



*Universidad Nacional
de La Pampa*

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA
FACULTAD DE INGENIERÍA**

TRABAJO DE PROYECTO Y DISEÑO FINAL

**Automatización de autoclave utilizada en ensayos del laboratorio
de alimentos del centro regional *INTI La Pampa*.**

Carrera: Ingeniería Electromecánica

Alumno: Daniel Esteban Diaz Carbó

Tutor Académico: Ing. Roberto Yep – Electrónica I y Electrónica II

**Jurado: Ing. Néstor García – Facultad de Ingeniería- UNLPam.
Ing. Diego Vicente - Facultad de Ingeniería- UNLPam.
Ing. Ariel Castelino – Facultad de Ingeniería – UNLPam.**

Resumen:

Este proyecto se realizó con el propósito de evaluar la mejora de una autoclave existente en el INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial) y obtener un equipo más seguro y con una mejora tecnológica, por el uso de un microcontrolador y un circuito electrónico de mando, aplicado sobre el circuito de potencia existente. Con la implementación de los conocimientos adquiridos durante la carrera se llevó a cabo el diseño de un controlador PID, para lo cual primero se relevaron los datos de la planta a lazo abierto, más tarde se procedió a evaluar los mismos. Se diseñó un controlador digital, luego se simuló de forma computacional.

Luego se procedió a realizar un diseño electrónico con un microcontrolador y el circuito del mismo. Así también se programó y se implementó el mismo en una maqueta de la planta original, con el fin de comprobar el sistema a lazo cerrado del controlador implementado.

Palabras Clave:

Controlador – Microcontrolador – PID – Autoclave

Overview:

This project was carried out with the purpose of evaluating the improvement of an existing autoclave at the INTI (National Institute of Industrial Technology) and obtaining a safer equipment with a technological improvement, through the use of a microcontroller and an electronic command system, applied on the existing power circuit. With the implementation of the knowledge acquired during the studies, the design of a PID controller was carried out, for which first the data of the open-loop plant was collected, later was evaluated. A digital controller was designed, then simulated computationally.

Then an electronic design was made with a microcontroller and its circuit. Thus, it was also programmed and implemented in a model of the original plant, in order to check the closed-loop system of the implemented controller.

Palabras Clave:

Controller – Microcontroller – PID – Autoclave

General Pico La Pampa, 14 de Abril de 2021

Contenido

Introducción.....	3
Planteo de situación problemática	3
Objetivos:.....	4
Marco teórico:.....	5
Diseño del sistema.	8
Análisis e investigación de los componentes	22
Procedimiento de configuración de Microcontrolador.....	24
Procedimiento de programación de Microcontrolador	26
Procedimiento de diseño del circuito eléctrico de control	29
Circuito de detección de cruce por cero.....	30
Circuito de potencia.....	32
Circuito de medición.....	32
Prueba del PD	33
Resultados Obtenidos y conclusiones.....	34
Bibliografía	36

Introducción:

El siguiente proyecto se realizó según la resolución N°069/16 de Ingeniería Electromecánica (Plan 2015)

Este proyecto se realizó con el propósito de mejorar y obtener un equipo más seguro y con una mejora tecnológica. El mismo se pretende lograr por medio de la modernización de la autoclave implementando un sistema de control integrado por un controlador PID y un circuito electrónico para el mismo. Se logrará por este medio la obtención de resultados más precisos y controlados, y un procedimiento más seguro en el uso de la autoclave para ensayo de conservas de alimentos.

La autoclave es un recipiente a presión, que se utiliza para diferentes propósitos. Los conocidos y relacionados con este trabajo son los siguientes:

- Para esterilización de instrumental especial.
- Para ensayo de conservas de alimentos.

La autoclave para la cual se realizó este diseño y proyecto es una autoclave para esterilización de instrumental. La misma pertenece al INTI La Pampa, institución en la cual el autor de este proyecto desempeñó la labor como becario durante 1 año. De ahí es que se gesta el proyecto para su realización.

Al conocerse que la autoclave existente sólo se utilizaba para la esterilización de instrumentos, y ante la necesidad de un equipo de prueba de conservas, surgió el proyecto actual de adaptar la misma a una autoclave para ensayos de conservas.

Planteo de situación problemática

La autoclave para ensayo de conservas tiene un proceso en el cual la conserva debe ser sometida a una temperatura de 120°C durante 2 minutos, luego se debe dejar enfriar lentamente para que el frasco de conserva no sufra roturas por variaciones térmicas bruscas.

El problema radica en el riesgo que implica el uso de la autoclave para conservas con una válvula de tipo “encendido/apagado” y en la ineficiente e imprecisa metodología de control del mismo para realizar el proceso, ya que el sistema no distingue el sensor del actuador (válvula de alivio de presión) y no discrimina la medición y control de los parámetros de temperatura y presión, sino que controla ambos por un valor fijado de presión a lazo abierto del sistema.

El sistema actual comienza a elevar la temperatura una vez encendido (no posee interruptor, simplemente se conecta el enchufe al tomacorriente). Para el procedimiento controlado por una persona, se comienza a elevar la temperatura hasta que esta llega a 120°C. Este valor es fijado por la magnitud establecida de la válvula de alivio de presión a 1 Kg/cm². Luego esta válvula al actuar se mantiene en su posición de abierta, independientemente de que la presión baje, evacuando el vapor y no ejerciendo

ninguna otra actuación. De manera que la resistencia seguirá entregando energía en forma de calor, hasta que la persona desconecte la alimentación del sistema a la red eléctrica. Cabe destacar que por más que la válvula de presión cambie al estado de apertura, liberando vapor de agua-y con la liberación del mismo el calor entregado al sistema-, la temperatura del sistema sigue aumentando hasta cortar el suministro de energía de forma manual.

Esto lleva a la conclusión de que es un sistema de lazo abierto, ya que la salida no se mide ni se realimenta para compararla con la entrada. Al final, la persona encargada de llevar a cabo el procedimiento, deberá desconectar la autoclave en el momento que esta abra la válvula. Encontrándose así, pendiente de esta acción.

Objetivos:

Con este trabajo se pretende desarrollar un proyecto real de diseño de un sistema de control. Cabe aclarar que la aplicación del mismo está sujeta a los recursos disponibles por el INTI, que es la institución que dispone del equipo.

Se pretende implementar las distintas herramientas adquiridas en el transcurso de la carrera, asentándolas en la práctica a través de este diseño.

El objetivo principalmente consiste en el análisis del sistema a controlar y sus parámetros. Luego en la investigación y desarrollo del equipamiento que se deberá implementar en el mismo con el último fin de que la institución propietaria de la autoclave lleve a cabo la automatización que se pretende del sistema.

Al finalizar el trabajo se pretende haber definido el diseño del sistema de control. Así mismo serán los materiales para llevar a cabo el proyecto (sensores, actuadores, sistema de control, tableros, materiales eléctricos/electrónicos, manuales, etc.), los cuales deberá utilizar la institución correspondiente para llevar a cabo el proyecto.

Marco teórico:

El sistema actual de la autoclave se encuentra conformado por la configuración que se puede observar en la Figura 1.



Figura 1

El sistema de la autoclave, actualmente cuenta con:

1. Válvula de purga de aire. La cual se mantiene abierta durante el calentamiento del agua y la producción de vapor. En el momento que comienza a salir vapor de forma continua (proceso que se lleva a cabo visualmente), se cierra la válvula de purga de aire.
2. Manómetro. El instrumento de medición que se utiliza para tomar los parámetros de referencia en este equipo es el manómetro, el cual indica la presión en MPa, y a su vez, indica la temperatura de forma indirecta (considerando como referencia la presión interna del recipiente).
3. Válvula de seguridad. Esta válvula cumple la función de aliviar la presión dentro del recipiente. La misma posee ajustado un valor de forma mecánica, el cual no se controla durante el proceso. El control de ajuste de presión se realiza una vez al año con un patrón de parámetro.
4. Resistencia calefactora. Es utilizada para transmitir calor al agua que se encuentra dentro del recipiente, con el fin de elevar la temperatura de la misma, producir vapor y elevar la presión interna. Esta resistencia utiliza energía eléctrica de la red a una tensión de 220 VCA y es de una potencia de 2.000 W. Actualmente no se ejerce ningún tipo de control sobre este actuador.

Las siguientes instrucciones corresponden al procedimiento de uso de la autoclave:

1. Se debe verificar que la autoclave no esté conectada a la red eléctrica.
2. Se debe agregar agua destilada verificando que el nivel de la misma no supere la superficie de chapa perforada en donde se colocan los elementos a ser sometidos al procedimiento de la autoclave.
3. Se debe colocar el material a ser ensayado sobre la chapa perforada.
4. Se procede a cerrar la tapa de la autoclave y a sellar la misma ajustando las tuercas (deben ajustarse de a pares, de forma cruzada).
5. Se controlará que la válvula de alivio se encuentre inicialmente abierta.
6. Acto seguido se conecta la alimentación al tomacorriente, alimentando la misma y comenzando esta a operar.
7. Se mantiene abierta la válvula de alivio hasta el momento en que el vapor cesa de salir de forma interrumpida y comienza a fluir de forma continua. Esto asegurará que la autoclave ha sido purgada completamente y se consiguió eliminar todo el aire de su interior.
8. Se cierra la válvula.
9. Una vez alcanzada la presión de trabajo establecida de 1kg/cm^2 se abrirá de forma espontánea la válvula de alivio (en caso de no abrirse esta se abrirá la válvula de seguridad), y en consecuencia se debe desconectar la alimentación eléctrica de la autoclave.
10. Luego se cuenta un tiempo según la esterilización/ensayo a realizar, en donde se desenergiza de forma definitiva y se espera a que se enfríe.
11. En caso de que haya abierto la válvula de alivio se deja compensar de forma natural la presión y temperatura de la autoclave con la temperatura ambiente. Caso contrario, se debe abrir la válvula y esperar que se equiparen las mismas.
12. Finalmente, cuando el equipo haya enfriado lo suficiente (se recomienda que sea la temperatura ambiente) se procede a abrir la tapa desenroscando las tuercas y luego se prosigue a retirar los elementos ensayados del interior de la autoclave.

Analizando la forma de operar el sistema se puede concluir que es un sistema a lazo abierto en donde la salida no es medida en forma directa ni tampoco se realimenta para compararla con la entrada. Además, debe haber una persona operando sobre el actuador, ya que ante una señal de escalón de entrada (aplicar una tensión constante de 220V a la resistencia) la salida sigue creciendo de forma constante e indiscriminada.

Se logra apreciar que se ejerce un control de forma manual, en el que una vez que se visualiza la salida continua de vapor se cierra la espita manualmente y luego por tiempo se controla el momento en el que se ha de apagar la fuente de calor.

Los procesos mencionados anteriormente dejan una clara evidencia de que se trata de un sistema a lazo abierto en el cual no hay control automático directo de la variable

de salida y que el control que se ejerce por la persona es impreciso (considerando que no se mide la temperatura de forma directa, sino indirectamente con la calibración de la válvula). Ya que, en cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. Así, a la entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración de la válvula de presión a 1 kg/cm².

El sistema actual, relevado a lazo abierto se expresa en la figura 2:

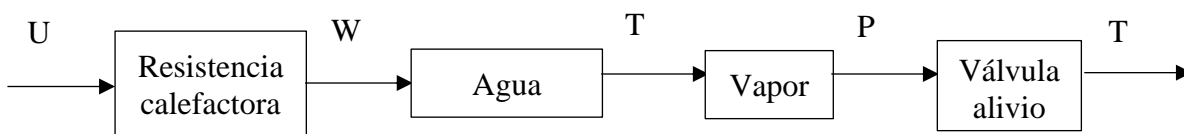


Figura 2

La válvula de alivio termina siendo un actuador que controla la temperatura de la autoclave. Esto lo realiza considerando que el estado termodinámico del vapor de agua a una presión manométrica de 1 kg/cm² o 0,96 bar se encuentra a 120°C, temperatura a la cual se debe realizar el proceso de la autoclave. Considerando la siguiente tabla de constantes termodinámicas del vapor de agua húmedo, se observa lo mencionado anteriormente para el funcionamiento de la válvula de alivio de presión, la cual se encuentra configurada para actuar a una presión de 1,9853 bar.

Pres. sat. bars	Temp. sat. °C	Volumen v' (dm ³ / kg)	Volumen v'' (dm ³ / kg)	Entalpía i' (kJ / kg)	Entalpía i'' (kJ / kg)	Entalpía η_{-v} (kJ / kg)	Entropía s' (kJ / kg.°K)	Entropía s'' (kJ / kg.°K)	Entropía Δs (kJ / kg.°K)
1,0132	100,00	1,0435	1673,00	419,1	2675,8	2256,7	1,308	7,355	6,048
1,2000	104,81	1,0472	1428,20	439,4	2683,3	2244,0	1,361	7,298	5,937
1,2080	105,00	1,0474	1419,40	440,2	2683,6	2243,5	1,363	7,296	5,933
1,4000	109,32	1,0509	1236,50	458,4	2690,3	2231,9	1,411	7,246	5,835
1,4326	110,00	1,0515	1210,10	461,3	2691,3	2230,0	1,419	7,239	5,820
1,6000	113,32	1,0543	1091,30	475,4	2696,4	2221,0	1,455	7,202	5,747
1,6905	115,00	1,0558	1036,50	482,5	2698,9	2216,4	1,473	7,183	5,710
1,8000	116,93	1,0575	977,39	490,7	2701,8	2211,1	1,494	7,163	5,668
1,9853	120,00	1,0603	891,71	503,7	2706,3	2202,5	1,528	7,130	5,602
2,0000	120,23	1,0605	885,59	504,7	2706,6	2201,9	1,530	7,127	5,597
2,2000	123,27	1,0633	809,99	517,6	2711,0	2193,4	1,563	7,096	5,533
2,3209	125,00	1,0649	770,43	525,0	2713,5	2188,5	1,581	7,078	5,497
2,4000	126,09	1,0659	746,60	529,6	2715,0	2185,4	1,593	7,067	5,474

Una vez alcanzada la temperatura de 120°C, se debe mantener a la misma durante unos 2 minutos a todos los productos introducidos en la autoclave que se pretenden ensayar.

En conclusión, se posee un sistema en el cual se desea controlar la temperatura elevando la misma, hasta llegar al valor de 120°C y de allí en más dejar durante 2 minutos las conservas con el fin de esterilizar las mismas. Esta medición, se realiza de forma indirecta.

Por otro lado, el sistema no es automático, ya que la persona debe estar atenta a la apertura de la válvula espita, para luego apagar el sistema.

Por lo tanto, en el presente proyecto se desarrolla la automatización del proceso por medio de un controlador y un sistema de medición directa de la variable a controlar, es decir, la temperatura del vapor.

Diseño del sistema.

Para controlar la planta de la autoclave se propone utilizar un controlador PID. Éste PID será implementado sobre un microcontrolador de la marca Microchip. El microcontrolador seleccionado es el **PIC18F45K20**ⁱ. Éste será la base para el diseño del circuito electrónico y la programación en C, del PID a diseñar y fabricar.

En primera instancia se relevó la planta del sistema.

Para ello se utilizó un termistor NTC -que es el sensor que se tenía a disposición para realizar la medición-. Este es un tipo de sensor de temperatura de resistencia variable, que se denomina NTC por sus siglas en inglés: Negative Temperature Coefficient. Este sensor presenta la particularidad que su resistencia disminuye a medida que aumenta la temperatura, ya que está compuesto por un semiconductor. A diferencia de los RTD, la variación de la resistencia respecto de la temperatura no es lineal en los NTC. En este caso la curva característica es exponencial, y responde a la ecuación modelo de *Steinhart-Hart*:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3,$$

En donde:

T: es la temperatura en grados Kelvin.

R: Es la resistencia a la temperatura **T** en Ohms.

A, B, C: son los coeficientes de *Steinhart-Hart*, en donde varía dependiendo del tipo de modelo de termistor y del rango de temperatura de interés.

Debido a la complejidad de la ecuación y a que no es necesario una precisión tan alta para este caso, se procedió a utilizar una aproximación, la cual se expresa en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{T_0} + \frac{1}{B} \ln \left(\frac{R}{R_0} \right)$$

En este caso:

T₀ es la temperatura ambiente de 25°C, es decir 298.15°K.

B: 3950 el coeficiente del termistor.

R₀: es el valor de la resistencia a la temperatura de 25°C, en este caso 10kΩ.

De aquí se mide la resistencia **R** y luego se obtiene el valor **T**, correspondiente a la temperatura a la que se encuentre midiendo en ese momento el termistor.

Una gran ventaja es que al realizar la medición con el termistor NTC no es necesario agregar una junta fría para compensar, como en el caso de una termocupla o termopar. A continuación, se conectó a una placa Arduino, según la figura 3 representativa del esquema eléctrico:

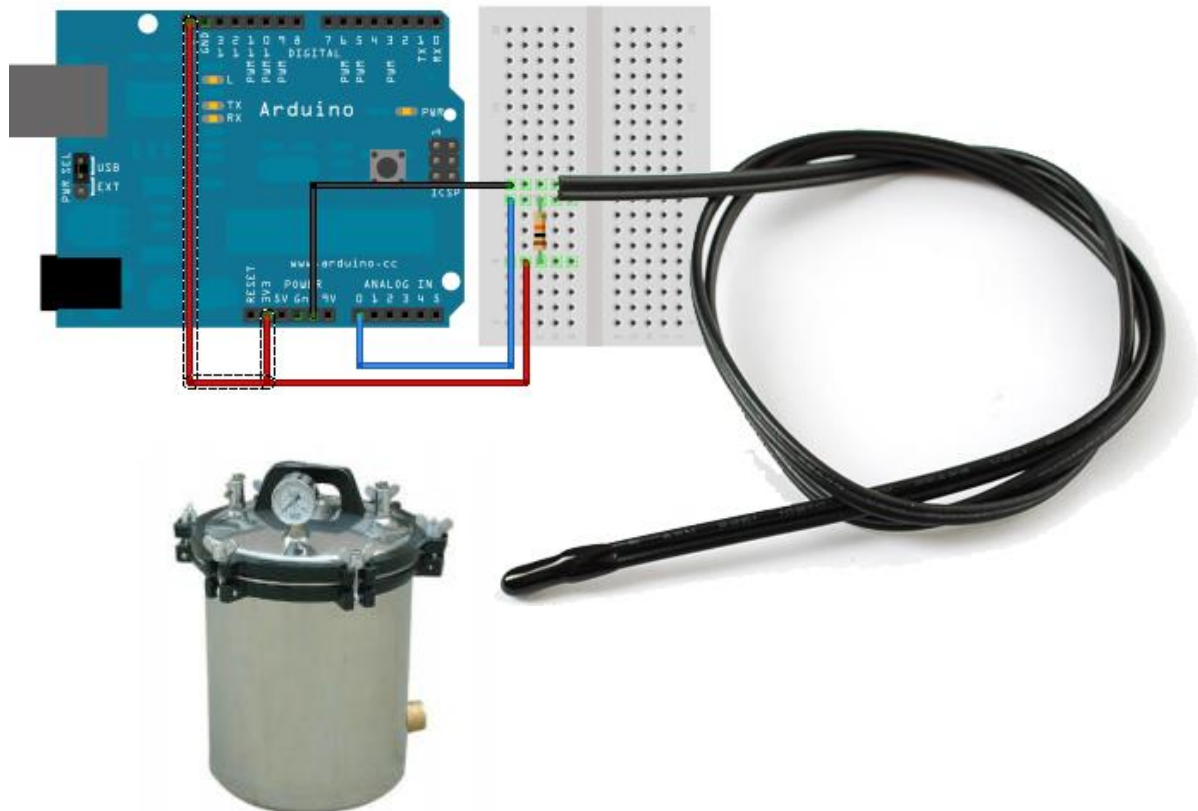


Figura 3

En donde, a través del puerto serie de la placa Arduino se obtuvieron los datos de la temperatura respecto del tiempo, a intervalos de 1 segundo, con el programa correspondiente cargado en la interfaz de programación de Arduino. Para ello el código se cargó en el controlador de Arduino, luego de haber conectado este al puerto USB, y de su posterior compilado en el programa IDE Arduino. El código del programa cargado lo puede hallar en el anexo de este proyecto. ⁱⁱ

El valor del termistor NTC utilizado, es de 10 k Ω a una temperatura de 25°C. Para conseguir los valores de temperatura a través de este esquema, se utilizó una entrada analógica en la cual se realiza una medición de tensión en el divisor resistivo de tensión generado por una resistencia de 10 k Ω ±1% y el termistor NTC. Este circuito se diseñó de esta manera para medir la tensión sobre la resistencia del termistor, ya que el microcontrolador no mide resistencia sino tensión a través de la entrada de Conversión Digital Analógica (ADC por sus siglas en inglés).

Teniendo en cuenta la resistencia de $10\text{ k}\Omega$ y la resistencia variable de termistor, a esta última la denominamos **R** el voltaje de salida **V_o** es:

$$V_o = R / (R + 10K) * V_{cc}$$

En donde **V_{cc}** es la tensión de la fuente de 3,3 V.

Considerando que el rango a medir se encontraba dentro de los 20°C y los 120°C aproximadamente, y teniendo en cuenta que la caída de tensión producida sobre el valor del termistor da como resultado un rango determinado por:

$$\text{Valor ADC} = V_i * 1023 / V_{\text{aref}}$$

En donde **V_i** es la tensión de medición sobre la resistencia y **V_{aref}** es la tensión de 3,3 V.

Considerando la tensión **V_o = V_i** se tiene:

$$\text{Valor ADC} = R / (R + 10K) * 1023$$

En donde se logra observar que es independiente de la tensión de alimentación.

Por último, lo que se desea obtener es el valor de la resistencia **R** con el cual se hallará el valor de la temperatura correspondiente al NTC con ese valor resistivo.

La precisión obtenida para la medición del termistor es de 1%, es decir de $\pm 0,25^\circ\text{C}$, ya que a 25°C se puede encontrar entre $10.100\ \Omega$ y $9.900\ \Omega$.

La entrada analógica utilizada es de tipo Single-end, debido a que se toma como referencia **GND**, es decir, la masa. Y se mide la tensión de forma directa sobre la resistencia del divisor resistivo, respecto de masa.

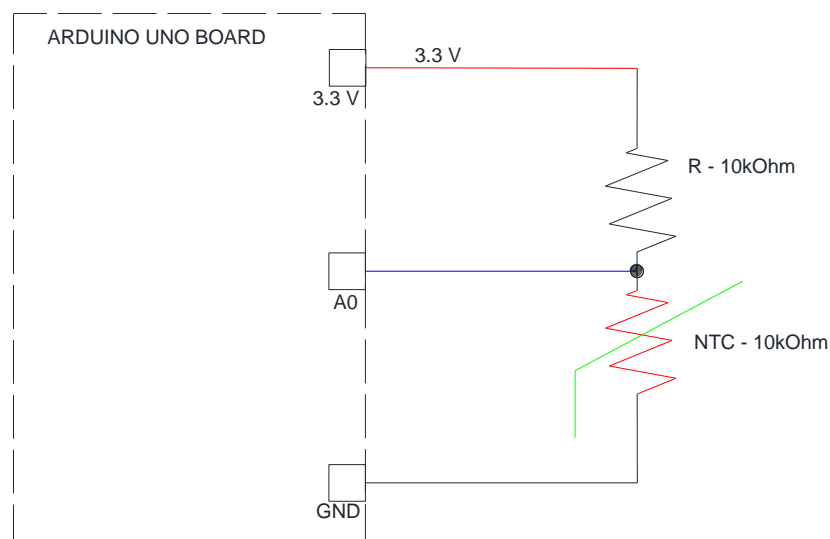


Figura 4

En el caso de Arduino Uno, las entradas analógicas disponen de 10 bits de resolución, lo que proporciona 1024 niveles digitales, lo que a 3,3 V supone una precisión de la medición de $\pm 4,74\text{mV}$. Que implica una variación porcentual de $\pm 0,14\%$, se considera muy buena precisión para los valores que se van a relevar.

El circuito mencionado se puede apreciar en el esquema de conexión representado en la *Figura 3*, en la cual se logra apreciar la conexión llevada a cabo para el relevo de la temperatura y su registro. En la *Figura 4* se puede apreciar el diagrama del circuito eléctrico de conexionado de los componentes con la placa de Arduino.

Con el fin de obtener una medición más real y eliminar errores, se tomaron 5 mediciones por segundo y se promediaron. Éstas se registraron para graficar cada 1 segundo. Los mismos se pueden observar en la *Figura 5*.

Luego con la lectura de cada valor de tensión adquirido en la entrada analógica A0, se procedió a la conversión de cada uno de los valores de tensión a su valor correspondiente en $^{\circ}\text{C}$.

Los siguientes datos fueron obtenidos y plasmados en el siguiente gráfico:

Temperatura vs tiempo - Entrada Escalón - NTC

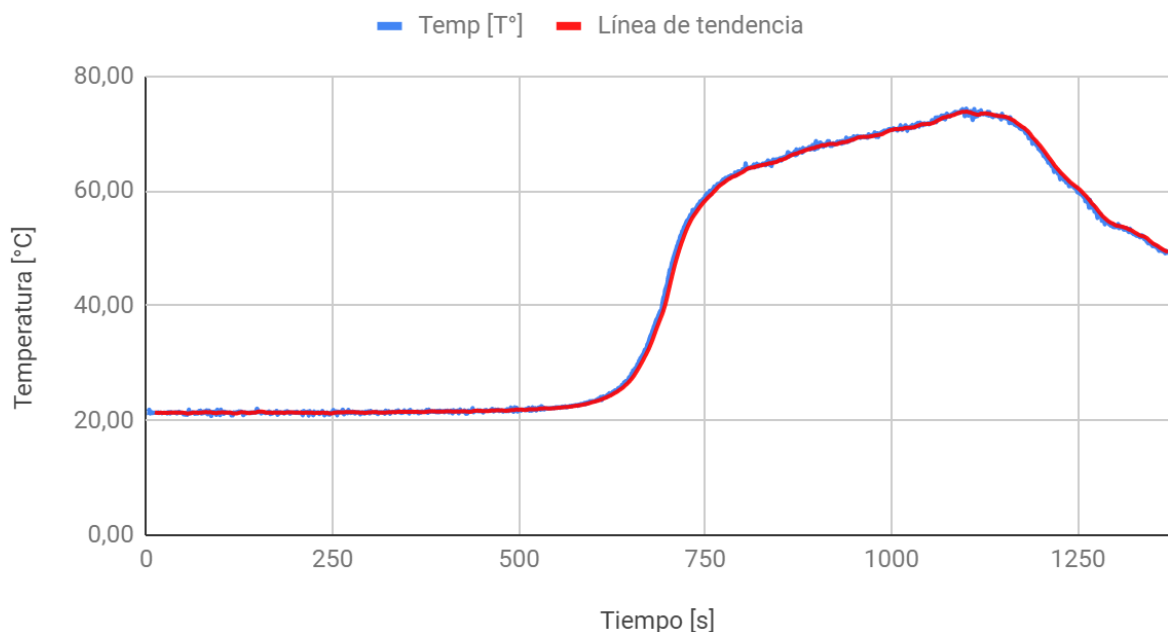


Figura 5

En la *figura 5* se han graficado los valores correspondientes al ensayo realizado, en donde se logra apreciar que la máxima temperatura que se registra es de $74,311^{\circ}\text{C}$ a los 1100 segundos de haber insertado el escalón de 220V en la entrada. En el momento

que se registró la apertura de la válvula de alivio de presión, se registró una temperatura de 73,8°C.

Por los datos obtenidos, se infiere que este método para evaluar la respuesta de la planta no es válido, ya que, la temperatura a la que el agua comienza a evaporar es a los 100°C, y la válvula (a suponer bien calibrada) abre a aproximadamente 1bar de presión manométrica, equivalente a 120°C.

Se concluyó que este método no fue efectivo para medir ya que el termistor NTC se encontraba ubicado sobre la superficie exterior de la autoclave, en donde varios factores han tenido influencia. Principalmente la medición se encontró afectada por la diferencia de temperatura entre la chapa interior y la exterior, causada por una capa de aire que funciona como aislante térmico – en pequeña magnitud- y que termina afectando con un retardo la medición.

Concluido esto se procedió a relevar la planta desde el interior. Para ello se buscó una termocupla que pudiera soportar la temperatura y presión interior. Investigando y buscando alternativas cercanas para su implementación en la autoclave con los recursos disponibles, se logró conseguir una termocupla (perteneciente al INTI La Pampa).

Para realizar la medición con la termocupla tipo K se utilizó una placa de Arduino UNO con un módulo MAX 6675ⁱⁱⁱ. Este módulo desempeña una digitalización de la señal de la termocupla tipo K y realiza su compensación de junta fría. Los datos de salida se poseen una resolución de 12 bit y se transmiten en una comunicación SPI. De este modo se comunica con la placa de Arduino UNO a través del protocolo de comunicación mencionado.

El esquema de conexión del mismo se puede apreciar en la figura 8.

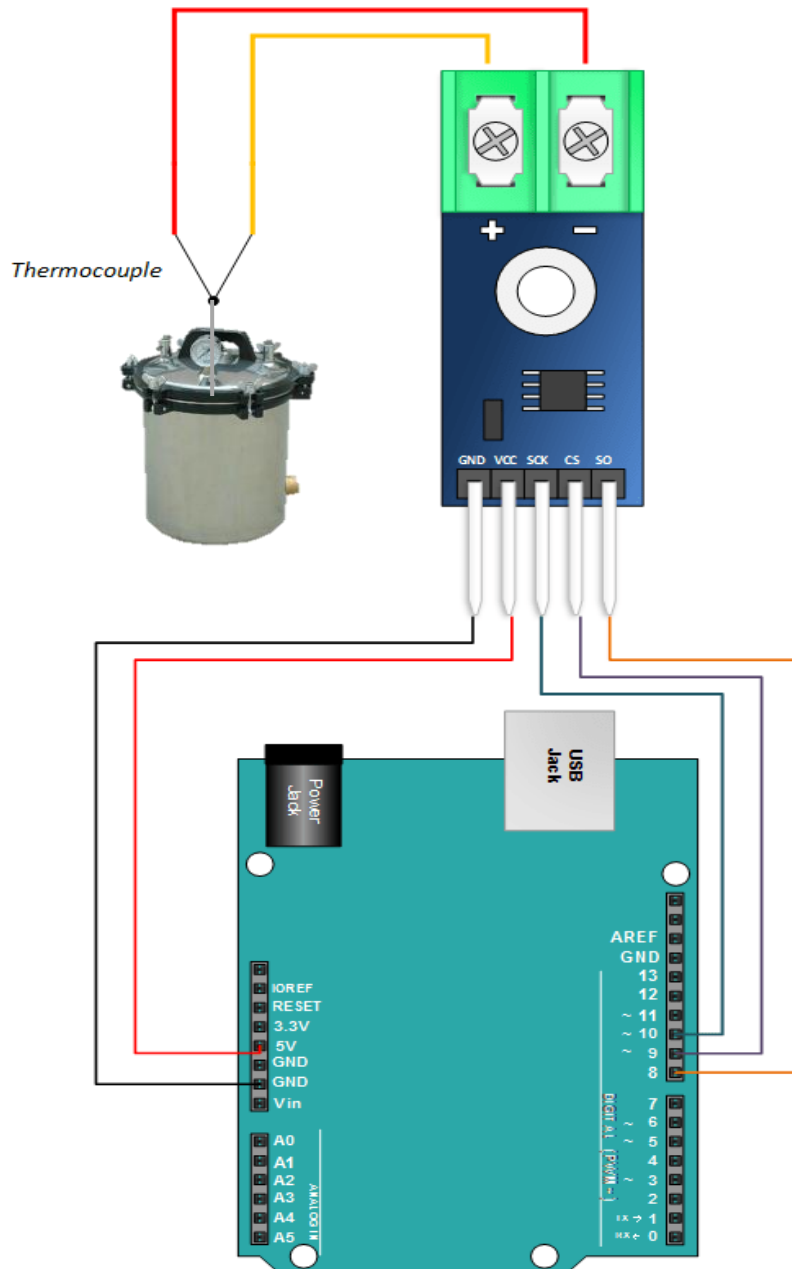


Figura 6

Al microcontrolador Arduino se le cargó un código^{iv}, el cual incluye la librería del convertidor MAX6675, con el fin de relevar los datos de la temperatura cada 500ms:

Se realizaron 3 mediciones, y de estas se obtuvo el gráfico que se aprecia en la figura 9, en donde se grafica la temperatura respecto del tiempo en segundos.

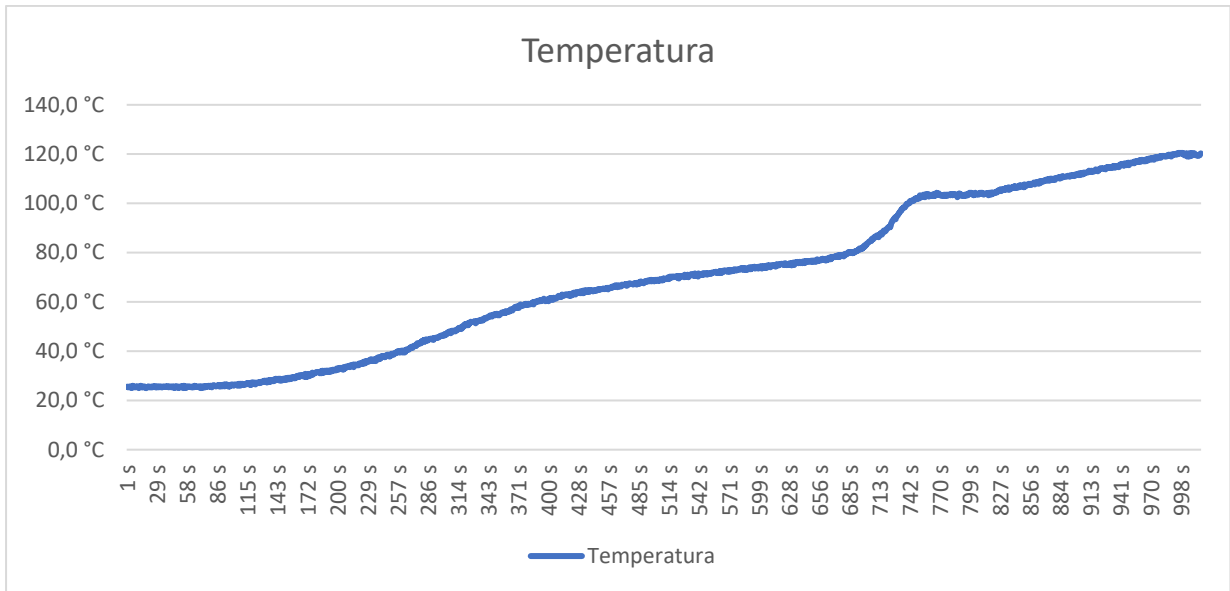


Figura 7

Observando el mismo se deduce que se puede simplificar a un sistema con un retardo de unos 257 segundos (cuando alcanza una temperatura de 40°C), y luego se considera lineal, ya que recién a partir de ese instante se considera relevante el cambio de la temperatura respecto del total del rango. Por lo tanto, lo mencionado, queda expresado con los siguientes gráficos:

El retardo corresponde al gráfico se puede observar en la figura 10.

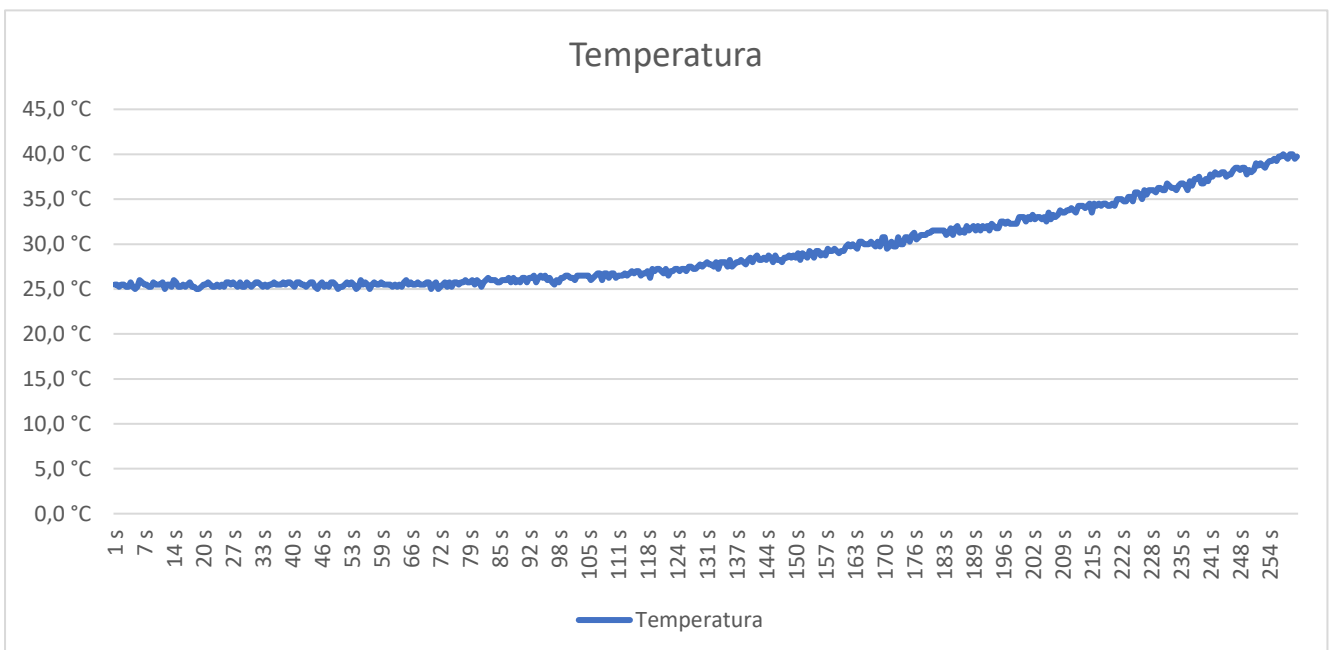


Figura 8

Luego el tramo de la planta que se considera lineal, es el correspondiente al gráfico que se encuentra en la figura 11. Este tramo de Temperatura vs. Tiempo, se considera

entre los 40°C y los 120°C, que son los que se desean alcanzar en la planta mediante el controlador de temperatura.

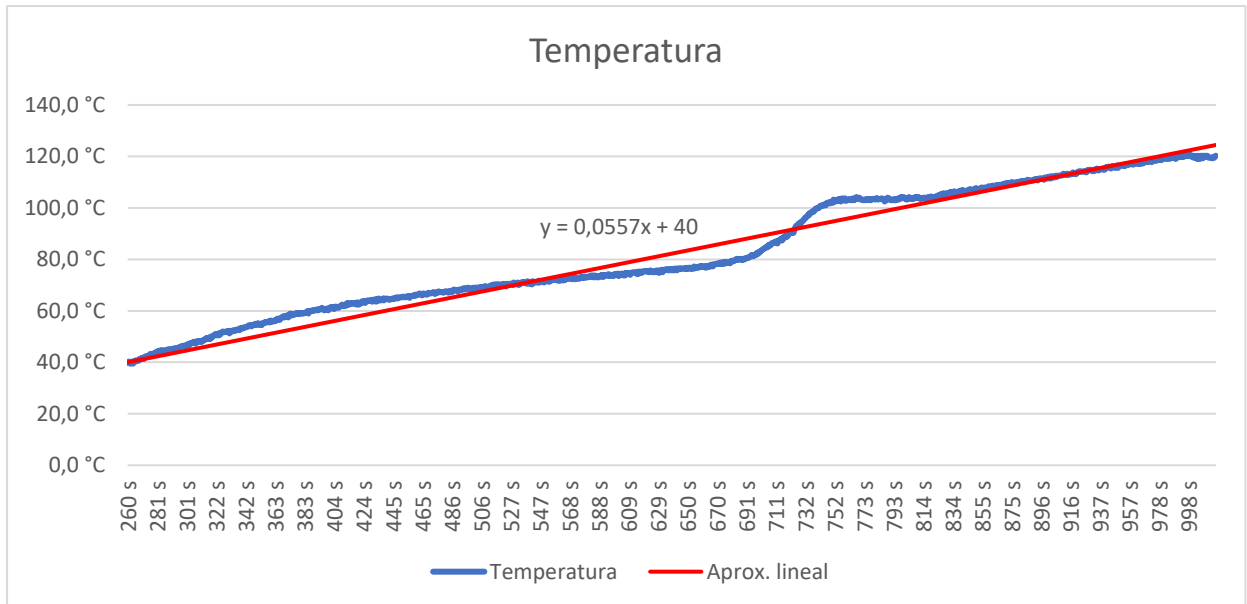


Figura 9

En donde se aprecia la aproximación a un sistema lineal de primer orden integrador con retardo de 257 segundos. Al aproximar mediante el uso de una línea de tendencia por hoja de cálculo, se obtiene la ecuación de una recta de tendencia lineal. La ecuación que expresa la aproximación de la misma, es la siguiente:

$$y = 0,0557 \cdot X + 40$$

Esta ecuación se adopta como el modelo matemático de representación de la planta, a la que se le aplique la sintonización del controlador para el control del sistema.

Para tal fin se utiliza el método Ziegler-Nichols, en el cual se sugieren ciertas reglas para sintonizar los controladores PID. Esto significa asignar valores a K_p , T_I y a T_d , que como se puede observar en la figura 12, corresponden al controlador PID que será el encargado de controlar el sistema. En donde el K_p se considera el valor de la ganancia

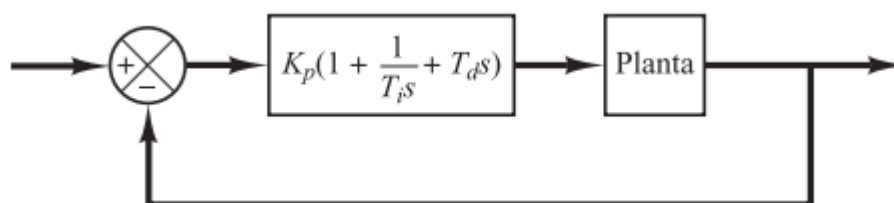


Figura 10

proporcional, T_I corresponde al valor de tiempo integral y T_d corresponde al valor de tiempo derivativo.

Para este método, se considera el sistema con retardo y la linealidad del sistema dentro del rango de operación. Tal como se ha considerado el sistema previamente.

De los gráficos obtenidos acerca de la aproximación lineal, se tiene que la ganancia del proceso es:

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{120 - 40}{1000 - 257} = 0,1076716$$

El diagrama de la planta sin el controlador PID es el que se encuentra en la figura 13:

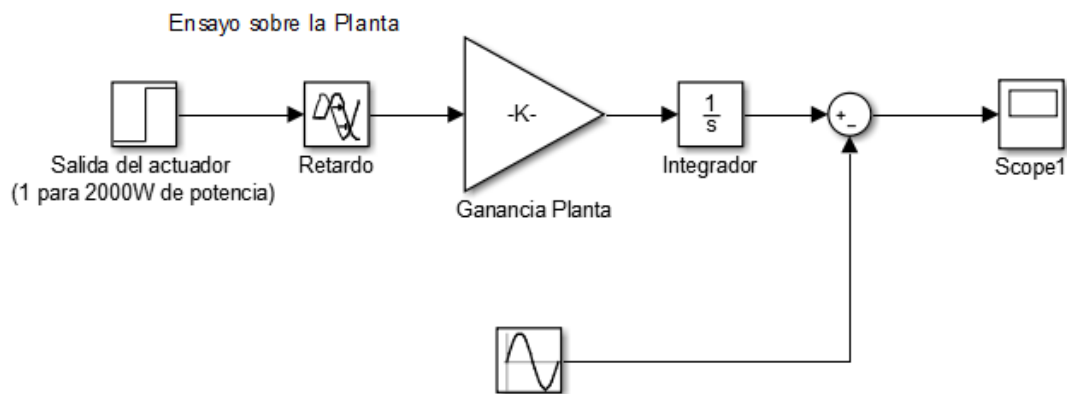


Figura 11

Como se logra apreciar en la figura 13, se ha introducido una desviación a la señal de la termocupla, existente durante las mediciones llevadas a cabo, que bien pueden apreciarse en las *figuras 9, 10 y 11*. Esta señal es oscilante debido a la sensibilidad del instrumento, y la misma tiene una similitud muy grande a una función senoidal. En consecuencia, se escogió introducir mediante Simulink una señal de las siguientes características:

$$O(t) = 0,5 \times \text{Sen} (0,01 \text{ rad/s} \times t)$$

Para el diseño del controlador, se tiene en cuenta que la planta del sistema cuenta con una válvula de seguridad la cual se abrirá cuando la presión supere 1 kg/cm^2 de presión manométrica, lo cual equivale a un excedente de temperatura de 120°C . Por lo tanto, se pretende diseñar un sistema que no tenga sobrepicos. Lo que equivale a diseñar un sistema sobre amortiguado, lo más aproximado al amortiguamiento crítico. Se considera, además, que el modelo de la planta ya posee 1 polo en cero y se sabe que esto le da un grado de robustez al sistema ante perturbaciones y lo hace un sistema de error igual a cero en estado estacionario.

Luego para la obtención de los valores correspondientes a la sintonización del PD, se cerró el lazo en el programa "Simulink" y se obtuvieron los valores mediante la sintonía. El diagrama de bloques correspondiente al sistema de lazo cerrado se muestra en la figura 14.

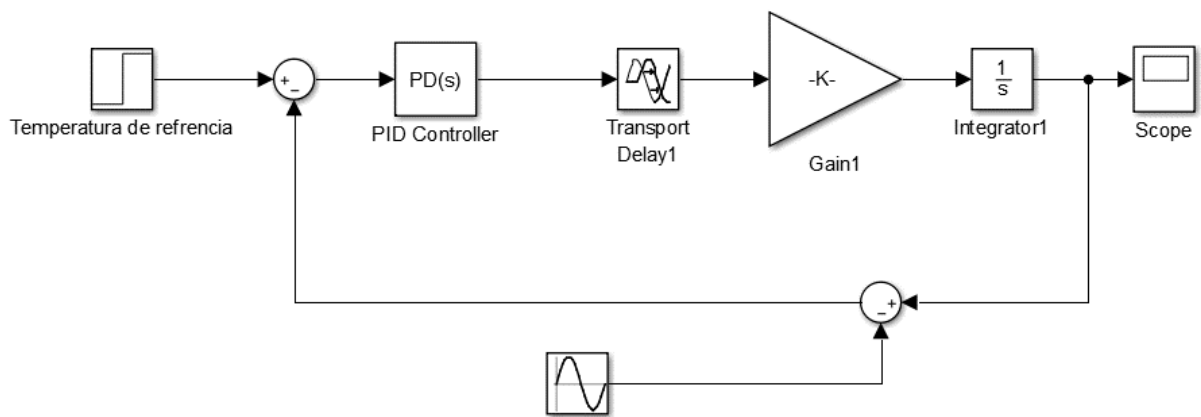


Figura 12

Para hallar los valores se tuvieron en cuenta inicialmente los valores propuestos por Ziegler-Nichols basados en la respuesta al escalón de la planta. Éstos se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

En la tabla se logra apreciar que los valores de T y L se obtienen de la linealización, los mismos son representados en la *Figura 15*, y son los siguientes:

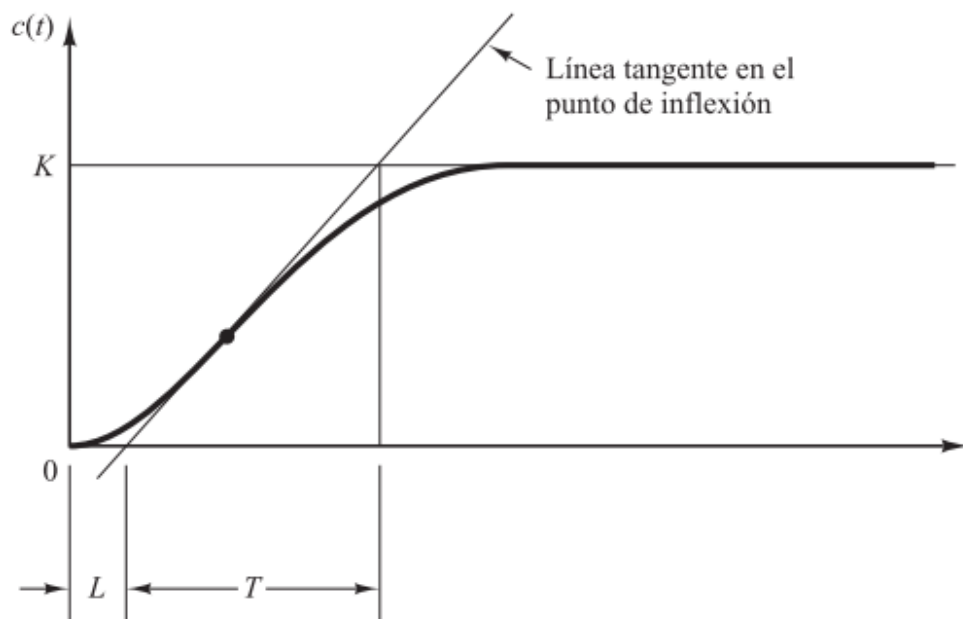
- $T = 780s - 257s = 523s$
- $L = 257s$

Figura 13

En donde T resulta de la recta tangente trazada en el punto de inflexión de la planta. Y L es el tiempo de retardo del sistema.

El valor obtenido para el controlador inicial es:

- Proporcional. $P = 2,035$



Con este valor se procedió a simular y analizar la respuesta obtenida. Los resultados obtenidos para el controlador actuando sobre la planta se detallan en la *figura 16*.

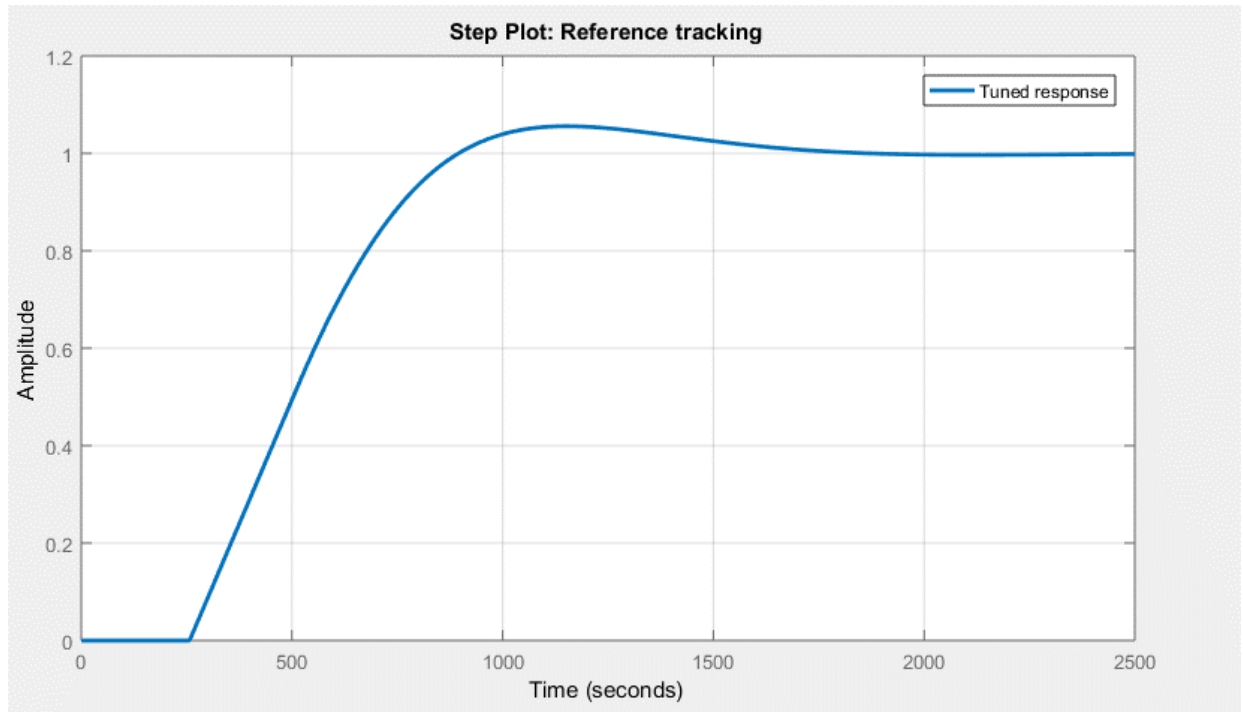


Figura 14

Para obtener los valores de la parte derivativa, se utilizó el sintonizador PD proporcionado por el programa Simulink. Buscando el valor de respuesta más rápido y sin tener sobrepicos por lo mencionado anteriormente.

De la operación mencionada se obtuvo un valor para la parte derivativa y proporcional, como sigue:

- Derivativo. $D = 44,5283$
- Proporcional. $P = 0,016629$

Se logra observar que la respuesta a la salida del control actúa como se muestra en la figura 17.

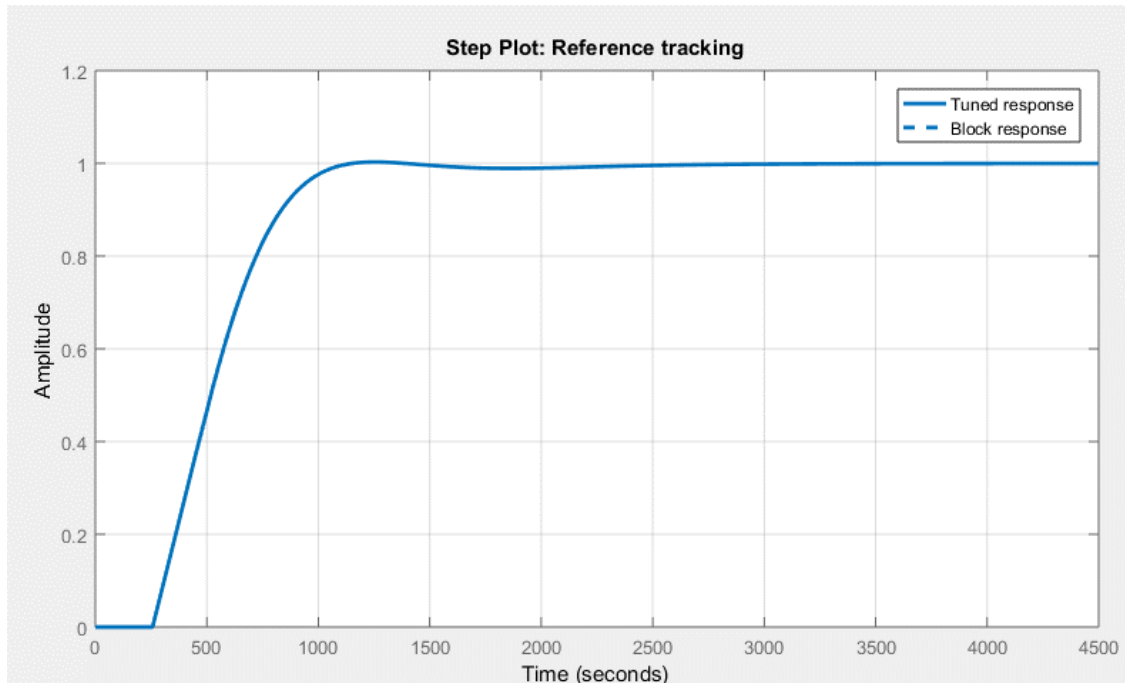


Figura 15

Por último, se muestra en la *figura 18* la respuesta de todo el sistema a su salida, con la entrada de referencia configurada a 120°C.



Figura 16

Quedando así el sistema con un tiempo de respuesta de 1072 segundos, en donde el ruido que se apreciaba en el sensor de temperatura no causa ningún efecto sobre el sistema, como se aprecia en la figura 18.

De esta manera se consigue evitar una magnitud de presión que ocasione un aumento de temperatura innecesaria, y que deviene en la apertura de la válvula de seguridad.

Hecho a comprobar, ya que esto es simplemente el análisis teórico y analítico de la situación problemática.

Con el fin de programar el controlador digital, se considera que se debe discretizar la acción del controlador, ya que los valores hallados mediante el SimuLink son de carácter analógico.

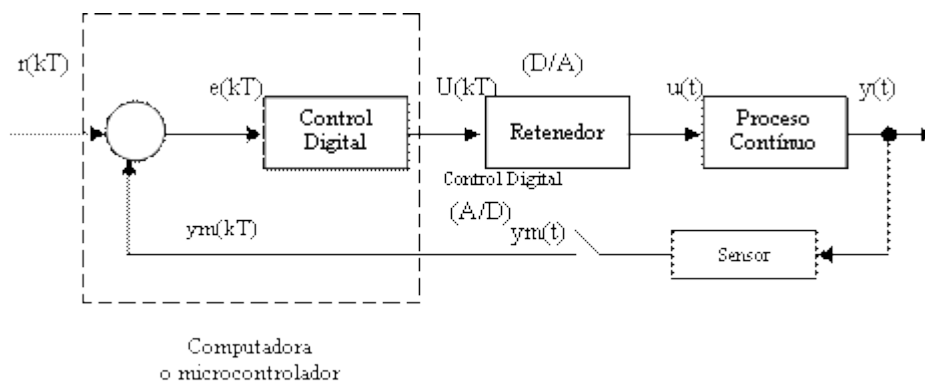


Figura 17

Para esto se tiene en cuenta que en un proceso con controlador digital como el de la figura 19, la salida del proceso $y(t)$ se muestra cada T segundos para generar la salida muestreada $y(kT)$ con $k = \pm 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Dado que T es constante la señal muestreada se expresa como $y(kT)$. En este caso T será del orden de los 10ms, que es la interrupción que lleva a cabo el microcontrolador, determinada por la disposición del reloj interno del mismo que se seleccione.

Las características de los controladores PID son bien conocidas y se encuentran bien establecidas. Las relaciones de entrada salida de un controlador PID de forma continua pueden ser expresada como sigue:

$$U(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(\tau) d(\tau) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

Ecuación 1

En donde $U(t)$ es la salida del controlador y $e(t) = r(t) - y(t)$, en donde $r(t)$ corresponde al punto de referencia deseado e $y(t)$, corresponde a la salida de la planta. T_i y T_d se los conoce como tiempo integral y tiempo derivativo, respectivamente.

Ahora bien, para este caso en donde se desea implementar un controlador digital, se debe adaptar la ecuación 1, de la representación continua a una discreta. Para ello se considera en primera instancia, que el controlador será solamente del tipo proporcional derivativo (PD). Teniendo en cuenta esto se procede a una aproximación de diferencia finita regresiva para la derivada, es decir:

$$\frac{d e(KT)}{d t} \approx \frac{e(KT) - e((K-1)T)}{T}$$

Diagram illustrating the approximation of the derivative of the error signal in a sampled-data system. The left side shows the continuous-time derivative $\frac{d e(KT)}{d t}$. The right side shows the discrete-time approximation $\frac{e(KT) - e((K-1)T)}{T}$. Labels indicate: 'La derivada del error muestreado' points to the derivative term; 'La señal muestreado' points to the error signal $e(KT)$; 'Muestra anterior' points to the previous error signal $e((K-1)T)$; and 'Periodo de muestreo' points to the sampling period T .

Ecuación 2

Por lo tanto, en el controlador digital que será programado, se tomará un valor de muestreo, se calculará su error y éste se guardará en la memoria de *muestra anterior*, al próximo valor medido se le calculará su error y se realizará la cuenta con el valor de *muestra actual* y el valor de *muestra anterior*. Según se muestra en la *ecuación 2*.

Análisis e investigación de los componentes

Para el análisis e investigación de los componentes a utilizar en el sistema de control, se llegó a la conclusión que será utilizado un microcontrolador modelo PIC18F45K20, correspondiente a la marca Microchip®.

Éste es un microcontrolador que posee un CPU de 16 bit, un oscilador interno de 16MHz, extensible a 64MHz con un PLL interno. Posee un módulo ADC (Analogic Digital Converter) con 10 bit -el cual permitirá realizar una resolución más cómoda y adecuada del rango de valores de temperatura a relevar durante el funcionamiento del sistema, *en caso de utilizarse un sensor analógico* -. El PIC18F45K20 también posee un módulo CCP, del cual podrá ser utilizado el PWM para controlar la salida, es decir, la resistencia de calefacción de 2000W de la autoclave con la cual se calienta el agua del recipiente.

En caso de contar una termocupla tipo K, con el módulo conversor MAX6675^v. de conversión analógica digital

Con el fin de medir la temperatura de la autoclave durante el funcionamiento del sistema, y en base a esta realizar los cálculos y el procesamiento en el CPU, necesarios para operar sobre el actuador del sistema (resistencia calefactora), se utiliza un sistema de termocupla con su transductor a tensión analógica. Se recomienda el uso de una termocupla que pueda ser utilizada midiendo en el interior de la autoclave, capaz de soportar temperaturas de más de 120°C y presiones manométricas de más de 1kg/cm². Por cuestiones de presupuesto y materiales disponibles, para el relevo de la planta se utilizó una termocupla tipo K. Pero se puede utilizar cualquier otra termocupla ya que todas son capaces de medir en el rango de operación de la autoclave.

En el cual se estará midiendo la tensión analógica sobre la resistencia correspondiente al sensor de temperatura. Esto es debido a que el microcontrolador puede medir una tensión y convertirla en un valor digital de 10 bits, para un rango de 20°C -considerando la temperatura de un laboratorio- y hasta 120°C -considerando la temperatura a la que

se utiliza la autoclave y debe abrirse la válvula de alivio en caso de exceder la presión máxima admitida-.

Como sistema de operación automática adicional, se propone el uso de una electroválvula de 12 VC para cierre y apertura de la válvula reguladora de presión. Con el fin de abrir la misma al inicio del proceso y cerrar la misma unos segundos después de haber alcanzado los 103°C. -Esto actualmente se realiza a mano con el fin de purgar el aire existente en la autoclave, momento en el que solamente expulsa vapor hacia afuera del equipo, lo cual es peligroso-.

Procedimiento de configuración de Microcontrolador

Para configurar el microcontrolador PIC18F45K20, se procedió a descargar e instalar el software perteneciente a la empresa Microchip desde su página web. El programa correspondiente al modelo de microcontrolador utilizado es el MPLAB X IDE v5.05.

Se seleccionó el microcontrolador mencionado, se creó un proyecto denominado PyDFinal, se procedió a la configuración de los parámetros de operación del microchip.

Como parámetros principales se configuraron:

La frecuencia de trabajo del microcontrolador será de 16Mhz -internal clock-, utilizando el FOSC (Frecuency Oscilator) interno que posee el microcontrolador. Esto se puede observar en la figura 18.

Luego se introdujeron 3 recursos del dispositivo a los recursos del proyecto a utilizar, estos son:

- TMR0
- TMR2
- ECCP1
- ADC

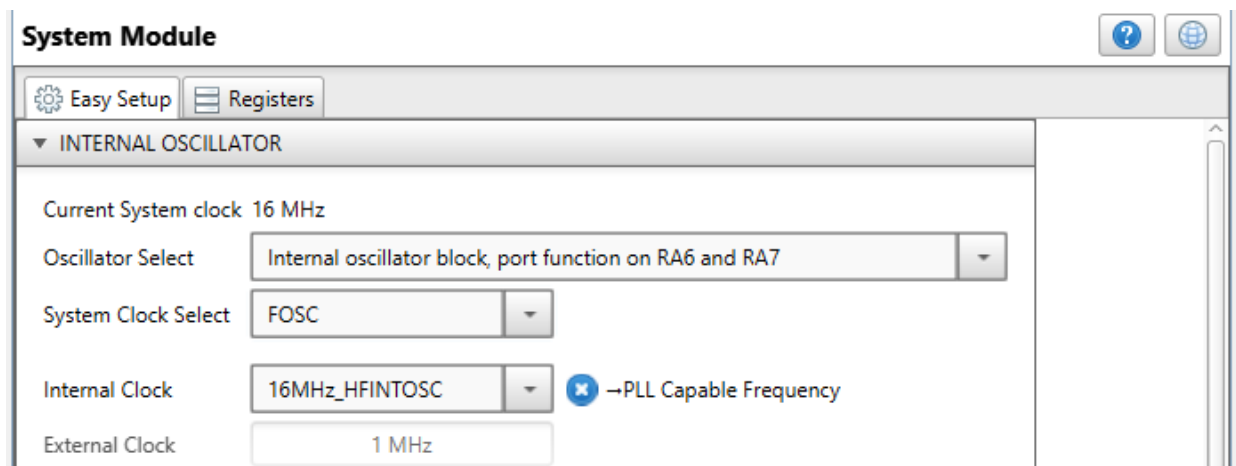


Figura 18

En donde el TMR0 es un timer que se utiliza para la función de interrupción de procesos durante el funcionamiento del microcontrolador. El cual será configurado en un tiempo de aproximadamente 10ms, como se muestra en la figura 19.

Por otro lado, el TMR2 es el timer correspondiente a la función de salida PWM la cual se encuentra en el módulo ECCP1. Este módulo será configurado con un período de PWM de 1,024 ms, con una resolución de 10 Bits, tal como se logra ver en la figura 20. Una vez configurados todos estos parámetros y los periféricos del dispositivo a ser

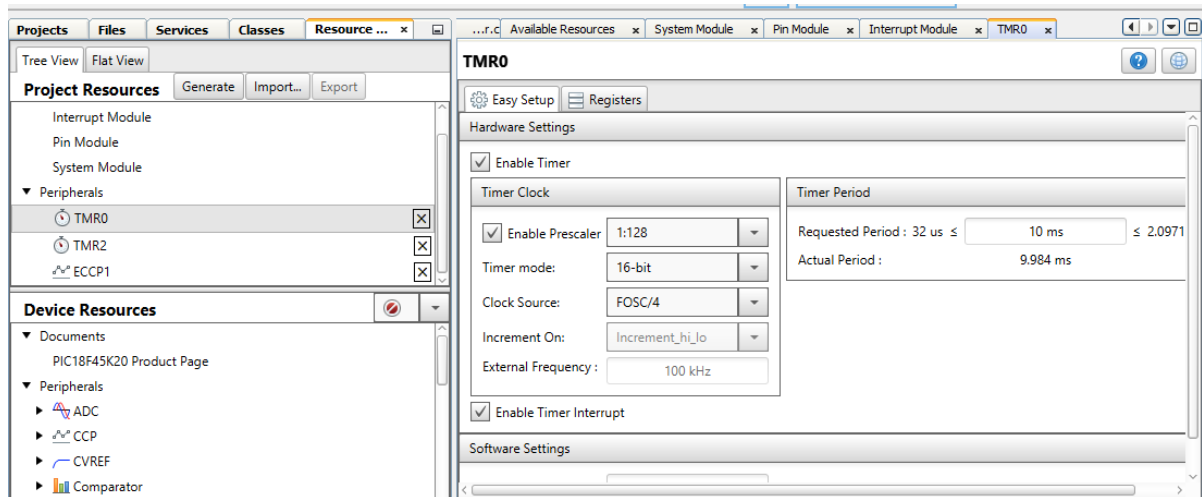


Figura 19

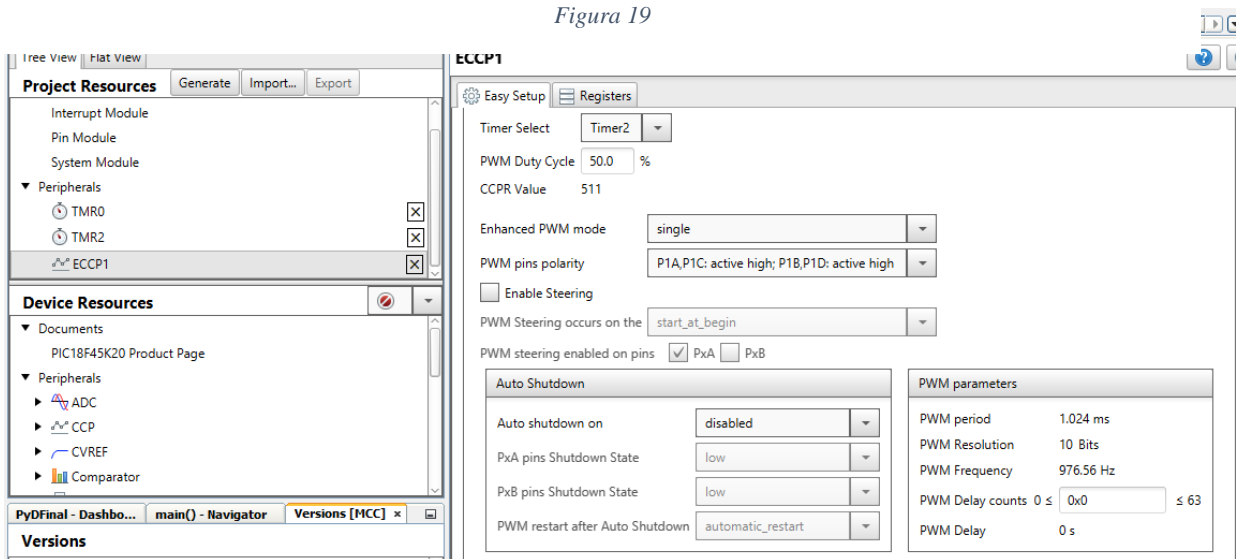


Figura 20

utilizados como recursos del proyecto, se procedió a crear el archivo principal denominado main.c.

Procedimiento de programación de Microcontrolador

Con el fin de controlar el sistema a través del microcontrolador, se procede a la programación del mismo. Este programa será compilado y cargado al microcontrolador que opere midiendo a través de un sensor de temperatura NTC y actuando sobre el sistema a través de una salida por PWM hacia el actuador (resistencia).

El programa cuenta con una estructura de tiempos correspondiente a las interrupciones de cada salida o función necesaria dentro de la función principal (main). Las interrupciones corresponden al prendido de un led, a la entrada analógica del sensor de temperatura y al PD.

A continuación, se coloca el código con el que se programa el microcontrolador PIC18F45K20:

```
#include "mcc_generated_files/mcc.h"  
#include "math.h"  
#define TMR_LED 100  
#define TMR_SENS 500  
#define TMR_PID 10
```

```
struct tiempos{  
    uint8_t led;  
    uint8_t sens;  
    uint8_t pid;
```

```
}tiempo;
```

```
void interrupcion_10ms (){  
if(tiempo.led) tiempo.led--;  
if(tiempo.pid)tiempo.pid--;  
}
```

```
void blink(){  
    if(tiempo.led) return;  
tiempo.led=TMR_LED;  
LED_Toggle();  
}
```

```
#define NUMSAMPLES 5  
#define SERIERESISTOR 10000
```

```
#define THERMISTORNOMINAL 10000
#define TEMPERATURENOMINAL 25
#define BCOEFFICIENT 3950

uint16_t samples[NUMSAMPLES],temp,i;
float average;
floatsteinhart;

voidsensadoTemp (){//funcion para leer la temperatura

if(tiempo.sens)return;
tiempo.sens=TMR_SENS;

    for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
        samples[i] = ADC_GetConversion(channel_AN0);
    }

    for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
        average += samples[i];
    }
    average /= NUMSAMPLES;
    average = 1023 / average - 1;
    average = SERIERESISTOR / average;

    steinhart = average / THERMISTORNOMINAL; // (R/Ro)
    steinhart = logf(steinhart); // ln(R/Ro)
    steinhart /= BCOEFFICIENT; // 1/B * ln(R/Ro)
    steinhart += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/To)
    steinhart = 1.0 / steinhart; // Invert
    steinhart -= 273.15; // convert to C
}

uint16_t resultado=0;
int16_t error=0,derivativo=0,error_ant=0,duty_temp=0;
#define SET_POINT 36
#define KD 0//44.5283
#define KP 44//0.016629

void pid(void){
    if(tiempo.pid)return;
```

```
tiempo.pid=TMR_PID;

    //resultado=330*ADC_GetConversion(channel_AN0);
resultado=(uint16_t) (330*temp);
    resultado/= 1023;

    error=-resultado+SET_POINT;

    derivativo=error-error_ant;
duty_temp=(uint16_t) (error*KP+derivativo*KD);

    if(duty_temp<0) duty_temp=0;
    if(duty_temp> 1023) duty_temp=1023;

    EPWM1_LoadDutyValue(duty_temp);

error_ant=error;

}

void main(void)
{

SYSTEM_Initialize();

INTERRUPT_GlobalInterruptEnable();
INTERRUPT_PeripheralInterruptEnable();

    TMR0_SetInterruptHandler(interrupcion_10ms);

while (1)
    {
    blink();
    pid();
    sensadoTemp();
    }
}
```

Procedimiento de diseño del circuito eléctrico de control

Luego en la *figura 22*, se logra observar el esquema eléctrico del sistema, utilizado para la conexión del microcontrolador con el sensor de temperatura, y la parte de potencia.

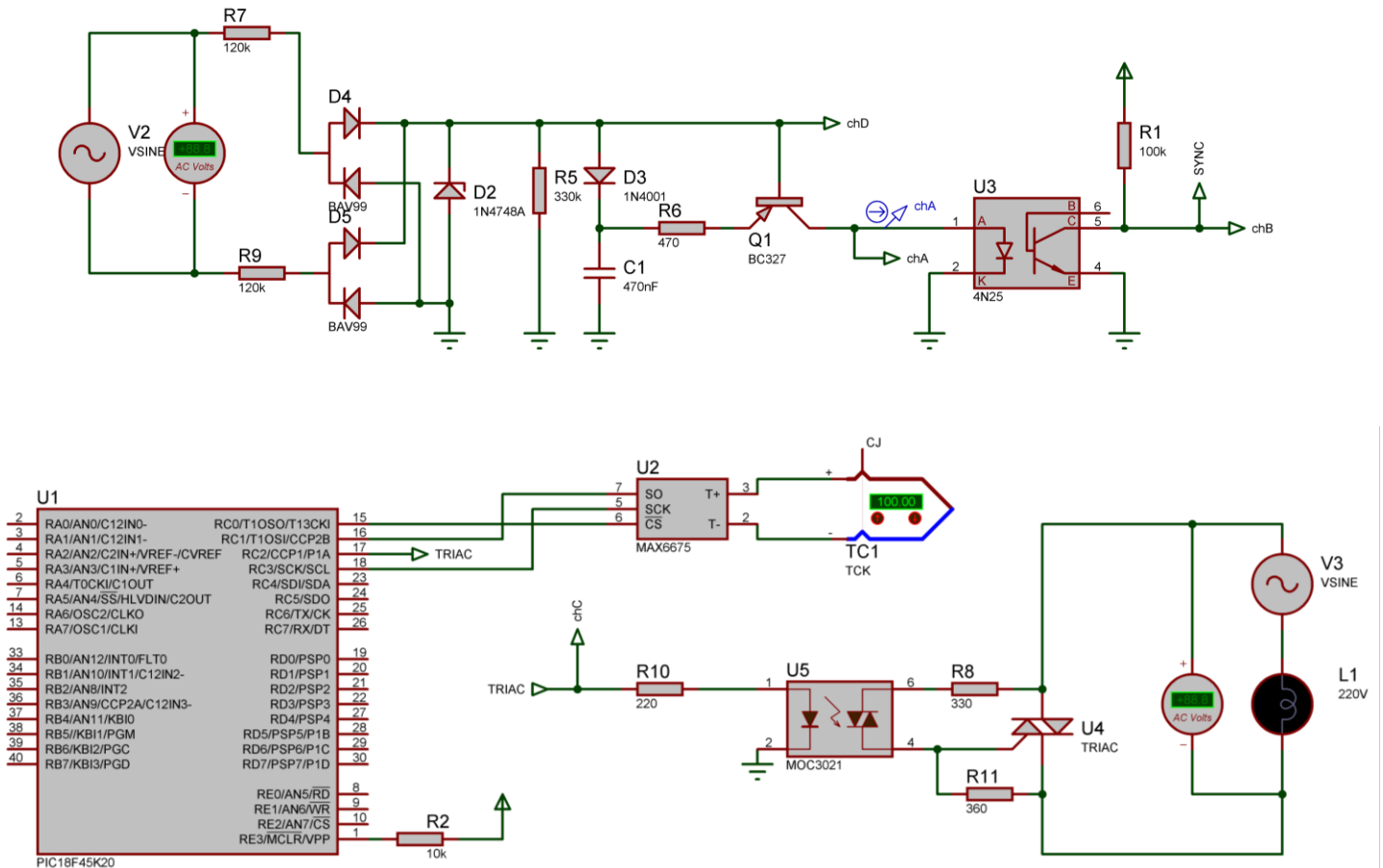


Figura 21

Al trabajar con corriente alterna, se deberá determinar el instante en el que la tensión pasa por su valor nulo, con el fin de determinar el tiempo y con este la potencia que se entregará a la resistencia calefactora. Ya que esta tensión tiene valores distintos a lo largo del tiempo (es una tensión senoidal, en donde $V_t = V_p \cdot \text{sen}(w \cdot t)$), la potencia entregada quedará determinada por el tiempo a partir del instante en el que se ponga la carga bajo tensión y hasta el instante en que la tensión sea nuevamente nula.

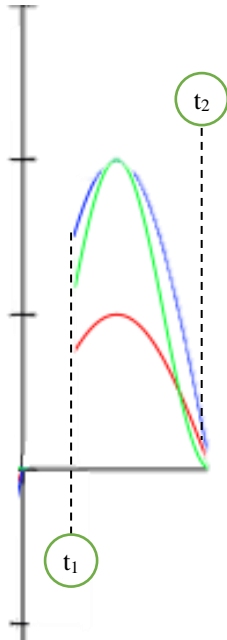


Figura 22

Como puede observarse en la *figura 23* (en donde la potencia se encuentra en otra escala) la potencia será determinada a partir del instante t_1 hasta el instante t_2 , quedando determinado por un disparo del circuito de control y de potencia al cruzar la tensión por el valor nulo.

Circuito de detección de cruce por cero

Para ello el circuito que se utiliza con el fin de determinar este instante en que la onda senoidal de tensión es nula, es el que se muestra en la *figura 24*.

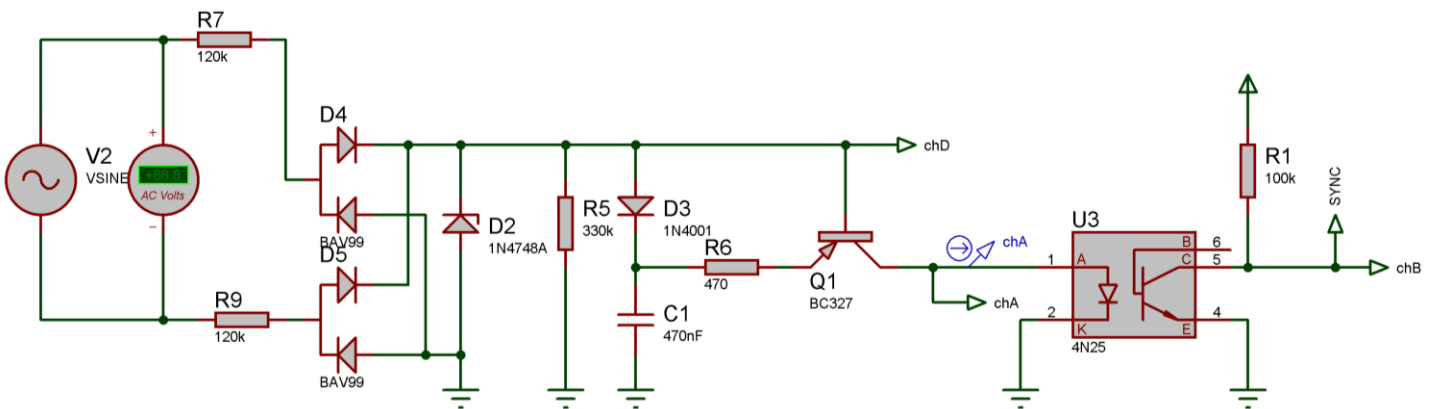


Figura 23

En la parte de potencia se procedió a utilizar un DIAC optoacoplador MOC3021^{vi}(U5), el cual será encargado de conectar el suministro principal de energía a la carga (resistencia de calefacción de 800W), y para operar el mismo durante fracciones de tiempo durante los ciclos de onda senoidal, tanto positivas como negativas.

La representación del instante de la onda senoidal. Esta parte del circuito se puede apreciar en la *figura 23*. Sincronizando un pulso

Este circuito detecta el cruce por cero y se encuentra conformado por un puente de diodos BAV99^{vii} de onda completa, destinado a determinar los pulsos, seguido de un diodo Zener 1N4728A^{viii} con el fin de regular la tensión que estará a la entrada del optoacoplador 4N25^{ix}, disparado por el transistor BC327^x con el fin de ingresar la señal a la entrada del microcontrolador en un nivel de tensión TTL.

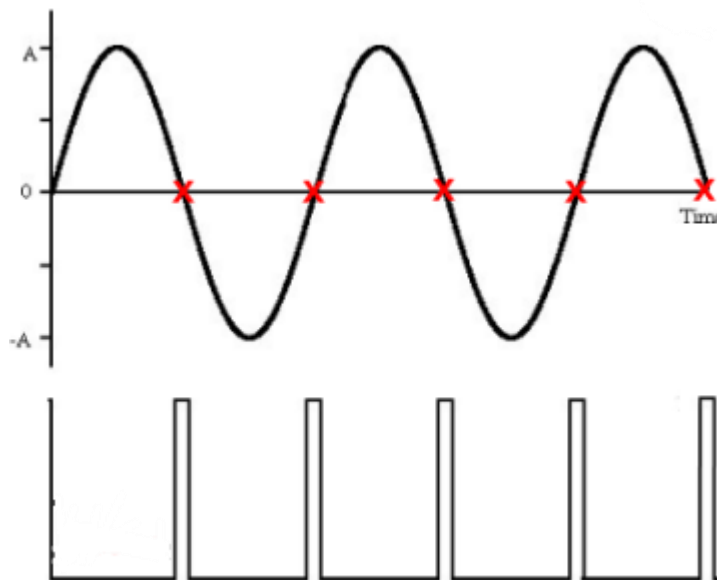


Figura 24

Durante la mayor parte del tiempo la salida del optoacoplador se encuentra en baja, y cuando la tensión senoidal de la red se encuentra muy cerca de ser nula, se tiene una señal alta. Esto se logra apreciar en la *figura 25*.

Circuito de potencia

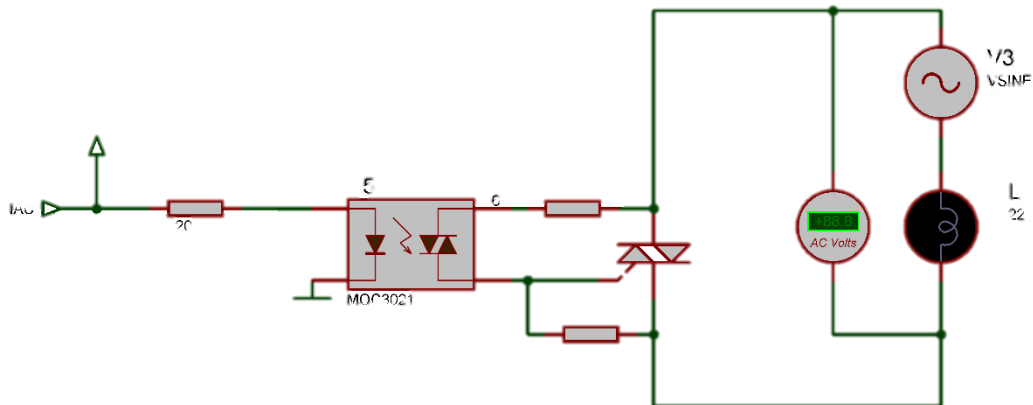
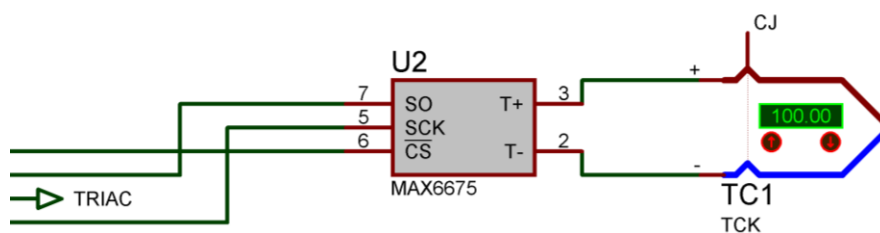


Figura 25

En ese instante de cruce por cero, se determinará el tiempo de operación del TRIAC hasta el próximo paso por cero de la onda senoidal. El tiempo durante el cual la onda senoidal operará, entregando potencia a la resistencia calefactora, conectada a través del TRIAC -y este a su vez disparado por el optoacoplador MOC3010^{xi}- será el que determine la cantidad de energía que disipará la resistencia, siendo así su funcionamiento similar al de un PWM de onda cuadrada. Este mismo se puede observar en la *figura 26*.

Circuito de medición



Considerando el uso de una termocupla tipo K, se conecta la misma a un conversor digital de junta fría compensada MAX6675.

Prueba del PD

Con el fin de verificar solamente el correcto funcionamiento del programa del controlador PD, se simuló una planta con una resistencia calefactora de 3W y 36 Ω . Se estableció otro valor de temperatura a la referencia de SET_POINT del programa, de 34°C.

Se procedió a montar el sistema en Arduino, ya que se presentaron dificultades para conseguir el Microcontrolador indicado.

Cabe aclarar que las pruebas realizadas no son con el fin de comprobar el comportamiento dual controlador-planta, ya que esto no ha sido posible por no contar con el equipamiento necesario para llevar a cabo tal prueba. Por lo tanto, la prueba realizada corresponde solamente a la lógica y funcionamiento solamente del controlador PD.

La medición de temperatura se realizó mediante el termistor NTC existente, sujetando a esta misma con una cinta a la resistencia calefactora de simulación.

El código del programa utilizado en Arduino para la simulación de la planta se encuentra en el anexo.^{xii}

Básicamente este código está dividido en dos partes.

Por un lado, tenemos la parte de medición o muestreo. En donde el código lee cada 100 ms la entrada analógica del termistor, configurado en el pin A0 del Arduino. De cada 5 lecturas se toma un promedio y se toma como referencia para el cálculo en el otro sector del código.

En el segundo sector del código tenemos la parte de control, la cual toma el valor medido y el anterior para realizar los cálculos, teniendo así la derivada (debido al instante de tiempo pequeño en donde se calcula la variación de la temperatura). Luego sobre este valor calculado en comparación con el punto de referencia se envía al actuador a prender con una determinada potencia la resistencia calefactora. Esta potencia es determinada por el tiempo promedio que se encuentra encendida a su máxima potencia, es decir, se controla por una salida PWM del Arduino, que actúa sobre un transistor para manejar la potencia disipada a través de la resistencia.

Resultados Obtenidos y conclusiones

Se realizaron repetidas pruebas sobre la resistencia de 3W -*como maqueta de simulación de la planta*- a modo de comprobar el método de euler y que respondiera a su propósito de diseño como controlador. Salvando las distancias de dinámica e inercia del sistema como planta, lo que se buscó fue comprobar el funcionamiento del código para el control.

Como resultado se obtuvo que la misma respondió al proceso de control, pero no de la manera esperada, ya que superó los valores límites establecidos. Es decir, el sistema se diseñó para responder ante una entrada de escalón de 34°C y llegar al valor final de forma amortiguada. Este sistema no respondió así, sino que tuvo un sobrepico en aproximadamente un 15% por sobre el valor de referencia. Claramente, esto se debe a que los parámetros utilizados son para la planta original y esta posee otra dinámica. Pero si se pudo comprobar que el funcionamiento del PD y se lograron acercar a valores experimentales de control sobre la planta simulada.

Como análisis y conclusión de lo acontecido durante las pruebas sobre la planta simulada en la maqueta mencionada, se llega a la conclusión de que el sistema PID con el control por PWM responde correctamente a un sistema de lazo cerrado, respondiendo a la salida medida con el sensor de temperatura, y ajustando los valores de potencia entregada por el actuador a medida que el sistema opera para alcanzar el valor de referencia.

Si bien se comprueba que el controlador responde al sistema, no se puede determinar con precisión cómo responderá a la planta original, hasta entonces se implemente y se realicen los ajustes finales sobre esta. La planta real (la autoclave de acero inoxidable) posee una inercia térmica muy distinta a la resistencia cerámica de 3W, la potencia de la resistencia de la autoclave es considerablemente mayor (2000W), por lo que el tiempo para entregar cierta cantidad de calor difiere mucho de la planta simulada.

Como conclusión final, para comprobar el correcto funcionamiento e implementar el controlador PD sobre la autoclave se deberá contar con los elementos necesarios.

Estos son:

- Termocupla K o NTC, que soporte el nivel de temperatura en el interior de la autoclave
- Microcontrolador Marca Microchip, modelo **PIC18F45K20**.
- Resistencias: 2 x 10kΩ, 33kΩ, 2 x 120kΩ, 330 kΩ, 470 Ω, 220 Ω, 2 x 330 Ω, 100 kΩ.
- Diodos: 4 x BAV99, 1NA001, 1N4748A.
- TRIAC: BT137.
- Capacitor: 470nF.
- Transistor: BC327.
- Optoacopladores: 4N25, MOC3021.

- Electroválvula 12VCC.
- Virola de $\frac{1}{4}$ " de cierre para termocupla. (A adaptar según modelo adquirido)
- Caja estanco de 20cm x 20cm aproximadamente.
- 3 Prensacables de $\frac{5}{8}$ ".
- Interruptor de corte de alimentación del sistema.
- Pulsador de inicio de operación del sistema.
- Conexión puesta a tierra.
- Plaqueta PCB.
- 3 metros de Cable TPR 3x1,5mm².

Bibliografía

<http://files.pfernandezdiez.es/Termodinamica/PDFs/17Termod.pdf>

Manual de autoclave – Documentación interna del INTI.

Practical Proces Control. Tuning and troubleshooting. - Cecil L. Smith

Ingeniería de Control Moderna – Ogata 5ed.

Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Muhammad H. Rashid

ⁱ ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/40001303h.pdf

ⁱⁱ Código de programa cargado en Arduino:

```
#define THERMISTORPIN A0
#define THERMISTORNOMINAL 10000
#define TEMPERATURENOMINAL 25
#define NUMSAMPLES 5
#define BCOEFFICIENT 3950
#define SERIESRESISTOR 10000

uint16_t samples[NUMSAMPLES];

void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(EXTERNAL);
}

void loop(void) {
  uint8_t i;
  float average;

  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    samples[i] = analogRead(THERMISTORPIN);
    delay(10);
  }

  average = 0;
  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    average += samples[i];
  }
  average /= NUMSAMPLES;
```

```
Serial.println(average);
  average = 1023 / average - 1;
  average = SERIESRESISTOR / average;
Serial.println(average);

float steinhart;
steinhart = average / THERMISTORNOMINAL; // (R/Ro)
steinhart = log(steinhart); // ln(R/Ro)
steinhart /= BCOEFFICIENT; // 1/B * ln(R/Ro)
steinhart += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/To)
steinhart = 1.0 / steinhart; // Invert
steinhart -= 273.15; // convert to C
Serial.print(steinhart);
delay(1000);
}
```

iii <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>

```
#include "max6675.h"

int ktcSO = 8;
int ktcCS = 9;
int ktcCLK = 10;

MAX6675 ktc(ktcCLK, ktcCS, ktcSO);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  // give the MAX a little time to settle
  delay(500);
}

void loop() {
  // basic readout test

  Serial.print(" ");
  Serial.print(ktc.readCelsius());
  Serial.print("\n");
  delay(500);
}
```

iv

v <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>

vi <http://www.farnell.com/datasheets/97984.pdf>

vii <https://www.vishay.com/docs/85718/bav99.pdf>

viii <https://www.vishay.com/docs/85816/1n4728a.pdf>

ix <http://www.vishay.com/docs/81864/4n25x000.pdf>

x <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/BC327-D.PDF>

xi <http://www.farnell.com/datasheets/1806097.pdf>

```
#define THERMISTORPIN A0
#define THERMISTORNOMINAL 10000
#define TEMPERATURENOMINAL 25
#define NUMSAMPLES 5
#define BCOEFFICIENT 3950
#define SERIESRESISTOR 10000
#define PWM 3
#define PIN 4

uint16_t samples[NUMSAMPLES];
float steinhart;
void setup(void) {
  Serial.begin(9600);
  analogReference(EXTERNAL);
  pinMode(PWM, OUTPUT);
}

void sensor (void) {
  uint8_t i;
  float average;

  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    samples[i] = analogRead(THERMISTORPIN);
    delay(10);
  }

  average = 0;
  for (i=0; i< NUMSAMPLES; i++) {
    average += samples[i];
  }
  average /= NUMSAMPLES;

  //Serial.println(average);
  average = 1023 / average - 1;
  average = SERIESRESISTOR / average;
  //Serial.println(average);

  steinhart = average / THERMISTORNOMINAL; // (R/Ro)
```

```
steinhart = log(steinhart);           // ln(R/Ro)
steinhart /= BCOEFFICIENT;           // 1/B * ln(R/Ro)
steinhart += 1.0 / (TEMPERATURENOMINAL + 273.15); // + (1/To)
steinhart = 1.0 / steinhart;         // Invert
steinhart -= 273.15;                 // convert to C
Serial.print(steinhart);
Serial.print("\n");
delay(100);
}

//uint16_t resultado=0;
//int16_t error=0,derivativo=0,error_ant=0,duty_temp=0, valorDuty=0;
float error=0,derivativo=0,error_ant=0;
uint8_t duty_temp=0, valorDuty=0;
#define SET_POINT 34
#define KD 0.01662//44.5283//
#define KP 60.1359 //0.016629 //

void pid(void){

    error=SET_POINT-steinhart;
    error*=18.214;
    derivativo=error-error_ant;
    duty_temp=(uint16_t)((error*KP+derivativo*KD*100)); // el *100 es 1/T
    valorDuty=duty_temp;
    if(duty_temp<0) duty_temp=0;
    if(duty_temp>255) duty_temp=255;

    analogWrite(PWM,duty_temp);
    Serial.print("\n");
    Serial.print("\r PWM: ");
    Serial.print(duty_temp);
    Serial.print("\n");
    Serial.print("error: ");
    Serial.print(error);
    Serial.print("\n");
    Serial.print("dif error: ");
    Serial.print(derivativo);
    Serial.print("\n");
    Serial.print("valorDuty: ");
```

```
Serial.print(valorDuty);  
Serial.print("\n");  
  
error_ant=error;  
  
}  
  
void loop() {  
  
    digitalWrite(PIN,!digitalRead(PIN));  
    pid();  
    sensor();  
}
```