



Rivar

REVISTA IBEROAMERICANA DE
VITICULTURA, AGROINDUSTRIA
Y RURALIDAD

Editada por el Instituto
de Estudios Avanzados de la
Universidad de Santiago de Chile

CONTROL DE TEMPERATURA CON PID E ILUMINACIÓN CON VOLTAJE CONTINUO PARA LA EVALUACIÓN DEL EFECTO SOBRE EL ÍNDICE DE ESTABILIDAD DEL ACEITE DE SOYA (GLYCINE MAX)

*Temperature Control with PID and Continuous Voltage
Lighting Evaluation of the Effect on the Stability Index
of Soybean Oil (Glycine max)*

*Controle de temperatura com PID e iluminação com
tensão contínua para a avaliação do efeito sobre o
índice de estabilidade do óleo de soja (Glycine max)*

Vol. 11, N° 32, 254-275, mayo 2024

ISSN 0719-4994

Artículo de investigación
<https://doi.org/10.35588/f7emr124>

Olivia Magaly Luque-Vilca
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0002-9000-4624
oluque@unaj.edu.pe

Russel Allidren Lozada-Vilca
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0002-8915-3964
ralozadav.doc@unaj.edu.pe

Lenin Quille-Quille
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0003-3824-5268
l.quille@unaj.edu.pe

Lucio Ticona-Carrizales
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0003-2073-8857
l.ticonac@unaj.edu.pe

Solanhs Pinto-Calcina
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0002-6208-2377
s.pinto.ca@unaj.edu.pe

José Oscar Huanca-Frías
Universidad Nacional de Juliaca
Juliaca, Perú

ORCID 0000-0003-0638-2129
jo.huanca@unaj.edu.pe

Cynthia Milagros Apaza-Panca
Universidad Nacional de Frontera
Sullana, Perú

ORCID 0000-0002-5524-2627
cynthiamilagros9@gmail.com

Recibido

22 de mayo de 2023

Aceptado

28 de mayo de 2024

Publicado

Mayo de 2024

Cómo citar

Luque-Vilca, O.M., Lozada-Vilca, R.A., Quille-Quille, L., Ticona-Carrizales, L., Pinto-Calcina, S., Huanca-Frías, J.Ó. y Apaza-Panca, C.M. (2024). Control de temperatura con PID e iluminación con voltaje continuo para la evaluación del efecto sobre el índice de estabilidad del aceite de soya (*Glycine max*). *RIVAR*, 11(32), 254-275.
<https://doi.org/10.35588/f7emr124>

ABSTRACT

Currently, food products, such as oil, are displayed at high lighting intensities and sometimes at temperatures above 20 °C, factors that can accelerate oxidative rancidity, such as degradation of oil quality. This is the reason why a PID (Proportional-Integral-Derivative) control system was implemented that allowed quality tests to be carried out on the oil stored in different temperature conditions (13 °C to 27 °C). During these tests, the transfer function of the system and the controller, was found using the automatic tuning of the control box. This improved the precision and continuous voltage for illumination (from 155 lux to 1145 lux) by varying the intensity of the LEDs. For the experimental design, the central composite design (CCD) was used, resulting in 13 treatments. After 30 days, the quality of the oil was evaluated (acidity index and peroxide index), and the oxidative stability index was determined using the Rancimat method. It was found that temperature and lighting have a significant effect on the quality and oxidative stability of the oil ($p < 0.05$), achieving the storage condition with greater stability at 300 lux of lighting and 15 °C temperature.

KEYWORDS

Oil, illumination, temperature.

RESUMEN

Actualmente, los productos alimenticios, como el aceite, se exhiben a elevadas intensidades de iluminación y en ocasiones a temperaturas por encima de los 20 °C, factores que pueden acelerar la rancidez oxidativa, como la degradación de la calidad del aceite. Esta es la razón por la cual se implementó un sistema de control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que permitió realizar pruebas de calidad del aceite almacenado en diferentes condiciones de temperatura (13 °C a 27 °C). Durante esas pruebas, se halló la función de transferencia del sistema y el controlador, utilizando la sintonía automática de la caja de control. Esto mejoró la precisión y el voltaje continuo para la iluminación (de 155 lux a 1145 lux), variando la intensidad de los LED. Para el diseño experimental, se utilizó el diseño central compuesto (DCC), lo que resultó en trece tratamientos. A los treinta días, se evaluó la calidad del aceite (índice de acidez e índice de peróxidos), y se determinó el índice de estabilidad oxidativa mediante el método Rancimat. Se encontró que la temperatura y la iluminación presentan un efecto significativo sobre la calidad y la estabilidad oxidativa del aceite ($p < 0.05$), logrando la condición de almacenamiento con mayor estabilidad a 300 lux de iluminación y 15 °C de temperatura.

PALABRAS CLAVE

Aceite, iluminación, temperatura.

RESUMO

Atualmente, os produtos alimentícios, como o óleo, são exibidos em elevadas intensidades de iluminação e em ocasiões em temperaturas por acima dos 20 °C, fatores que podem acelerar o ranço oxidativo, como a degradação da qualidade do óleo. Este é o motivo pelo qual implementou-se um sistema de controle PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que permitiu realizar provas de qualidade do óleo armazenado em diferentes condições de temperatura (13 °C até 27 °C). Durante essas provas, encontrou-se a função de transferência do sistema e o controlador, utilizando a sintonia automática da caixa de controle. Isso melhorou a precisão e a tensão contínuo para a iluminação (de 155 lux até 1145 lux), variando a intensidade dos LED. Para o desenho experimental, utilizou-se o desenho central composto (DCC), o que resultou em treze tratamentos. Aos trinta dias, avaliou-se a qualidade do óleo (índice de acidez e índice de peróxidos), e determinou-se o índice de estabilidade oxidativa mediante o método Rancimat. Encontrou-se que a temperatura e a iluminação apresentam um efeito significativo sobre a qualidade e a estabilidade oxidativa do óleo ($p < 0.05$), conseguindo a condição de armazenamento com maior estabilidade, em 300 lux de iluminação e 15 °C de temperatura.

PALAVRAS-CHAVE

Óleo, iluminação, temperatura.

Introducción

El aceite comestible en el quehacer diario se utiliza en la cocina para freír alimentos, preparar aderezos, entre otros, por lo que es indispensable en la vida diaria de los consumidores (Jiang et al., 2021). Puede provenir de una variedad de fuentes y es propenso a la degradación (Olagunju et al., 2022); siendo la soya (*Glycine max*) una fuente para la fabricación del aceite vegetal. Las condiciones de almacenamiento son importantes para garantizar su calidad durante su vida útil. Así, la luz y las elevadas temperaturas pueden acelerar el proceso de oxidación del aceite (Chen et al., 2022), lo que conlleva a la formación de productos secundarios como el trans-4-hidroxi-2-hexenal (4-HHE) y el trans-4-hidroxi-2-nonenal (4-HNE) durante la peroxidación lipídica en los aceites comestibles. Estos compuestos son citotóxicos y genotóxicos, ya que pueden unirse covalentemente a las proteínas, los fosfolípidos y el ADN, alterando además el funcionamiento normal del hígado, los pulmones y el cerebro (Hua et al., 2022). También se produce la generación de carbonos terciarios durante la polimerización (Liu et al., 2015).

Durante el almacenamiento del aceite, es importante monitorear las condiciones de calidad, como la evaluación del índice de calidad y el índice de estabilidad oxidativa (OSI) (Lubitza, 2019), puesto que a veces se expone a elevadas intensidades de iluminación en las vitrinas de las tiendas y en los almacenes, así como a la exposición a la luz solar, que son agentes que podrían intensificar procesos desfavorables (Mikołajczak y Tańska, 2022) y acelerar la rancidez oxidativa del aceite, afectando las características organolépticas y fisicoquímicas, como el cambio de color e índice de acidez, que son indicadores del envejecimiento del aceite vegetal (Hoffmann et al., 2019). Del mismo modo, a temperaturas por encima de los 25 °C, aumenta la producción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH) e hidrocarburos aromáticos oxigenados (OPAH), lo que representa un riesgo para la salud de los consumidores debido a la presencia de aldehídos tóxicos (Gong et al., 2019).

Una alternativa para mantener una temperatura estable durante el almacenamiento es mediante el sistema de controlador PID (Mikołajczak y Tańska, 2022) y la iluminación con voltaje continuo, que pueden ser eficaces para minimizar la oxidación y prolongar la vida útil del aceite. Tales sistemas son utilizados en el control de procesos debido a su eficiencia y su naturaleza robusta, lo que son algunas de las razones de su gran popularidad (Joseph et al., 2022). Pueden ser utilizados para mantener la temperatura del ambiente de almacenamiento constante y prevenir cambios bruscos de temperatura que puedan acelerar la oxidación de los aceites, por lo que en la industria alimentaria se utilizan para monitorear diferentes procesos y garantizar la calidad, a fin de mantener las características propias del producto (Mikołajczak y Tańska, 2022). Por lo expuesto, el estudio tuvo como objetivo evaluar el efecto de la temperatura e iluminación en la estabilidad del aceite de soya, en relación con la calidad y el índice de estabilidad oxidativa (OSI), mediante el método de Rancimat durante el almacenamiento, utilizando el sistema de control PID para la temperatura y voltaje continuo para la iluminación. Ello ayuda a predecir el comportamiento de la calidad del aceite a lo largo del tiempo y en diferentes situaciones.

Materiales y métodos

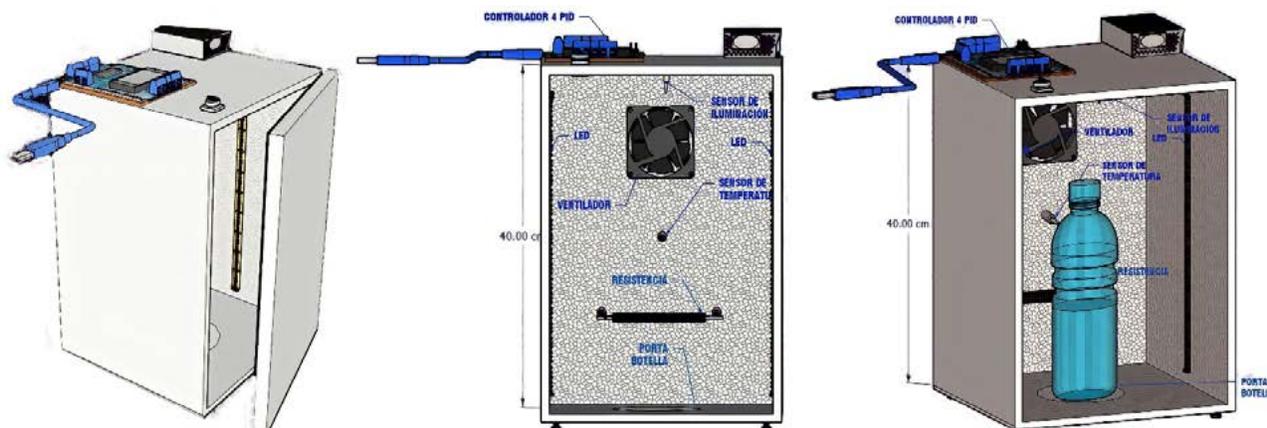
Materiales de investigación

El material de investigación fue el aceite comercial de soya de la marca Vicentina, refinado en Bolivia y envasado en la planta de procesamiento Río Grande Distribuciones S.A.C., ubicada en Juliaca, Perú, disponible en el mercado de los departamentos de Puno, Cuzco y Arequipa, Perú. Se utilizó un muestreo simple de inspección normal por atributos del lote número 171 en botellas envasadas de presentación de 1 litro, con un límite de calidad aceptable (LCA) de 1.0, y un nivel de inspección especial S4 de acuerdo con la NTP-ISO 2859-1:2018. Se evaluó la calidad del aceite (índice de acidez e índice de peróxidos) a los 30 días bajo fuentes de luz artificial (iluminación LED) y temperaturas de acuerdo a los tratamientos conducidos bajo el diseño central compuesto (DCC), utilizando un controlador PID para la temperatura y voltaje continuo para la iluminación (Tabla 1).

Descripción de la construcción de la caja control

La caja de control se construyó a base de madera debido a su conductividad térmica, que es relativamente baja, siendo las pérdidas de calor mínimas y siendo suficientemente rígida como para que la caja pueda ser manipulada con seguridad. Además, se incorporaron láminas de poliestireno para asegurar su aislamiento térmico con el ambiente (Figura 1), el diseño de la caja control permite el monitoreo de solo una botella de aceite de un litro.

Figura 1. Diseño de la caja control y ubicación de la botella de aceite de soya de un litro
Figure 1. Design of the control box and location of one liter soybean oil bottle



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

La caja tiene dimensiones de 0.40 m de alto x 0.25 m de ancho x 0.25 m de largo y operó en un rango de temperatura de 13 °C a 27 °C, con una resistencia eléctrica de nicrom de 50 W y un ventilador de 5 V.

Asimismo, la iluminación se reguló de acuerdo a cada tratamiento según Tabla 1, suministrada mediante LEDs de luz cálida, controlados por el potenciómetro y el sensor (luxómetro), los cuales se ubican en las paredes internas de la caja.

El sensor de iluminación mide la cantidad de Lux dentro de la caja y se coloca antes de someter una muestra a una iluminación e intensidad específica, variando el voltaje continuo y luego manteniéndolo constante. El sensor de temperatura, tipo NTC, se colocó a la altura media de la muestra (botella de aceite) con un rango de operación suficiente para las operaciones de la caja de control.

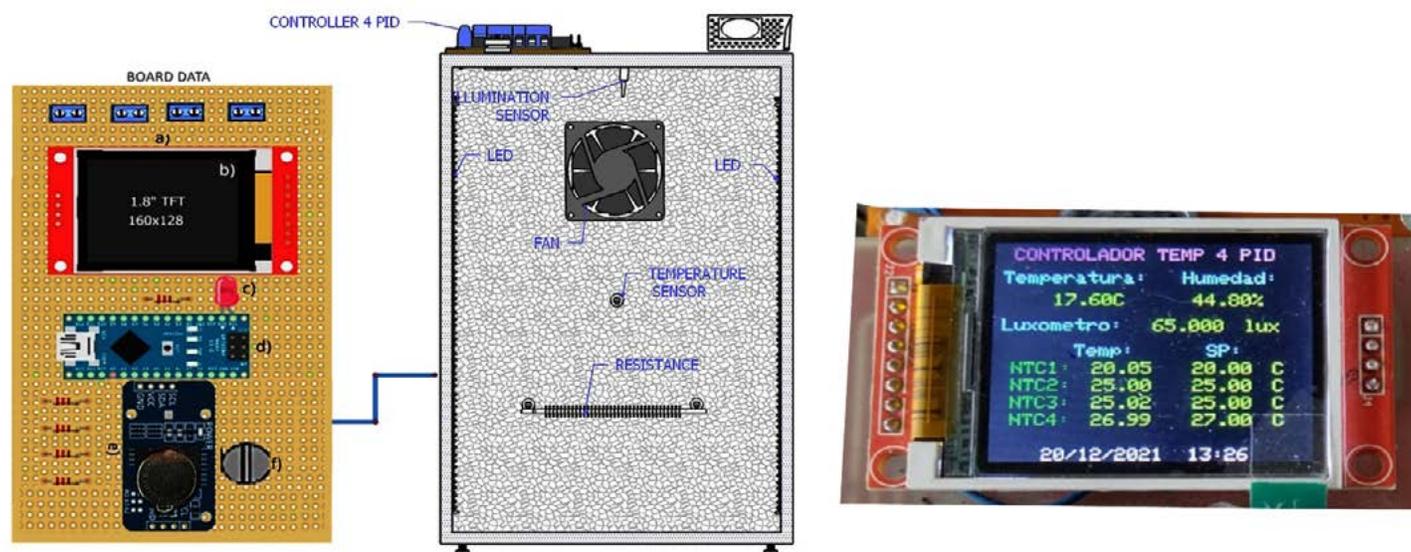
En la pared posterior de la caja de control se instaló un ventilador que tuvo como objetivo principal bajar y mantener el flujo continuo de temperatura en toda el área de la caja. También se instaló el sensor DHT22 fuera de la caja para medir la temperatura y la humedad relativa del ambiente. Los cables de alimentación y la señal de los sensores se encuentran aislados en el exterior de la caja de control.

Instrumentación

Se diseñó un sistema de monitoreo que integra sensores para medir la temperatura e iluminación, junto con la electrónica adecuada dentro de la caja de control. Además, se miden la temperatura y la humedad relativa fuera de la caja de control. Dado que el sistema se estableció con cajas acondicionadas de fácil manejo y de tamaño adecuado, las lecturas de temperatura e iluminación son altamente aceptables y se muestran en tiempo real en la pantalla TFT (Figura 2). El sistema fue desarrollado con componentes de bajo costo y disponibles en el mercado.

Figura 2. Sistema de control: tarjeta, interface para los sensores de temperatura e iluminación y pantalla TFT en tiempo real

Figure 2. Control system: card, interface for temperature and lighting sensors and real-time TFT display



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Se muestra en Figura 2 el tablero registrador de datos de temperatura e iluminación, que comprende los siguientes componentes:

1. Pantalla TFT que muestra las variables en tiempo real.
2. Socket SD.
3. LED indicador de encendido.
4. Placa Nano Arduino.
5. Reloj RTC para fecha y hora.
6. Potenciómetro para controlar la intensidad de lux.
7. Sensor de temperatura NTC.
8. Sensor de iluminación BH1750.
9. Ventilador.
10. Fuente de alimentación.
11. Sensor DHT22 de temperatura y humedad relativa del ambiente.
12. Resistencia de Nicrom.

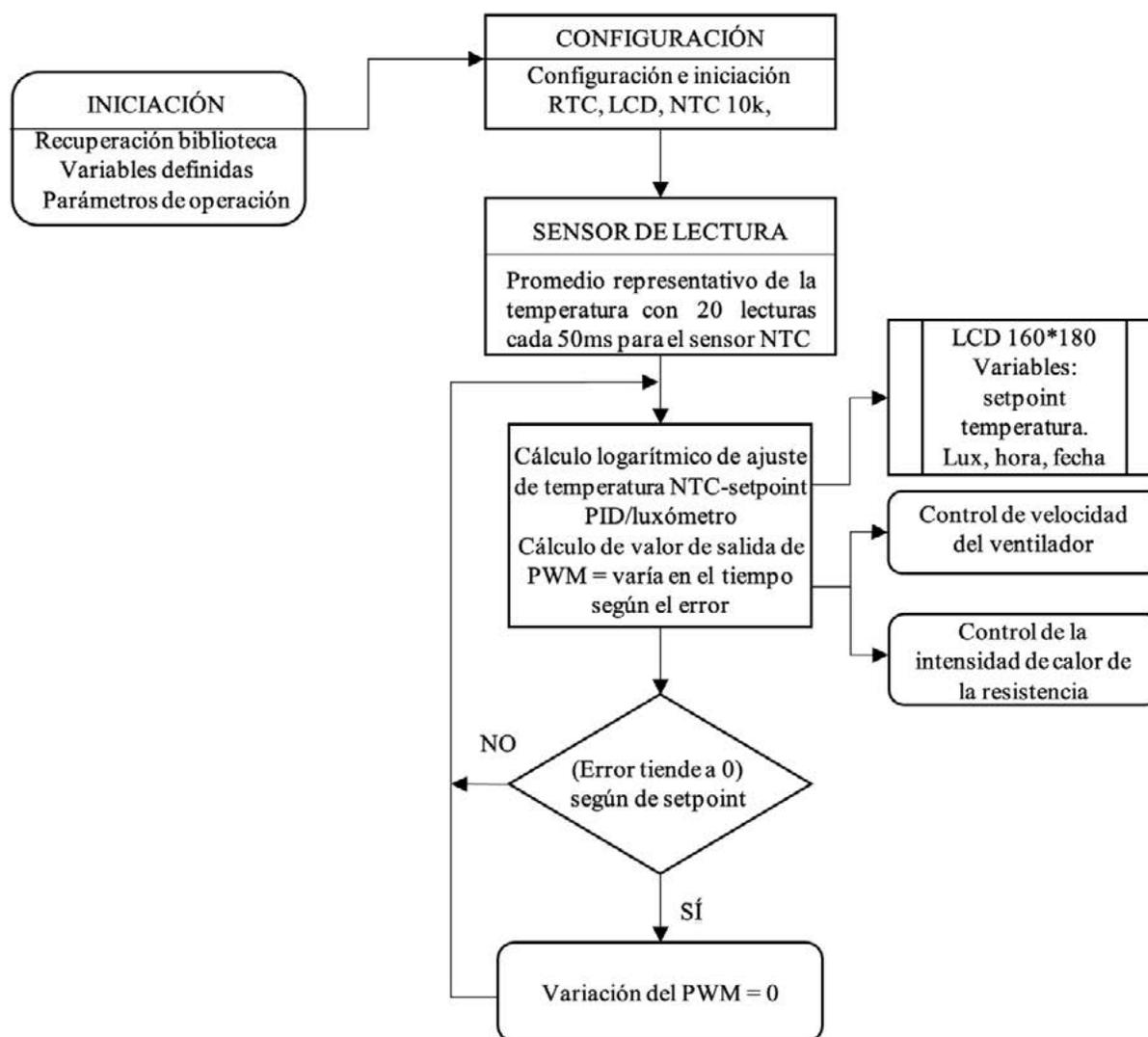
Selección de sensor

Sensor de temperatura NTC (coeficiente de temperatura negativo): Termistor NTC 10K. Es un sensor análogo que tiene una resistencia que cambia según la temperatura, y los 10K significan que tiene una resistencia de 10K Ω a una temperatura de 25 °C. Es un modelo con dos hilos de cobre estañados y está protegido por una cápsula de acero inoxidable.

El sensor de iluminación BH1750; o de iluminación digital permite medir el flujo luminoso (iluminancia). Posee un convertor interno de 16 bits, por lo que entrega una salida digital en formato I2C. Su desempeño es mejor que el de un foto-resistor (LDR), ya que no es necesario realizar conversiones de voltaje para obtener datos interpretables. Entrega automáticamente el valor en lux, lo que permite medir la cantidad de luz por metro cuadrado dentro de la caja de control, y este valor se mide variando el voltaje continuo en los LEDs.

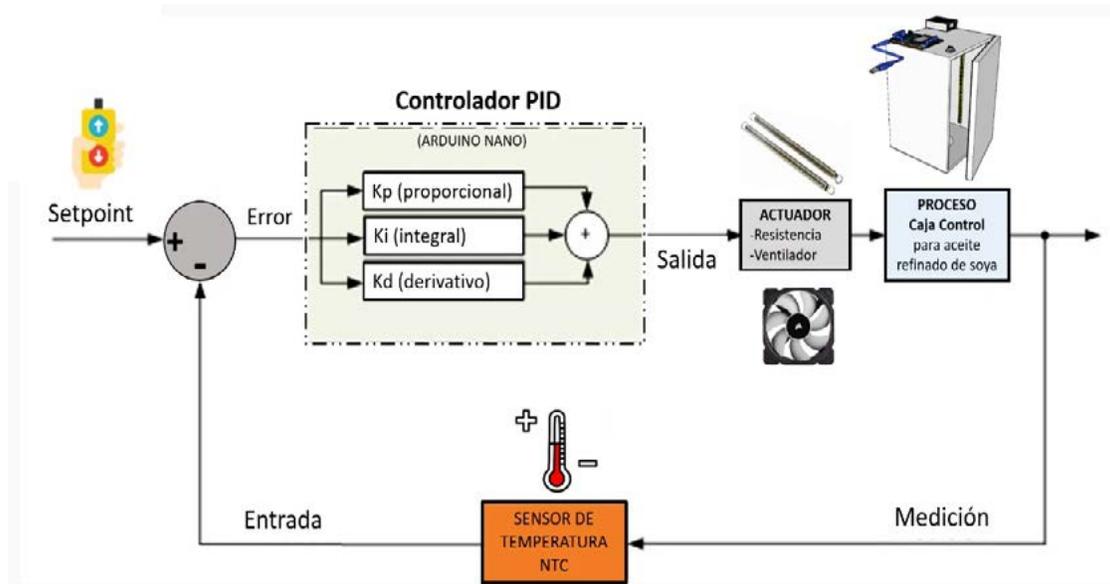
El sensor DHT22, o sensor digital de temperatura y humedad relativa integra un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circundante. Muestra los datos mediante una señal digital. El algoritmo de programación de funcionamiento del datalogger y el procedimiento del sistema se muestran en las Figuras 3 y 4.

Figura 3. Diagrama de flujo del proceso de la caja control
Figure 3. Flow diagram of the control box process



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Figura 4. Diagrama de bloques del controlador PID para la caja control
Figure 4. Block diagram of the PID controller for the control box



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Determinación del índice de calidad del aceite

El índice de calidad del aceite de soya se determinó mediante la evaluación del índice de acidez, utilizando el método establecido en la NTP 209.005 y en AOAC del año 2015, a los treinta días. Este método permite evaluar el deterioro hidrolítico, y los resultados se expresaron como índice de acidez. Asimismo, se evaluó el índice de peróxido utilizando el método establecido en la NTP 209.00 revisada en 2016 y en AOAC del 2015, que permite medir la cantidad de oxígeno asociada al grado de oxidación del aceite.

Determinación del índice de estabilidad oxidativa

El índice de estabilidad a la oxidación se evaluó utilizando el Metrohm Rancimat, modelo 892, de acuerdo con el método oficial AOCS Cd 12b-92 de AOCS de 1997. El instrumento operó a 120 °C, con un caudal de gas de 20 L/h a través del aceite (2.5 g). Los productos de descomposición volátiles quedaron atrapados en el agua destilada, lo que aumentó la conductividad del agua. El indicador de estabilidad a la oxidación es el tiempo que se tarda en alcanzar el punto de inflexión de la curva de conductividad.

Análisis estadístico

Se trabajó con dos factores (temperatura en °C e iluminación en Lux) utilizando el diseño compuesto central (diseño de superficie de respuesta), que consta de cuatro puntos factoriales (2^k) y cuatro puntos axiales y cinco repeticiones, obteniendo un total de trece tratamientos (Quanhong y Caili, 2005), con el fin de evaluar si las variables independientes influyen en la calidad del aceite y en el índice de estabilidad oxidativa (Tabla 1).

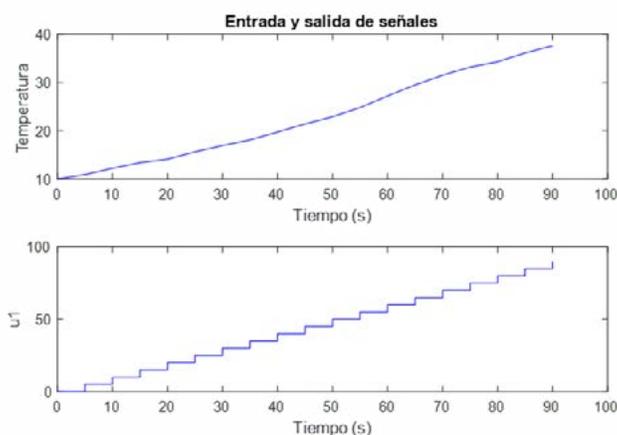
Resultados y discusión

Sistema de control PID

Para poder hallar un eficiente controlador PID para la planta-caja de control, se realizó la curva de respuesta del comportamiento de la temperatura en el tiempo al activar la resistencia eléctrica de nicrom o calentador y se discretizó cada cinco segundos para observar el comportamiento del sistema, como se muestra en Figura 5.

Figura 5. Curva de respuesta de la planta-caja control activando la resistencia, temperatura vs. tiempo y discretizando cada 5s

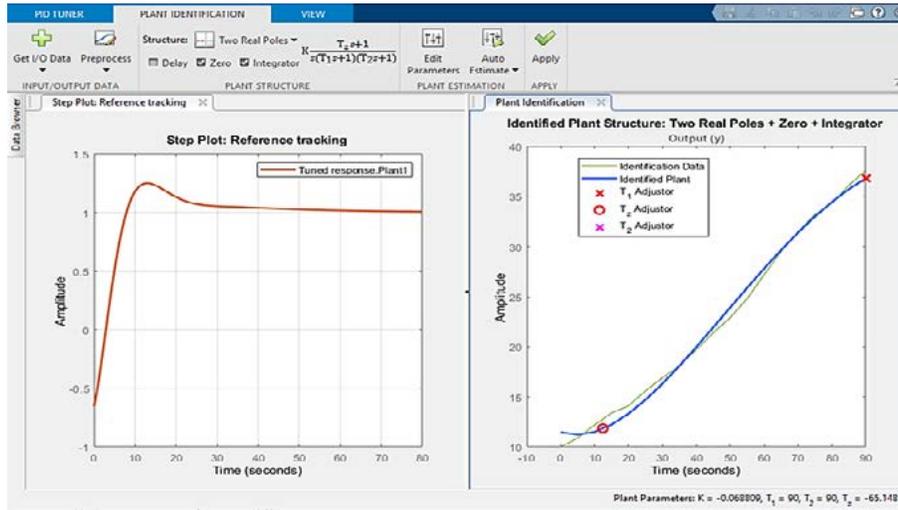
Figure 5. Response curve of the plant-control box activating the resistance, temperature vs. time and discretizing every 5s



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Para hallar la función de transferencia de la planta-caja control, se utilizó la aplicación PID Tuner del software MATLAB 2021. Insertando la curva encontrada, se estimó automáticamente la función de transferencia (FT) (Figura 6).

Figura 6. Identificación de la función de transferencia de planta-caja control, configuramos e identificamos polos zeros para G(s)
Figure 6. Identification of the plant-control box transfer function, we configure and identify zero poles for G(s)



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

La estimación y predicción de la función de transferencia fue de 91.93%. Obtención de la función de transferencia $G(s)$ para la planta-caja control:

$$G(s) = K * \frac{1+Tz*s}{s(T1*s+1)(T2*s+1)} \quad (1)$$

$$= -0.06 * \frac{1 - 65.1s}{s(90s + 1)(90s + 1)} = 0.043 * \frac{s + 0.015}{s(s + 0.011)^2}$$

Donde K: ganancia del sistema

Tz: tiempo de sobreimpulso

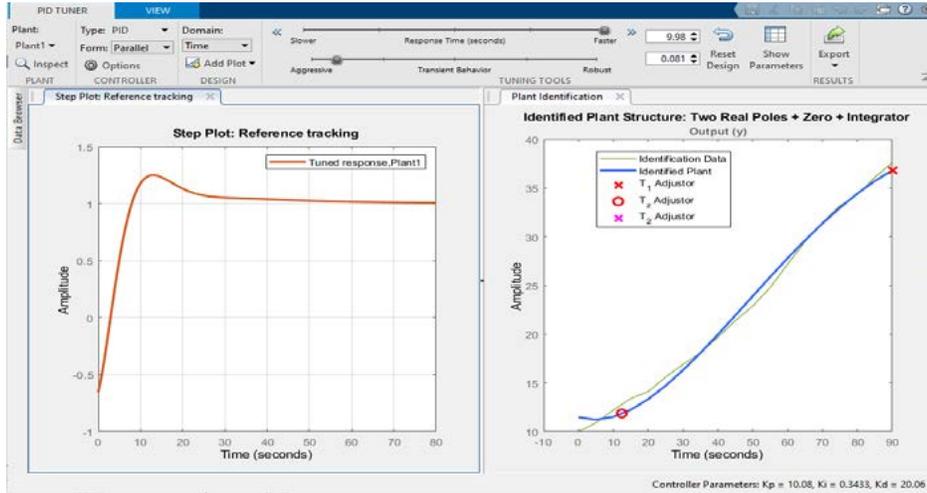
T1, T2: constantes de tiempo

La ecuación 1 se ajusta mejor a la curva, en la identificación de nuestra planta (Figura 6). Consta de un zero, dos polos y un integrador.

Para hallar un Controlador PID en paralelo, se configura y se representa gráficamente la respuesta al escalón unitario. Luego, se procede a sintonizar, encontrando los parámetros K_p , K_i y K_d para la planta-caja control (Figura 6), presentando valores adecuados que demuestran su estabilidad en el menor tiempo. Dichos valores son: $K_p=10.08$, $K_i=0.34$ y $K_d=20.06$ (Figura 7).

Figura 7. Identificación del controlador adecuado $C(s)$, configurando y verificando la respuesta a escalón unitario

Figure 7. Identification of the appropriate controller $C(s)$, configuring and verifying the unit step response



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Obtención de la función de transferencia $C(s)$ para la planta-caja control PID en paralelo, es la que mejor se adapta a nuestra planta, según Figura 7:

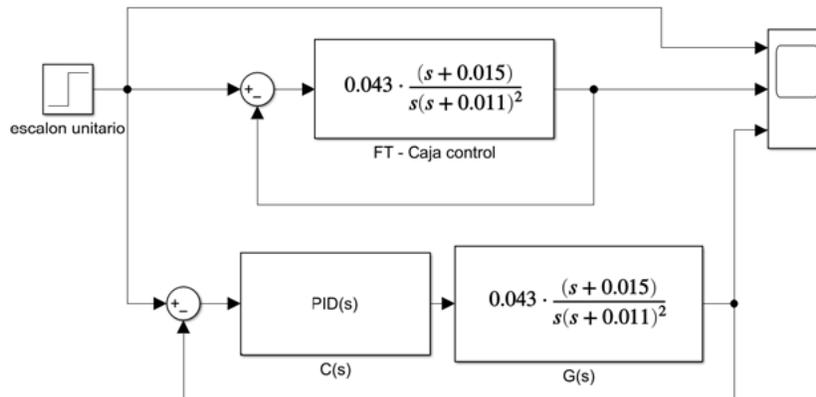
$$C(s) = Kp + Ki \frac{1}{s} + Kd \cdot s \quad (2)$$

$$= \frac{Kd \cdot s^2 + Kp \cdot s + Ki}{s} = \frac{20.06s^2 + 10.08s + 0.34}{s}$$

Para poder comprobar la estabilidad de la planta-caja control se realizó la simulación en el Simulink del MATLAB 2021 (Figura 8).

Figura 8. Diagrama de bloques con retroalimentación unitaria para respuesta de la función de transferencia de la caja control y con controlador PID $C(s)$ y función de transferencia $G(s)$

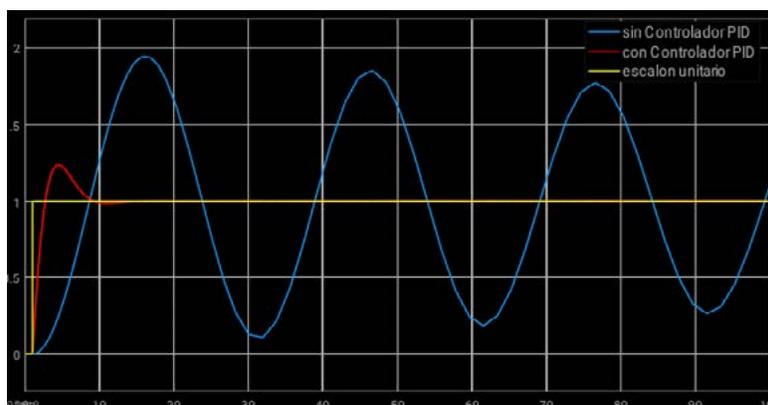
Figure 8. Block diagram with unitary feedback for the response of the transfer function y , PID controller $C(s)$ and transfer function $G(s)$



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Sin controlador, el sistema es inestable. El controlador PID $C(s)$ permite alcanzar la estabilidad en quince segundos, como se puede verificar en Figura 9.

Figura 9. Respuesta de la planta-caja control al escalón unitario
Figure 9. Response of the plant-control box to the unit step



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

La caja control cuenta con una comprobación de estabilidad mediante el uso del controlador PID en quince segundos, con el fin de garantizar la correcta medición de la temperatura dentro de la caja control en beneficio del producto evaluado. Kherkhar, et al. (2022), en su investigación sobre la creación de un enfriador termoeléctrico basado en Arduino y un enfoque de control PID, demuestra que el controlador propuesto se valida mediante simulaciones en Matlab/Simulink. Tiene la capacidad de mantener constante el perfil de temperatura incluso cuando se modifica la corriente continua de suministro. Esto significa que las simulaciones con el controlador PID revelan un buen desempeño en términos de estabilidad, con un error de temperatura de solo una discrepancia de ± 0.1 °C y un tiempo de control de quince segundos en su sistema de control propuesto. Ello, en relación con la presente investigación, garantiza la eficiencia del sistema de control PID, ya que permite evitar las variaciones de temperatura y logra la homogeneidad de la temperatura dentro de toda la caja de control.

Evaluación del índice de calidad del aceite

En Tabla 1 vemos los valores del índice de acidez, el índice de peróxidos y la estabilidad oxidativa (OSI) de los trece tratamientos trabajados a diferentes temperaturas (°C) e iluminación (Lux).

Tabla 1. Índice de acidez, índice de peróxido, e índice de estabilidad de oxidación de los tratamientos

Table 1. Acid value, peroxide value, and oxidation stability index of the treatments

Tratamientos	Temperatura (°C)	Iluminación (Lux)	Índice de acidez (mEq O2/Kg de aceite)	Índice de peróxido	OSI (h)
1	15.00	300	0.073 ±0.0028	5.391 ±0.2789	7.070
2	25.00	300	0.075 ±0.0013	5.934 ±0.1111	6.400
3	15.00	1000	0.079 ±0.0027	25.693 ±3.7511	2.770
4	25.00	1000	0.114 ±0.0014	27.218 ±4.1569	1.080
5	13.00	650	0.069 ±0.0013	10.486 ±0.0780	6.250
6	27.00	650	0.079 ±0.0028	9.944 ±0.1512	5.490
7	20.00	155	0.071 ±9.017E-06	3.741 ±0.3119	6.910
8	20.00	1145	0.124 ±0.0071	27.239 ±3.3596	1.420
9	20.00	650	0.087 ±0.0013	9.984 ±0.2924	5.550
10	20.00	650	0.089 ±0.0027	10.031 ±0.4387	5.550
11	20.00	650	0.089 ±0.0028	9.906 ±0.3624	6.210
12	20.00	650	0.089 ±0.0026	10.018 ±0.4024	6.330
13	20.00	650	0.088 ±0.0029	9.999 ±0.3824	5.940

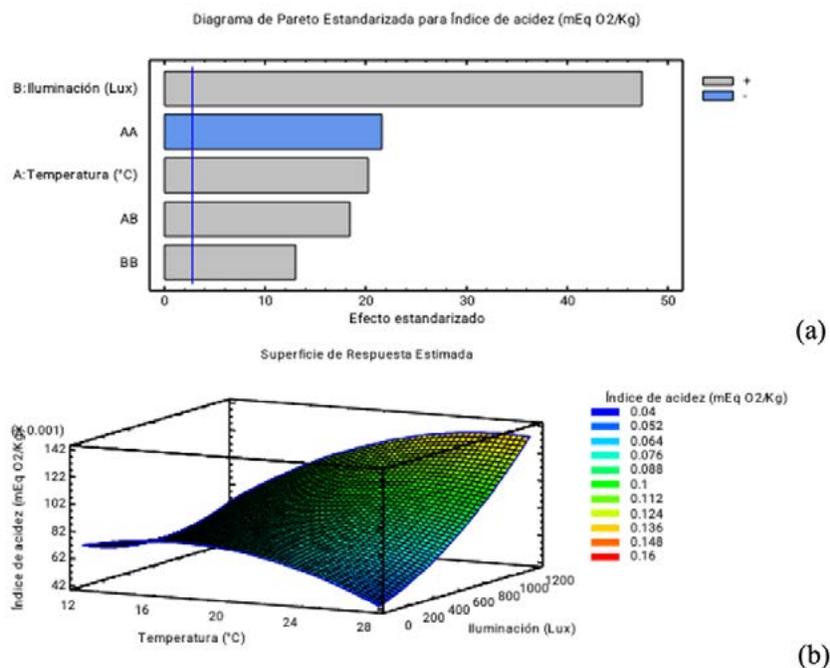
Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Efecto de la temperatura e iluminación en el índice de acidez del aceite de soya

En Figura 10 se presenta el diagrama de Pareto y el diagrama de superficie de respuesta en relación con el efecto de la temperatura e iluminación sobre el índice de acidez del aceite de soya, encontrando diferencias significativas entre los factores de estudio ($p < 0.05$). Los resultados se muestran en Tabla 2.

Figura 10. Efectos de la temperatura e iluminación sobre el índice de acidez: (a) diagrama de Pareto y (b) diagrama de superficie de respuesta

Figure 10. Effects of temperature and lighting on the acid number: (a) Pareto diagram and (b) response surface diagram



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Tabla 2. ANOVA para el índice de acidez del aceite de soya
Table 2. ANOVA for the acidity index of soybean oil

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura (°C)	0.00032694	1	0.00032694	408.67	0.000
B:Iluminación (Lux)	0.00179861	1	0.00179861	2248.26	0.000
AA	0.00037326	1	0.00037326	466.57	0.000
AB	0.00027225	1	0.00027225	340.31	0.0001
BB	0.00013621	1	0.00013621	170.27	0.0002
Falta de ajuste	0.00017797	3	5.9322E-05	74.15	0.0006
Error puro	0.0000032	4	8.00E-07		
Total (corr.)	0.00315708	12			

Donde Razón-F: valor de "F" calculado de la temperatura e iluminación. Valor-P: probabilidad de aceptación. Fuente: elaboración propia. Where F-Ratio: "F" value calculated and lightning. P-value: probability of acceptance. Source: own elaboration.

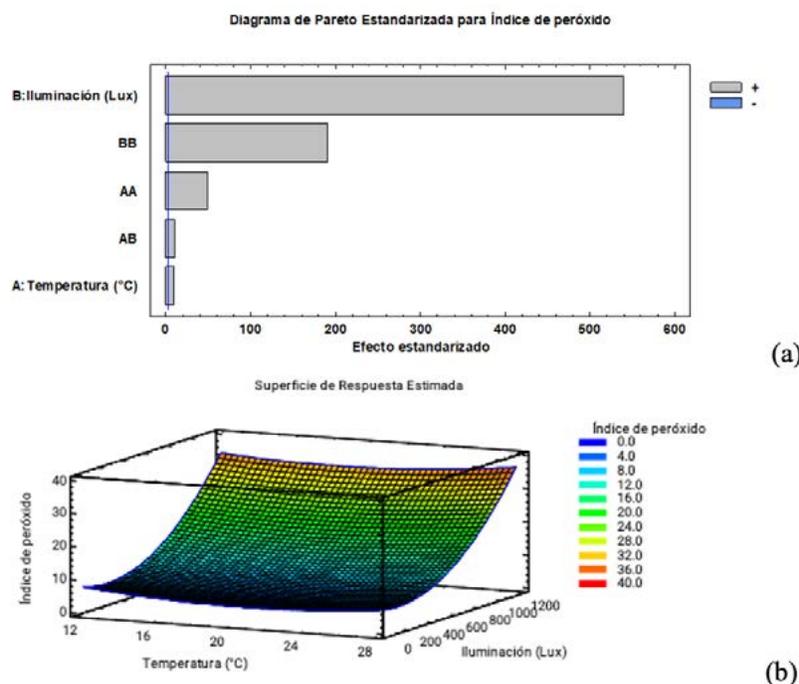
La iluminación y la temperatura influyen en el incremento del índice de acidez en función del tiempo de almacenamiento. Se encontró que, a una temperatura de 15 °C, se presenta un menor contenido de acidez y, a medida que aumenta la temperatura, se observa un incremento de la acidez. Esta última es un indicador de calidad del aceite comestible evaluado durante el almacenamiento (Jiang et al., 2021). Sin embargo, la iluminación tiene una mayor influencia que la temperatura en el incremento del índice de acidez. Considerando que la evaluación de la acidez es una característica de calidad del aceite y que los ácidos grasos primarios son responsables de la acidez del producto, este puede proporcionar un producto de mayor calidad (Medeiros et al., 2021). Por esta razón, se les da importancia a las metodologías analíticas destinadas a determinar el grado de acidez del producto (de Oliveira et al., 2010), ya que el índice de acidez indica el grado de cambios hidrolíticos del aceite, es decir, la acidez libre (Lužaić et al., 2023).

Efecto de la temperatura e iluminación en el índice de peróxido del aceite de soya

En Figura 11 presentamos el diagrama de Pareto y el diagrama de superficie de respuesta en relación con el efecto de la temperatura e iluminación sobre el índice de peróxido del aceite de soya, encontrando diferencias significativas entre los factores de estudio ($p < 0.05$). Los resultados se muestran en Tabla 3, y se observa que la iluminación (lux) tiene una mayor influencia en el índice de peróxidos, y a medida que aumenta la iluminación, los valores del índice de peróxidos aumentan de manera significativa.

Figura 11. Efectos de temperatura e iluminación sobre el índice de peróxidos: (a) diagrama de Pareto y (b) diagrama de superficie de respuesta

Figure 11. Effects of temperature and lighting on the peroxide index: (a) Pareto diagram and (b) response surface diagram



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Tabla 3. ANOVA para el índice de peróxido del aceite de soya
Table 3. ANOVA for the peroxide index of soybean oil

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A:Temperatura (°C)	0.211734	1	0.211734	88.14	0.0007
B:Iluminación (Lux)	699.706	1	699.706	291265.07	0.000
AA	5.82803	1	5.82803	2426.02	0.000
AB	0.241081	1	0.241081	100.35	0.0006
BB	87.8112	1	87.8112	36552.98	0.000
Falta de ajuste	30.2914	3	10.0971	4203.12	0.000
Error puro	0.0096092	4	0.0024023	-	-
Total (corr.)	819.711	12	-	-	-

Donde Razón-F: valor de "F" calculado de la temperatura e iluminación. Valor-P: probabilidad de aceptación. Fuente: elaboración propia. Where F-Ratio: "F" value calculated and lightning. P-value: probability of acceptance. Source: own elaboration.

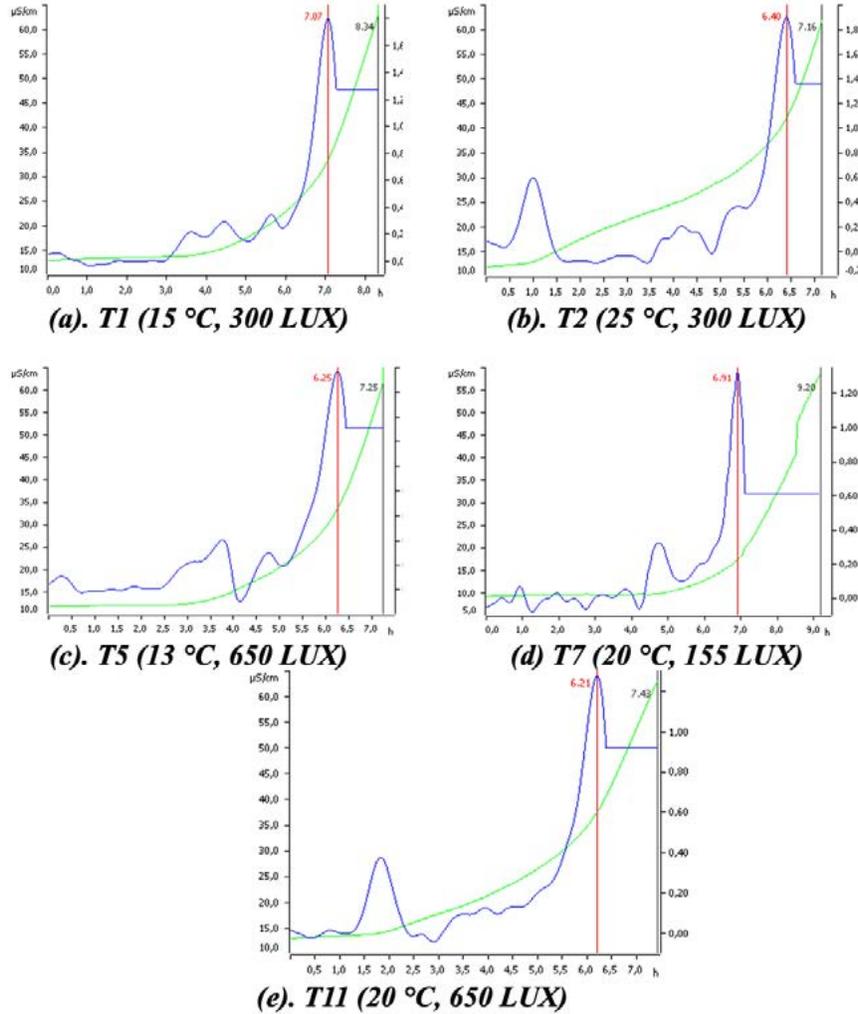
Se encontraron diferencias significativas en relación al índice de peróxido, considerando un modelo cuadrático, resultados que concuerdan con lo reportado por Martínez et al. (2016). Esto podría atribuirse al hecho de que los niveles de peróxidos aumentan con un mayor contenido de ácidos grasos poliinsaturados, lo cual hace al aceite de soya más susceptible a la oxidación cuando se expone a la luz (Chen et al., 2022). Por lo tanto, la determinación del índice de peróxido (IP) es uno de los parámetros de calidad utilizados para supervisar la oxidación de los lípidos y permite controlar la calidad del aceite durante su almacenamiento (Zhang et al., 2021). Durante el almacenamiento a temperatura ambiente y la exposición a la luz, se intensifican las reacciones oxidativas, lo que causa cambios en el color, un aumento de los ácidos grasos libres, un incremento en el índice de peróxido y una reducción del periodo de inducción (de Almeida et al., 2019).

Evaluación de la estabilidad oxidativa

Con respecto a las curvas de conductividad versus tiempo, se muestran en Figura 12. Fueron obtenidas bajo las mismas condiciones experimentales: 120 °C de temperatura y un flujo de aire de 20 L/h. Se considera que la estabilidad oxidativa de un aceite tiene una influencia directa de la temperatura y el flujo de aire. Se encontró que la iluminación y la temperatura afectan los valores de OSI. Esto podría atribuirse a la descomposición de hidroperóxidos de los lípidos. Se encontró un modelo lineal simplificado que muestra la influencia de la tasa de flujo de aire y la temperatura, con un coeficiente de temperatura de -3.29×10^{-2} (García-Moreno et al., 2013).

Figura 12. Índice de estabilidad oxidativa del aceite de soya a diferentes condiciones de almacenamiento

Figure 12. Oxidative stability index of soybean oil at different storage conditions



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Se encontró una diferencia significativa con respecto al índice de estabilidad oxidativa ($p < 0.05$) en relación a la iluminación, utilizando un modelo lineal como cuadrático. Además, se observó que el OSI disminuye cuando se reduce la cantidad de iluminación (Tabla 1). Estos resultados son similares a los informados por Makhoulouf et al. (2021), quienes también encontraron que la estabilidad oxidativa se logra a niveles más bajos de iluminación. El período de inducción (IP) calculado a partir de la conductividad del agua se correlaciona con los índices de calidad del aceite; sin embargo, se considera que el IP basado en la conductividad se retrasa ligeramente en comparación con la oxidación real del aceite (Li et al., 2019).

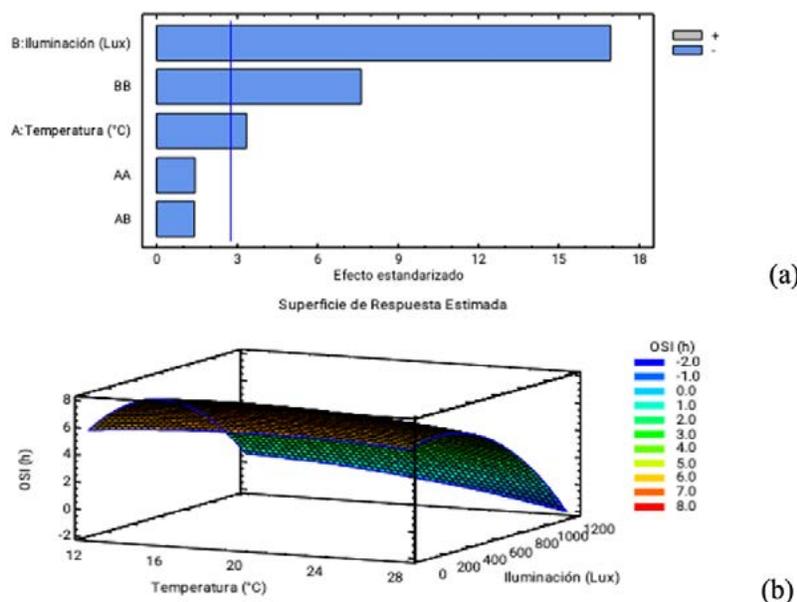
La aplicación de un controlador PID para la temperatura e iluminación, junto con un voltaje continuo, permite aumentar la estabilidad del aceite de soya durante el almacenamiento. Esta estrategia puede ser efectiva para minimizar la oxidación y prolongar la vida útil del aceite de soya. No obstante, se sugiere el uso de antioxidantes o la mezcla con aceites potencialmente estables (Olagunju et al., 2022), como el extracto crudo de orujo de manzana y quercetina (Manzoor et al., 2022) o el de Mashua (*Tropaeolum tuberosum*) (Mao et al., 2020), entre otros. Además, se recomienda llevar a cabo el cálculo de los indicadores de estabilidad oxidativa durante todo el manejo de los aceites comestibles para evitar la ingesta de aldehídos (Nogueira et al., 2019). Actualmente, el aceite de soya tiene un alto contenido en ácido oleico, superior al 75%, y ácidos grasos poliinsaturados inferiores al 10%, lo que lo hace cada vez más popular entre los fabricantes de alimentos y los operadores de servicios alimentarios (Knowlton, 2022).

Efecto de la temperatura e iluminación en la estabilidad oxidativa del aceite de soya

En la Figura 13 se presenta el diagrama de Pareto y el diagrama de superficie de respuesta respecto al efecto de la temperatura e iluminación sobre el índice de estabilidad oxidativa del aceite de soya, encontrando diferencias significativas entre los factores de estudio ($p < 0.05$). La misma se presenta en Tabla 4.

Figura 13. Índice de estabilidad oxidativa del aceite de soya: (a) diagrama de Pareto y (b) diagrama de superficie de respuesta

Figure 13. Oxidative stability index of soybean oil: (a) Pareto diagram and (b) response surface diagram



Fuente: elaboración propia. Source: own elaboration.

Tabla 4. ANOVA para la estabilidad oxidativa del aceite de soya
Table 4. ANOVA for the oxidative stability of soybean oil

Fuente	Suma de cuadrados	Grado de libertad	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura (°C)	1.47473	1	1.47473	11.21	0.0286
B: Iluminación (Lux)	37.7759	1	37.7759	287.09	0.0001
AA	0.264168	1	0.264168	2.01	0.2295
AB	0.2601	1	0.2601	1.98	0.2325
BB	7.6314	1	7.6314	58	0.0016
Falta de ajuste	1.58227	3	0.527423	4.01	0.1066
Error puro	0.52632	4	0.13158	-	-
Total (corr.)	49.2744	12	-	-	-

Donde Razón-F: valor de "F" calculado de la temperatura e iluminación. Valor-P: probabilidad de aceptación. Fuente: elaboración propia. Where F-Ratio: "F" value calculated and lightning. P-value: probability of acceptance. Source: own elaboration.

Se presentan los valores de OSI en la Tabla 1, donde la oxidación del aceite se realizó en dos fases: la de inducción, con la formación de hidroperóxidos conjugados, y la fase de oxidación final, donde los hidroperóxidos se dividen en compuestos orgánicos aromáticos de cadena corta, que causan la rancidez del aceite (Rodríguez et al., 2015). Por lo que se muestra en la Figura 13, la temperatura ejerce un efecto sobre el OSI. De esta manera, el tratamiento T4 (25 °C, 1000 LUX) presenta un tiempo de 1.08 horas de estabilidad oxidativa, lo que representa el envejecimiento del aceite y la presencia de ácidos volátiles de oxidación que causan el aumento de los valores de OSI en respuesta a la temperatura e iluminación, en comparación con las condiciones iniciales. Por lo tanto, se obtienen mayores valores de OSI a medida que la temperatura disminuye, obteniendo el mismo comportamiento respecto a la aplicación de la iluminación, ya que a medida que se incrementa la intensidad de iluminación, se obtienen menores valores de OSI.

Conclusión

Se evidenció el efecto significativo de la temperatura e iluminación en la estabilidad del aceite de soya, en cuanto a la calidad (índice de acidez e índice de peróxido) y al índice de estabilidad oxidativa (OSI) del aceite de soya a los treinta días de almacenamiento utilizando el sistema de control PID para la temperatura y voltaje continuo para la iluminación, logrando una mayor estabilidad oxidativa del aceite a 300 Lux de iluminación y 15 °C de temperatura.

Bibliografía

- Chen, J., Zhang, L., Li, Q., Gao, Y. y Yu, X. (2022). Utilization of *Diaphragma Juglandis* Extract as a Natural Antioxidant for Improving the Oxidative Stability of Soybean Oil During Deep Frying. *Food Chemistry*, *X*(14), 100359. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100359>
- Chen, J., Wang, Y., Liu, W., Zhang, F., Li, J., Yang, H. y Bi, Y. (2022). Effects of Free Fatty Acids and Peroxide on Thermal Loss of Sesamol and Formation of its Transformation Products in Soybean oil. *LWT*, *159*, 113236. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113236>
- De Oliveira, M.A.L., Balesteros, M.R., Faría, A.F. y Vaz, F.A.S. (2010). Determination of Olive Oil Acidity. En V.R. Preedy y R.R. Watson (Eds.), *Olives and Olive Oil in Health and Disease Prevention* (pp. 545-552). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374420-3.00059-0>
- De Almeida, D.T., Viana, T.V., Costa, M.M., Silva, C. de S. y Feitosa, S. (2019). Effects of Different Storage Conditions on the Oxidative Stability of Crude and Refined Palm Oil, Olein and Stearin (*Elaeis guineensis*). *Food Science and Technology (Brazil)*, *39*, 211-217. <https://doi.org/10.1590/fst.43317>
- García-Moreno, P.J., Pérez-Gálvez, R., Guadix, A. y Guadix, E.M. (2013). Influence of the Parameters of the Rancimat Test on the Determination of the Oxidative Stability Index of Cod Liver Oil. *LWT - Food Science and Technology*, *51*(1), 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.11.002>
- Gong, G., Wu, S. y Wu, X. (2019). Effects of Storage Time and Temperature on Toxic Aldehydes and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Flavouring Oil Gravy During Storage. *LWT*, *116*, 108510. <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.108510>
- Hoffmann, J.F., Fasquelle, T., Vaitilingom, G., Olives, R., Py, X. y Goetz, V. (2019). Compatibility of Vegetable Oils with Solid Filler Materials for Thermocline Thermal Energy Storage Systems. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *200*, 109932. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2019.109932>
- Hua, H., Wu, S. y Ma, X. (2022). Determination of trans-4-hydroxy-2-alkenals in Thermally Treated Soybean Oil by SPE-HPLC. *Grain & Oil Science and Technology*, *5*(12), 107-113. <https://doi.org/10.1016/j.gaost.2022.06.001>
- Jiang, H., He, Y. y Chen, Q. (2021). Determination of Acid Value During Edible Oil Storage Using a Portable NIR Spectroscopy System Combined with Variable Selection algorithms Based on an MPA-based Dstrategy. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(8), 3328-3335. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10962>
- Jiang, Y., Su, M., Yu, T., Du, S., Liao, L., Wang, H., Wu, Y. y Liu, H. (2021). Quantitative Determination of Peroxide Value of Edible Oil by Algorithm-assisted Liquid Interfacial surface Enhanced Raman Spectroscopy. *Food Chemistry*, *344*, 128709. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128709>

- Joseph, S.B., Dada, E.G., Abidemi, A., Oyewola, D.O. y Khammas, B.M. (2022). Metaheuristic Algorithms for PID Controller Parameters Tuning: Review, Approaches and open Problems. *Heliyon*, 8(5), e09399. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09399>
- Kherkhar, A., Chiba, Y., Tlemçani, A. y Mamur, H. (2022). Thermal Investigation of a Thermoelectric Cooler Based on Arduino and PID Control Approach. *Case Studies in Thermal Engineering*, 36, 102249. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2022.102249>
- Knowlton, S. (2022). High-oleic Soybean Oil. En F.J. Flider (Ed.), *High Oleic Oils: Development, Properties and Uses* (pp. 53-87). AOCS Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822912-5.00007-1>
- Li, X., Li, Y., Yang, F., Liu, R., Zhao, C., Jin, Q. y Wang, X. (2019). Oxidation Degree of Soybean Oil at Induction Time Point under Rancimat Test Condition: Theoretical Derivation and Experimental Observation. *Food Research International*, 120, 756-762. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.11.036>
- Liu, Z., Sharma, B.K., Erhan, S.Z., Biswas, A., Wang, R. y Schuman, T.P. (2015). Oxidation and Low Temperature Stability of Polymerized Soybean Oil-based Lubricants. *Thermochimica Acta*, 601, 9-16. <https://doi.org/10.1016/J.TCA.2014.12.010>
- Lubitza, S. (2019). *Evaluación del efecto antioxidante de arabinoxilanos del maíz (Zea Mays) en aceites comerciales utilizando el método Rancimat*. [Investigación de grado]. Universidad de Sonora.
- Lužaić, T., Kravić, S., Stojanović, Z., Grahovac, N., Jocić, S., Cvejić, S., Pezo, L. y Romanić, R. (2023). Investigation of Oxidative Characteristics, Fatty Acid Composition and Bioactive Compounds Content in Cold Pressed Oils of Sunflower Grown in Serbia and Argentina. *Heliyon*, 9(7), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18201>
- Makhlouf, F.Z., Squeo, G., Difonzo, G., Faccia, M., Pasqualone, A., Summo, C., Barkat, M. y Caponio, F. (2021). Effects of Storage on the Oxidative Stability of Acorn Oils Extracted from Three Different Quercus Species. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 101(1), 131-138. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10623>
- Manzoor, S., Masoodi, F.A., Rashid, R. y Dar, M.M. (2022). Effect of Apple Pomace-based Antioxidants on the Stability of Mustard Oil During Deep Frying of French Fries. *Lwt*, 163, 113576. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113576>
- Mao, X., Chen, W., Huyan, Z., Sherazi, S. T.H. y Yu, X. (2020). Impact of Linolenic acid on Oxidative Stability of Rapeseed Oils. *Journal of Food Science and Technology*, 57(9), 3184-3192. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04349-x>
- Martínez, J., García, K., Vargas, J., Arias, A. y Hernández, J. (2016). Efecto de la temperatura de almacenamiento sobre la calidad fisicoquímica del aceite de palma (RBD) y la margarina vegetal. *Revista Alimentos Hoy*.

- Medeiros Vicentini-Polette, C., Rodolfo Ramos, P., Bernardo Gonçalves, C y Lopes de Oliveira, A. (2021). Determination of Free Fatty Acids in Crude Vegetable Oil Samples Obtained by High-pressure Processes. *Food Chemistry: X*, 12, 100166. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2021.100166>
- Mikołajczak, N. y Tańska, M. (2022). Effect of Initial Quality and Bioactive Compounds content in Cold-pressed Flaxseed Oils on Oxidative Stability and Oxidation Products Formation During One-month Storage with Light Exposure. *NFS Journal*, 26, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.nfs.2022.02.001>
- Nogueira, M.S., Scolaro, B., Milne, G.L. y Castro, I.A. (2019). Oxidation Products from Omega-3 and Omega-6 Fatty Acids During a Simulated Shelf Life of Edible Oils. *Lwt*, 101, 113-122. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.11.044>
- Olagunju, A.I., Adelakun, O.S. y Olawoyin, M.S. (2022). The Effect of Rice Bran Extract on the Quality Indices, Physicochemical Properties and Oxidative Stability of Soybean Oil Blended with Various Oils. *Measurement: Food*, 6, 100032. <https://doi.org/10.1016/j.meafoo.2022.100032>
- Quanhong, L. y Caili, F. (2005). Application of Response Surface Methodology for Extraction Optimization of Germinant Pumpkin Seeds Protein. *Food Chemistry*, 92(4), 701-706. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2004.08.042>
- Rodríguez, G., Villanueva, E., Glorio, P. y Baquerizo, M. (2015). Estabilidad oxidativa y estimación de la vida útil del aceite de sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.). *Scientia Agropecuaria*, 6(3), 155-163. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.03.02>
- Zhang, N., Li, Y., Wen, S., Sun, Y., Chen, J., Gao, Y., Sagymbek, A. y Yu, X. (2021). Analytical Methods for Determining the Peroxide Value of Edible Oils: A Mini-review. *Food Chemistry*, 358, 129834. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.129834>