

Propuesta de mejora tecnológica a un tanque de 5 L de fundición de queso mozzarella por medio de la adaptación de un sistema de control de temperatura

Proposal for Technological Improvement of a 5 L Mozzarella Cheese Melting Tank Through the Adaptation of a Temperature Control System

Luis Eduardo García Jaimes^{ac}, Juan Pablo Restrepo Jiménez^{bd}, Julián Jiménez Ocampo^{be}

^a Grupo de Investigación en Ingeniería Sostenible (GIS) de la Facultad de Ingeniería del Politécnico Colombiano JIC, Colombia

^b Estudiante de la Facultad de Ingeniería del Politécnico Colombiano JIC, Colombia

^c luisgarcia@elpoli.edu.co | <https://orcid.org/0000-0001-6255-3469>

^d juan_restrepo91171@elpoli.edu.co

^e julian_julian91171@elpoli.edu.co

Citation: García Jaimes, L. E., Restrepo Jiménez, J. P., y Jiménez Ocampo, J. (2023). Propuesta de mejora tecnológica a un tanque de 5 L de fundición de queso mozzarella por medio de la adaptación de un sistema de control de temperatura. *Mutis*, 13(2), 1-21.
<https://doi.org/10.21789/22561498.1937>

Recibido: 22 de noviembre de 2022
Aceptado: 1 de febrero de 2023

Copyright: © 2023 por los autores. Licenciado para *Mutis*. Este artículo es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

RESUMEN

En este artículo se presenta una propuesta de mejora para el control de la temperatura de un baño María utilizado para fundir queso mozzarella, con el fin obtener la textura adecuada del queso, evitar que este se queme y reducir pérdidas económicas en locales de comida rápidas. Inicialmente, se realizó el estudio del proceso utilizado en la fundición del queso para determinar los componentes susceptibles de cambio necesarios para mejorar el desempeño del sistema; a continuación, se realizó el modelamiento fenomenológico del proceso lo que sirvió como base para sintonizar adecuadamente los controladores. La propuesta se realiza basada en tecnología y componentes de bajo costo, se presentan los planos eléctricos, planos de instrumentación y de control y se propone el uso de controladores digitales tipo PI para el control de la temperatura. Los controladores se sintonizaron utilizando técnicas de control por modelo interno (IMC) y el método del lugar geométrico de las raíces (LGR). Los ensayos realizados en el prototipo muestran mejoras significativas en la calidad de la textura del queso y en el tiempo necesario para su adecuada fundición sin pérdidas de materia prima.

Palabras clave: control de temperatura; reología; baño María; modulación por ancho de pulso (PWM); tanques de fundición; ingeniería.

ABSTRACT

This article presents a proposal to improve the temperature control of a bain-marie used to melt mozzarella cheese, in order to obtain the appropriate texture of the cheese, prevent it from burning and reduce economic losses in fast food places. Initially, the process used to melt the cheese was studied to determine the components that need to be changed to improve the performance of the system. Subsequently, the phenomenological modeling of the process, which served as a basis to properly tune the controllers, was carried out. The proposal is based on low-cost technology and components; electrical plans, instrumentation and control plans are presented, and the use of PI-type digital controllers for temperature control is proposed. Controllers were tuned using internal model

control (IMC) techniques and the locus of roots (LGR) method. The tests carried out with the prototype show significant improvements in the quality of the texture of the cheese and in the time necessary for its adequate melting without loss of raw material.

Keywords: temperature control; rheology; bain-marie; pulse width modulation (PWM); foundry tanks; engineering.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, el queso ha sido un alimento primordial para el consumo humano, brindando un elevado contenido en grasas y proteínas, lo que lo ha convertido en un soporte rico en nutrientes. En la actualidad, se consume en diversos tipos y presentaciones; por ejemplo, el queso fundido tipo mozzarella. En el proceso de fundición se disponen los bloques de queso en un tanque que, en la mayoría de los casos, utiliza el procedimiento del baño de María, que es un método para calentar una sustancia, sumergiendo el recipiente que la contiene en otro más grande con agua u otro líquido que se lleva a ebullición.

En Aceves (2013) se evaluó la fundición y la textura en queso Oaxaca comercial y la estructura química de los quesos analizando 29 marcas de queso Oaxaca comercial. En Carapaz (2013) se realiza un análisis sobre la preparación de queso fundido untable, llevando a cabo ensayos para obtener su mejor formulación y textura. Pedregosa et al. (2020) trabajan en un proyecto cuyo objetivo es obtener un queso fundido con unas propiedades sensoriales adecuadas, mediante un proceso tecnológicamente viable. En Oña y Rodríguez (2015) se presenta todo lo relacionado al diseño y creación de un baño María con circulación para los laboratorios de Inmunología de la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE). Finalmente, en Crespo (2016) se analiza el efecto de la temperatura en el rendimiento del queso y su valoración sensorial.

En la actualidad, el control del proceso de fundición del queso mozzarella en la empresa no es el más eficiente, debido a que se utiliza un sistema completamente manual; es decir, el encargado del proceso tiene que estar en absoluto cuidado del queso para evitar pérdidas del insumo y mala presentación del producto final.

El propósito de este trabajo de grado es diseñar una propuesta de mejora tecnológica en los tanques de 5l de fundición de queso mozzarella, consistente en la adaptación de un sistema de control de temperatura para reducir pérdidas económicas y mejorar la calidad y textura del queso, utilizando materiales de bajo costo.

El principal impacto de este proyecto está alrededor de las franquicias de comidas rápidas en donde su componente característico es el queso mozzarella fundido, debido a que posibilita obtener un producto de mejor calidad y reducir pérdidas. Además, en un criterio teórico alrededor de la instrumentación y control, es un sistema innovador y positivo en la industria alimenticia.

MATERIALES Y MÉTODOS

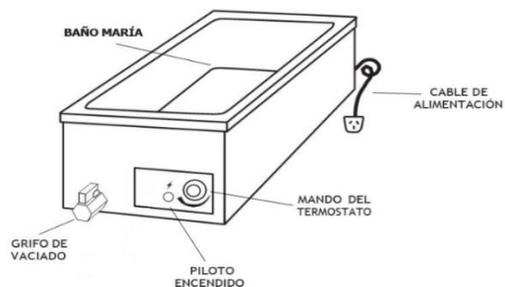
Descripción del sistema

Los tanques de fundición utilizados son un dispositivo basado en el método de baño María para calentar o derretir el queso. Estos están fabricados en acero inoxidable, ya que este material es el exigido en la industria alimenticia. Su funcionamiento actual es el siguiente:

- El tanque de fundición debe colocarse en una superficie totalmente horizontal y sin ningún desnivel para garantizar una temperatura uniforme en toda la superficie de la cesta.
- El nivel del agua debe estar a la altura de la cesta y, además, contar con un período de calentamiento que este alrededor de 30 a 40 minutos a máxima temperatura.
- Para energizar el tanque se debe accionar el switch ON-OFF; además, contar con un sistema de termostato, que consta de una perilla que permite 5 niveles de temperatura: bastante elevado, elevado, medio, bajo y bastante bajo.
- Una vez el tanque alcance su temperatura se puede colocar el queso que se va a fundir.

En la Figura 1 se pueden ver los componentes externos del tanque de fundición:

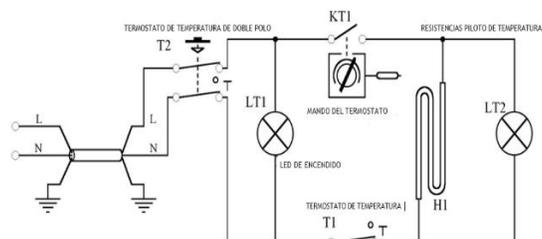
Figura 1. Tanque de fundición



Fuente: Eunasa (s.f.)

En la Figura 2 se muestra el esquema del circuito eléctrico y de control del dispositivo actual:

Figura 2. Plano eléctrico actual



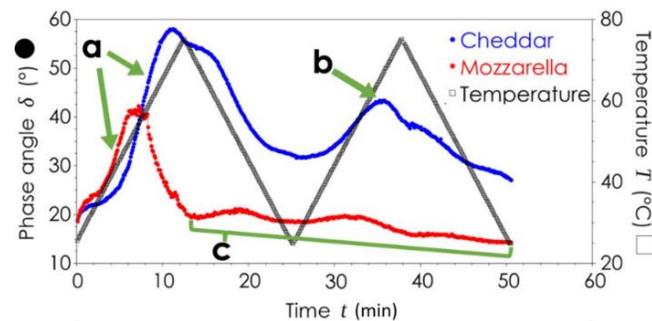
Fuente: Eunasa (s.f.)

Reología del queso

La reología del queso se define como el estudio de su deformación y flujo cuando es sometido a un esfuerzo. Las propiedades reológicas incluyen características intrínsecas tales como elasticidad, viscosidad y viscoelasticidad que se relacionan principalmente con la composición, estructura y la fuerza de atracción entre los elementos estructurales del queso (Centre for Industrial Rheology, s.f.)

El ángulo de fase es una medida de la respuesta viscoelástica del material. Un ángulo de fase de 0° significa que el material responde elásticamente; un ángulo de fase de 90° significa que el material se deforma de manera viscosa (o inelástica). En la Figura 3 en el punto “a”, tanto el queso cheddar como el mozzarella se derriten por primera vez. En el punto “b”, el queso cheddar se ha vuelto a fundir significativamente. En el punto “c” se puede ver un ‘endurecimiento’ irreversible del queso mozzarella (Centre for Industrial Rheology, s.f.). En el perfil de fusión que se les aplica a los dos tipos de queso, la línea roja corresponde al queso mozzarella. Se puede determinar que dicho queso alcanza su ángulo de fase a una temperatura aproximadamente de 40°C ; a medida que baja la temperatura se pierde su ángulo de fase de manera irreversible.

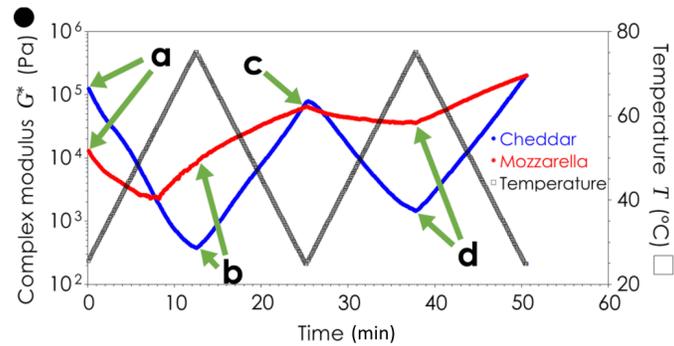
Figura 2. Generación de perfiles de fusión con reología



Fuente: Centre for Industrial Rheology (s.f.)

Por otro lado, el módulo de Young es una medida de la rigidez de un material: cuanto mayor es el módulo, más rígido es el material. En la Figura 4 se presenta una comparación entre la rigidez del queso mozzarella y el queso cheddar para un ciclo de temperatura. Se observa, en el punto “a” (temperatura ambiente), que el cheddar es más duro que la mozzarella; en el punto “b” el cheddar se vuelve más suave que el mozzarella a medida que aumenta la temperatura; en el punto “c” se puede ver que el cheddar se recupera a su rigidez original y el mozzarella es más duro que cuando comenzó; en el punto “d” se observa que el cheddar se ha suavizado al recalentarse, mientras que el mozzarella permanece rígido (Centre for Industrial Rheology, s.f.).

Figura 3. Perfil de rigidez

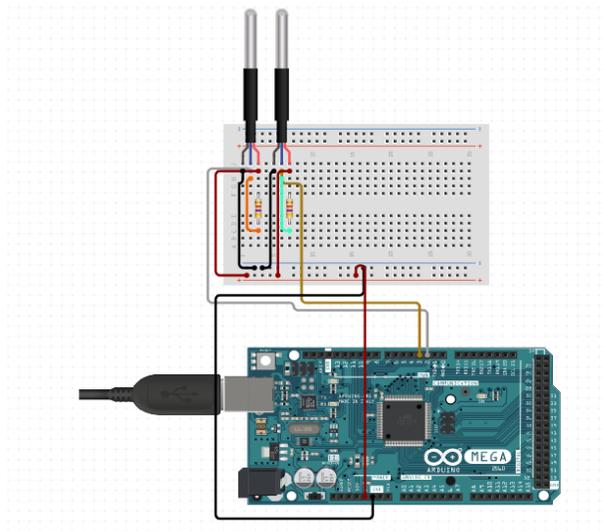


Fuente: Centre for Industrial Rheology (s.f.)

Identificación del sistema

El sistema actual cuenta con un método de control básico que consta de un termostato con 5 niveles de temperatura. Para su identificación se hizo una captura de datos en un tiempo fijo de 40 minutos, se tomaron dos temperaturas: una correspondiente al tanque del baño María y la otra a la cesta en donde va el queso, utilizando la tarjeta Arduino mega, dos sensores de temperatura DS18B20 y el software de Arduino. En la Figura 5 se observa la conexión que se realizó para la captura de datos del sistema.

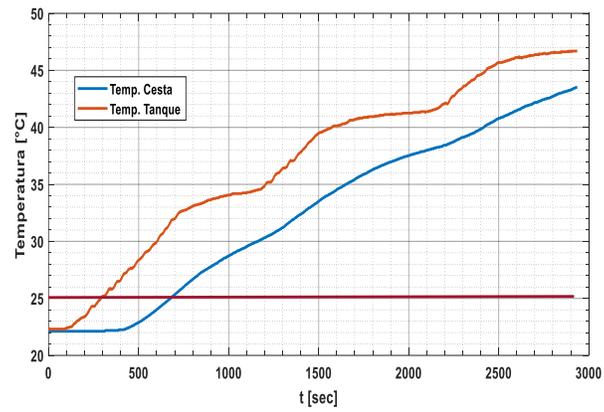
Figura 4. Conexión para la adquisición de datos.



Fuente: elaboración propia

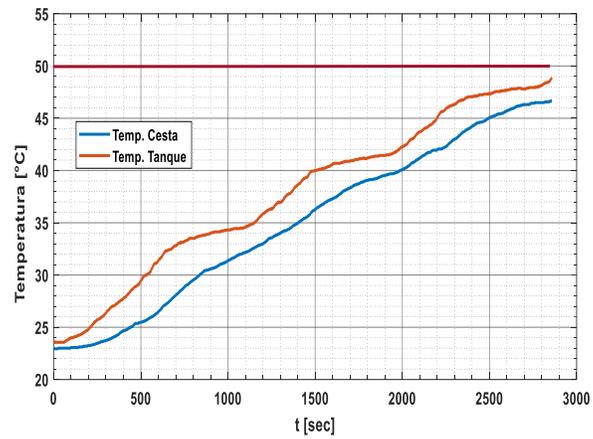
En las figuras 6, 7 y 8 se muestra la respuesta del sistema en lazo cerrado ante una entrada del 25, 50 y 75% respectivamente del rango de trabajo del termostato; como puede apreciarse, el sistema de control actual es deficiente y no permite estabilizar la temperatura, en el valor deseado.

Figura 5. Control con el termostato al 25%



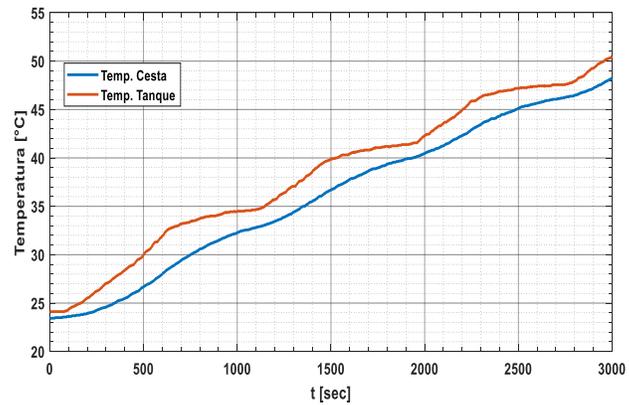
Fuente: elaboración propia

Figura 6. Control con el termostato al 50%



Fuente: elaboración propia

Figura 7. Control con el termostato al 75%

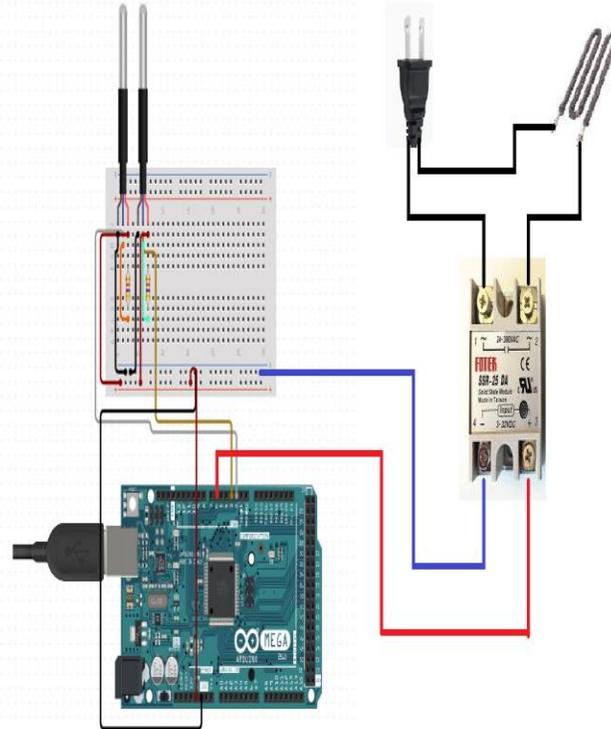


Fuente: elaboración propia

Para modelar la dinámica del sistema se trabaja con un modelo fenomenológico basado en ecuaciones de balance de energía y se validan los resultados en forma experimental desconectando el termostato del tanque e instalando un relé de estado sólido el cual permite variar la potencia suministrada a la resistencia calefactora por medio de un PWM y trabajando en lazo abierto.

En la Figura 9 se observa la conexión para esta adquisición de datos:

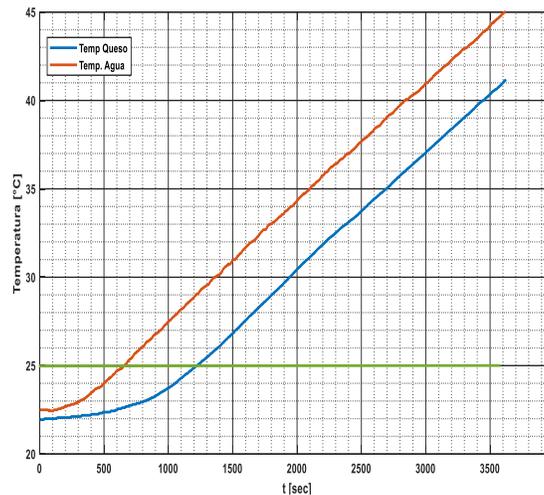
Figura 8. Conexión de adquisición de datos en lazo abierto.



Fuente: elaboración propia

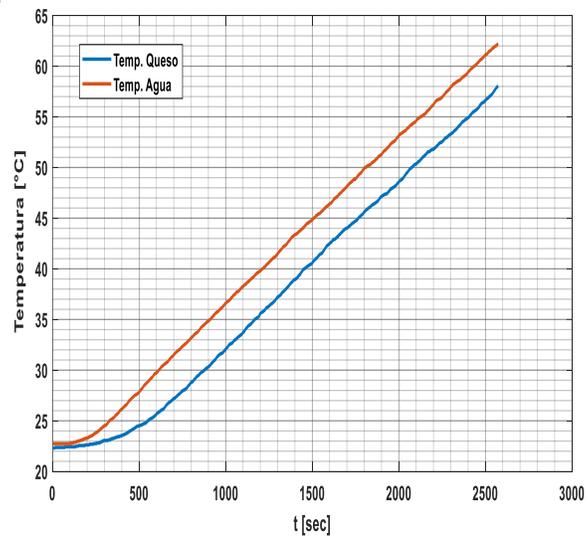
En las figuras 10 y 11 se presenta la respuesta del sistema en lazo abierto ante una entrada del 25 y 75% del PWM.

Figura 9. Respuesta del sistema a un 25% PWM.



Fuente: elaboración propia

Figura 10. Respuesta del sistema a un 75% PWM.



Fuente: elaboración propia

Modelamiento del sistema

En un baño María se pueden utilizar diferentes líquidos para el calentamiento en el recipiente grande (Agua, aceite, etc.). De esta forma se obtienen diferentes temperaturas de trabajo. Cuando se usa agua como en este proyecto, la máxima temperatura del producto colocado dentro del recipiente pequeño no pasa de los 100 °C.

En el baño María se presenta transferencia de calor por convección forzada, ya que este sistema trabaja con un fluido (usualmente agua) en su punto de ebullición. También se presenta transferencia de calor por conducción, puesto que entre la sustancia que se calienta y el fluido existe una pared perteneciente al recipiente. Como el espesor de la pared es muy delgado y la diferencia de temperatura entre las dos superficies de la pared es, en la mayoría de los casos

insignificante, el calor absorbido por ella puede despreciarse (Pulla, 2016; Pulgarín et al., 2015; Salazar et al., 2022). La transferencia de calor por convección se rige por la ley de transferencia de calor de Newton:

$$Q = h \cdot A(T_f - T_s) \quad (Ec. 1)$$

En donde:

Q : Flujo de calor [W]

A : Área de la superficie de contacto [m^2]

T_f : Temperatura del fluido [$^{\circ}K$]

T_s : Temperatura de la superficie [$^{\circ}K$]

h : Coeficiente pelicular de transmisión por convección [$\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}K}$]

Por otro lado, la ecuación de transmisión de calor por conducción se conoce como la ley de Fourier:

$$Q = \frac{KA}{L}(T_1 - T_2) \quad (Ec. 2)$$

En donde:

Q : Cantidad de calor transferido [W]

K : Conductividad térmica del material [$\frac{W}{m \cdot ^{\circ}K}$]

A : Área total de transferencia [m^2]

L : Espesor de la pared [m]

T_1 y T_2 : Temperaturas en las superficies de la pared [$^{\circ}K$]

El balance de energía para el baño maría se puede resumir así:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Acumulación de} \\ \text{energía dentro} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Transferencia} \\ \text{de energía} \\ \text{al sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Consumo de} \\ \text{energía} \\ \text{dentro del} \\ \text{sistema} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Transferencia de} \\ \text{energía hacia afuera} \\ \text{del sistema} \end{array} \right\} \quad (Ec. 3)$$

Matemáticamente, el balance de energía se puede expresar con las siguientes ecuaciones diferenciales:

- Para el tanque con el queso:

$$m_q c_{pq} \frac{dT_q}{dt} = hA(T_a - T_q) + \frac{KA}{L}(T_{sq} - T_{sa}) \quad Ec. 4$$

- Para el tanque grande con agua:

$$m_a c_{pa} \frac{dT_a}{dt} = Q_R + hA(T_q - T_a) + \frac{KA}{L}(T_{sq} - T_{sa}) \quad (Ec. 5)$$

En donde:

- $hA(T_a - T_q)$: Calor por convección que gana el queso y pierde el agua caliente

- $\frac{KA}{L}(T_{sq} - T_{sa})$: Calor por conducción que gana el queso y pierde el agua caliente
- $m_a c_a (T_a - T_{ao})$: Calor necesario para calentar el agua del tanque grande

m_q : Masa del queso [Kg]

c_{pa} : Calor específico del agua $\left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}\right]$

c_{pq} : Calor específico del queso $\left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K}\right]$

h : Coeficiente pelicular de transmisión por convección $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}\right]$

A : Área de transferencia [m^2]

L : Espesor de las paredes (Lámina de acero)

T_q : Temperatura del queso [$^\circ K$]

T_a : Temperatura del agua [$^\circ K$]

T_{ao} : Temperatura inicial del agua [$^\circ K$]

T_{sa} : Temperatura de la superficie de la cesta en contacto con el agua [$^\circ K$]

T_{sq} : Temperatura de la superficie de la cesta en contacto con el queso [$^\circ K$]

T_{sq} : Temperatura de la superficie de la cesta en contacto con el agua [$^\circ K$]

Q_R : Potencia suministrada por la resistencia para calentar el agua [W]

En la Tabla 1 se dan el valor de los parámetros del baño María.

Tabla 1. Valor de los parámetros del baño maría

| SÍMBOLO | PARÁMETRO | VALOR | UNIDADES |
|----------|---------------------------------------|----------------|------------------------|
| A | Área de transferencia (agua-queso) | 0.23 | m^2 |
| L | Espesor de la lámina de aluminio | 0.015 | m |
| h | Coeficiente pelicular de transmisión | 6000 | $W/m^2 \cdot ^\circ K$ |
| K | Coeficiente conducción del acero | 46.52 | $W/m \cdot ^\circ K$ |
| c_{pa} | Calor específico del agua | 4196 | $J/Kg \cdot ^\circ K$ |
| c_{pq} | Calor específico del queso | 2850 | $J/Kg \cdot ^\circ K$ |
| Q_R | Potencia suministrada por resistencia | 1200 | W |
| T_a | Temperatura del agua | 100 | $^\circ C$ |
| T_{ao} | Temperatura inicial del agua | 20 | $^\circ C$ |
| T_q | Temperatura de fusión del queso | 72.5 ± 1.5 | $^\circ C$ |
| m_a | Masa del agua en el tanque | 10 | Kg |
| m_q | Masa del queso en la cesta | 2.5 | Kg |

Fuente: elaboración propia.

De las ecuaciones diferenciales anteriores, operando matemáticamente y con los parámetros propios del proceso, se obtienen las siguientes funciones de transferencia:

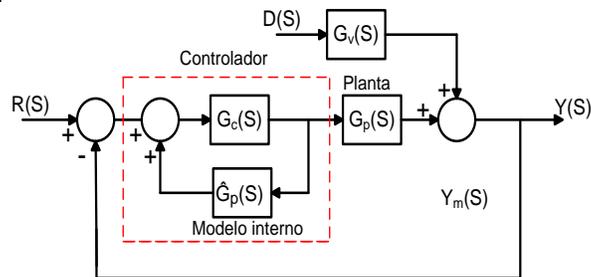
$$G_1(S) = \frac{T_a(S)}{V(S)} = \frac{0.0001586}{S(S + 0.2264)} = \frac{7.0 \cdot 10^{-4}}{S(4.417S + 1)} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$G_2(S) = \frac{T_q(S)}{V(S)} = \frac{0.0006847S + 0.0001325}{S(S + 0.2264)} \quad (Ec. 7)$$

Controladores

• **Control con modelo interno (IMC):** el control con modelo interno (IMC) que se muestra en la Figura 12 se utiliza como una alternativa de los controladores P, PI, PD y PID y presenta dos características importantes: la primera, que incorpora explícitamente el modelo de la planta $\hat{G}_p(S)$; y la segunda, que el diseño del controlador $G_c(S)$ está completamente relacionado con dicho modelo. La síntesis de este controlador es relativamente sencilla (Carrasco, 2020).

Figura 11. Esquema de control con modelamiento interno



Fuente: elaboración propia

El controlador, con el modelo interno $\hat{G}_p(S)$ tiene por función de transferencia:

$$G_{CIMC}(S) = \frac{G_c(S)}{1 - G_c(S)\hat{G}_p(S)} \quad (Ec. 8)$$

Las funciones de transferencia que relacionan a la variable controlada $y(t)$ con el *set-point* $r(t)$ y la perturbación $d(t)$ son, respectivamente:

$$G_{wr}(S) = \frac{Y(S)}{R(S)} = \frac{G_c(S)G_p(S)}{1 + [G_p(S) - \hat{G}_p(S)]G_c(S)} \quad (Ec. 9)$$

$$G_{wd}(S) = \frac{Y(S)}{D(S)} = \frac{[1 - G_c(S)\hat{G}_p(S)]G_d(S)}{1 + [G_p(S) - \hat{G}_p(S)]G_c(S)} \quad (Ec. 10)$$

La condición ideal del control se alcanza si $Y(S) = R(S)$ y se elimina el efecto de la perturbación; es decir, si:

$$\frac{Y(S)}{R(S)} = 1 \quad \frac{Y(S)}{D(S)} = 0 \quad (Ec. 11)$$

Para que se cumplan las igualdades anteriores, en las ecuaciones 9 y 10 se debe cumplir que:

$$G_p(S) = \hat{G}_p(S) \quad \text{y} \quad G_c(S)G_p(S) = 1 \quad (Ec. 12)$$

De la ecuación 12 se obtiene:

$$G_c(S) = \frac{1}{G_p(S)} = [G_p(S)]^{-1} \quad (Ec. 13)$$

Las dos condiciones dadas por la ecuación 12 son imposibles de cumplir pues, por lo general, no se cuenta con el modelo exacto de la planta y pueden existir partes del modelo no invertibles, como son el tiempo de retardo o ceros en el semiplano derecho (ceros positivos) en tanto, al invertir la planta, producen inestabilidad en el sistema.

La dificultad anterior, se puede resolver si se descompone $G_p(S)$ en dos partes: una formada por los elementos de la parte invertible, $G_p^-(S)$ y otra con los elementos no invertibles, $G_p^+(S)$ (Zambrano, 2017).

$$G_p(S) = G_p^-(S) \cdot G_p^+(S) \begin{cases} G_p^-(S): \text{Contiene los ceros negativos} \\ G_p^+(S): \text{ceros positivos y el retardo} \end{cases} \quad (Ec. 14)$$

Entonces, el diseño del controlador $G_c(S)$ queda de la forma:

$$G_c(S) = [G_p^-(S)]^{-1} = \frac{1}{G_p^-(S)} \quad (Ec. 15)$$

Tomando como base la estructura IMC general, se desarrolló un procedimiento para obtener el controlador y lograr que la planta siga un modelo de referencia determinado $G_m(S)$. Para lograr la solución se redefinió el controlador IMC como:

$$G_c(S) = [G_p^{-1}(S)]^{-1} \cdot G_m(S) = \frac{G_m(S)}{G_p^-(S)} \quad (Ec. 16)$$

• **Controlador de temperatura utilizando el método del lugar geométrico de las raíces:** este método se puede utilizar en el diseño de controladores continuos o discretos cuando se desea localizar los polos dominantes de lazo cerrado en una determinada posición y se conocen las especificaciones de funcionamiento del sistema en términos de la respuesta transitoria tales como: máximo sobre impulso, frecuencia natural no amortiguada coeficiente de amortiguamiento, tiempo de establecimiento, etc.

A continuación, se enumeran los pasos a seguir para sintonizar un controlador discreto PI o PD, utilizando el LGR (García, 2013):

- a. Determinar la función de transferencia de pulso del sistema, seleccionando previamente el tiempo de muestreo adecuado.
- b. Determinar la ubicación de los polos dominantes de lazo cerrado deseados, teniendo en cuenta las especificaciones de funcionamiento requeridas.
- c. Determinar el ángulo de fase que debe aportar el controlador para que el sistema cumpla con la condición de ángulo en el polo de lazo cerrado deseado. Esto permite calcular el cero del controlador:

$$\angle D(z)HG(z)|_{z=z_0} = -180^\circ \quad (Ec. 17)$$

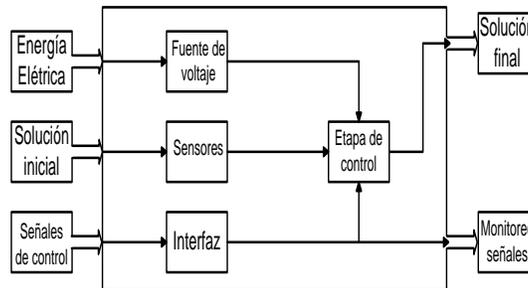
d. La ganancia del controlador se calcula utilizando la condición de módulo:

$$|D(z)HG(z)|_{z=z_0} = 1 \quad (\text{Ec. 18})$$

Propuesta de mejora

En la Figura 13 se puede observar el diseño de la propuesta de mejora en un diagrama de subárea:

Figura 13. Diagrama de subáreas



Fuente: elaboración propia

La propuesta de mejora al tanque de fundición de queso mozzarella la constituye la adición de los siguientes elementos:

- **Tarjeta de adquisición de datos:** Arduino Mega que cuenta con 54 entradas/salidas digitales, 16 entradas analógicas, 4 UART, maneja un voltaje de 5.5 V.

- **Relé estado sólido:** relé FOTEK SSR-25-DA con una corriente máxima de carga de 25 amperios, voltaje de carga 24-380VAC, voltaje de control 3-32VDC, tiempo de respuesta ON<10ms, OFF<10ms y una resistencia de aislamiento sobre 50Mohms/500VDC.

- **Sensor de temperatura:** DS18B20, cuenta con un rango de temperatura de -55 a 125 °C, resolución de 9 a 12 bits (configurable), interfaz 1-Wire (puede funcionar con un solo pin). Múltiples sensores pueden compartir el mismo pin. Precisión: ±0.5 °C (de -10 °C a +85 °C), alimentación 3.0V a 5.5V y necesita una resistencia de 4.7 KΩ para su conexión al Arduino [6].

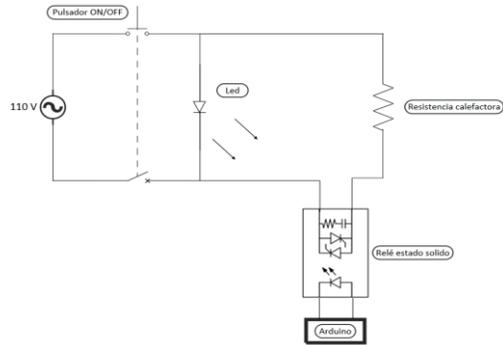
- **Teclado matricial:** teclado 4x4 con 16 botones con organización matricial, mayor resistencia al agua y al polvo, máximo voltaje operativo 24 V DC, máxima corriente operativa 30 mA, dimensiones 69x77 mm y una temperatura de operación de 0 a 55 °C [7].

- **Display LCD:** formato de visualización 16x2, ciclo de trabajo de 1/16, fuente de alimentación de 5 V [8].

- **Adaptador I2C:** módulo de interfaz serial FC-113 IIC/I2C para los displays 1602, voltaje de alimentación 5V DC.

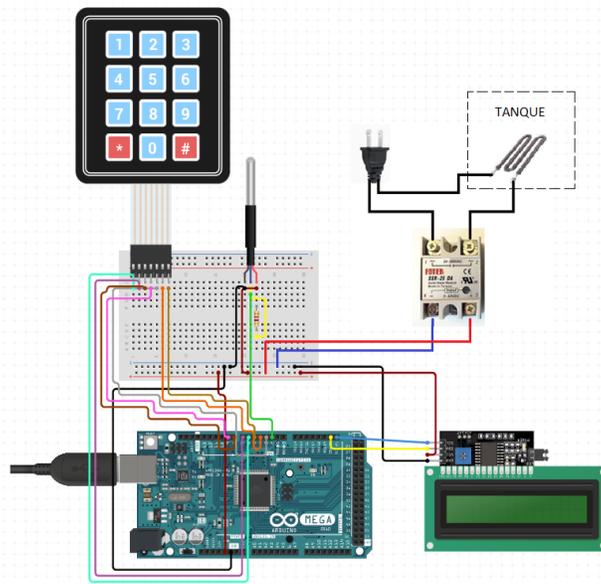
En el diseño, el plano eléctrico de la propuesta se representa en la Figura 14 y en la Figura 15 se observa la conexión completa de los componentes necesarios para esta mejora:

Figura 14. Plano eléctrico de la mejora.



Fuente: elaboración propia

Figura 15. Conexión completa.



Fuente: elaboración propia

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sintonización de controladores

• **Control con modelo interno para el baño María:** para estimar el controlador del sistema de temperatura del baño María se asume tiempo de establecimiento $t_s = 1800$ s y coeficiente de amortiguamiento $\xi = 0.8$. Con estas especificaciones, la ecuación característica para el modelo de referencia es:

$$S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2 = S^2 + 0.00328S + 4.34 * 10^{-6} = 0$$

El modelo de referencia debe tener ganancia unitaria; por lo tanto:

$$G_m(S) = \frac{7.71 * 10^{-6}}{S^2 + 0.0044S + 7.71 * 10^{-6}}$$

La función de transferencia del baño María no tiene polos inestables ni tiempo muerto; por lo tanto, $G_p^-(S) = G_p(S)$

$$G_p^-(S) = G_p(S) = \frac{0.0007}{S(4.417S + 1)}$$

Entonces:

$$G_c(S) = \frac{G_m(S)}{G_p^-(S)} = \frac{0.011S(4.417S + 1)}{S^2 + 0.0044S + 7.71 * 10^{-6}}$$

Según la ecuación la ecuación 8:

$$G_{IMC}(S) = \frac{G_c(S)}{1 - G_c(S)G_p^-(S)}$$

Es decir:

$$G_{CIMC}(S) = \frac{0.0485(S + 0.2264)}{S + 0.0044}$$

$$G_{CIMC}(S) = \frac{2.495(4.417S + 1)}{227.27S + 1}$$

Al discretizar el controlador $G_{CIMC}(S)$ con $T = 300$ s se obtiene:

$$D(z) = \frac{1.021z + 0.9628}{z - 0.2048}$$

• **Control con el lugar geométrico de las raíces para el baño María:** para estimar el controlador del sistema de temperatura del baño María se asume tiempo de establecimiento $t_s = 1800$ s, coeficiente de amortiguamiento $\xi = 0.8$ y período de muestreo $T=300$ s.

Ubicación del polo deseado:

$$|z| = e^{-\xi\omega_n T} \quad \theta = 57.3\omega_n T \sqrt{1 - \xi^2} \quad Ec. 19$$

$$z = |z|[\cos\theta \pm j\text{sen}\theta] \quad Ec. 20$$

Según las especificaciones propuestas:

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad \omega_n = \frac{4}{0.8 * 1800}$$

$$\omega_n = 0.00277 \text{ rad/s}$$

Entonces:

$$|z| = e^{-0.8 * 0.00277 * 300} \quad |z| = 0.514$$

$$\theta = 57.3 * 0.00277 * 300 * \sqrt{1 - 0.8^2}$$

$$\theta = 28.56^\circ$$

La ubicación deseada para el polo en lazo cerrado es $z = 0.451 \pm j0.245$. Se calcula el valor del ángulo que presenta la planta discreta en el polo deseado:

$$\angle HG(z)|_z = \angle \frac{0.2069z + 0.00309}{z(z-1)} \Big|_{z=0.451+j0.245}$$

$$\angle HG(z)|_z = \angle \frac{0.0964 + j0.05069}{(0.451 + j0.245)(-0.549 + j0.245)}$$

$$\angle HG(z)| = -156.74$$

Según la condición de ángulo se debe cumplir que:

$$\angle HG(z).D(z) = -180^\circ$$

Entonces, el controlador debe aportar:

$$-180^\circ + 156.74^\circ = -23.26^\circ$$

Se asume un controlador PI de la forma:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{q_o \left(z + \frac{q_1}{q_o} \right)}{z-1}$$

Entonces:

$$\angle D(z) = \angle \frac{q_o \left(z + \frac{q_1}{q_o} \right)}{z-1} \Big|_{z=0.451+j0.245} = -23.26^\circ$$

$$\angle \frac{q_o \left(0.451 + j0.245 + \frac{q_1}{q_o} \right)}{-0.549 + j0.245} = -23.26^\circ$$

Resolviendo se obtiene:

$$\frac{q_1}{q_o} = -0.677$$

Por lo tanto:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{q_o(z - 0.677)}{z-1}$$

Finalmente, la condición de módulo establece que:

$$|D(z).HG(z)|_z = 1$$

$$\left| \frac{q_o(z - 0.677)}{z-1} * \frac{0.2069z + 0.00309}{z(z-1)} \right|_{z=0.451+j0.245} = 1$$

Resolviendo para q_o se obtiene: $q_o = 4.149$.

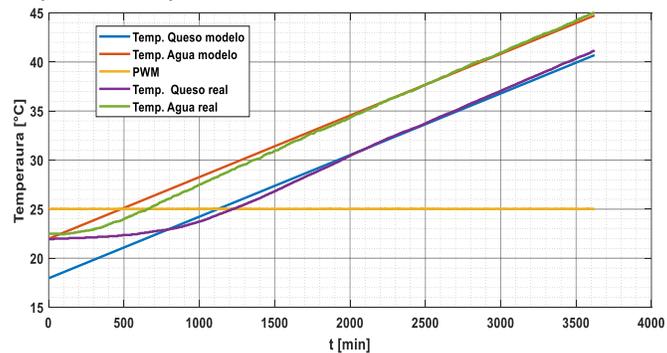
Reemplazando los parámetros estimados, el controlador PI está dado por:

$$D(z) = \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{4.149(z - 0.677)}{z-1}$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Figura 16 se muestra la comparación entre la respuesta del modelo fenomenológico obtenido y la respuesta del sistema real ante una entrada en forma de escalón del 25% aplicada al sistema de potencia de la resistencia calefactora. el resultado permite validar el modelo.

Figura 16. Respuesta real y del modelo estimado al escalón del 25%.



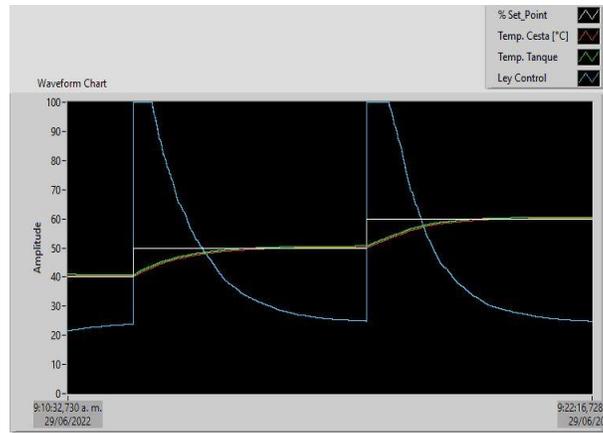
Fuente: elaboración propia

Resultados de los controladores aplicados

Se calcularon dos controladores PI: uno por el método de modelo interno y otro por el lugar geométrico de las raíces.

La Figura 17 corresponde a la respuesta de las temperaturas del tanque con agua y de la cesta del queso con el controlador PI-IMC. Inicialmente, el sistema se estabilizó a una temperatura de 40 °C y luego se aplicó un cambio en el *set-point* para llevar la temperatura a 50 °C. Se observa la rápida respuesta de la ley de control, que lleva al PWM al 100%, aplicando así la máxima potencia al proceso; se aprecia una corta saturación en el EFC y luego, al ir aumentando la temperatura, va disminuyendo el porcentaje del PWM aplicado hasta que el sistema estabiliza la temperatura en el valor deseado sin oscilaciones significativas y con error de estado estable menor del 1%. También se nota que la diferencia entre las dos temperaturas es muy pequeña, del orden de 1 °C. El proceso se repitió llevando el *set-point* de temperatura hasta 60 °C; en este caso, se observa una respuesta muy similar a la anterior y con las mismas características de error de estado estable y de diferencias en las dos temperaturas.

Figura 17. Respuesta del proceso con el control PI-IMC.



Fuente: elaboración propia

La Figura 18 corresponde a la respuesta de las temperaturas en el tanque con agua y en la cesta del queso con el controlador PI estimado con el método del LGR. Igual que en el caso anterior, el sistema se estabilizó a una temperatura de 40°C y luego se aplicó un cambio en el *set-point* para llevar la temperatura a 50 °C. Se observa la rápida respuesta de la ley de control, que lleva al PWM al 100%, aplicando así la máxima potencia al proceso; se aprecia saturación en el EFC con duración un poco mayor que la generada por el IMC y luego, al ir aumentando la temperatura, el porcentaje del PWM aplicado va disminuyendo hasta llegar al 0% e inmediatamente comienza a aumentar y, después de una pequeña oscilación, se estabiliza llevando la temperatura al valor deseado con error de estado estable menor del 1%. También se nota que la diferencia entre la temperatura del tanque y la temperatura de la cesta es muy pequeña, del orden de 1 °C. El proceso se repitió llevando el *set-point* de temperatura hasta 60 °C; en este caso, se observa una respuesta muy similar a la anterior y con las mismas características de error de estado estable y de diferencias en las dos temperaturas.

Figura 18. Respuesta del proceso con el controlador PI con el LGR.



Fuente: elaboración propia

En la Tabla 2 se puede observar la comparación del desempeño de los controladores. Se utilizaron los criterios de la integral del error absoluto (IAE) promedio y de la integral del cuadrado del error (ICE) promedio, para establecer con cuál de los dos algoritmos de control el proceso tenía mejor comportamiento de hecho. Con estos criterios no se observa una diferencia significativa en el desempeño de los controladores, con lo cual se puede concluir que los dos algoritmos pueden utilizarse ventajosamente para controlar la temperatura del baño María y obtener una textura aceptable para el queso.

Tabla 2. Comparación del desempeño de los controladores.

| CONTROLADOR | IAE | ICE |
|-------------|--------|---------|
| IMC | 1.6618 | 8.8605 |
| PI | 1.6637 | 10.4373 |

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

- Se analizó el actual proceso de fundición de queso mozzarella y se establecieron los principales elementos susceptibles al cambio. Se concluyó que el sistema cuenta con un control demasiado básico y muy deficiente, que daba como resultado imperfecciones en el producto final y desperdicio de materia prima, dando como resultado pérdidas económicas al establecimiento.
- Se diseñó la propuesta de mejora tecnológica utilizando materiales de bajo costo que se seleccionaron previamente analizando entre varias opciones

del mercado que permitieron realizar un control adecuado de la temperatura en los tanques de fundición. Se aplicaron las bases teóricas de los controladores PI, por modelo interno (IMC) y controlador por lugar geométrico de las raíces (LGR). Se demostró que estos controladores respondieron de manera adecuada al sistema, acoplándose muy bien al control de temperatura requerido teóricamente por la reología del queso mozzarella.

- Se validó el desempeño del sistema implementado, realizando un análisis comparativo con el proceso anterior, pudiéndose observar que el sistema con la propuesta de mejora presentó mejores resultados en la operación del proceso, como lo son: consumo energético, tiempo de fundición, tiempo de permanencia del queso en el tanque, disminución de desperdicios de materia prima y mejora sustancial en la textura.
- Con los dos algoritmos de control implementados se observa un buen desempeño del sistema, lo cual indica que estas estrategias son adecuadas para controlar este tipo de procesos.
- En el consumo energético se ve un importante ahorro debido a que el sistema, al llegar a la temperatura especificada, disminuye el consumo energético de la resistencia calefactora y se mantiene por un largo tiempo en dichas condiciones, mientras que el sistema actual no puede alcanzar esta condición.
- En el tiempo de permanencia en la cesta se determinó que se puede dejar el queso mucho más tiempo sin supervisión, debido a que el controlador logra mantener en las condiciones de temperatura adecuadas al queso, evitando así que este se queme o se enfrié, obteniendo una mejor textura del producto final y evitar las pérdidas de materia prima por queso quemado o queso muy sólido que pierde propiedades de elasticidad

RECOMENDACIONES

Como trabajo futuro, una vez establecidos los ajustes y realizadas las pruebas de control, se recomienda realizar algunos ajustes en la instrumentación del baño María para hacer más eficiente el proceso de calentamiento, de modo que se obtenga un producto de alta calidad. Como nuevos experimentos, se sugiere realizar un análisis más exhaustivo de la calidad de la textura final del queso fundido.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid y a la empresa que facilitó los baños María para realizar el diseño de la automatización.

REFERENCIAS

Aceves, J. (2013) *Caracterización del fundido y textura de queso Oaxaca y queso Oaxaca de imitación comercial* [Tesis de pregrado, Universidad Autónoma del Estado de México].

Carapaz, L. (2013) *Elaboración de queso fundido untable tipo cheddar en Industria Lechera Carchi S.A.* Universidad Técnica de Ambato. Ciencia e Ingeniería de Alimentos.

Carrasco, L. (2020) *Diseño e implementación de un control PID IMC para planta piloto de refrigeración* [Tesis de grado, Universidad de Piura].

Crespo, S. (2016). *Efecto de la temperatura de cuajado de la leche sobre el rendimiento quesero, la composición química y la valoración sensorial de quesos frescos de cabra* [Trabajo de máster, Universidad Politécnica de Valencia].

Centre for Industrial Rheology (s.f.). Página web principal. <https://www.rheologylab.com/articles/food/melted-cheese/>

Eunasa (s.f.). *Manual del usuario* https://www.eunasa.com/uploads/attachments/article/84059es_537024%20%20Manual%20Ba%C3%B1o%20Mar%C3%ADa.pdf

García, L. E. (2013). *Control Digital Teoría y Práctica*. Editorial L. Vieco Ltda.

Oña, B y Rodríguez, D. (2015) *Diseño y construcción de un baño maría utilizando un controlador PID Fuzzy para el laboratorio de inmunología de la universidad de las fuerzas armadas ESPE* [Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas]. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11535>

Pedregosa, A. López, A. y Olalla, M (2020). *Innovación en el desarrollo de queso fundido para lonchear a partir de queso fresco de cabra*. *Ars Pharm*, 61(1).

Pulgarín, S. Agudelo, A. Gómez, F. y Rojas, O (2015). *Diseño de un sistema de control de temperatura y vaciado semiautomático de chocolate* [Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira].

Pulla, C. V. (2016) *Rediseño y experimentación del banco de pruebas del viscosímetro Saybolt* [Tesis de pregrado, Escuela superior politécnica de Chimborazo].

Salazar, M. Guayasamín, M. Molina, J. y Salazar, M. (2022). *Construcción de un baño maría para pruebas de tratamientos térmicos a nivel de laboratorio* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Chimborazo].

Zambrano, J. (2017) *Desarrollo de estrategias de control por el modelo interno (IMC) para procesos con grandes retardos de tiempo* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica del Litoral].