





Controlador de temperatura para la elaboración de requesón.

Temperature controller for ricotta cheese production.

-  **José Manuel Torres-Ferrusquia** es Estudiante de ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México en Celaya, (19031499@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0005-8251-5028>), Ingeniero.
-  **Elizabeth Espitia-Romero** es Estudiante de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en el Tecnológico Nacional de México en Celaya, (d2203009@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0000-1541-1185>), Maestra.
-  **Juan José Martínez-Nolasco** es Profesor-Investigador del Departamento de Ingeniería Mecatrónica en el Tecnológico Nacional de México en Celaya. (juan.martinez@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-4080-1286>), Doctor.
-  **Micael Gerardo Bravo-Sánchez** es Profesor-Investigador del Departamento de Ingeniería Bioquímica y Ambiental en el Tecnológico Nacional de México en Celaya, (gerardo.bravo@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-3083-4172>), Doctor.

Resumen: Este artículo presenta el diseño y la implementación de un controlador de temperatura automatizado para el proceso artesanal de producción de queso ricotta o requesón. La precisión en el control de la temperatura es crucial para garantizar un rendimiento de producción alto, así como la calidad del producto, ya que el proceso requiere mantener la temperatura del suero de leche dentro de rangos específicos, entre 40°C y 95°C. Para lograr esto, se seleccionaron componentes electrónicos adecuados, incluyendo un termopar tipo K para la medición precisa de la temperatura, un servomotor para controlar la válvula de suministro de gas, y un microcontrolador Arduino que gestionó el algoritmo de control. El sistema de control se basa en un algoritmo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) que fue diseñado utilizando herramientas de simulación como MATLAB basándonos en una gráfica proporcionada por el proceso artesanal. El controlador PID fue implementado para regular la temperatura de manera automática, ajustando el flujo de gas en función de las lecturas de temperatura en tiempo real. Se llevaron a cabo diversas pruebas físicas para validar el funcionamiento del controlador en la producción real de queso ricotta variando distintos parámetros, así como ganancias de los controladores y rangos de operación. Los diferentes resultados demostraron la capacidad del controlador para ajustar los parámetros con la finalidad de lograr un comportamiento similar de la temperatura respecto al tiempo de la gráfica del proceso artesanal. En conclusión, el controlador diseñado proporciona un método fiable y eficiente para el control de temperatura en procesos artesanales, con potencial para ser adaptado a otros productos que requieran un control preciso de las condiciones térmicas.

Palabras clave: Algoritmo, Arduino, automatización, control de temperatura, requesón, sensor, termopar.

Cómo citar: Torres-Ferrusquia, J.M. Espitia-Romero, E. Martínez-Nolasco, J. J. y Bravo-Sánchez, M. G.(2024). Controlador de temperatura para la elaboración de requesón. Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales, 6(12), pp. 129-143. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.129-143>

Recepción: 30-09-2024
Aprobación: 23-10-2024



Abstract: This study focuses on the development and implementation of an automated temperature control system specifically designed for the artisanal production of ricotta cheese. Temperature regulation is critical for maintaining product quality and ensuring the efficiency of the production process, as it requires keeping the milk whey within a precise temperature range of 40°C to 95°C. The system was built using a K-type thermocouple for real-time temperature monitoring, a servomotor to regulate the gas flow, and an Arduino microcontroller programmed to execute a control algorithm.

The control logic was based on a Proportional-Integral-Derivative (PID) algorithm, which was fine-tuned using MATLAB simulations. The temperature reference for tuning the system was derived from the traditional artisanal process, allowing for a more accurate representation of the desired thermal profile. The automated system adjusts the gas supply based on real-time data, ensuring that the process adheres closely to the target temperature setpoint. Extensive physical testing was conducted, adjusting control parameters such as gain values and operational limits. The results showed that the PID controller effectively mimicked the desired temperature profile over time, achieving stability and performance comparable to the artisanal method. The automated controller offers a robust and adaptable solution for temperature regulation in artisanal production environments. It has the potential for broader applications in other thermal-sensitive production processes, enhancing both product consistency and operational efficiency.

Keywords: Algorithm, Arduino, automation, temperature control, cottage cheese, sensor, thermocouple.

Introducción

Proceso de Elaboración

El requesón es el producto obtenido de la coagulación por temperatura de las proteínas del suero o de las caseínas no coaguladas en las fabricaciones de algún tipo de queso (Dr. Salvio Jiménez Pérez, s.f.).

La elaboración de requesón requiere un control preciso de la temperatura durante el proceso de calentamiento del suero de leche, en la mayoría de los lugares donde se elabora involucra que una persona manipule el suministro de calor para la correcta elaboración de este producto. Las temperaturas de este proceso se encuentran dentro del rango de 40°C hasta los 95°C temperatura a la cual las proteínas empiezan a coagularse y suben a la superficie. En este punto se interrumpe el calentamiento y la agitación, y se deja reposar la cuajada de 2 a 3 minutos para luego extraerla con una malla, luego se enfría y moldea (Quintanilla, 1998).

Según H.W. Modler El proceso consiste en varios pasos de calentamiento a 92°C, desnaturalización de proteínas de suero en un tubo de retención durante 10 minutos para inducir la coagulación, formación de cuajada, seguido de la separación de la cuajada del suero desproteinizado (Modler, 1988).

Este proyecto tiene como objetivo diseñar e implementar un controlador de temperatura que automatice este proceso, mejorando la consistencia y calidad del producto final, así como mantener el rendimiento del producto cuando se elabora de manera artesanal. El proyecto se desarrolló en varias etapas: selección y adquisición de componentes para medición de temperatura y suministro de calor, desarrollo de algoritmos de control, y pruebas experimentales.

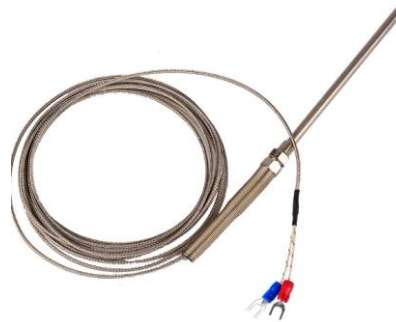
Selección de componentes

Medición de temperatura

La elaboración de requesón requiere un monitoreo meticuloso de la temperatura para garantizar la calidad del producto final. Para lograr este objetivo, la elección de componentes electrónicos adecuados es esencial, y en este caso, la selección de termopares tipo K se fundamenta en varias consideraciones cruciales, especialmente en el contexto de utilizar el microcontrolador Arduino y el módulo MAX6675 en conjunto con el termopar.

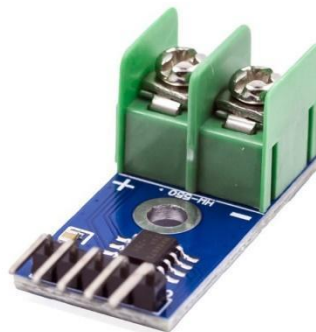
El termopar tipo K es un sensor de temperatura que opera de manera autónoma, sin necesidad de una fuente de alimentación externa. Esto se debe a su principio de funcionamiento basado en el efecto termoeléctrico, donde dos conductores de diferentes materiales, en este caso, cromel (una aleación de Ni-Cr) y alumel (una aleación de Ni-Al), generan una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre las uniones de los conductores. Así, el termopar tipo K que se muestra en la Figura 1 convierte directamente la temperatura en una señal eléctrica de 41 mV por cada grado centígrado detectado, eliminando la necesidad de un suministro de energía adicional.

Figura 1. Sonda termopar tipo K 100mm recuperado de (Torres, 2024).



En conjunto con el módulo MAX6675 que se muestra en la Figura 2 y un termopar, son característicos por ser indicadores de temperatura de un precio muy económico en el mercado y con un rango de exactitud bastante bueno.

Figura 2. Módulo MAX6675 recuperado de (ZJIA, s.f.)



1. Amplio rango de temperatura para la versatilidad del proceso: Los termopares tipo k ofrecen un rango de medición de temperatura amplio (0°C a 900°C) y adecuado para las diversas etapas de la elaboración de requesón el rango comprendido dentro del proceso de elaboración se encuentra de 35°C a 85°C-90°C, permitiendo una cobertura integral de temperaturas. Esta característica es fundamental al trabajar con el módulo MAX6675 y Arduino, ya que asegura mediciones precisas en todas las fases del proceso.
2. Compatibilidad y facilidad de integración con Arduino y MAX6675: La elección de termopares tipo k se alinea perfectamente con el uso del microcontrolador Arduino y el módulo MAX6675, facilitando la integración sin complicaciones. La comunicación eficiente entre estos componentes contribuirá a un monitoreo en tiempo real y a un control preciso de la temperatura durante la elaboración de requesón.
3. Higiene y durabilidad con sonda de acero inoxidable: La sonda del termopar, fabricada en acero inoxidable, no solo proporciona durabilidad y resistencia en entornos de producción alimentaria, sino que también asegura un nivel óptimo de higiene durante el proceso de elaboración de requesón. La facilidad de limpieza y la resistencia a la corrosión del acero inoxidable son cruciales en aplicaciones alimentarias.
4. Rapidez de respuesta para un control preciso: La velocidad de respuesta rápida de los termopares tipo k es especialmente valiosa al trabajar con el módulo MAX6675 y Arduino. Esta característica asegura que el sistema pueda ajustarse de manera oportuna ante los cambios de temperatura, manteniendo así un control preciso a lo largo de todo el proceso.
5. Economía del sensor: La elección del termopar tipo k se destaca por ser una opción económica y eficiente en términos de costos. Esto es particularmente relevante para proyectos con presupuestos ajustados, garantizando al mismo tiempo un rendimiento confiable y preciso.

En resumen, la elección de termopares tipo k se justifica no solo por su versatilidad, rapidez de respuesta y compatibilidad con el microcontrolador Arduino y el módulo MAX6675, sino también por su contribución a la higiene, durabilidad y economía del sensor, aspectos clave para el éxito del proyecto de controlador de temperatura para la elaboración de requesón.

Elección del método de suministro de calor

Para la elaboración de requesón dentro del proceso artesanal se manejan rangos comprendidos entre los 40°C hasta los 95°C por lo cual se requiere una forma de calefacción que tenga la capacidad de suministrar dichas temperaturas al suero. En el proceso artesanal se utilizan quemadores de alta presión de hierro fundido como el que se muestra en la Figura 3 los cuales tienen una entrada de aire regulable, así como una perilla para controlar la flama, este sistema está conectado con una manguera con forro metálico conectada directamente a un cilindro de gas lp (liquido a presión) se considera un método de suministro de calor no invasivo ya que nunca se está en contacto directo con el suero por lo cual implica que existan menos factores de contaminación en dicho proceso.

Figura 3. Quemador de alta presión de hierro fundido para gas lp recuperado de (Anónimo, Geek Factory, 2024)



Para el control de la válvula reguladora se implementa la adaptación de un servomotor en la misma, por lo cual se diseñan componentes para el correcto control de esta.

Para la alimentación del quemador de alta presión se utiliza una manguera como la que se muestra en la Figura 4 con forro metálico para que soporte las presiones del gas que fluye a través de esta.

Figura 4. Manguera para gas lp recubierta de metal recuperado de (Anónimo, Geek Factory, 2024)



Los cilindros de gas LP, como el mostrado en la Figura 5, son esenciales para la alimentación de nuestro sistema de calefacción de alta presión. Estos cilindros, comúnmente de 50 kg, están diseñados para soportar las presiones necesarias para el suministro continuo de gas LP al quemador el cual suministra calor a los contenedores del suero de la leche como se muestra en la Figura 6.

Figura 5. Cilindro de gas lp recuperado de (Anónimo, Mercado libre, 2024)



1) Descripción técnica del cilindro:

- Capacidad y Dimensiones: El cilindro tiene una capacidad de 50 kg de gas LP, con dimensiones estándar que permiten un manejo seguro y eficiente.
- Material: Fabricado en acero resistente, capaz de soportar altas presiones y condiciones ambientales adversas.
- Presión de Operación: Estos cilindros están diseñados para operar a presiones seguras especificadas por las normas industriales, con válvulas de seguridad para prevenir sobrepresión.

Figura 6. Demostración de sistema sin control o lazo abierto.



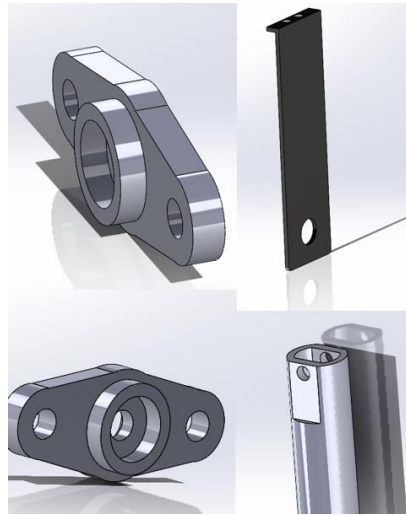
Para el control de la válvula reguladora del quemador de alta presión, se ha seleccionado un servomotor de 15 kg mostrado en la Figura 7. Este servomotor es capaz de proporcionar el par necesario para ajustar con precisión la válvula, asegurando un control óptimo del flujo de gas. La capacidad de 15 kg del servomotor garantiza que tenga suficiente fuerza para manejar las condiciones operativas del quemador, manteniendo una regulación constante y precisa de la temperatura durante el proceso de elaboración de requesón.

Figura 7. Servomotor de 15kg para regulación de flujo de gas.



Para fijar el servomotor a la válvula del quemador, se realizaron adaptaciones específicas. Las piezas necesarias para esta adaptación se diseñaron utilizando el software de modelado 3D SolidWorks y posteriormente se fabricaron en un taller de maquinado. El diseño incluye soportes y acoplamientos personalizados que permiten una conexión segura y estable entre el servomotor y la válvula. Como se muestra en la Figura 8.

Figura 8. *Diseño de piezas para fijar servomotor a válvula reguladora.*



Finalmente, la Figura 9 se muestra la válvula del quemador montada con las piezas maquinadas y el servomotor. Esta configuración asegura un control preciso del flujo de gas, necesario para mantener las temperaturas óptimas durante el proceso de elaboración de requesón.

Figura 9. *Sistema regulador de flujo de gas.*



Método

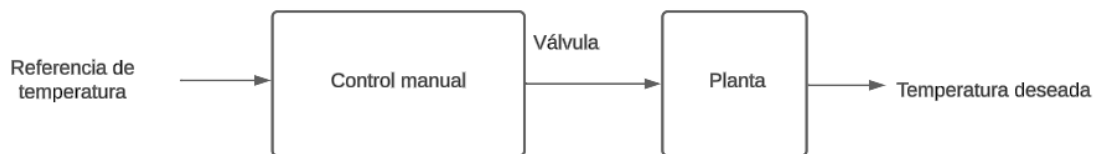
Para la obtención de la planta primeramente se desarrolla un algoritmo en Arduino que permite monitorear la temperatura en tiempo real durante el proceso. Este monitoreo es fundamental para garantizar que las temperaturas se mantengan dentro del rango óptimo (40°C a 95°C) necesario para la correcta elaboración del requesón.

Monitoreo y registro de temperaturas.

El algoritmo en Arduino fue programado para leer la temperatura del proceso artesanal utilizando el termopar tipo K en conjunto con el módulo MAX6675. Las lecturas de temperatura se registran continuamente y se almacenan en un transmisor de datos, el cual envía las mediciones a una hoja de cálculo en Excel. Este método permite graficar las temperaturas en relación con el tiempo del proceso, proporcionando una representación visual del perfil térmico durante la elaboración del requesón.

Para la obtención de nuestro setpoint, el sistema se realizó en lazo abierto. En este modo, el proceso de elaboración del requesón fue controlado manualmente, permitiendo observar y registrar cómo las variaciones en el flujo de gas afectaban la temperatura del suero. La configuración en lazo abierto mostrada en la Figura 10 es esencial para caracterizar el comportamiento del sistema sin la intervención de un controlador automático, proporcionando datos base para el desarrollo posterior de un sistema de control cerrado.

Figura 10. Diagrama de bloques del Sistema.



El diagrama de bloques del sistema en lazo abierto incluye los siguientes componentes:

1. Referencia de Temperatura: El valor deseado de temperatura que se quiere alcanzar.
 2. Control Manual: Realizado por un usuario que ajusta manualmente el flujo de gas.
 3. Válvula: El componente que regula el flujo de gas en función del ajuste manual.
 4. Planta: Representa el quemador y el sistema de calefacción del suero.
 5. Temperatura Deseada: La salida del sistema, que es la temperatura del suero
- A. Gráfica de temperatura

Una vez que se recopilaban los datos, se generó una gráfica mostrada en la Figura 11 que muestra la evolución de la temperatura a lo largo del tiempo. Esta gráfica se utiliza como el setpoint, estableciendo los límites de temperatura que van desde 40°C hasta 95°C.

Durante el experimento, el proceso de elaboración del requesón se llevó a cabo en lazo abierto, con una persona regulando manualmente el flujo de gas del quemador mediante la perilla de la válvula. Este control manual permitió observar cómo las variaciones en el flujo de gas afectaban

la temperatura del suero. El proceso completo duró aproximadamente 80 minutos, alcanzando el setpoint de 95°C.

La implementación de este sistema de monitoreo y control manual permitió obtener datos valiosos sobre el comportamiento térmico del proceso de elaboración del requesón. Estos datos sirven como base para el desarrollo de un control automático más preciso y eficiente, mejorando la consistencia y calidad del producto final.

Figura 11. Gráfica setpoint.

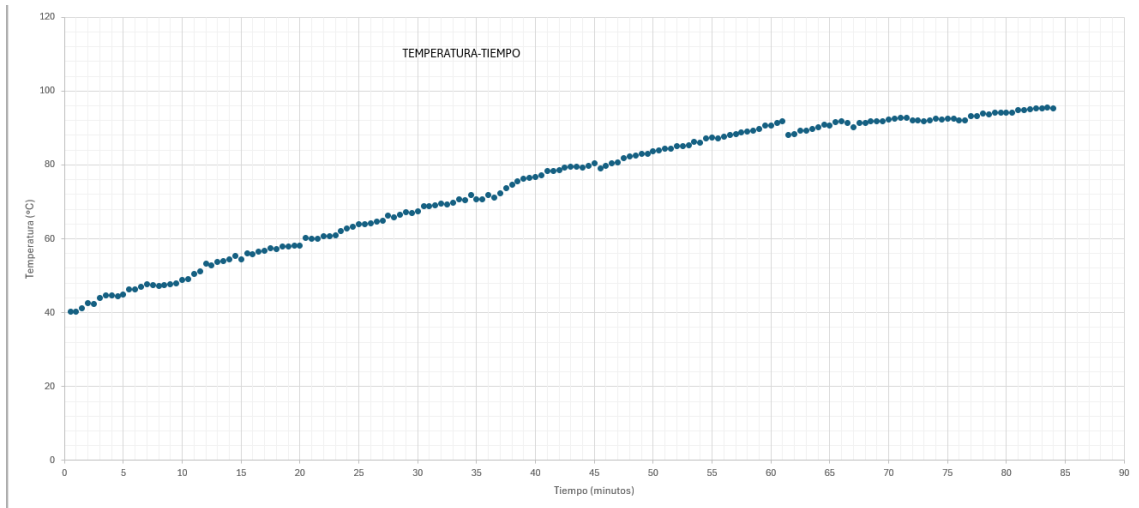


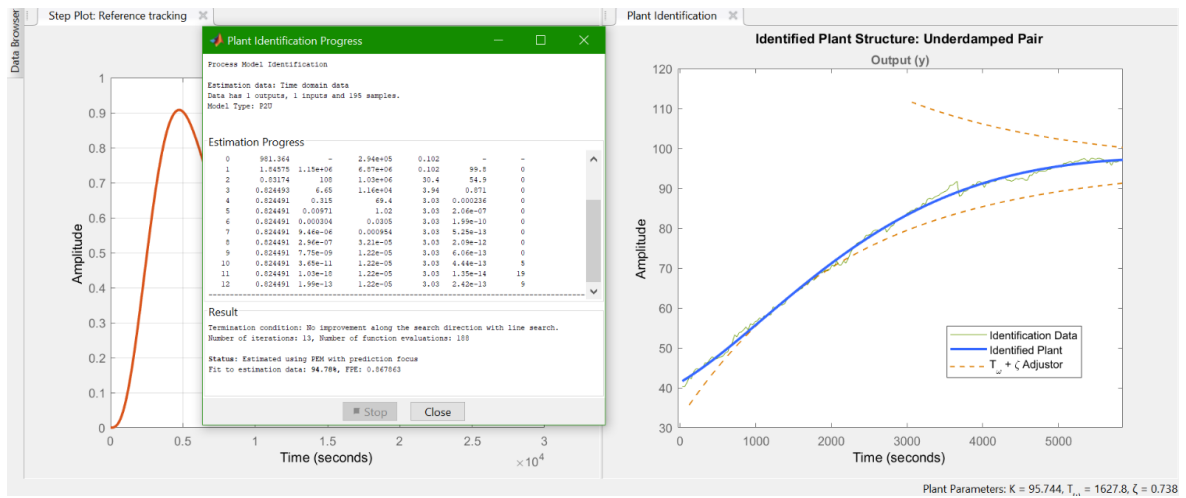
Ilustración 11

Modelado y análisis en Matlab

Utilizando la herramienta PIDTUNER en MATLAB, se analizó el comportamiento del sistema de calefacción basado en los datos obtenidos. El análisis reveló que el sistema puede ser modelado como una planta mostrada en la ecuación 1 de tipo subamortiguado. Se obtuvo un modelo de la planta como se puede observar en la Figura 12 con una precisión de estimación del 94.78%, definido por la siguiente función de transferencia:

$$G = \frac{95.744}{(1627.8s)^2 + 2(1627.8s)(0.738) + 1} \quad (1)$$

Figura 12. Obtención de planta mediante PIDTUNER



Diseño del controlador PID

Con la misma herramienta PID Tuner de MATLAB, diseñamos un controlador PID para automatizar el control de la temperatura. Esta herramienta nos proporcionó los valores de los parámetros del controlador, específicamente K_p , K_i , y K_d . Estos valores se utilizaron para configurar el controlador PID en el algoritmo de Arduino, permitiendo un control más preciso y automático del flujo de gas y, por ende, de la temperatura del suero.

$K_p=0.05618$, $K_i=3.66e-05$, $K_d=21.54$

Programación del controlador

La programación del controlador de temperatura se realizó utilizando la plataforma Arduino y diversas librerías específicas para el manejo del PID, el módulo de termopar MAX6675 y el servomotor. Las librerías utilizadas incluyen PID_v1.h para la implementación del controlador PID, max6675.h para la lectura de la temperatura a través del termopar, y servo.h para el control del servomotor que ajusta la válvula del quemador de alta presión.

1. Configuración y mapeo del servomotor

El mapeo para la apertura del servomotor se realizó considerando la experiencia de los artesanos. La apertura máxima de la válvula se fijó en un ángulo de 140 grados y el ángulo mínimo en 167 grados. Estos valores se determinaron visualmente mediante pruebas con el quemador encendido, observando que a 140 grados el quemador proporcionaba una buena potencia de llama, y a 167 grados producía una llama pequeña.

2. Funcionamiento del código

- Inclusión de Librerías: Se incluyen las librerías necesarias para el controlador PID, el módulo de termopar MAX6675 y el servomotor.
- Definiciones de Pines: Se definen los pines del Arduino conectados al módulo MAX6675.

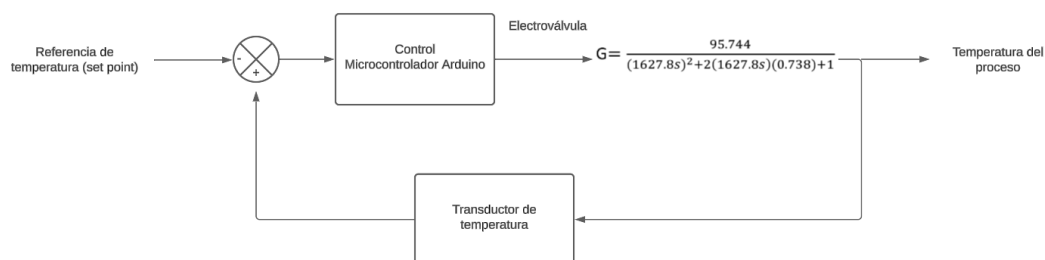
- Configuración del Controlador PID: Se definen las constantes del PID (kp, ki, kd) y se configura el setpoint a 95°C.
- Inicialización del PID y Servo: En la función setup(), se inicializa la comunicación serial, se configura el modo automático del PID, se adjunta el servo al pin especificado y se limitan los valores de salida del PID.
- Lectura y Control de Temperatura: En la función loop(), se lee la temperatura actual del termopar y se verifica su validez. La lectura se establece como entrada para el PID.
- Movimiento del Servo: El servo se mueve al ángulo calculado y se imprimen los datos de temperatura y ángulo en el puerto serial si ha pasado el intervalo de tiempo especificado.
- Cálculo y Mapeo del PID: Se calcula la salida del PID y se mapea esta salida al rango de ángulos del servo en función de la temperatura actual.
- Intervalo de Espera: Se introduce un retraso de 1 segundos antes de la siguiente iteración del loop.

Este código implementa el control de temperatura de manera automática utilizando un servomotor para ajustar la válvula del quemador, asegurando que la temperatura del suero se mantenga dentro del rango deseado para la elaboración del requesón.

Resultados

Con el controlador ya programado, procedimos a cerrar el lazo en nuestro sistema. El diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado mostrado en la Figura 13 incluye la referencia de temperatura o setpoint, un punto suma o comparador, el controlador programado con un microcontrolador Arduino, el cual controla la electroválvula fabricada anteriormente, seguido por nuestra planta, y finalmente la temperatura del proceso con una retroalimentación proporcionada por nuestro transductor de temperatura. A continuación, se muestra el diagrama de bloques de este sistema:

Figura 13. Diagrama de bloques lazo cerrado.

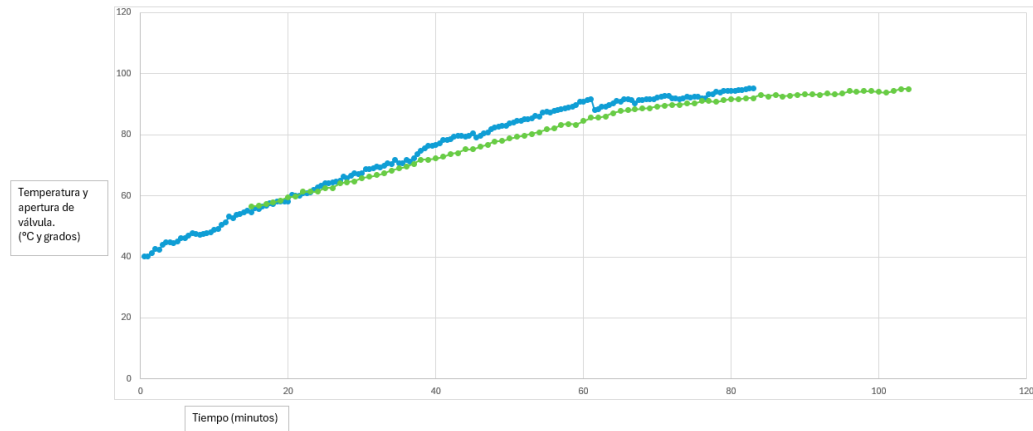


Se realizaron cuatro pruebas para evaluar el desempeño del controlador

Primera prueba: controlador por intervalos de temperatura

La primera prueba se llevó a cabo con un controlador que no utilizaba PID, sino que operaba solo por rangos de temperatura. Este controlador fue muy impreciso y tardó mucho en alcanzar la respuesta en estado estable. El setpoint de 95°C se alcanzó hasta los 105 minutos. Al comparar la gráfica obtenida con la del setpoint, se observó una gran discrepancia. A continuación, se presenta la comparación de estas dos gráficas mostradas en la Figura 14.

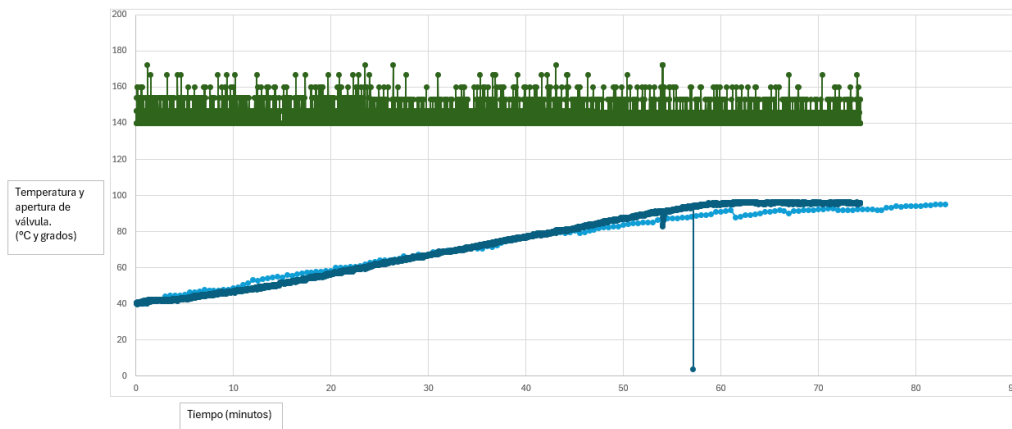
Figura 14. Gráfica de la primera prueba



Segunda prueba: Controlador PID con valores de Matlab

En la segunda prueba, el controlador se programó utilizando los valores PID proporcionados por Matlab. La respuesta que se muestra en la Figura 15 en estado transitorio fue muy similar a la del setpoint, pero en estado estable el controlador fue muy rápido, alcanzando el setpoint de 95°C en 72 minutos. Esto afectó negativamente el rendimiento de producción. A continuación, se muestra la gráfica comparando el setpoint con la obtenida en esta prueba, además de los grados de apertura del servo a lo largo del proceso:

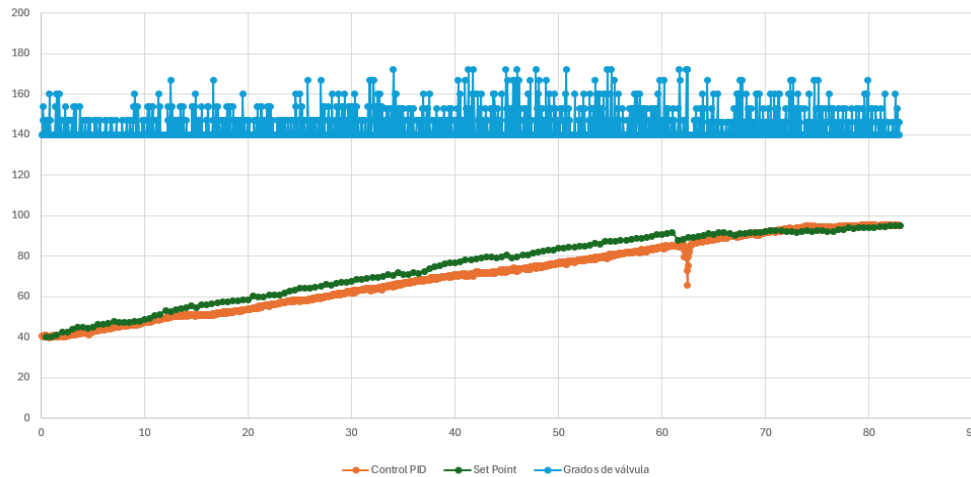
Figura 15. Gráfica segunda prueba.



Tercera prueba: Ajustes en el controlador PID

En la tercera prueba, se realizaron pequeños ajustes al controlador relacionados con los tiempos de apertura de la válvula, manteniendo los mismos valores PID. La respuesta transitoria fue muy cercana como se observa en la Figura 16 la del setpoint y la respuesta en estado estable fue exactamente igual al setpoint, alcanzando los 95°C en 80 minutos. La siguiente gráfica muestra la comparación y los grados de apertura del servo a lo largo del proceso:

Figura 16. Gráfica de tercera prueba.



Dado que la similitud con el setpoint fue muy alta, los datos de lectura de este controlador se exportaron a Matlab para introducirlos en PIDTuner y obtener la planta, calculando un porcentaje de error en estado estable mostrado en las ecuaciones 2,3 y 4 de 0.718%. Este valor es prácticamente cero, indicando que el controlador proporcionó un excelente rendimiento de producción.

$$G = \frac{138.16}{(497s+1)(376.49s+1)} \quad (2)$$

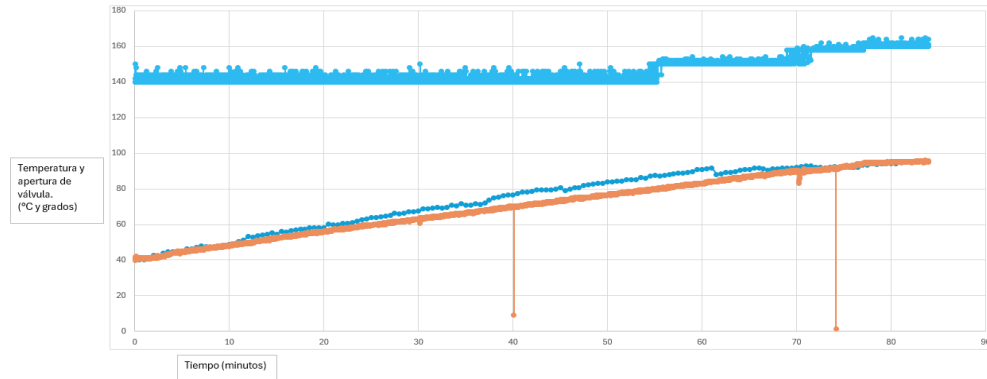
$$K_p = G(s)H(s) = \frac{138.16}{(0+1)+(0+1)} = 138.16 \quad (3)$$

$$e_{ss} = \frac{R_1}{1+K_p} = \frac{1}{1+138.16} = \frac{1}{139.16} = 0.0071859 \quad (4)$$

$$e_{ss} = (7.1859 \times 10^{-3})(100) = 0.718\% \quad (5)$$

Cuarta prueba: Controlador PID con rangos de temperatura establecidos

En la última prueba, se realizó una pequeña modificación para que el PID operara en rangos establecidos conforme se fuera acercando al setpoint. Este controlador mostró una respuesta tanto transitoria como en estado estable muy similar al setpoint. Además, los grados de apertura mostrados en la Figura 17 del servo disminuyeron conforme se acercaba al setpoint, como se puede ver en la siguiente gráfica:

Figura 17. Gráfica de última prueba.

Estos datos también se exportaron a Matlab para obtener la planta y calcular el porcentaje de error en estado estable, obteniendo un error de 0.774% calculado en las ecuaciones 6,7,8 y 9. Este resultado es aceptable para el proyecto y la finalidad del controlador, concluyendo que este fue el mejor controlador.

$$G = \frac{128.15}{(5035s+1)+(165.14s+1)} \quad (6)$$

$$[K_p = G(s)H(s) = \frac{128.15}{(0+1)+(0+1)} = 128.15] \quad (7)$$

$$[e_{ss} = \frac{R_1}{1+K_p} = \frac{1}{1+128.15} = \frac{1}{129.15} = 0.0077429] \quad (8)$$

$$[e_{ss} = (7.7429 \times 10^{-3})(100) = 0.774\%] \quad (9)$$

A lo largo de las pruebas, se determinó que el controlador PID con rangos establecidos fue el más efectivo, proporcionando una respuesta cercana al setpoint con un porcentaje de error en estado estable muy bajo. Esto sugiere que nuestro sistema de control es adecuado para mantener la temperatura requerida en el proceso artesanal de elaboración de requesón, optimizando el rendimiento de producción y garantizando la calidad del producto final.

Discusión

En este proyecto, se desarrolló y evaluó un sistema de control de temperatura para el proceso artesanal de elaboración de requesón, utilizando un controlador PID implementado en un microcontrolador Arduino. El proceso comenzó con la obtención del setpoint a través de un sistema en lazo abierto, seguido por la implementación de diferentes estrategias de control.

Las pruebas iniciales con un controlador por rangos demostraron ser ineficaces debido a la gran demora en alcanzar la temperatura deseada. La transición a un controlador PID, con valores obtenidos de Matlab, mejoró significativamente la respuesta, aunque presentó una estabilidad óptima. Posteriormente, ajustes específicos al controlador PID resultaron en un rendimiento que prácticamente replicaba el setpoint, evidenciando una excelente precisión y estabilidad con un error en estado estable muy bajo.

La implementación final, que involucró la modulación del PID en rangos establecidos conforme se acercaba al setpoint, logró la mejor performance. Este enfoque no solo mejoró la respuesta transitoria y la estabilidad, sino que también optimizó el tiempo de proceso y redujo la fluctuación en la apertura del servo, lo que se tradujo en una eficiencia energética y un control más preciso.

El éxito de este proyecto radica en la integración efectiva de herramientas de diseño y simulación (como Matlab y PIDTuner) con la programación y control en tiempo real mediante Arduino. Este sistema no solo es aplicable al proceso específico de elaboración de requesón, sino que también puede ser adaptado a otros procesos industriales que requieran un control preciso de temperatura.

En resumen, este proyecto demuestra que la combinación de técnicas modernas de control y herramientas de simulación puede mejorar significativamente los procesos artesanales, haciendo posible la optimización de la calidad del producto y la eficiencia del proceso. Los resultados obtenidos son prometedores y abren la puerta a futuras mejoras y aplicaciones en diferentes campos de la industria alimentaria y más allá.

Referencias

- Anónimo. (12 de 02 de 2024). eiccontrols. <https://eiccontrols.com/es/inicio/313-termopar-tipo-k-de-30cm-de-largo-y-rango-0c-hasta-900c.html>
- Anónimo. (06 de 02 de 2024). ElectroCrea. <https://electrocrea.com/products/termopar-tipo-k-con-modulo-max6675>
- Anónimo. (06 de 02 de 2024). Geek Factory. <https://www.geekfactory.mx/tienda/modulos/max6675-modulo-interfaz-para-termopar-tipo-k/>
- Anónimo. (12 de 02 de 2024). Hagalo.mx. <https://hagalo.mx/mangueras-para-gas/26818-manguera-para-gas-coflex-3-8-x-5m-no-vg-b500.html>
- Anónimo. (12 de 02 de 2024). Homedepot. <https://www.homedepot.com.mx/plomeria/tuberias-y-conexiones/valvulas-y-llaves/llave-control-gas-1-2-900748>
- Anónimo. (12 de 02 de 2024). Mercado libre. https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-936097597-servomotor-mg995-15k-arduino-x-2-piezas-_JM
- Anónimo. (12 de 02 de 2024). Mercado libre. <https://listado.mercadolibre.com.mx/cilindro-de-gas-50-kg>
- Dr. Salvio Jiménez Pérez, D. P. (s.f.). <https://www.imc-sa.es/>. (Instituto Tomás Pascual para la nutrición y salud) Retrieved 01 de 06 de 2024, from https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/37364945/Curso_Leche_RACVE_3-libre.pdf?1429564270=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DCoordinador_Dr_Salvio_Jimenez_Perez_Acad.pdf&Expires=1717446372&Signature=EG1GpyYsLlpRVwjtdirD0yaNTfLH9hsGcvefoPp8pU
- Modler, H. (1988). Desarrollo de un Proceso Continuo para la Producción de Queso Ricotta . Revista de ciencia láctea, 71(8), 2003-2009.
- Quintanilla, C. M. (12 de Diciembre de 1998). Biblioteca Digital de la Universidad Zamorano. Retrieved 01 de 06 de 2024, from <https://bdigital.zamorano.edu/bitstreams/c71dd2f3-1770-44be-881d-431a988558e8/download>
- Torres, D. H. (06 de 02 de 2024). HeTPro-Tutoriales. <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/termopar-tipo-k-max6675-alarma/>
- ZJIA. (s.f.). AMAZON. Retrieved 01 de 06 de 2024, from <https://www.amazon.com.mx/K-Type-Termopar-Sensor-temperatura-sonda/dp/B00OLIOTHM>