

Design and temperature control of an ecological hybrid egg incubator ^{*}

Luis Juárez ^{*} Leopoldo Vite ^{**} Jorge Rivera ^{*}

^{*} *Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Instituto Tecnológico Superior de Teziutlán/TECNM, Teziutlán, México (e-mail: luis.jr@teziutlan.tecnm.mx, jorge.rf@teziutlan.tecnm.mx).*

^{**} *UPIEM-IPN, Unidad Profesional Interdisciplinaria de Energía y Movilidad del IPN, México (e-mail: levitech@ipn.mx)*

Abstract: In this article, we address the mechanical design and temperature control of an ecological egg incubator. A central component of the proposed incubator is the heating chamber, where the temperature is adjusted using a nickel/chromium heating element and a solar energy-based thermotank. Temperature regulation within the heating chamber is carried out through a PI controller. The tuning of the control gains is performed using the \mathcal{D} -partition method, which allows obtaining stability regions of the closed-loop system in the presence of input time delay.

Keywords: Linear system, Egg incubator, Thermotank, Delay.

1. INTRODUCCIÓN

Se han llevado a cabo diversos estudios que abordan el impacto de la variación en las principales variables físicas durante el proceso de incubación, estas variables incluyen la temperatura, el movimiento de los huevos, la humedad y la ventilación. Es importante destacar que estas variaciones dependen de la especie de los huevos en incubación. Por ejemplo, las condiciones ideales para la incubación varían considerablemente entre especies como gallinas, patos, lagartos, tortugas o peces.

Un estudio que expone las variaciones en las variables de incubación de una especie de pez en particular se encuentra detallado en la investigación presentada en Glenn III and Tiersch (1997). En el trabajo publicado en Ghaderi et al. (2018), se examina el uso de la constante dieléctrica de los huevos como un método no invasivo, económico y preciso para la detección de embriones muertos y huevos fértiles durante el proceso de incubación.

El problema de ventilación y distribución de la temperatura en el diseño de una incubadora se aborda en Kabir and Abedin (2018). Durante las pruebas, se realizaron incubaciones de huevos de pato y los resultados destacan que, en ausencia de interrupciones en el suministro de energía y con una adecuada regulación de la temperatura, las aves nacieron con un estado de salud óptimo y un tamaño adecuado.

En otro enfoque, se controla la temperatura y la humedad en el diseño de incubadoras de huevos mediante la aplicación de un algoritmo de control inteligente basado en reglas difusas (Dutta and Anjum, 2021). El trabajo de Oliveira et al. (2020) investiga los efectos de diferentes frecuencias de movimiento de huevos durante la incubación. Se llevaron a cabo cuatro pruebas con movimientos a frecuencias de 24, 12, 6 o 3 veces por día a un ángulo de 45° durante 18 días de incubación. Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que una frecuencia de movimiento de 24 veces por día durante la incubación proporciona una alta tasa de nacimientos. En contraste, las bajas frecuencias de movimiento (12, 6 o 3) resultaron en tasas de incubación más bajas. Además, los resultados sobre el desarrollo del embrión y los músculos de las aves muestran que el movimiento de los huevos durante la incubación desempeña un papel importante, siendo un parámetro clave y decisivo durante el desarrollo embrionario (Guo et al., 2021).

Los resultados obtenidos sobre la incubación de especies específicas de tortugas, publicados en Du et al. (2010), muestran que la influencia de la temperatura en el período de incubación afecta tanto al éxito de los nacimientos como a las características de las especies incubadas. Tras realizar el ensayo, se determinaron parámetros óptimos de temperatura en un rango de entre 26 y 28 grados centígrados. Otro estudio que se enfoca en examinar la variabilidad de la temperatura durante el proceso de incubación en huevos de tortugas ectotermas se presenta en Massey and Hutchings (2021). En cuanto a la incubación de huevos de lagarto, el efecto de la temperatura se analiza en Goodman (2008).

^{*} Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México y a la UPIEM-IPN.

El diseño de una incubadora que aborda las cuatro variables esenciales en el proceso de incubación se describe en Szolga and Bondric (2020), donde se aplican conocimientos en microcontroladores, sensores de temperatura y humedad, e incluso tecnología GSM para permitir el monitoreo remoto.

En este artículo se presenta el diseño de una incubadora híbrida que emplea dos sistemas de suministro de calor. Por un lado, se utiliza una resistencia eléctrica, y por otro, un calentador solar. El sistema cambia de fuente de energía térmica una vez que el termotanque no puede suministrar calor. Además, se aborda el diseño y control de una de las variables de incubación, específicamente la temperatura, controlada únicamente por la resistencia eléctrica. A diferencia de investigaciones previas, se considera el retardo inherente del sistema de calentamiento en el proceso de modelado. Para lograr la estabilización del sistema de control en lazo cerrado, se emplea la metodología de \mathcal{D} -particiones, la cual permite obtener fronteras de estabilidad. En este trabajo se analiza la σ -estabilidad del sistema para determinar la tasa de convergencia (Bellman and Cooke, 1963).

La estructura del artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2, se describe el modelado de un sistema de primer orden con retardo en la entrada, la estrategia de control y el enfoque de las \mathcal{D} -particiones. La Sección 3 abarca el diseño virtual de la incubadora y el modelado de la resistencia eléctrica. La sintonización del sistema en lazo cerrado con la ley de control propuesta y los resultados vía simulación se encuentran en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5, se exponen las conclusiones y las perspectivas para futuras investigaciones derivadas de este trabajo.

2. PRELIMINARES

En esta sección, se describe el modelo matemático del sistema de calefacción, la estrategia de control Proporcional-Integral (PI) y el método de \mathcal{D} -particiones.

2.1 Función de transferencia en lazo abierto

El modelo de sistemas térmicos, como el de la resistencia eléctrica utilizada para suministrar calor en la incubadora, puede obtenerse mediante pruebas en lazo abierto, donde se analiza la respuesta del sistema a una entrada escalón cuyo valor es menor que el valor nominal admisible.

En el caso de la resistencia eléctrica que suministra energía térmica a la incubadora, el modelo se describe mediante la función de transferencia

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{ke^{-s\tau}}{1 + s\gamma}, \quad (1)$$

donde $s \in \mathbb{C}$, $Y(s)$ y $U(s)$ denotan la temperatura en la cámara de incubación y la entrada de voltaje a la

resistencia eléctrica, respectivamente, k es la ganancia estática del sistema, es decir, la relación de ganancia entre la entrada y la salida, γ es la constante de tiempo definido como el tiempo requerido para que el sistema alcance el 63,2% del valor final o de estado estable y $\tau > 0$ es el retardo en la entrada del sistema. Estos parámetros pueden obtenerse de la respuesta del sistema en lazo abierto al aplicar una entrada escalón. La entrada escalón se define en un rango de valores del diez al veinte por ciento del valor nominal. De manera específica, los coeficientes de la planta se determinan empleando las siguientes igualdades

$$\begin{aligned} \tau &= t_1 - t_0, \\ \gamma &= t_2 - t_1, \\ k &= \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0}, \end{aligned}$$

donde u_0 y u_1 son las condiciones iniciales y finales de la entrada escalón, respectivamente, t_0 es el tiempo de inicio, t_1 corresponde a la intersección entre la recta de máxima pendiente y el eje t , t_2 se obtiene de la intersección entre la recta de máxima pendiente y el valor máximo de la respuesta de salida. El valor de y_0 corresponde al valor de la temperatura inicial, mientras que y_1 corresponde al valor nominal alcanzado en la respuesta de salida.

2.2 Control PI

La ley de control PI es ampliamente utilizada tanto en el ámbito académico como en el industrial debido a su efectividad y simplicidad (Astrom, 1995). El controlador calcula el error $e(t)$ entre la salida $y(t)$ y el valor deseado $y_d(t)$ como sigue

$$e(t) = y_d(t) - y(t).$$

Con esta diferencia se construye una acción de control proporcional al error y una acción integral cuya función es eliminar el error en estado estacionario. La estructura estándar del controlador PI es representada como

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\sigma) d\sigma, \quad (2)$$

donde k_p es la ganancia proporcional, k_i es la ganancia integral y $u(t)$ es la señal de control.

La función de transferencia del sistema (1) en lazo cerrado con la ley de control (2) satisface

$$\frac{Y(s)}{Y_d(s)} = \frac{(k_p s + k_i) ke^{-s\tau}}{(k_p s + k_i) ke^{-s\tau} + \gamma s^2 + s}, \quad (3)$$

donde $Y_d(s)$ denota la temperatura deseada en la cámara de incubación.

En lo subsecuente, se describe el método de \mathcal{D} -Particiones para obtener ganancias estabilizantes de la ley de control PI en presencia del retardo τ en la entrada de la planta. Es importante destacar que esta metodología ha sido ampliamente utilizada en la estabilización de sistemas con retardos dado que proporciona condiciones necesarias y suficientes para la estabilidad.

2.3 D-Particiones

Se considera la ecuación característica del sistema (1) en lazo cerrado con (2), dada por el cuasipolinomio de la forma

$$Q(s, k_p, k_i) = s^2 + \frac{s}{\gamma} + \frac{(k_p s + k_i) k e^{-s\tau}}{\gamma}. \quad (4)$$

El objetivo de esta sección es el estudio de la σ -estabilidad del sistema (1) en lazo cerrado con (2). Para ello, se considera $\sigma > 0$ y se realiza el cambio de variable $s \rightarrow (s - \sigma)$, de tal manera el cuasipolinomio (4) toma la forma

$$\begin{aligned} Q_\sigma(s, k_p, k_i) &:= Q(s - \sigma, k_p, k_i) \\ &= (s - \sigma)^2 + \frac{s - \sigma}{\gamma} + \\ &\quad \frac{(k_p (s - \sigma) + k_i) k e^{-(s - \sigma)\tau}}{\gamma}. \end{aligned} \quad (5)$$

Observe que el análisis de la σ -estabilidad de (4) es análogo al análisis de la estabilidad marginal del cuasipolinomio transformado (5) para cualquier σ dado (Bellman and Cooke, 1963).

Fronteras de estabilidad A continuación se caracterizan las regiones σ -estables aplicando el método D-Particiones (Nejmark, 1949), esta metodología determina el cruce de raíces cuando $s = 0$ y $s = \pm i\omega$, $\omega \in \mathbb{R}^+$, $i^2 = -1$. Al evaluar $s = 0$ en la ecuación (5) resulta

$$\sigma^2 - \frac{\sigma}{\gamma} + \frac{(-k_p \sigma + k_i) k e^{\sigma \tau}}{\gamma} = 0,$$

con lo cual

$$k_i = -\frac{\sigma(\sigma\gamma - 1)}{k e^{\sigma\tau}} + k_p \sigma.$$

Evaluando $s = i\omega$ en (5) se tiene

$$(i\omega - \sigma)^2 + \frac{i\omega - \sigma}{\gamma} + \frac{(k_p (i\omega - \sigma) + k_i) k e^{-(i\omega - \sigma)\tau}}{\gamma} = 0,$$

o lo que es igual

$$\operatorname{Re}\{Q_\sigma(i\omega, k_p, k_i)\} + i\operatorname{Im}\{Q_\sigma(i\omega, k_p, k_i)\} = 0,$$

donde

$$\operatorname{Re}\{\cdot\} = \frac{(-k_p \sigma + k_i) k e^{\sigma \tau} \cos(\tau \omega)}{\gamma} + \frac{k_p \omega k e^{\sigma \tau} \sin(\tau \omega)}{\gamma} - \frac{\omega^2 + \sigma^2 - \frac{\sigma}{\gamma}}{\gamma}, \quad (6)$$

$$\operatorname{Im}\{\cdot\} = \frac{k_p \omega k e^{\sigma \tau} \cos(\tau \omega)}{\gamma} - \frac{(-k_p \sigma + k_i) k e^{\sigma \tau} \sin(\tau \omega)}{\gamma} - \frac{-2\omega\sigma + \frac{\omega}{\gamma}}{\gamma}. \quad (7)$$

Mediante operaciones algebraicas entre las expresiones (6)-(7) se obtiene

$$k_p = \frac{(2\omega\sigma\gamma - \omega) \cos(\tau\omega) + \sin(\tau\omega) (\omega^2\gamma - \sigma^2\gamma + \sigma)}{e^{\sigma\tau} k \omega \left((\cos(\tau\omega))^2 + (\sin(\tau\omega))^2 \right)}, \quad (8)$$

$$k_i = \frac{((-\gamma\sigma + 1) \sin(\tau\omega) + \gamma\omega \cos(\tau\omega)) (\omega^2 + \sigma^2)}{e^{\sigma\tau} k \omega \left((\cos(\tau\omega))^2 + (\sin(\tau\omega))^2 \right)}. \quad (9)$$

Las expresiones (8) y (9) definen las fronteras σ -estables en el espacio paramétrico (k_p, k_i) .

3. DESARROLLO

En esta sección, se describe el diseño mecánico de la incubadora, así como el proceso de sintonización del controlador PI. Las representaciones virtuales en tres dimensiones se llevan a cabo empleando el software SolidWorks ©, versión 2019.

3.1 Diseño mecánico virtual

La estructura general de la incubadora propuesta se muestra en la Figura 1. Se ha diseñado una cámara de incubación con dimensiones de 95 cm de longitud, 48 cm de ancho y 70 cm de alto, con la capacidad de albergar hasta 224 huevos, como se representa en la Figura 3. Esta incubadora se sostiene mediante la base del calentador '1', que también soporta el termotanque '2' y los tubos de vacío '3'. En los laterales del termotanque se encuentran los marcos de soporte de la cámara de incubación '4'. Las tapas laterales derecha e izquierda '5' sostienen los marcos '6' de las ventilas responsables del control de humedad '7'. En la parte superior de la cámara de incubación, se aprecia la tapa superior '8', que proporciona soporte al conducto de ventilación '9'. Este conducto extrae el aire del interior de la cámara, asegurando una ventilación constante. Dentro de este conducto se encuentra el motor ventilador, que genera el flujo de aire necesario para mantener las condiciones adecuadas en la cámara de incubación. En la parte superior del conducto, se coloca una cubierta '10' que previene la caída de objetos extraños

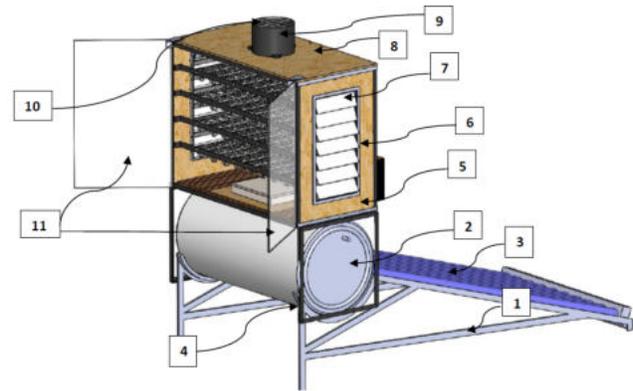


Fig. 1. Estructura general de la incubadora propuesta.

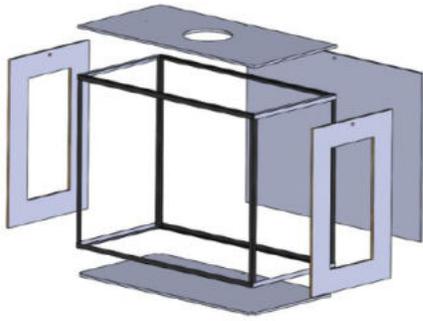


Fig. 2. Vista explosiva de la cámara de incubación.

en el interior de la cámara de incubación. La incubadora cuenta con dos tapas de acrílico '11', una a la izquierda y otra a la derecha. Estas tapas están sujetas mediante dos bisagras atornilladas a la tapa superior para facilitar su apertura y cierre.

La dimensión de la canasta para sostener los huevos se calcula tomando el promedio de 22 piezas de huevo de diferentes tamaños. El diámetro resultante es de 47.52mm , y la altura es de 52.25mm , como se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Dimensiones promedio de un huevo de gallina

N.º	Diámetro (mm)	Altura (mm)
1	47.56	52.14
2	47.94	53.21
3	47.6	53.34
4	48.22	52.25
5	48.51	52.54
6	48.65	53.62
7	44.96	52.56
8	47.76	51.45
9	46.49	50.76
10	46.68	52.02
11	47.33	53.92
12	46.48	52.03
13	47.78	50.32
14	47.63	50.06
15	47.37	53.23
16	46.28	51.46
17	48.79	51.32
18	48.17	53.53
19	48.04	51.46
20	47.88	52.78
21	47.52	53.22
22	47.8	52.29
Promedio	47.52	52.25

En la Figura 3, se presenta un arreglo para una fila de siete huevos. Cada canasta está diseñada de manera individual y tiene la capacidad de acoplarse a otras mediante una varilla sujetadora.

La cama de incubación se diseña para albergar hasta 56 huevos, como se muestra en la Figura 4.



Fig. 3. Arreglo de canastas.

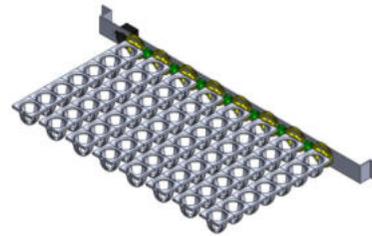


Fig. 4. Ensable de la cama de incubación.

3.2 Modelado de la resistencia calefactora

Se propone un sistema híbrido de control de temperatura que incorpora dos fuentes de energía térmica. Por un lado, se cuenta con una resistencia calefactora que opera exclusivamente con energía eléctrica, y por otro lado, se incluye un calentador solar. El sistema está diseñado para cambiar automáticamente la fuente de energía térmica cuando el termostato no pueda proporcionar calor. Sin embargo, este trabajo se enfoca en el modelado y control de temperatura exclusivamente para la resistencia calefactora.

Al interior de la cámara de incubación se encuentra la resistencia calefactora atornillada a la tapa inferior, Figura 5. Se propone el uso de una resistencia de níquel-cromo con una tensión nominal de 120 Vac. Siguiendo la metodología descrita en la Subsección 2.1, se aplicó una señal escalón $u(t)$ del 20% del valor nominal (24Vac) al sistema en lazo abierto.

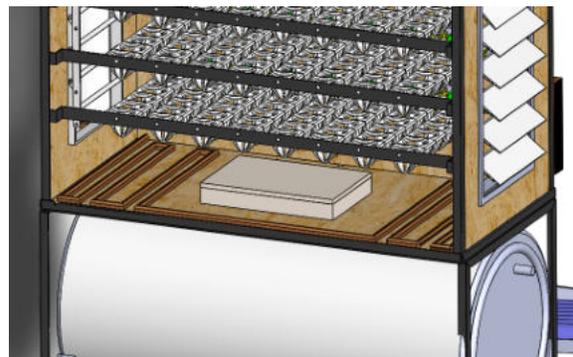


Fig. 5. Resistencia calefactora.

De la respuesta del sistema se obtiene $t_0 = 0$, $t_1 = 1.2$, $t_2 = 29$. Por lo tanto

$$\begin{aligned}\tau &= t_1 - t_0 = 1.2, \\ \gamma &= t_2 - t_1 = 27.8, \\ k &= \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} = 3.166.\end{aligned}$$

De este modo, la función de transferencia queda definida como

$$G(s) = \frac{3.166e^{-1.2s}}{1 + 27.8s}.$$

A continuación, se ilustra la región de estabilidad del sistema (1) en lazo cerrado con la ley de control (2). En la Figura 6, el contorno exterior denota la frontera de estabilidad, es decir, provee el par (k_p, k_i) con lo cual los polos del sistema (3) están sobre el eje imaginario ($\sigma = 0$). Mientras que para cada uno de los contornos interiores, el par (k_p, k_i) , define las regiones donde el sistema es exponencialmente estable con una específica tasa de decaimiento $\sigma > 0$. El máximo decaimiento exponencial alcanzable denotado por σ^* , ocurre cuando todas las regiones σ -estables colapsan en un punto (k_p, k_i) del espacio paramétrico.

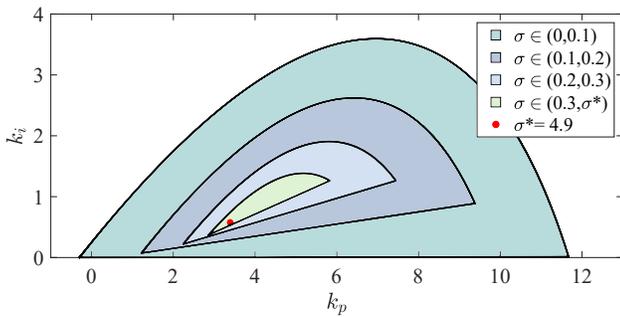


Fig. 6. Regiones σ -estables en el espacio paramétrico (k_p, k_i) .

4. RESULTADOS VÍA SIMULACIÓN

En esta sección, se presentan los resultados de simulación correspondientes al sistema (1) en un lazo cerrado con la ley de control (2). Los parámetros del sistema se detallan en la Sección 3.2. Las ganancias del controlador PI se han establecido en $k_p = 1.26$ y $k_i = 0.064$, seleccionadas con base en la región de estabilidad ilustrada en la Figura 6. Es importante destacar que, aunque la máxima tasa de decaimiento del sistema en lazo cerrado corresponde a $\sigma = 4.9$, la respuesta transitoria presenta un sobre pico mayor.

En las Figuras 7 y 8 se ilustran la salida y la señal de control del sistema en lazo cerrado (1)-(2).

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta el diseño virtual de una incubadora ecológica de huevos. Se emplea una ley de

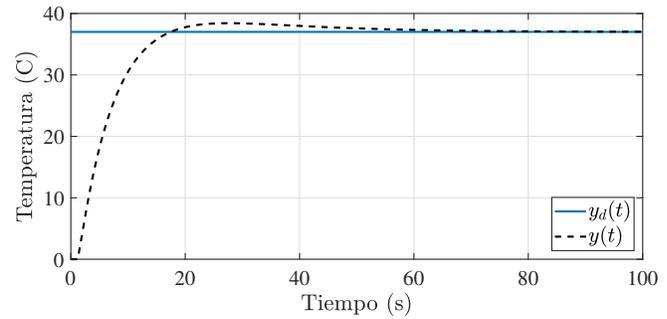


Fig. 7. Señal de referencia $y_a(t)$ y señal de salida $y(t)$ del sistema en lazo cerrado (1)-(2).

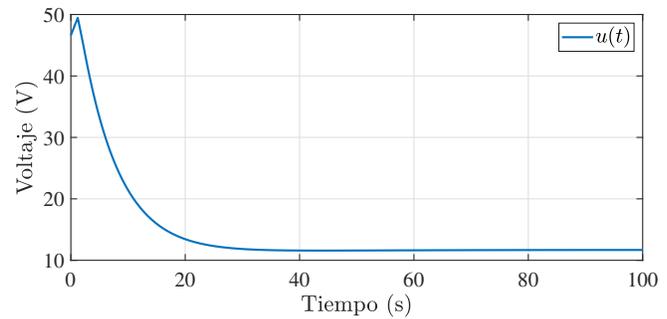


Fig. 8. Señal de control $u(t)$ del sistema en lazo cerrado (1)-(2).

control PI para controlar la temperatura en el interior de la cámara de incubación. La estabilización del sistema en lazo cerrado se realiza empleando el método de \mathcal{D} -particiones, el cual permite obtener las regiones de estabilidad en presencia del retardo en la planta. Como trabajo a futuro, se modelarán y regularán las siguientes variables de incubación: humedad, movimiento y ventilación.

ACKNOWLEDGEMENTS

Agradecimientos al Tecnológico Nacional de México, proyecto 15370.22-PD y a la UPIEM-IPN, proyecto PECI 20230697.

REFERENCIAS

- Astrom, K.J. (1995). PID controllers: theory, design, and tuning. *The International Society of Measurement and Control*.
- Bellman, R. and Cooke, K. (1963). *Differential-difference equations*. Academic Press, New York.
- Du, W.G., Wang, L., and Shen, J.W. (2010). Optimal temperatures for egg incubation in two geoemydid turtles: *Ocadia sinensis* and *mauremys mutica*. *Aquaculture*, 305(1-4), 138–142.
- Dutta, P. and Anjum, N. (2021). Optimization of temperature and relative humidity in an automatic egg incubator using mamdani fuzzy inference system. In *2021 2nd International Conference on Robotics, Elec-*

- trical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, 12–16. IEEE.
- Ghaderi, M., Banakar, A., and Masoudi, A.A. (2018). Using dielectric properties and intelligent methods in separating of hatching eggs during incubation. *Measurement*, 114, 191–194.
- Glenn III, D.W. and Tiersch, T.R. (1997). An alternative egg-incubation jar. *The Progressive Fish-Culturist*, 59(3), 253–255.
- Goodman, R.M. (2008). Latent effects of egg incubation temperature on growth in the lizard *anolis carolinensis*. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological Genetics and Physiology*, 309(9), 525–533.
- Guo, B., Dai, Z., Ren, Y., Zhu, H., Shao, X., Sun, A., and Shi, Z. (2021). Improvement of goose embryonic and muscular developments by wider angle egg turning during incubation and the regulatory mechanisms. *Poultry Science*, 100(12), 101477.
- Kabir, M.A. and Abedin, M. (2018). Design and implementation of a microcontroller based forced air egg incubator. In *2018 International Conference on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE)*, 1–4. IEEE.
- Massey, M.D. and Hutchings, J.A. (2021). Thermal variability during ectotherm egg incubation: a synthesis and framework. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology*, 335(1), 59–71.
- Nejmark, J.I. (1949). D-decomposition of the space of quasipolynomials. *Prikl. Matem. i Mech*, 13, 349–379.
- Oliveira, G.d.S., Dos Santos, V.M., Rodrigues, J.C., and Nascimento, S.T. (2020). Effects of different egg turning frequencies on incubation efficiency parameters. *Poultry science*, 99(9), 4417–4420.
- Szolga, L. and Bondric, A. (2020). Smart system for incubating eggs. In *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, 260–264. IEEE.