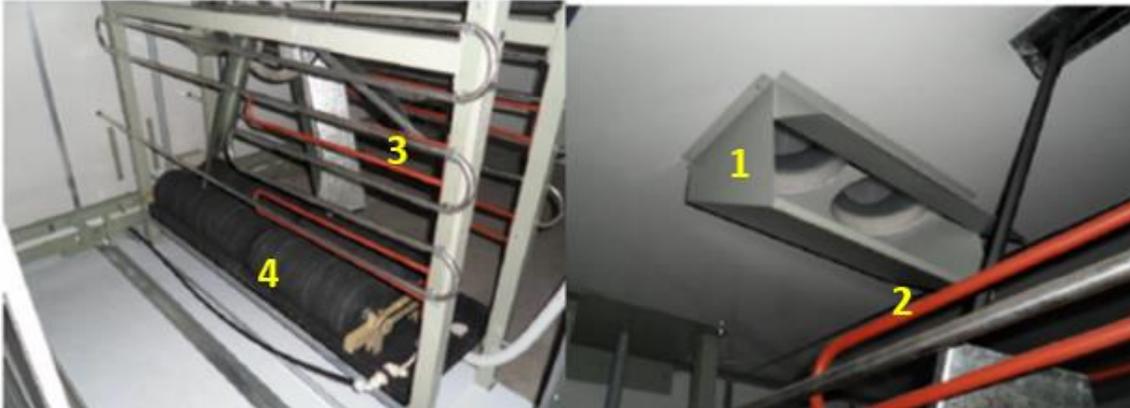
Fonte: Onelye (2024).

As características do equipamento são:

- controle comum da temperatura, da umidade e dos amortecedores para reduzir a flutuação da temperatura;
- a incubadora pode ajustar o calor automaticamente de acordo com a temperatura do ambiente e o ciclo de crescimento do embrião, mantendo uma temperatura estável para dentro;
- a exaustão nova da estrutura da ventilação, a entrada de ar e os canais refrigerando reforçados de ar são isolados de um outro para reabastecer oxigênio e para dissipar o calor na fase atrasada da incubação.

Nas Figuras (5, 6 e 7) estão apresentados os componentes da incubadora, modelo Onelye Livestock Machinery co.

Figura 5 – 1. ventilador de agitação médio, 2. aquecedor, 3. tubo de resfriamento de água, 4. rolo de umidade



Fonte: Onelye (2024).

Figura 6 – 1. acima do motor do ventilador, 2. sistema de amortecedor, 3. sistema de torneamento



Fonte: Onelye (2024).

Figura 7 – 1. carrinho de ovos, 2. controlador principal, 3. vista lateral

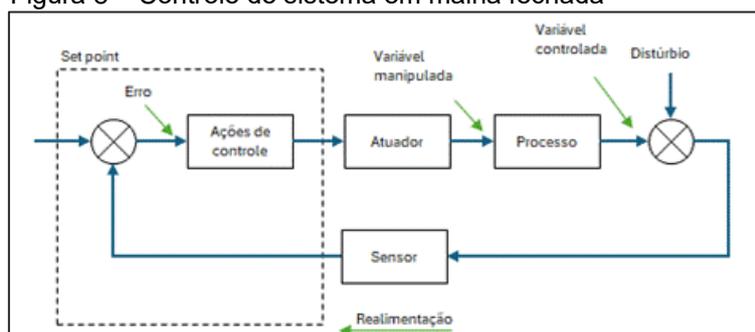


Fonte: Onelye (2024).

Controlador: o controlador PID (proporcional, integral e derivativo) é uma técnica que une as ações derivativa (velocidade antecipativa), integral (zera o erro) e proporcional (minimiza o erro), fazendo com que o erro seja minimizado.

Segundo Osaka 2010, o controle PID, é um modelo que possibilita um controle eficaz para as especificações do regime transitório e do regime permanente do sistema de malha fechada, conforme Figura 8, pela obtenção dos parâmetros do controlador por técnicas de projeto. Utilizaremos o método sugerido por Ziegles e Nichols para sintonia do controlador.

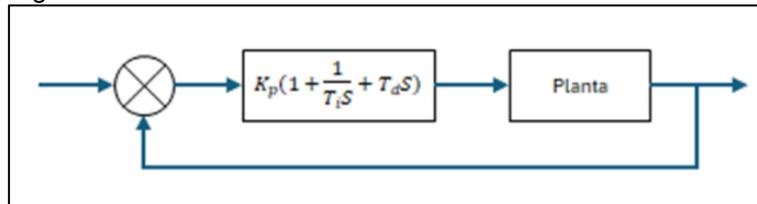
Figura 8 – Controle de sistema em malha fechada



Fonte: Próprio autor.

Os valores do ganho proporcional K_P , do tempo integral T_i , e do tempo derivativo T_d , Figura 9, baseadas nas características da resposta transitória da planta, conforme OSAKA, 2010, são sugeridas por regras propostas por Ziegler e Nichols.

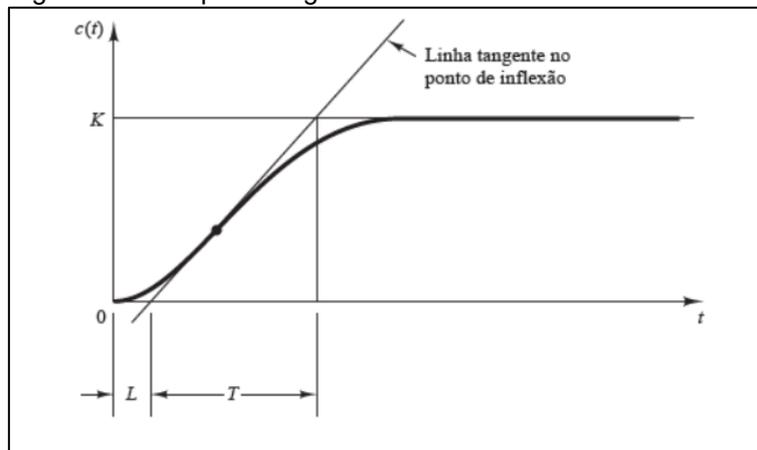
Figura 9 – Modelo controle PID



Fonte: Ogata (2010).

Para determinar a função de transferência, obtemos experimentalmente ou a partir de uma simulação dinâmica da planta, a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário, conforme Figura 10, essa curva terá formato de “S”.

Figura 10 – Resposta degrau unitário



Fonte: Ogata (2010).

Através da curva de variação de temperatura, pode-se determinar os valores de K (ganho), θ (tempo morto) e τ (constante tempo do processo).

Para determinar o valor de K – ganho, pela seguinte Equação 1:

$$K = \frac{\frac{\Delta Y}{\Delta Y_{range}}}{\frac{\Delta F}{\Delta F_{range}}} \quad (1)$$

Em que:

- ΔY – variação da variável temperatura (variável controlada);
- ΔY_{range} – variação dos limites do instrumento de medição temperatura (variável controlada);
- ΔF – variação da variável aquecedor (variável manipulada);
- ΔF_{range} – variação dos limites do instrumento de medição aquecedor (variável controlada).

A função de transferência pode ser aproximada da seguinte forma, pela Equação 2:

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

Método Ziegles e Nichols: para calcular os Parâmetros do Controlador PID, utilizamos a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do controlador PID

	K_p	T_I	T_D
P	$\frac{\tau}{k\theta}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{\tau}{k\theta}$	$\frac{\theta}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{\tau}{k\theta}$	2θ	$0,5\theta$

Fonte: Próprio autor.

Dependente conforme Equação 3:

$$m(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3)$$

Independente conforme Equação 4:

$$m(t) = P(t) + I \int_0^t e(t) dt + D \frac{de(t)}{dt} \quad (4)$$

Convertendo da forma dependente para independente (parâmetros utilizados pelo SciLab), são dadas pelas Equações 5, 6 e 7.

$$P = K_p \quad (5)$$

$$I = \frac{K_p}{T_I} \quad (6)$$

$$D = K_p T_D \quad (7)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

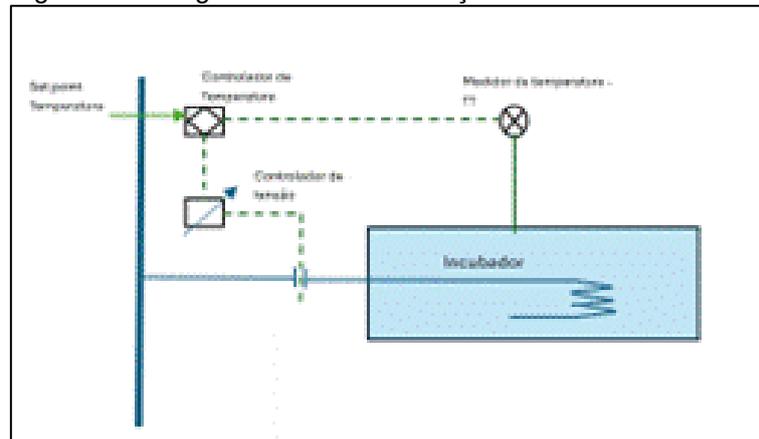
Controle de Umidade

Essa variável possui uma faixa de operação que permitem um controle exclusivamente proporcional ou um sistema On/Off, para que o sistema fique dentro da faixa de controle exigido para a incubação adequada dos ovos.

Controle de Temperatura

Consideremos a malha de controle adotada para sistema de controle de temperatura e função da variação de tensão que alimenta uma resistência elétrica, conforme Figura 11.

Figura 11 – Diagrama de instrumentação



Fonte: Próprio autor.

Aplica-se na planta um degrau unitário e observa-se a curva de reação, em malha aberta, Figura 12. Assim, podemos separar os parâmetros do controlador. O método heurístico foi aplicado para determinar os valores de sintonia inicial e que após implantação deverá ser adequado de acordo com a resposta operacional.

Figura 12 – Resposta degrau unitário



Fonte: Próprio autor.

Através de observação dos dados operacionais, foi determinado:

- θ – tempo morto = 28 s;
- τ – constante tempo processo = 100 s.

Para determinar o valor de K – ganho, podemos calcular utilizando a Equação 1, substituindo os valores é realizada da seguinte forma:

$$K = 0,28$$

Assim, podemos escrever a função de transferência, conforme Equação

8.

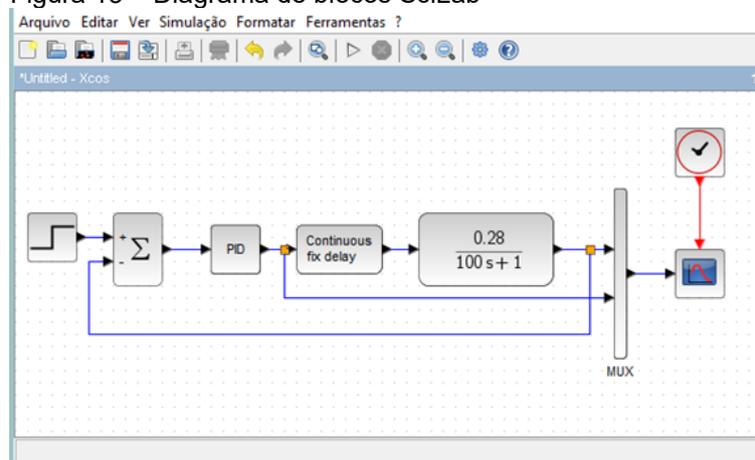
$$G(S) = \frac{0,28e^{-2S}}{100S+1} \quad (8)$$

Simulação scilab

Utilizamos a ferramenta computacional SciLab para simular o processo. O controlador PID (proporcional, integral e derivativo) é uma técnica que une as ações derivativa (velocidade antecipativa), integral (zera o erro) e proporcional (minimiza o erro), fazendo com que o erro seja minimizado.

Foi construído o diagrama de blocos para simulação da malha de controle, Figura 13.

Figura 13 – Diagrama de blocos SciLab



Fonte: Próprio autor.

Para calcular os parâmetros do controlador, utilizamos os dados Tabela 2 Regra de Sintonia em Resposta ao Degrau Unitário da Planta, conforme método Ziegles e Nichols.

Tabela 2 – Regra de sintonia em resposta ao degrau unitário da planta

	K_p	T_I	T_D
P	17,86	∞	0
PI	16,074	6,67	0
PID	21,432	40	10

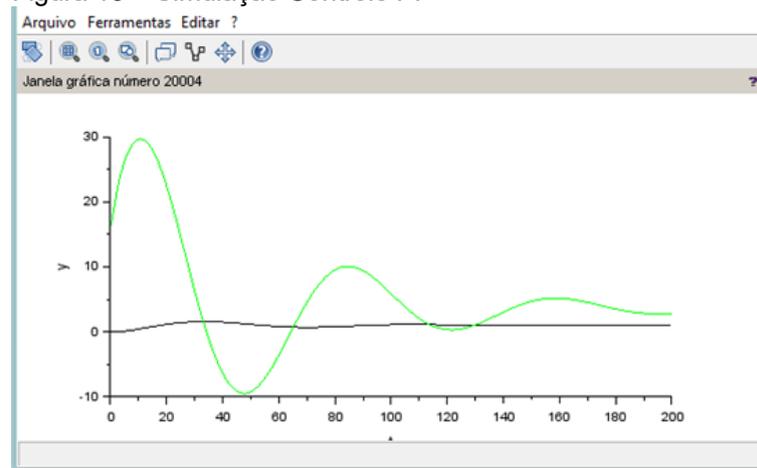
Fonte: Próprio autor.

Convertendo da forma dependente para independente (parâmetros utilizados pelo SciLab), temos:

P	I	D
16,074	2,410	0
21,432	0,536	214,320

Foi simulado o controle PI e PID, gerando as seguintes respostas, apresentado nas Figuras 15 e 16, respectivamente.

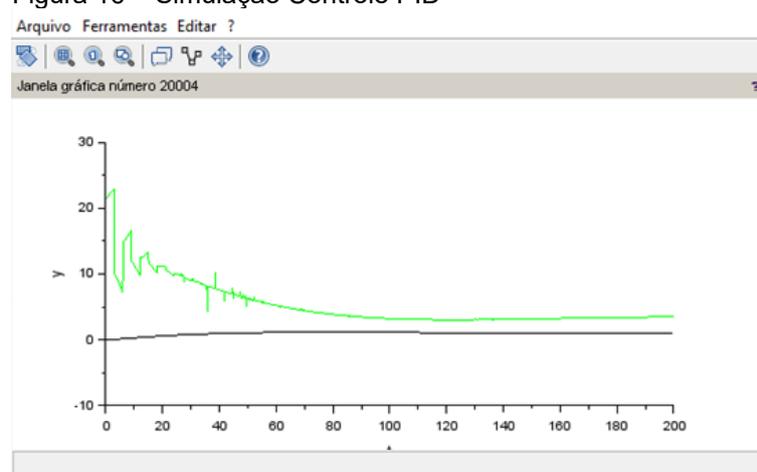
Figura 15 – Simulação Controle PI



Fonte: Próprio autor.

O tempo de estabilização no controle PI, ocorreu após 200 segundos, com variação de temperatura no entorno do set point, ou seja, pico de temperatura acima e abaixo do set point, em virtude da curva senoidal que desse modelo de controlador, conforme Figura 15.

Figura 16 – Simulação Controle PID



Fonte: Próprio autor.

O tempo de estabilização do controlador PID ocorreu após 100 segundos, Figura 16, atendendo a especificação do tempo τ – constante tempo processo de 100seg. A temperatura decresceu ao longo do tempo até a estabilização da

temperatura, o que diminui o estresse térmico por variação de temperatura, reduzindo o risco de perda de produtividade.

4 CONCLUSÕES

Ter um modelo dinâmico para auxiliar no projeto e na sintonia de um equipamento de incubatório, irá garantir maior produtividade de pintos nascidos após tempo final de incubação, dado que a temperatura é vital para garantir eficiência.

As duas alternativas de controle PI e PID apresentam resultados adequados para controlar a temperatura durante o período de incubação. Certamente, após implantação da planta deve-se realizar testes e ajustes no controlador para garantir máxima eficiência. Com o objetivo de alcançar o controle de temperatura no tempo de 100 segundos o controlador PID se tornou mais viável por alcançar esse tempo, e tem menor oscilação de temperatura em relação ao controle PI, que devido sua curva ser senoidal a temperatura varia de um ponto de maior valor a outro de menor valor até alcançar a temperatura de objetivo, o que pode causar estresse térmico dos ovos dentro da incubadora, no controle PID a temperatura decai até alcançar a temperatura pretendida, com mínima variação.

Outros controles como umidade, CO₂ e tempo viragem, basicamente necessitam de controle On/Off, apesar de serem parâmetros que garantem produtividade, criar malha de controle para esse fim não é adequado, pois o sistema permite oscilações sem impacto no resultado esperado, que é eficiência operacional.

REFERÊNCIAS

AVIAGEN. **Como... medir a temperatura da casca?**. Huntsville: Aviagen Global Corporate Office, [20??]. Disponível em: https://aviagen.com/assets/Tech_Center/BB_Foreign_Language_Docs/Portuguese/03-How-To-3-Measure-Egg-Shell-Temperature-PT.pdf. Acesso em: 25 abr. 2024.

COBB, V. **Guia de Manejo de Incubação COBB**. São Paulo: Cobb-Vantress Brasil, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL. **Estatísticas setoriais**. São Paulo: ABPA, 2024. Disponível em: <https://abpa-br.org/>. Acesso em: 28 mar. 2024.

LAUVERS, G.; FERREIRA, V. P. de A. Fatores que afetam a qualidade dos pintos de um dia, desde a incubação até recebimento na granja. **Revista Científica Eletrônica de Medicina Veterinária**, v. 9, n. 16, p. 1-19, 2011.

MENDÉZ, M. S. C. **Manejo e incubação de ovos férteis**. São Paulo: Zootecnia Brasil, 2021. Disponível em: <https://zootecniabrasil.com/2021/11/13/manejo-e-incubacao-de-ovos-ferteis/>. Acesso em: 28 abr. 2024.

MOURA, P. G.; ARANHA, F. N.; HANDAM, N. B.; MARTIN, L. E.; SALLES, M. J.; CARVAJAL, E.; JARDIM, R.; SOTERO-MARTINS, A. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 25, n. 6, p. 791-808, dez. 2020.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010.

ONELYE, W. **Ovo comercial da incubadora da única fase que choca os ovos 5.7kw da máquina 20000**. Wuxi ONELYE. Disponível em: <https://portuguese.sinopfe.com/sale-13452735-commercial-single-stage-incubator-egg-hatching-machine-20000-eggs-5-7kw.html>. Acesso em: 28 abr. 2024.

ONELYE LIVESTOCK MACHINERY CO. **Conventional incubator**. Disponível em: <http://www.onelye.com/product/ots-oth.html>. Acesso em: 28 abr. 2024.