

## Control e instrumentación de un sistema de deshidratación atmosférica

## Control and Instrumentation of an Atmospheric Dehydration System

*Alexis Fernando Pérez García<sup>a</sup>, Rodrigo Velasco Rebollo<sup>b</sup>, Omar Jacobo Santos Sánchez<sup>c</sup>*

### Abstract:

This study presents the implementation of a Proportional-Integral-Derivative (PID) controller with gain optimization applied to an atmospheric fish dehydration system. The novelty of the work lies in the design of a control card selector that enables operation with multiple devices, as well as in the tuning of PID gains to enhance the thermal system performance. Experimental results demonstrate significant improvements in system performance: a 39.37% reduction in the Integral Absolute Error (IAE), a 78.6% decrease in overshoot, a 6.29% reduction in stabilization time, and a 2.98% decrease in energy consumption compared to the conventional PID-Ziegler-Nichols method. These advancements allow for optimal temperature control during the drying process, improving operational efficiency and the quality of the final product.

### Keywords:

*Gain optimization, PID control, dehydration process.*

### Resumen:

El presente estudio describe la implementación de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) con optimización de ganancias aplicado a un sistema de deshidratación atmosférica de pescado. La novedad del trabajo radica en el diseño de un seleccionador de tarjetas de control que permite operar con distintos dispositivos, así como en el ajuste de las ganancias del PID para mejorar el rendimiento del sistema térmico. Los resultados experimentales evidencian una mejora significativa en el desempeño del sistema: se logró una reducción del error absoluto integral (IAE) del 39.37 %, una disminución del sobreimpulso del 78.6 %, una reducción del tiempo de estabilización del 6.29 %, y un ahorro energético del 2.98 %, en comparación con el método PID-Ziegler-Nichols. Estos avances permiten mantener condiciones óptimas de temperatura durante el proceso de secado, mejorando la eficiencia operativa y la calidad del producto final.

### Palabras Clave:

*Optimización de ganancias, control PID, proceso de deshidratación.*

## Introducción

En el ámbito de los sistemas de control, y en general en la ingeniería, se han buscado herramientas y métodos que permitan desarrollar proyectos que contribuyan al avance de la tecnología y generen un beneficio para la humanidad. Un ejemplo de ello es el sistema de deshidratación atmosférica, que se utiliza para eliminar el contenido de agua en los alimentos mediante la exposición a un flujo de aire caliente a presión atmosférica.

El proceso de deshidratación de alimentos es uno de los métodos más antiguos y tradicionales para la conservación de los mismos. Se puede realizar mediante el secado a cielo abierto (exposición directa al sol) o con el uso de cámaras de secado [2]. La función principal de una máquina de deshidratación atmosférica es la de reducir el contenido de agua de los alimentos, al calentar una resistencia eléctrica, mientras un sistema de ventilación permite la circulación de un flujo de aire que pasa por ella y después por los alimentos.

<sup>a</sup> Alumno de la licenciatura en ingeniería en electrónica, Instituto de Ciencias Básicas e ingenierías | Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) | Pachuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0009-4424-6874>, Email: [pe440408@uaeh.edu.mx](mailto:pe440408@uaeh.edu.mx)

<sup>b</sup> Alumno del Doctorado en Ciencias en Automatización y Control, Instituto de Ciencias Básicas e ingenierías | Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) | Pachuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0004-9611-2759>, Email: [ve387696@uaeh.edu.mx](mailto:ve387696@uaeh.edu.mx)

<sup>c</sup> Profesor Investigador, Instituto de Ciencias Básicas e ingenierías | Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH) | Pachuca-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1694-2727>, Email: [omarj@uaeh.edu.mx](mailto:omarj@uaeh.edu.mx)

De esta manera, se reduce el volumen del producto, lo que facilita su transporte.

A diferencia de los sistemas descritos por Castro Lumbi et al. [1], que empleaban microcontroladores básicos, el presente trabajo incorpora un seleccionador de tarjetas y control PID optimizado, lo que permite mayor flexibilidad y precisión en el proceso.

Algunos de los beneficios más comunes de la deshidratación de alimentos, son: la conservación, facilidad de transporte, prolongación de la vida útil y preservación de micronutrientes, tomando lo anterior en cuenta en este estudio se experimentó con la deshidratación de pescado. Esto no solo se realizó pensando en su consumo humano, sino también en su posible uso como alimento para animales. Por otro lado, Párraga Rivera y Zambrano Santana [3] desarrollaron alimentos deshidratados para perros utilizando carne de cerdo, enfocándose en calidad microbiológica y bromatológica. Este estudio complementa dicha línea al aplicar control avanzado en la deshidratación de pescado, con potencial para uso humano y animal. Incluso tiene aplicaciones en la industria cosmética y farmacéutica, donde, por ejemplo, plantas como el aloe vera se deshidratan para obtener polvo seco, utilizado en la elaboración de productos medicinales o cosméticos [4].

Este estudio se centró principalmente en la deshidratación de pescado, explorando las posibilidades que surgen al implementar un sistema de deshidratación energéticamente eficiente. Para ello, se requiere un sistema que permita controlar el tiempo de secado, monitorear el proceso y optimizar el uso de energía eléctrica. En este contexto, se implementó un control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) para optimizar las ganancias del sistema. Se estima que alrededor del 90% de los sistemas cerrados utilizan un controlador PID, ya que se basan en esquemas de ajuste, identificación y técnicas de adaptación [5].

El objetivo del control PID implementado en este sistema es minimizar el error entre la señal de referencia (temperatura deseada) y la señal de salida del sistema (temperatura medida). Además, este controlador tiene la capacidad de anticipar cambios futuros gracias a su acción derivativa [6].

El control PID se compone de la suma de tres términos: el término proporcional, el término derivativo y el término integral [7].

En palabras más simples, se puede decir que en el control PID, la parte proporcional refleja el estado presente, la parte integral considera lo ocurrido en el pasado, y la parte derivativa anticipa lo que puede suceder en el futuro. En este caso, estas tres partes trabajan juntas para ajustar la temperatura deseada y lograr la deshidratación adecuada de los alimentos en experimentación.

En estudios previos como el de Cuji Secaira [8], se aplicaron controladores On-Off, PI y PID al proceso de deshidratación de tomate, obteniendo mejoras en la estabilidad térmica, pero con tiempos de secado prolongados (10 horas). En

contraste, el presente trabajo propone un sistema con control PID optimizado que presenta una mejora en eficiencia energética.

En el siguiente apartado, se presentará la metodología, el problema a resolver, el funcionamiento de la máquina de deshidratación atmosférica y las partes que la componen.

El objetivo principal es eliminar la mayor cantidad posible de agua, lo que permite extender la vida útil del producto mientras se mantienen sus propiedades nutricionales. Este enfoque ha sido validado por estudios previos, como el presentado en [9], donde se discuten métodos tradicionales de secado, tendencias actuales en la deshidratación de alimentos y su impacto en la vida útil e integridad nutricional.

### Metodología

Los materiales utilizados en contacto directo con el pescado deshidratado cumplen con las normativas de sanidad vigentes. La estructura de la máquina está hecha con acero inoxidable de grado alimenticio, reconocido por su resistencia a la corrosión, facilidad de limpieza y compatibilidad con procesos alimentarios. Este tipo de acero cumple con los requisitos establecidos por la FDA, que regula las Buenas Prácticas de Manufactura para alimentos, incluyendo equipos y superficies en contacto con productos alimenticios [13]. Para la manipulación del producto, se emplearon guantes de nitrilo certificados para uso alimentario, los cuales cumplen con las especificaciones sanitarias establecidas por la COFEPRIS en la NOM-251-SSA1-2009, que regula las prácticas de higiene en el proceso de alimentos, bebidas y suplementos alimenticios [14]. Estas medidas aseguran que el proceso de deshidratación se realice bajo condiciones sanitarias adecuadas, minimizando el riesgo de contaminación cruzada y asegurando la calidad e inocuidad del producto final.

El prototipo cuenta con las siguientes características: Medidas de 80cm x 90cm x 70cm, la cámara dispone de un área de secado con un túnel de viento como salida.

Cámara de calentamiento, donde una rejilla eléctrica (actuador) varía la temperatura según el voltaje que se aplica, el cual va desde 0-127VAC también cuenta con un ventilador en la parte trasera de la cámara, que produce un flujo de aire constante. En el diagrama de la Fig. 1. Se puede apreciar a manera general el diagrama esquemático de la máquina. Cuenta con un sensor de temperatura el LM35, que es un sensor de temperatura lineal de alta precisión y entrega una salida de voltaje lineal proporcional a la temperatura en grados Celsius, a razón de 10mV/°C. Cuenta con un rango de temperatura que va desde -55°C a + 150°C.

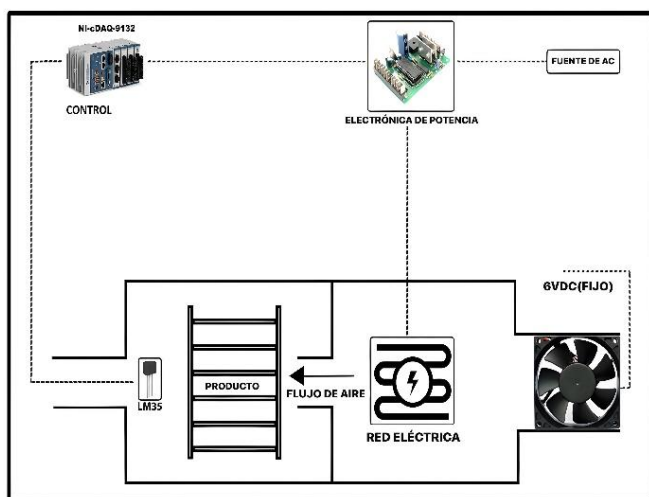


Fig. 1. Diagrama del prototipo de deshidratación.

La deshidratadora atmosférica cuenta con tres cabinas destinadas a colocar los alimentos para su deshidratación, y un cuarto nivel en la parte inferior, donde se ubica el sistema de control. Para su funcionamiento, se utilizan dos fuentes de voltaje: la primera es una fuente de 12V que alimenta los ventiladores, mientras que la segunda fuente se encarga de suministrar energía al sensor de temperatura y al sistema de control.

De manera general, en cuanto a la estructura física y funcionamiento del proyecto, se utilizó un dispositivo de adquisición de datos, modelo USB-6008 de National Instruments, que es responsable de la lectura de señales analógicas, es en este dispositivo donde se conecta el sensor de temperatura LM35, cuyas lecturas se procesan dentro del software LabVIEW donde se calcula la señal de control que se aplica a un circuito de potencia. Este último se encarga de regular el voltaje que se aplica al actuador, por el cual circula un flujo de aire generado por los ventiladores.

### Diseño experimental y Protocolo

El protocolo experimental tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de un sistema de deshidratación atmosférica controlado mediante un algoritmo PID optimizado, aplicado al secado de pescado molido. Cada muestra tuvo un peso inicial de 100 gramos, y se realizaron tres réplicas por configuración de control para asegurar la validez estadística de los resultados. Las muestras fueron pesadas antes y después del proceso para calcular la pérdida de humedad, utilizando una balanza digital con precisión de 0.01 g. Durante el secado, se rotaron cada hora para asegurar una distribución homogénea del flujo de aire. El setpoint de temperatura fue de 60 °C, y el proceso se monitoreó durante 5 horas y 20 minutos. La velocidad de flujo de aire fue de 2.1 m/s.

La señal de control fue generada mediante LabVIEW y aplicada a través de un circuito de potencia conectado a una resistencia eléctrica. La temperatura fue monitoreada en tiempo real mediante un sensor LM35, con una precisión de 10 mV/°C. Las variables dependientes incluyeron la pérdida de masa (como indicador de humedad), el tiempo de estabilización de temperatura y el consumo energético del sistema térmico.

El pescado fue seleccionado como modelo experimental por su alto contenido proteico y su relevancia en la alimentación animal y humana. Las muestras fueron colocadas sobre láminas de aluminio, etiquetadas y almacenadas al finalizar el proceso. El objetivo fue reducir la humedad por debajo del 10%, asegurando un secado uniforme y eficiente. Los datos obtenidos fueron analizados para validar el desempeño del controlador PID y su impacto en la calidad del producto final.

Cabe mencionar que no solo se utilizó la NI USB-6008 en el sistema, sino que también se emplearon otras tarjetas para la adquisición de datos y la aplicación de la señal de control. Ante la necesidad de utilizar múltiples dispositivos de control, se diseñó un circuito seleccionador que permite cambiar de módulos de manera práctica y eficiente. Esto es especialmente útil al realizar experimentos, ya que se emplearon otros dispositivos de control, como el cDAQ-9182 en conjunto con el chasis CDAQ-9184, además de un PID industrial marca Honeywell modelo DC-1040, para operar el sistema en diferentes escenarios y así realizar comparaciones. Por lo tanto, el diseño de este seleccionador facilita el cambio entre tarjetas de control. El diseño mencionado se realizó de la forma siguiente:

Un multiplexor empleado permite seleccionar una de las tres señales de entrada y dirigirla hacia una única línea de salida. Utilizando compuertas analógicas, se controla el flujo de señales, tal como se muestra en la Fig.2. Las compuertas lógicas no operan de manera aislada para controlar las señales, sino que actúan en conjunto con relés, los cuales aíslan completamente las señales y proporcionan una conmutación robusta entre las entradas. Para superar la limitación de corriente en las salidas de las compuertas y controlar relés de mayor potencia, se emplea el ULN2003A, que resuelve eficazmente las restricciones de corriente.

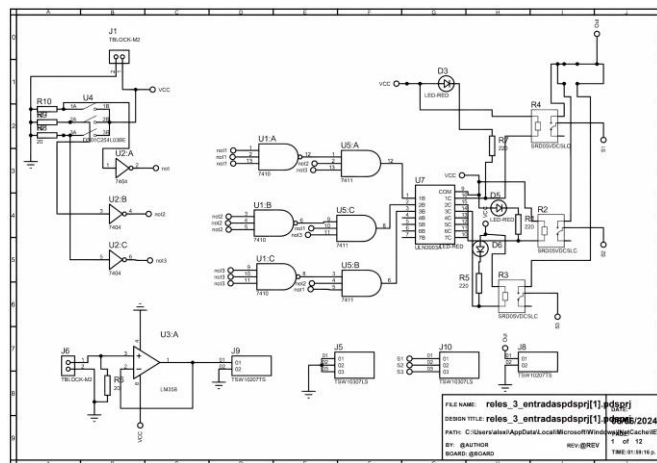


Fig.2. Diseño esquemático del seleccionador.

Se implementó un sistema de seguridad en las combinaciones de las compuertas para que dependan una de la otra. Es decir, al activar la primera compuerta se enciende el LED 1 como referencia para indicar que el relé 1 está activo, así como la señal 1, de manera similar para los otros 2 relés, sin embargo, se implementó un sistema de seguridad que asegura que, si se activa la señal 1 y por descuido se activa también la señal 2, ambas señales se desactivaran inmediatamente, impidiendo el paso de ninguna de ellas. Este sistema de protección se aplicó a los tres relés, haciendo que cada uno dependa del otro. Para

lograr este sistema, se utilizaron diferentes tipos de compuertas como: compuerta AND, Tabla. 1. compuerta NAND, Tabla. 2. Y por último compuerta NOT. Tabla. 3.

| A | B | C | S |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

Tabla. 1. Tabla de verdad compuerta AND.

| A | B | C | S |
|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 0 |

Tabla. 2. Tabla de verdad compuerta NAND.

| A | S |
|---|---|
| 0 | 1 |
| 1 | 0 |

Tabla. 3. Compuerta NOT.

Para un mejor manejo de combinaciones y utilizando la electrónica digital, se obtienen las siguientes expresiones booleanas.

**Caso 1** para la primera entrada, clasificando los interruptores como:

A= Interruptor 1, B= Interruptor 2, C= Interruptor 3, S= Salida.

La primera expresión booleana seria:

$$\bar{A} + (\bar{A} * \bar{A} * \bar{A}) + (A * B * C) = S \quad (1)$$

Los interruptores se interpretan mediante entradas de voltaje (1 y 0), considerando que, cuando están apagados, el valor es 0, y cuando están encendidos, con una entrada de voltaje de 5v, el valor es 1. Se obtiene lo siguiente al sustituir (1):

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 1 * 1) = 1$$

Donde

$$\bar{A} = 0, A = 1, B = 1 \text{ y } C = 1$$

Por lo tanto, la salida es 1, lo que activa el primer relé y lo que esté conectado al seleccionador. En el sistema de seguridad, cuando se enciende un segundo interruptor, ya sea B o C, las ecuaciones booleanas quedarían de la siguiente manera al activar el interruptor 2:

$$\bar{A} + (\bar{A} * \bar{A} * \bar{A}) + (A * \bar{B} * C) = S, (B)$$

$$\bar{A} + (\bar{A} * \bar{A} * \bar{A}) + (A * B * \bar{C}) = S, (C)$$

Sustituyendo:

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 0 * 1) = 0, (B)$$

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 1 * 0) = 0, (C)$$

Esto demuestra que el sistema de seguridad funciona correctamente, según las comprobaciones realizadas con álgebra booleana, donde la salida será 0 al activar más de una entrada. Lo mismo ocurre en los siguientes dos casos.

**Caso 2.**

$$\bar{B} + (\bar{B} * \bar{B} * \bar{B}) + (A * B * C) = S \quad (2)$$

Sustituyendo (2)

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 1 * 1) = 1$$

Al igual que en el caso anterior, al activar un segundo interruptor A o C ocurre lo siguiente:

$$\bar{B} + (\bar{B} * \bar{B} * \bar{B}) + (\bar{A} * B * C) = S, (A)$$

$$\bar{B} + (\bar{B} * \bar{B} * \bar{B}) + (A * B * \bar{C}) = S, (C)$$

Sustituyendo

$$0 + (0 * 0 * 0) + (0 * 1 * 1) = 0, (A)$$

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 1 * 0) = 0, (C)$$

Siempre teniendo en cuenta que:

$$(A, B, C = 1) \text{ y } (\bar{A}, \bar{B}, \bar{C} = 0)$$

**Caso 3.**

$$\bar{C} + (\bar{C} * \bar{C} * \bar{C}) + (A * B * C) = S \quad (3)$$

Sustituyendo (3)

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 1 * 1) = 1$$

Queda la misma lógica que en los casos anteriores al activar otro interruptor A o B.

$$\bar{C} + (\bar{C} * \bar{C} * \bar{C}) + (\bar{A} * B * C) = S, (A)$$

$$\bar{C} + (\bar{C} * \bar{C} * \bar{C}) + (A * \bar{B} * C) = S, (B)$$

Sustituyendo

$$0 + (0 * 0 * 0) + (0 * 1 * 1) = 0, (A)$$

$$0 + (0 * 0 * 0) + (1 * 0 * 1) = 0, (B)$$

El diagrama, funcionando según lo previsto, dio origen a la PCB, diseñada con el software Proteus, como se muestra en la Fig. 3. La placa fue fabricada utilizando una CNC LPKF ProtoMat S43. Esta máquina permite la creación de diseños complejos y detallados, como el de la placa presentada en la Fig. 4.

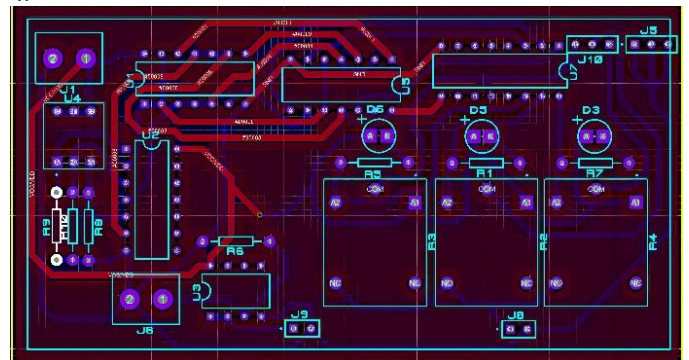


Fig.3. Pcb del seleccionador.

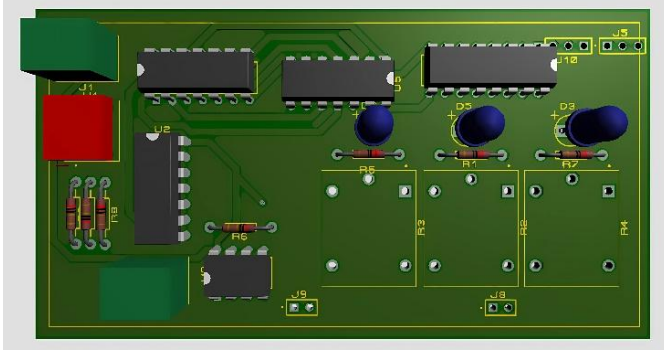


Fig. 4. Vista 3D del seleccionador.

La implementación de este seleccionador facilitó el manejo de las tarjetas de control, ya que la salida del seleccionador se conecta al dimmer, el cual recibe los datos enviados por la tarjeta de control para regular la potencia aplicada a la resistencia eléctrica. La máquina de deshidratación se modela como un sistema lineal escalar.

$$\dot{x}(t) = ax(t) + bu(t) \dots (10)$$

En este modelo,  $u(t)$  representa el voltaje aplicado a la tarjeta de electrónica de potencia, que suministra el voltaje en corriente alterna al sistema de calefacción, y  $x(t)$  representa la temperatura en el área de deshidratado.

En este estudio se hace mayor énfasis en la aplicación del controlador PID para ajustar las ganancias en este sistema. El control se centra en regular la señal de control  $u(t)$  para mantener la temperatura lo más cercana posible al valor deseado.

Para optimizar las ganancias del controlador PID, se empleó el algoritmo de descenso de gradiente, el cual permite ajustar los parámetros del sistema mediante la minimización de una función de coste, tal como se describe en [11]. Dicha función se define como

$$J = x^T(N)Hx(N) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \{x^T(i)Qx(i) + u^T(i)Ru(i)\},$$

donde  $x(t)$  es el estado y  $u(t)$  la señal de control.

En la siguiente sección se presentan los resultados obtenidos.

### Resultados

Primeros resultados (Implementación de un PID digital mediante su algoritmo de velocidad) El sistema logró una reducción del error IAE del 39.37% y un ahorro energético del 2.98% en comparación con el controlador PID-ZN.

Partiendo de

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Tomada de [7]

Para discretizar la ecuación anterior se considera un tiempo discreto  $t = KT_s$ , donde  $T_s$  es el tiempo de muestreo,  $k$  el instante de muestreo,  $k = 0, 1, 2, \dots$  y la parte proporcional discretizada se expresa como  $K_p e(KT_s)$

La parte integral puede ser expresada como la suma de áreas en cada instante

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_i} \int_0^{t=KT_s} e(\tau) d\tau &= \frac{1}{T_i} \left[ \int_0^{T_s} e(t) dt + \int_{T_s}^{2T_s} e(t) dt + \dots \right. \\ &\quad \left. + \int_{(k-1)T_s}^{kT_s} e(t) dt \right] = \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \\ &\approx \frac{1}{T_i} [T_s e(0) + T_s e(T_s) + \dots + T_s e(KT_s)], \end{aligned}$$

La parte integral se expresa de la siguiente manera

$$\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \approx \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i).$$

Ahora para la discretización de la parte derivativa se usa la aproximación de Euler hacia atrás quedando de la siguiente manera

$$T_d \frac{de(t)}{dt} \approx T_d \frac{e(KT_s) - e(KT_s - T_s)}{T_s},$$

Usando notación simplificada, el controlador PID discreto se expresa de la siguiente forma

$$u(k) = k_p e(k) + \frac{k_p T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + k_p T_d \left[ \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \right]$$

O bien

$$u(k) = k_p \left\{ e(k) \left[ 1 + \frac{T_d}{T_s} \right] + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) - \frac{T_d}{T_s} e(k-1) \right\} (1)$$

La expresión anterior corresponde al algoritmo de posición de PID.

La ecuación (1) se calcula en un instante anterior por lo que se tiene

$$\begin{aligned} u(k-1) &= k_p \left\{ e(k-1) \left[ 1 + \frac{T_d}{T_s} \right] \right. \\ &\quad \left. + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^{k-2} e(i) - \frac{T_d}{T_s} e(k-2) \right\} \end{aligned}$$

Por lo que al hacer la operación  $u(k) - u(k - 1)$  se obtiene lo siguiente

$$u(k) = u(k - 1) + k_p \left\{ e(k) \left[ 1 + \frac{T_d}{T_s} \right] + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) - \frac{T_d}{T_s} e(k - 1) \right\} - k_p \left\{ e(k - 1) \left[ 1 + \frac{T_d}{T_s} \right] + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) - \frac{T_d}{T_s} e(k - 2) \right\}$$

Con lo anterior se obtiene el algoritmo de velocidad del PID mostrado a continuación

$$u(k) = u(k - 1) + kp \left\{ \left[ 1 + \frac{T_d}{T_s} + \frac{T_s}{T_i} \right] e(k) - \left[ 1 + 2 \frac{T_d}{T_s} \right] e(k - 1) + \frac{T_d}{T_s} e(k - 2) \right\}$$

El algoritmo de velocidad es útil para simplificar la implementación práctica del controlador mediante diagrama de bloques en el software de instrumentación virtual LabVIEW.

#### Experimentos con pescado

Se realizaron tres réplicas por cada configuración experimental con el objetivo de garantizar la validez estadística de los resultados obtenidos. Esta práctica permite evaluar la consistencia del sistema bajo condiciones controladas y minimizar el efecto de posibles variaciones externas. El flujo de aire de 2.1 m/s fue determinado a partir de las especificaciones técnicas del ventilador utilizado en la cámara de secado, cuya función es mantener una circulación constante de aire caliente para facilitar la transferencia de humedad desde el producto hacia el exterior. Las dimensiones internas de la cámara (40x30x25 cm) fueron seleccionadas en función de la capacidad requerida para alojar las muestras de pescado molido, permitiendo una distribución uniforme del flujo térmico y asegurando condiciones homogéneas durante el proceso de deshidratación.

Teniendo en cuenta el algoritmo de velocidad aplicado al proceso de deshidratación, se decidió iniciar los experimentos con alimentos que en este caso se realizó con pescado. Este alimento fue seleccionado debido a su alto contenido proteico y su relevancia tanto en la alimentación animal, como para ganado, y también para su uso en la investigación científica. El pescado, además de ser un insumo clave en la producción de alimentos para animales, representa un modelo adecuado para experimentos en laboratorios de biología, donde sus propiedades y comportamiento bajo diferentes condiciones de secado pueden proporcionar información valiosa sobre procesos de conservación y estabilidad de nutrientes. A través de estos experimentos, se busca optimizar los parámetros del controlador PID y otros componentes del sistema de deshidratación para maximizar la eficiencia del proceso y la calidad del producto final.

Obteniendo el pescado es necesario molerlo para poder pesarlo, en este caso se experimentó con cada 100g de producto de



Fig. 5. Pescado Molido

pescado molido, el pescado molido se puede apreciar en la Fig. 5. Donde ya molido se pone en un papel aluminio cuidadosamente para no desparramar el producto y no perder ningún gramo para poder realizar estos experimentos.



Fig. 6. Muestras pesadas de pescado

Para asegurar una mejor comparación en los experimentos, se pesa cada muestra de pescado molido tres veces antes de colocarla en una bandeja para deshidratación. Este pesaje repetido ayuda a confirmar que cada muestra tiene el mismo peso inicial. Luego, las muestras de pescado se enumeran para poder identificarlas fácilmente y se rotan cada hora dentro del sistema de secado. Esta rotación garantiza que todas las muestras reciban la misma cantidad de aire y calor, lo que ayuda a que se sequen de manera uniforme. El propósito es reducir la cantidad de agua por debajo del 10% de humedad así que aparte de rotar cada hora también son pesadas para medir la pérdida de agua.

En la Fig. 6. se puede ver cómo las muestras enumeradas están preparadas para el proceso de deshidratación, colocadas sobre láminas de aluminio. Cada muestra pesa exactamente 100 gramos, lo que asegura que todas sean iguales al comienzo del experimento. Este cuidado en el pesaje y la rotación es importante porque permite comparar los resultados de manera justa, ya que todas las muestras pasan por las mismas condiciones. Además, con este procedimiento se puede analizar

cómo el secado afecta al pescado, lo que es útil tanto para mejorar el proceso como para estudiar la conservación de los alimentos.

El experimento se realizó con un Setpoint de 60°C, y este valor también se registró al finalizar la deshidratación del pescado. Una vez que el proceso terminó, el producto deshidratado se colocó en una bolsa, donde se etiquetó con el setpoint y el peso final de 300 gramos, como se muestra en la Fig. 7. De este modo, el pescado quedó completamente deshidratado. La máquina demostró su eficiencia al completar el proceso de manera satisfactoria, lo que confirma su utilidad para este tipo de proyectos.



Fig. 7. Producto final deshidratado y etiquetado

Terceros resultados (Aplicación del PID con ganancias del sistema lineal)

Para finalizar, con el objetivo de realizar una comparación, los resultados obtenidos en estos experimentos incluyen la aplicación del controlador PID con ganancias optimizadas para un modelo de un sistema lineal. Estas ganancias fueron calculadas siguiendo un proceso riguroso de ajuste y optimización, aplicando los pasos descritos en el artículo [11]. Este enfoque permitió adaptar el controlador PID de manera eficaz a las características del sistema de deshidratación, mejorando su desempeño en términos de estabilidad y precisión, cabe mencionar que la duración de estos experimentos es por partes iguales y establecen una duración de 5 horas y 20 minutos

Las ganancias obtenidas no solo ayudaron a mantener el control de la temperatura, sino que también optimizaron el tiempo total de deshidratación, reduciendo la variabilidad en las muestras y asegurando un secado homogéneo del producto. Este resultado demuestra que la integración de técnicas de optimización en sistemas PID puede ser altamente efectiva en procesos industriales complejos, como la deshidratación de alimentos, donde las condiciones del sistema no son estrictamente lineales.

Estas ganancias optimizadas se presentan en la Tabla 4, donde se incluyen varios indicadores de rendimiento que permiten

evaluar la eficacia del sistema de control. Los indicadores mostrados son: el Error Absoluto Integral (IAE), que mide la acumulación de error a lo largo del tiempo; el tiempo de estabilización ( $T_{ss}$ ), que indica cuánto tarda el sistema en alcanzar un estado estable dentro de un criterio de  $\pm 2\%$ ; y, finalmente, el consumo total de energía, expresado en kilovatios-hora ( $kWh$ ), que muestra cuánta energía fue utilizada durante el proceso de deshidratación, posteriormente se explicara de manera breve cada factor de desempeño que se mencionan en la tabla 4.

Además, los resultados incluyen un indicador de 60°, que hace referencia a la eficiencia del sistema cuando opera bajo ciertas condiciones específicas del proceso. Estos indicadores permiten evaluar no solo la precisión del controlador PID optimizado.

| Control                                 | IAE    | Mp (%) | Tss(s) | EC (kwh) |
|-----------------------------------------|--------|--------|--------|----------|
| PID-ZN                                  | 37,246 | 31.18  | 3735   | 0.806    |
| PID +<br>Ganancias<br>optimizadas<br>LS | 22,585 | 6.666  | 3500   | 0.782    |

Tabla 4. Indicadores de desempeño

Los indicadores de desempeño son fundamentales para registrar y analizar el avance del proyecto, cada uno de estos indicadores mide distintos aspectos del sistema teniendo como base los siguientes datos cuantitativos sobre el experimento

$$1. \text{Reducción del IAE: } \frac{37,246 - 22,585}{37,246} \times 100 = 39.37\%$$

$$2. \text{Reducción del MP (\%): } \frac{31.18 - 6.666}{31.18} \times 100 = 78.6\%$$

$$3. \text{Reducción del TSS: } \frac{3735 - 3500}{3735} \times 100 = 6.29\%$$

$$4. \text{Ahorro energético (EC): } \frac{0.806 - 0.782}{0.806} \times 100 = 2.98\%$$

Error Absoluto Integral (IAE): Este indicador mide la acumulación del error absoluto en el tiempo. El error se calcula como la diferencia entre el valor deseado, el setpoint, y la salida real del sistema, en otras palabras, el IAE permite ver cuánto se desvía el sistema del objetivo a lo largo del tiempo.

Sobre impulso Porcentual (Mp%): Representa el porcentaje de exceso respecto al setpoint cuando el sistema responde inicialmente, este valor muestra cuánto se pasa el sistema del valor deseado al comienzo de su respuesta, y sirve para identificar respuestas demasiado bruscas o picos no deseados.

Además de lo mencionado, la Figura 8 presenta los niveles de humedad del producto a un setpoint de 60°C. En esta figura, se puede observar la humedad medida durante las primeras 5 horas del experimento, se muestra la humedad relativa del pescado cuando se aplica el PID + Ganancias optimizadas. Durante este periodo inicial es crucial para entender cómo las distintas temperaturas afectan el proceso de deshidratación. Al analizar estos datos, se puede evaluar la eficiencia del sistema de control y cómo responde a los diferentes ajustes de temperatura, lo que es fundamental para optimizar el proceso de deshidratación de manera efectiva.

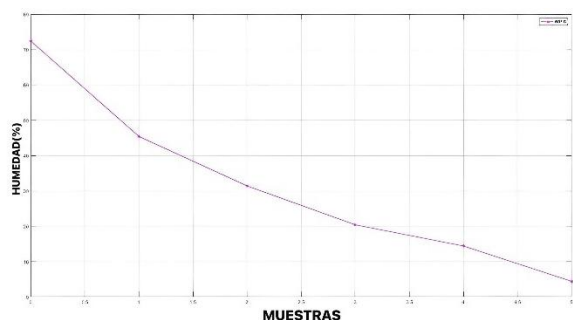


Fig. 8. Niveles de humedad a Setpoint de 60°C

Por último, este experimento se centra en la aplicación del controlador PID, lo que permite analizar su efectividad en comparación con otros tipos de controladores. En la Fig. 9. se presenta una comparación visual que ilustra el rendimiento del PID frente a otros métodos de control en el proceso de deshidratación. Esta comparación es fundamental, ya que permite identificar las ventajas y desventajas de cada enfoque, así como determinar cuál de ellos proporciona un mejor control sobre el proceso.

La imagen muestra una comparación detallada con otros controladores mencionados en el artículo [11], lo que facilita la evaluación de su rendimiento en términos de estabilidad y precisión.

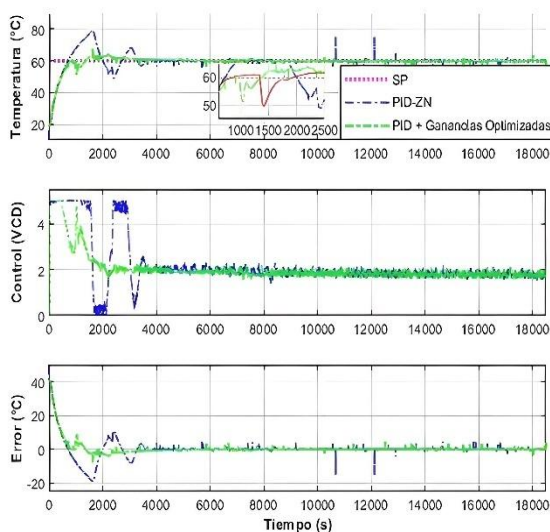


Fig. 9. Aplicación de un PID en comparación con otros controladores

## Trabajo a futuro

Los trabajos futuros planeados para este proyecto incluyen, el rediseño del seleccionador para poder incorporar más funciones en una sola placa para reducir las conexiones con cables. Además, se diseñará un chasis para proteger la placa y cuidar el circuito. También se contempla la instalación de ventiladores en la parte inferior de la deshidratadora debido a que el calor es elevado y el diseño actual de la máquina no son óptimos, en ocasiones la temperatura alta llega hasta la parte inferior. Los ventiladores se colocarán para proteger los cables y otros materiales menos resistentes. En cuanto al control del proceso, se propone la implementación de un sistema en lazo cerrado basado en la medición directa de la humedad del producto terminado. Para ello, se plantea la integración de sensores de humedad con salida de señal normalizada de 4–20 mA, los cuales ofrecen alta inmunidad al ruido eléctrico y compatibilidad con controladores industriales. Esta señal sería utilizada como variable de retroalimentación por el controlador PID, permitiendo ajustar automáticamente los parámetros del proceso hasta alcanzar el nivel de humedad deseado. Se continuará experimentando con pescado y se realizará un análisis del ciclo de vida del proceso de deshidratación de pescado para identificar áreas de mejora en términos de sostenibilidad. También se evaluarán otras fuentes de energía alternativas y renovables, como la solar o eólica, para alimentar el proceso de deshidratación y reducir el impacto ambiental.

## Conclusiones

En este artículo se aborda la aplicación de un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), centrando su implementación en una deshidratadora atmosférica. El experimento se realizó utilizando carne de pescado, con el objetivo de aplicar un control óptimo que permita mejorar el proceso de deshidratación. A través de este enfoque, se buscó no solo mantener un control preciso de la temperatura, sino también proponer soluciones que contribuyan al ahorro de energía durante el proceso. De esta manera, el uso del controlador PID optimizado mejora la eficiencia energética, aspecto clave para la sostenibilidad y el rendimiento del proceso de deshidratación. En este proyecto, también se realizó una comparación con otros controladores, lo que permitió evaluar su desempeño en relación con el controlador PID. Además, se abordó la aplicación del PID con ganancias optimizadas para un sistema lineal. Esta implementación permitió ajustar el comportamiento del controlador a las características complejas del proceso, mejorando así su precisión.

## Referencias

- [1] Castro Lumby, L. F., en Electromecánica, C. D. T. S., Jácome, L., & Rodrigo, Ó. Implementación de una máquina deshidratadora de frutos y vegetales con una capacidad de 10kg a través de elementos eléctricos electrónicos y

mecánicos para mejorar la conservación de alimentos en el sector agroindustrial de la ciudad de Latacunga.

- [2] Rodríguez, G. M., Cruz, R. A. O., Sánchez, J. M., Silva, A. L. F., & García, E. S. (2022). Innovación en los alimentos deshidratado en Guanajuato. *Energías Renovables*, 9(48).
- [3] Párraga Rivera, M. R., & Zambrano Santana, C. L. (2023). Desarrollo de un alimento deshidratado tipo BARF para perros incorporando subproductos del faenamiento porcino (Bachelor's thesis, Calcuta: ESPAM MFL).
- [4] Antury, K. L. A., Rojas, D. A. V., & Bermeo, O. M. B. (2021). Conservación de las propiedades nutraceuticas del Aloe Vera (Aloe Barbadensis Miller), mediante técnicas de secado. *Ingeniería y Región*, (25), 6-21.
- [5] Knospe, C. (2006). Control PID. *Revista IEEE Control Systems*, 26 (1), 30-31.
- [6] Moreno, M. A. (2001). Apuntes de control PID. Universidad Mayor de San Andres, La Paz-Bolivia, 8.
- [7] Mazzone, V. (2002). Controladores PID. Quilmes: Universidad Nacional de Quilmes.
- [8] Cuji Secaira, J. A. (2022). Diseño y verificación de sistemas de control On-Off, PI y PID sobre el proceso de deshidratación térmica de tomate.
- [9] Torres Jaramillo, E. A. (2022). Incidencia de los métodos tradicionales y nuevas tendencias de deshidratación de alimentos en la vida útil e integridad nutricional.
- [10] Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna. Pearson educación.p 79.
- [11] Velasco-Rebollo, R.-E., Santos-Sánchez, O.-J., & Rodríguez-Guerrero, L. (2025). Optimization of PID and optimal discrete control for time delay nonlinear systems via gradient descent applied to a fish meat dehydration process. CITIS, AACyE, ICBI, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo.
- [12] Lu, Y., Yang, G., Shen, Y., Yang, H., & Xu, K. (2022). Multifunctional flexible humidity sensor systems towards noncontact wearable electronics. *Nano-Micro Letters*, 14(150). <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00895-5>
- [13] FDA. (2021). Current Good Manufacturing Practices (CGMPs) for Food and Dietary Supplements. U.S. Food and Drug Administration. <https://www.fda.gov/food/guidance-regulation-food-and-dietary-supplements/current-good-manufacturing-practices-cgmps-food-and-dietary-supplements>
- [14] COFEPRIS. (2009). NOM-251-SSA1-2009: Prácticas de higiene para el proceso de alimentos, bebidas o suplementos alimenticios. Diario Oficial de la Federación. <https://siipris02.cofepris.gob.mx/CCB/Consulta.aspx?Id=1136506>