

Artículo de Investigación

Design and Implementation of an Incubator with PI Controller for Optimizing the Chicken Egg Incubation Process

Diseño e implementación de una incubadora con controlador PI para optimizar el proceso de incubación de huevos de gallina

Citación: Peña D. ; I. Vásquez-Valencia; Solís Pino, A. Design and Implementation of an Incubator with PI Controller for Optimizing the Chicken Egg Incubation Process. I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 17. 2023.

Deivid Peña ^{1,*} , **Iván Vásquez Valencia** ² , **Andrés Felipe Solís Pino** ³ 

¹ Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá; deividpena@unicomfacaucá.edu.co.

² Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá; cvasquez@unicomfacaucá.edu.co.

³ Corporación Universitaria Comfacaucá - Unicomfacaucá; asolis@unicomfacaucá.edu.co.

* Correspondencia: asolis@unicomfacaucá.edu.co.

Nota del editor: Sello editorial Unicomfacaucá se mantiene neutral con respecto a los reclamos derivados de los resultados de este trabajo.



Derechos de autor: © 2023 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES)

Resumen: Este artículo describe el diseño y desarrollo de una incubadora de huevos de gallina con estructura de tablero de fibra de densidad media (MDF). La incubadora cuenta con un sistema de control de temperatura que integra un controlador proporcional-integral (PI), un microcontrolador Arduino Uno y una bombilla regulada. También se incluye una pantalla para proporcionar información en tiempo real sobre la temperatura, la humedad y el valor de consigna, que se fija en 37 grados centígrados para garantizar el desarrollo óptimo de los polluelos. Se utilizó el software Proteus para la estimulación eléctrica de componentes como el regulador de intensidad y los optoacopladores. Para el modelado matemático de la incubadora, se empleó un enfoque de modelado de caja negra para derivar la función de transferencia del sistema. Se aplicaron técnicas de cancelación de polos para sintonizar el controlador PI, y las constantes del controlador se optimizaron utilizando Matlab para lograr una respuesta óptima del sistema. Finalmente el controlador consigue llegar al valor deseado establecido en el punto de referencia, asegurando condiciones de incubación ideales y aumentando al máximo la tasa de eclosión al mantener un control y supervisión continuos de la temperatura y la humedad.

Palabras clave: Control PI; incubadora de huevos , sintonización de controladores, Diseño mecatrónico, Simulación Dinámica.

Abstract: This paper describes the design and development of a chicken egg incubator with a structure made of medium-density fiberboard (MDF). The incubator features a temperature control system that integrates a proportional-integral (PI) controller, an Arduino Uno microcontroller, and a regulated light bulb. A display is also included to provide real-time information on temperature, humidity, and the setpoint value, which is set at 37 degrees Celsius to ensure optimal development of the chicks. The Proteus software was utilized for the electrical stimulation of components such as the dimmer and optocouplers. For the mathematical modeling of the incubator, a black box modeling approach was employed to derive the system's transfer function. Pole cancellation techniques were applied to tune the PI controller, and the controller constants were optimized using Matlab to achieve an optimal system response.

Keywords: PI Control; Egg Incubator; Controller Tuning; Mechatronic Design; Dynamic Simulation.

1. Introducción

En 2018, la producción mundial de pollo de carne alcanzó un récord de 95,5 millones de toneladas, con una tasa de crecimiento anual del 2,0% [1]. Según las proyecciones de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), se espera que la producción de pollo siga creciendo a una tasa anual del 3% hasta 2023 [2]. Este crecimiento es especialmente significativo en países como Colombia, donde la producción avícola desempeña un papel destacado en la economía [3]. Colombia es el sexto productor mundial de pollo, sólo por detrás de Estados Unidos, Brasil, México, Canadá y Argentina. En cuanto a la producción de huevos de mesa, Colombia ocupa el cuarto lugar después de Estados Unidos, Brasil y México [4].

La producción avícola en Colombia también enfrenta varios retos y oportunidades que deben ser abordados para garantizar su sostenibilidad y competitividad [5]. Algunos de estos retos son: mejorar la bioseguridad y el control de enfermedades, reducir el uso de antibióticos y residuos, mejorar el bienestar animal y la protección del medio ambiente, satisfacer las demandas y expectativas de los consumidores, adaptarse al cambio climático y a las fluctuaciones del mercado, y aumentar la innovación y la investigación [6].

Dada la importancia de la producción avícola para la economía colombiana y el sustento de miles de familias dedicadas a la avicultura, es fundamental mejorar los procesos de producción avícola. Una solución propuesta es el diseño e implementación de una incubadora de huevos que mantenga las condiciones óptimas para el desarrollo de los polluelos, para esto integra un sistema de control proporcional-integral (PI) para regular con precisión la temperatura a 37 grados centígrados. Además, se incluirá un sistema de control de la humedad para garantizar el correcto desarrollo de los embriones. Este documento presenta la incubadora de huevos de gallina como herramienta fiable y eficaz para mejorar los procesos de desenvolvimiento de las familias avícolas.

2. Materiales y métodos

En este trabajo se destaca la integración de los principios de diseño mecatrónico [7], en el desarrollo de una incubadora eficiente para el proceso de incubación de huevos de gallina. Los resultados obtenidos, demuestran el potencial de esta metodología en el diseño de sistemas complejos que involucran componentes mecánicos, electrónicos y de software. Se utilizó como elemento integrador la propuesta de Saaen [8] el cual guía algunos elementos, lineamientos importantes para el desarrollo de este prototipo.

3.1. Diseño CAD

El diseño asistido por ordenador (CAD) es una herramienta de software digital que permite analizar varios diseños mecánicos tridimensionales de distintos componentes. En este caso, la estructura de la incubadora se diseñó con SolidWorks con unas dimensiones de 30 cm x 30 cm, teniendo en cuenta los requisitos del sistema, como los conductos de circulación de aire y los puntos de fijación de los componentes que debían ensamblarse a la estructura, incluida la bombilla, el controlador y el circuito de control. Esta elección facilitó la visualización y detección de posibles problemas de diseño relacionados con las dimensiones de los componentes fijados a la estructura. Además, SolidWorks permite transferir los dibujos al software RDWorks para la posterior fabricación de la estructura de la incubadora con una cortadora láser. A continuación, se ensamblaron los componentes para validar el diseño en su aplicación final.

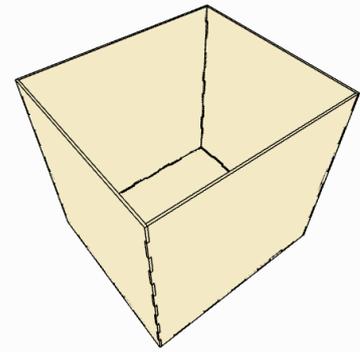
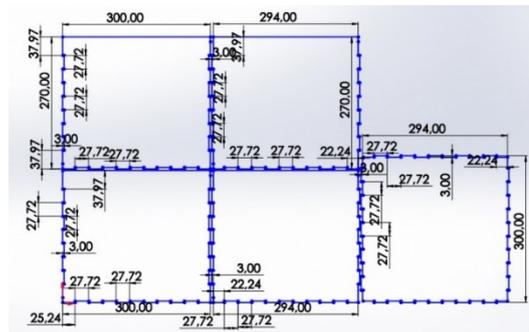


Figura 1. (a) Planos 2D de la estructura realizados en SolidWorks; (b) Modelo 3D de la estructura ensamblada en Master Box. Fuente: Elaboración propia.

La estructura de la incubadora se diseñó para proporcionar un entorno controlado para el crecimiento de los organismos. La estructura consistió en un marco cuboide hecho de láminas acrílicas, con una tapa extraíble en la parte superior. La tapa tenía un orificio para insertar un termómetro para controlar la temperatura en el interior de la incubadora. La estructura también tenía un sistema de ventilación, uno a cada lado del cuboide. El sistema de ventilación garantizaba un suministro constante de aire fresco y evitaba la acumulación de un exceso de humedad y dióxido de carbono.

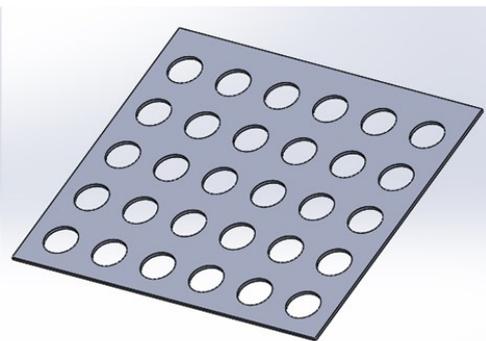
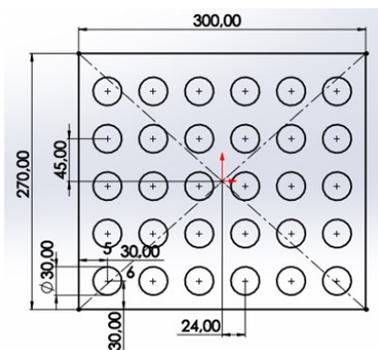


Figura 2. (a) Plano 2D tapa de incubadora creado con SolidWorks; (b) Vista Modelo 3D correspondiente a la tapa de la incubadora. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Diseño electrónico

La configuración eléctrica para el control de temperatura y humedad de la incubadora consta de los componentes mostrados en la Figura 3. El circuito fue verificado utilizando el software de simulación Proteus antes de su implementación física. El circuito fue verificado utilizando el software de simulación Proteus antes de su implementación física.

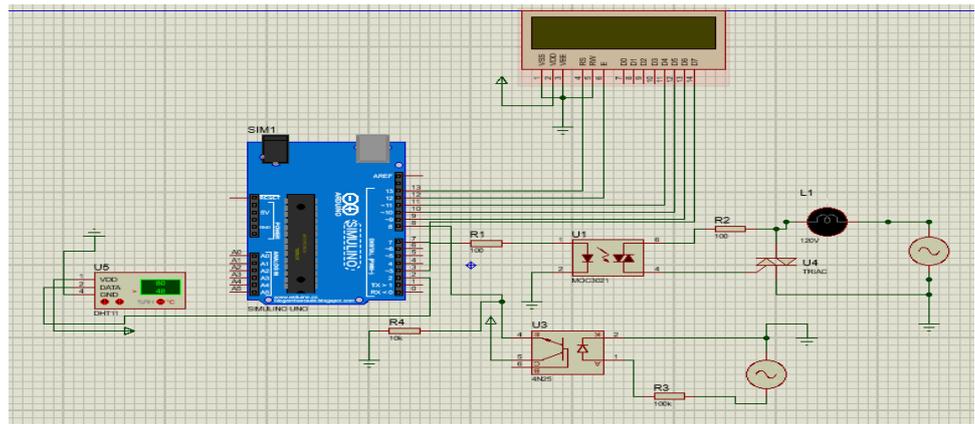


Figura 3. Esquemático eléctrico en Proteus. Fuente: Elaboración propia.

El control de potencia de la bombilla incandescente de 100W, que sirve como fuente de calor en la incubadora, se consigue mediante un circuito dimmer. Este circuito tiene un pin de disparo y un detector de paso por cero conectados a los pines digitales 8 y 7 del microcontrolador Arduino, respectivamente. El circuito dimmer puede ser un Dimmer Module AC Light Power Control comercial que se muestra en la Figura 3.

- **Resistencias:** Cuatro resistencias con diferentes valores se utilizaron para limitar la corriente en el circuito. Una resistencia de 100 ohmios se conectó a la salida del pin de disparo, y otra resistencia de 100 ohmios se conectó en serie con la línea de CA. Los valores de resistencia se eligieron en función de las especificaciones del diseño.
- **Arduino:** El microcontrolador Arduino es el encargado de controlar las variables de temperatura y humedad en la incubadora. Se comunica con los sensores, actuadores y dispositivos de visualización a través de su código de programación, permitiendo un funcionamiento coordinado y eficiente del sistema.
- **Sensor de temperatura y humedad DHT11:** Este sensor integra las capacidades de detección de temperatura y humedad en un solo dispositivo, permitiendo la medición y monitorización de estas variables dentro de la incubadora. Proporciona lecturas en tiempo real de la temperatura y la humedad en una pantalla LCD, lo que ayuda a ajustar estos parámetros a los valores óptimos para la incubación de huevos.
- **Pantalla lcd:** La pantalla LCD muestra información importante sobre el estado del sistema, como la temperatura actual, la humedad y el punto de ajuste. Esta información en tiempo real permite una monitorización precisa del funcionamiento de la incubadora y asegura que las condiciones internas están dentro del rango deseado para la incubación de huevos de gallina.
- **MOC3011 y TRIAC:** El optoacoplador MOC3011 activa el TRIAC, que controla la potencia suministrada a la bombilla. El pulso de luz emitido por el LED dentro del optoacoplador activa el fototransistor, que enciende la puerta del TRIAC, permitiendo así variar la potencia entregada a la carga y ajustar su brillo o intensidad luminosa.
- **Optoacoplador 4N25:** El optoacoplador 4N25 se utilizó para la detección del paso por cero en el circuito de control de potencia. Consta de un LED y un fototransistor aislados ópticamente entre sí. Cuando la señal de CA cruza cero, el LED se enciende y se apaga, haciendo que el fototransistor se encienda y se apague en consecuencia. Esta señal se alimenta al pin 7 del

Arduino, que la utiliza para sincronizar los pulsos de disparo del circuito dimmer.

- **Bombillo incandescente de 100W:** Este bombillo se utilizó como fuente de calor en la incubadora. Dado que al controlar la potencia que llega a dicho bombillo, en efecto se presentan cambios en la temperatura al interior del sistema. Permitiendo así, una temperatura alrededor de los 37.5 grados centígrados para un óptimo ambiente de incubación.

3.3. Sistema de control PI

Un controlador PI (proporcional-integral) es un tipo común de controlador de realimentación que ajusta la salida en función del error entre los valores deseado y real. Tiene dos componentes: un componente proporcional y un componente integral.

El componente proporcional produce una salida que es proporcional al error, lo que reduce el error de estado estacionario. El componente integral produce una salida que es proporcional a la integral del error, lo que elimina la desviación [9]. El controlador PI puede expresarse mediante la siguiente ecuación en el dominio del tiempo:

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (2)$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral definida como $k_i = k_p / T_i$, $e(t)$ es la señal de error y $U(t)$ es la señal de salida.

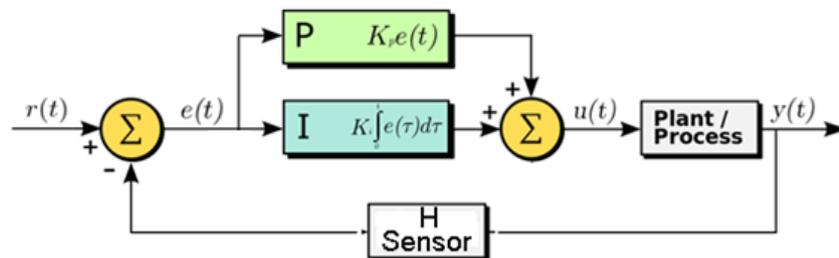


Figura 4. diagrama de bloques de un sistema de control PI. Fuente: [10].

En este contexto, se trabajó con una acción de control proporcional-integral (PI), como se muestra en la ecuación 2. Sin embargo, la función de transferencia de la ecuación 2 está en el dominio del tiempo; debido a esto, se puede transformar al dominio de la frecuencia ya que se obtiene una representación más conveniente para el análisis y diseño de sistemas de control, permitiendo estudiar la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia compleja y facilita el diseño de controladores eficientes [11] como se muestra en la ecuación 3.

$$G_{cl}(s) = \frac{K_c(T_i s + 1)}{T_i s} \quad (3)$$

En la siguiente sección se cubrirá la sintonización del PI diseñado para controlar la temperatura en la incubadora, calculando los valores específicos de K_p y K_i para este sistema.

3.4. Modelamiento Matemático

El enfoque utilizado para modelizar el sistema fue el de caja negra. Este enfoque consiste en tratar el sistema como una entidad desconocida, centrándose en analizar las entradas y salidas del sistema sin tener en cuenta los detalles internos ni la estructura interna del mismo [11]. En lugar de intentar comprender cómo funciona internamente el sistema, se busca establecer una relación matemática entre entradas y salidas sin conocer

detalles sobre su funcionamiento interno. Esto se hace con el fin de modelar su comportamiento de forma eficaz.

3.4.1. Respuesta transitoria

La respuesta transitoria es esencial para comprender cómo se comporta un sistema durante el tiempo de transición y cómo responde a las perturbaciones. Puede proporcionar información sobre la estabilidad del sistema, la velocidad de respuesta, la precisión y otros aspectos. Además, la respuesta transitoria también puede utilizarse para evaluar y diseñar sistemas de control, ya que permite analizar el comportamiento del sistema durante la transición a un estado estacionario deseado [8].

Para obtener la respuesta transitoria del sistema, se aplica un cambio escalón a la variable de entrada (Potencia) para observar la respuesta del sistema, incrementándola de 0 a 100 % como potencia máxima. Con ello se pretende observar cómo responde la variable de salida que, en este caso, es la temperatura. Se asume que la variable de salida debe estar en estado estacionario, es decir, en estado estable; para este caso, se toman los valores de temperatura del monitor serial del Arduino IDE, el cual varía gradualmente hasta llegar a su estado estacionario donde no hay cambios de temperatura, luego estos valores se exportan a Excel para graficar la respuesta del sistema, el cual tiene una respuesta de un sistema de primer orden como se muestra en la Figura 5, tomando en cuenta que se ha tomado a las variables de desviación para tener el cero como referencia lo cual facilitará el análisis del sistema.

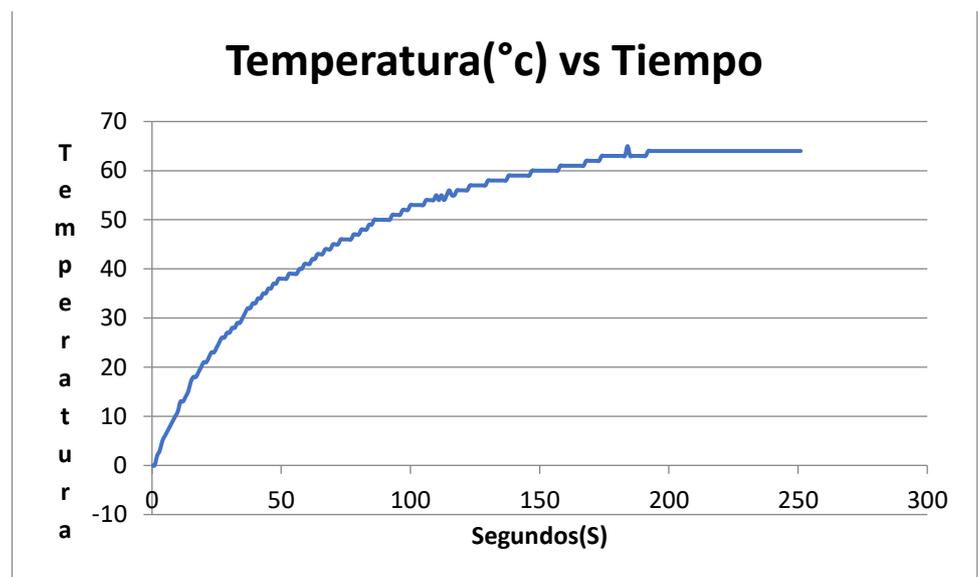


Figura 5. Temperatura vs tiempo en respuesta transitoria. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Función de transferencia

Para obtener la función de transferencia se parte de los datos obtenidos. Es así como mediante la ecuación 4, se obtuvo la ganancia del sistema de primer orden, ya que al dividir el valor final entre el valor del cambio a la entrada escalón, se obtiene la ganancia del sistema, que representa la relación entre el cambio en la variable de salida y el cambio en la variable de entrada.

$$K = \frac{V_f}{\Delta u} \quad (4)$$

Dónde, V_f : Es el valor al que converge la variable de salida del sistema después de un tiempo, en respuesta a la entrada escalón. ΔU : Es el cambio unitario aplicado a la

variable de entrada del sistema en este caso de 100. Reemplazando valores en la ecuación 4 se obtiene una ganancia del sistema de 0.64.

Posteriormente, se procede a calcular la constante de tiempo del sistema t , mediante la ecuación 5, la cual representa la respuesta transitoria de un sistema de primer orden ante un cambio al escalón. Reemplazando el valor de t en dicha ecuación, se obtiene que t es el tiempo necesario para que la variable de salida alcance aproximadamente el 63.2% de su valor final en respuesta al cambio escalón.

$$t = \tau$$

$$y = k\Delta u \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) = (1 - e^{-1}) = K\Delta u(1 - 0.368) = 0.632(K\Delta u) \quad (5)$$

Reemplazando, tenemos $0,632 * (64)$, lo que nos da como resultado que cuando la temperatura está a $40,448 \text{ }^\circ\text{C}$, la constante de tiempo del sistema se obtiene en un tiempo aproximado de 57 segundos. Debido a esto, ahora se puede determinar el modelo matemático que describe la dinámica del sistema. Cabe mencionar que la constante de tiempo influye en la aproximación del modelo matemático que describe el sistema de primer orden. Por esta razón, empleando técnicas estáticas, se ajusta el modelo matemático para ajustar una mejor aproximación al modelo, minimizando el cuadrado del error con la ecuación 6. Este procedimiento se realizó utilizando la herramienta Excel Solver, y así se encontró una constante de tiempo que se ajustara mejor al modelo.

$$E = \sum(Y_i - f(X_i))^2 \quad (6)$$

Dónde:

y_i son los valores observados.

$f(x_i)$ son los valores predichos por el modelo para las variables independientes x_i .

Σ representa la suma sobre todos los puntos de datos.

Finalmente, se obtiene una constante de tiempo de 55.989, que se ajusta mejor al modelo. Por lo tanto, ahora se puede reemplazar en la ecuación 7, que describe el comportamiento del sistema en términos de la temperatura en función del tiempo.

$$\dot{y} = k\Delta u \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (7)$$

Finalmente se obtuvo el modelo matemático, como se observa en la ecuación 8. Este modelo es una buena aproximación, respecto al modelo obtenido por Saa.

$$y(t) = 64 \left(1 - e^{-\frac{t}{55.989}}\right) \quad (8)$$

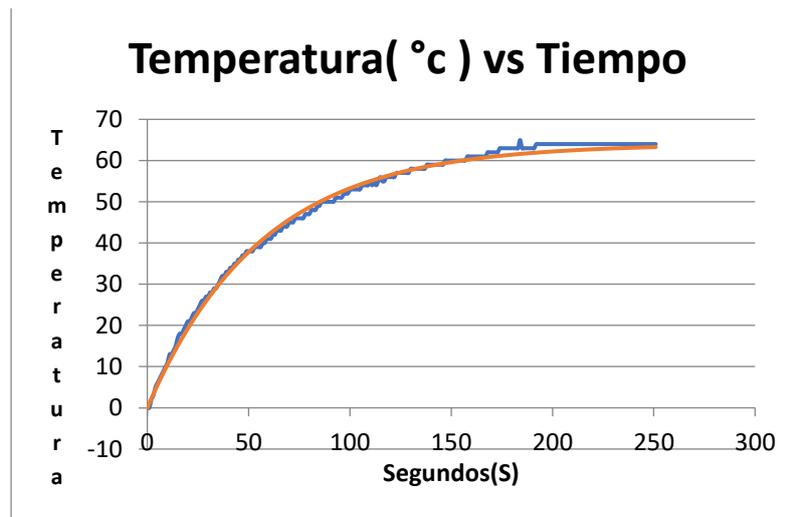


Figura 6. Aproximación del modelo matemático a la respuesta transitoria, azul (Datos Experimentales), naranja (Modelo Matemático). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 6, se puede apreciar la curva roja que corresponde al modelo matemático obtenido mediante la ecuación 8, y la curva azul corresponde a los datos experimentales. Se puede observar que hay una buena aproximación entre ambos, lo cual permite partir con este modelo matemático.

3.4.3. sintonización del control PI

Utilizando la técnica de cancelación de polos, se realizó la sintonización del controlador PI, ampliamente utilizada en el campo de la ingeniería de control para diseñar controladores que mejoren el rendimiento de los sistemas dinámicos. Este método se basa en colocar polos adicionales en el controlador para cancelar los polos no deseados del sistema [9]. En la Figura 7 se muestra la representación en diagrama de bloques utilizada para obtener la función de transferencia en lazo cerrado del controlador. A partir de esta representación, se resuelve en su forma canónica, como se ilustra en la Ecuación 9, para encontrar la función de transferencia del controlador.

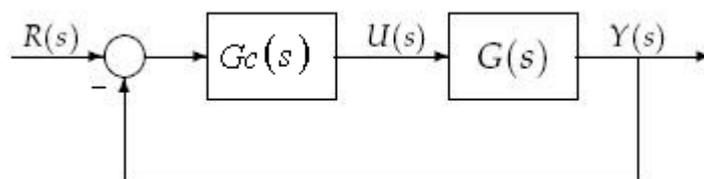


Figura 7. diagrama de bloques del control en lazo cerrado. Fuente: Elaboración propia.

Función de transferencia del controlador en lazo cerrado.

$$Gcl(s) = \frac{G(s)Gc(s)}{1+G(s)Gc(s)} \quad (9)$$

Para aplicarlo es necesario obtener la función de transferencia de la planta, representada como un sistema de primer orden. Esto se ilustra en la ecuación 10, que corresponde a la función de transferencia de la planta en lazo abierto. Esta ecuación establece una relación entre la entrada y la salida, que se refiere a la potencia y la temperatura.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (10)$$

Después de obtener los valores para $G(s)$, al sustituir en la ecuación 3 el tiempo integral T_i , e igualándolo a la constante de tiempo del sistema de la planta, de manera que se cancele el polo de la planta y así obtener la función de transferencia del controlador, como se muestra en la ecuación 11

$$G_c(s) = \frac{K_c(55.989s+1)}{55.989s} \quad (11)$$

Finalmente, Se logró hallar la ganancia proporcional K_c , que se obtiene después de operar matemáticamente el sistema en lazo cerrado, como se muestra en la ecuación 12. La constante de tiempo deseada se encuentra utilizando la ecuación 13, en la cual se establece que el tiempo de establecimiento del sistema debe ser de 8 minutos.

$$K_c = \frac{55.989}{\tau_d \cdot 0.64} \quad (12)$$

$$\tau_d = \frac{T_e}{4} = \frac{480}{4} = 120 \quad (13)$$

Finalmente se obtiene la ganancia proporcional K_c como se muestra en la ecuación 14. Con los datos obtenidos, se procede a reemplazar en la ecuación 3, y así lograr deducir la función de transferencia del controlador.

$$K_c = \frac{55.989}{120 \cdot 0.64} = 0.73 \quad (14)$$

4. Resultados

Sustituyendo los términos previamente encontrados en la sección anterior, los cuales incluyen la ganancia K obtenida en la ecuación 4 y la constante de tiempo τ hallada de la ecuación 6, se procedió a reemplazar reemplazar estos valores en la ecuación 10. Por consiguiente, se obtuvo la función de transferencia de la planta como se muestra en la ecuación 15.

$$G(s) = \frac{0.64}{55.989s+1} \quad (15)$$

Después de realizar el ajuste detallado utilizando el método de cancelación de polos descrito en la sección de Materiales y Métodos, se determinaron los valores finales para las constantes K_p y T_i del controlador PI diseñado. Reemplazando estos valores en la ecuación general del controlador, Ecuación 3, se obtuvo la siguiente función de transferencia (Ecuación 16) del controlador PI implementado para el sistema de incubación de huevos de gallina.

$$G_c(s) = \frac{43.74(55.989s+1)}{55.989s} \quad (16)$$

Se utilizó Simulink, una extensión de Matlab, para evaluar su comportamiento en lazo cerrado para la simulación del controlador PI obtenido. En este proceso se utilizaron las funciones de transferencia de la planta y del controlador PI, las cuales fueron conectadas empleando álgebra de bloques, como se muestra en la Figura 8. La respuesta del sistema se muestra en la Figura 9, donde se puede observar que el tiempo de establecimiento del sistema es de aproximadamente 8 minutos, como se deseaba; sin embargo, cuando se aplica una perturbación al sistema en el minuto 15, se observa que el control no es muy eficiente para rechazar las perturbaciones que puede sufrir el sistema modelado. Sin embargo, el diseño e implementación de una incubadora a través de un controlador PI puede optimizar el proceso de incubación de huevos de gallina.

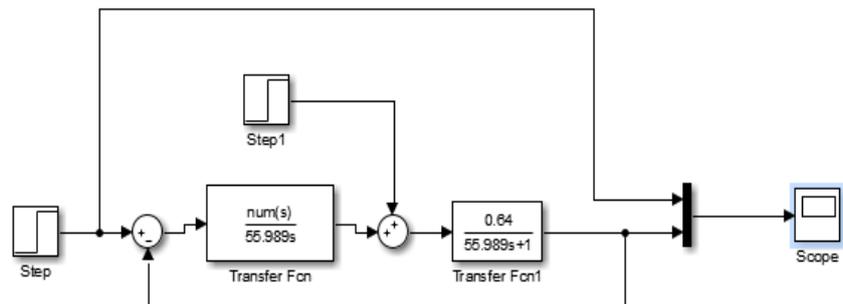


Figura 8. Diagrama de bloques del control PI en Simulink. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el controlador logra alcanzar el valor establecido en el setpoint, proporcionando condiciones óptimas de incubación y maximizando la tasa de eclosión al mantener el control y monitoreo de la temperatura y humedad, respectivamente, a diferencia de las incubadoras convencionales que son diseñadas con simples termostatos ON/OFF que no regulan fielmente la temperatura y humedad, variable crítica en el proceso de incubación [12], siempre y cuando el controlador PI pueda optimizar el proceso de incubación y cuando el sistema no esté sometido a perturbaciones sólidas que puedan desestabilizar el sistema implementado.

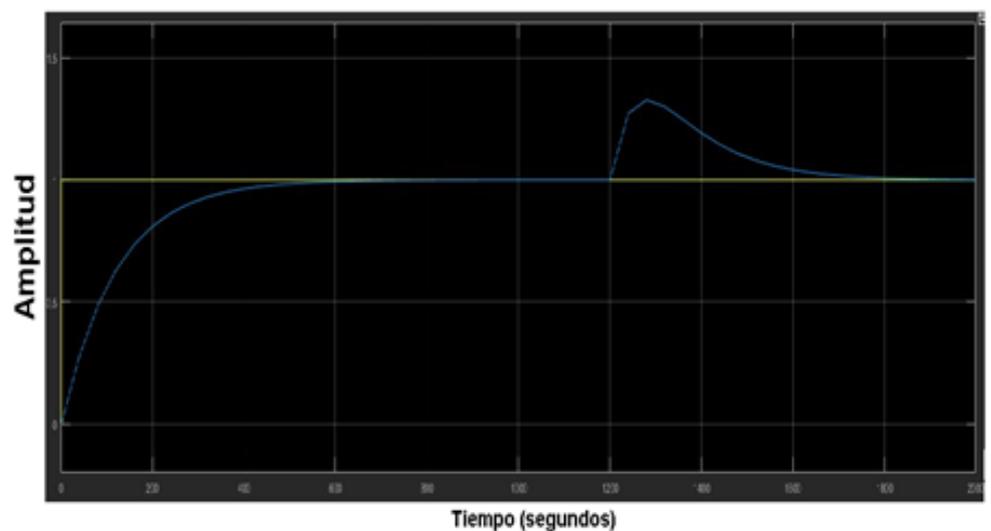


Figura 9. Respuesta del control PI en Simulink. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se proporciona la construcción del prototipo final.

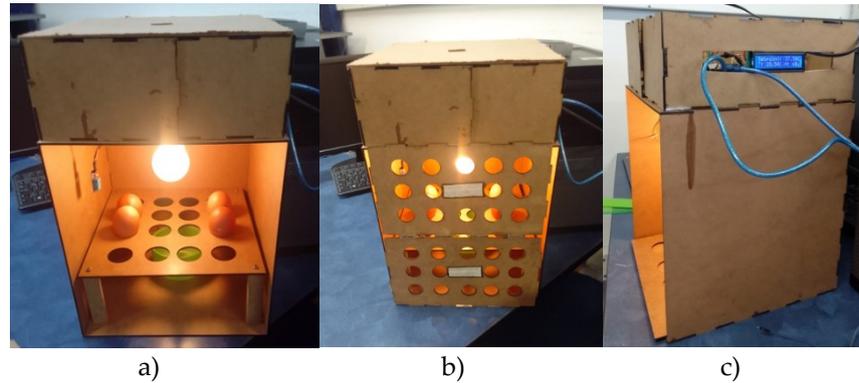


Figura 10. a) Vista frontal incubadora de huevos de gallina; (b) vista frontal incubadora con tapa; (c) pared lateral de incubadora con pantalla LCD. Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

Los resultados obtenidos reflejan de forma concluyente que el controlador P.I. diseñado y ajustado mediante el método de cancelación de polos demuestra una respuesta adecuada para regular la temperatura en los parámetros necesarios en este sistema de incubación de huevos de gallina, consiguiendo estabilizar el sistema en el punto de consigna en un tiempo de 8 minutos. Sin embargo, es imprescindible aclarar que este tipo de controlador, sintonizado mediante la técnica mencionada, no puede rechazar correctamente las perturbaciones que entran en el sistema. Estos resultados validan la hipótesis inicial de que un controlador de I.P. adecuadamente sintonizado puede mantener la temperatura de incubación dentro del rango óptimo para el desarrollo embrionario. Aunque es necesario realizar más pruebas en un entorno controlado, el rendimiento observado en la simulación del sistema apunta a un importante potencial de mejora de los procesos de temperatura mediante control automático, en comparación con trabajos anteriores como el de J.G. Albor [9], que emplea control on/off o sistemas difusos en incubadoras. Además, el enfoque de control P.I. muestra una mayor precisión y suavidad en respuesta a cambios en la referencia y perturbaciones [7], lo que subraya su robustez una vez que se ha obtenido un modelo preciso del sistema. Además, este trabajo implementó el circuito de control de potencia desde cero utilizando componentes discretos en una protoboard. Sin embargo, como mejora futura, se sugiere un módulo de regulación comercial compatible con Arduino, que simplificaría el montaje y la puesta en marcha del sistema, especialmente en aplicaciones a mayor escala.

5. Conclusiones

En este trabajo, se desarrolla un prototipo de sistema de incubación de huevos y polluelos. En conclusión, la simulación del sistema implementado demuestra que el controlador PI estableció el sistema en la referencia de temperatura requerida, con un valor de 37° Celsius en aproximadamente 8 minutos, cumpliendo así el objetivo propuesto. Esto resalta la importancia del control de la temperatura y del monitoreo constante de la humedad relativa del ambiente de incubación durante todo el proceso de desarrollo del huevo, manteniendo la temperatura en 37°C y asegurando que la humedad relativa en la incubadora sea de 50% a 60% [12]. Estas condiciones controladas y vigiladas mejoran el correcto desarrollo de los embriones y maximizan la tasa de eclosión. Por otro lado, es esencial reconocer que el método de cancelación de polos es valioso en los sistemas de control para eliminar o reducir la influencia de polos no deseados. Sin embargo, es esencial considerar que la aplicación exclusiva de este método

no garantiza un rechazo rápido de las perturbaciones que puedan producirse en el sistema, como puede comprobarse en las pruebas de simulación.

Contribuciones de autor: "Conceptualización, D.P y A.F.S; metodología, D.P, C.I.V; software, D.P, C.I.V y A.F.S; validación, D.P, C.I.V y A.F.S; análisis formal, D.P, C.I.V y A.F.S; investigación, D.P, C.I.V y A.F.S; supervisión, D.P, C.I.V y A.F.S; administración de proyectos, A.F.S. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito ". La autoría debe limitarse a aquellos que hayan contribuido sustancialmente al trabajo informado.

Fondos: Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Agradecimientos: Agradecimiento a la Corporación Universitaria Comfacaucá – Unicomfacaucá por las facilidades técnicas y tecnológicas.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] C. L. Morales, J. F. de J. A. Solís, and R. V. Manzanilla, "Competitividad de México en la producción de carne de pollo en el mundo de 2005 a 2017," *Atl. Rev. Econ. Rev. Atlántica Econ.*, vol. 5, no. 1, p. 2, 2022.
- [2] L. Benito and J. Cortez, "Producción de Carne de Pollo en Perú," *Rev. Estud. Agro*, vol. 4, no. 1, 2020.
- [3] P. Donado-Godoy *et al.*, "Prevalence, risk factors, and antimicrobial resistance profiles of Salmonella from commercial broiler farms in two important poultry-producing regions of Colombia," *J. Food Prot.*, vol. 75, no. 5, pp. 874–883, 2012.
- [4] J. A. Jaimes-Olaya, A. P. Gómez Ramírez, D. C. M. Álvarez Espejo, D. Soler Tovar, J. R. Romero Prada, and L. C. Villamil Jiménez, "Las enfermedades infecciosas y su importancia en el sector avícola," *Rev. Med. Vet.*, no. 20, pp. 49–61, 2010.
- [5] S. C. Carrera-Quintana, P. Gentile, and J. Girón-Hernández, "An overview on the aquaculture development in Colombia: Current status, opportunities and challenges," *Aquaculture*, p. 738583, 2022.
- [6] H. M. Hafez and Y. A. Attia, "Challenges to the poultry industry: Current perspectives and strategic future after the COVID-19 outbreak," *Front. Vet. Sci.*, vol. 7, p. 516, 2020.
- [7] J. D. Arcos Rosero, D. C. Bolaños Rosero, L. F. Alape Realpe, A. F. Solis Pino, and E. Roldán González, "Mechatronic Design of a Prototype Orthosis to Support Elbow Joint Rehabilitation," *Bioengineering*, vol. 9, no. 7, 2022, doi: 10.3390/bioengineering9070287.
- [8] J. G. Saa and M. J. Cucanchon, "Design of a temperature control system for an egg incubator," *Tekhnê*, vol. 17, no. 2, pp. 35–42, 2020.
- [9] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003.
- [10] M. A. Johnson and M. H. Moradi, *PID control*. Springer, 2005.
- [11] J. P. Cardona, J. J. Leal, and J. E. Ustariz, "Modelado matemático de caja blanca y negra en educación en ingeniería," *Form. Univ.*, vol. 13, no. 6, pp. 105–118, 2020.
- [12] J. M. P. Ramos and E. A. L. Cedeño, "Estudio de las tecnologías de control utilizadas en las incubadoras avícolas," *E-IDEA J. Eng. Sci.*, vol. 2, no. 4, pp. 13–23, 2020.