

Área de Conocimiento de Tecnología de la
Información y Comunicación

“Diseño de control electrónico con el objetivo de rehabilitar el proceso de esterilización de la autoclave RAYPA modelo AH-21DRY ubicado en el SILAIS Managua”

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Electrónico

Elaborado por:

Br. Luis Benjamín
Medrano Miranda
Carnet: 2018-0239U

Br. Heidi Paola
Bolaños García
Carnet: 2015-0038U

Tutor:

MSc. Juan Miguel
Mairena

RESUMEN DEL TEMA

El presente trabajo monográfico tiene como finalidad el diseño e implementación de un sistema de control electrónico para rehabilitar el proceso de esterilización de la autoclave RAYPA ubicada en el SILAIS Managua. La autoclave presenta fallas en su módulo de control, por lo cual se propone un sistema alternativo basado en un microcontrolador PIC y un controlador PID que garantiza una regulación térmica precisa, segura y eficiente. El estudio incluye la recopilación de especificaciones técnicas, modelado matemático del proceso térmico, implementación del algoritmo PID en lenguaje C y simulación en Proteus. Los resultados demuestran que el sistema propuesto permite mantener la temperatura requerida para la esterilización en rangos óptimos (100 °C - 134 °C) con bajo margen de error, reduciendo la necesidad de repuestos costosos e inyectando nuevas oportunidades en el campo de la biomedicina. Este proyecto evidencia el potencial del control automático aplicado a equipos médicos discontinuados, fomentando una sinergia entre la ingeniería electrónica y el sector salud.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi guía y fortaleza.

A mi madre, mis hermanos, y amigos, quienes nunca me dejaron rendirme y me acompañaron con amor en cada paso de este camino

— ***Heidi Paola Bolaños García***

Agradecimientos

Agradezco a mi universidad y a mis docentes por sus enseñanzas y apoyo en la realización de este proyecto.

A mi compañero de monografía, por compartir el esfuerzo y la dedicación hasta el final.

Y, sobre todo, a mi familia, por su amor y respaldo incondicional.

— ***Heidi Paola Bolaños García***

Agradecimientos

Agradezco a Dios por darme la oportunidad de poder cumplir esta nueva etapa de mi vida, por que se que el todo me lo da y el todo me lo puede quitar. A mi madre Tatiana Miranda por prepararme ante los escenarios de la vida, a mi padre Alberto Medrano por ser un buen ejemplo a seguir, a la Msc. Dora Ines por ser la pionera en este hermoso mundo de la biomedicina o Ingeniería biomédica, por confiar en nuestros ideales, a mi amada Jessenia Ordoñez por ser luz en medio de mis tinieblas, por cuidarme y atesorarme, por creer en aquello que no era capaz de ver y por amarme a pesar de todos mis defectos. Sera un placer poder estar hasta mi ultimo aliento a tu lado.

— ***Luis Benjamín Medrano Miranda***

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. ANTECEDENTES	2
III. JUSTIFICACIÓN	4
IV. OBJETIVOS	5
V. MARCO TEÓRICO	6
5.1 AUTOCLAVE.....	6
5.2 AUTOCLAVE SERIE AHS-DRY.....	6
5.3 CICLO DE ESTERILIZACIÓN ESTÁNDAR	6
5.4 TIPOS DE CONTROLADORES.....	11
5.4.1 CONTROL ON/OFF	11
5.4.2. <i>Control PID</i>	12
5.4.3 <i>Control difuso</i>	13
5.5 MEDICIÓN DE TEMPERATURA	14
5.5.1 <i>Termopar</i>	15
5.6 CONTROL DE POTENCIA	17
VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS	18
6.1 DISEÑO METODOLÓGICO.....	18
6.2 PROCESO DE ELABORACIÓN	18
6.2.1 <i>Evaluación de los requerimientos de funcionamiento de la autoclave RAYPA</i>	18
6.2.2 <i>Diseño de controlador PID basado en microcontrolador</i>	19
6.2.3 <i>Desarrollo del algoritmo de programación y configuración</i>	19
6.3 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	20
6.3.1 <i>Diagrama del sistema</i>	21
6.3.2 <i>Sistema de control</i>	22
6.4 MICROCONTROLADOR PIC.....	23
6.4.1 <i>Criterio de selección para el microcontrolador PIC</i>	24
6.4.2 <i>Criterio de selección para entorno de programación</i>	27
6.4.3 <i>Control PID</i>	29
6.4.4 <i>Modelo matemático:</i>	30
6.4.5 <i>CONFIGURACIÓN DEL ELEMENTO CALEFACTOR:</i>	31
6.4.6 <i>Identificación del proceso:</i>	33
6.4.7 <i>Control PI por asignación de 2 polos reales</i>	35
6.4.8 <i>Controlador PID discreto con PIC</i>	37
6.4.9 <i>Control de temperatura PID con microcontrolador PIC:</i>	38
6.4.10 <i>Configuración de la TERMOPAR tipo K</i>	39
6.11 <i>Esquemático:</i>	48
7. ANÁLISIS DE COSTO	55
VII. CONCLUSIONES	57
VIII. RECOMENDACIONES.....	58
IX. BIBLIOGRAFÍA	59

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA	8
FIGURA 2. PLC SIEMENS.....	9
FIGURA 3. ARDUINO UNO.....	10
FIGURA 4. MICROCONTROLADOR PIC.....	11
FIGURA 5. CONTROLADOR ON-OFF.....	12
FIGURA 6. CONTROLADOR PID	13
FIGURA 7. CONTROL DIFUSO	14
FIGURA 8. TERMOPAR TIPO K.....	16
FIGURA 9. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL.....	21
FIGURA 10. MICROCONTROLADOR PIC.....	24
FIGURA 11. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PIC18F4550.....	26
FIGURA 12. ENTORNO DE PROGRAMACIÓN CCS C COMPILER	28
FIGURA 13. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA DE CONTROL.....	29
FIGURA 14. CONFIGURACIÓN BÁSICA DE CONTROLADOR PID EN PIC.....	31
FIGURA 15. CONFIGURACIÓN DEL ELEMENTO CALEFACTOR	32
FIGURA 16. IDENTIFICACIÓN OFF-LINE.....	33
FIGURA 17. ESTABILIDAD DEL SISTEMA A LOS 4TAO	34
FIGURA 18. ETAPA DE POTENCIA	39
FIGURA 19. SEÑALES REQUERIDAS PARA LA COMUNICACIÓN SPI.....	39
FIGURA 20. BIT DE CONFIGURACIÓN.....	40
FIGURA 21. ETAPA DE TERMOPAR	40
FIGURA 22. CALIBRACIÓN DEL TERMOPAR.....	41
FIGURA 23. FUENTE DE ALIMENTACIÓN.	42
FIGURA 24. VÁLVULA DE SEGURIDAD.....	42
FIGURA 25. ELECTROVÁLVULA DC.....	44
FIGURA 26. ELECTROVÁLVULA AC	44
FIGURA 27. TERMOSTATO COTHERM.....	46
FIGURA 28. SIMULACIÓN EN PROTEUS DEL CONTROLADOR PID CON MICROCONTROLADOR PIC18F4550.....	48
FIGURA 29. PICKIT 3.....	49
FIGURA 30 PRUEBA EN LA ETAPA DE CONTROL Y LCD.....	50
FIGURA 31. PWM 1KHZ.....	50
FIGURA 32 PRUEBA DEL TERMOPAR Y ELEMENTO CALEFACTOR.	51
FIGURA 33. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROGRAMA	52

FIGURA 34. DISEÑO DE PCB	53
FIGURA 35. PROTOTIPO TERMINADO	54
FIGURA A.2. ESQUEMÁTICO	54

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	7
TABLA 2. FICHA TÉCNICA.....	20
TABLA 3. CUADRO COMPARATIVO	45
TABLA 4 LISTA DE COMPONENTES	51
TABLA 5 LISTA DE MATERIALES	55

I. INTRODUCCIÓN

Este documento tiene como objetivo principal resolver una problemática en el SILAIS Managua, específicamente mejorar la eficiencia del proceso de esterilización mediante la rehabilitación de la autoclave RAYPA.

Las autoclaves son equipos fundamentales en el área de la salud, ya que se encargan de realizar el proceso de esterilización de los distintos instrumentos en cada área médica. La esterilización es un método para eliminar bacterias y otros microorganismos presentes en materiales y productos médicos, los cuales pueden ser perjudiciales para la salud de las personas.

Cabe mencionar que la autoclave RAYPA presenta daños en el módulo principal de la tarjeta PCB. Por ello, se realizará un estudio de los componentes del equipo, con el fin de valorar el tipo de tecnología a utilizar, estructurar un diagrama de bloques, entre otras acciones. Esto nos invita a incursionar en el mundo de la biomedicina y conocer sus ramas técnicas, como la electromedicina, sus métodos y estudios.

Este proyecto representa una oportunidad para la innovación, ya que aplica conceptos y técnicas de control automatizado. La implementación de un sistema de control automatizado puede optimizar el proceso de esterilización, reducir la intervención humana, minimizar los errores y mejorar la seguridad, lo que, a su vez, puede tener un impacto positivo en la calidad de los servicios de salud.

II. ANTECEDENTES

En Nicaragua, existe una creciente preocupación respecto a la atención que brinda el sistema de salud a la población en los hospitales públicos, siendo uno de los principales problemas la esterilización de los instrumentos médicos, lo que ha generado graves consecuencias. Esta situación ha provocado una serie de infecciones que ponen en peligro la vida de los pacientes.

Sin embargo, la adquisición y el mantenimiento de autoclaves comerciales resultan costosos y requieren grandes inversiones, lo que dificulta su acceso por parte de los hospitales públicos del país. Como resultado, muchas instituciones no cuentan con el equipo de esterilización necesario, lo que agrava aún más la situación.

A continuación, se presentan algunos trabajos monográficos encontrados a nivel nacional e internacional:

A nivel nacional, se destaca el documento monográfico titulado “Implementación de un sistema electrónico de control para el horno de convección por gravedad del laboratorio de ingeniería ambiental, FIQ-UNI” (Julio Bermúdez, 2022). Este trabajo plantea el diseño e implementación de un sistema electrónico de control para la rehabilitación del horno Thelco Precisión 130 del laboratorio de ingeniería ambiental de la FIQ-UNI. Este equipo realiza el proceso de esterilización mediante calor seco, lo cual implica alcanzar una mayor temperatura y un mayor tiempo de exposición.

A nivel internacional, se encuentra el documento titulado “Diseño de un control electrónico de una autoclave a vapor” (Figuroa Rodríguez, 2014). Este trabajo tiene como objetivo diseñar un control electrónico para los ciclos de esterilización que sustituya funcionalmente a un sistema mecánico en una autoclave de vapor modelo KRBF-2038-VE.

También, a nivel internacional, se encuentra el documento titulado “Diseño implementación de un sistema de control automático de un esterilizador de instrumentos médicos a vapor para la empresa H.W. KESSEL S.A.C” (Huamán Chávez, 2019)

Este trabajo aborda el diseño e implementación de un sistema de control automático para un esterilizador de instrumentos médicos a vapor, con la finalidad de garantizar la calidad y seguridad de los procesos de esterilización en dicha empresa.

III. JUSTIFICACIÓN

La esterilización es un proceso vital en cualquier hospital, ya que previene la propagación de infecciones y enfermedades entre pacientes y personal médico. Sin embargo, muchos hospitales públicos de Nicaragua no tienen acceso a equipos de esterilización modernos y eficientes debido a su alto costo. Como resultado, estos hospitales se ven obligados a recurrir a métodos menos eficaces, como la ebullición del agua o el uso de productos químicos, lo que incrementa el riesgo de infecciones y enfermedades.

Existen varios factores que agravan esta situación. Uno de los principales es la reducción del presupuesto público asignado al sector salud. En 2005, este presupuesto era inferior a 40 dólares per cápita, lo que representaba menos del 2 % del PIB, según la CEPAL (Panorama de América Latina, 2005). En la actualidad, el presupuesto ha aumentado a 109 dólares per cápita, representando el 5,4 % del PIB, de acuerdo con la CEPAL (Panorama de América Latina, edición 2022). Este incremento constituye un indicador positivo para el sector salud.

Este proyecto se desarrolla en el SILAIS Managua. La autoclave RAYPA fue donado por el MINSA y posteriormente dado de baja por el SILAIS debido a un daño en su tarjeta principal. Este equipo, al ser fundamental, amerita su reinserción inmediata. La causa de su baja, al igual que la de muchos otros equipos, radica en que el repuesto necesario es extremadamente costoso o no se encuentra disponible en el mercado nacional.

La rehabilitación de esta autoclave es crucial, ya que contribuiría a reducir los costos generales de operación. Además, representa una oportunidad para aplicar los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera de Ingeniería Electrónica. Al mismo tiempo, se fomentaría una conexión entre dos sectores: el académico y el de la salud, abriendo nuevas perspectivas en áreas como la biomedicina, la electromedicina o la ingeniería biomédica.

IV. OBJETIVOS

Objetivo general:

- Implementar un sistema de control electrónico con el objetivo de la rehabilitación del proceso de esterilización de la autoclave RAYPA ubicado en el SILAIS Managua.

Objetivos específicos:

1. Evaluar los requerimientos de funcionamiento de la autoclave RAYPA.
2. Diseñar un controlador PID basado en microcontroladores que garantice el proceso de esterilización de forma estable, segura y eficiente.
3. Desarrollar el algoritmo de programación y configuración del sistema de control electrónico para la autoclave RAYPA.

V.MARCO TEÓRICO

5.1 Autoclave

Una autoclave es un equipo que realiza el proceso de esterilización usando vapor de agua a altas presión y temperatura. Proporcionan una solución para las múltiples necesidades de esterilización de un laboratorio general, incluyendo vidrio, plásticos, utensilios metálicos, bolsas de residuos de laboratorio, cargas envueltas y no envueltas, pequeños objetos porosos y huecos, líquidos, medios de cultivo y otros artículos de laboratorio. (RAYPA.COM, 2024)

5.2 Autoclave serie AHS-DRY

Las autoclaves de la serie AHS DRY son autoclaves robustas con un excelente rendimiento para procedimientos de esterilización de líquidos y sólidos. La carga debe colocarse en las bandejas o cesto de la cámara y, tras llenar manualmente el tanque de agua independiente con agua purificada, el equipo comienza a crear el prevacío inicial, suministra automáticamente agua a la cámara de esterilización, se calienta y realiza purgas hasta alcanzar la combinación preprogramada de tiempo y temperatura de esterilización. (RAYPA.COM, 2024)

5.3 Ciclo de esterilización estándar

Pre-vacío: En este paso inicial, la bomba de vacío del equipo remueve mecánicamente el aire de la cámara y de la carga mediante un solo pulso de vacío de -0,75 Bares. Esto permite que el vapor pueda penetrar en los objetos de la carga de geometrías complejas que de otro modo no podrían alcanzarse con un simple desplazamiento del aire por gravedad. Posteriormente, el tanque de agua independiente comienza a suministrar agua a la cámara de esterilización y la camisa calefactora se enciende, precalentando la carga. (RAYPA.COM, 2024)

Calentamiento: Tras completar la fase de prevacío y una vez que el fondo de la cámara de esterilización se ha llenado de agua, las potentes resistencias eléctricas montadas en el fondo de la cámara de esterilización se calientan drásticamente, transfiriendo energía al agua para producir vapor saturado en toda la cámara. (RAYPA.COM, 2024)

Esterilización: Al alcanzar la temperatura de esterilización preprogramada dentro de la cámara, comienza la fase de esterilización, manteniendo con precisión la temperatura durante toda la duración de esta fase. (RAYPA.COM, 2024)

Este paso fundamental es controlado por una sonda de temperatura PT-100 Clase A ubicada dentro de la cámara. Como opción para procesos de esterilización de líquidos, esta fase puede ser regulada por una sonda de temperatura flexible PT-100 Clase A situada en el interior de una muestra (RAYPA.COM, 2024)

Secado al vacío: Una vez finalizada la fase de esterilización, solo para los programas de sólidos, se inicia el secado al vacío, en el que se producen múltiples pulsos de vacío mientras la camisa calefactora está encendida, secando completamente la carga y devolviendo automáticamente el agua al tanque de agua independiente. (RAYPA.COM, 2024)

Enfriamiento: Una vez completada la fase de secado al vacío comienza el enfriamiento natural y sonará un pitido acústico cuando se alcance una temperatura de seguridad que permita abrir la cámara. En los programas de líquidos con el modo Agar activo, el equipo mantendrá indefinidamente la temperatura preprogramada, seleccionable entre 40 y 80°C. (RAYPA.COM, 2024)

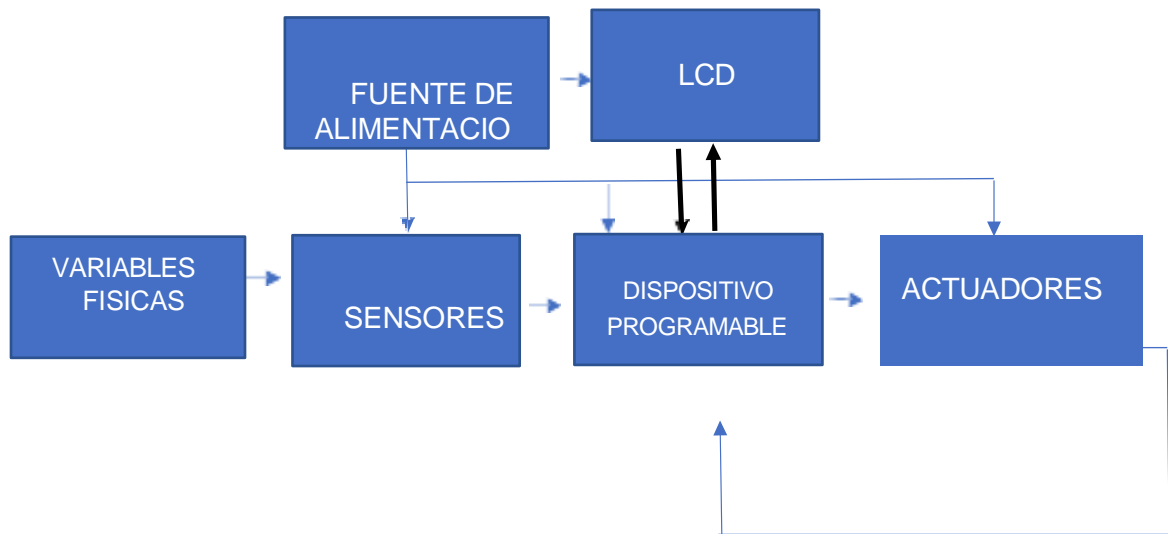
TABLA 1 DE CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

CARACTERÍSTICAS	
Equipo	Autoclave de esterilización a vapor
Temperatura de esterilización	100-134 Grados Celsius
Presión máxima	2,1 bar
Potencia	1200-2000 watts
Tensión eléctrica	230V (115 V opcional)
Frecuencia de red	50/60 Hz

Fuente: Manual RAYPA autoclave de sobremesa

Diagrama funcional del sistema

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema



Fuente: Elaboración propia

Dispositivos programables:

PLC:

Un autómatas programable o PLC (Programmable Logic Controller) es un sistema de control industrial diseñado para automatizar procesos, máquinas o líneas de producción. (Cursoaula21.com, 2024)

Funciona de forma continua: recibe señales de entrada (como sensores), procesa la información con un programa previamente cargado y, según la lógica definida, activa las salidas necesarias (como motores, válvulas o actuadores). Los PLC permiten automatizar desde tareas simples hasta sistemas industriales complejos, lo que mejora la eficiencia, reduce errores humanos y optimiza el mantenimiento. (Cursoaula21.com, 2024)

Uno de sus mayores beneficios es la flexibilidad. A diferencia de los antiguos sistemas de relés, los PLC permiten modificar el funcionamiento de un proceso simplemente

reprogramando el equipo, sin necesidad de cambiar el cableado físico. Además, pueden recopilar, analizar y compartir datos en tiempo real, lo que resulta clave en entornos industriales conectados. (Cursoaula21.com, 2024).

Figura 2. Plc siemens



Fuente: SIEMENS.COM, 2024

Tarjeta de desarrollo:

Una tarjeta de desarrollo es una herramienta que permite a un usuario la realización de diseño de prototipos tecnológicos, cuentan con una unidad principal de procesamiento de información, así como la integración, dentro del mismo dispositivo, de los elementos necesario para realizar diferentes y variados proyectos de desarrollo y de investigación. (virtual.cuautitlan.unam.mx, 2024)

Dentro de los componentes principales con los que estas placas cuentan están la memoria, el bus de comunicación, puertos de entrada y salida como unidades USB, Ethernet, pines de entrada y salida de propósito general (los cuales pueden ser

digitales o analógicos), en algunos casos cuentan con comunicación vía Wi-Fi, y en casos más particulares cuentan con características especiales para la facilitación de su integración en sistemas IoT e Industria 4.0. (virtual.cuautitlan.unam.mx, 2024)

Figura 3. Arduino uno



Fuente: Arduino.com, 2024

Microcontrolador:

Una unidad de microcontrolador (MCU) es esencialmente una computadora pequeña en un solo chip. Está diseñado para administrar tareas específicas dentro de un sistema integrado sin requerir un sistema operativo complejo. (IMB.COM, 2024)

Estos circuitos integrados compactos (IC) contienen un núcleo de procesador (o núcleos), memoria de acceso aleatorio (RAM) y memoria de solo lectura programable borrable eléctricamente (EEPROM) para almacenar los programas personalizados que se ejecutan en el microcontrolador, incluso cuando la unidad está desconectada de una fuente de alimentación. (IMB.COM, 2024)

A diferencia de los microprocesadores de uso general, los microcontroladores integran periféricos de procesamiento, memoria y entrada/salida (E/S), incluidos temporizadores, contadores y convertidores de analógico a digital (ADC), en una

unidad independiente eficiente y rentable. Al integrar varios componentes en un solo sistema, los microcontroladores son adecuados para aplicaciones que necesitan procesamiento de señales en tiempo real, como controlar motores y servos e interactuar con diferentes tipos de sensores y comunicaciones. (IMB.COM, 2024)

Figura 4. Microcontrolador pic



Fuente: Microchip.com, 2024

5.4 Tipos de controladores

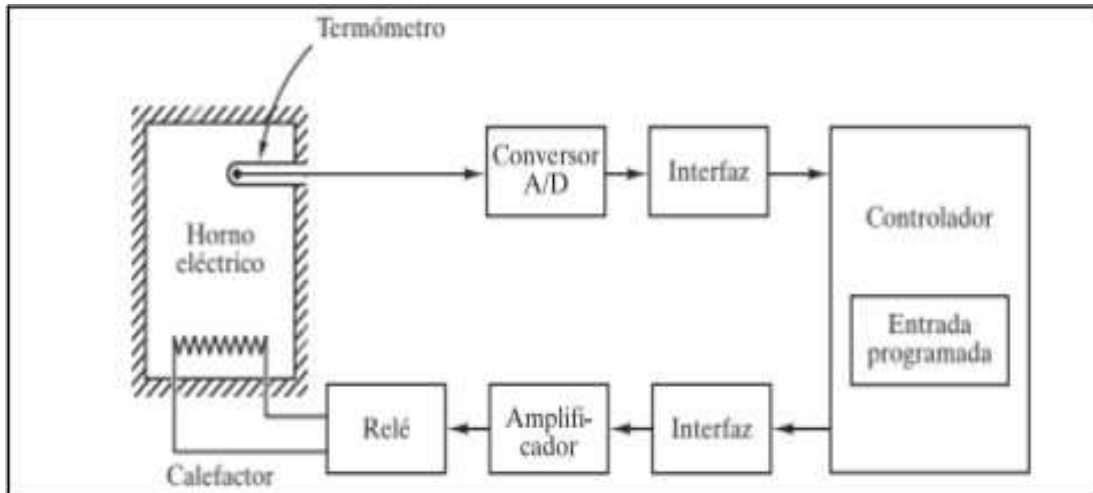
5.4.1 Control ON/OFF

Un método de control de fácil aplicación, comúnmente conocido también como “todo o nada”, empleado en sistemas realimentados, el elemento final de control solo puede tomar dos posiciones, cuando la variable de control presenta una variación envía una señal para que el actuador tome una de las dos posibles posiciones.

A pesar que este método presente ventajas debido a su facilidad de uso, bajo costo, no nos brinda un valor exacto en la variable controlada, ya que presenta una variación

continua en la variable de control (Ogata, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, 2010)

Figura 5. Controlador on-off



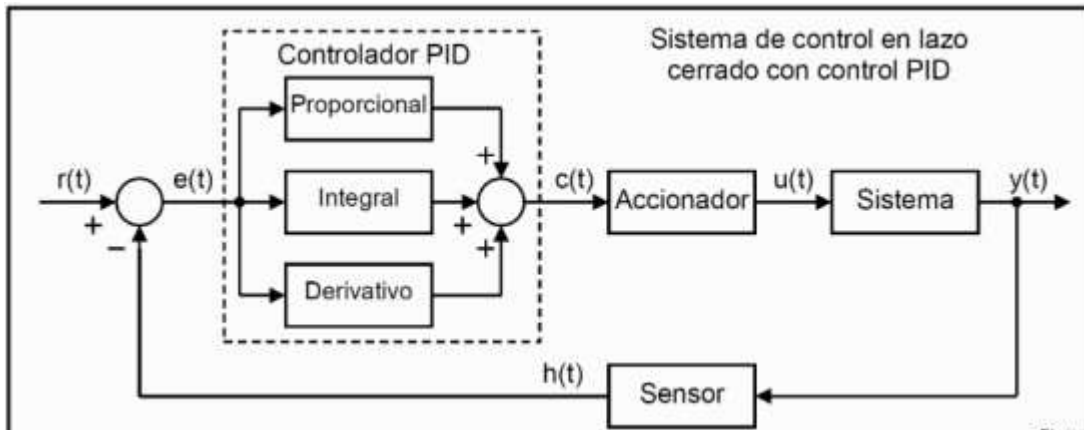
Fuente: (Ingeniería de Control Moderna, 2010)

5.4.2. Control PID

Es un método de control altamente efectivo y ampliamente utilizado a nivel industrial, este mecanismo de control simultaneo por realimentación controla un sistema de lazo cerrado ajustando su salida, tomando en cuenta la desviación o error entre un valor medido y un valor deseado, para que la variable de control alcance el valor deseado.

La ecuación 1.4 representa el controlador PID, como se puede ver en la figura x, el controlador está compuesto de tres elementos que proporcionan una acción proporcional K_p (error actual), una acción integral K_i (error pasado) y acción derivativa K_d (estimación de error futuro) (Ogata, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, 2010).

Figura 6. Controlador PID



Fuente: (Ingeniería de Control Moderna, 2010)

Ecuación de control PID:

$$c(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1)$$

Para:

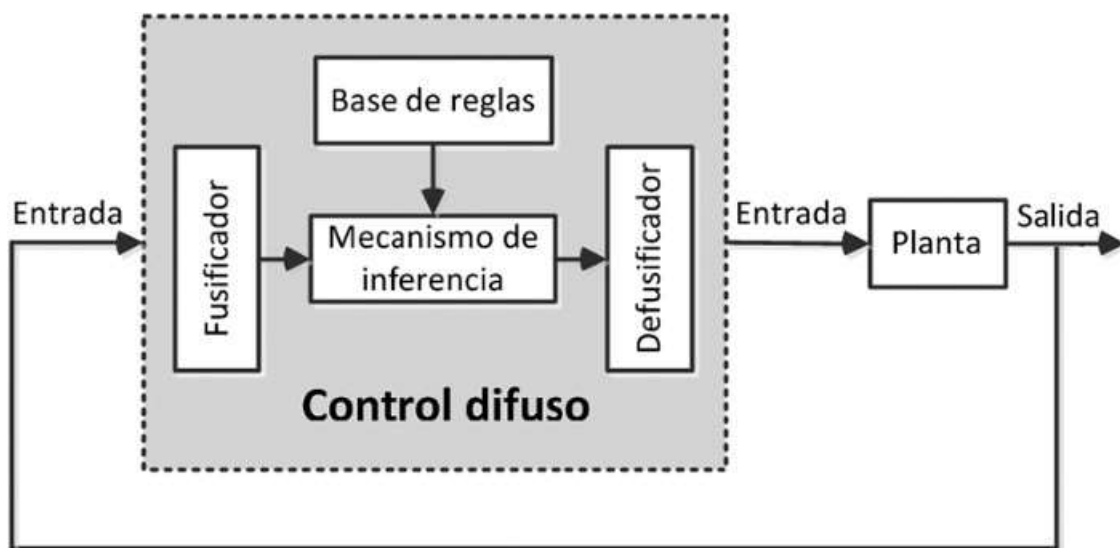
- $c(t)$ = señal de control
- $e(t)$ = señal de error
- K_p, K_i, K_d = parámetros del controlador PID

5.4.3 Control difuso

El control difuso es una técnica utilizada principalmente en los sistemas de control automático, donde se manejan variables lingüísticas en lugar de las ecuaciones matemáticas tradicionales para tratar situaciones complejas con información imprecisa o incierta.

Esta técnica se basa en lógica difusa, una extensión de la lógica booleana, que permite manejar valores intermedios entre verdadero y falso, lo que la hace ideal para aplicaciones como el control de temperatura y la gestión de tráfico. Optimizar un sistema con control difuso puede proporcionar una respuesta más flexible y precisa en comparación con los métodos de control clásicos, adaptándose mejor a las variaciones del entorno. (studysmarter.es, 2024)

Figura 7. Control difuso.



Fuente: researchgate.net, 2024

5.5 Medición de temperatura

En los sistemas de esterilización por vapor, como en una autoclave, la temperatura es una variable crítica para garantizar la eficacia del proceso. Una medición precisa y confiable es esencial para asegurar que las condiciones internas alcancen y mantengan los niveles requeridos para la destrucción de microorganismos.

La autoclave emplea sensores de temperatura integrados, generalmente termopares tipo K o sensores PT100, ubicados estratégicamente dentro de la cámara para monitorear el ciclo térmico en tiempo real.

Estos sensores alimentan un sistema de control automatizado que ajusta el calentamiento y activa alarmas en caso de desviaciones.

Durante el proceso investigativo, se revisaron manuales técnicos de otros equipos equivalentes, lo que permitió identificar distintos enfoques en la gestión térmica: desde controladores básicos hasta sistemas PID con regulación precisa y registro digital.

También se validó, mediante consultas al personal de la central de equipo, que en la mayoría de las aplicaciones del equipo se trabaja a temperaturas cercanas a 100 °C-134°C, por lo que la estabilidad térmica y la repetibilidad del sistema de medición son factores determinantes. (Elaboración propia, 2024)

Sistema de control de temperatura:

La temperatura de un horno de laboratorio se mide mediante una termocupla, que es un dispositivo analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz.

Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay una discrepancia (error) el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y control de potencia, para hacer que la temperatura del horno adquiera el valor deseado (Ogata, INGENIERÍA DE CONTROL MODERNA, 2010).

5.5.1 Termopar:

La termocupla tipo K es un sensor de temperatura analógico del tipo transductor, por lo cual no necesita ser alimentado por una fuente de voltaje. Permite medir la temperatura mediante una señal eléctrica. Dicha señal puede medirse mediante el cambio en milivoltios entregado por el instrumento de medición.

En las Termocuplas tipo K en un extremo está la unión de los alambres y en el otro extremo el terminal de los cables de medición, el cual puede estar protegido por un cabezal.

Los materiales que componen una termocupla tipo K son el cromel compuesto por níquel y cromo y el alumen compuesto por níquel y aluminio, tanto el cromel como el alumen tienen un color plateado brillante, el alumen tiene mayor proporción de níquel por lo cual es más magnético.

La termocupla tipo K varía la señal en milivoltios que entrega, por cada grado centígrado detectado.

Por ejemplo, en una termocupla «tipo K» al someter la unión de sus dos metales a 750°C, se obtiene en sus extremos un valor de 31,214 milivoltios.

Este tipo de termocupla sigue siendo la más utilizada para aplicaciones industriales y está elaborada principalmente para atmósferas neutras, por lo cual debes tener mucho cuidado cuando protejas el sensor para usarlo en un ambiente diferente a este. (medicionycontrol.com.co, 2024)

Figura 8. Termopar tipo k.



Fuente: Amazon, 2024

5.6 Control de potencia

El control de potencia es una parte fundamental en los sistemas de regulación térmica. Su propósito es gestionar cuánta energía se suministra al elemento calefactor, en función de las necesidades térmicas del sistema.

Este proceso debe ser dinámico y preciso para mantener la temperatura deseada, garantizar la esterilización efectiva y evitar el sobrecalentamiento o el desperdicio energético.

En un sistema basado en microcontroladores, la señal de control generada por el algoritmo, se traduce en una señal de modulación de ancho de pulso (PWM), que regula la cantidad de potencia aplicada al actuador térmico (resistencia eléctrica).

Esta señal puede actuar directamente sobre un relevador de estado sólido (SSR), o bien una etapa de control con TRIAC si se trabaja con corriente alterna.

Los aspectos clave en el diseño del control de potencia incluyen:

- **Precisión y velocidad de respuesta:** El control debe responder rápidamente a los cambios de temperatura sin provocar oscilaciones térmicas.
- **Compatibilidad eléctrica:** Debe tenerse en cuenta el tipo de carga (resistiva), el voltaje de operación, y la necesidad de aislamiento galvánico en algunos casos.
- **Seguridad y protección:** Es esencial incorporar mecanismos de protección contra sobre corriente, cortocircuito o fallas en el sensor, para evitar daños al sistema o riesgos para el usuario.
- **Integración con el microcontrolador:** El entorno de programación seleccionado debe permitir un control preciso del hardware PWM y facilitar la implementación del lazo de control PID. (Elaboración propia, 2025)

VI. ANÁLISIS Y RESULTADOS

6.1 Diseño Metodológico

Ubicación de Estudio:

La ubicación de estudio del proyecto estará dirigida en el SILAIS Managua.

Área de estudio:

Sistemas de control automatizado.

Tipo de investigación:

La investigación tiene un enfoque aplicado, ya que se centra en estudiar, probar y evaluar distintos métodos y tecnologías con el fin de establecer los parámetros óptimos de temperatura, presión y tiempo, orientados a recuperar la funcionalidad de la autoclave.

6.2 Proceso de elaboración

6.2.1 Evaluación de los requerimientos de funcionamiento de la autoclave RAYPA:

Esta etapa inicial consistió en la obtención y análisis de información relevante sobre el equipo en estudio. Para ello, se realizó una revisión del manual, la ficha técnica y la documentación proporcionada por el fabricante.

Asimismo, se recopilaron datos con el personal operario, lo que permitió comprender el uso real del equipo, sus limitaciones actuales y las posibles mejoras desde el punto de vista funcional.

Además, se llevó a cabo una comparación con las características de otras autoclaves, lo que facilitó la identificación de oportunidades de mejora en aspectos como la interfaz de usuario, la precisión del control térmico y la eficiencia energética.

Se identificó la temperatura como la variable más crítica en el proceso, motivo por el cual se priorizó el diseño e implementación de un sistema de medición y control térmico de alta precisión y fiabilidad.

6.2.2 Diseño de controlador PID basado en microcontrolador

En esta etapa se integró el algoritmo PID dentro del microcontrolador, constituyendo el núcleo del sistema de control térmico. Este controlador fue diseñado para mantener la temperatura en el punto deseado, minimizando oscilaciones, sobre impulsos o retardos. Los parámetros KP, Ki y KD fueron ajustados mediante pruebas experimentales, adaptados a la dinámica térmica específica del sistema.

La señal de salida del PID se utilizó para controlar el ciclo de trabajo de una señal PWM, la cual modula la potencia entregada al elemento calefactor mediante un circuito de potencia, relé de estado sólido (SSR), según el tipo de carga y tensión utilizada.

El diseño incluye mecanismos de protección ante fallos, además de funcionalidades para visualización del proceso y retroalimentación en tiempo real. El resultado es un sistema confiable, preciso y adaptable a distintas condiciones operativas.

6.2.3 Desarrollo del algoritmo de programación y configuración:

Con los requerimientos definidos, se procedió con la selección del entorno de desarrollo adecuado (como CCS C Compiler) compatible con la familia de microcontroladores PIC, valorando su facilidad de depuración, soporte técnico y disponibilidad de librerías para periféricos.

El algoritmo desarrollado integra las siguientes funcionalidades:

- Lectura de temperatura desde un termopar tipo K a través del módulo digital MAX6675 usando protocolo SPI.
- Evaluación del error térmico (diferencia entre temperatura medida y setpoint).
- Ejecución del algoritmo PID para cálculo de la acción correctiva.
- Generación de señal PWM proporcional a la salida del controlador.
- Interfaz con el usuario mediante pantalla LCD, permitiendo la visualización del estado del sistema.

6.3 Características Técnicas:

Con el propósito de comprender el funcionamiento y las capacidades del equipo de esterilización, se realizó un estudio técnico de la autoclave RAYPA. Este análisis incluyó una revisión detallada de su manual operativo, el cual proporcionó información esencial sobre los parámetros operativos, sistemas de seguridad, ciclos automáticos de esterilización y ficha técnica.

Además, se consideraron observaciones prácticas del personal responsable de su operación, lo que permitió identificar aspectos que podrían mejorarse en futuras implementaciones, ya sea en términos de automatización, interfaz de usuario o integración con otros sistemas. Esta información es clave para desarrollar propuestas de optimización y asegurar un uso eficiente y seguro del equipo.

TABLA 2. FICHA TÉCNICA.

CARACTERÍSTICAS	ESPECIFICACIÓN
VOLUMEN TOTAL/ÚTIL DE LA CÁMARA	22/21 LITROS
DIMENSIONES ÚTILES DE LA CÁMARA (DIÁMETRO X PROFUNDIDAD)	210 X 430 MM
NÚMERO MÁXIMO DE BANDEJAS	4 O 5
PESO NETO	49 KG
POTENCIA	1200-2000 W
VOLTAJE	120-230 V
FRECUENCIA	50/60 HZ
RANGO DE TEMPERATURA DE ESTERILIZACIÓN	100 – 134 °C
RANGO DE TIEMPO DE ESTERILIZACIÓN	1 – 250 MINUTOS
PRESIÓN MÁXIMA	2,1 BAR

Fuente: (Raypa, 2024)

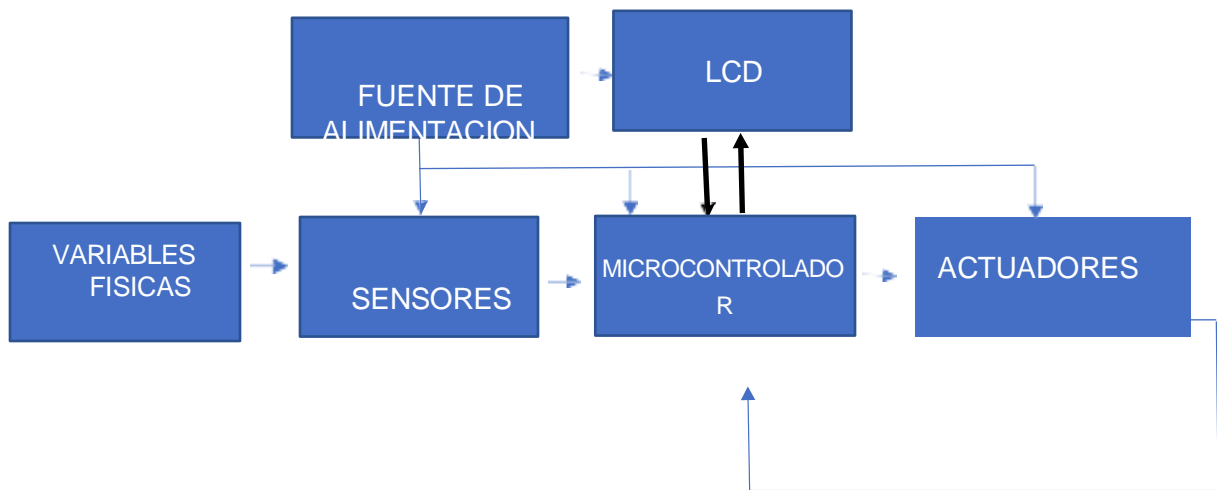
Como parte del proceso de análisis técnico del sistema de esterilización, se realizó una revisión detallada de la autoclave RAYPA, complementada con el estudio de manuales, fichas técnicas y documentación de equipos con funcionalidades similares.

Esta revisión comparativa permitió identificar tendencias tecnológicas en el diseño de autoclaves, así como contrastar prestaciones clave como capacidad, control de temperatura y sistemas de seguridad.

6.3.1 Diagrama del sistema

Figura 9. Diagrama de bloques del sistema de control

Fuente: (Elaboración Propia)



Fuente de alimentación: Este componente proporciona la energía necesaria para alimentar todos los circuitos del sistema de control electrónico de la autoclave. Debe ser capaz de suministrar una potencia estable y limpia para garantizar el correcto funcionamiento de todos los dispositivos.

LCD: Pantalla de Cristal Liquida. Es la pantalla donde se muestra la información como texto, numero o gráficos.

Microcontrolador: Un microcontrolador o un sistema embebido programable controla el proceso de esterilización mediante de algoritmo específicos. Este recibe datos de los sensores, realiza cálculos y envía comandos o cierta acción a los actuadores para mantener las condiciones deseadas para el proceso de esterilización.

Actuador: Los actuadores son los dispositivos que convierten las señales eléctricas del controlador en acciones físicas. Estos pueden incluir relé de potencia para controlar elementos de calentamiento, válvulas electromagnéticas para regular el flujo de fluido, etc.

Sensores: Son los dispositivos electrónicos encargados de medir las variables físicas relevantes para el proceso de esterilización. Estos pueden incluir termopares para medir la temperatura, transductores de presión y otros sensores especializados para controlar condiciones específicas del proceso de esterilización.

6.3.2 Sistema de control:

El sistema de control es un componente esencial en el funcionamiento de una autoclave, ya que permite supervisar y regular variables críticas del proceso de esterilización. Este sistema se encarga de interpretar las señales de los sensores y activar los mecanismos necesarios para mantener las condiciones óptimas durante cada ciclo.

En equipos modernos, el control suele estar basado en microcontroladores o sistemas embebidos con algoritmos PID (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales ajustan de forma precisa la potencia de calefacción en función de la diferencia entre la temperatura real y la deseada.

La comparación con otras autoclaves similares permitió identificar que este sistema incorpora una interfaz digital que facilita la configuración de parámetros, la selección de ciclos automáticos y la visualización en tiempo real de los procesos de la autoclave.

Un sistema de control eficaz no solo garantiza la eficiencia energética y la precisión térmica, sino que también asegura la seguridad del operador y la fiabilidad del proceso de esterilización, factores esenciales en entornos laborales e industriales.

6.4 MICROCONTROLADOR PIC

Los microcontroladores PIC (Peripheral Interface Controller), desarrollados por Microchip Technology, son dispositivos electrónicos programables ampliamente utilizados en sistemas embebidos para el control y automatización de procesos.

Gracias a su bajo costo, versatilidad, y bajo consumo de energía, son una opción ideal para aplicaciones como el control térmico en autoclaves, hornos de laboratorio y otros equipos similares.

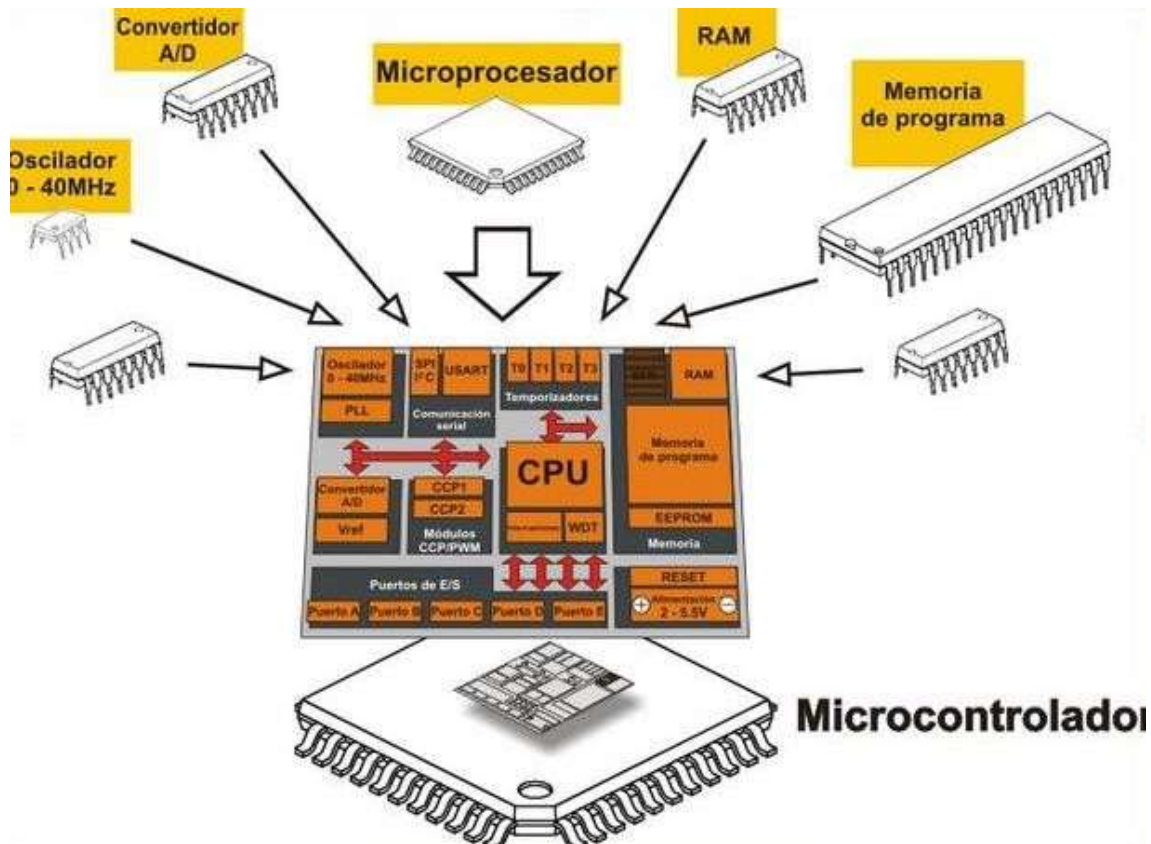
Estos microcontroladores cuentan con periféricos integrados que facilitan la adquisición y procesamiento de señales, incluyendo:

- **Convertidores A/D (analógico-digital):** para leer sensores de temperatura como termopares.
- **Temporizadores y PWM:** útiles para controlar resistencias calefactoras.
- **Módulos de comunicación (USART, I2C, SPI):** para conectarse con pantallas, módulos de memoria o interfaces de usuario.
- **Memoria EEPROM/Flash:** para guardar parámetros como el setpoint de temperatura o la configuración del ciclo.

En el contexto de un sistema de control térmico, como en la implementación de la autoclave, un microcontrolador PIC puede ejecutar un algoritmo PID para regular la temperatura en tiempo real, tomando como referencia la lectura del sensor (por ejemplo, un termopar tipo K) y modulando la potencia de calentamiento según el error detectado.

Además, su facilidad de programación (mediante entornos como compiladores como CCS C) los hace altamente accesibles tanto para proyectos académicos como profesionales. En nuestro caso nosotros decidimos trabajar con el microcontrolador PIC18F4550 en el entorno de desarrollo ccs c compiler.

Figura 10. Microcontrolador pic



Fuente: Curso de electrónica, 2024

6.4.1 Criterio de selección para el microcontrolador PIC

La selección de un microcontrolador para un sistema de control térmico, como el requerido para una autoclave, es un proceso crítico que debe considerar tanto las necesidades funcionales del sistema como las características técnicas de la autoclave.

Esta elección determina la capacidad del sistema para adquirir datos, procesar señales, ejecutar algoritmos de control (como el PID), y gestionar la interfaz con el usuario.

Entre los principales criterios de selección se encuentran:

- **Cantidad y tipo de entradas/salidas (I/O):** Se requiere un número adecuado de pines digitales y analógicos para conectar sensores (termopares), actuadores (relés) y pantallas LCD.
- **Resolución del conversor A/D:** Es crucial para interpretar con precisión las señales analógicas provenientes del sensor de temperatura.
- **Capacidad de procesamiento:** Debe ser suficiente para ejecutar en tiempo real algoritmos como el controlador PID sin demoras ni errores.
- **Periféricos integrados:** Como módulos PWM, timers, comunicación serial (USART, I2C, SPI), y EEPROM para almacenamiento de parámetros.
- **Consumo energético y estabilidad térmica:** En aplicaciones industriales o de laboratorio, la eficiencia energética y el comportamiento bajo variaciones de temperatura son relevantes.
- **Facilidad de programación y soporte técnico:** El uso de entornos como compiladores como **CCS C** facilita el desarrollo y la depuración del sistema.

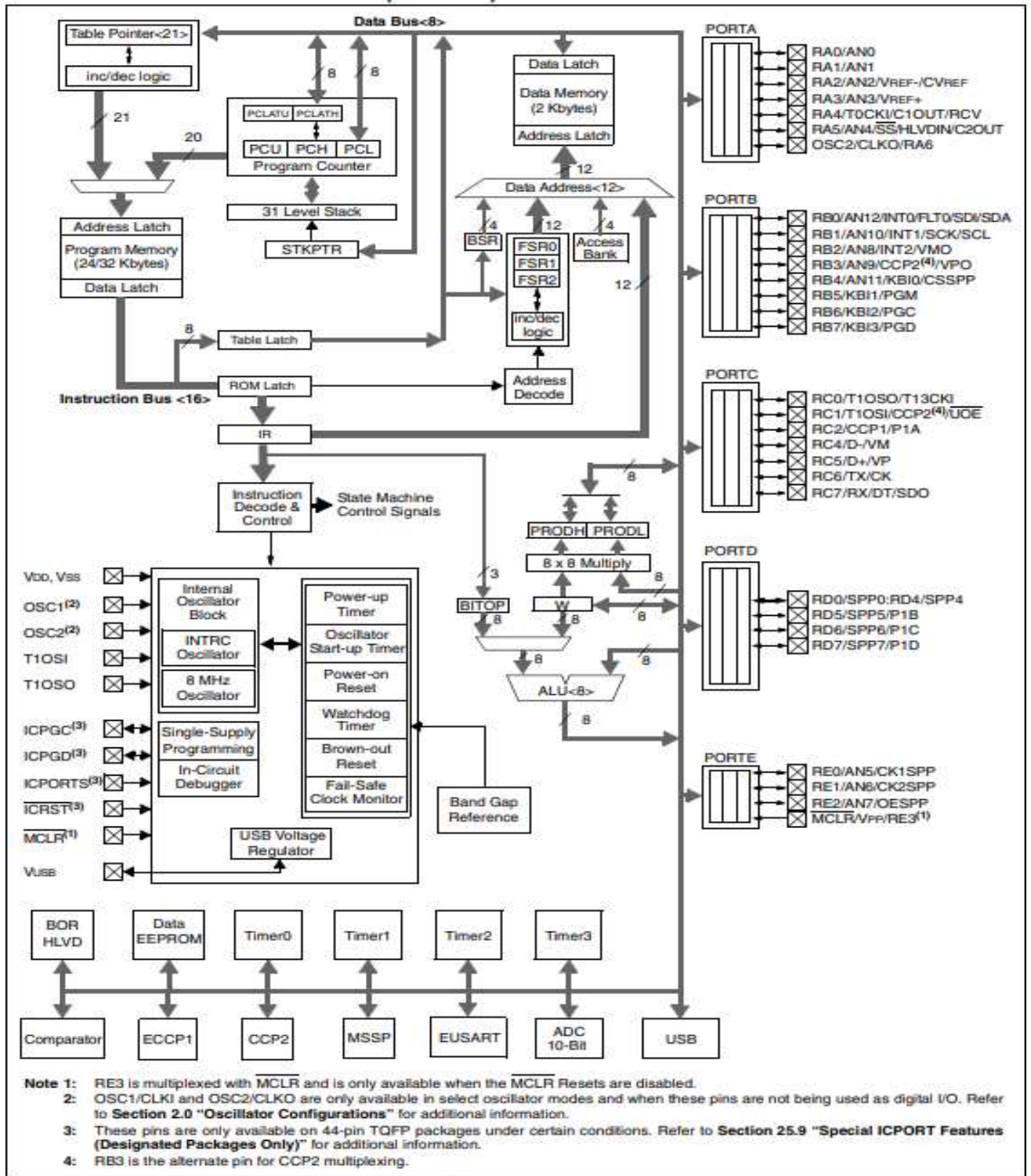
En función de estos factores, microcontroladores de la familia PIC18 suelen ser opciones adecuadas, ya que ofrecen una buena relación costo-beneficio, cuentan con soporte para programación en C, y poseen la capacidad de controlar sistemas térmicos con precisión y estabilidad.

La correcta elección del microcontrolador garantiza la fiabilidad, eficiencia y escalabilidad del sistema de control, lo que es esencial en procesos donde la temperatura debe mantenerse dentro de márgenes exactos, como en las aplicaciones de esterilización, en este caso se decidió trabajar con el PIC18F4550.

Se decide trabajar con el microcontrolador PIC 18F4550 por 3 razones:

- Facilidad de programación
- Bajo costo
- Versatilidad para integrar los demás elementos del equipo.

Figura 11. Diagrama de bloques del pic18f4550



Fuente: Microchip.com, 2024

6.4.2 Criterio de selección para entorno de programación

La elección del entorno de programación adecuado es un aspecto fundamental en el desarrollo de sistemas de control térmico basados en microcontroladores PIC, como los que podrían implementarse para el monitoreo y regulación de temperatura en autoclaves.

Un entorno correctamente seleccionado facilita el diseño, la depuración y la implementación eficiente del sistema, lo que impacta directamente en su fiabilidad y rendimiento.

Entre los criterios principales para seleccionar el entorno de desarrollo destacan los siguientes:

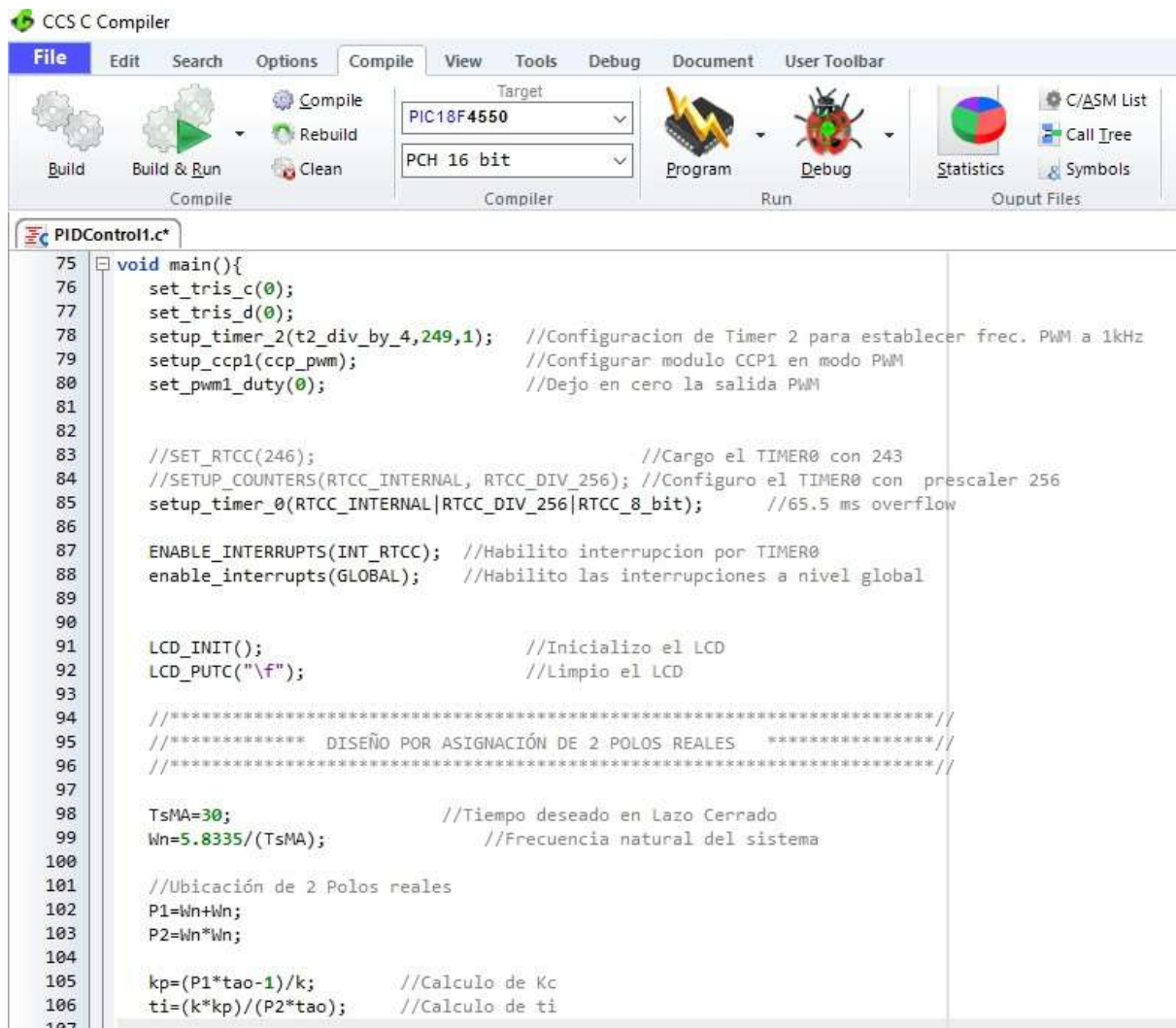
- **Compatibilidad con el microcontrolador:** El entorno debe soportar el modelo específico de PIC elegido, **PIC18f4550**.
- **Facilidad de uso y curva de aprendizaje:** Especialmente importante en entornos académicos o de prototipado rápido, donde se valora la claridad en la estructura del código y la disponibilidad de ejemplos.
- **Herramientas de depuración y simulación:** La capacidad de simular el comportamiento del programa o depurarlo en tiempo real con herramientas como **PICkit** es esencial para garantizar la estabilidad del sistema.
- **Bibliotecas y soporte para periféricos:** La disponibilidad de librerías para manejo de ADC, PWM, comunicación I2C/SPI y pantallas facilita la integración de componentes como termopares, actuadores y módulos de visualización.
- **Documentación y comunidad:** Contar con una base sólida de documentación técnica, foros activos y ejemplos funcionales acelera el desarrollo y resolución de problemas.

Nosotros decidimos trabajar con CCS C Compiler ya que es muy utilizado en aplicaciones educativas e industriales. Permite un desarrollo más directo y práctico, especialmente valorado por su facilidad para trabajar con dispositivos periféricos y generar código optimizado.

La correcta selección del entorno de programación no solo optimiza los tiempos de desarrollo, sino que también garantiza la estabilidad del control PID, la precisión en la adquisición de datos y una interacción eficiente con el usuario final, asegurando así el éxito del sistema de control implementado en el equipo.

En este caso, se utilizará CCS C Compiler, ya que ha sido el entorno con el que se ha trabajado consistentemente a lo largo de los años, lo que ofrece familiaridad y eficiencia en el desarrollo.

Figura 12. Entorno de programación ccs c compiler



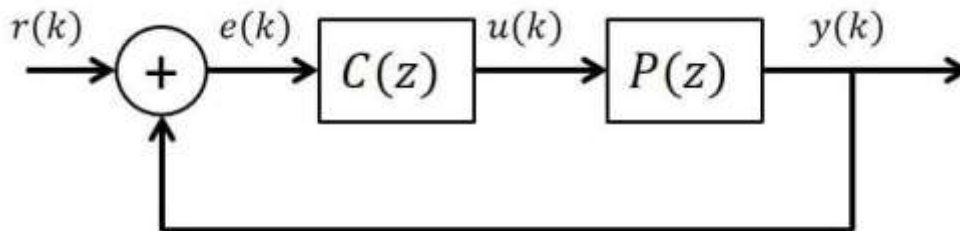
Fuente: (Elaboración Propia)

6.4.3 Control PID

El controlador PID es uno de los controles o compensadores más utilizados actualmente en la industria debido a su fácil sintonía y robustez en los diferentes procesos existentes. Este es utilizado para llevar una variable física (Nivel, temperatura, velocidad, presión, etc) a un punto de operación específico (set point).

Un diagrama de bloques clásico de un sistema de control puede representarse de la siguiente forma:

Figura 13. Diagrama de bloques del sistema de control.



Fuente: Controlautomáticoeducación.com, 2024

Donde:

- $r(k)$ es nuestra señal de referencia o set point.
- $e(k)$ es nuestra señal de error (La resta entre $r(k)$ y $y(k)$).
- $C(z)$ es nuestro controlador PID discreto.
- $u(k)$ es nuestra señal de control (Ley de control).
- $P(z)$ es nuestra planta o proceso en representación discreta.
- $y(k)$ es nuestra variable de salida a controlar.

La ley de control PID puede representarse por la siguiente ecuación:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{t_i} \int_0^t e(t) dt + k_p t_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

En dominio de la transformada de Laplace es representado por:

$$u(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right] e(s) \quad (3)$$

El control PID posee tres parámetros:

- k_p es la ganancia proporcional.
- t_i es el tiempo integral.
- t_d es el tiempo derivativo.

(Controlautomáticoeducación.com, 2024)

6.4.4 Modelo matemático:

Todo proceso es representado por funciones de transferencia de primer o segundo orden, el cual el cual se trabajará para modelar el comportamiento de nuestra planta.

$$P(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

El modelo está representado en su forma continua, es decir en el dominio de Laplace.

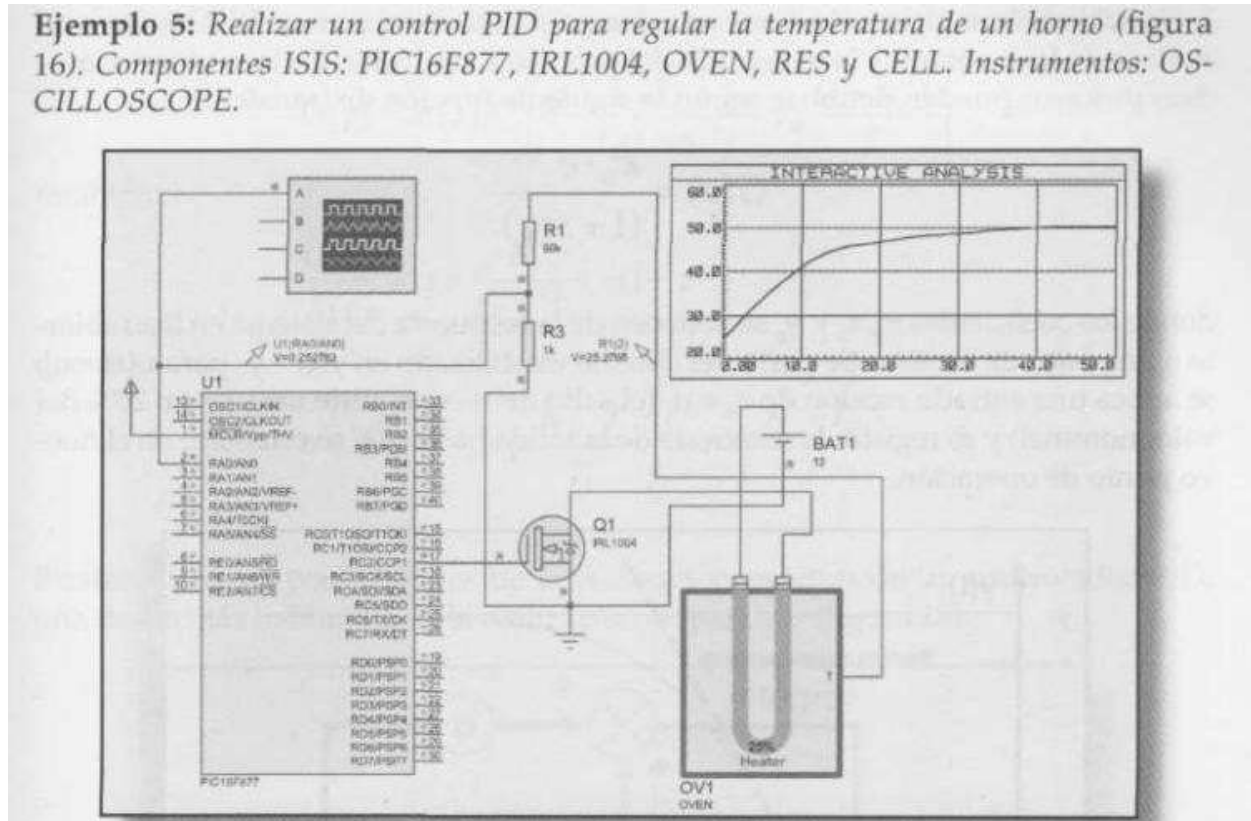
Donde:

- K es la ganancia del sistema.
- τ es la constante de tiempo del proceso.
- θ es el retardo del proceso.

(Controlautomáticoeducación.com, 2024)

Para obtener estos tres parámetros de nuestro proceso, nos basaremos del ejemplo #5 de la unidad 6, Modulo CCP-comparador, captura y PWM. (Breijo, 2014)

Figura 14. Configuración básica de controlador pid en pic.



Fuente: (Breijo, 2014)

6.4.5 CONFIGURACIÓN DEL ELEMENTO CALEFACTOR:

Temperatura ambiente: 25°C

Temperature coefficient (V/°C): Este parámetro proporciona una estimación de la temperatura que alcanzará el elemento calefactor en función de la tensión aplicada. En este caso, se considera una relación de 1 V/°C, lo que significa que, por cada voltio aplicado, la temperatura del elemento calefactor aumentará aproximadamente en un grado Celsius.

Oven Time Constant (sec): La constante de tiempo de nuestro elemento calefactor indica el tiempo que tarda el sistema en responder a un cambio en la entrada de

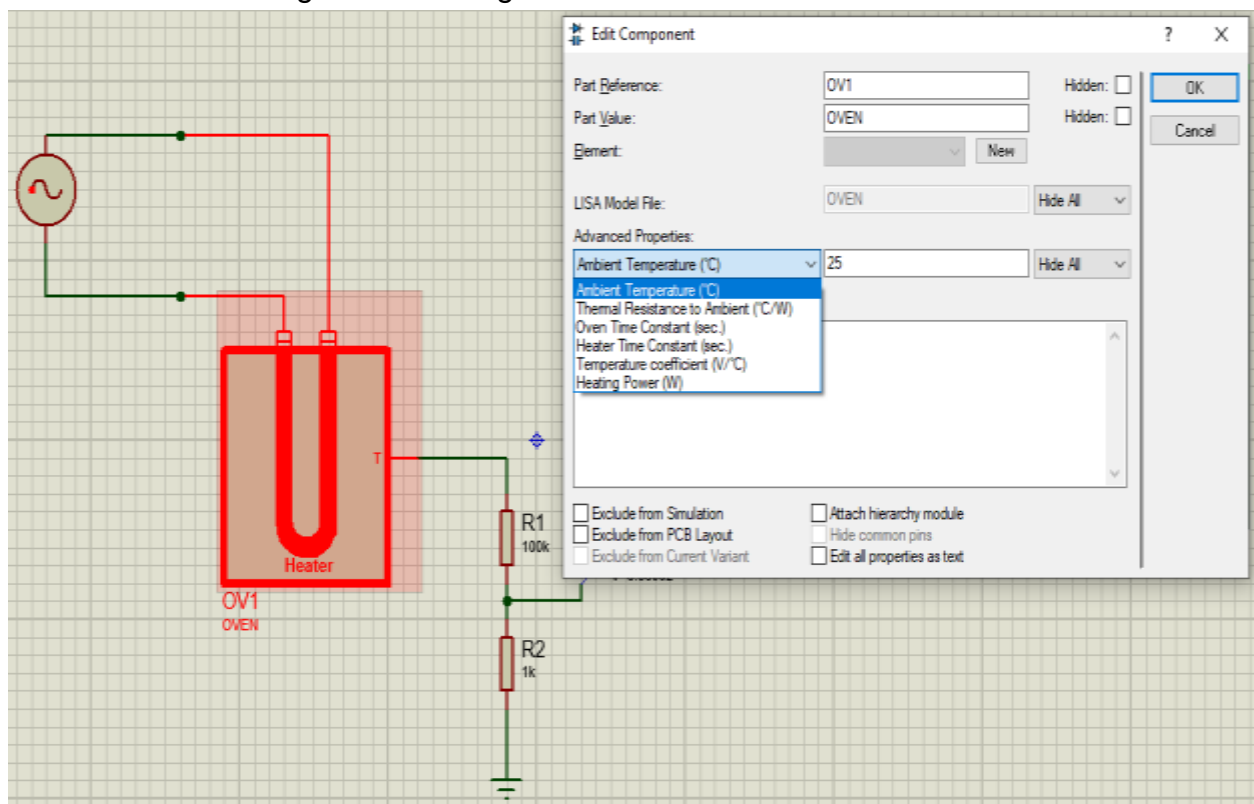
energía. Para evitar simulaciones demasiado largas, se ha establecido un valor de 10 segundos para esta constante.

Heater time constant (sec): se refiere a esta misma constante del calefactor. Para optimizar el tiempo de simulación, se ha decidido usar un valor de 1 segundo en algunos casos, dependiendo del nivel de detalle requerido.

Thermal resistance to ambient (°C/W): resistencia térmica elemento calefactor ambiente. Valor por defecto 0.7.

Heating Power (W): Este parámetro corresponde a la potencia del elemento calefactor. Para asegurar que la tensión medida por nuestro sensor de temperatura no supere los 5 voltios, se establecerá un valor de 1.2 kW para la potencia del calefactor.

Figura 15. Configuración del elemento calefactor.



Fuente (Elaboración Propia)

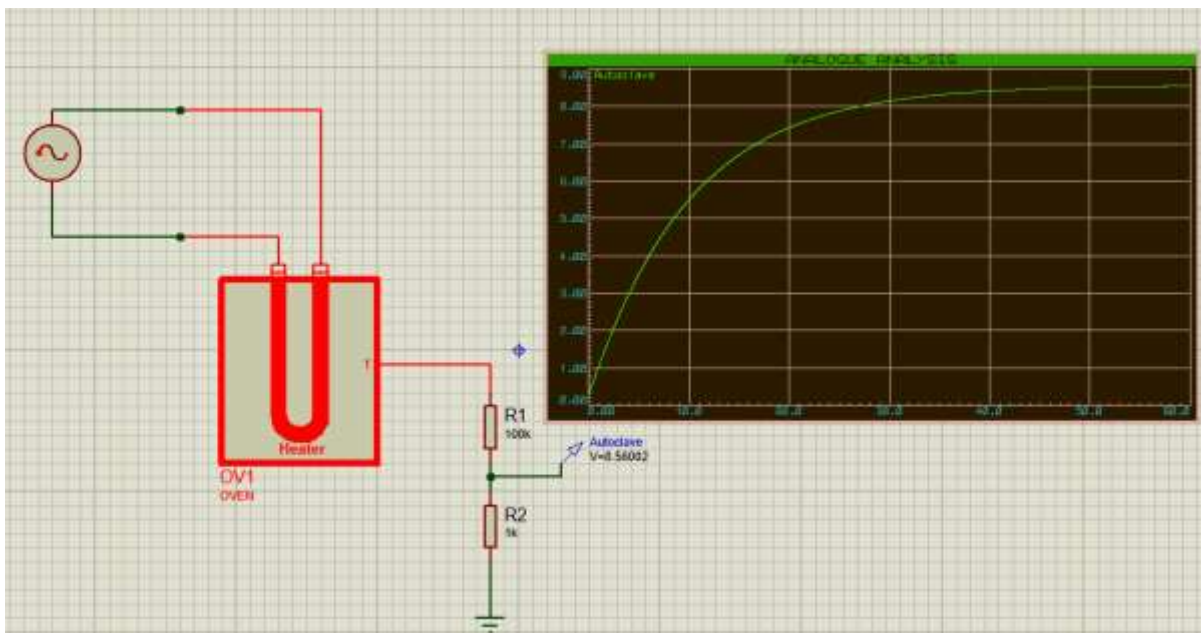
Ahora, como el dispositivo OVEN tiene un terminal que dice T, el cual nos indica la temperatura del horno en grados Celsius. Para esto es conveniente utilizar un divisor de voltaje por 100 para obtener la señal del elemento calefactor en milivoltios. Así, 25°C corresponderán a 250mV.

6.4.6 Identificación del proceso:

Para identificar el modelo matemático que represente adecuadamente la dinámica de la variable de proceso (la temperatura), es necesario recopilar datos iniciales del sistema. En este caso, el elemento calefactor operará con una alimentación de 120 Vac.

Para determinar el modelo matemático del sistema, se llevará a cabo un proceso de identificación *off-line*. Este procedimiento consiste en aplicar una señal de estímulo al elemento calefactor y registrar la respuesta del sistema, con el fin de graficar su comportamiento en función del tiempo.

Figura 16. Identificación off-line.



Fuente (Elaboración Propia)

Dado que el sistema presenta un comportamiento lineal, se optó por aplicar un estímulo correspondiente al 15 % del voltaje de alimentación nominal (120 Vac), lo cual equivale a 18 V. A partir de esta estimulación, se generará la curva de respuesta térmica que permitirá estimar los parámetros del modelo.

Se observa que la gráfica de respuesta inicia en 25 °C (0.25 V) y alcanza un valor final de 134 °C (1.34 V), como resultado de alimentar el elemento calefactor con 18 V.

A partir de estos datos, es posible calcular la ganancia del proceso utilizando la siguiente fórmula:

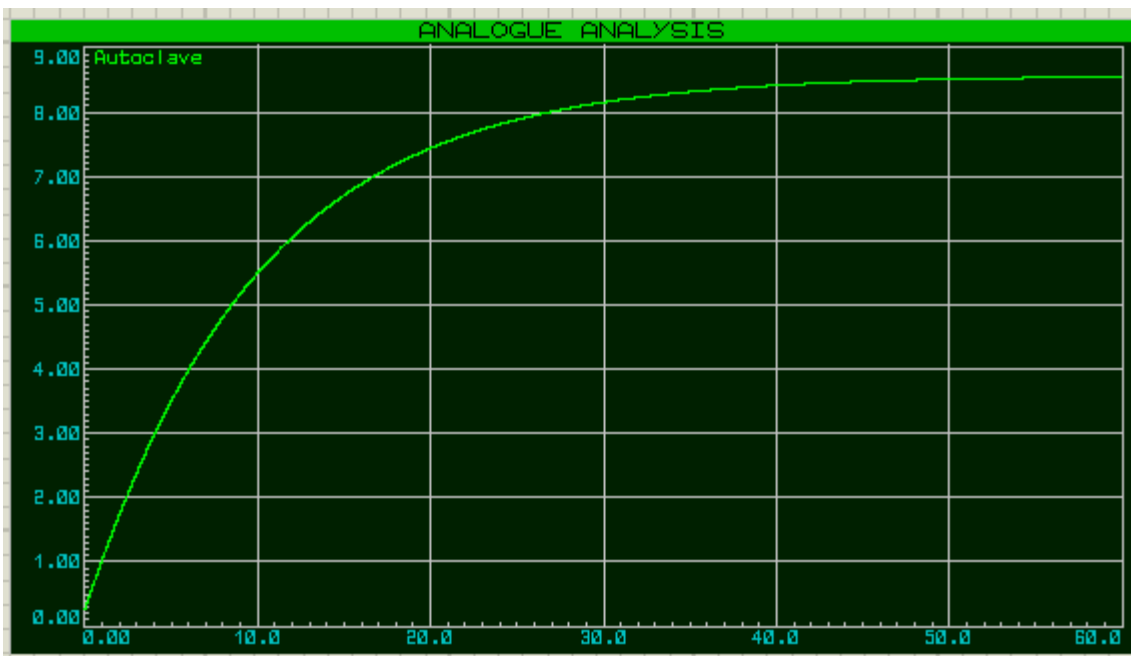
$$(5) \quad K = \frac{Y_{final} - Y_{inicial}}{U_{final} - U_{inicial}}$$

$$K = \frac{134-25}{18-0} = 6.0555 \text{ } ^\circ\text{C/V} \quad (6)$$

Si se realiza el cálculo de la ganancia utilizando únicamente unidades de voltaje, se puede obtener una forma adimensional del parámetro de ganancia del sistema:

$$K = \frac{1.34-0.25}{18-0} = 0.0605 \quad (7)$$

Figura 17. Estabilidad del sistema a los 4tao.



Fuente (Elaboración Propia)

Se observa que la temperatura en la gráfica comienza a estabilizarse aproximadamente a los 40 segundos (línea azul). A partir de este comportamiento, es posible estimar la constante de tiempo del sistema térmico utilizando la siguiente fórmula:

T establecimiento=4τ (8)

Esto era de esperarse, ya que previamente se había establecido una constante de tiempo de 10 segundos en los parámetros del elemento calefactor. Finalmente, para completar el modelo, es necesario determinar el valor del retardo del sistema. Para ello, se analiza el tiempo que tarda el elemento calefactor en responder una vez que ha sido energizado.

Se observa que la respuesta del elemento calefactor es prácticamente instantánea, lo que permite asumir un retardo nulo. En el diseño del controlador PID implementado con el microcontrolador PIC, se optó por utilizar únicamente las acciones proporcional e integral, omitiendo la acción derivativa. Esta estrategia de control es conocida como “asignación de dos polos reales”.

De manera general, el comportamiento dinámico del elemento calefactor puede representarse mediante la siguiente función de transferencia:

$$P(s) = \frac{0.0605e^{-1s}}{10s+1} \quad (9)$$

Con el modelo del proceso ya identificado, es posible proceder al cálculo de los parámetros del controlador.

$$k_p, t_i, t_d$$

6.4.7 Control PI por asignación de 2 polos reales:

En este proyecto de controlador PID con el PIC solo utilizamos nuestra parcela proporcional e integral, colocando la acción derivativa en cero. La idea básica de este diseño es asignarle polos a nuestro proceso para que actúe de la manera como nosotros deseamos siguiendo el siguiente procedimiento:

Seleccionamos un tiempo de establecimiento deseado. Es decir, el tiempo en que queremos que se establezca la temperatura, por ejemplo, vamos a suponer que

nosotros queremos que la temperatura se estabilice en más o menos 40 segundos.

$$T_{ss}=40$$

Calculamos la frecuencia natural de nuestro sistema de forma que no tenga sobre impulso. Una forma de hacer esto es asignando 2 polos iguales, a esto se le conoce como un sistema críticamente amortiguado. La frecuencia natural puede determinarse con la siguiente formula.

$$W_n = \frac{5.8335}{T_{ss}} = 0.1458 \quad (10)$$

Calculamos el polinomio deseado el cual contiene los dos polos iguales que estamos asignando al sistema:

$$(11) \quad (s + W_n)^2 = s^2 + p_1s + p_2 = s^2 + 2W_ns + W_n^2$$

$$p_1 = 2W_n = 2*0.1458 = 0.2916 \quad (12)$$

$$p_2 = W_n^2 = 0.1458^2 = 0.0212 \quad (13)$$

Por último, calculamos el parámetro k_c y t_i con las siguientes formulas:

$$k_p = \frac{P_1\tau - 1}{K} = 0.2916*10^{-1}/0.0605 = 31.6694 \quad (14)$$

$$t_i = \frac{k_p * K}{P_2 * \tau} = 31.66*0.0605/0.0212*10 = 9.0350 \quad (15)$$

6.4.8 Controlador PID discreto con PIC:

Como vamos a implementar el PID en nuestro microcontrolador PIC, debemos colocar la ley de control en tiempo discreto con un tiempo de muestreo (T) adecuado.

Ziegler y Nichols mencionan dos formas distintas:

$$\begin{aligned} 1. T &< \frac{\theta}{4} \\ 2. T &= \frac{\tau}{20} \end{aligned} \quad (16)$$

Para nuestro caso de nuestro elemento calefactor escogeremos uno que corresponde a 100mS y siendo menor que $T < \theta/4$.

El control discreto PID se obtiene discretizando la ecuación continua (vista al comienzo de esta entrada) aproximando el término integral mediante la sumatoria trapezoidal y el término derivativo mediante la diferencia de dos puntos para de esa forma obtener la función de transferencia pulso del controlador PID digital.

$$C(z^{-1}) = \frac{u(k)}{e(k)} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (17)$$

Donde:

$$\begin{aligned} q_0 &= k_p \left[1 + \frac{T}{2t_i} + \frac{t_d}{T} \right] \\ q_1 &= -k_p \left[1 - \frac{T}{2t_i} + \frac{2t_d}{T} \right] \\ q_2 &= \frac{k_p t_d}{T} \end{aligned} \quad (18)$$

Con esto, la ley de control que vamos a ingresar a nuestro PIC sale del control PID discreto (Despejando $u(k)$).

(18)

$$\begin{aligned} u(k)(1 - z^{-1}) &= q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \\ u(k) - u(k)z^{-1} &= q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \\ u(k) &= u(k)z^{-1} + q_0e(k) + q_1z^{-1}e(k) + q_2z^{-2}e(k) \end{aligned}$$

Aplicando transformada inversa Z obtenemos la ecuación en diferencias:

$$u(k) = u(k - 1) + q_0e(k) + q_1e(k - 1) + q_2e(k - 2) \quad (19)$$

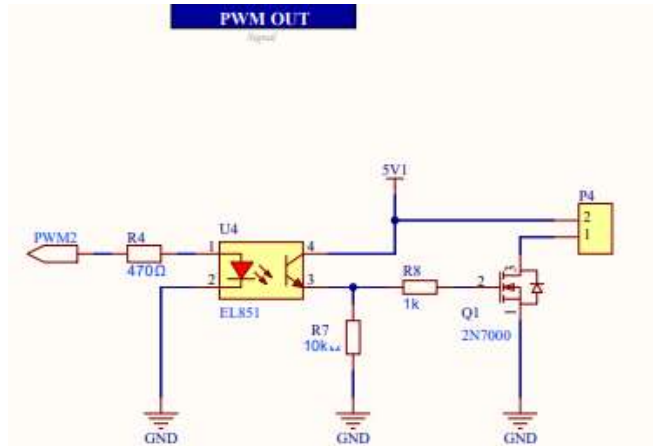
Así, $u(k)$ quiere decir la ley de control actual, $u(k-1)$ es la ley de control un instante de muestreo atrás, $e(k)$ es el error actual (Referencia – temperatura), $e(k-1)$ es el error un instante de muestreo atrás, $e(k-2)$ es el error dos instantes de muestreo atrás. (Controlautomáticoeducación.com, 2024)

6.4.9 Control de temperatura PID con microcontrolador PIC:

Para implementar el control, debemos hacer uso de un TRIAC de potencia que sea capaz de aguantar la corriente de la autoclave (18.88 A), para eso se seleccionó el TRIAC BTA24-600BRG con un nivel alto de conmutación y una alta capacidad de corriente, el cual en el GATE será activado por una señal PWM del PIC a fin de poder regular la potencia de la autoclave.

En este caso, como se requería mayor precisión, se empleó el uso del timer0 del pic. (El set-point o referencia será fijada a 134°C.

Figura 18. Etapa de potencia.



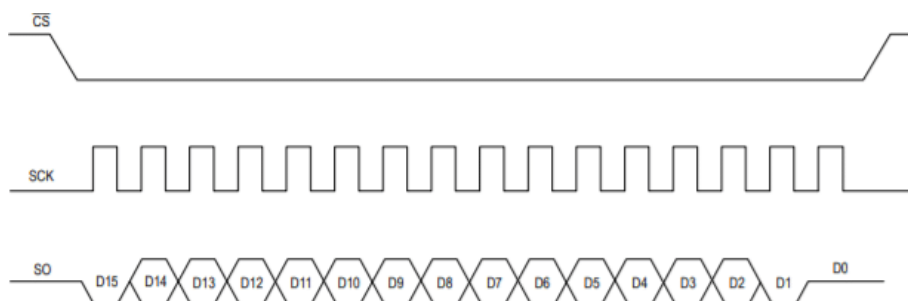
Fuente (Elaboración Propia)

6.4.10 Configuración de la TERMOPAR tipo K:

Para poder realizar la lectura de temperatura de cualquier proceso utilizando el microcontrolador PIC, utilizaremos un termopar tipo K con el MAX 6675, la termocupla tipo K es conectado al integrado MAX6675 y la información de temperatura se le envía al microcontrolador PIC a través de 3 terminales usando la comunicación SPI.

El funcionamiento y circuito recomendado del integrado MAX6675 puede ser encontrado en la hoja de datos. Básicamente al aplicar la comunicación SPI debemos generar las siguientes señales con nuestro microcontrolador PIC.

Figura 19. Señales requeridas para la comunicación spi.



Fuente: Datasheet max6675, 2024

Donde la primera línea (CS – Channel Selector) será un PIN del PIC el cual pasará de 1 para 0 para comenzar la comunicación. Luego se genera un tren de pulsos síncronos con el pin para generar el reloj mostrado en SCK. Por último, deben almacenarse los 16 bits o 2 bytes que son enviados del MAX6675 al sistema de control.

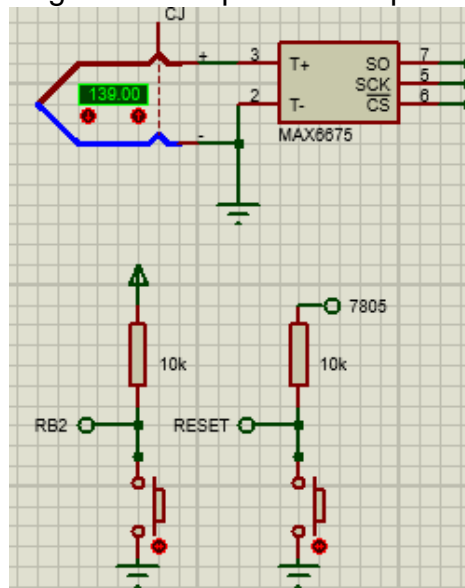
Figura 20. Bit de configuración.

BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING											THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE	
		14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4				3
Bit	15													2	1	0
	0	MSB											LSB		0	Three- state

Fuente: Datasheet max6675, 2024

Como vemos el bit 15 es un bit que no se usa, desde el bit 14 hasta el bit 3 están los datos de temperatura que en total suman 12 bits, donde los 10 primeros bits son el valor entero de la temperatura, y los 2 últimos bits son los decimales de la temperatura. El bit numero 2 indica si la termocupla tipo K está conectada o no, el bit 1 es el id del dispositivo y el bit 0 son los estados.

Figura 21. Etapa de termopar.



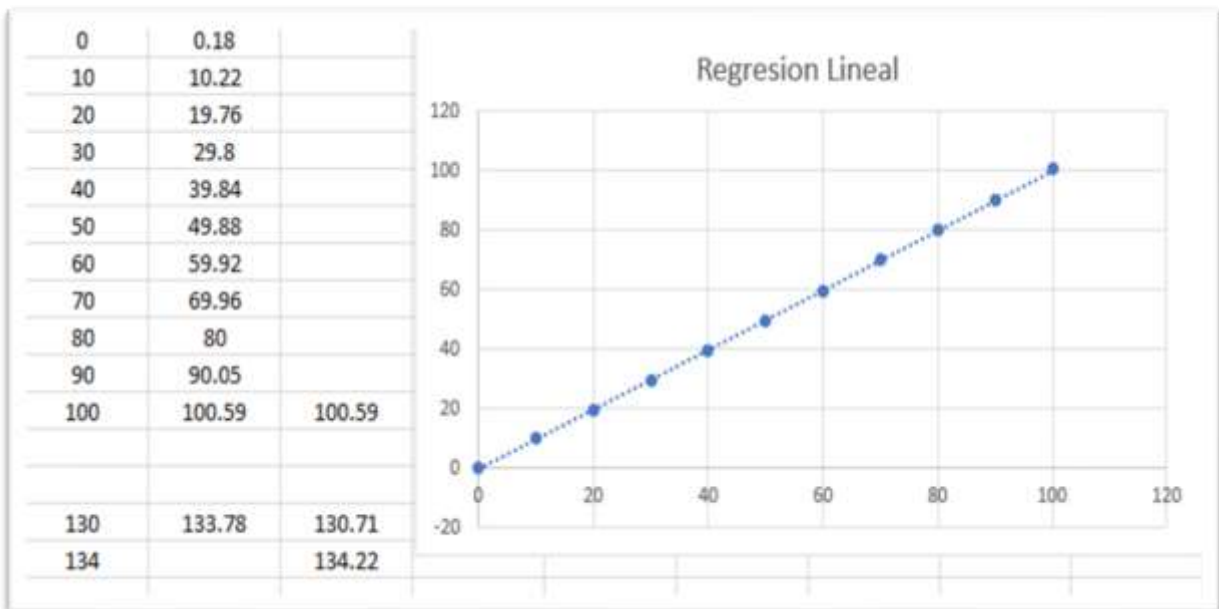
Fuente (Elaboración Propia)

Para poder calibrar el MAX6675 con el termopar tipo K usando cualquier microcontrolador, puede usarse una regresión lineal para programarla en el microcontrolador.

Para poder hacer esa regresión lineal, vamos a necesitar tener un sensor de temperatura patrón, el cual nos indicará el valor real de temperatura, para eso tomaremos los datos del patrón comparado con los datos leídos del termopar tipo K y colocaremos estos dos datos en dos columnas en un archivo en EXCEL.

Donde la ecuación de la regresión lineal sería:

Figura 22. Calibración del termopar.



Fuente (Elaboración Propia)

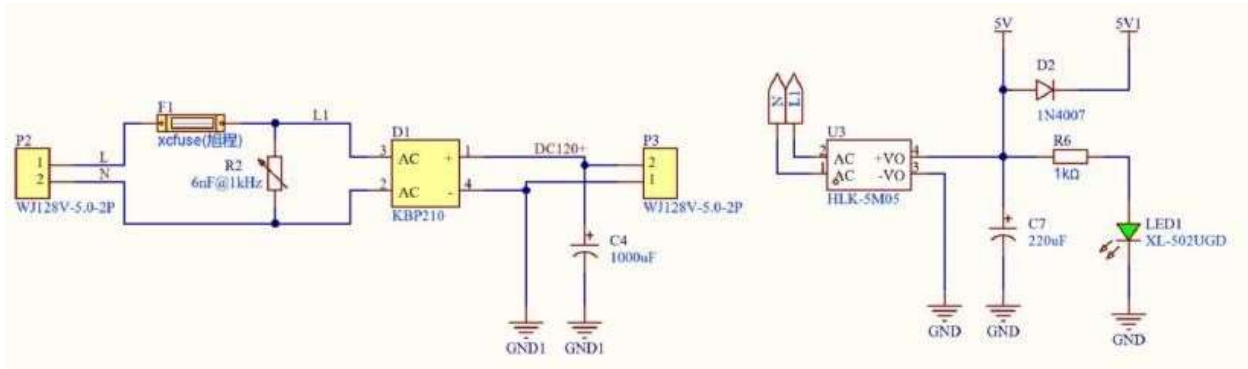
$$Y = 1.0038x + 0.1534 \quad (20)$$

$$R^2 = 0.999915; 99.99\%$$

$$r = 0.999957$$

$$\text{Error estándar} = 0.4162$$

Figura 23. Fuente de alimentación.



Fuente (Elaboración Propia)

ELEMENTOS DEL EQUIPOS:

Válvula de seguridad:

Es un dispositivo que se abre automáticamente para aliviar el exceso de presión en un sistema o equipo. en la autoclave funciona como un mecanismo de protección que libera el exceso de presión de vapor de la cámara cuando la presión supera un límite preestablecido, previniendo así una sobrepresión peligrosa y evitando explosiones.

Consiste en un disco que es levantado por la presión excesiva contra la fuerza de un resorte, abriendo un paso para que el vapor se escape. Una vez que la presión disminuye por debajo del punto de ajuste, el resorte cierra el disco, restaurando la seguridad del sistema.

Figura 24. Válvula de seguridad



Fuente: (Raypa T. d.)

Electroválvula (Solenoid):

Es una válvula electromecánica que controla el flujo de líquidos o gases mediante un campo magnético generado por una bobina eléctrica (solenoid). Cuando se energiza la bobina, el campo magnético mueve un émbolo, lo que abre o cierra la válvula para permitir o detener el paso del fluido.

En una autoclave funciona como un interruptor que regula el flujo de vapor o agua. Cuando se energiza la bobina del solenoid, se crea un campo magnético que mueve un émbolo. Este movimiento abre o cierra la válvula, lo que permite al sistema de control de la autoclave aumentar o disminuir la presión y la temperatura de la cámara de esterilización según el ciclo programado.

Cómo funciona el proceso:

La bobina se energiza: El sistema de control de la autoclave envía una señal eléctrica a la bobina de la electroválvula.

Se crea un campo magnético: La corriente eléctrica que fluye por la bobina genera un campo electromagnético.

El émbolo se mueve: Este campo magnético atrae (o repele, dependiendo del diseño) un émbolo de material ferroso, que está unido a un elemento de sellado.

Se abre o cierra la válvula: El movimiento del émbolo abre o cierra el orificio de la válvula, controlando el paso del vapor o del agua.

Reversión del proceso: Cuando la corriente eléctrica se corta, el campo magnético desaparece, y un resorte o la presión del fluido empujan el émbolo de regreso a su posición original, abriendo o cerrando la válvula de nuevo.

Su papel en la autoclave:

Fase de purga:

La electroválvula se abre para dejar salir el aire de la cámara mientras se introduce el vapor.

Fase de exposición (esterilización):

La electroválvula se cierra para evitar la fuga de vapor, lo que permite que la temperatura y la presión dentro de la cámara aumenten hasta el punto de esterilización deseado.

Fase de escape:

Otra electroválvula (o la misma, según el diseño) se abre para liberar el vapor y la presión de la cámara, devolviéndola a la presión ambiente.

Figura 25. Electroválvula DC



Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Electroválvula AC



Fuente: Elaboración propia

Ambas en conjunto funcionan de la siguiente manera:

- Electroválvula de entrada de agua/vapor (AC 110/120V): permite llenar el generador o la cámara.
- Electroválvula de purga/escape (DC 110V): abre para liberar aire o vapor condensado durante el ciclo.
- Ambas son controladas por la placa electrónica de la autoclave, que decide cuándo energizarlas para que abran o cierren.

Tabla 3. Cuadro Comparativo.

Característica	Bobina (DC 110 V / 14 W)	Bobina (AC 110/120 V / 18 VA)
Tipo de corriente	Corriente continua (DC)	Corriente alterna (AC)
Voltaje nominal	110 V DC	110 V 50 Hz / 120 V 60 Hz
Consumo	14 W (~0.127 A)	18 VA (~0.15 A)
Ciclo de trabajo (ED)	100% (operación continua)	100% (operación continua)
Respuesta	Más estable, sin zumbido	Puede generar leve zumbido/vibración por la AC
Eficiencia	Menor consumo eléctrico	Consumo un poco mayor
Control	Requiere fuente/tarjeta que entregue DC	Se conecta directo a red eléctrica (AC)
Uso típico en autoclave	Accionamiento controlado electrónicamente (purga, válvula de seguridad)	Entrada/salida de agua o vapor directamente desde la red
Ventajas	- Funcionamiento silencioso - Mayor precisión de control - Ideal para señales electrónicas	- Instalación más simple - Compatible con red eléctrica estándar - Menos componentes en el circuito
Desventajas	- Requiere conversión AC–DC (fuente) - Más costosa	- Posible vibración y ruido - Ligero mayor consumo eléctrico
Durabilidad	Alta si la fuente DC es estable	Alta, pero depende de la calidad de la red eléctrica

Fuente: (Elaboración Propia)

Ambas electroválvulas son componentes esenciales en el funcionamiento de la autoclave:

La electroválvula AC (110/120V) asegura el suministro de agua/vapor hacia la cámara.

La electroválvula DC (110V) permite el escape controlado de aire y vapor, garantizando ciclos de esterilización seguros y eficientes.

El correcto mantenimiento y funcionamiento de estas válvulas es fundamental para la seguridad, confiabilidad y eficiencia del equipo de esterilización.

Termostato o regulador de temperatura COTHERM:

Es un dispositivo que detecta y controla las variaciones de temperatura en diversos sistemas, como calentadores de agua, equipos de cocina profesional o sistemas de calefacción, asegurando que se mantenga una temperatura constante y segura. En la autoclave detecta la temperatura del vapor o del entorno y actuando como un interruptor para controlar la generación de calor, abriendo o cerrando un circuito eléctrico.

Cuando la temperatura alcanza el punto deseado, el sensor (ya sea de cera, un bulbo con fluido o un elemento eléctrico) envía una señal para desactivar el sistema de calefacción y, al bajar, se reactiva para mantener la temperatura de esterilización necesaria para la correcta esterilización de la autoclave.

Figura 27. Termostato cotherm



Fuente: (Raypa T. d.)

Principios de funcionamiento:

Detección de temperatura:

El termostato Cotherm utiliza un sensor que reacciona a los cambios de temperatura. Este sensor puede ser un bulbo con un fluido que se expande o contrae, un elemento sensible a la cera o sensores eléctricos.

Expansión o contracción:

Al aumentar la temperatura, el fluido o el material del sensor se expanden, y esta expansión provoca un movimiento mecánico.

Activación del interruptor:

Este movimiento se transmite, a través de un fuelle o pistón, para activar un interruptor, abriendo o cerrando un circuito eléctrico.

Control de la calefacción:

Si la temperatura es demasiado baja: El termostato hace contacto, permitiendo el paso de la corriente y activando la fuente de calor (generalmente un elemento calefactor o la generación de vapor).

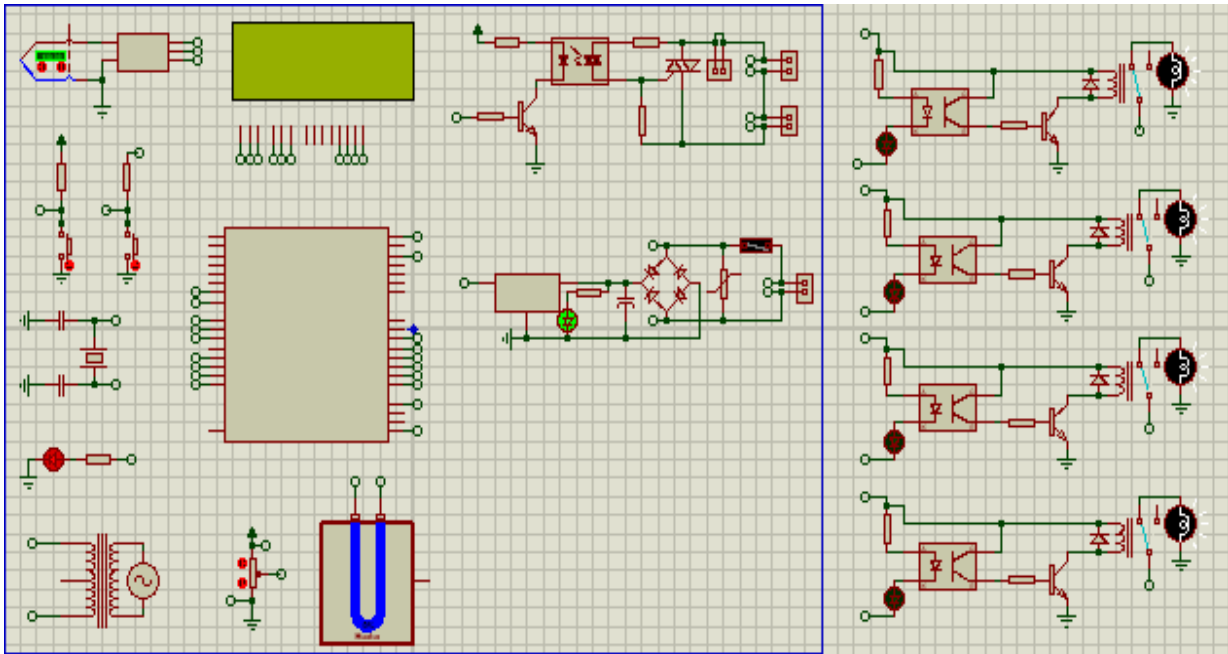
Si la temperatura es demasiado alta: El sensor se expande y actúa sobre el interruptor, abriendo el circuito. Esto desactiva la fuente de calor, evitando el sobrecalentamiento.

Mantenimiento y precisión:

El proceso se repite continuamente para mantener la temperatura de esterilización establecida por el usuario, evitando la fluctuación excesiva y asegurando una esterilización eficaz.

6.11 Esquemático:

Figura 28. Simulación en proteus del controlador PID con microcontrolador PIC18F4550



Fuente (Elaboración Propia)

PRUEBA DE FUNDIONAMIENTO:

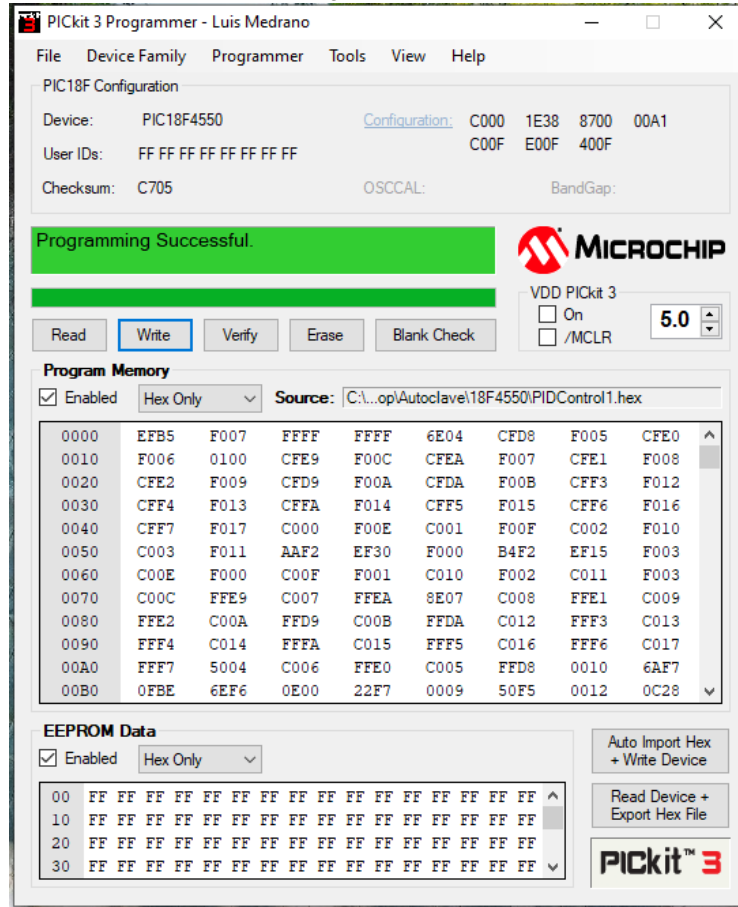
El objetivo de la prueba es verificar el correcto funcionamiento del prototipo diseñado, asegurando que cumpla con las funciones establecidas en los requerimientos del sistema, tales como la lectura de sensores, el control de actuadores y la visualización de datos.

Condiciones de prueba:

- **Ubicación:** Laboratorio de electrónica / Sala de pruebas controlada.
- **Condiciones ambientales:** Temperatura ambiente entre 25 °C y 30 °C.
- **Alimentación:** Fuente de 5 Vdc/120 Vdc/120ac

- **Equipos de medición:** Multímetro digital, osciloscopio (opcional), PC con software de monitoreo.

• Figura 29. Pickit 3



• Fuente: (Elaboración Propia)

Procedimiento:

- Verificación visual del ensamblaje del prototipo.
- Encendido del sistema y validación de que no haya cortocircuitos ni calentamiento de componentes.

Prueba de módulos individuales:

- Sensor(es): comprobar que entregan valores correctos en condiciones conocidas.
- Pantalla/LCD: verificar que muestre la información de forma clara y sin errores.

- Relé o actuador: validar la activación y desactivación según comandos esperados.

Figura 30 prueba en la etapa de control y lcd.

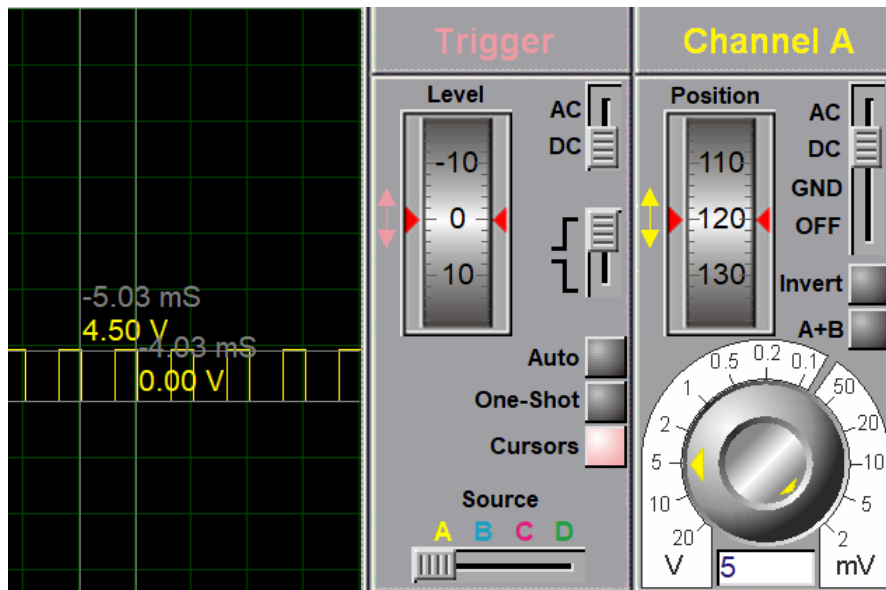


Fuente (Elaboración Propia)

Prueba del sistema completo con una simulación de operación real:

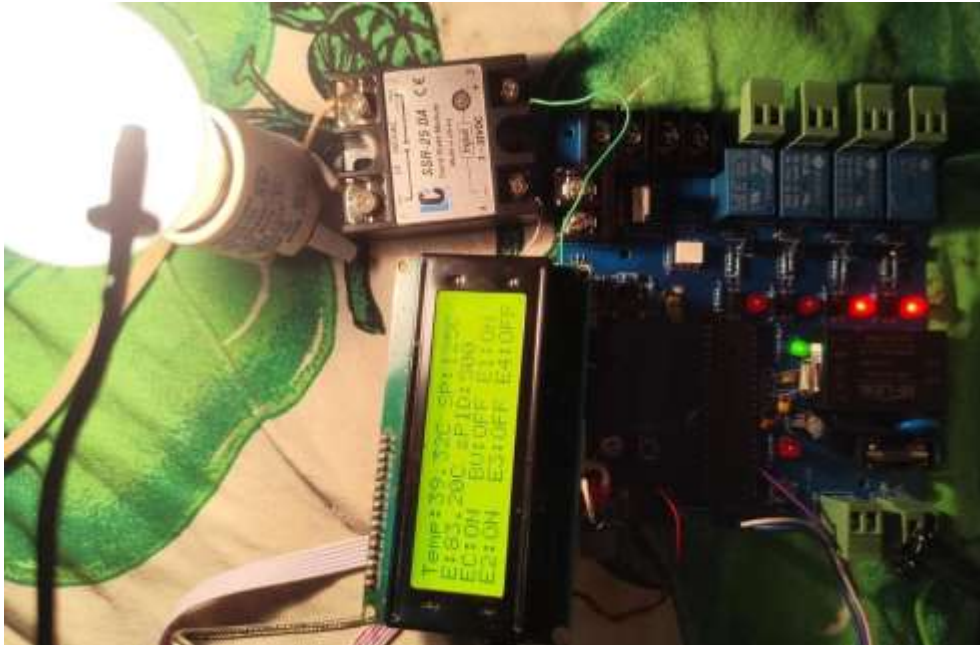
- Simular o generar condiciones reales del entorno (temperatura).
- Observar el comportamiento de control (por ejemplo: activación del calentador cuando se requiere)

Figura 31. PWM 1KHZ



Fuente (Elaboración Propia)

Figura 32 prueba del termopar y elemento calefactor.



Fuente (Elaboración Propia)

Resultados obtenidos:

- **Lectura de sensores:** Correcta / Con margen de error de $\pm 3\%$
- **Visualización:** Mensajes correctos, tiempos de actualización aceptables
- **Respuesta del sistema de control:** El sistema responde adecuadamente a los eventos y condiciones simuladas.
- **Tiempo de respuesta:** $<1>$ ms con respecto a la adquisición de la señal medida.

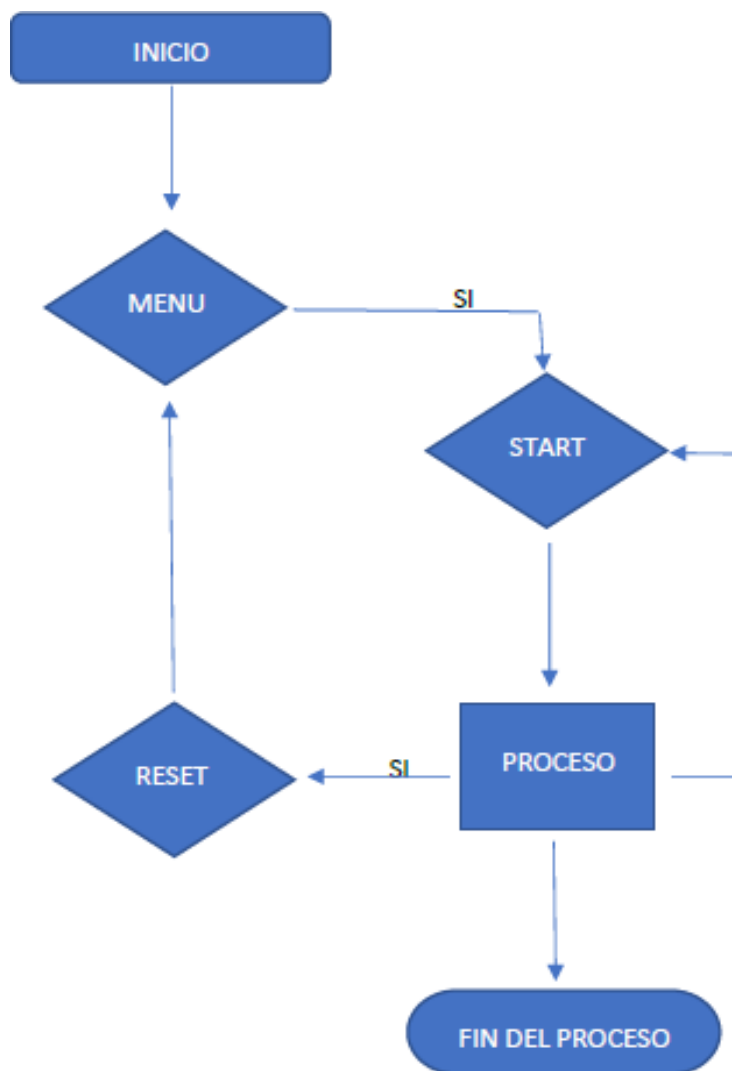
Tabla 4 Lista de Componentes

Componente probado	Resultado	Observaciones
Sensor de temperatura	OK	Lectura estable a 100 °C
TRIAC de calentador	OK	Activación a 134 °C
Pantalla LCD	OK	Visualización clara de parámetros
Algoritmo de control	OK	Responde según lo programado

Fuente (Elaboración Propia)

Diagrama de Flujo:

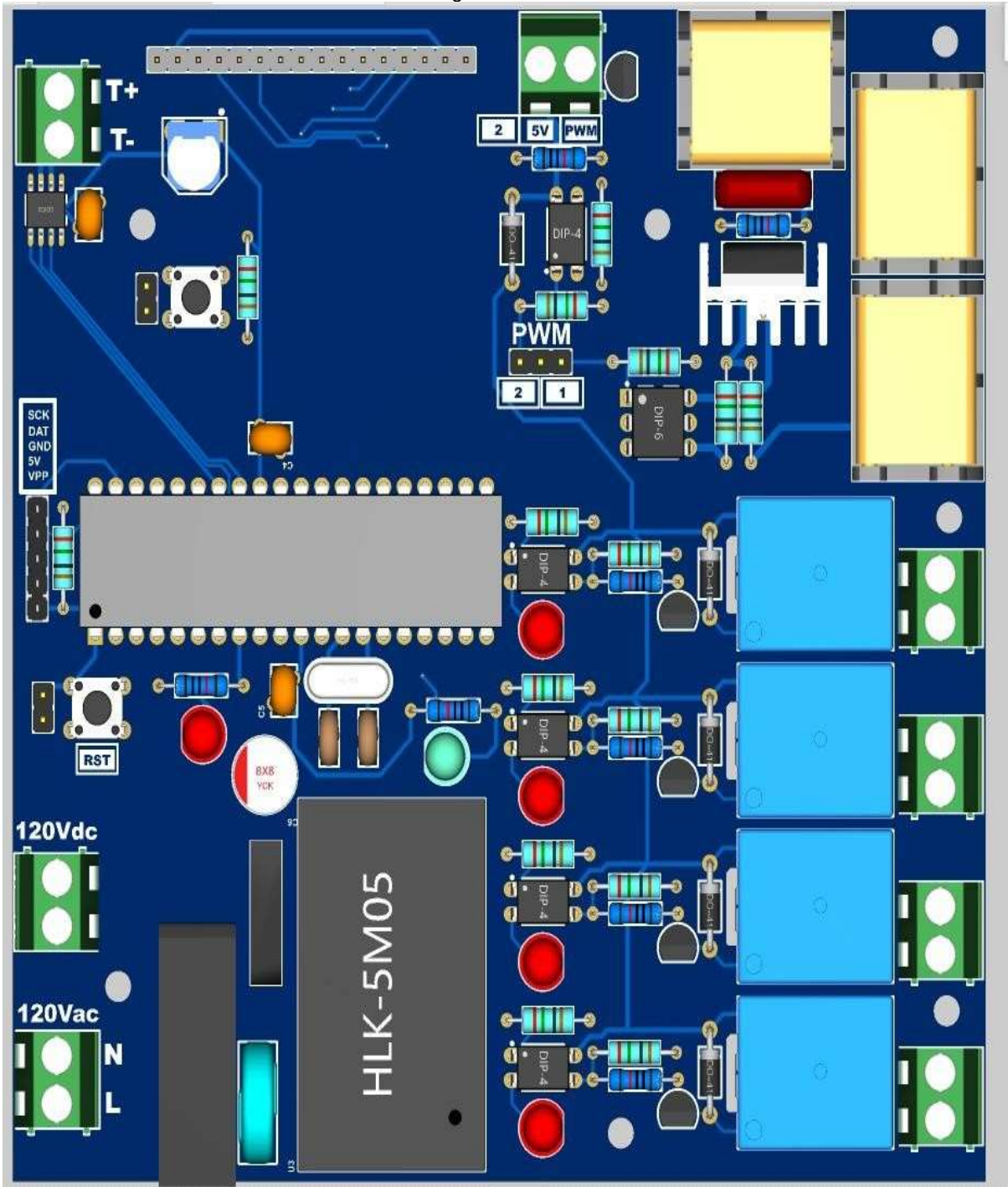
Figura 33. Diagrama de flujo del programa



Fuente: (Elaboración Propia)

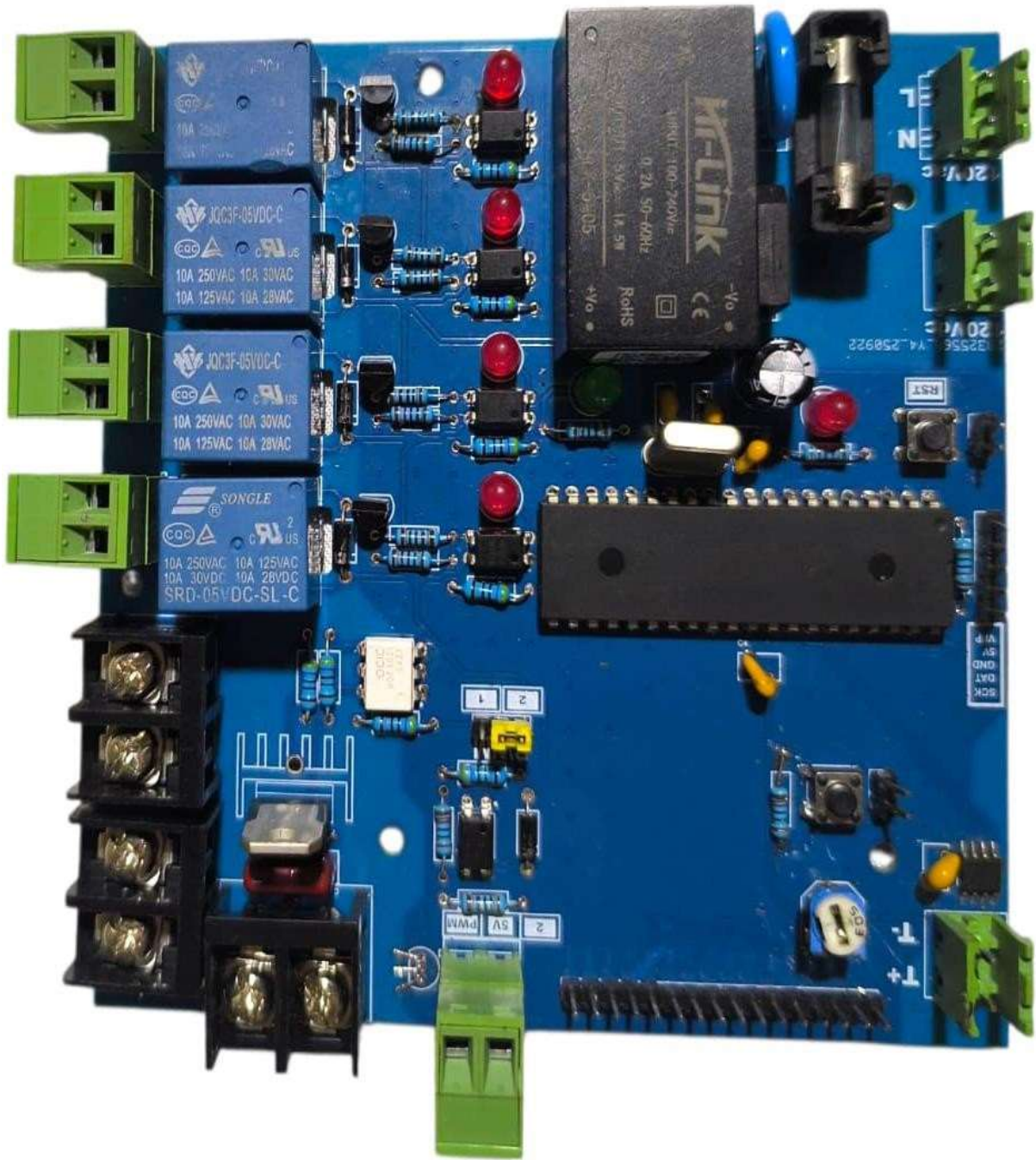
Diseño de la PCB:

Figura 34. Diseño de PCB



Fuente: (Elaboración Propia)

Figura 35. Prototipo terminado



Fuente: (Elaboración Propia)

7. Análisis de costo

La implementación del diseño electrónico para la rehabilitación del proceso de esterilización de la Autoclave RAYPA modelo AH-21DRY implicó una inversión económica significativamente menor que la adquisición de un equipo nuevo.

En la siguiente tabla se presentan los costos asociados a los materiales utilizados en el proyecto:

TABLA 5 LISTA DE MATERIALES

Componente	Designador	Cantidad	Especificaciones Técnicas
PIC18F4550-I/P	U2	1	Microcontrolador 8 bits, 48MHz, 32KB Flash, USB 2.0 Full Speed
Header 40p	-	1	Conector macho 40 pines, paso 2.54mm
Cristal 8 MHz	X1	1	Reloj externo 8 MHz, tolerancia ± 20 ppm
Capacitor cerámico 22pF	C2, C3	2	50V, $\pm 5\%$
Pulsador TS660CJ	SW2, SW1	2	Push button, PCB 6x6mm
Resistencia 10k Ω	R5, R1, R18, R17, R15, R16, R7	7	$\frac{1}{4}W$, $\pm 5\%$
Capacitor 100nF	C4, C5, C10	3	Cerámico, 50V, desacoplo
Resistencia 1k Ω	R9, R22, R21, R19, R20, R6, R8	7	$\frac{1}{4}W$, $\pm 5\%$
LED rojo XL-502SURD	LED2-LED6	5	LED 5mm, Rojo, Vf=2V, If=20mA
MAX6675ISA+T	U1	1	Convertor termopar a digital, SPI, -20 a +85°C
Conector WJ128V-5.0-2P	P1, P2, P11-P10	8	Bornera 5.0mm, 2 pines, 300V/10A
Puente rectificador KBP210	D1	1	2A, 1000V, encapsulado KBP
Fusible xcfuse	F1	1	250V, 2A, rápido
Varistor VDR	R2	1	275VAC, 14mm
Relevador PZ254V-11-05P	H5	1	Relay 5VDC, 10A, SPDT
Optoacoplador MOC3021M	U5	1	Triac driver, LED infrarrojo

Resistencia 470Ω	R10, R23, R24, R14, R13, R11, R12, R4	8	¼W, ±5%
Triac BTA24-600BRG	Q6	1	600V, 25A, TO-220
Disipador HS1	HS1	1	Aluminio, para TO-220
Capacitor 100nF	C7	1	Cerámico, 50V
Resistencia 100Ω	R25	1	¼W, ±5%
Relay SRD-05VDC-SL-C	RLY4, RLY3, RLY1, RLY2	4	5V, 10A, SPDT
Transistor 2N2222A	Q5, Q4, Q2, Q3	4	NPN, 40V, 600mA
Diodo 1N4007	D6, D5, D3, D4	4	1000V, 1A
Regulador LM7805	U9, U8, U6, U7, U4	5	Salida fija 5V, 1A
LED azul XL-502UGD	LED1	1	LED 5mm azul, Vf=3.2V, If=20mA
Conector ZX-PZ2.54-1-16PZZ	J2	1	Conector hembra 16 pines, 2.54mm
Caja prototipo IP65	-	1	Caja plástica IP65, 200x120x75mm
PCB FR-4	-	1	Fibra de vidrio, 1 capa, 5 pies cuadrados

Fuente (Elaboración Propia)

Según cotizaciones actuales de mercado, la adquisición de una autoclave nueva directamente con el fabricante asciende a 6,141 euros, lo que equivale aproximadamente a 6,750 USD.

En comparación, el costo de rehabilitación mediante nuestro diseño fue de tan solo 160 USD, es decir, 2.7% del valor de un equipo nuevo.

Este resultado confirma la viabilidad económica del proyecto, ya que permitió recuperar la funcionalidad del equipo con una inversión mínima en relación con el costo de reposición.

Además, la rehabilitación de la autoclave extiende su vida útil, garantiza la continuidad de los procesos de esterilización en el SILAIS Managua y contribuye a la optimización de los recursos financieros destinados al sector salud.

VII. CONCLUSIONES

En esta sección se presentan las conclusiones derivadas del estudio y se ofrecen recomendaciones basadas en los hallazgos. Se discuten los logros alcanzados, las limitaciones identificadas y las posibles áreas a mejorar para futuras investigaciones o implementaciones.

El diseño e implementación de un nuevo sistema de control electrónico permitió restaurar las funciones esenciales del proceso de esterilización por vapor, devolviendo la operatividad a una autoclave que previamente estaba fuera de servicio.

El uso de un microcontrolador como núcleo del sistema demostró ser una solución eficiente, de bajo costo y adaptable, facilitando el control preciso de variables críticas como la temperatura y el tiempo de esterilización.

Se logró una correcta integración de sensores de temperatura, pantalla de visualización y módulos de activación asegurando la estabilidad y precisión de la información y las respuestas del sistema.

El prototipo desarrollado demostró ser funcional y replicable, lo cual evidencia que este tipo de soluciones pueden ser implementadas en otras unidades de salud con equipos similares, reduciendo costos de reposición mediante la rehabilitación tecnológica.

El proyecto de rehabilitación de la autoclave representó una inversión rentable y estratégica. Los beneficios, como la mejora en la eficiencia del proceso de esterilización, la reducción de errores y el ahorro de recursos, superan claramente los costos del proyecto, asegurando un retorno tangible en desempeño y calidad del servicio.

Este proyecto representa un aporte significativo a la sostenibilidad del sistema de salud pública, al extender la vida útil de un equipo crítico mediante innovación tecnológica local.

VIII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar capacitaciones periódicas para el personal encargado del uso y mantenimiento del sistema, garantizando una correcta operación, interpretación de alertas y respuesta ante fallas.

Para prolongar la vida útil del sistema y asegurar su funcionamiento continuo, es necesario implementar rutinas de revisión, limpieza, verificación de sensores, y pruebas de seguridad eléctrica.

Se recomienda promover activamente la rehabilitación y recuperación de equipos médicos dados de baja, ya que esta práctica genera un impacto técnico, económico y social altamente significativo.

La restauración controlada de estos dispositivos permite:

- **Optimizar recursos institucionales**, reduciendo costos asociados a nuevas adquisiciones.
- **Extender la vida útil de equipos esenciales**, fortaleciendo la cobertura de servicios de salud.
- **Fomentar una cultura de sostenibilidad**, evitando el desperdicio de tecnología que aún puede ser funcional.
- **Desarrollar capacidades técnicas reales**, al permitir que estudiantes y personal en formación trabajen con sistemas médicos reales.

Se insta a los estudiantes a involucrarse en proyectos de rehabilitación, diagnóstico y mejora de estos equipos, ya que trabajar con tecnología médica real les brinda experiencia práctica invaluable.

Además, este tipo de proyectos impulsa la innovación, el pensamiento crítico y el compromiso con la mejora continua de los servicios de salud.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- (2010). En O. Katsuhiko, *Ingeniería de Control Moderna*.
- 330ohms. (s.f.). Obtenido de www.330ohms.com
- Amazon. (s.f.). Obtenido de www.amazon.com
- Arduino.com. (2024).
- Breijo, E. G. (2014). *Compilador C CSS y simulador Proteus para microcontroladores PIC*. MARCOMBO, S.A.
- Controlautomáticoeducación.com. (2024).
- Curso de Electroónica. (s.f.). Obtenido de www.incb.com.mx/curso-de-electronica
- Cursoaula21.com. (2024).
- Cursoaula21.com. (2024).
- Diagrama de Control Difuso. (s.f.). Obtenido de https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Diagrama-a-bloques-del-sistema-de-control-difuso_fig3_338809975
- Elaboración Propia. (s.f.).
- eléctrica, r. (s.f.).
- Figueroa Rodríguez, P. A. (2014). *Diseño de control electrónico de un autoclave de vapor*.
- Huamán Chávez, A. R. (2019). *Diseño e implementación de un sistema de control automático de un esterilizador de instrumentos médicos a vapor para la empresa H. W. Kessel S. A. C.*
- IMB.COM. (2024).
- Integrated, M. (s.f.). *Hojas de datos MAX6675*.
- max6675, D. (2024).
- medicionycontrol.com.co. (2024).
- Medrano y Bolaños. (2024). Managua.
- Microchip. (s.f.). *Datasheet PIC18F450*. Obtenido de datasheet.microchip.com
- Microchip.com. (2024).
- Moderna, I. d. (2010).
- Panorama de América Latina*. (2005). Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/entities/publication/6d840ffe-a52c-46e3-a7d5-1e859f6eaac8>
- Panorama de América Latina*. (2022). Obtenido de <https://www.cepal.org/es/publicaciones/48518-panorama-social-america-latina-caribe-2022-la-transformacion-la-educacion-como>
- Raypa. (01 de Octubre de 2024). Obtenido de www.raypa.com
- Raypa, T. d. (s.f.).
- researchgate.net. (2024).
- SIEMENS.COM. (2024).
- sobremesa, M. R. (s.f.).
- studysmarter.es. (2024).
- virtual.cuautitlan.unam.mx. (2024).

ANEXOS

A.1 Código de Programación Principal en CCS C Compiler

```
#INCLUDE <18f4550.h>
#USE DELAY(CLOCK=8000000,crystal)
#FUSES HS,NOPROTECT,NOWDT,NOBROWNOUT,NOPUT,NOLVP
#use rs232(baud=9600, xmit=pin_c6, rcv=pin_c7, bits=8)
#define TC_CLK    PIN_B1
#define TC_CS    PIN_C0
#define TC_DATA  PIN_B0
#define bStart   PIN_B2
#define R1       PIN_B4
#define R2       PIN_B5
#define R3       PIN_A0
#define R4       PIN_A1
#define R5       PIN_A2
#include "max6675.c"
#include "flex_lcd_20X4.c"

/*Declaración de variables*/
char msg[32];
float tActual = 0, SP = 0, SP1= 125, SP2 = 134, eActual = 0;
float eAnterior = 0, eAnterior2 = 0, kp = 2, ki = 5, kd = 1;
float sPID = 0, sPID1 = 0;
long int sPWM = 0;
boolean bActLCD = false, bActPID = false;
int var8veces = 8;

/*Declaración de funciones*/
```

```

void delay_seconds(int n);

#INT_RTCC //Rutina de servicio de interrupción por TMR0 cada 100mS
serv_int_TMR0(){
    set_timer0(131); //Vuelve a cargar el timer0 con 131
    //Actualización de LCD
    if(bActLCD){ //Si está activa la bandera, se actualiza la LCD
        tActual = do_everything();
        lcd_gotoxy(1,1);
        printf(lcd_putc,"Temp:%3.2fC SP:%.0fC",tActual, SP); //Muestra la temperatura
actual y el set point
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"E:%3.2fC sPID:%ld",eActual, sPWM); //Muestra el error actual y
la salida del PID
    }
    //Ley de Control
    if(bActPID){ //Si está activa la bandera, ingresa a la rutina PID
        tActual = do_everything(); //Lee la temperatura actual
        eActual = SP - tActual; //Calcula el error actual (set point - temperatura actual)

        //sPID: Salida del PID (o ley de control) actual
        //sPID1: Salida del PID (o ley de control) en el muestreo anterior
        //eActual: Error actual, es el set point - temperatura actual
        //eAnterior: Error en el muestreo anterior
        //eAnterior2: Error en dos muestreos anteriores
        //kp: constante proporcional | ki: constante integral | kd: constante derivativa
        sPID = sPID1 + kp*eActual + ki*eAnterior + kd*eAnterior2; //Calcula la salida del
PID
    }
}

```

```

//Se limita sPID a un mínimo de 0 y un máximo de 300°C
if (sPID >= 300.0){
    sPID = 300.0;
}
if (sPID <= 0.0){
    sPID = 0.0;
}

//Llevamos el sPID a bits para el PWM. En este caso su valor máximo es 500,
para un valor máximo de temperatura en el horno de 300°C (estimado)
sPWM = sPID*500/300;
//Implementación del PID calculado:
set_pwm1_duty(sPWM);
//Actualización de valores:
sPID1 = sPID;
eAnterior2 = eAnterior;
eAnterior = eActual;

}

}

void main()
{
//Inicialización de bomba de vacío y electroválvulas (apagadas)
    output_low(R1); //Electroválvula E#1
    output_low(R2); //Electroválvula E#2
    output_low(R3); //Electroválvula E#3
    output_low(R4); //Electroválvula E#4

```

```
output_high(R5); //Bomba de vacio, tiene lógica invertida
```

```
//Inicialización de la LCD
```

```
lcd_init(); //Inicializa la LCD
```

```
//Mensaje de Bienvenida
```

```
lcd_putc("\f"); //borra pantalla
```

```
lcd_gotoxy (1 , 1);
```

```
printf(lcd_putc, " Inicio del ");
```

```
lcd_gotoxy (1 , 2);
```

```
printf(lcd_putc, " Sistema ");
```

```
lcd_gotoxy (1 , 3);
```

```
printf(lcd_putc, " Bienvenidos ");
```

```
lcd_gotoxy (1 , 4);
```

```
printf(lcd_putc, " ");
```

```
delay_ms(200);
```

```
//Inicialización del PWM
```

```
setup_timer_2( T2_DIV_BY_4, 124, 1 ); // Configura Timer2, periodo ajustado a 1mS
```

```
setup_ccp1(CCP_PWM); // Configura el módulo CCP para uso del PWM
```

```
set_pwm1_duty( 0 ); // Asigna el valor inicial del Duty Cycle al PWM
```

```
delay_ms( 5 ); // Retardo de 5ms
```

```
// Configurar Timer0 como temporizador interno con prescaler de 1:64
```

```
// para lograr un tiempo de 100ms
```

```
setup_timer_0(RTCC_INTERNAL | RTCC_DIV_64);
```

```
// Cargar el registro TMR0 con el valor inicial para 100ms
```

```

// Con un cristal de 8MHz y un prescaler de 64, el tiempo de cada
// ciclo del temporizador es de 32 microsegundos. 100ms / 32us = 3125 ciclos
// Para un temporizador de 8 bits, el valor a cargar es 256 - 3125 % 256 = 131
set_timer0(131);

// Habilitar interrupciones por desbordamiento de timer0
enable_interrupts(INT_TIMER0);

// Habilitar interrupciones globales
enable_interrupts(GLOBAL);

while(true){
    while(input(bStart)){ //Espera a que se presione el botón de Start
    }
    delay_ms(100);
    //Visualización inicial en la LCD
    lcd_putc("\f"); //borra pantalla
    lcd_gotoxy (1 , 1);
    printf(lcd_putc, " Inicio del ");
    lcd_gotoxy (1 , 2);
    printf(lcd_putc, " Ciclo ");
    delay_seconds(2);
    lcd_putc("\f"); //borra pantalla
    sprintf(msg,"%3.2fC",do_everything());
    printf("%s",msg);
    lcd_gotoxy (1 , 1);
    printf(lcd_putc, " Temp. Actual: ");
    lcd_gotoxy (1 , 2);

```

```

printf(lcd_putc, "    %s    ",msg);
delay_seconds(2);
lcd_putc("\f");    //borra pantalla
    bActLCD = true;    //Activa la bandera para que actualice la LCD en la rutina de
atención de interrupción por temporización
    delay_ms(2000);

//Al presionar Start se activa la electroválvula E#1
//Se realiza vacío (con una bomba de vacío 120vac) de la recamara por 10 minutos
//La bomba de vacio se conecta a R5
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:OFF BV:ON E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calefactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:OFF E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_high(R1); //Activa E#1
    output_low(R5); //Activa la bomba de vacío
    delay_seconds(600); //Retardo de 10 minutos

//Se desactiva la bomba de vacio
//Se activa la electroválvula E#4 por 5 segundos
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:OFF BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calefactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:OFF E3:OFF E4:ON "); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_high(R5); //Desactiva la bomba de vacío después de 10 minutos
    output_high(R4); //Activa E#4

```

```

delay_seconds(5); //Retardo de 5 segundos

//Se desactiva la electroválvula E#4
//Se activa la electroválvula E#2
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:OFF BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
cafactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_low(R4); //Desactiva E#4
    output_high(R2); //Activa E#2

//Se activa el elemento calefactor para llegar a los 125°C
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
cafactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    SP = SP1; //Cargamos el Set Point de 125°C
    bActPID = true; //Activa la bandera para acceso a la ley de control dentro de la
rutina de servicio de interrupción
    While((tActual < 124)||tActual > 126)){ //Se mantiene a la espera dentro del
loop para valores fuera del rango
    }

//Al llegar a 125°C, se realiza una purga al activar la electroválvula E#3 por un
segundo y
//desactivándola por 15 segundos. Este ciclo se repite 8 veces
    var8veces = 8;

```

```

while(var8veces !=0){
    var8veces--;
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calegfactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:ON E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_high(R3); //Activa E#3
    delay_ms(1000); //retardo de un segundo
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calegfactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_low(R3); //Desactiva E#3
    delay_seconds(15); //retardo de 15 segundos
}

```

//Sigue calentando hasta llegar a los 134°C

//Al llegar a 134°C, realiza una cuenta regresiva de 3 min

```

    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calegfactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    SP = SP2; //Cargamos el Set Point de 134°C
    bActPID = true; //Activa la bandera para acceso a la ley de control dentro de la
rutina de servicio de interrupción

```

```

    While((tActual < 133)||tActual > 135){ //Se mantiene a la espera dentro del
loop para valores fuera del rango
    }
    delay_seconds(180); //Retardo de 3 minutos
    bActPID = false; //Desactiva la bandera para acceso a la ley de control dentro
de la rutina de servicio de interrupción
    //Desactiva el elemento calefactor pasando el PWM a 0% de Duty Cycle
    set_pwm1_duty(0);

//Se activa la electroválvula E#3 durante 3 minutos y luego se desactiva
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calefactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:ON E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_high(R3); //Activa E#3
    delay_seconds(180); //Retardo de 3 minutos
    //Transcurridos los 3 minutos se desactiva la electroválvula E#3
    lcd_gotoxy(1,3);
    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calefactor, la bomba de vacio y la electroválvula 1
    lcd_gotoxy(1,4);
    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:OFF E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4
    output_low(R3); //Desactiva E#3

//Se desactiva la electroválvula E#2 durante 5 minutos,
//al mismo tiempo se activa la bomba de vacío durante 5 minutos
    lcd_gotoxy(1,3);

```

```

    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:ON E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calector, la bomba de vacio y la electroválvula 1

    lcd_gotoxy(1,4);

    printf(lcd_putc,"E2:OFF E3:ON E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4

    output_low(R2); //Desactiva E#2

    output_low(R5); //Activa la bomba de vacio

    delay_seconds(300); //Retardo de 5 minutos

//Transcurridos los 5 minutos se desactivan la electroválvula E#2 y la bomba de
vacio

//También se desactiva la electroválvula E#1

    lcd_gotoxy(1,3);

    printf(lcd_putc,"EC:ON BV:OFF E1:ON "); //Muestra el estado del elemento
calector, la bomba de vacio y la electroválvula 1

    lcd_gotoxy(1,4);

    printf(lcd_putc,"E2:ON E3:ON E4:OFF"); //Muestra los estados de las
electroválvulas 2, 3 y 4

    output_high(R2); //Activa E#2

    output_high(R5); //desactiva la bomba de vacio

    output_low(R1); //desactiva E#1

//Finalización del ciclo y visualización del mensaje de finalización

    bActLCD = false; //Desactiva la entrada a la rutina de actualización de LCD

    bActPID = false; //Desactiva la entrada a la rutina de PID

    lcd_putc("\f"); //borra pantalla

    lcd_gotoxy (1 , 1);

    printf(lcd_putc, "    Ciclo    ");

    lcd_gotoxy (1 , 2);

    printf(lcd_putc, "    Finalizado    ");

```

```
}
```

```
}
```

```
/*Funciones*/
```

```
void delay_seconds(int n) {
```

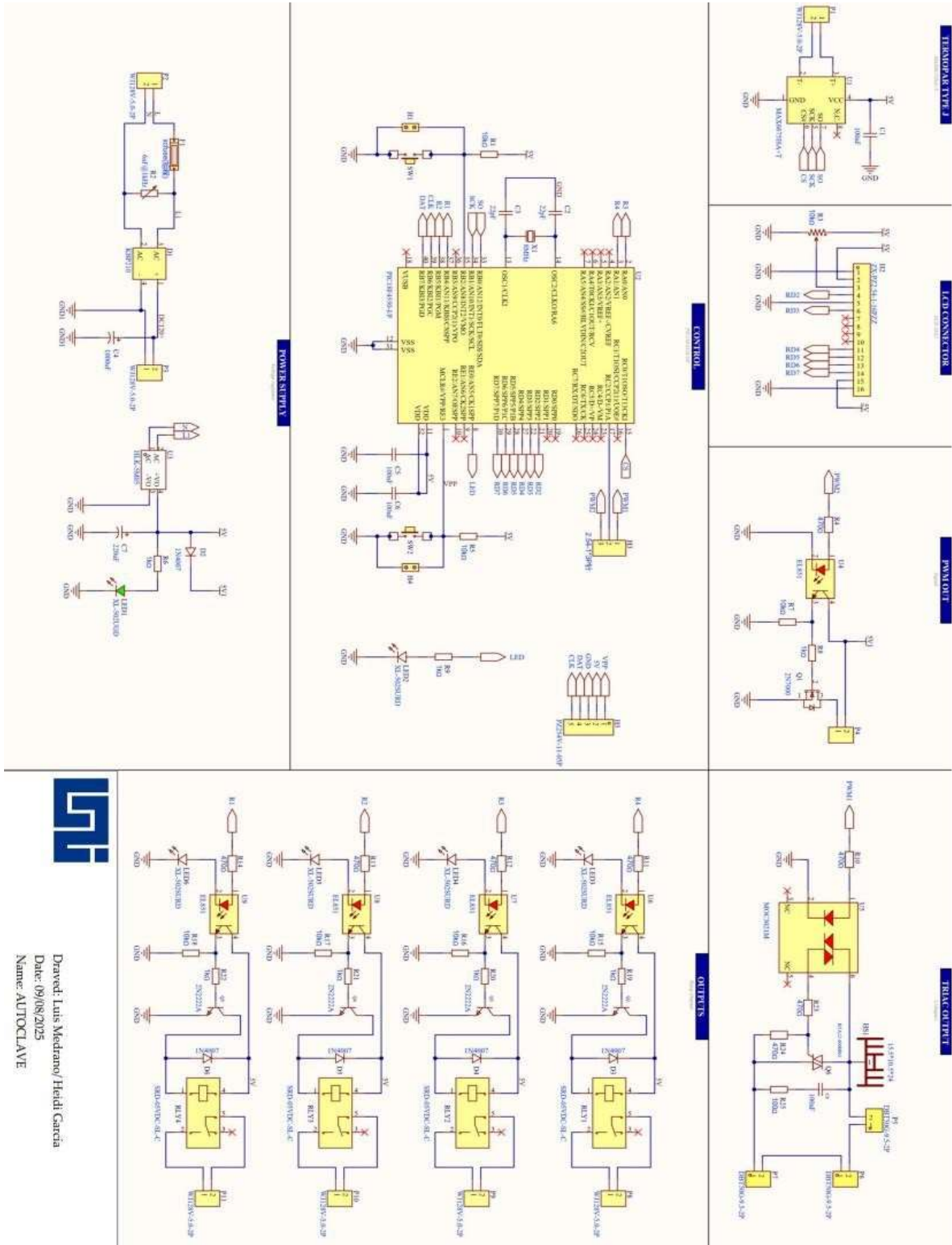
```
    for (;n!=0; n--)
```

```
        delay_ms( 1000 );
```

```
}
```

A.2 Esquemático:

FIGURA A.2. ESQUEMÁTICO



Fuente: (Elaboración Propia)



Diseñador: Luis Medrano/ Heidi Garcia
 Fecha: 09/08/2025
 Nombre: AUTOCLAVE

Cotización de la autoclave AH-21-DRY

R T ESPINAR, S.L. Avinguda del Vallès, 322 Pol. Ind. "Els Bellots" 08227 Terrassa (Barcelona), Spain Tel. +34 937 830 720 raypa@ray pa.com www.ray pa.com CIF: ESB584 68992	SILAIS Managua 4QWH+FQV Managua Nicaragua Sr. Luis Medrano
--	--

Su contacto: Marc Pérez

PRESUPUESTO

NÚMERO	FECHA	VALIDEZ	REFERENCIA
00026321	22/08/2025	21/09/2025	AH-21-DRY

Referencia	Descripción	Cantidad	
AUTOCLAVE HORIZONTAL CON SECADO 21L			
AH-21-L	AUTOCLAVE DE SOBREMESA CON SECADO 22L - MONOFA. 230V HS Code: 8419.89	1	
36007	CAJA DE CARTÓN PALETIZADA Nº 17 (84X72X82 CMS)	1	
			Subtotal:
			6.141,00 EUR

VÍA DE PAGO	Transferencia
-------------	---------------

CONDICIONES DE PAGO	50% CONF.PDO.; 50% ANTES ENVIO
---------------------	--------------------------------

Incoterm:	EXW
-----------	-----

TRANSPORTE	Ciudad: TERRASSA - R T S.L
------------	----------------------------

Subtotal **6.141,00 EUR**