

Universidad Autónoma de Baja California

Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño



Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería

“Diseño del control de temperatura para una autoclave
para aplicaciones en la industria de alimentos y
esterilización de insumos médicos”

Tesis para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

Presenta

ARNULFO COLLINS AMADOR

Director de tesis:

Dr. Juan de Dios Sánchez López

Ensenada, Baja California, enero del 2021.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

“Diseño del Control de Temperatura de una Autoclave para aplicaciones en la industria alimenticia y esterilización de insumos médicos”.

TESIS

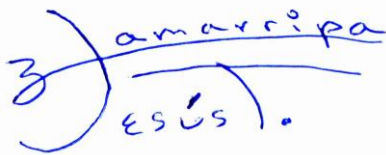
Que para obtener el grado de maestría en ingeniería presenta:

Arnulfo Collins Amador

Aprobada por:



Dr. Juan de Dios Sánchez López
Director de tesis



Dr. José de Jesús Zamarripa Topete
Miembro del comité



Dr. José Luis León Luna
Miembro del comité

Ensenada Baja California, México. Enero 2021

Contenido

Capítulo I	5
1 Introducción.	5
2.- Antecedentes	6
3.- Justificación	7
4.- Objetivos del proyecto	8
5.- Metodología	8
Capítulo II	11
Teoría de operación de la Autoclave.....	11
Capítulo III.....	20
Modelo del sistema Físico de la autoclave y diseño del sistema de control.....	20
Diseño del control de temperatura para la autoclave	20
Introducción	20
Modelo del Autoclave.....	22
Descripción General del Modelo de la Autoclave.....	22
Modelo térmico de la cámara de una autoclave.....	22
Sistema de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID).....	29
Método de Ziegler-Nichols de respuesta al escalón de la planta	30
Método Ziegler-Nichols de respuesta a la frecuencia	32
Capítulo IV.....	35
Metodología y requerimientos para implementación del control de temperatura la autoclave (PLC)	35
Programación de escalera (Ladder).....	36
Descripción del PLC específico.....	37
Descripción de componentes y accesorios utilizados	41
Modulación del ancho de pulso para el control de la energía	45
Esquema a implementar para simular el control de temperatura de la autoclave	47
Capitulo V.....	48

Implementación, experimentos y resultados	48
Integración de la autoclave	48
Implementación del control PID en el PLC.....	48
Programa de la autoclave usando control PID.....	48
El Vector de autoajuste o autotune.	49
Resultados	65
Capítulo VI.....	69
Conclusiones	69
Bibliografía	71

Capítulo I

I Introducción.

En la industria alimenticia son muy necesaria las autoclaves para generar vida de anaquel en los productos que se esterilizan en su interior, y en el ramo hospitalario y médico, también es muy conocido la importancia de tener equipo confiables que puedan esterilizar adecuadamente los instrumentales e insumos médicos. Pero también es bien sabido que la gran mayoría de estos equipos son de procedencia extranjera. Pudiendo ser desarrollados con tecnología mexicana, atendiendo los requerimientos de los campos de investigación, industria alimenticia y médica, así como el ramo hospitalario médico.

Actualmente hay equipos de diversos tamaños en la industria alimenticia y con diferentes propósitos. Ya sea para esterilizar latas, frascos y bolsas asépticas, entre otros envases.

En el ramo médico, en los hospitales para esterilizar instrumental, batas, insumos médicos, etc., y los equipos para esterilizar son más pequeños que en la industria, pero siguen los mismos conceptos y controles, con diferentes procesos (temperaturas y tiempos). Es de suma importancia mantener la seguridad higiénica, en un hospital, sobre todo si se practican operaciones quirúrgicas. Pero también aquí encontramos muchos equipos de procedencia extranjera, y algunos de estos son equipos nacionales, y algunos tienen deficiencias de fabricación, por el uso de materiales y componentes eléctricas de baja calidad.

El enfoque de este trabajo de tesis es el desarrollo de equipo seguro, normativo, y confiable en su operación y uso.



Figura 1 Diferentes tipos de autoclaves comerciales

2.- Antecedentes

Desde la primera autoclave fabricada por Charles Chamberland, que trabajó con Pasteur en el desarrollo de la pasteurización, creó la autoclave en 1879.

Una autoclave esteriliza los objetos calentándolos con vapor. Algunas temperaturas comunes a las que opera un autoclave son: 115 grados C/10 p.s.i., 121 grados C/15 p.s.i., y 132 grados C/27p.s.i (p.s.i., en inglés libras por pulgada cuadrada). La temperatura, presión y tiempo de funcionamiento dependen del grado de esterilización necesario.

Una autoclave funciona con configuraciones estándar para matar a la mayoría de las bacterias, esporas, virus y hongos. La mayoría de los consultorios médicos, gabinetes de tatuajes, consultorios odontológicos y otros lugares donde los instrumentos utilizados pueden estar en contacto con contaminantes, tienen un pequeño autoclave para la esterilización.

Los hospitales utilizan grandes autoclaves para esterilizar muchos objetos a la vez. El calor mata a los microorganismos haciendo que sus proteínas vitales coagulen. Las proteínas se pegan unas a otras provocando un daño que es letal para los microorganismos. El autoclave cocina los microorganismos de la misma manera que una olla a presión cocina la comida, pero a una mayor temperatura. Estas máquinas utilizan vapor en lugar de calor seco debido a que el vapor transmite el calor más eficientemente a los microorganismos.

Actualmente existen procedimientos por organismos autorizados como la FDA, COFEPRIS, etc. Y agencias certificadoras que aprueban los equipos para el uso industrial y médico.

En el diseño de autoclaves, parte de la seguridad está determinada por los muchos factores como la estructura metálica que resista a los esfuerzos mecánicos de la presión y de la temperatura.

Los controles mecánicos sobre que controlan el vapor, y toda la instrumentación complementa con los controles eléctricos y electrónicos, que aseguran la operación y la seguridad con instrumentos calibrados para procesos térmicos de esterilización de alimentos e insumos médicos.

Es determinante que el circuito de control opere confiable y los controles tengan capacidad de programación amigable para garantizar que el proceso térmico determinado para la eliminación de bacterias, hongos, virus y otros organismos, se ejecute a la perfección al momento de operar la autoclave, además que los controles sean capaces de guardar registros y memorias digitales de la historia del proceso.

3.- Justificación

Las autoclaves tienen muchos campos de aplicación, en el área de alimentos, en el ramo médico, y también en el área de investigación.

Se puede lograr diseñar una autoclave, con el sistema de control compatible para varios tamaños según sea el proceso térmico a esterilizar y el campo de aplicación.

Actualmente la industria alimenticia, y las áreas médicas e investigación, invierten en equipo extranjero en su gran mayoría. Y ajustan sus trabajos al presupuesto y al equipo adquirido, sin considerar la funcionalidad. Es aquí donde este trabajo de tesis busca impactar, con el fin de iniciar el conocimiento básico para la implementación de este tipo de aparato, de tanta utilidad en la industria y en el sector salud.

4.- Objetivos del proyecto

Diseñar el sistema de control de temperatura de una autoclave pequeña para aplicaciones en la industria alimenticia y para usos médicos (hospitalarios, clínicos, y esterilización de instrumentos quirúrgicos), economía, bajo costo y dirigida a los pequeños productores de alimentos, clínicas pequeñas (privadas y públicas) y para instalaciones donde se realiza investigación y se requieren pequeñas unidades de esterilización ó con características específicas de esterilización.

Basándose en un modelo de autoclave con control eléctrico, que reúna los requisitos de esterilidad y confiabilidad. Es decir cumpla con los lineamientos de las normas mexicanas de seguridad alimentaria, especificadas en la COFEPRIS. Así mismo cumpla con los requisitos de buenas prácticas de manufactura de equipos.

Si bien en esta tesis se mencionan modelos y técnicas de control basados en la teoría del control clásica, el enfoque de este trabajo está basados en aspectos y métodos prácticos tal como se enfrentaría un profesional en campo.

5.- Metodología

- A) Se hará un estudio del estado de la técnica, en diferentes bases de datos y en artículos técnicos, para determinar una oportunidad de innovación.
- B) Revisar la normatividad nacional e internacional relacionada.
- C) Selección de los diferentes componentes involucrados en el control, medición y seguridad.
- D) Simulación.
- E) Posible implementación del proyecto si se dispone del material.

Desarrollar el diseño del control de una autoclave, alto grado de seguridad, confiabilidad y amigable para la operación en aplicaciones de la industria alimenticia y del ramo médico, en apego a las normas mexicanas e internacionales.

La estructura de la tesis es la siguiente: en el capítulo II se explica de forma breve el funcionamiento de las autoclaves y su aplicación en la industria alimenticia y médica. En el capítulo III se presentan de forma resumida el modelo matemático básico de las autoclaves, así la forma básica de los sistemas de control PID, que es uno de los más utilizados en la industria. En el capítulo IV se presentan los componentes básicos para el control de la autoclave y su utilización. En parte correspondiente al capítulo V se aborda el problema sobre la autoclave particular a implementar/simular, así como los resultados obtenidos e por último las conclusiones son presentadas en el capítulo VI.

Capítulo II

Teoría de operación de la Autoclave

Desde la primera autoclave fabricada por Charles Chamberland, que trabajó con Pasteur en el desarrollo de la pasteurización, creándose con esto, la primera autoclave en el año de 1879. Una autoclave esteriliza los objetos calentándolos con vapor. Algunas temperaturas comunes a las que opera un autoclave son: 115 grados C/10 psi, 121 grados C/15 psi., y 132 grados C/27p.s.i (psi., en inglés libras por pulgada cuadrada). La temperatura, presión y tiempo de funcionamiento dependen del grado de esterilización necesario.

Una autoclave funciona con configuraciones estándar para matar a la mayoría de los microorganismos como: bacterias, esporas, virus y hongos, (1), (2). La mayoría de los consultorios médicos, gabinetes de tatuajes, consultorios odontológicos, y otros lugares donde los instrumentos utilizados pueden estar en contacto con contaminantes, tienen un pequeño autoclave para la esterilización.

Los hospitales utilizan grandes autoclaves para esterilizar muchos objetos a la vez. El calor mata a los microorganismos haciendo que sus proteínas vitales coagulen. Las proteínas se pegan unas a otras provocando un daño que es letal para los microorganismos.

La autoclave mediante el calor del vapor esteriliza su contenido y aniquila los microorganismos, con temperaturas y presiones de vapor determinadas, este proceso térmico es estudiado y determinado por autoridades en análisis de microorganismos, y autorizan el manejo apropiado para esterilizar cada organismo en la autoclave.

Estas máquinas utilizan el vapor para transmitir el calor, la presión y por el tiempo predeterminado en su interior para esterilizar su contenido y aniquilar eficientemente a los microorganismos

Actualmente existen procedimientos por organismos autorizados como la FDA, COFEPRIS, etc. Y agencias certificadoras que aprueban los equipos para el uso industrial y médico (3), (4).

En el diseño de autoclaves, parte de la seguridad está determinada por los muchos factores como la estructura metálica que resista a los esfuerzos mecánicos de la presión y de la temperatura.

Los controles mecánicos para el vapor, los controles eléctricos y electrónicos, que aseguran la operación y la seguridad con instrumentos calibrados para los diversos procesos térmicos de esterilización de insumos médicos.

Es determinante que la automatización de la autoclave opere confiable y tenga capacidad de programación de los diversos ciclos de esterilización, para garantizar que el proceso térmico determinado elimine las bacterias, hongos, virus y otros organismos. Se ejecute a la perfección al momento de operar la autoclave, además que el sistema de automatización sea capaz de guardar registros y memorias digitales de la historia del proceso.



Figura 2. Ejemplo de autoclaves comerciales para uso médico

En la figura 2 se muestran diferentes vistas externas de una autoclave comercial para uso médico y en la figura 3 se muestra el ciclo típico de una autoclave comercial genérica. En esta figura se muestra cómo responde el interior de la autoclave ante la aplicación de calor, observándose un retardo en el calentamiento en el retardo de la autoclave y un mayor retardo para el caso de la solución de líquidos dentro de un recipiente colocado en el interior de la autoclave.

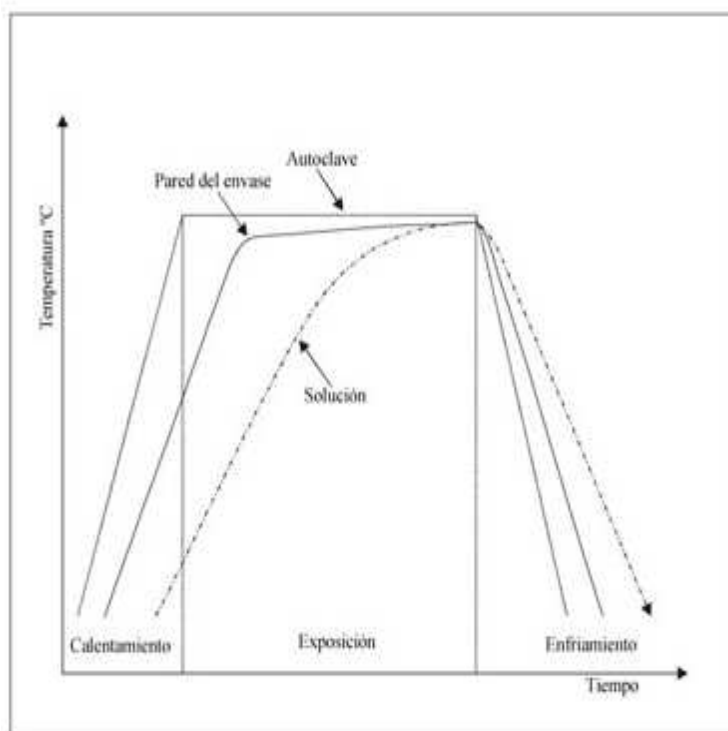


Figura 3. Comportamiento de una autoclave durante el proceso de incremento del calor, mantenimiento de la temperatura y enfriamiento.

En la industria de alimenticia, farmacéutica y en hospitales tienen procedimientos muy estrictos en cuanto a la preparación de productos para esterilizar, y los ya esterilizados, por lo que el equipo emitirá un comprobante impreso y digital, para cumplir esta parte. En la figura 4 se muestra una tabla con las especificaciones del ciclo en términos de tiempo y temperatura para lograr la esterilización de ciertos productos.

PARÁMETROS Y UTILIZACIÓN DE LOS PROGRAMAS INCLUIDOS EN EL AUTOCLAVE
(Nota: Todos estos parámetros son modificables por el usuario).

N° de programa	Utilización	Temperatura esterilización	Tiempo esterilización	Tiempo secado	Fraciones
0	Libre	-	-	-	-
1	Instrumental NO embalado	134 °C	4 min	15 min	2 (1)
2	Instrumental embalado	134 °C	12 min	30 min	3 (2)
3	Priones	134 °C	20 min	20 min	3 (2)
4	Delicado NO embalado	121 °C	15 min	15 min	2 (1)
5	Delicado embalado	121 °C	30 min	30 min	3 (2)
6	Desinfección	105 °C	25 min	15 min	1 (3)
7	Líquidos	121 °C	30 min	-	1 (3)
8	Sólidos	121 °C	15 min	30 min	1 (3)
9	Sólidos	134 °C	4 min	30 min	1 (3)

(1) Purgado con dos fracciones de vacío.
(2) Purgado con tres fracciones de vacío.
(3) Purgado atmosférico (sin vacío).

Figura 4. Tabla de parámetros de esterilización

De la tabla anterior se puede observar que tres parámetros son importantes según el producto que se busca esterilizar, que son la temperatura de esterilización, el tiempo de esterilización y el tiempo de secado. Otra consideración es el purgado requerido para producir cambios en la presión en el interior de la autoclave.

El proceso de esterilización involucra también el manejo de presión para lograr la eliminación de patógenos, tal como se muestra en la figura 5.

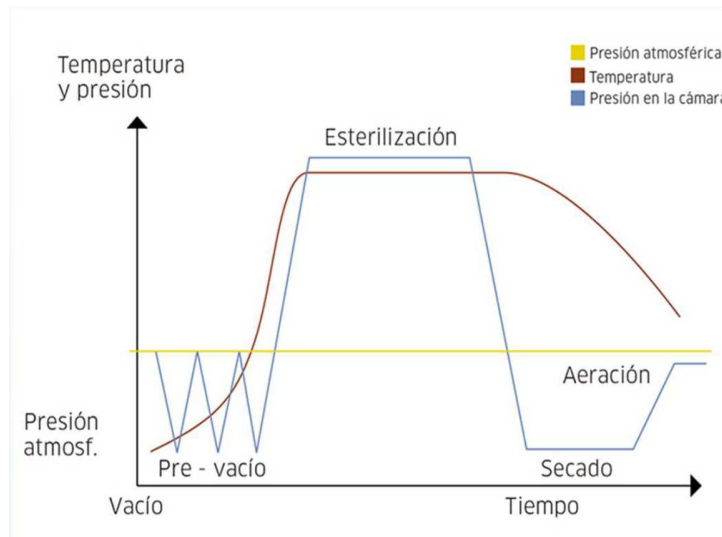


Figura 5. Proceso térmico de un Ciclo de esterilización

El vapor de agua es un excelente agente para transferir energía térmica a cuerpos dentro de una autoclave en comparación de las moléculas de aire seco por En el proceso de esterilización con calor húmedo, las moléculas de agua condensan sobre las superficies más frías y transfieren aproximadamente 2500 J por gramo de vapor. Esta cantidad de energía eleva la temperatura de los microorganismos hasta niveles que los destruye o elimina su capacidad de ser patógenos.

La mayoría de microbios mueren a partir a de 80 °C pero otros agentes patógenos, como priones o esporas de hongos y bacterias, necesitan de una temperatura mayor y más tiempo para su destrucción e inactivación. Una temperatura de las más utilizadas en autoclaves es **121 °C durante 15 – 20 minutos**, tal como se muestra en la figura 4, aunque dependen del tamaño de la carga y el contenido que se desea esterilizar. Otra temperatura común son 134 °C durante 3 minutos. No obstante, el proceso completo puede durar hasta 1.5 horas, incluyendo el tiempo requerido para presurizar, despresurizar y enfriar (5).

Para conseguir el máximo efecto del vapor de agua, el aire dentro de la autoclave deberá alcanzar el **punto de saturación**, que a las temperaturas utilizadas en la autoclave suele ser una humedad relativa del 3 – 5%. Al estar saturado, que es cuando las moléculas de agua condensan en las superficies frías, el volumen se reduce y crea un efecto de succión del vapor hacia el material y permite una **gran penetración del vapor**, mejorando el proceso de esterilización.

Se requiere de aire seco a fin de alcanzar la saturación, el cual se puede obtener por medio de diferentes métodos entre los que se tiene el desplazamiento por gravedad y el uso de bombas de vacío. En el primero se aprovecha que el vapor más caliente ocupa la parte superior del interior de la autoclave y la parte baja es ocupada por el aire, más denso que el vapor, el cual puede ser drenado por medio del control de una válvula automática (que pudiera ser actuada por solenoide de forma que permita el control eléctrico)



Figura 6. Válvula controlada por solenoide

En el segundo de los casos, una bomba succiona el aire del interior de la autoclave. En la siguiente figura se muestra la forma básica el funcionamiento de una autoclave.

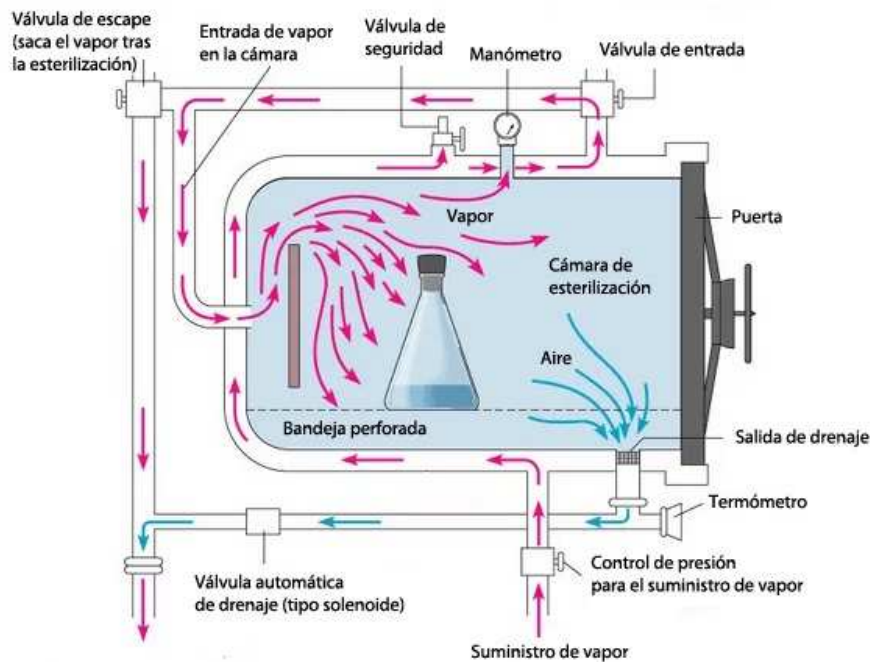


Figura 7. Diagrama básico de una autoclave y descripción del funcionamiento

En la figura 7 se muestra en forma gráfica la operación de la autoclave antes descrita. Se puede observar que adicionalmente la autoclave requiere de instrumentación para la lectura de temperatura y presión, control de temperatura y control de presión, así como válvulas de seguridad

Para lograr lo anterior la autoclave requiere de varios componentes y funciones: 1) Generador de vapor y suministro del mismo. 2) Fase de previa y posterior al vacío del ciclo de esterilización. 3) La cámara de la autoclave. 4) Proceso de Enfriamiento. 5) Sistemas de control de la autoclave.

Los puntos 1, 2, 3 y 4 cuatro se explicaron de forma general en líneas anteriores. En el capítulo 3 se explicará a detalle la parte de los sistemas de control.

Otro punto a considerar y que es de suma importancia, es el costo de operación y mantenimiento de un autoclave. Un autoclave para uso de laboratorio

médico tiene un rango de consumo de entre 32 a 630 kW-h/semana (1664-32760 kW-h/año) dependiendo de varios factores como tamaño, tamaño de las cargas, tiempo de utilización, etc. Esta es otra de las razones por la que es importante investigar el desempeño de este tipo de equipos, que podría ser prohibitivo sobre todo para industrias o laboratorios pequeños (5).

Capítulo III

Modelo del sistema Físico de la autoclave y diseño del sistema de control

En este capítulo se mostrará con fines ilustrativos diferentes enfoques y modelos de un sistema de control de temperatura tal como el que requiere una autoclave, si bien en el trabajo se tomará un enfoque práctico, basados en la obtención de los parámetros de control por medio de “autotuning” (6), (7), (8).

Una autoclave consiste básicamente en un recipiente hermético aislado en el cual se suministra energía en forma de calor produciendo en su interior un incremento de temperatura y presión, la que posteriormente se enfría y en algunos casos se induce un vacío para secar el producto al que se somete el proceso.

Diseño del control de temperatura para la autoclave

Introducción

El propósito de un sistema de control de un proceso, es el de mantener la variable de interés del proceso en un valor determinado o por lo menos cercano a él, sin importar los disturbios o u otros efectos adversos, (9) (10). Esto se logra utilizando por medio de la realimentación de la señal de salida y compararla con la señal de entrada, la diferencia es la señal de error “e”, la cual en el caso ideal debería ser cero.

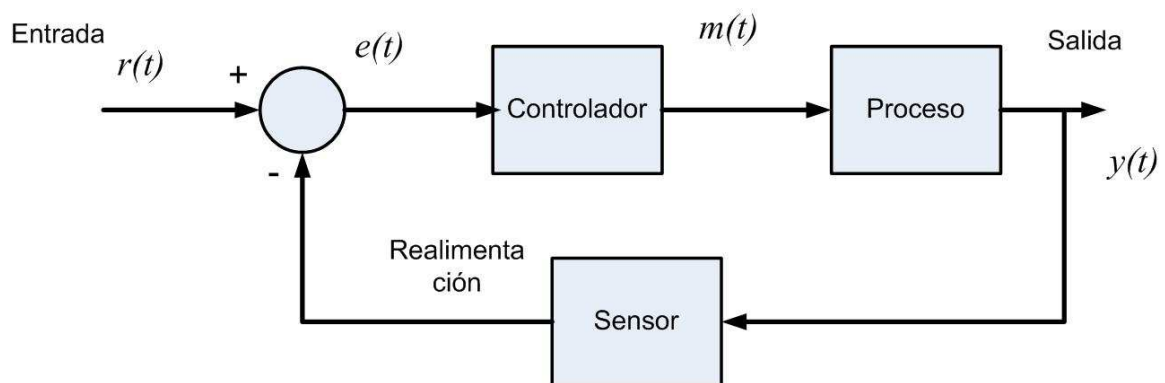


Figura 8. Diagrama a bloques de un sistema de control realimentado.

En el diagrama de bloque mostrado, se puede ver que el sistema está formado en su forma básica por dos bloques, el controlador, el proceso y un punto de suma que realiza la suma algebraica entre el valor establecido o deseado de la variable a controlar y la variable de salida del proceso o planta.

El controlador ejerce una acción, sobre el proceso, para que con ayuda de la realimentación, de hacer cero o reducir dentro de un rango deseado la señal de error.

Suponiendo que la variable del proceso sea mayor que el valor deseado, el error tendrá un valor negativo, reduciendo la señal de salida del controlador, que a su vez reduce la señal de salida del proceso. En el caso contrario, es decir si el error es positivo debido a que la señal de salida del proceso es menor que el valor pre-establecido o deseado de la variable a controlar, la salida del controlador se incrementará ocasionado que la salida del proceso sea aproximado al valor establecido reduciendo o anulando el error. A esto se le llama realimentación negativa. El proceso a controlar o planta puede ser de diferente naturaleza física, tales como calderas, sistemas de posición, control de velocidad de motores, etc.

El lazo de control trabajará adecuadamente si los diferentes parámetros del controlador están ajustados adecuadamente. Caso contrario el controlador se desempeñara de manera deficiente y el sistema podría convertirse en inestable. Básicamente hay toda una teoría para analizar y diseñar sistemas de control realimentados. Para este trabajo nos enfocaremos en los sistemas de control con control proporcional-integral-derivativo.

Modelo del Autoclave

Para la realización de un sistema de control se requiere entre otras cosas tener conocimiento de del comportamiento de la planta proceso ó sistema a controlar.

En el caso de las autoclaves diversos modelos matemáticos han sido estudiados (11). En general en una autoclave se busca tanto controlar la presión como la temperatura, para lo cual requiere de vapor o resistencias eléctricas, un mecanismo de enfriamiento, y un sistema de control de la presión interna

Descripción General del Modelo de la Autoclave

Básicamente un autoclave es un recipiente que contiene la presión en su interior, y en la cual algunas se utilizan para curar materiales, esterilizar artículos, alimentos y un otras aplicaciones. Normalmente son de acero inoxidable y aislado térmicamente. En general las autoclaves pueden tener tres ciclos que involucrarían tres sistemas de control, que son el calentamiento de su interior, el manejo de su presión interior, y un periodo de enfriamiento, lo que nos lleva a la formulación de tres modelos. Teorías de control avanzado podría ser utilizados ya que como es sabido la relación entre la temperatura y presión en un gas se rige por la **ley general de los gases** (leyes de la física) por lo cual lo podemos considerar como un sistema multivariable, y para un control más preciso es necesario considerar la interdependencia entre las variables. Sin embargo para este trabajo se controlarán por separado.

Modelo térmico de la cámara de una autoclave

El modelo de la planta o proceso térmico del autoclave se muestra en la figura 9, y el cual físicamente consiste en un cilindro hecho de metal y con sus paredes aisladas térmicamente y en su interior pueden tener una plataforma para colocar los artículos a procesar con la autoclave

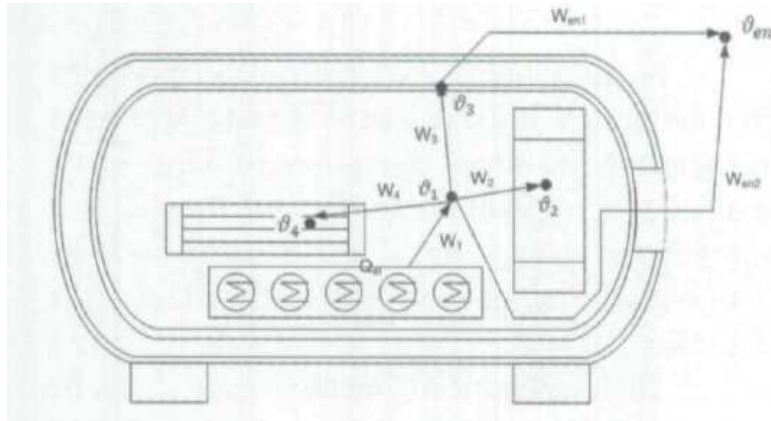


Figura 9 Modelado de autoclave de acuerdo a referencias (11) y (10).

En el proceso el flujo de calor se rige por (11):

$$W_1=Q \quad (1)$$

Donde W_1 es el flujo de calor desde de los calentadores al aire en el interior del autoclave y Q es el calor suministrado (caldera, calentador electrico, en W ; W_2 es el flujo de calor entre el interior del autoclave (aire) hacia la pared de l a autoclave se define por (11):

$$W_2 = \frac{(T_1-T_2)}{\theta_{am}} \quad (2)$$

En donde T_1 es la temperatura del aire en el interior del autoclave, T_2 la temperatura en la pared del autoclave (Metalica) y θ_{am} es la resistencia térmica entre el aire y el metal . W_3 es el flujo de calor entre el metal del recipiente y el aire circundante exterior a través del aislante y es determinado por la ecuación #3

$$W_3 = \frac{(T_2-T_A)}{\theta_{mic}} \quad (3)$$

En donde T_A es la temperatura ambiente y θ_{ac} es la resistencia térmica entre el aire y la cubierta aislante del metal. Considerando además W_4 como el flujo de aire del metal al material en el interior del autoclave y W_{ma1} como el flujo desde la

cubierta de metal al ambiente a través del material aislante y W_{ma2} es el flujo desde la cubierta de metal al ambiente externo sobre metal sin aislamiento, esto es:

$$W_4 = \frac{(T_1 - T_4)}{\theta_{miA}} \quad (4)$$

$$W_{ma1} = \frac{(T_3 - T_A)}{\theta_{ca}} \quad (5)$$

$$W_{ma2} = \frac{(T_1 - T_A)}{\theta_{aA}} \quad (6)$$

Con θ_{miA} , θ_{cA} , θ_{aA} , son las resistencias térmicas entre: el aire y el material del autoclave, entre la cubierta de metal y el ambiente y entre el aire dentro del autoclave y el ambiente a través del metal no aislado respectivamente. T_3 y T_4 es la temperatura entre la cubierta de metal y la del material respectivamente.

Lo anterior es considerando la autoclave libre de producto en su interior. Las ecuación de balance energía del sistema para sistemas concentrados.

$$\begin{bmatrix} \text{Cambio de} \\ \text{energía} \\ \text{almacenada} \\ \text{en el sistema} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Flujo de} \\ \text{calor de} \\ \text{entrada al} \\ \text{sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{Flujo de} \\ \text{calor de salida} \\ \text{al} \\ \text{sistema} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Calor} \\ \text{generado} \\ \text{en el interior} \\ \text{del sistema} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \text{trabajo} \\ \text{producido} \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior para nuestro sistema térmico se puede expresar como

$$c_p V \frac{dT}{dt} = Q_{ent} - Q_{sal} + Q_{gen} + \frac{dW}{dt} \quad (7)$$

en donde c_p es el calor específico y V es volumen (constante). De la ecuación de balance de energía adecuada a los anteriores parámetros se tiene

$$\frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{m_a c_a} (W_1 - W_2 - W_3 - W_{mA2}) \quad (8)$$

$$\frac{dT_2}{dt} = \frac{1}{m_m c_m} (W_4) \quad (9)$$

$$\frac{dT_3}{dt} = \frac{1}{m_c c_c} (W_3 - W_{mA1}) \quad (10)$$

$$\frac{dT_4}{dt} = \frac{1}{m_{mt} c_{mt}} (W_4) \quad (11)$$

en donde m_a , m_m , m_c y m_{mt} son las masas de aire, metal, capa del metal y del material a someter en el autoclave respectivamente (en kilogramos, kg en el sistema métrico) y c_a , c_m , c_c y c_{mt} sus respectivos calores específicos (en $[J/(kg/K)]$), m_a es la masa del aire dentro del autoclave en [kg], c_a es el calor específico del aire en $[J/(KgK)]$

Se puede observar que de lo anterior que un modelo de la autoclave mas completo puede ser bastante complejo y posiblemente deje de ser práctico para fines de diseño e implementación en escenarios reales debido a que hay variables múltiples así como varios disturbios que son difícil de caracterizar y que posiblemente sean superfluos para muchas de las aplicaciones. Los modelos complejos buscan sobre todo tener una precisión en el control de las variables que posiblemente no sea necesario en la mayoría de los casos

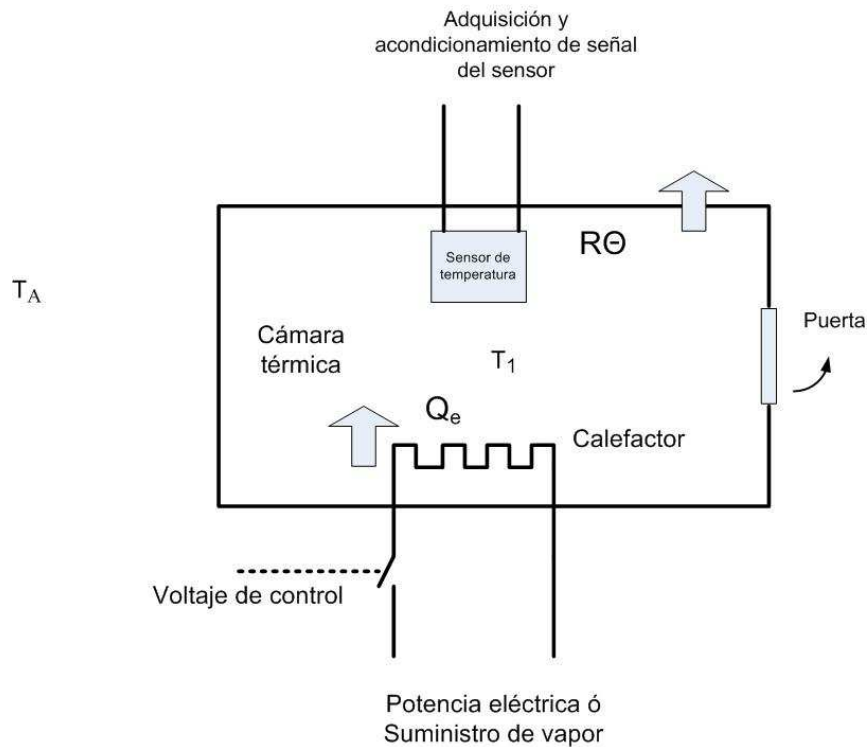


Figura 10. Esquema básico de un recipiente térmico aislado, que modela el recipiente del autoclave de forma simplificada.

Una versión simplificada del modelo se presenta a continuación, en la cual podemos ver que el sistema es de primer orden y básicamente describimos los mecanismos de entrada de calor y pérdida de calor por algún disturbio.

Entonces la ecuación anterior queda en una forma más simple

$$Q_{ent} = C \frac{dT}{dt} + Q_{sal} \quad (12)$$

Donde C es la capacitancia térmica en el interior del recipiente o tanque de la autoclave. Q_{sal} se debe a las pérdidas debidas a las de calor a través del recipiente y están definidas por:

$$Q_{sal} = \frac{(T_1 - T_A)}{R\theta_{miA}} \quad (13)$$

Sustituyendo en la ecuación anterior y despejando se tiene

$$Q_{ent} = C \frac{dT}{dt} + Q_{sal} \quad (14)$$

Después de aplicar la transformada de Laplace de resolviendo para la temperatura en el interior del recipiente, la cual es una de las variables a controlar, se tiene:

:

$$T(s) = \frac{Q_e}{C(s+1/CR\theta_{miA})} + \frac{T_A}{c(s+1/CR\theta_{miA})} \quad (15)$$

Si ignoramos el segundo elemento de la ecuación el cual es un disturbio, nos queda un sistema de primer orden.

$$T(s) = \frac{Q_e}{C(s+1/CR\theta_{miA})} \quad (16)$$

Un modelo simple y linealizado para la autoclave tanto para calentamiento-enfriamiento así como para el proceso de presión interna de autoclaves se ha utilizado para analizar el comportamiento de diversos tipos de estructuras de control [Preglej] y es de la forma:

$$G(s) = \frac{\beta}{as+1} e^{-\gamma s} \quad (17)$$

Donde α , β son constante y γ constante positiva

Para parámetros típicos del tanque de una autoclave se tiene el siguiente comportamiento ante una entrada escalón unitario, el cual se muestra en la figura 11.

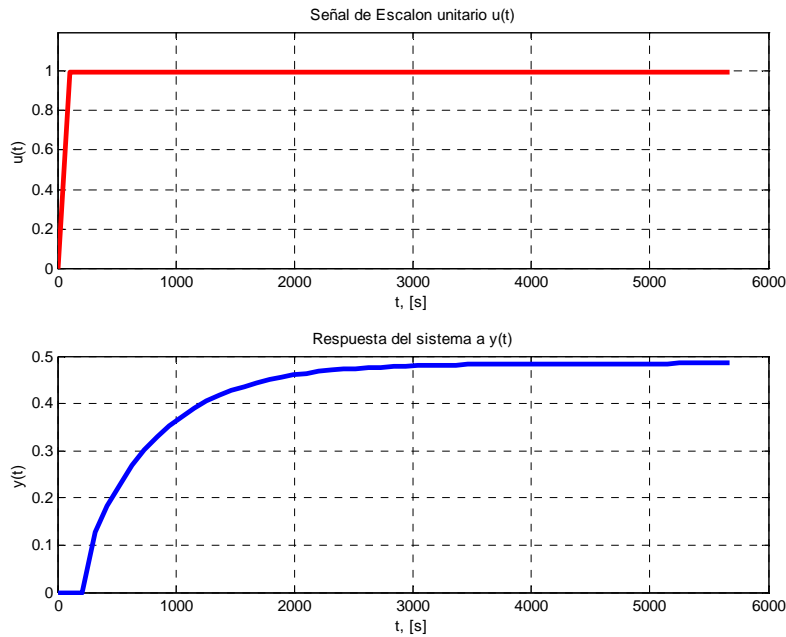


Figura 11. Señales de entrada y salida al modelo dado por la ecuación

En la figura anterior se muestran el comportamiento ante un entrada escalón unitario de la función de transferencia de lazo abierto que modela de forma idealizada un proceso térmico similar a una autoclave, para un recipiente metálico y con aislamiento de lana mineral (11), (12).

La determinación de los parámetros de la planta, en esta caso el recipiente aislado de la autoclave, tanto cuando es la variable a controlar la temperatura, esta en el proceso de calentamiento y el de enfriamiento, así para cuando la variable a controlar es la temperatura puede ser complicado donde varias disciplinas de la física e ingeniería como la transferencia de calor, la termodinámica, entre otras, hace más viable el uso de métodos alternos debidamente probados tales como el control proporcional, integral y derivativo, el cual no requiere un modelado complicado de la planta y el cual se basa en la respuesta temporal o frecuencial de

la planta o proceso para obtener los parámetros del controlador sin requerir entrar en complicadas teorías.

Sistema de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID)

Los controladores o controles con acción Proporcional-Integral –Derivativa (PID) son de amplio uso debido a sus características de eliminar el error en estado estable (Acción integral), ser capaz de responder rápidamente debido a su parte derivativa que es más que suficiente para muchas acciones.

Actualmente alrededor del 95% de los procesos de control de lazo cerrado son PID (13) a pesar de que existen una gran cantidad de tipos técnicas para diseñar sistemas de control.

Un controlador PID es descrito por la ecuación:

$$m(t) = Ke(t) + \frac{K}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + KT_d \frac{de(t)}{dt} dt \quad (18)$$

Como se estableció líneas arriba, la acción de control se compone de tres términos. Con relación a la ecuación, el primer término multiplica a señal de error por una constante K , representa la entrada integral y es responsable de actuar sobre los valores actuales de la señal de error $e(t)$, el segundo término involucra una integral con sus respectivas constantes y esta parte de la ecuación se encarga de utilizar el pasado de la señal $e(t)$ para compensar al sistema y el último término deriva la señal de error se encarga de anticiparse con el fin de poder responder adecuadamente a los requerimientos del sistema a controlar.

La constante K es la ganancia del término proporcional, T_i , constante de tiempo del término integral y T_d periodo del término proporcional. Por lo anterior se menciona

(10) (6), que el controlador PID realiza su acción de control utilizando los valores pasados, presentes y futuros de la señal de error.

Existen una gran variedad de métodos para obtener los parámetros y sintonizar este tipo de control de acuerdo a los requerimientos y una amplia literatura que los describe (6) (13).

Si bien en sus inicios y por muchas décadas este tipo de sistemas de control se implementaron por medio analógicos, actualmente casi su totalidad se implementan en forma digital tales como el uso de micro-controladores, controles lógicos programables o computadoras dedicadas, los que les confiere mucha flexibilidad y otras posibilidades, tales como monitoreo remoto, auto-sintonización (auto-tuning), entre otras, (12) (13) (8) (6).

Uno de los métodos que se utilizan más ampliamente es de Ziegler-Nichols, el cual puede ser basado en la respuesta al escalón y en la respuesta a la frecuencia.

Método de Ziegler-Nichols de respuesta al escalón de la planta

Este es un método clásico para la obtención de los parámetros del controlador, del cual existen diferentes variaciones del método, pero en este trabajo presentamos solo el método basado en la respuesta al escalón de la planta o proceso en lazo abierto. De esta respuesta se obtienen dos parámetros que nos permiten determinar a su vez los propios del controlador PID, tal como se ve en la figura.

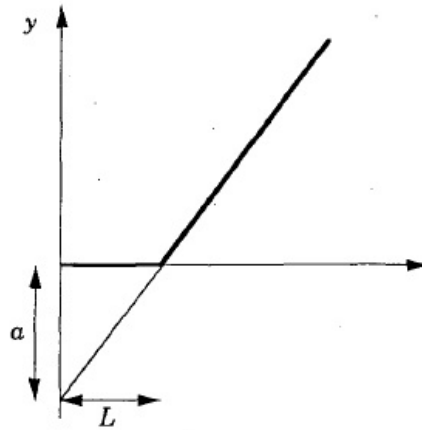


Figura 12. Caracterización de respuesta a escalón del método Ziegler-Nichols

En este método el punto donde la pendiente tiene su máximo valor es determinado, una línea tangente se traza. Las intersecciones entre la tangente y los ejes dan los parámetros A y L .

El modelo resultante del proceso o planta es integrador con un retardo de tiempo. Como se puede observar este método requiere de la obtención de dos parámetros A y L relacionados con la respuesta al escalón del sistema en lazo abierto.

Una vez obtenido lo anterior, se puede obtener directamente de los parámetros del controlador PID de acuerdo a la figura 13 (13).

Controller	K	T_i	T_d	T_p
P	$1/a$			$4L$
PI	$0.9/a$	$3L$		$5.7L$
PID	$1.2/a$	$2L$	$L/2$	$3.4L$

Figura 13. Relación de parámetros para el controladores P, PI y PID

Método Ziegler-Nichols de respuesta a la frecuencia

En este método se ajustan los parámetros del controlador conectado a la planta y se ajustan los periodos de la parte integral y derivativa de tal manera que solo queda habilitada la parte proporcional y se procede aumentar la ganancia paulatinamente hasta el punto que la señal de salida del proceso o variable a controlar comience a tener oscilaciones.

Se determina el valor de la ganancia (S_u) en donde ocurre este fenómeno y el periodo de oscilación del mismo (T_u). En la siguiente figura se presenta la obtención de parámetros a partir de esto valores obtenidos por este método (13) .

Controller	K	T_i	T_d	T_p
P	$0.5K_u$			T_u
PI	$0.4K_u$	$0.8T_u$		$1.4T_u$
PID	$0.6K_u$	$0.5T_u$	$0.125T_u$	$0.85T_u$

Figura 14. Relación de parámetros para el controladores P, PI y PID por el método Z-N respuesta a la frecuencia.

Independiente de la variante del método de Ziegler-Nichols utilizado, de los cuales sólo se han mostrado dos, estos son utilizados, en muchos de los casos como métodos de auto-sintonía de los PLC comerciales.

La sintonía automática, o “auto-tune”, es un método donde el controlador se ajusta de forma automática por bajo orden del diseñador. Tradicionalmente, el usuario pulsaba un botón o enviaba una orden al controlador. La sintonía automática de controladores PID se puede llevar a cabo mediante la combinación de los métodos de determinadas dinámicas de procesos (6).

Un procedimiento de sintonía automática consiste en tres pasos: Generación de la perturbación del proceso. Evaluación de la respuesta de la perturbación. Cálculo de los parámetros del controlador. Éste es el mismo procedimiento que utiliza un ingeniero experimentado cuando sintoniza un controlador manualmente. El proceso debe ser perturbado de alguna manera para determinar su dinámica. Esto se puede hacer de múltiples maneras, por ejemplo, aplicando escalones, pulsos o sinusoides a la entrada del proceso.

La evaluación de la respuesta a la perturbación puede incluir una determinación del modelo del proceso o una simple caracterización de la respuesta.

En aplicaciones prácticas, se ha demostrado que el uso de la sintonía automática es uno de los métodos más prácticos en tiempo y en desempeño de los resultados obtenidos

Los controladores PID comerciales con capacidades de sintonía automática están disponibles en el mercado y fabricados por diversas marcas desde hace varios años.

Capítulo IV

Metodología y requerimientos para implementación del control de temperatura la autoclave (PLC)

Generalidades

Actualmente se cuenta con diferentes medios para implementar el controlador PID. Para procesos industriales, o donde se tienen procesos con grandes inercias y por lo tanto grandes constantes de tiempo, la utilización de Controladores Lógicos Programables (PLC del inglés Programmable Logic Control), los cuales son esencia computadoras pensadas para su utilización en el control de sistemas industriales, tales como control de motores, semáforos, control de calderas y otros tipos de procesos industriales.

Si bien son de naturaleza digital en el cual las entradas y salidas básicas son de éste tipo, también muchos tipos de ellos se fabrican con módulos para entradas y salidas analógicas. Estos los hace son ideales para muchas aplicaciones de procesos industriales, además de que por su relativa facilidad de programación, su versatilidad al poder agregársele diferentes tipos de módulos de entrada y salida adicionales de los que ya posee, y la facilidad de comunicación en red. Esto último permite el monitoreo a distancia de los procesos controlados por el PLC.

Los Controladores Lógicos Programables (PLC) son equipos diseñados para sistemas, procesos y equipos de control en sitio y a distancia, así pues encontramos estos controles (PLC) en la robótica industrial, procesos automatizados productivos, equipos repetitivos, de alta capacidad productiva y en diversos equipos con controles automáticos especiales, como las autoclaves.

Existen diferentes fabricantes y tipo de autoclaves, de acuerdo a cada a la aplicación y los requerimientos del usuario. En este trabajo seleccionaremos u tipo

específico con el fin de delimitar este trabajo, el cual será uno de los tipos de la marca Unitronic.

Programación de escalera (Ladder)

El tipo de programación es uno de los criterios importantes a la hora de seleccionar un PLC. La programación aceptada por la gran mayoría de PLC es la programación en Lenguaje de Escalera, aunque su nombre oficial el de Diagrama de Contactos (14). Lo anterior es una herencia de los diagramas de contactos que se utilizan en los circuitos de control eléctricos con elementos como relevadores, bobinas, contactos alambrados de forma física, pero la programación de escalera permite realizar lo mismo pero de forma que los elementos existen solo como instrucciones en la programación interna del PLC, pudiendo realizarse circuitos de control más complejos y versátiles que si lo fueran usando elementos alambrados físicamente.

Existen otros lenguajes para programar PLC, pero esto no se abordará en este texto considerando que el lenguaje de escalera es el más común y es que se utiliza en este trabajo.

El Lenguaje en Escalera es el mismo para todos los modelos existentes de PLC, lo que cambia de fabricante a fabricante o de modelo a modelo es el microcontrolador que tiene en su interior, y por esta razón lo que difiere entre los PLC es la forma en que el software interpreta los símbolos de los contactos en Lenguaje en Escalera (14). El software de programación es el encargado de generar el código en ensamblador que puede ser interpretado por el tipo microcontrolador que posee el PLC.

En la siguiente figura se muestra la imagen desplegada en una pantalla de computadora de la programación de escalera.

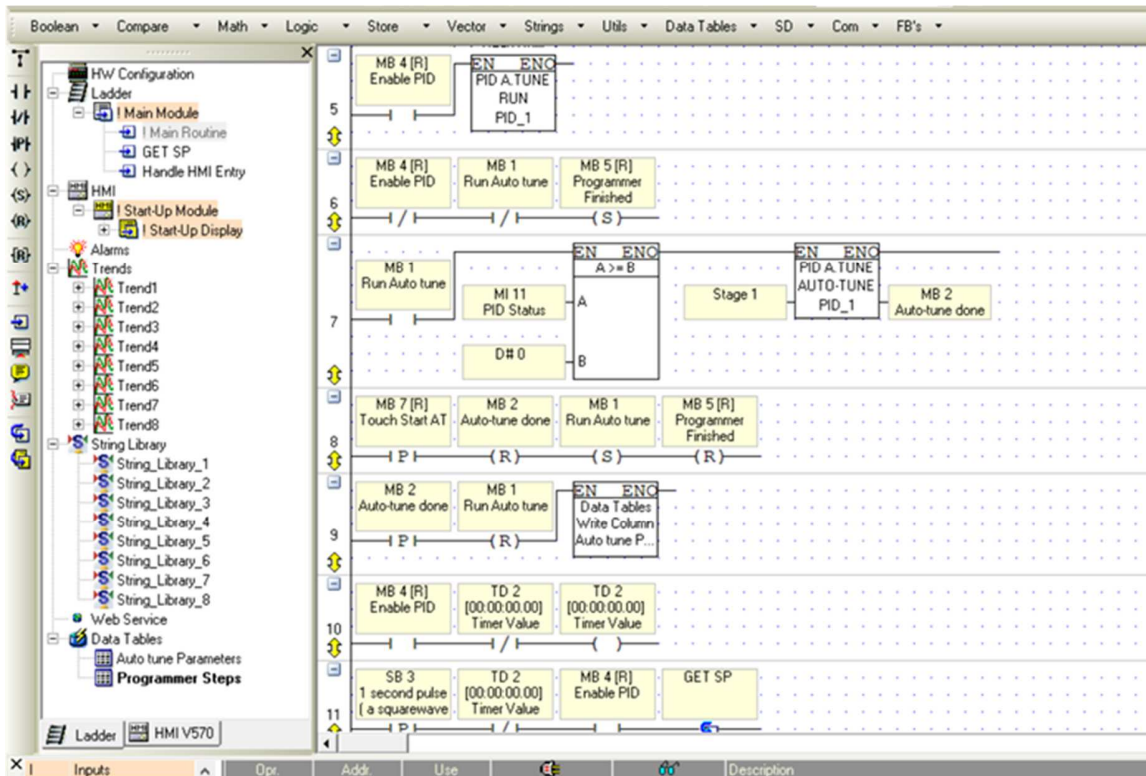


Figura 15 Imagen de un segmento de programa usando la programación de escalera

Se puede notar que aparecen las componentes en un diagrama clásico de los circuitos eléctricos de control tales como contactos normalmente abiertos (NA), normalmente cerrados (NC), bobinas y bloques de control de funciones especializadas que posiblemente sean muy difíciles de realizar con los elementos de un control eléctrico clásico

Descripción del PLC específico.

El PLC V570 es un avanzado controlador lógico programable con pantalla táctil de 5.7 pulgadas, a colores, con una gran resolución. Se le pueden agregar módulos encajables por la parte posterior, que portaran las entrada y salidas, ya sea digitales ó analógicas, dependiendo las características del módulo elegido. En

resumen es un PLC muy versátil, con un software que permite la programación de su pantalla y el programa de control, como un solo conjunto sin tener utilizar dos dispositivos y dos programas de software.



Figura 16. Vista frontal del PLC Unitronics V570



Figura 17. PLC V570 vista del módulo de conexiones

Los PLC Unitronics usan VisiLogic como lenguaje software, para crear los proyectos de control. Después de planificar la tarea de control, se usa VisiLogic para escribir, depurar y descargar el control del PLC y sus aplicaciones con de Interface Humano-Máquina (HMI) en el controlador.

Para el control de automatización de este PLC se utiliza, el editor de escalera y la aplicación HMI, que configura la función del panel operativo. Se usa el HMI Editor para crear las pantallas que se muestran en la pantalla del controlador.

Las pantallas les indican a sus operadores qué hacer. Puede hacer que sus operadores inicien sesión con una contraseña, ingrese puntos de ajuste y otros datos e instruya al operador qué hacer en caso de un problema del sistema o alarma.

Una pantalla puede contener texto e imágenes. El texto y las imágenes pueden ser tanto fijos como variables.

Las variables se insertan en una pantalla para: Mostrar valores de tiempo de ejecución como enteros. Representa los valores de tiempo de ejecución con texto, imágenes o gráficos de barras.

También la pantalla permite mostrar mensajes de texto que varían según las condiciones de tiempo de ejecución, permite que un operador ingrese datos utilizando el teclado alfanumérico para crear su proyecto de control: Configuración de hardware Escalera y Pantallas HMI.

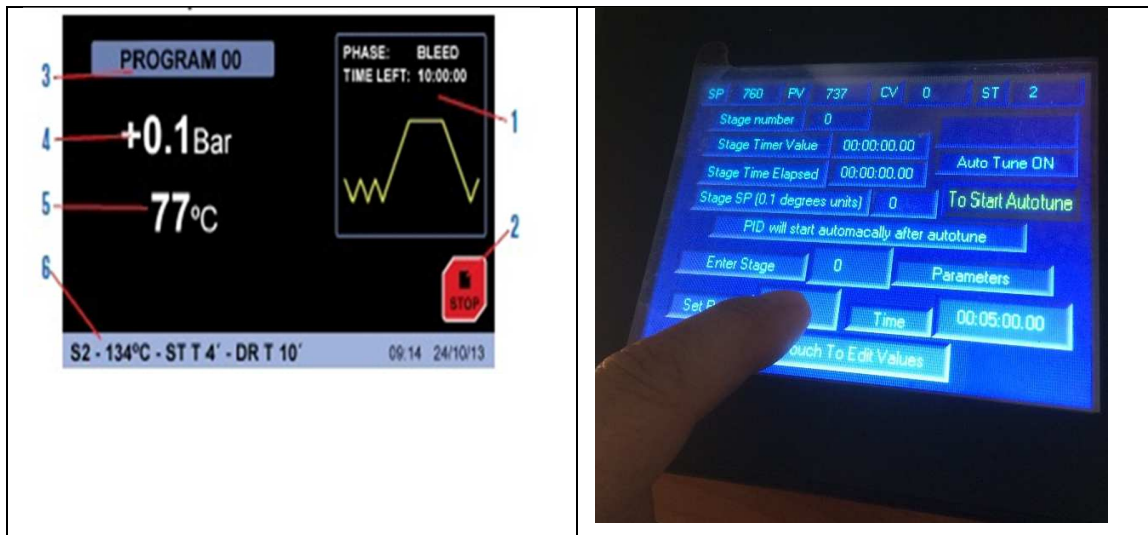


Figura 18. Pantalla táctil (HMI) de PLC Unitronics

Se puede cambiar la edición a través de los botones de la barra de herramientas o haciendo clic en elementos en el Explorador de proyectos. Interfaz de idioma VisiLogic admite varios idiomas de interfaz.

Configuración de hardware VisiLogic ofrece un módulo integral de configuración de hardware. El fundamento del sistema de control es que el controlador (PLC) puede configurar entradas: analógicas, digitales y de alta velocidad contador / eje-codificador / medidores de frecuencia y PT100; y salidas: analógicas, salidas digitales y PWM de alta velocidad. Un programa modular VisioLogic se crea con configuración lógica de escalera y subrutinas, y las interfaces HMI.

Las características del módulo de entradas y salidas V200-18-E6B Unitronics del PLC V570 son:

Características:

2 entradas analógicas TC / PT100 / 0-10 Vcd, 0-20 mA, 4-20 mA

3 entradas analógicas 0-10 Vcd, 0-20 mA, 4-20 mA

15 entradas digitales tipo relevador 30Vcd, 250 Vca

15 salidas digitales tipo relevador 30Vcd, 250 Vca

- 2 salidas digitales 24 Vcd pnp (0.5 Amp) / npn
- 2 salidas analógicas 0-10 Vcd, 4-20 mA



Figura 19. Módulo de entradas y salidas V200-18-E6B Unitronics del PLC V570

Descripción de componentes y accesorios utilizados

RTD PT-100

Los sensores Pt100 o de termo-resistencia son un tipo específico de sensor RTD (Resistencia dependiente de la temperatura). La característica más importante de los elementos Pt100 es que están fabricados con platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD.

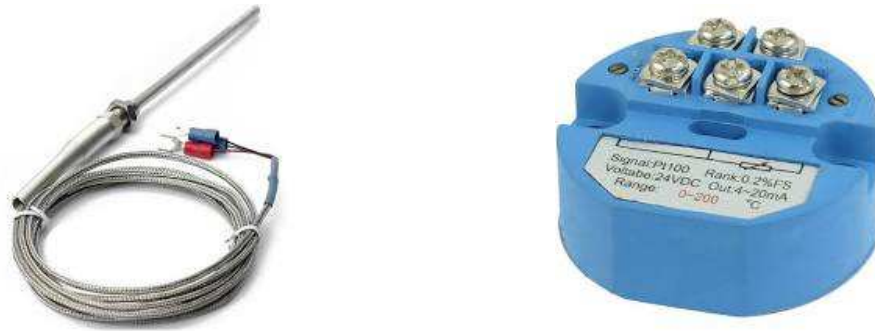


Figura 20. Diferentes tipos de sensores PT-100 a) Sonda, b) Con transductor de voltaje a corriente (corriente de salida en el rango de 4 a 10 mA)



Figura 21. Montaje del sensor de temperatura PT-100

Sobre el sensor de temperatura usado, el cual es un PT100 RTD, A/100-3W-IM-4" de platino (PLATINUM RTD PT100, 3-WIRE), es de 4" y permiten su inmersión en líquido. La Resistencia dependiente de temperatura tiene un coeficiente 0.00385 ohm por grado centígrada, es de grado B y con un rango de temperatura de -200 a 200 °C, figura ().

Fuente de voltaje Regulada para alimentar el PLC.

Se utiliza una fuente regulada para alimentar el PLC, modelo MDR-60-24, entrada 100-240 Vca / 1.8 Amp, salida 24Vdc / 2.5Amp, marca Mean Well Enterprise CO. LTD.

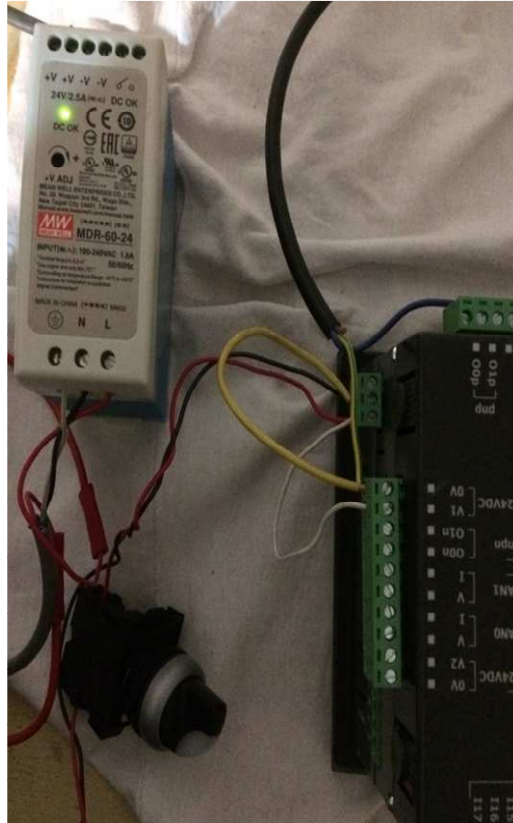


Figura 22 Fuente de alimentación para el PLC

Para el control de la resistencia para la generación de calor se utiliza el relevador de estado sólido marca FINDER modelo 77.25.9.024.8650 de un polo y capacidad de 25 A con entrada de control dentro del rango 4-32 volts y pudiéndose utilizar de 48 a 600 Vac



Figura 23. Relevador estado sólido marca Finder, modelo 77.25.9.024.8650



Figura Conexión del Relevador al interruptor de CA

El elemento calefactor utilizado fue una resistencia eléctrica utilizada para calentar agua en los calefactores de agua eléctricos, de 2000 Watts de potencia cuando se alimenta con 120 Vca, modelo SG-1153L, marca BRK.



Figura 24. Resistencia de 2000 Watts 120 Vac usada como elemento calefactor

La resistencia es controlada por medio de la técnica de modulación de anchura de pulso (PWM de las siglas en inglés: Pulse Width Modulation). Esta técnica permite controlar la potencia de salida y por lo tanto el calor suministrado de forma proporcional aunque la salida del PLC sea digital y maneje solo dos estados lógicos.

Modulación del ancho de pulso para el control de la energía

La modulación de ancho de pulso (PWM) es una técnica ampliamente utilizada para controlar la energía mediante interruptores electrónicos de energía, usualmente dispositivos semiconductores, tales como rectificadores controlados de silicio (SCR), triodos de corriente alterna (TRIAC) o relevadores de estado sólido. El valor medio del voltaje (y la corriente) alimentado a la carga se controla conmutando el dispositivo entre el suministro y la carga de forma rápida. Cuanto más tiempo esté encendido el interruptor (transistor) en comparación con los períodos de apagado, mayor será la potencia suministrada a la carga.

La frecuencia de conmutación de PWM deberá ser más rápida que la inercia o constante de tiempo del sistema que se controla. Esto hace posible su uso en sistemas de control de temperatura. En este tipo de modulación el valor de la

frecuencia es fija y por lo tanto el periodo, solo cambia la porción del tiempo en que el dispositivo está encendido.

El término "ciclo de trabajo" describe la proporción de tiempo de "encendido" con respecto al intervalo o "período" regular de tiempo; un ciclo de trabajo bajo corresponde a baja potencia, porque la energía está apagada la mayor parte del tiempo. El ciclo de trabajo se expresa en porcentaje, estando el 100% totalmente encendido.

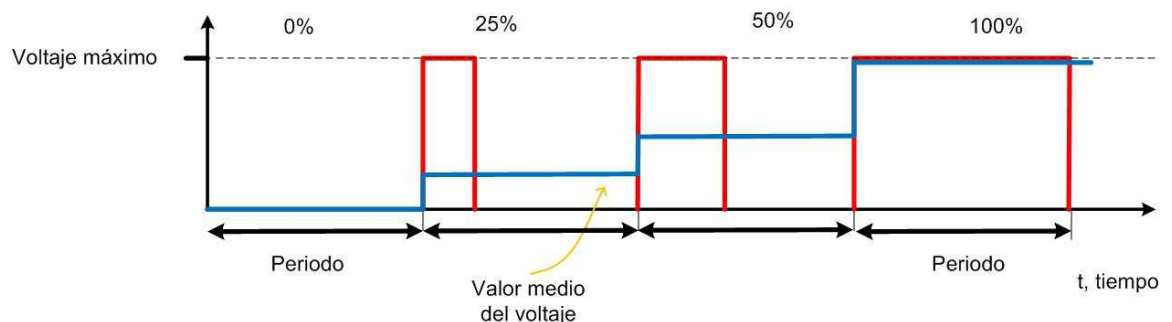


Figura 25. WW Modulación de anchura de pulso (PWM)

Usando como referencia la figura, el voltaje entregado a la carga con la modulación PWM es dado por la expresión:

$$V_{PWM} = V_{max} \left(\frac{\text{Duración del pulso}}{\text{Periodo}} \right) = V_{max} \times \text{ciclo de trabajo} \quad (19)$$

La principal ventaja del PWM es que la pérdida de energía en los dispositivos de conmutación es muy baja. Cuando un interruptor está apagado, prácticamente no hay corriente, y cuando está encendido, casi no hay caída de voltaje en el interruptor. La pérdida de energía, al ser el producto del voltaje y la corriente, es por lo tanto en ambos casos cercana a cero.

Esquema a implementar para simular el control de temperatura de la autoclave

El esquema implementado en este trabajo de tesis se muestra en la figura 26, en el cual se puede ver los diferentes elementos que se describieron en las líneas anteriores.

La descripción del programa que ejecuta el PLC para controlar la temperatura usando el algoritmo de control PID será descrito en la siguiente sección del documento.

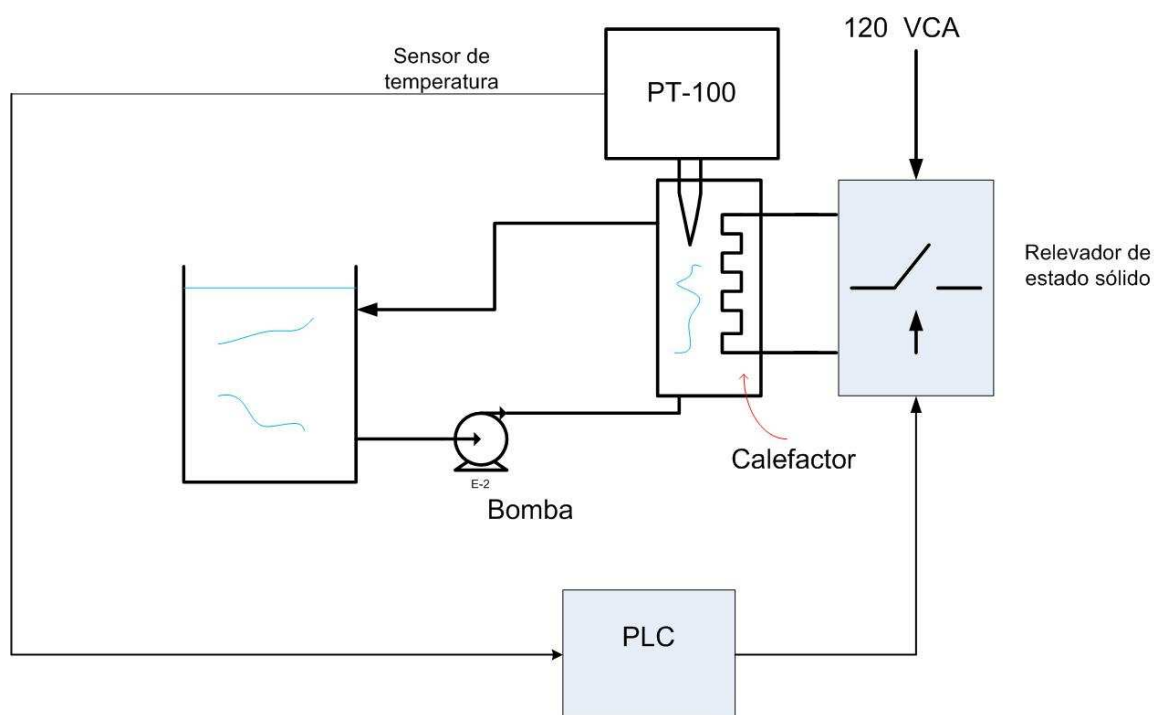


Figura 26. Esquema implementado para controlar la temperatura simulando la cámara de la autoclave

Capítulo V

Implementación, experimentos y resultados

Integración de la autoclave

En esta tesis se presenta el control de temperatura de la autoclave, el cual se implementó utilizando el PLC del Unitronics™, por medio del software VisiLogic™, que es software propio de este PLC. Debido a no contar con la cámara de la autoclave se simuló el control de temperatura calentando el agua de un recipiente y manteniendo la temperatura dentro de valores pre-establecidos. Para esto la salida del PLC operó en modo de modulación por anchura de pulso o PWM (del inglés "Pulse Width Modulation").

Implementación del control PID en el PLC

A continuación se explicarán la operación de los programas y subprogramas requeridos e implementados en el PLC para lograr el control de temperatura de la autoclave.

Programa de la autoclave usando control PID

Este tipo de aplicación en una autoclave, es necesaria para construir el control del ciclo térmico de calentamiento de una autoclave usando la técnica de control PID. Para este programa, es requerido una serie de datos almacenados en la memoria del PLC a manera de tabla que sirve para configurar el sistema de control PID en esta tabla de datos, cada fila es un paso que determina tanto el punto de ajuste (Set Point, SP) por etapa, así como un temporizador (timer) por etapa.

Los valores de cada etapa se linealizan (Es decir los valores se interrelacionan formando una pendiente) y de esta forma determinan un SP calculado cada segundo. Los valores se pueden ingresar en la tabla de datos a través de una PC o desde el PLC Unitronics a través de un sistema de entrada de teclado.

Para la configuración de hardware se utilizará un PLC unitronics V570 y una tarjeta V200-18-E6B.

La información técnica sobre PID, Autotune y el vector Autotune está en el anexo del manual de PLC Visiologic.

Es importante que la configuración PID debe ejecutarse en el encendido. Para que el autoajuste o autotune se habilite, para ello se requiere lo siguiente:

Debe proporcionarse los VALORES de los siguientes parámetros de configuración:

- Punto fijo
- Rango de entrada: valor de proceso límite bajo
- Rango de entrada: valor de proceso límite alto
- Rango de salida: valor de control límite bajo
- Rango de salida: límite alto del valor de control

El bloque dentro del diagrama de escalera MI1 contiene el valor de entrada (PV) medido o leído a través de una entrada analógica TC / J definida en la configuración del hardware (es decir se configura una entrada analógica en el PLC)

El valor de entrada se puede medir mediante la entrada analógica que el usuario eligió en la configuración del hardware. La entrada analógica es mediante una resistencia dependiente de temperatura de platino RTD PT100. El valor de Control (CV) se da en grados Celsius o Fahrenheit y se da en unidades de 0,1 grados.

El Vector de autoajuste o autotune.

Una vez que se ejecuta el autoajuste, los valores calculados de K_p , T_i , T_d y S_t se escriben automáticamente en los parámetros de configuración.

Es importante, Configurar el lazo PID y desactive la entrada del teclado para el primer ciclo. Esto asegura que la solicitud de entrada del teclado se realizará tocando el panel táctil V570.

Además se puede suspender el valor integral y evitar que aumente si es requerido. Esto puede resultar útil, sobre todo en equipos de aplicación con temperatura de calentamiento, como en las autoclaves de esterilización.

A continuación se presenta las líneas del programa requeridas para ejecutar un bucle o ciclo con el control PID. Para los valores de la primera etapa se leen de los Pasos del programador PLC V570 en la tabla de datos de los parámetros para el control PID.

El proceso comienza con el contacto “ SB2 power up bit” de encendido del PLC, que activa la configuración del “PID Autotune configuración”, (Figura 27, línea 1). El contacto abierto “MB3 Door open” es de seguridad y deshabilita “PID Autotune”, e indica que la puerta de la autoclave se encuentra abierta, es decir la autoclave no está lista para operar (Figura 27, línea 2).

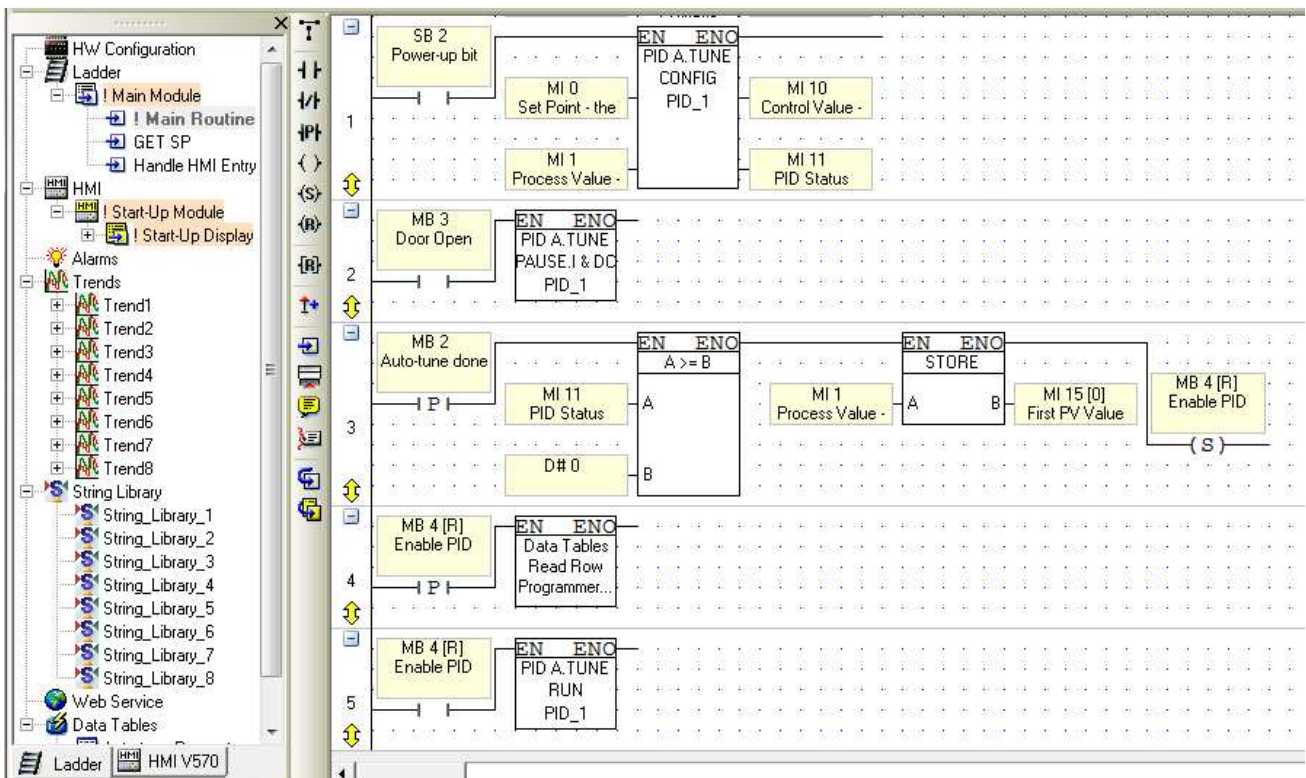


Figura 27 Inicialización del PID

La línea 6, indica que el programa a terminado, está condicionado que el PID este habilitado, y en caso de que el auto-ajuste (autotune) ya no este corriendo, indicará finalmente que el proceso a terminado MB5 (ver figura 28).

Para realizar el auto-ajuste y una vez que se éste se completa (Autotune MB2), almacenamos el primer valor de PV para la primera etapa en MI15, establecemos el bit Habilitar PID (MB1) e iniciamos el PID Auto tune (línea 3).

El valor será el valor bajo de la primera etapa y se utilizará para la linealización de la primera etapa. Las líneas 7, 8 y 9 permiten el ajuste automático. Cuando aumente el MB de autoajuste, los parámetros de autoajuste estarán en el vector Autoajuste de 32 MI de longitud.

El bit de Programador terminado también se restablece. Al tocar la pantalla el botón "To Start Autotune" (MB7), se iniciará el Autotune .También se habilita La lectura de datos de los puntos de cada etapa capturados en una tabla de datos.

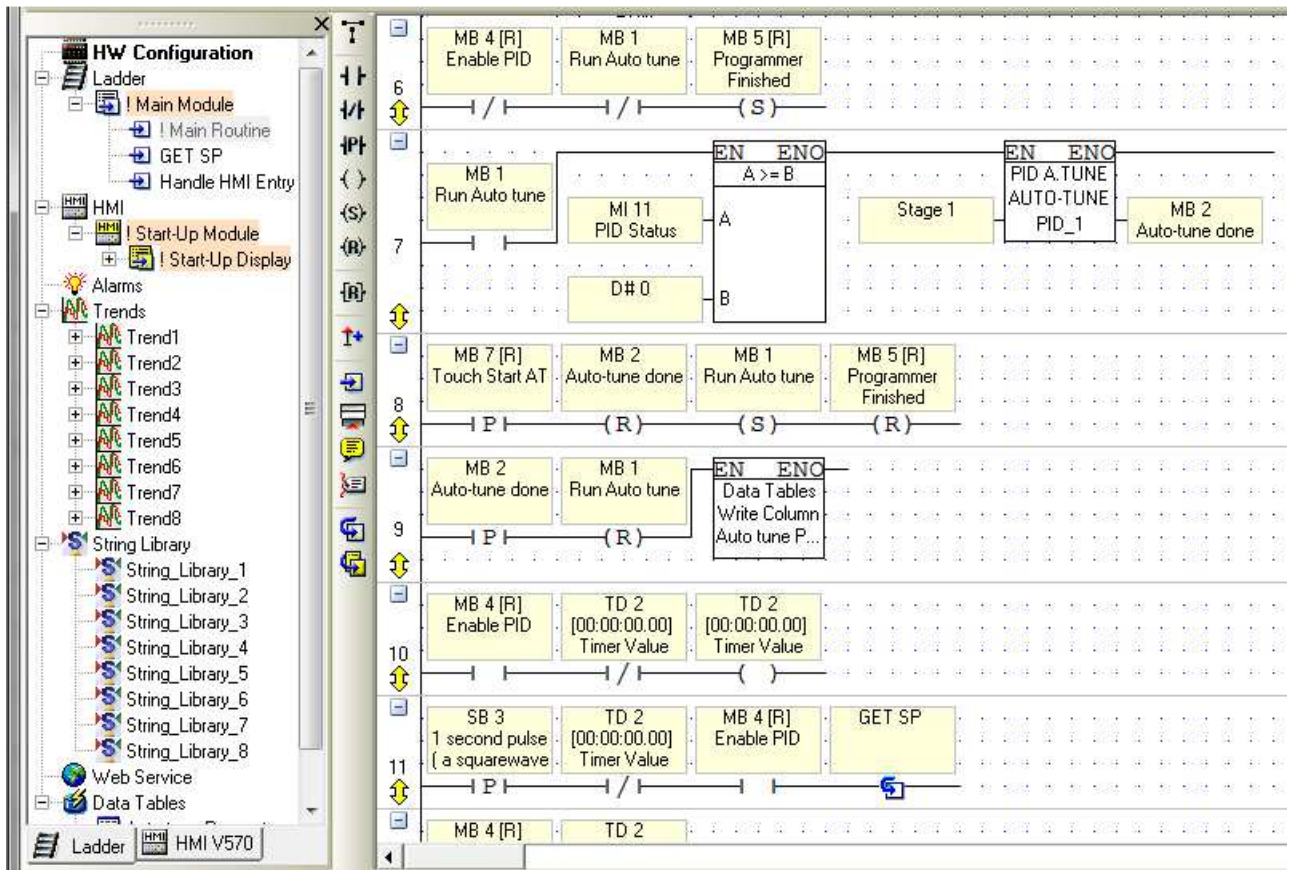


Figura 28. Programa de escalera de líneas 6 a 11

Cuando se ejecuta el bucle PID, linealizamos el SP (Set-Point) por los pasos (datos de tabla) de acuerdo con la cantidad de etapas del proceso térmico. Se Habilita la subrutina “GET SP” de la linealización como se observa en la línea 11. Además comienza la lectura de datos (En tabla de datos) a través de los comandos de programa en la línea 12.

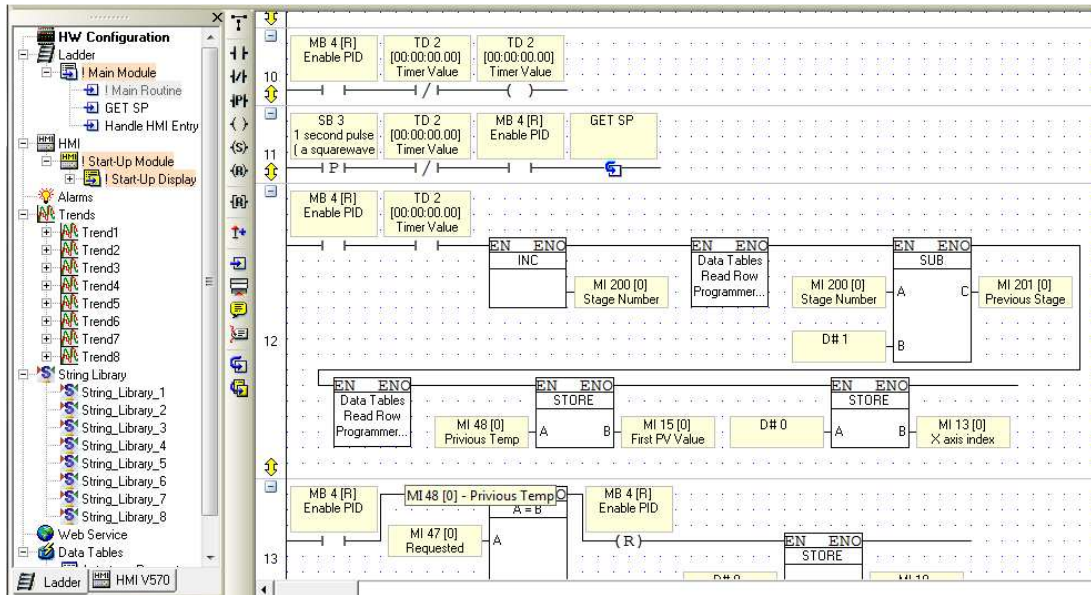


Figura 29. Programa de escalera de líneas 10 a 13

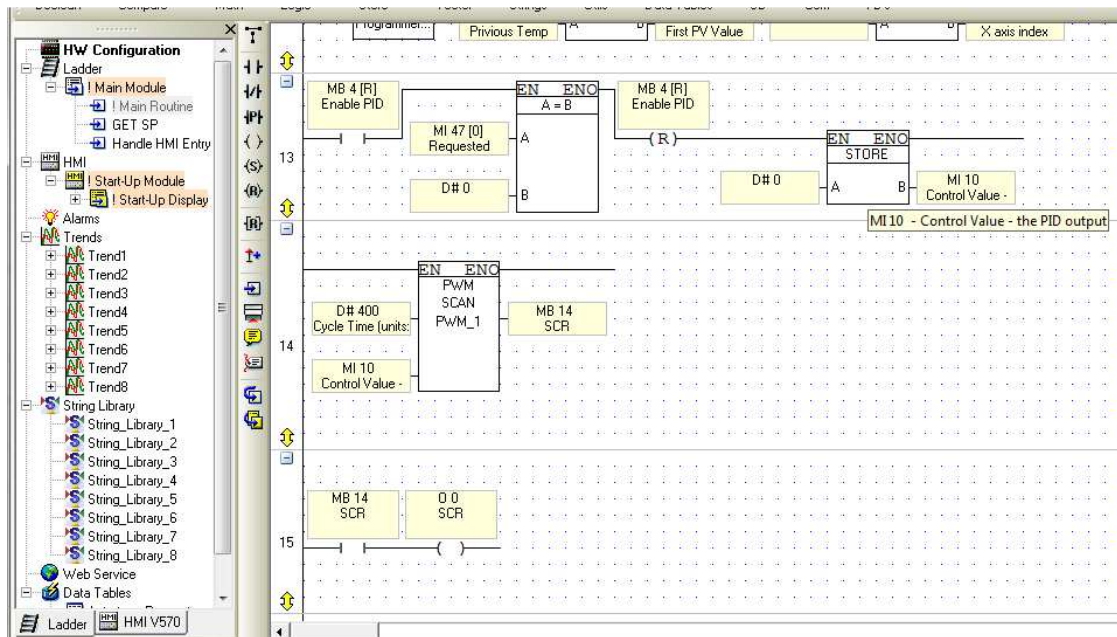


Figura 30 Programa de escalera de líneas 13 a 15.

Cada segundo convertimos el valor preestablecido del temporizador a un valor numérico de segundos (ML1).

Cada segundo, convertimos el valor del temporizador transcurrido en un valor numérico de segundos (ML0).

Al final, el valor final de la línea 13 es MI 10 que es el “Control Value” (valor de control). Este valor genera modulación a través del comando PWM (Pulse Width Modulation) de la línea 14, es decir tiene como resultado el control de salida de energía para la resistencia de calentamiento con ayuda del SCR (Silicium Controlled Rectifier o Rectificador Controlado de Silicio) esto se ve en la línea 15.

En la línea 1 de la subrutina “GET SP” donde se presentan los comandos para la Linealización, determinamos el SP actual de acuerdo con los 3 parámetros: temperatura (usuario), tiempo (usuario) y valor de PV inicial (Figura e). Es más fácil verlo como: $Y = \text{función}(AX + B)$.

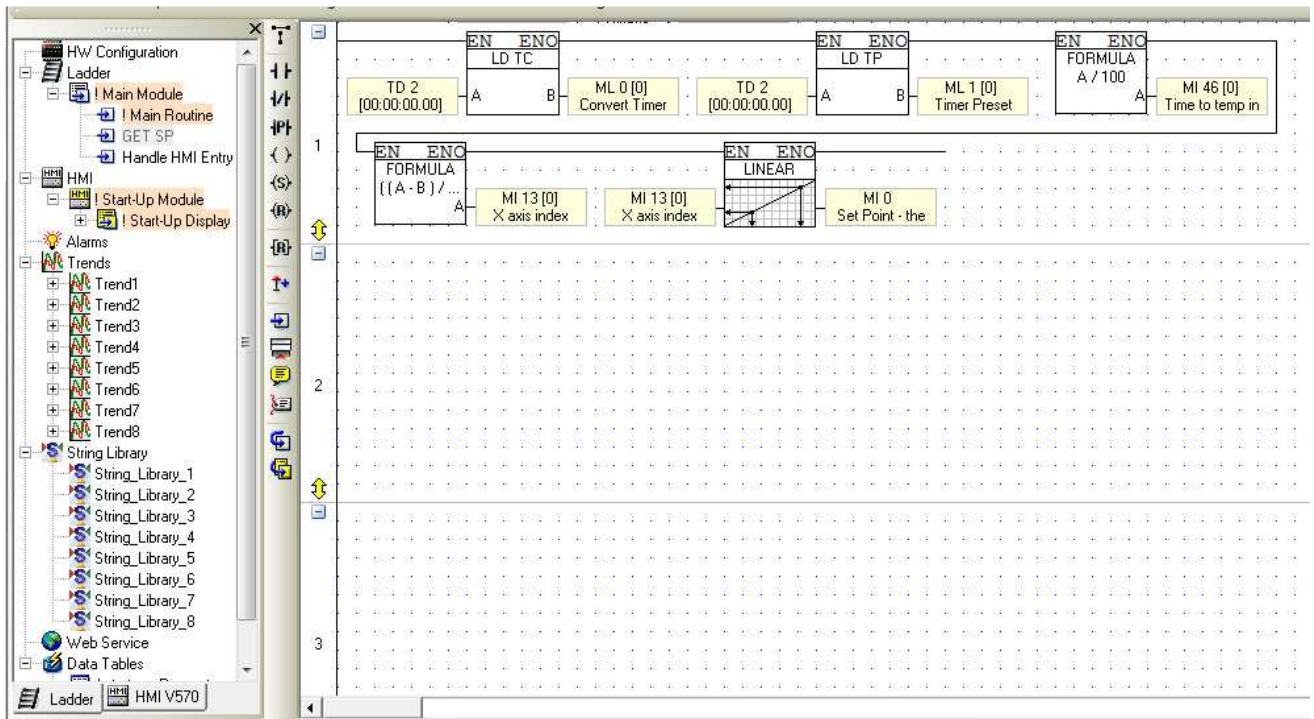


Figura 31. Subrutina GET ST (Get Set-Point: Obtener ajuste deseado)

La subrutina “Handle HMI Entry” permite la captura manual en modo HMI (Human Machine Interface), se ejecuta con la pantalla táctil, desde el inicio y ejecuta

el sistema de entrada del teclado que pasa por la pantalla. Las redes ó líneas 1 y 2 gestionan el ciclo de búsqueda, (Figura 32).

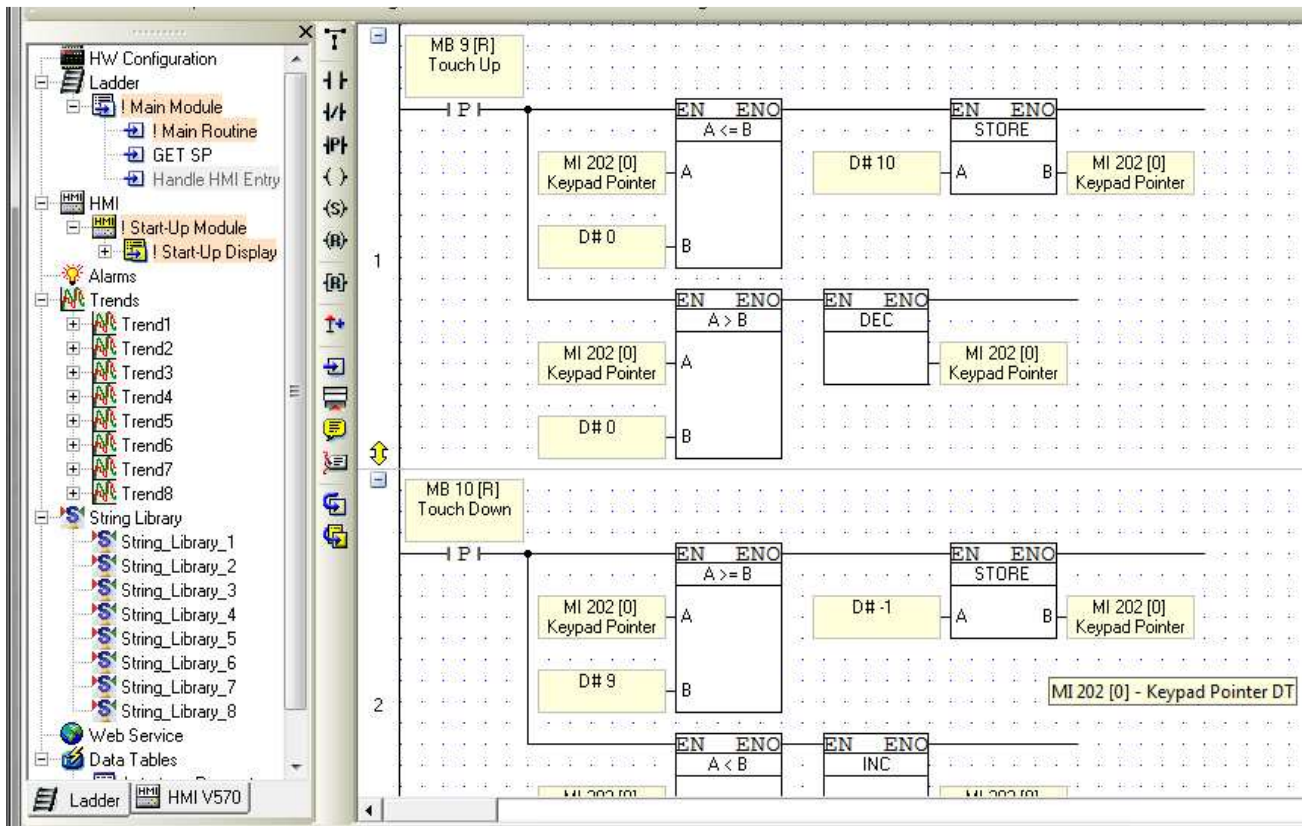


Figura 32. Subrutina HMI, líneas 1 y 2.

A través de esta misma subrutina “Handle HMI Entry”, se alimentan los datos de la tabla de datos, de las etapas del proceso térmico. Esto se aprecia en los comandos de las líneas 3 y 4 (Figura 33 y 34).

Programer PID vision 570, 31 may 20, rev 10.vlp - Unitronics VisiLogic OPLC IDE - [Ladder Application (! Main Module.Handle HMI Entry)]

Project Edit View Insert Build Connection Ladder HMI Tools Registration Help

Boolean Compare Math Logic Store Vector Strings Utils Data Tables SD Com FB's

HW Configuration
Ladder
! Main Module
! Main Routine
GET SP
Handle HMI Entry
HMI
Start-Up Module
Start-Up Display
Alarms
Trends
Trend1
Trend2
Trend3
Trend4
Trend5
Trend6
Trend7
Trend8
String Library
String_Library_1
String_Library_2
String_Library_3
String_Library_4
String_Library_5
String_Library_6
String_Library_7
String_Library_8
Web Service
Data Tables

Ladder HMI V570

MB 10 [R] Touch Down

MI 202 [0] Keypad Pointer

D# 9

MB 9 [R] Touch Up

MB 11 [R] Entering in progress

MB 10 [R] Touch Down

MB 6 [R] Enter Values

D# 0

D# -1

D# 9

EN ENO A >= B

EN ENO STORE

EN ENO A < B

EN ENO INC

EN ENO Data Tables Read Row Programmer...

SB 31 Refresh current

I	Inputs	O	Outputs	T	Timers	MB	Memory Bits	MI	Memory Integer	ML	Memory Long	DW	Double Word	XB	X Bits	XI	X Integer
0																	
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	
6																	

Operands Watches Memory Find Compile Event Log Project Optimizer

Serial: Com 4,19200 000%

Figura 33. Subrutina HMI, línea 3.

Esto facilita la operatividad del control automático del proceso térmico, pero también genera un ambiente de control tipo recetas.

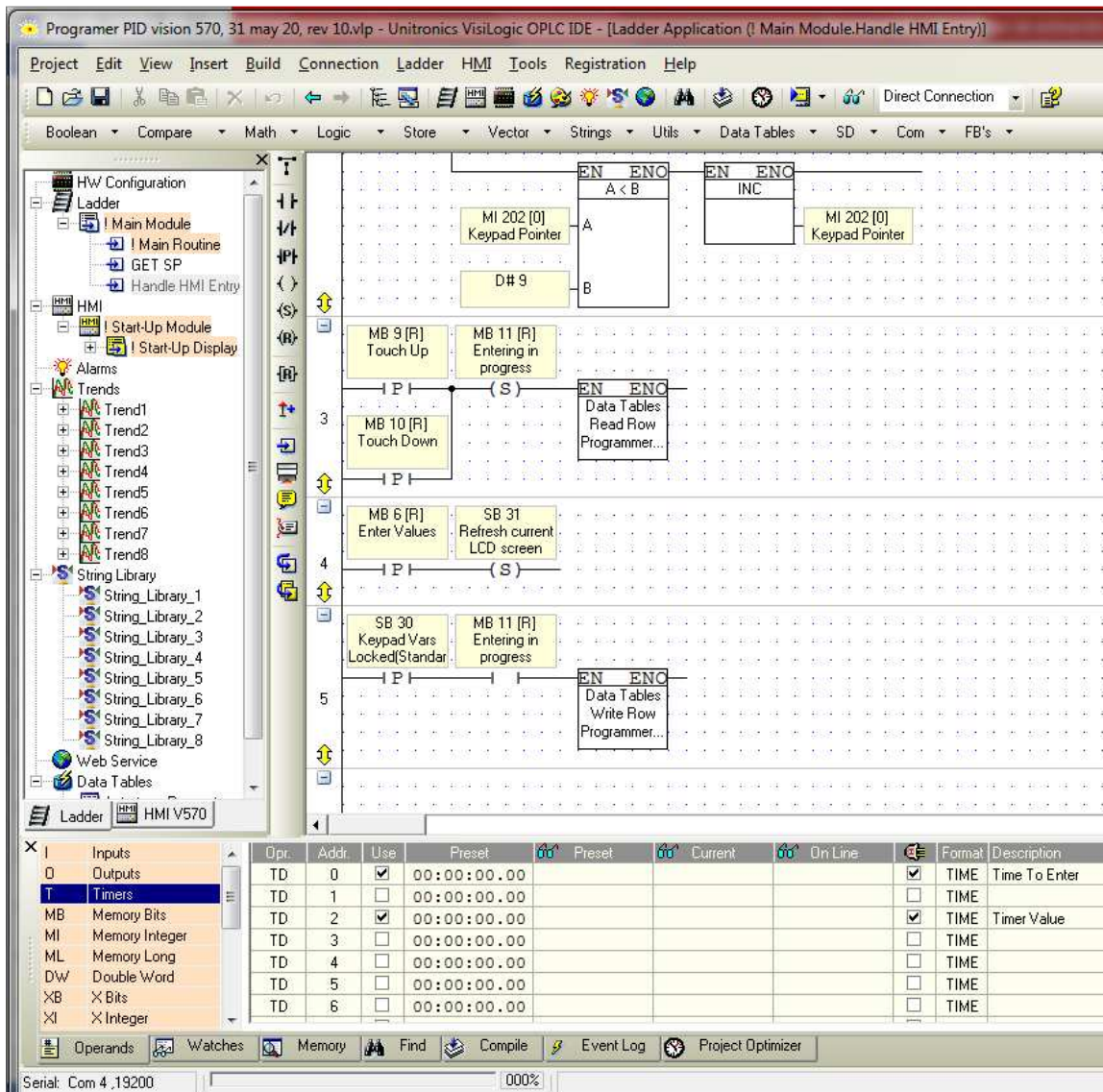


Figura 34. Subrutina HMI, líneas 3, 4 y 5.

En la figura 35, se muestra la pantalla en la cual se observan los espacios de una tabla de cargan los valores del PID de forma automática, estos son calculados por medio del Autotune del PLC V570.

Estos valores son:

KP Proportional band (banda proporcional)

- TI Integral time (Constante de tiempo de la parte integral)
- TD Derivative time (Constante de tiempo de derivación)
- ST Sample time (muestra de tiempo)

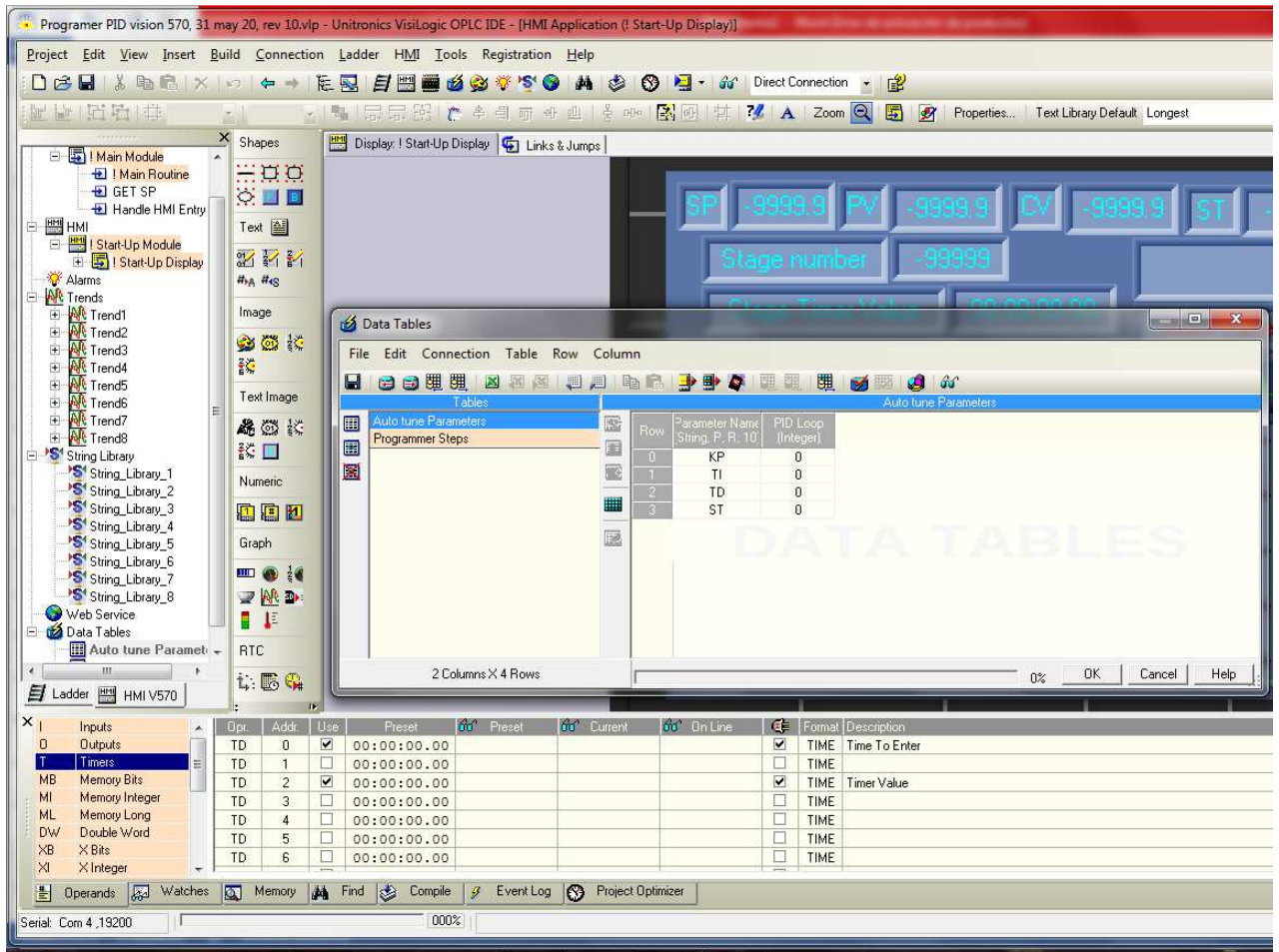


Figura 35. Visualizador de inicialización

En la figura 36 se muestra la Tabla de datos de las etapas del proceso térmico, los cuales se cargan a través de la pantalla táctil HMI, y estos valores de los puntos de control, son grabados en “Programmer Steps” la cual es una tabla de datos del proceso térmico que contiene la temperatura para cada punto de control y su tiempo de estadía.

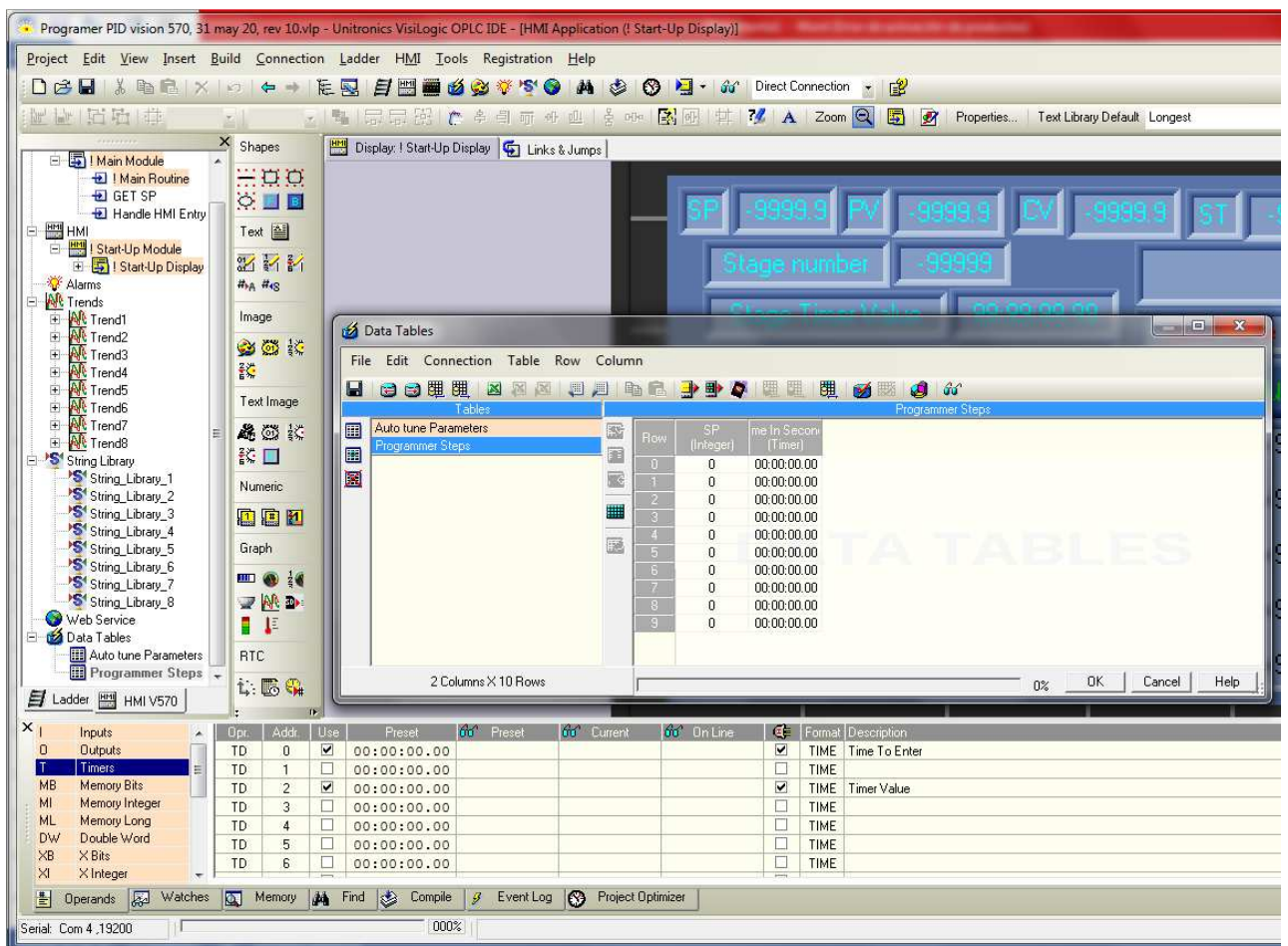


Figura 36. Tabla de datos de las etapas del proceso térmico

En la figura 37, se muestra la imagen de la pantalla del visualizador (Display HMI) señalando el Auto Tune OFF, esto quiere decir que el PLC está haciendo un reconocimiento del punto de coincidencia para auto-calibrarse. Es decir el PLC seguirá punto de control en su recorrido del proceso térmico, pero también considerando la retroalimentación de la señal de la temperatura que indique la

cercanía al punto de control para emitir los valores de autoajuste (autocalibración, autotune) para después se usen en el PID en su avance controlado por el proceso térmico de la autoclave.

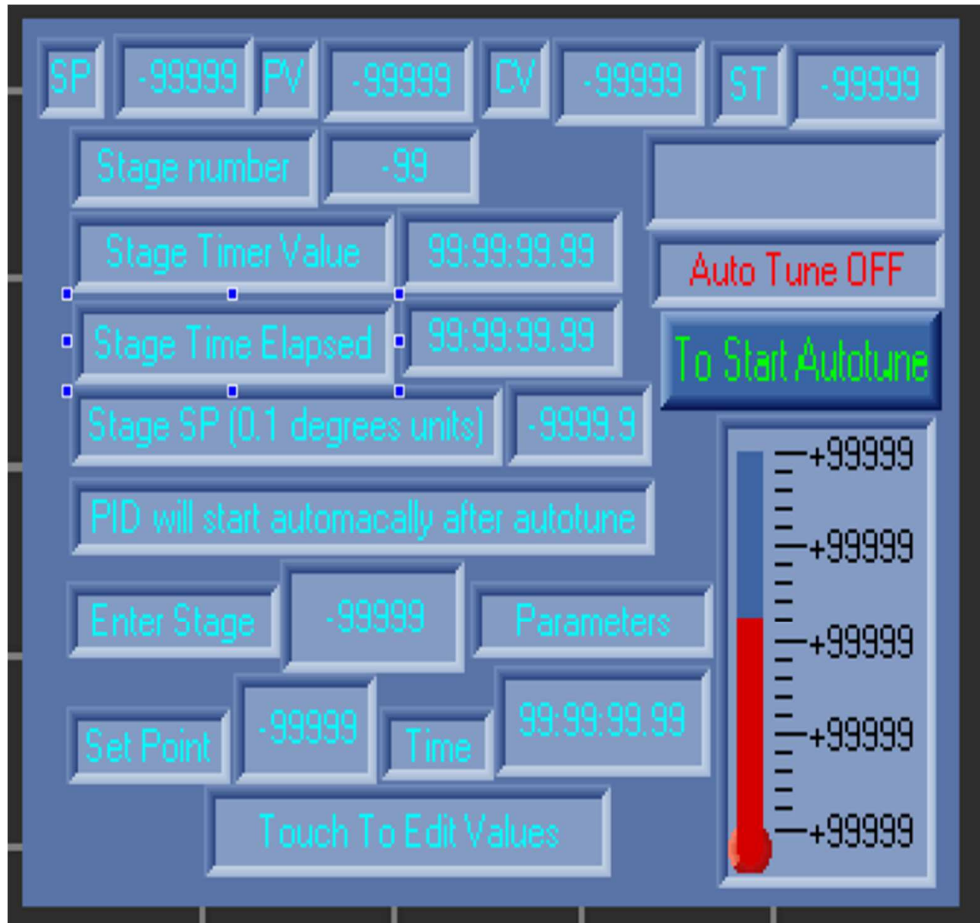


Figura 37. Pantalla táctil con datos en proceso de auto-calibración

Esta otra imagen (Figura 38) muestra la Pantalla táctil del PLC Unitronics V570, que el proceso de Auto-Tune ha sido completado, entonces el PID del PLC estará habilitado para recorrer todos los puntos cargados en la tabla de puntos que

generan el proceso de térmico, de forma secuencial y con intervalos previamente programados.

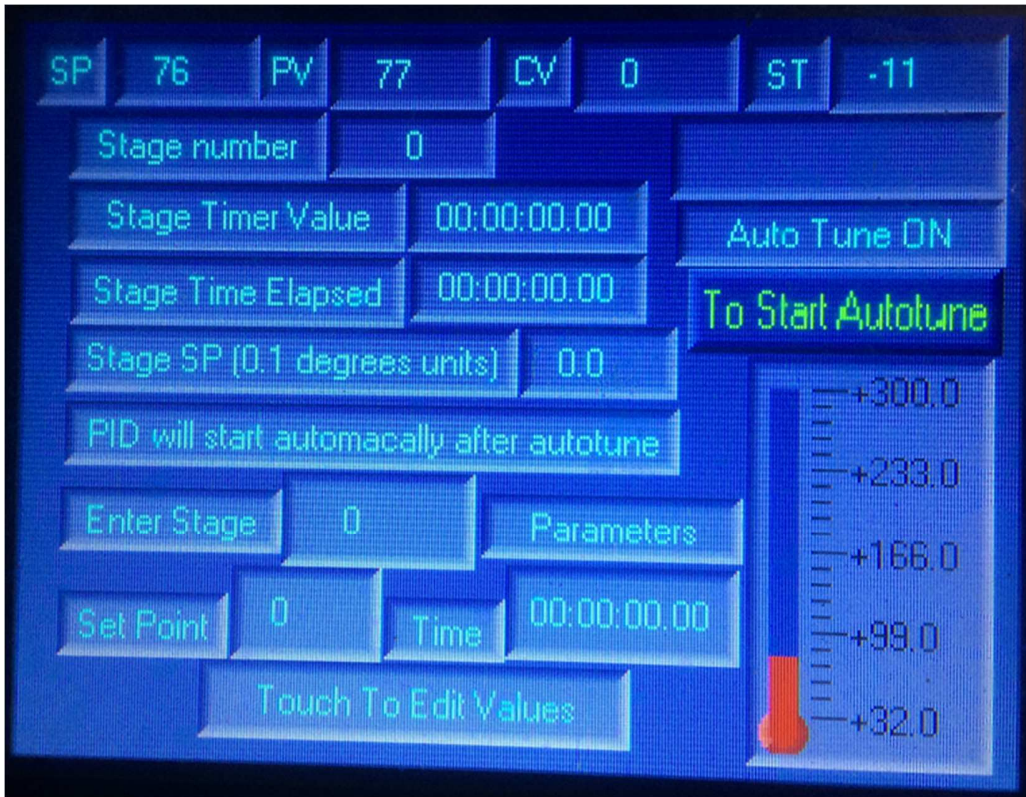


Figura 38. Proceso de Auto-Tune terminado

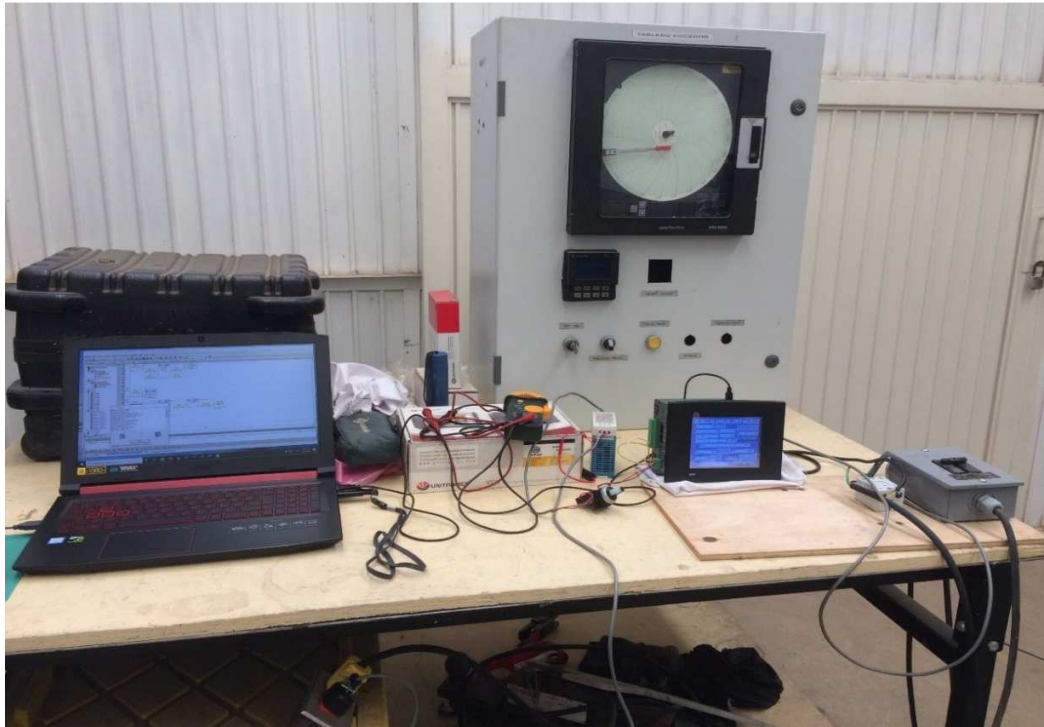


Figura 39. Montaje de la maqueta para simular el control de temperatura

En la figura 39 se muestra la maqueta demostrativa que se construyó para realizar el experimento con el uso del PLC V57057-T20B-JN, marca: Unitronics, alimentación: 12 / 24 Vcd, una computadora, equipo de medición (multímetro y amperímetro), protecciones eléctricas para la bomba 2 x 15 Amp, 220 Vca. Además se utilizó un termómetro electrónico, una fuente de poder, herramienta, y otros componentes para revisión de señales en diversos puntos del proceso térmico, cabe mencionar que por falta de una autoclave se simuló la parte de calentamiento de un proceso térmico, utilizado en el ciclo de esterilización.

En la figura 40, se muestran la conexión del sensor de temperatura PT-100 a la tubería usada por el sistema de simulación del control de temperatura



Figura 40. Montaje del sensor de temperatura PT-100

En la figura 40, se muestra el montaje de la resistencia eléctrica y del sensor en la maqueta de simulación de la autoclave.



Figura 41. Montaje de la resistencia calefactora

En la figura 41 se muestran el montaje del elemento calefactor, el cual es la resistencia eléctrica, de 1500 Watts a 120 Vca, modelo SG-1153L, BKR.

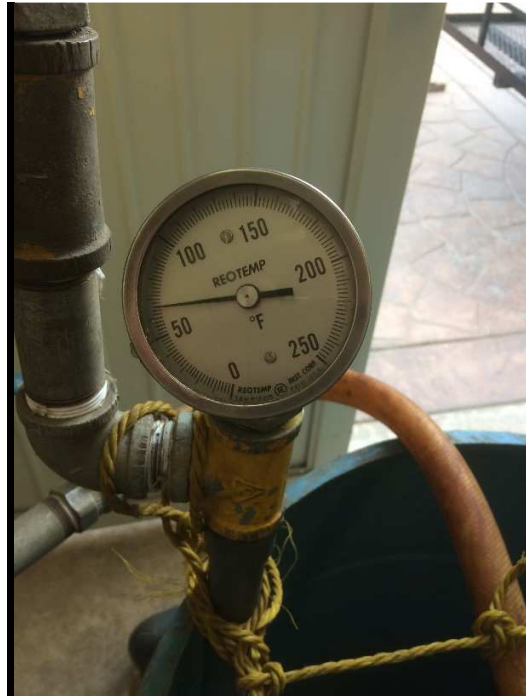


Figura 42. Termómetro analógico.

Como forma de respaldo se utilizó un termómetro analógico de 0 a 250 grados Fahrenheit, marca: Reotemp, de acero inoxidable de 4.5 pulg. de longitud, rosca 1/2 pulgada npt., que nos permite monitorear de manera independiente del visualizador del PLC, la temperatura del agua del sistema implementado para simular el control de temperatura.

En la figura 43, se muestra la otra parte de la maqueta utilizada para evaluar el control de temperatura PID implementado en el PLC. Debido a no disponer de la cámara de la autoclave, se utilizó un recipiente para contener el agua de la cual se va a controlar la temperatura. La resistencia o elemento calefactor se colocó en una tubería metálica, ya que el recipiente utilizado está hecho de plástico. Lo anterior requirió de la utilización de una bomba que permita la recirculación del agua.



Figura 43. Recipiente con calefactores de temperatura y bomba para alimentación de agua

Los resultados obtenidos en la simulación se muestran en la siguiente sección

Resultados

Como primer paso a ejecutar fue realizar la sintonización automática (autotune). En la figura 44, se puede observar los resultados obtenidos y mostrados en la interfaz del PLC con la computadora. Se observan los valores obtenidos para K_p , T_I , T_D y ST que son 24, 1, 382 y 37 respectivamente en formato entero

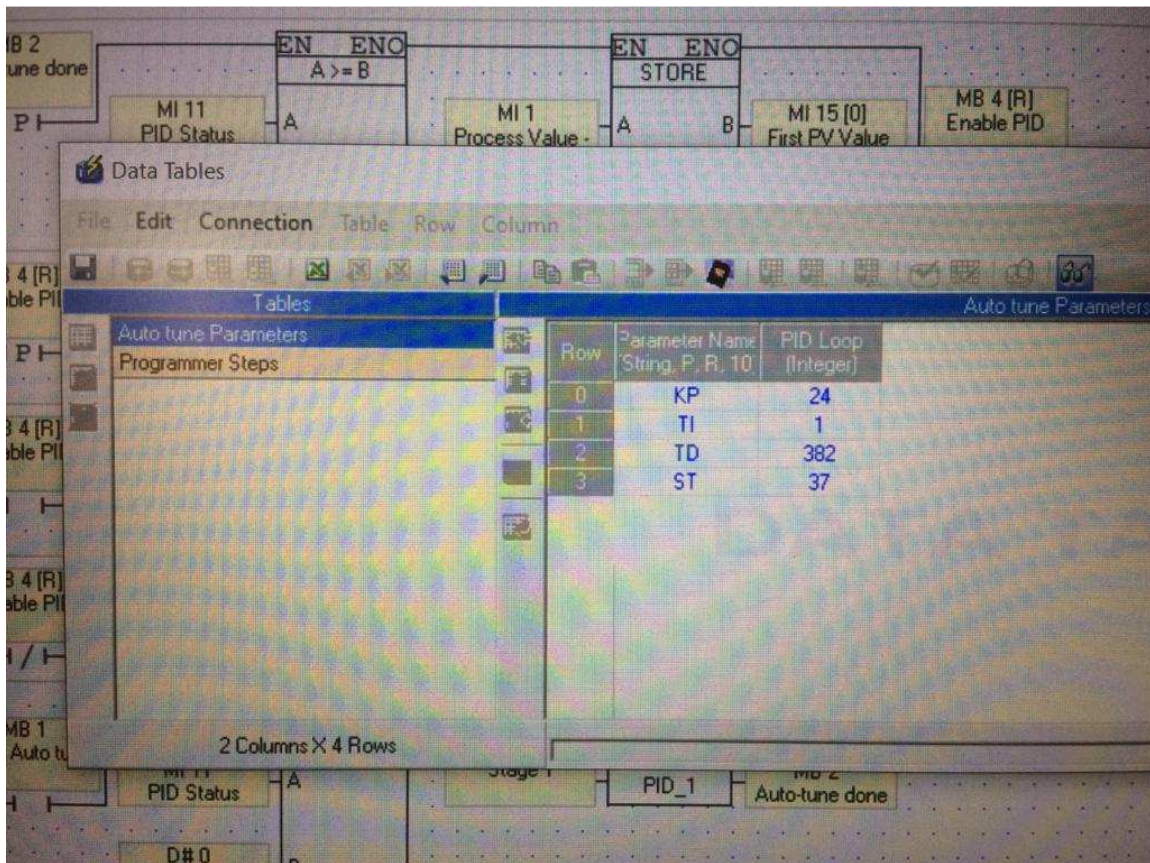


Figura 44. Valores del PID obtenidos por la sintonización automática

El sistema implementado es difícil obtener las temperaturas obtenidas en el autoclave, por lo que se realizó un “escalamiento” del problema con el fin de demostrar la operación del control PID implementado en el PLC (Figura 43). Es decir se programó el ciclo de operación propio de la autoclave y se procedió a obtener mediciones del comportamiento, similar al que aparece en secciones anteriores (Figuras 3 y 5). Lo anterior se muestra en la figura 45, en la que observa el registro de temperatura impreso en papel medido en el proceso.

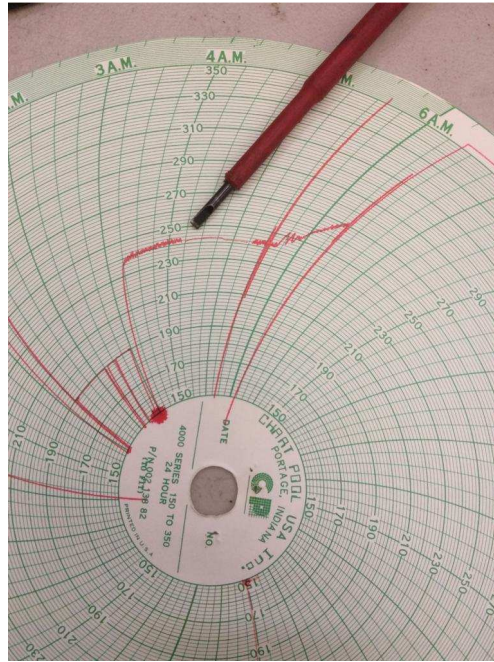


Figura 45. Registro de la temperaturas del proceso

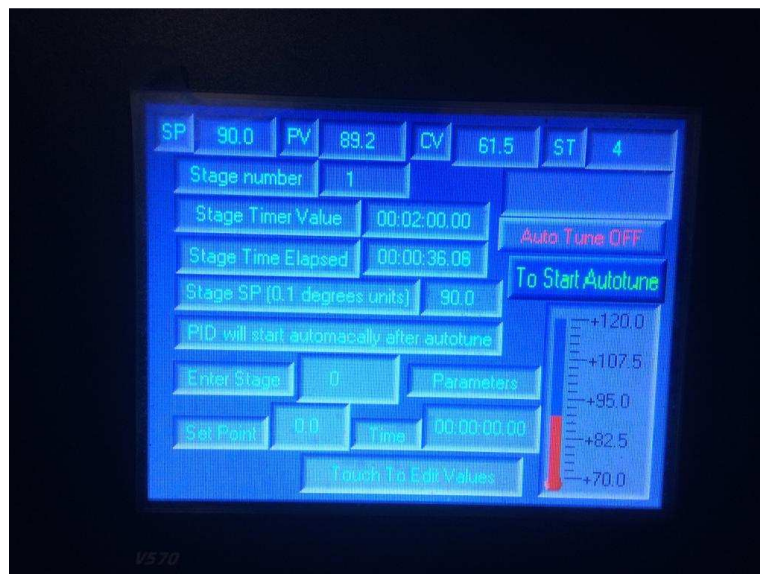


Figura 46. Pantalla táctil durante el proceso

Con los valores obtenidos por la sintonización automática se simuló el comportamiento de la autoclave con el control PID con los parámetros obtenidos de la sintonización automática.

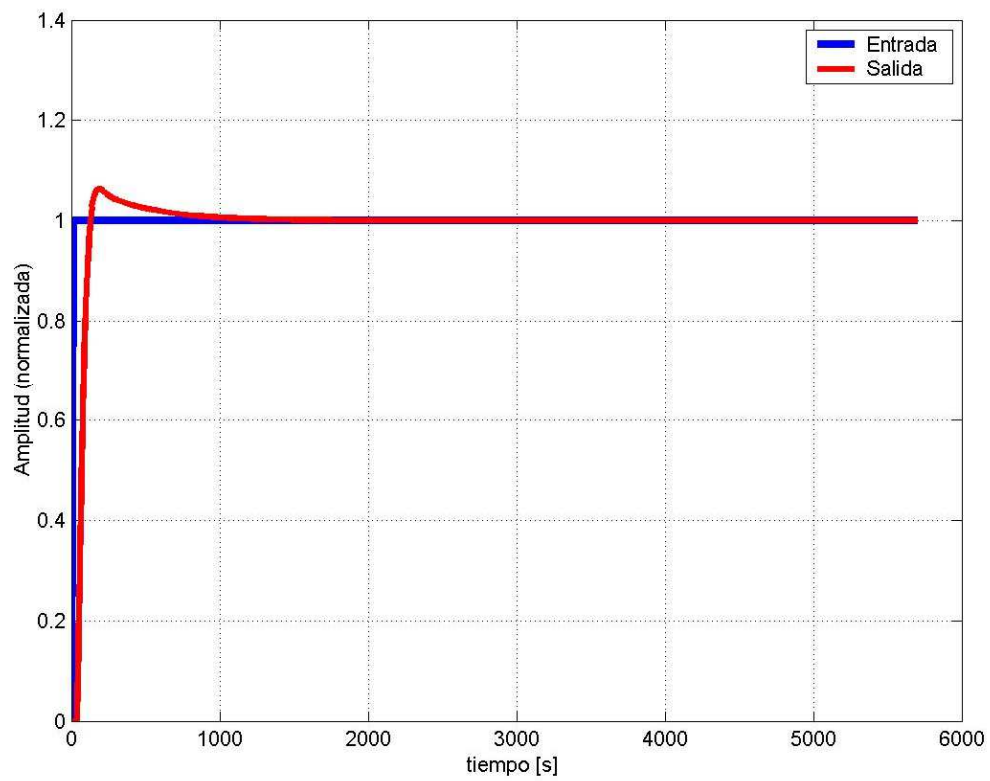


Figura 47. Simulación del comportamiento de la autoclave con control PID usando los parámetros obtenidos en la sintonización automática

Capítulo VI

Conclusiones

El programa del control PID del PLC V570 Unitronics, fue utilizado para seguir una tabla de puntos de control de un proceso térmico determinado, simulando el proceso térmico de calentamiento de un proceso de esterilización de una autoclave, donde cada punto tiene una temperatura y un tiempo de estadía.

Cada un punto de control es alcanzado por el control PID del PLC siguiendo los puntos de una tabla de datos, que contienen temperatura y tiempo de estadía. Controlando la temperatura podemos controlar la presión, refiriendo el experimento a la presión de vapor generado por temperatura.

El calentamiento de agua a través de una resistencia eléctrica, y haciéndola circular con una bomba centrífuga. La resistencia, un termómetro electrónico RTD, un termómetro analógico, se instalaron en la tubería de recirculación.

Con los datos de la tabla el PLC controló que se calentará el agua siguiendo la tabla de datos, y observar que los puntos se alcanzaran uno a uno.

Es muy importante que se requieren controles efectivos, confiable y que aseguren una esterilización adecuada. Así también como en los procesos térmicos usados en la esterilización de alimentos y enseres médicos, la aplicación de las autoclaves es requerida en otros campos de la industria tales como la metalurgia, aeroespacial, etc.

Se observó, que si bien, se controló solo la temperatura de una maqueta que simulaba la autoclave, el programa desarrollado puede ser utilizado con algunas modificaciones para controlar la temperatura del autoclave, siempre que se tenga

además elementos que permitan a generar los procesos de vacío o enfriamiento requeridos para cumplir con el proceso térmico completo, del ciclo esterilización requerido por los estándares de esterilización en el área de aplicación (de alimentos ó médica).

Bibliografía

1. **Héctor Cerra, M. Cristina Fernández, et. al.** *Manual de microbiología aplicada las industrias farmaceuticas, cosmeticas y productos* . 2013.
2. **Stempliuk, Silvia I. Acosta-Gnass y Vlaeska de Andrade.** *Manual de esterilización para centros de salud*. s.l. : Organización Panamericana de la Salud, 2008.
3. **COFEPRIS** . *Normatividad Mexicana para el equipamiento de hospitales*. 2018.
4. **FDA.** *Normatividad US FDA*.
5. *Laboratory autoclaves: a case of study.* **Faugeroux, Delphine y Wells, Barbra.** 2016, Laboratory Design.
6. **O'Dwyer, Aidan.** *Handbook of PI and PID Controller tuning rules*. London : Imperial College Press, 2009.
7. **Visilogic.** *Software Manual Visilogic-Getting Started V230-G23 Rev:3.0*.
8. *Sintonización de un controlador PID implementado en un PLC haciendo uso de inteligencia de enjambres.* **Arturo Duque Marín, Jesus A. Lopez, Andres Felipe Navas.** 1, Enero de 2017, Prospect, Vol. 15, págs. 35-41.
9. **László Keviczky, Ruth Bars, Jenő Hetthéssy, Csilla Bányász.** *Control Engineering:MATLAB Exercises*. Singapur : Springer, 2019.
10. *Simple Models for Process Control.* **Raymond Gorez, Petr Klán.** 2011, Simulation Notes Europes. doi: 10.11128/sne.21en.10075.
11. *Mathematical Model of an Autoclave.* **Aleksander Preglej et. al.** 2011, Journal of Mechanical Engineering, págs. 503-516.
12. **Kulakowski, Bohdan T.** *DYNAMIC MODELING AND CONTROL OF ENGINEERING SYSTEMS*. New York : Cambridge, 2007.
13. **Astrom, Karl J.** *PID Controllers* . NC : Instrument Society of America , 1995.
14. <https://instrumentacionycontrol.net/conociendo-el-lenguaje-escalera-ladder-en-los-plcs/>.