

**Diseño e implementación de controlador de temperatura en plataformas electrónicas
didácticas a bajo costo.**

Alejandro Ruiz Fernández

Asesor: Ing. Jesús David González Llorente, PhD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, UNAD

Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería

Ingeniería Electrónica

Medellín – Colombia

2021

Jesús David González Llorente

Asesor asignado

Carlos Eduardo Velásquez Villada

Jurado

Agradecimientos

Especial agradecimiento a mis padres por creer en mí siempre, porque sin sus palabras de motivación no hubiese sido posible, en el momento en el que este recibiendo el título de ingeniero electrónico sé que estarán orgullosos de mi como yo lo estoy de ellos.

Al tutor Jesús D. González, por confiar en mí, por darme su apoyo, por compartir sus conocimientos y experiencias, por su constante acompañamiento durante este proceso. A mis amigos, compañeros y familiares que de alguna u otra manera aportaron su granito para culminar este proceso educativo con éxito.

Resumen

En este trabajo se presenta un diseño experimental de bajo costo para la aplicación de sistemas de control PID. Para el diseño del regulador empleado se ha recurrido a un sistema embebido (Arduino uno) encargado del control del sistema, y para la simulación del control realimentado Simulink, que facilita la predicción de comportamiento de la variable controlada (temperatura en °C) y controlable (potencia en %) del sistema a controlar, el desarrollo de este prototipo permite al usuario probar diferentes configuraciones del PID en el regulador.

Por su bajo costo y por la utilización de lenguaje de programación de alto nivel y además de su amplia información en internet, software de desarrollo y simulación gratuitos, en este proyecto tiene como propósito mostrar cómo diseñar e implementar un prototipo controlador de temperatura desde cero, que parte de cómo obtener la ecuación característica con el método de curva de reacción de la planta hasta la aplicación de los conceptos matemáticos que controlen dicha variable del proceso.

Palabras Claves: Controlador, Sistema Embebido, PID, Lazo Cerrado, Temperatura, Cruce por Cero, Matlab - Simulink.

Abstract

In this work, a low-cost experimental design for the application of PID control systems is presented. For the design of the regulator used, an embedded system (Arduino uno) has been used in charge of controlling the system, and for the simulation of the feedback control Simulink, which facilitates the prediction of the behavior of the controlled variable (temperature in ° C) and controllable (power in%) of the system to be controlled, the development of this prototype allows the user to test different configurations of the PID in the regulator.

Due to its low cost and the use of a high-level programming language and in addition to its extensive information on the internet, free development and simulation software, the purpose of this project is to show how to design and implement a temperature controller prototype from scratch. It starts from how to obtain the characteristic equation with the plant's reaction curve method until the application of the mathematical concepts that control said process variable.

Keywords: Controller, Embedded System, PID, Closed Loop, Temperature, Zero Crossing, Matlab - Simulink.

Contenido

Resumen.....	4
Abstract	5
Introducción	12
Planteamiento del problema.....	13
Justificación.	14
Objetivos.....	15
Objetivo general.....	15
Objetivos específicos.	15
Marco conceptual del proyecto.....	16
¿Qué es un controlador PID?	16
Antecedentes.....	18
Técnicas de sintonización	19
Método manual	19
Método de Ziegler-Nichols (ZN).....	20
Método de Cohen-Coon (CC).....	23
Método de optimización de criterios.....	24
Métodos de López, Millar, Smith y Murril.....	25
Otros métodos.....	27
Variables para controlar.....	28
Temperatura.....	28
Potencia.....	28

	7
Otros Conceptos.....	29
Cruce por cero.....	29
Análisis del sistema.....	31
Diseño del prototipo.....	31
Selección del controlador.....	32
Sensores.	33
Diseño electrónico.	35
Asignación de entradas y salidas.	38
Esquema actuador.....	39
Resultados.....	44
Respuesta del sensor de temperatura.	44
Modelado del sistema.	45
Simulación del control.....	50
Análisis de resultados obtenidos.....	51
Montaje del prototipo.....	57
Conclusiones.....	58
Trabajos Futuros.....	60
Referencias bibliográficas.....	62
Anexos.....	66
Anexo A.....	66
Anexo B.....	67
Anexo C.....	70

Anexo D..... 71

Lista de figuras

Figura 1. Respuesta a un escalón unitario (Ogata, 2010)	20
Figura 2. Curva en forma de S. (Ogata, 2010).....	21
Figura 3. Periodo crítico	22
Figura 4. ¼ de potencia bombillo incandescente.....	29
Figura 5. Cruce por cero AC.....	30
Figura 6. Diseño del prototipo	31
Figura 7. Arduino uno.....	33
Figura 8. Termocupla tipo K.....	33
Figura 9. Símbolo termocupla.....	34
Figura 10. Convertidor Análogo Digital Para Termocuplas.....	35
Figura 11. Estructura del sistema.....	36
Figura 12. Vista 3D del diseño electrónico.....	36
Figura 13. Diseño de circuito en proteus	37
Figura 14. Diseño en PDF (Proteus).....	37
Figura 15. Etapas del Actuador.....	39
Figura 16. Conexiones Dimmer	40
Figura 17. Puente Rectificador	40
Figura 18. Optoacoplador Etapa 2 y 4	41
Figura 19. Controlador Arduino	42
Figura 20.Triac.....	43
Figura 21. Respuesta del prototipo	44

	10
Figura 22. Función de transferencia en Matlab	47
Figura 23. Respuesta del sistema (Matlab).....	47
Figura 24. Simulación Vs Aplicación.....	48
Figura 25. Error máximo de Simulación Vs Aplicación.....	48
Figura 26. Controlador en Simulink	50
Figura 27. Respuesta inicial del método de sintonización.....	52
Figura 28. Efecto de la Acción integral	52
Figura 29. Simulación en MATLAB $K_p=1$ $T_i=198.4$	53
Figura 30. Aplicación Real $K_p= 1$ $T_i=198.4$	53
Figura 31. Simulación MATLAB Variable controlable	54
Figura 32. Aplicación Real Variable controlable	54
Figura 33. Simulink. Respuesta apropiada	55
Figura 34. Aplicación Real Respuesta apropiada	55
Figura 35. Simulink Variable controlable apropiada.....	56
Figura 36. Aplicación Real Variable controlable apropiada.....	56
Figura 37. Prototipo del proyecto	57
Figura 38. Esquemático del prototipo.....	66

Lista de Tablas

Tabla 1. Comportamientos constantes PID.....	17
Tabla 2. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols (Primer método).....	21
Tabla 3. Ganancia critica (Segundo método ZN)	22
Tabla 4. Constante para el método de López, Millar, Smith y Murril.....	27
Tabla 5. Análisis de controladores.....	32
Tabla 6. Distribución de pines digitales.....	38
Tabla 7. Distribución pines Analógicos.....	38

Introducción

Si queremos conocer el proceso más aplicado en la industria en cuanto a control de proceso se trata, en este proyecto se enfoca en describirlo en pequeña escala pero sin dejar de lado la idea central de aplicación, con el fin de mejorar la calidad de producción en los productos terminados de muchas empresas se establece en este documento el diseño e implementación desde cero, paso a paso de un controlador PID que aplica para muchas variables tales como flujo, nivel, presión entre otros, para mostrar esa aplicabilidad se controlara temperatura, es la variable con más concurrencias en las industrias. En los próximos capítulos se argumentará todo el procedimiento referente a la idea central del texto, principalmente con el diseño del prototipo, la programación del algoritmo, la caracterización del sistema y finalmente con la ejecución, al finalizar este proyecto se espera haber aportado a lector una idea clara sobre los conceptos básicos a la hora de implementar un control industrial.

Planteamiento del problema

La revolución industrial trajo consigo la necesidad de automatizar los procesos de producción Harper (2000) dice que “los sistemas de control nos permiten tener una operación más fiable, la implementación de los sistemas de control nos proporcionan incremento en la productividad, mejoras en la calidad del producto terminado, ahorro energético y seguridad operativa entre otros”. Una de las variables físicas con mayor presencia y uso es la temperatura; la podríamos encontrar por ejemplo, en la industria alimenticia para mantener el crecimiento de microorganismos bajo control, en la producción de metales por que minimiza la deformación de los materiales y variación de la dureza, en la manipulación de medicamento la humedad y altas temperaturas pueden ocasionar daños rápidamente, en calderas es sumamente importante para mantener los niveles de vapores deseados previniendo daños al sistema. Si analizamos más a detalle estos escenarios en todos es necesario el control de la temperatura. Observando la gran demanda de estos controladores e ingenieros capacitados en el tema es necesario la implementación de la teoría de control en sistemas reales.

Los altos recursos que se necesitan para llevar a cabo la implementación de los controladores en un entorno real dificultan su acceso. Muchos estudiantes no tienen la oportunidad de aplicar la teoría de control que le permita apropiarse del proceso de diseño de los controladores por falta de escenarios que permitan su implementación, por ejemplo laboratorios o fábricas que permitan realizar prácticas sobre control de procesos. Esta situación conlleva a la falta de emprendimientos por la carencia de conocimientos en el control de los procesos.

Justificación.

La fabricación de muchos de los productos que consumimos requiere condiciones de temperatura controlada por esto desarrollar un prototipo que controle dicha variable, puede ser de gran ayuda para tener un escenario para que los estudiantes puedan aplicar la teoría de control. No es necesario contar con equipos industriales para aplicar la teoría de control; porque hay componentes más accesibles que aunque son de propósito general pueden ser programados para emular sistema de control industrial. Sin embargo cabe resaltar para que para un ambiente más hostil requerirá de componentes más robustos.

Este proyecto permite afianzar los conocimientos en el área de la ingeniería electrónica en donde se demuestran las habilidades y destrezas adquiridas a lo largo de la formación profesional para aplicar lo aprendido a las necesidades diarias del entorno. Es un aporte a la sociedad consumidora de los productos y una contribución a estudiantes de ingeniería acerca de programación de controladores y las metodologías de diseño de control industrial.

Objetivos.

Objetivo general.

Diseñar e implementar un prototipo a escala de un control de temperatura en plataformas electrónicas didácticas a bajo costo.

Objetivos específicos.

Modelar matemáticamente el proceso de variación de la temperatura del prototipo para un posterior análisis.

Caracterizar la acción de control mediante la simulación para verificar su funcionamiento.

Aplicar la estrategia de control diseñada al prototipo, mediante la implementación de un sistema embebido.

Diseñar el controlador para la variación de temperatura del prototipo.

Marco conceptual del proyecto.

¿Qué es un controlador PID?

Un controlador PID es un sistema de control de variables físicas como lo son temperatura, humedad, flujo etc. El cual consta principalmente de un sistema de control realimentado, con un punto de ajuste deseado. También como lo definió (Zhong, 2016). “ Un controlador PID (Proporcional- Integral- Derivativo) es un mecanismo de control sobre una realimentación de lazo cerrado y es ampliamente usado en la industria para el control de sistemas.” Este tipo de controlador es en función del error del sistema.

Significados de las constantes

K_p constante de proporcionalidad: se puede ajustar como el valor de la ganancia del controlador o el porcentaje de banda proporcional.

K_i constante de integración: indica la velocidad con la que se repite la acción proporcional.

K_d constante de derivación: hace presente la respuesta de la acción proporcional duplicándola, sin esperar a que el error se duplique. El valor indicado por la constante de derivación es el lapso durante el cual se manifestará la acción proporcional correspondiente a 2 veces el error y después desaparecerá.

En la Tabla 1. Se relaciona el comportamiento que tiene un sistema controlado con el algoritmo **PID**, cuando estas experimentan un aumento en cada valor de las constantes, ahora bien teniendo en cuenta que K_p es la constante proporcional **P**, T_i es la constante de tiempo

integral **I** y T_d es la constante de tiempo derivativo **D**, se describe en cada una de ellas el tiempo de subida que en otras palabras es que tan rápido dicho controlador alcanza el valor de referencia, el sobre impulso es que tanto sigue aumentando una vez alcance el punto de referencia por encima de lo esperado, el tiempo de estabilización se refiere a cuando tarda para que el sistema sea estable en su punto de referencia y el error de estado estable es una vez el sistema alcance su estado estable cual será el error que se presente.

Tabla 1.

Comportamientos constantes PID.

Respuesta a lazo cerrado	Tiempo de subida	Sobre impulso-pico	Tiempo de estabilización	Error de estado estable
K_p	↓	↑	↔	↓
τ_i	↓	↑	↑	—
τ_d	↔	↓	↓	↔

Antecedentes.

Betancor (2006). En su aporte del diseño de un sistema de control de temperatura comenta que “Cuando se pretende llevar a cabo una práctica de control se encuentran dos dificultades: encontrar un modelo matemático de la planta que presente cierta exactitud y probar los controladores diseñados con la planta físicamente disponible.” En su trabajo se realiza control analógico de temperatura de un sistema, desde su fase inicial de identificación hasta la fase de comprobación, apoyándose de Matlab para realizar las simulaciones en tiempo real.

Guillén (2016). En colaboración con otros autores redacta un documento en el que relacionan conceptos similares al de este proyecto que lleva como nombre “Diseño experimental de un regulador PID de bajo costo para complementar el aprendizaje en control de procesos”. Algunas de sus palabras claves son: Diseño experimental de bajo costo, sistema embebido, control PID, Método de la Curva de Reacción.

Becerra (2018). En su trabajo “ Desarrollo de un sistema controlador de temperatura y monitoreo de PH y humedad del proceso SPING COATING”. Añade conocimientos importantes tales como acondicionamiento de una señal, sensores de temperatura, sistemas embebidos, funcionamiento de un Triac, funcionamiento de un optoacoplador y conceptos sobre control realimentado. Donde algunas de sus palabras claves son Arduino, agitador magnético etc.

Técnicas de sintonización

Método manual

El método propone que el tiempo integral y derivativo inicialmente se ajusten en cero, se aumenta la constante proporcional desde su mínimo valor hasta que la respuesta de la planta oscile una vez identificada esta respuesta, el valor de la constante proporcional será exactamente la mitad del valor con el que se halló dicha oscilación, luego se sintoniza el tiempo derivativo aumentándola hasta que se ajusta al tiempo de establecimiento y el tiempo integral aumentar hasta que la respuesta sea lo suficientemente rápida, (Ramírez, 2017).

También añade que se debe tener cuidado “con el incremento derivativo ya que puede desestabilizar el sistema si es muy alta su ganancia, también se debe ser cuidadoso con el incremento integral, pues este produce sobre impulso y existen sistemas que no lo pueden permitir ”. este método debe de aplicarse por personal competente para cada proceso observando la entrada y salida del sistema para así modificar los parámetros del controlador teniendo en cuenta las reglas que se establecen en el libro “El algoritmo de sintonización simple de controladores difusos: (ASSCD) ” pág. 40.

Incrementar la ganancia proporcional disminuye la estabilidad, el error decae más rápido si el tiempo integral T_i es disminuido, disminuir el tiempo integral T_i disminuye la estabilidad, Incrementar el tiempo derivativo T_d mejora la estabilidad.

Método de Ziegler-Nichols (ZN).

Los ingenieros de Taylor, John Ziegler y Nathaniel Nichols, en 1942 propusieron reglas de sintonización para determinar las constantes de un controlador PID, realizando pruebas experimentales y de simulación con herramientas de laboratorio para encontrar la forma básica de sintonizar un controlador, que dio como resultado al famoso método conocido como Ziegler y Nichols. (Alfaro, 2005). Los estudios de esta técnica fueron desarrollados con la estructura PID-ideal, con el objetivo de encontrar los valores de los controladores proporcionales (P), proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID) enfocándose en plantas con el modelo de primer orden más tiempo muerto.

Según (Ogata, 2010). En su libro “Ingeniería de Control moderna ” afirma que este método establece dos sintonizaciones diferentes donde “en el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental”. Y que la respuesta de la planta a dicho escalón está representada con la gráfica $c(t)$ de la Figura 1.



Figura 1. Respuesta a un escalón unitario (Ogata, 2010)

El criterio de este método se puede aplicar si dicha respuesta tiene forma de S tal y como se muestra en la figura 2. Adicionalmente en esta misma figura se ilustran las constantes L y T retardo y constante de tiempo τ respectivamente, las cuales se hallan trazando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S.

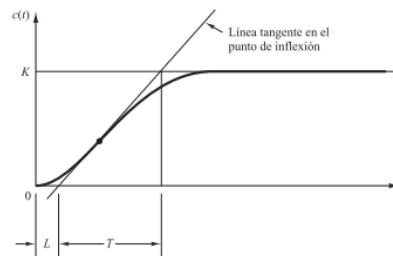


Figura 2. Curva en forma de S. (Ogata, 2010)

Donde:

L = Tiempo que la planta tarda en reaccionar al cambio escalón

T = Constante τ , describe el 63% del tiempo final en que se estabiliza el sistema

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2.

Regla de sintonía de Ziegler-Nichols (Primer método)

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	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Para el segundo método lazo cerrado, se debe fijar la constante de tiempo integral a infinito y la constante de tiempo derivativo en cero, modificando solo la acción de control

proporcional de cero hasta el valor crítico K_{cr} hasta que la respuesta se presente en oscilaciones sostenidas como lo ilustra la figura 3, de lo contrario este segundo método de la sintonía de Ziegler-Nichols no se puede aplicar por consiguiente el periodo crítico no se puede encontrar de forma experimental. (Ogata, 2010).

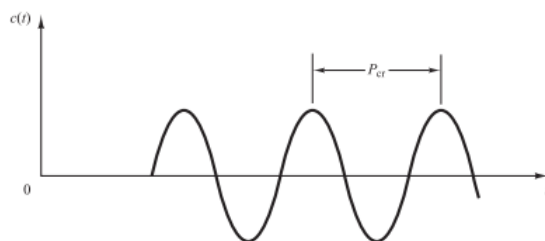


Figura 3. Periodo crítico

Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.

Ganancia crítica (Segundo método ZN)

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Método de Cohen-Coon (CC).

Es un método de sintonía para los controladores PID propuesto por los autores Cohen y Coon, 1953 donde se desea una sintonía para procesos con retardos más elevados. Es un método semi empírico usando la misma metodología de Z-N la cual se basa en una respuesta de tipo sigmoïdal, presentando las ecuaciones 2, 3 y 4 modificadas para las constantes de primer método de Z-N con la finalidad de mejorar las variaciones del controlador y sea más estable.

Ramírez (2017) realiza la comparación “El criterio de CC proporciona controladores muy parecidos a los que da ZN la diferencia importante se muestra en los controladores que integran el termino derivativo. Con CC se obtienen respuestas más amortiguadas pero más lentas ” El método utiliza la ecuación del controlador PID paralelo clásico, la sintonía del controlador PID vía Cohen y Coon es mostrada a continuación. (Cohen, 1953, p.857).

Teniendo en cuenta que la función de transferencia del proceso sigue la forma:

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

Para un controlador de tipo P

$$K_c = \left(1.03 + 0.35 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta} \quad (2)$$

Para un controlador de tipo PI

$$K_c = \left(0.9 + 0.083 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta} \quad (3)$$

$$T_i = \frac{\theta \left(0.9 + 0.083 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta}}{\left(1.27 + 0.6 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta}} \quad (4)$$

Para un controlador de tipo PID

$$K_c = \left(1.35 + 0.25 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta} \quad (5)$$

$$T_i = \frac{\theta \left(1.35 + 0.25 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta}}{\left(0.54 + 0.33 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right) \frac{\tau}{K\theta}} \quad (6)$$

$$T_d = \frac{0.5\theta}{\left(1.35 + 0.25 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right)} \quad (7)$$

Método de optimización de criterios.

Los criterios integrales en relación con la combinación de índices de desempeño se usan como método de desempeño de optimización (Ramírez, 2017). Afirma que “Estas funciones son ingresadas a un ordenador y por medio de alguna técnica de optimización, se obtienen los parámetros a y b que optimizan cierta función de costo”. (p.45).

Es necesario obtener en la práctica a partir de la respuesta del sistema el tiempo muerto y la constante de tiempo τ , se mencionan tres recomendaciones que optimizan los criterios integrales, la forma de encontrar cada uno de los parámetros de PID se basan en las 8, 9 y 10.

$$K_p = \frac{a(\tau/T_p)^b}{K} \quad (8)$$

$$T_i = \frac{T_p}{c} \left(\frac{\tau}{T_p} \right)^d \quad (9)$$

$$T_d = eT_p \left(\frac{\tau}{T_p} \right)^f \quad (10)$$

Donde las constantes a, b, c, d, e y f son el resultado de optimización de la respuesta del controlador.

Métodos de López, Millar, Smith y Murril.

El primer método basado en criterios integrales que presentó ecuaciones para el cálculo de los parámetros del controlador fue desarrollado por López, Millar, Smith y Murril es conocido de forma general como el método de López. Definiendo una función de costo de la forma.

$$\Phi = \int_0^{\infty} F[e(t), t] dt \quad (11)$$

Donde F es una función del error y del tiempo, se obtiene un valor que caracteriza la respuesta del sistema. Entre menor sea el valor de Φ , mejor será el desempeño del sistema de control, por ello, un desempeño óptimo se obtiene cuando Φ es mínimo. Como Φ es una función de los parámetros del controlador (K_c , T_i , T_d), el valor mínimo de Φ se obtiene resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial K_c} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial T_i} = 0, \frac{\partial \Phi}{\partial T_d} = 0 \quad (12)$$

Los criterios de desempeño utilizados por López fueron: Integral del error absoluto (IAE), Integral del error absoluto por el tiempo (ITAE) e Integral del error cuadrático (ISE). La optimización de los criterios de desempeño integrales de López está basada en el mejor modelo de primer orden más tiempo muerto que se pueda obtener, para lazos de control que funcionan como reguladores con un controlador PID-Ideal. Las ecuaciones 13, 14 y 15 representan la sintonización.

$$K_c \cdot K_p = a \left[\frac{t_m}{\tau} \right]^b \quad (13)$$

$$\frac{T_i}{\tau} = \frac{1}{c} \left[\frac{t_m}{\tau} \right]^{-d} \quad (14)$$

$$\frac{T_d}{\tau} = e \left[\frac{t_m}{\tau} \right]^f \quad (15)$$

Donde los valores para las constantes a , b , c , d , e y f se encuentran en la tabla 4.

Tabla 4.*Constante para el método de López, Millar, Smith y Murril*

	a	b	c	d	e	f
IAE	1.435	-0.921	0.878	-0.749	0.482	1.137
ITAE	1.357	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995
ISE	1.495	-0.945	1.101	-0.771	0.560	1.006

López, A.M., J.A. Miller, C.L. Smith y P.W. Murril; Tuning Controllers with Error-Integral Criteria, Instrumentation Technology (EUA), Nov. 1967.

Otros métodos.

Los métodos descritos anteriormente se consideran sencillos de implementar con un desempeño aceptable para sistemas con respuesta de primer orden, ya que solo se necesitan conocimientos básicos de control para llevarlos a cabo. Otros ejemplos tales como lo son Método de Rovira, Método de Kaya y Sheib, (Ramírez, 2017). Pero existen métodos como lugar de las raíces, sintonización de lambda y control por modelo interno que no son descritos en este documento porque son empleados para sistemas más complejos o de mayor orden, en los que resalta un comportamiento impredecible, lo que requiere un nivel mayor en conocimientos de la ciencia.

Variables para controlar.***Temperatura.***

Según la real academia española, la temperatura es una magnitud física que expresa el grado o nivel de calor de los cuerpos o del ambiente. En el artículo Meteorología descriptiva. Inzunza (2006). Define “El concepto de temperatura se deriva de la idea de medir el grado de caliente o frío relativo y de la observación de que las variaciones de calor sobre un cuerpo producen una variación de su temperatura”. La temperatura interfiere en el proceso de calentamiento del prototipo, es la variable que se desea controlar para ello se debe medir con ayuda de un transductor que este proyecto se usó la termocupla tipo K de la Figura 8.

Potencia.

Según Velázquez (2012) potencia eléctrica es “El trabajo que se requiere para mover una carga eléctrica de un punto a otro, en un tiempo determinado. Entre menor es el tiempo para realizar el trabajo más potencia eléctrica tendrá y viceversa ”(p. 18). Visto de otra manera se puede definir como la cantidad de energía que transfiere una fuente generadora por unidad de tiempo, en este proyecto es la variable controlable, si hay mayor potencia mayor será la temperatura del sistema, en la figura 4 se puede observar como la potencia de un bombillo convencional está en una parte de su potencia total.



Figura 4. 1/4 de potencia bombillo incandescente.

Otros Conceptos.

Cruce por cero.

En este proyecto el concepto de cruce por cero está relacionado directamente con la onda senoidal de la corriente alterna el cual consiste en determinar el momento en que dicha señal pasa del eje de la amplitud positiva a la negativa y en sentido contrario en ese preciso instante que el valor del voltaje es 0 V, detectar ese punto proporciona pulsos que son indispensables para tener un punto inicial de donde empieza y de donde termina un periodo de la onda. Villar (2001), añade en su libro que “cuya entrada es una señal en C.A y la salida es un pulso de corta duración que aparece únicamente cuando la entrada pasa a través del cero “ (p. 464) como lo muestra en la figura 5.

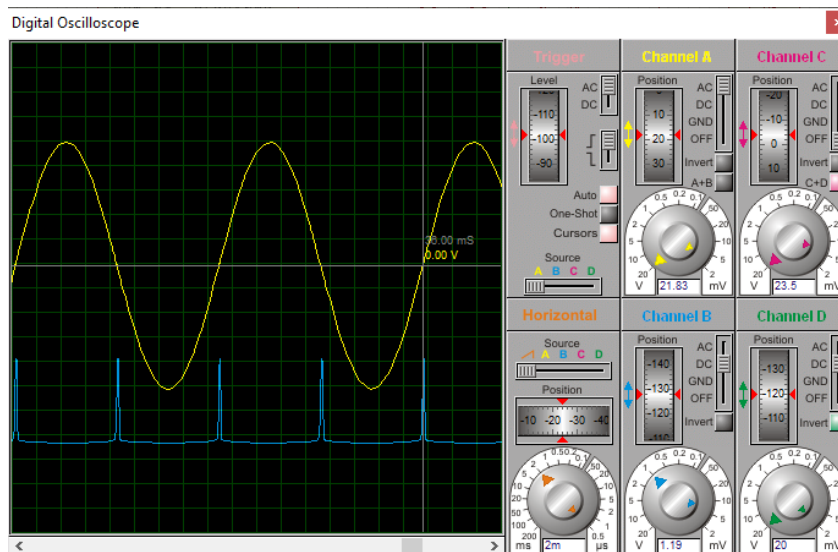


Figura 5. Cruce por cero AC

En Colombia la frecuencia de trabajo de la corriente alterna es de 60 Hz lo que indica que tiene 60 ciclos en un segundo, el periodo es el recíproco de esta, el cual teóricamente un periodo de onda es $\approx 0.0166s$ por lo que medio periodo o ciclo es $\approx 0.00833s$, si realizamos la conversión a microsegundos nos queda que es igual a $8330 \mu s$ dato de tiempo que nos proporcionará el detector de cruce por cero ayudando a estimar la acción de control sobre potencia de cargas alternas calculando el tiempo de disparo de un Triac de la figura 20, justo en esa ilustración se realiza una descripción más detallada de este dispositivo electrónico de potencia capaz de conmutar el voltaje alterno a grandes voltajes.

Análisis del sistema.

Diseño del prototipo.

Para el diseño del prototipo se tuvo en cuenta las siguientes características: primero, un sistema donde se pudieran aplicar los conceptos del control de procesos realimentado, segundo un sistema didáctico para realizar las pruebas que se consideraran convenientes y que este fuera a bajo costo de fácil acceso a los componentes.

Los componentes que se ilustran en la Figura 6 son: un sistema cerrado para que la concentración de calor sea estable, un elemento calefactor que para fines didácticos se optó por una bombilla, luego nació la inquietud de cómo controlar el calor que esta proporciona realizando consultas en la internet se encuentra que para llegar a este objetivo lo más conveniente es un circuito regulador de potencia para cargas alternas diseñando el circuito conocido como “ Dimmer ” los cuales cada uno de sus componentes se describen en la sección 3.4.2 del capítulo III del presente documento.

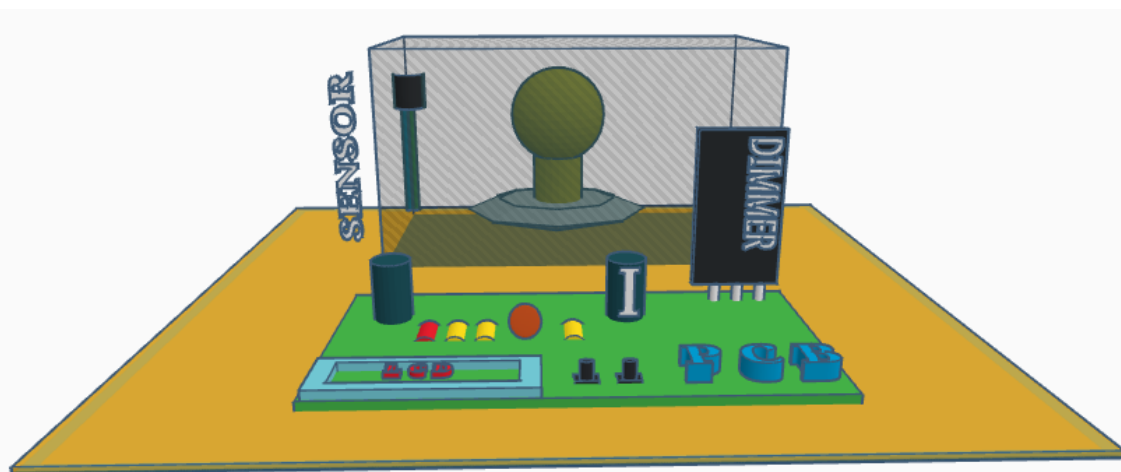


Figura 6. Diseño del prototipo

En el Anexo A del presente documento se especifica el esquemático de conexiones que representa a la Figura 6.

Selección del controlador.

La selección del controlador está dada por la relación costo-beneficio, el número de entradas y salidas, adaptabilidad y fácil manejo, protocolos de comunicación y tipo de software. En la tabla 5 se realiza un análisis entre Arduino uno, Arduino leonardo y el PLC Modicon Premium Unity processor TSXP57304MC de Schneider Electric, éste último hace parte de los controladores más comunes en los que se implementan en este tipo de sistemas en las industrias.

Tabla 5.

Análisis de controladores.

Tipo de controlador	Precio	N. de entradas	N. de salidas	Ambiente de trabajo	Licencia de software
ARDUINO UNO	\$31.126	14	14	Didáctico	Libre
ARDUINO LEONARDO	\$50.512	20	20	Didáctico	Libre
TSXP57304MC					
PLC	\$8.492.444,93	> 100	> 100	Industrial	Privada

Dado que este proyecto es realizado en un entorno casero donde se requieren de pocas entradas y salidas se optó por el controlador de fácil acceso, menor precio y soporte en la internet, lo cual está inclinada por un sistema embebido Arduino uno ilustrado en la figura 7 donde su costo y adaptabilidad es la más apropiada para el desarrollo de este proyecto.



Figura 7. Arduino uno.

Sensores.

Sensor de temperatura



Figura 8. Termocupla tipo K.

Un sensor de temperatura termocupla de la figura 8 consta de dos terminales y puede ser representada por el símbolo de la Figura 9, la cual en uno de sus extremos están unidas y se

conoce como punto caliente porque es ahí donde se genera la respuesta en función de la temperatura. Estos sensores de temperatura son altamente usados en las industrias por su rango de medición, precisamente de ese rango se desprenden los tipos termocuplas junto con el material que hacen parte de las dos terminales en este proyecto se utilizó el tipo K que tiene un rango desde -270 a 1330 °C.

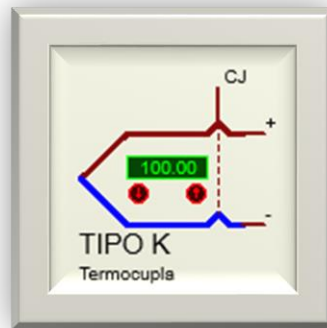


Figura 9. Símbolo termocupla

El transmisor MAX6675 de la Figura 10. Es un dispositivo electrónico que está diseñado para termocuplas tipo K principalmente para los controladores Arduino con la finalidad de adecuar la señal que entrega la termocupla ya que la señal está en el orden de los milivoltios y además su lectura es analógica por lo que no es posible ser leída por el controlador, dado que los controladores electrónicos reciben solo señales digitales entonces es necesario convertir esa respuesta analógica de temperatura a señales digitales determinada por la resolución del Arduino de 10 bits, lo que generalmente se conoce como el ADC. Además este dispositivo también nos ayuda a compensar la impedancia que generan los cables desde su punto unido hasta el controlador.

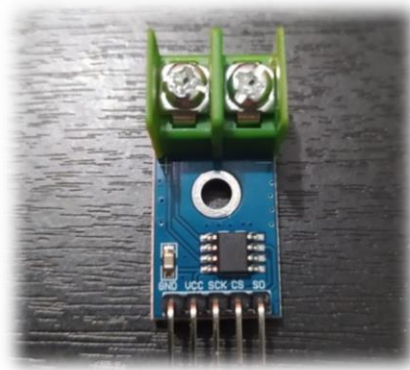


Figura 10. Convertidor Análogo Digital Para Termocuplas

Diseño electrónico.

Para llegar al diseño electrónico se realizó una previa investigación sobre antecedentes existente en la internet sobre los controladores PID en sistemas de temperatura, en los que se resaltan los expuesto en la página 18, dichos referentes en primer lugar aportaron los elementos necesarios para realizar un control realimentado, por ejemplo, Betancur (2006) describe paso a paso como llegar a la función de transferencia a partir de la obtención de datos experimentales, también la estructura principal de un controlador como se muestra en la figura 11, por otra parte Guillen (2016) realiza un trabajo en el cual introduce conceptos sobre la implementación un controlador PID a bajo costo y los principales pasos como controlar un sistema de calefacción con el algoritmo o ecuación PID. Siguiendo la estructura del sistema representada en la figura 11 podemos observar que es necesario un controlador lógico, un actuador que nos proporcione el control sobre el proceso, el sistema calefactor y finalmente un elemento sensor que proporcionará la realimentación al controlador, siguiendo con cada uno de los criterios mencionados se diseñó el prototipo final de la figura 37.

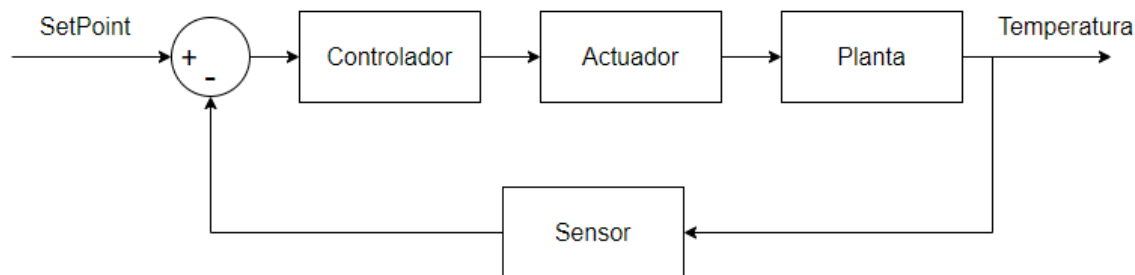


Figura 11. Estructura del sistema

Becerra (2018) en su trabajo comparte los principales criterios que se deben tener en cuenta para determinar los elementos que harán parte de un sistema realimentado partiendo de la idea de los actuadores, en el cual realiza la observación que es importante la respuesta del algoritmo con relación a la salida deseada del actuador.

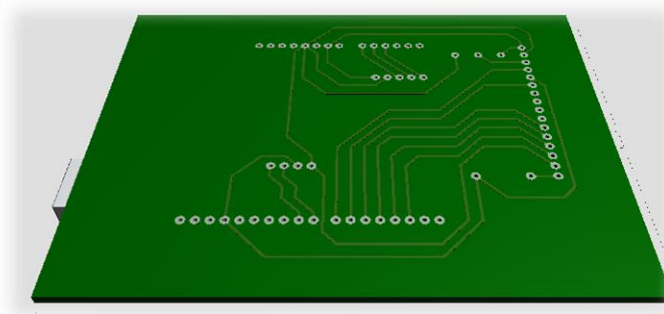


Figura 12. Vista 3D del diseño electrónico

Se usó el software electrónico PROTEUS el cual proporciona herramientas suficientes para la simulación de circuitos como lo ilustra el Anexo A, incluyendo también la funcionalidad de crear el diseño de PCB como lo ilustra la Figura 13, de una manera profesional con una vista 3D como ilustra la Figura 12. Se debe tener en cuenta que este prototipo está diseñado para controlar una temperatura entre los 30 y 120 °C.

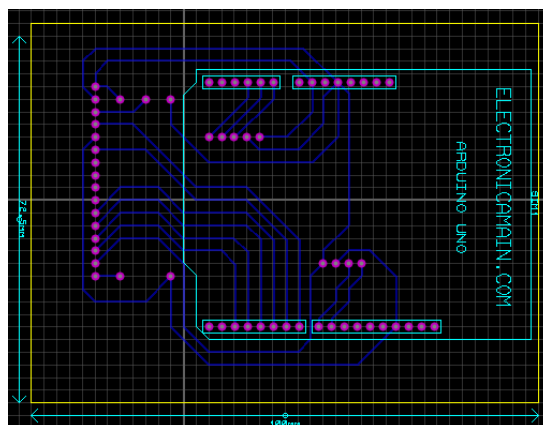


Figura 13. Diseño de circuito en proteus

Finalmente dicho diseño puede ser exportado y plasmado en físico con la funcionalidad de proteus de exportar los diseños en formato PDF como lo ilustra la Figura 14, esta figura nos ayudara realizar ese paso de lo simulado a la implementación con la ayuda de la técnica del planchado en baquelitas electrónicas.

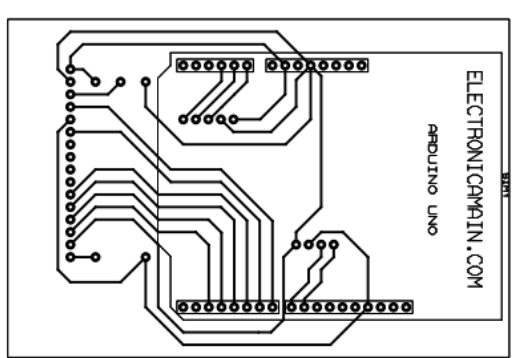


Figura 14. Diseño en PDF (Proteus)

En las tablas 6 y 7 se relacionan la asignación de pines del controlador para cada una de las señales. En la tabla 6 por ejemplo señales digitales en las que se puede resaltar la señal de entrada de cruce por cero y la de salida PWM, en la tabla 7 los puertos A0, A1 y A2 están conectados para la lectura de la temperatura real del prototipo.

*Asignación de entradas y salidas.***Tabla 6.***Distribución de pines digitales.*

Pin digital	Aplicación
Pin 12	Disponible
Pin 11	Disponible
Pin 10	Disponible
Pin 9	Salida PWM hacia el Triac
Pin 8	Detector de cruce por cero
Pin 7	Conexión con LCD 2*16
Pin 6	Conexión con LCD 2*16
Pin 5	Conexión con LCD 2*16
Pin 4	Conexión con LCD 2*16
Pin 3	Conexión con LCD 2*16
Pin 2	Conexión con LCD 2*16

Tabla 7.*Distribución pines Analógicos.*

Pin analógico	Aplicación
A0:	MAX 6675 SCK
A1:	MAX 6675 CS
A2:	MAX 6675 CO
A3:	Disponible
A4:	Disponible
A5:	Disponible

Esquema actuador

Etapas del funcionamiento del actuador DIMMER.

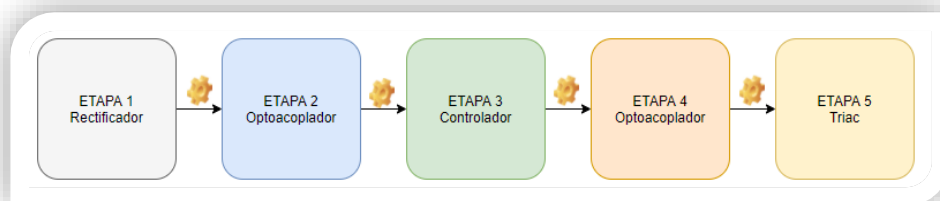


Figura 15. Etapas del Actuador

Dimmer es el nombre con el que se le conoce al circuito que se implementa como actuador para el sistema. En la Figura 16 se puede observar que consta de 8 puntos de conexión. En el pin 1, recibe la alimentación a 5 VDC, en el pin 2, se conecta la referencia a tierra, en el pin 3, es destinado para que entregue al controlador la señal de pulsos del cruce por cero que se explica con mayor detalle en la página 29.

El pin 4, es la salida del controlador hacia el Triac “ E5 ” en la Figura16, con una señal modulada por ancho de pulso o por sus siglas en ingles PWM, dicha señal será la encargada de determinar la potencia del bombillo. En los pines 5 y 6 se conecta la red domiciliaria a 110v y en los pines 7 y 8 la carga de corriente alterna en este caso el bombillo. En la figura 15, se describe de manera más ilustrada la función que cumple el Dimmer, separando sus etapas en el orden de como interfieren en la ejecución del proyecto.

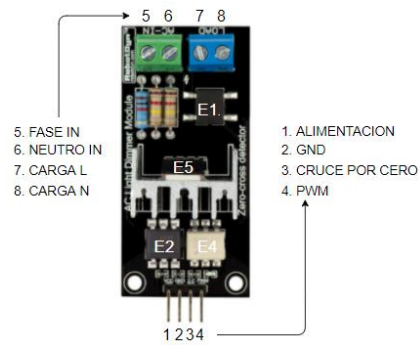


Figura 16. Conexiones Dimmer

Puente Rectificador

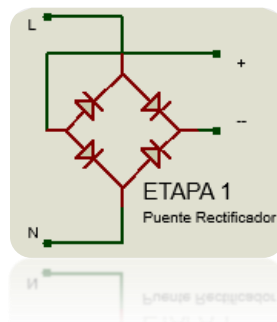


Figura 17. Puente Rectificador

Un puente rectificador es un elemento electrónico representado por su símbolo en la figura 17, nos convierte corriente alterna a corriente directa eliminando los valores negativos del mismo, este se compone de 4 diodos conectados en serie como lo muestra la figura 17, o como lo manifestó (Hermosa, 2009, p 93). “Los llamados puentes rectificadores son componentes que integran 4 diodos rectificadores conectados para formar un circuito puente rectificador “. El cual en este proyecto es alimentado a 110V 60 Hz en las terminales neutro (N) y Línea (L) , El circuito es también conocido como puente de Graetz por referencia a físico alemán quien lo popularizo.

Optoacoplador

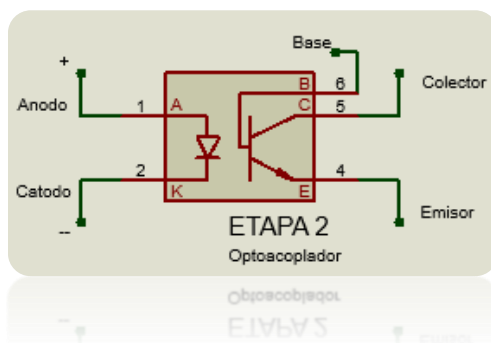


Figura 18. Optoacoplador Etapa 2 y 4

Un optoacoplador es un dispositivo electrónico representado por su símbolo en la Figura 18, funciona como un interruptor mediante la luz que emite el diodo hacia el fototransistor, puede aislar dispositivos con los de control como por ejemplo una carga 110V de un controlador o un PLC de una resistencia calefactora lo que quiere decir que si hay un cortocircuito en el sistema de potencia no habría afectación es en el sistema de control, en otras palabras como lo define (Peña, 2020). “Un optoacoplador es un elemento diseñado para aislar ciertas partes de un circuito. De esta forma se evitan daños por la presencia de voltajes y corrientes excesivas” (p. 51). Uno de los optoacopladores más utilizados es el 4N35 por lo que estará presente en muchos proyectos pero no solo para aislar los circuitos sino también para efectuar control sobre las cargas del sistema electrónico reemplazando las funciones de un relé.

Controlador

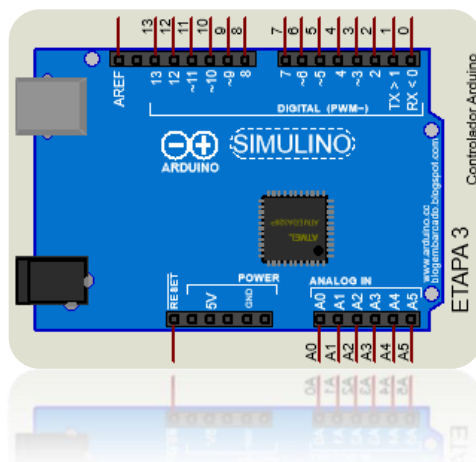


Figura 19. Controlador Arduino

Cuando hablamos de controladores nos referimos a un dispositivo lógico que es capaz de ser programable a solicitud de las personas quienes tiene un requerimiento de tener control sobre el mundo real . Mandado & Marcos (2009) afirman que ”es básicamente una computadora industrial la cual procesa todos los datos de una máquina como pueden ser sensores, botones, temporizadores y cualquier señal de entrada. Para posteriormente controlar los actuadores como pistones, motores, válvulas, etc.” Estos dispositivos electrónicos de los que hacen parte la familia Arduino ilustrado en la figura 19 están conformados por entradas y salidas digitales como también entradas y salidas análogas puertos de comunicación entre otras funcionalidades en este proyecto por su bajo costo y soporte se utilizó el microcontrolador Arduino que ajusta perfectamente a muchas aplicaciones de cualquier ámbito, aunque existen limitaciones para proyectos que demanden más componentes dentro del sistema, por consiguiente más entradas y salidas lo que es mejor controladores más robustos de mayor capacidad.

Triac

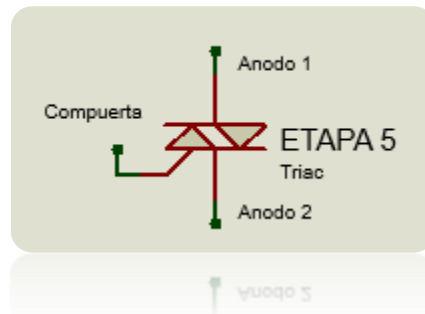


Figura 20.Triac

También conocido como triodo representado por su símbolo en la figura 20 hace referencia a los tres terminales del semiconductor siendo capaz de conmutar la corriente alterna el funcionamiento básico es conmutar entre el ánodo 1 y ánodo 2 dejando pasar la corriente cuando en la terminal de compuerta se aplica una pequeña corriente hasta que nuevamente esa corriente sea igual a cero. Lilen (1973) Lo definió como “ Es un elemento semiconductor de tres electrodos, uno de los cuales es el mando (la puerta) y los otros dos son los principales de conducción ” (pág. 74), entre algunas de sus aplicaciones esta para regular la cantidad de potencia que se le suministra a una carga, dicha función se aplicó en este proyecto, también para controlar la velocidad de un motor e interruptores de potencia en general.

Resultados

Respuesta del sensor de temperatura.

En la figura 21, se relaciona la gráfica que arrojó el sistema al someterlo a un escalón del 50% de la potencia total, con la cual se inicia el análisis de los parámetros que describen el sistema para su posterior modelamiento, estos datos fueron recolectados con la ayuda de la interfaz serial de Arduino y graficados en Excel estableciendo el formato de recolección de datos del Anexo D en la página 71, la captura de muestras realizó durante 5.500 segundos con un periodo de muestreo de 1s con lo que se modeló el sistema, durante la simulación y sintonización de las constantes que controlan el prototipo. Este sistema tiene una gráfica característica de primer orden más tiempo muerto que sigue a forma de la ecuación 16.

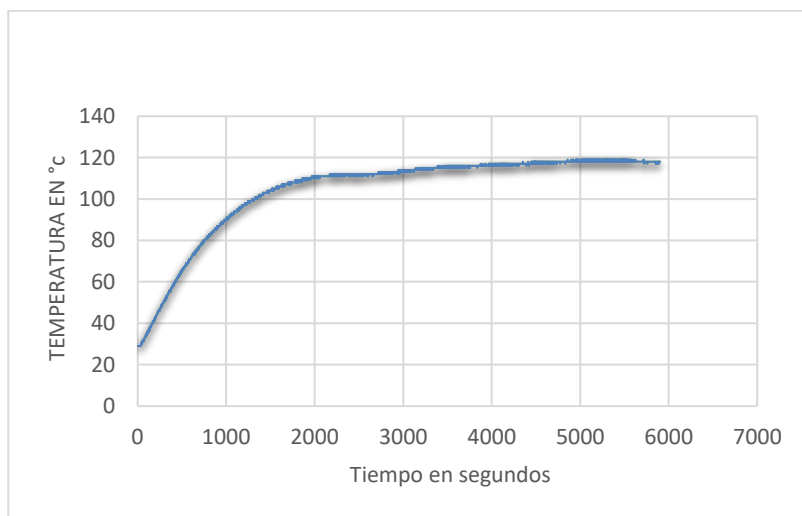


Figura 21. Respuesta del prototipo

Modelado del sistema.

Para hallar el modelo matemático se utiliza el método 123C propuesto en el artículo de (Alfaro, 2014, p.207) con el cual se puede identificar los parámetros que identifican el prototipo. Utilizando la curva de reacción del sistema, se establecen dos puntos de porcentaje específicos para hallar los datos del modelo. Para hallar la ganancia del sistema se aplicó la ecuación 17, para la constante de tiempo la ecuación 18 y finalmente para determinar el tiempo muerto con la ecuación 19.

Curva de sistema de primer orden representado por la siguiente ecuación

$$G(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} \quad (16)$$

Análisis matemático en base al modelo implementado.

$$\text{Ganancia } K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (17)$$

Donde:

$$\Delta y = T_{final} - T_{inicial}$$

$$\Delta u = Escalon_{final} - Escalon_{inicial}$$

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0}$$

$$K_p = \frac{120 - 29}{50 - 0} = \frac{91}{3,6} = 1.82$$

$$K_p = 1.82 \text{ } ^\circ\text{C}/\%$$

$$\text{Constante de tiempo } \tau = 0.9102(t_{75} - t_{25}) \quad (18)$$

Donde:

t_{75} = Tiempo a 75% de la temperatura final

t_{25} = Tiempo a 25% de la temperatura final

$$\tau = 0.9102(1190 - 318)$$

$$\tau = 0.9102(872)$$

$$\tau = 793.7$$

$$\text{Tiempo muerto } t_m = 1.2620t_{25} - 0.2620t_{75} \quad (19)$$

$$t_m = 1.2620(318) - 0.2620(1190)$$

$$t_m = 401.3 - 311.8 = -89.5$$

$$t_m = -89.5$$

Reemplazando en la ecuación característica de primer orden de la ecuación 6 se llega a que la función de transferencia es igual a la ecuación 20 descrita a continuación :

$$G(s) = \frac{1.82 e^{-89.5s}}{793.7 s + 1} \quad (20)$$

```

Comando_Matlab.m x +
1   clc;
2   clear;
3   s=tf('s');
4   [y,t]=step(((1.82*exp(-89*s))/(793.7*s+1)));
5   Temp_Ambiente=29;
6   Cambio_Escalon=50;
7   plot(t,y*Cambio_Escalon+Temp_Ambiente)
8   ylim([20 140])
9   grid on;
10  title('RESPUESTA AL ESCALON');
11  xlabel('Tiempo seg');
12  ylabel('Temperatura °C');

```

Figura 22. Función de transferencia en Matlab

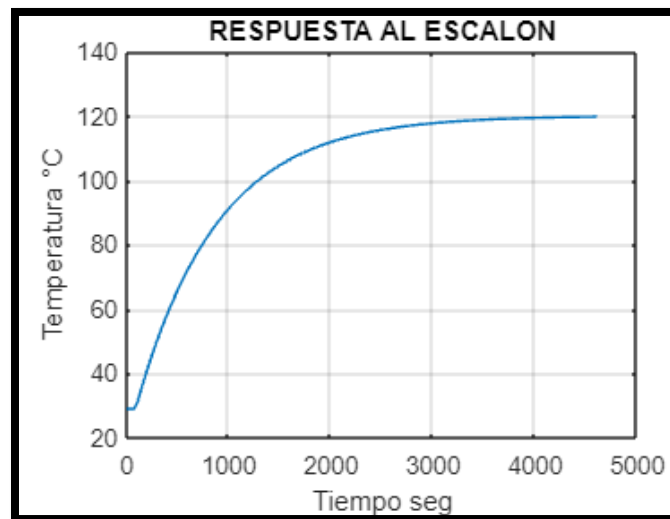


Figura 23. Respuesta del sistema (Matlab)

Una vez ejecutado el código de la figura 22 en Matlab se obtiene la respuesta de la figura 23, realizando la comparación de la respuesta del prototipo figura 21 con la respuesta computacional de la figura 23 podemos apreciar con una vista superpuesta en la figura 24 que la respuesta del modelo encontrado es similar a la respuesta de nuestro sistema, dado que el error máximo que se presenta observando detalladamente la figura 24 es de $\approx 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, como se ilustra

mejor en la figura 25. Llegando a la conclusión de que es un buen modelo para representar el sistema a controlar en este proyecto.

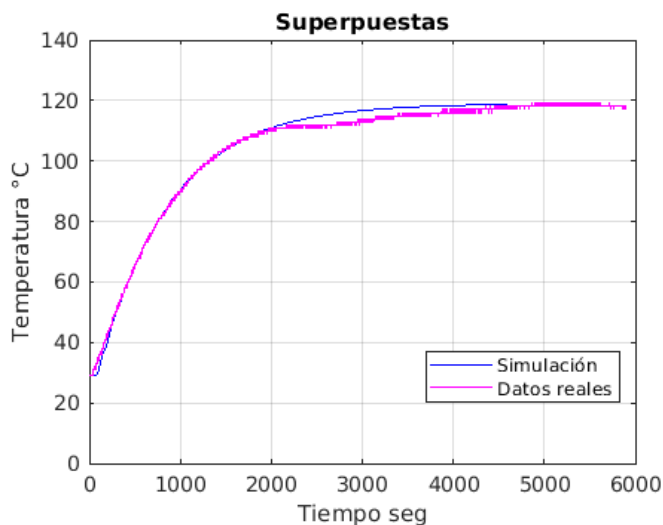


Figura 24. Simulación Vs Aplicación

En la figura 24, se puede determinar visualmente que el error máximo se presenta entre el segundo 2000 y 3000 en el eje de las X y en el eje de las Y entre 100 y 120 °C para observar mejor dicho comportamiento se le realiza una ampliación de esa parte en la figura 25.

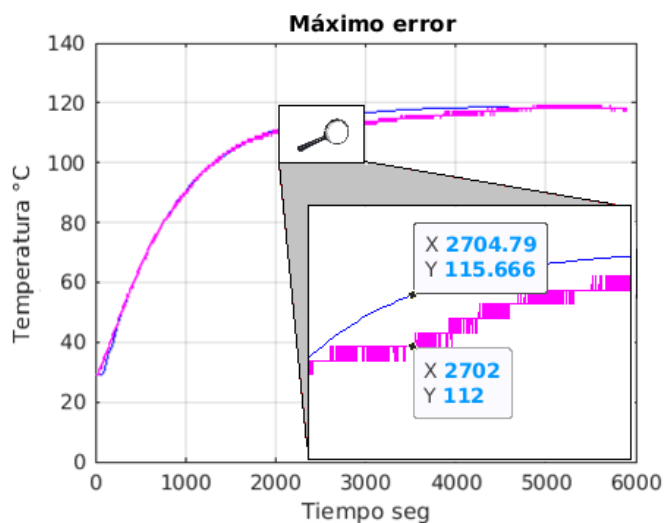


Figura 25. Error máximo de Simulación Vs Aplicación.

Según Bequette (2002) en su libro “Process Control, Modeling, Design and Simulation” establece el método de sintonización de sistema de primer más orden más tiempo muerto, sobre el cual señala que “El procedimiento basado en IMC muestra que solo es necesario ajustar la ganancia proporcional. El tiempo integral simplemente se establece igual a la constante de tiempo del proceso” (p. 369), con algunas características a continuación.

Controlador proporcional integral

$$G_C(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (21)$$

Estabilidad

$$K_c \cdot K_p > 0 \quad (22)$$

$$\tau_i = \tau_p \quad (23)$$

En la ecuación 21 se muestra la fórmula matemática del controlador PI con la que se logró controlar la temperatura del sistema, la cual se puede ver reflejada su implementación en el código del Anexo B. En el Anexo C se ilustra el diagrama de flujo que describe todo el procedimiento del control automático en que se puede observar la secuencia de la aplicación de la formula del controlador proporcional integral.

Simulación del control

Simular se puede convertir en una herramienta importante y muy útil al momento de ejecutar este tipo de control de variables, para este proyecto se usó simulink como programa de apoyo para llegar a aproximarse al comportamiento real de nuestra planta, en el diagrama de la figura 26, se evidencia varios bloques que proporciona el simulador una acción específica, aunque son muchas las formas de interpretar este tipo de control proporcional e integral, en dicha figura se relaciona la forma con la que en este proyecto se logró simular y predecir los comportamientos del control del sistema.

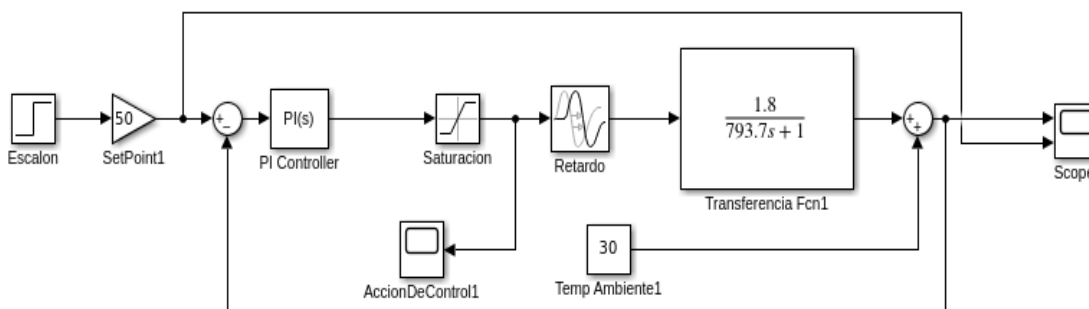


Figura 26. Controlador en Simulink

Ahora bien hablemos un poco sobre los bloques, el primer bloque el cual se ha denominado **Escalón** representa el valor de referencia, pero este por defecto se ejecuta en 1, para incrementar dicho valor se requiere el uso de un bloque ganancia que en la figura 26 se denomina como **Setpoint1**, este tipo de controladores se emplean en función del error por lo tanto con un bloque **SUM** se realiza la resta entre el valor de referencia con el valor en que la planta está, en este proyecto se puede interpretar como la variable temperatura, el valor del error en cada instante entra al **PI Controller** bloque en el cual ejecuta la ecuación matemática de los controladores PI entregando en su salida el valor preciso que el sistema necesita para alcanzar su

punto de referencia, dicho valor puede sobrepasar los valores máximos y mínimos de nuestro actuador, por ejemplo en este proyecto solo necesitamos que nuestra variable de control varíe entre 0 a 100 que representa la potencia en porcentajes, esto lo limitamos con la funcionalidad de bloque **Saturación**.

El bloque denominado **Retardo** nos proporciona el tiempo muerto que tiene nuestro sistema que junto con el bloque **Transferencia Fcn1** determinan el modelamiento, debemos tener en cuenta que para identificar estos modelos la temperatura ambiente no es despreciable y se quiere tener una simulación precisa, por lo con la constante **Temp Ambiente1** va al bloque **SUM** y se adiciona al proceso, finalmente se cuenta con herramientas de visualización (osciloscopios) la primera **AcciondeControl1** en la cual podemos ver la gráfica de la variable controlable y **Scope** para verificar de forma gráfica el comportamiento final de la simulación.

Análisis de resultados obtenidos.

Aplicando el método de sintonización descrito en la página 49 de este proyecto se obtiene la respuesta de la figura 27, en la que podemos apreciar que el sistema ha sido controlado, sin embargo si se desea tener una respuesta más rápida será criterio de la persona que lo aplica, y sus reacciones están descritas en las siguientes páginas de este documento. En la tabla 1 se añade el análisis del comportamiento de sistema cuando sus constantes son modificadas, siguiendo esos criterios y las condiciones de las ecuaciones 22 y 23 se trata de obtener la mejor respuesta del sistema por criterio personal.

Por lo dicho en el párrafo anterior estableciendo $K_p = 1$, se empieza a modificar el valor de la constante integral obteniendo respuestas que pueden ser identificadas en la figura 28, en la que se puede notar el comportamiento real a partir de la modificación de T_i en el código del Anexo B, llegando a la conclusión de que entre más pequeño es el valor de la constante T_i que le ingresamos al algoritmo resumido en el Anexo C mayor será la velocidad de respuesta del proceso, es importante tener en cuenta que esto hace que se oscilaciones y sobre impulsos como lo ilustra la figura 29.

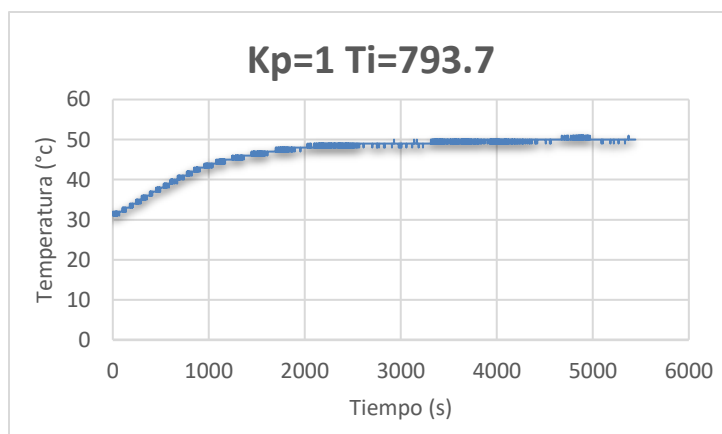


Figura 27. Respuesta inicial del método de sintonización

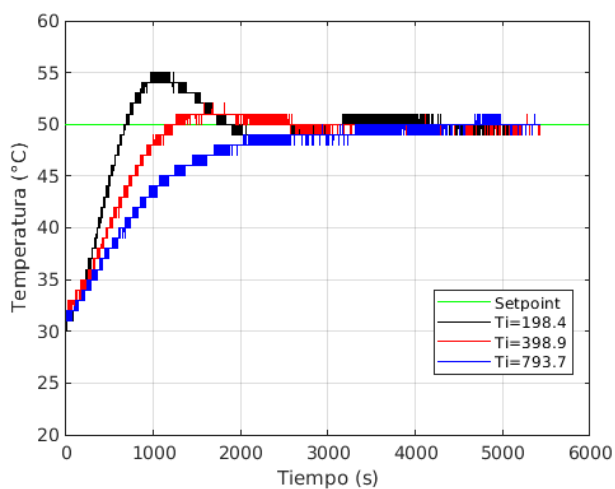


Figura 28. Efecto de la Acción integral

La simulación y aplicación real con $T_i = 198.4$ y $K_p = 1$ de la Figura 29 y Figura 30. respectivamente se podría tomar como una respuesta apropiada para el sistema ya que podría representar la gráfica característica de los controladores PID. Dado que en este análisis se encuentra que la variable controlable en ningún momento entra en saturación por lo que el sistema no presentará picos de temperatura ni tampoco esfuerzo del actuador del proceso.

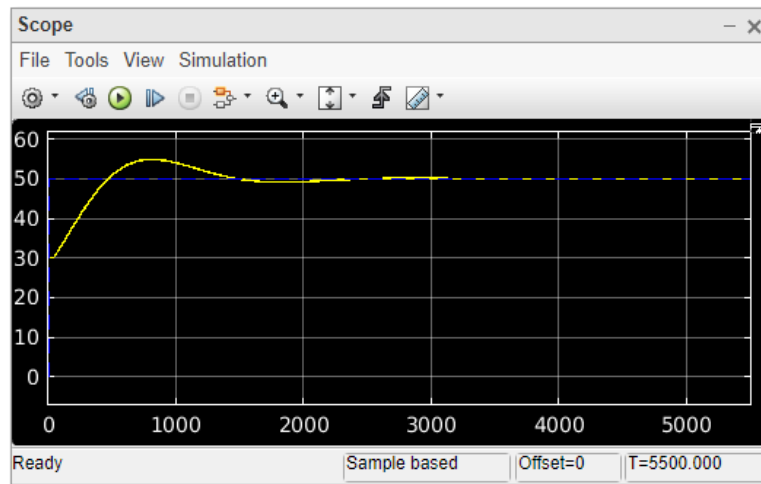


Figura 29. Simulación en MATLAB $K_p=1$ $T_i=198.4$

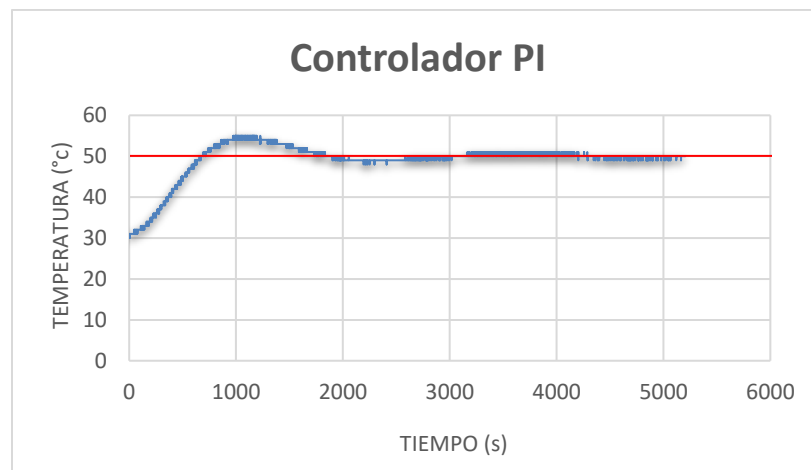


Figura 30. Aplicación Real $K_p= 1$ $T_i=198.4$

Uno de los temas más importantes para tener en cuenta en el control de procesos realimentados es que el comportamiento de los elementos encargados de corregir los errores para que estos no presenten movimientos bruscos para proteger la integridad del proceso y del actuador como tal y sea un sistema armonioso. Así como lo representa la Figura 31 Simulación en Matlab y posteriormente se observa en la aplicación real ilustrada en la Figura 32.

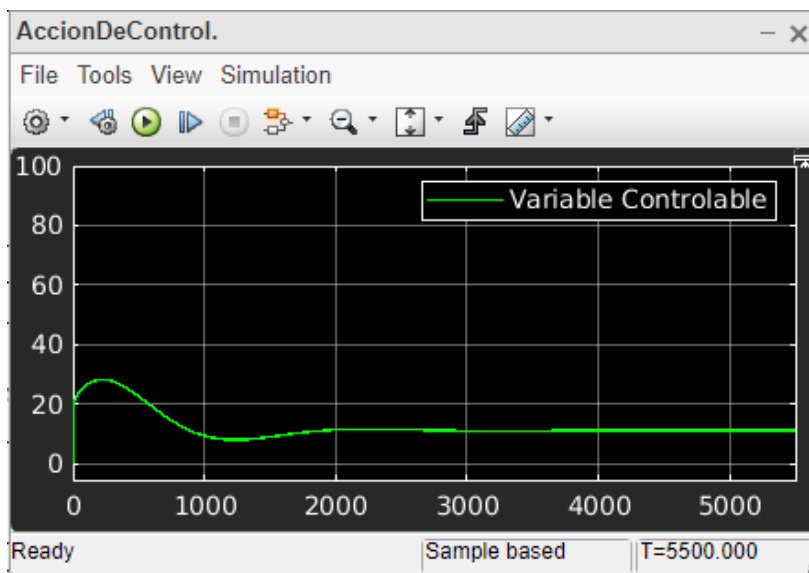


Figura 31. Simulación MATLAB Variable controlable

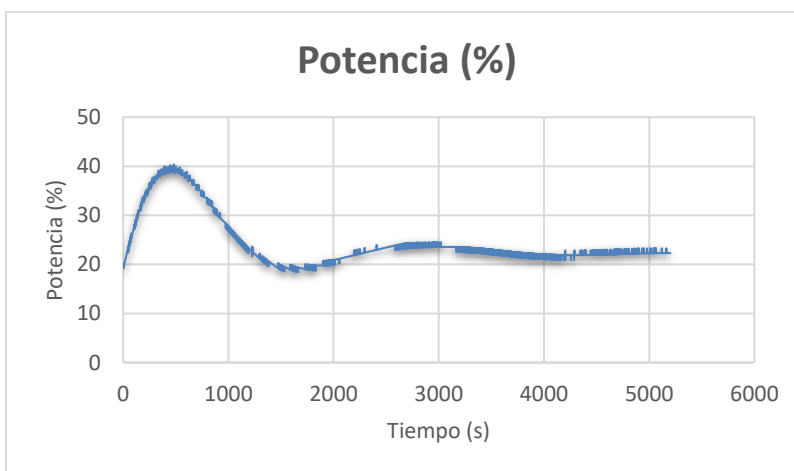


Figura 32. Aplicación Real Variable controlable

Para mejorar el tiempo estabilización en el punto de referencia, teniendo en cuenta que para los siguientes análisis se mantiene el valor de $T_i = 396.85$ que es representada en la gráfica roja de la figura 28. Tras realizar varios análisis del comportamiento con la constante proporcional $K_p = 2$, $K_p = 4$ y $K_p = 8$. se declina finalmente por criterio personal que los valores de las constantes de control proporcional son $T_i = 396.8$ y $K_p = 8$ relacionado su comportamiento en la simulación en la Figura 33 33, y su aplicación real de la figura 34.

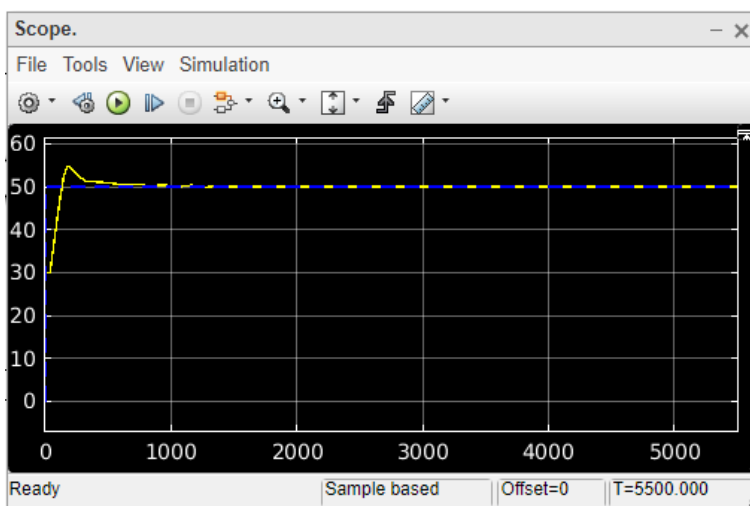


Figura 33. Simulink. Respuesta apropiada

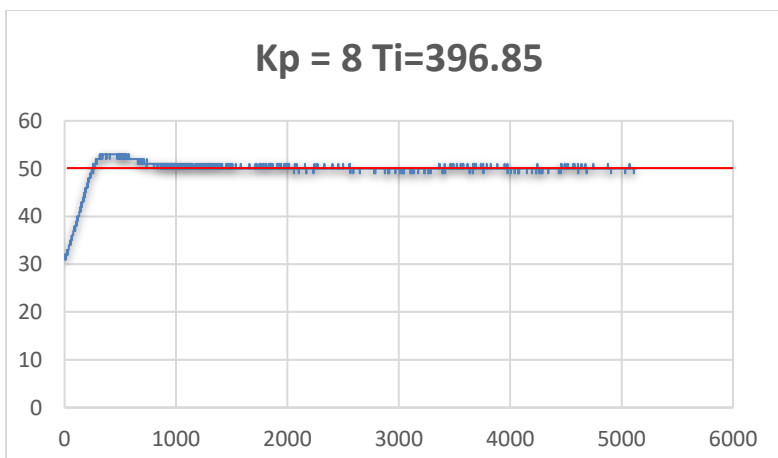


Figura 34. Aplicación Real Respuesta apropiada

En la Figura 35 y 36 simulación y aplicación real respectivamente se puede visualizar el comportamiento que tuvo la variable controlable para alcanzar el punto de referencia.

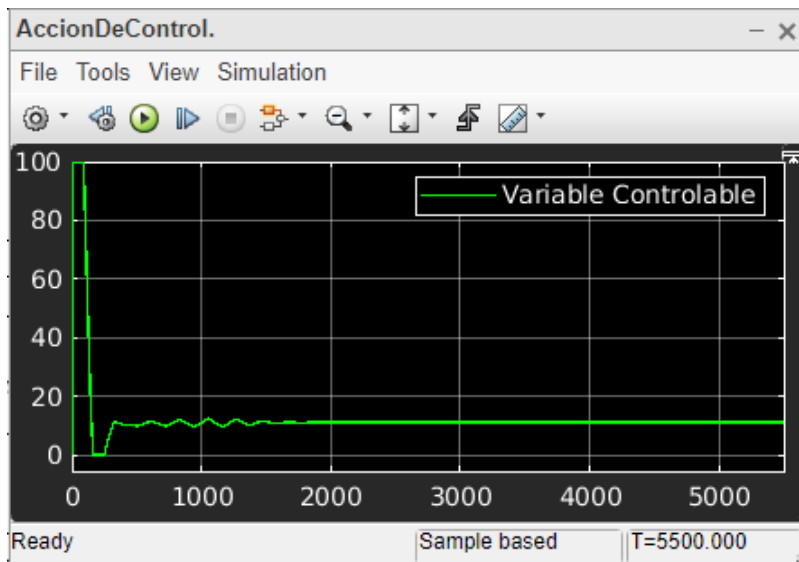


Figura 35. Simulink Variable controlable apropiada

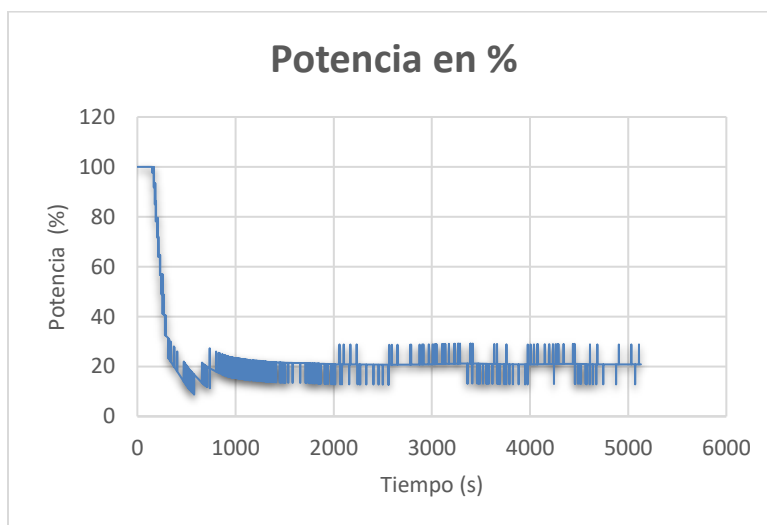


Figura 36. Aplicación Real Variable controlable apropiada

Montaje del prototipo.

En la figura 36 se ilustra el prototipo con el que se llevó a cabo la aplicación de este proyecto, donde se relacionan componentes necesarios para un control retroalimentado como el **controlador** Arduino, el **actuador** Dimmer, el **sensor** de temperatura termocupla tipo K, el elemento calefactor una bombilla y una pantalla LCD para la visualización del sistema.

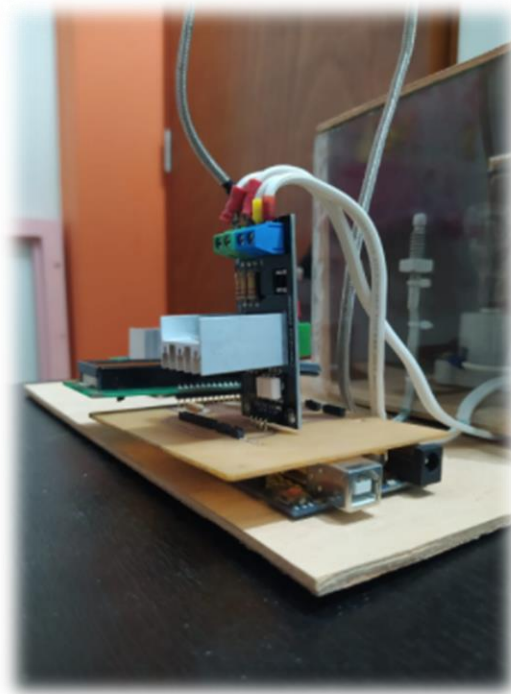


Figura 37. Prototipo del proyecto

Este diseño puede controlar temperaturas desde los 30 a los 120 °C, por lo que se debe tener cuidado al momento de generar altas temperaturas, dado que puede ocasionar lesiones graves a las personas e instalaciones.

Conclusiones

Existen multitud de métodos de sintonización para control de procesos, en este proyecto se aplicó un método semi empírico, dado que para las condiciones de nuestro sistema presentan comportamientos predecibles, como por ejemplo, sabemos que es un sistema que tendrá un tiempo de estabilización lo que significa que llegará a un valor y ahí se mantendrá.

Se logró identificar un modelo apropiado para el prototipo, lo cual se ve reflejado en la simulación donde se pueden observar comportamientos similares a los de la aplicación real.

Con la realización de este proyecto se pudo concluir que los elementos con los que se caracteriza el modelo matemático o función de transferencia no pueden ser cambiados. Por ejemplo, un cambio en el tipo de sensor requiere volver a caracterizar y modelar el sistema dado que posiblemente este nuevo sensor tendrá características técnicas diferentes como por ejemplo, tiempo de reacción, compensación y resolución. Lo que afectará la ecuación matemática del sistema.

Matlab y Simulink fueron herramientas indispensables para la realización del proyecto, permitiendo corroborar los modelos obtenidos mediante simulaciones. De igual manera, facilitaron la prueba de los controladores antes de ser implementados en el prototipo.

Debido a que existen diversas implementaciones de la ecuación matemática de los controladores PID, es sumamente importante comprender cuál de las ecuaciones es la usada en las herramientas de simulación. Así mismo, comprender como se ejecuta la ecuación del PID en un sistema embebido.

Tras la finalización de este proyecto se aclararon conceptos importantes como por ejemplo en la programación de un controlador, el modelamiento de sistemas dinámicos, temas relacionados con sensores y actuadores para un sistema de control realimentado.

Se determinó que el tiempo que requiere el controlador para ejecutar cada línea de código es de suma importancia para una correcta ejecución del control, ya que cada microsegundo se podría sumar a valor final de tiempo que calcula el algoritmo modificando así el instante de reacción del Triac.

Trabajos Futuros

Implementación de una interfaz gráfica conectada a internet, con la finalidad de establecer la persistencia de datos, monitoreo de las variables para cualquier usuario sin importar su ubicación geográfica y mejorar la visualización y/o el diseño del proyecto.

Emplear el controlador de lógica difusa en el prototipo, aprovechando por decirlo de alguna manera el molde ya construido, con el fin de enriquecer la habilidades y destrezas sobre el control de procesos.

Ejecutar el controlador diseñado en una planta industrial, planteando el ejemplo de realizar el control de temperatura de un horno industrial, se debe pasar la lógica del código a la sintaxis que el PLC interpreta, para ello nos podemos ayudar con diagrama de flujo del anexo B y C. Se debe tener en cuenta que en este paso de la implementación es importante un modo de lazo abierto para tomar los datos experimentales y de lazo cerrado para el control automático, como segundo paso conocer el actuador por seguir el ejemplo se supone que es una electroválvula y que recibe 4-20 mA siendo 4 mA la válvula totalmente cerrada y 20 mA totalmente abierta, como tercer paso adecuar la señal que nos entrega el sensor esto dependerá del tipo de sensor, por último nuestro elemento calefactor al que finalmente debemos controlar para mantener nuestro punto de consigna, una vez entendidos los pasos anteriores se debe comenzar con la toma de datos, ejecutando un cambio escalón unitario en nuestro actuador generaríamos cambio de temperatura y por consiguiente la obtención de datos para realizar la gráfica, con ello podemos seguir los pasos de la sección 4.2 del capítulo IV el cual describe el paso a paso para conocer la función de transferencia del sistema, también se plantea el código en Matlab para corroborar nuestro modelamiento. Paso siguiente debemos encontrar las constantes

proporcional e integral que usando el método descrito en la página 49 y con la ayuda del software Simulink de Matlab podríamos simular el comportamiento de nuestro sistema y verificar su funcionamiento real. La lógica de control en este sistema se basa en obtener con la ecuación de los controladores PI el valor exacto en miliamperios para que este deje pasar el combustible adecuado con el fin de alcanzar el punto de referencia.

Referencias bibliográficas

- Alfaro, V. (2005). Actualización Del Método De Sintonización De Controladores De Ziegler Y Nichols. San José – costa rica
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/article/download/7739/7403>.
- Alfaro, V. (2014). Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso. Universidad de Costa Rica. Recuperado de.
https://www.researchgate.net/publication/260058742_Identificacion_de_modelos_de_orden_reducido_a_partir_de_la_curva_de_reaccion_del_proceso/link/0046352f3ba3fab76000000/download.
- Becerra, J.C. (2018). Desarrollo de un sistema controlador de temperatura y monitoreo de PH y humedad del proceso SPING COATING. Universidad autónoma de occidente-Santiago del Cali. Recuperado de:
<https://red.uao.edu.co/bitstream/handle/10614/10213/T07859.pdf?sequence=5&isAllowed=y>
- Betancor, C. (2006). Diseño De Un Sistema De Control De Temperatura. Universidad de Las Palmas de G.C. Recuperado de: <http://62.204.194.45/fez/eserv/taee:congreso-2006-1116/S3F04.pdf>
- Bequette, W. (2002). Process Control, Modeling, Design and Simulation. 2da edición.
https://books.google.com.co/books/about/Process_Control.html?id=PdjHYm5e9d4C&redir_esc=y

Cohen, G.A. Coon. (1953), Theoretical Investigations of Retarded Control Trans ASME, 75.

Guillén, C. (2016). Diseño experimental de un regulador PID de bajo costo para complementar el aprendizaje en control de procesos, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria-España.

Recuperado de:

https://accedacris.ulpgc.es/bitstream/10553/20462/1/0730076_00000_0023.pdf

Harper, G. (2000). El ABC de la instrumentación en el control de procesos. Recuperado de https://books.google.com.co/books?id=KucFKY TZ__IC&pg=PA5&dq=importancia+de+control+de+procesos+industriales&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwjIuPCgs5zxAhU3TTABHQkmD50Q6AewA3oECAoQAg#v=onepage&q=importancia%20de%20control%20de%20procesos%20industriales&f=false.

Hermosa, A. (2009). Principios de electricidad y electrónica V. Marcombo. Recuperado de

<https://books.google.com.co/books?id=VjewlourLcC>.

Inzuanza, J. (2006). Capitulo Temperatura . recuperado de:

http://nimbus.com.uy/weather/Cursos/Curso_2006/Textos%20complementarios/Meteorologia%20descriptiva_Inzunza/cap4_Inzunza_Temperatura.pdf.

Lilen, H. (1973). Tiristores y Triac: principios y aplicaciones de los tiristores, Triac, diac, SBS, foto tiristores, etc., con esquemas de aplicación. Editorial Marcombo. Recuperado de

<https://books.google.com.co/books?id=7Yelfs7uItYC&pg=PA17&dq=Que+es+un+triac&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwui->

[Pmz__TxAhVwc98KHRCVD64Q6AEwAHoECAQQAg#v=onepage&q=triac&f=false](https://books.google.com.co/books?id=7Yelfs7uItYC&pg=PA17&dq=Que+es+un+triac&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwui-Pmz__TxAhVwc98KHRCVD64Q6AEwAHoECAQQAg#v=onepage&q=triac&f=false).

López, A.M., J.A. Miller, C.L. Smith y P.W. Murril; Tuning Controllers with Error-Integral Criteria, Instrumentation Technology (EUA), Nov. 1 967.

- Mandado, E. & Marcos, J. (2009). Autómatas programables y sistemas de automatización / PLC and Automation Systems. Marcombo. Recuperado de https://www.google.com/books/edition/Automatas_programables_y_sistemas_de_aut/5jp3bforBB8C?hl=es&gbpv=1&bsq=Definici%C3%B3n%20de%20PLC
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de control moderna. Pearson. https://books.google.com.co/books?id=QK148EPC_m0C&pg=PA398&dq=Ingenier%C3%ADa+de+control+moderna+2010.
- Peña, C. (2020). Descubriendo Arduino. RedUsers. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=bL7PDwAAQBAJ&pg=PA51&dq=que+es+un+optoacoplador&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiSprjk6fTxAhXyRzABHfM3D1UQ6AEwAnoECAoQAq#v=onepage&q=que%20es%20un%20optoacoplador&f=false>.
- Ramírez, E. (2017). El algoritmo de sintonización simple de controladores difusos: (ASSCD). De La Salle Ediciones. Recuperado de: https://books.google.com/books?id=18FdDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false.
- Velásquez, C (2012). Fundamentos de circuitos eléctricos. ITM. Recuperado de https://books.google.com.co/books?id=C_c-DwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=que+es+la+potencia+electrica+pdf&hl=es&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Villar, M. (2001). Profesores de Enseñanza Secundaria. Tecnología. Volumen IV E-book. MAD-

Eduforma, recuperado de

https://www.google.com/books/edition/Profesores_de_Ense%C3%B1anza_Secundaria_Tecn/r32D3siDbgsC?hl=es&gbpv=1&dq=que+es+cruce+por+cero&pg=PA459&printsec=frontcover.

Zhong, J. (2006). PID controller tuning: a short tutorial. Class lesson, Purdue University.

<https://cdn.instructables.com/ORIG/FC1/NAZC/IVA51KF1/FC1NAZCIVA51KF1.pdf>.

Anexos

Anexo A

Esquemático del prototipo.

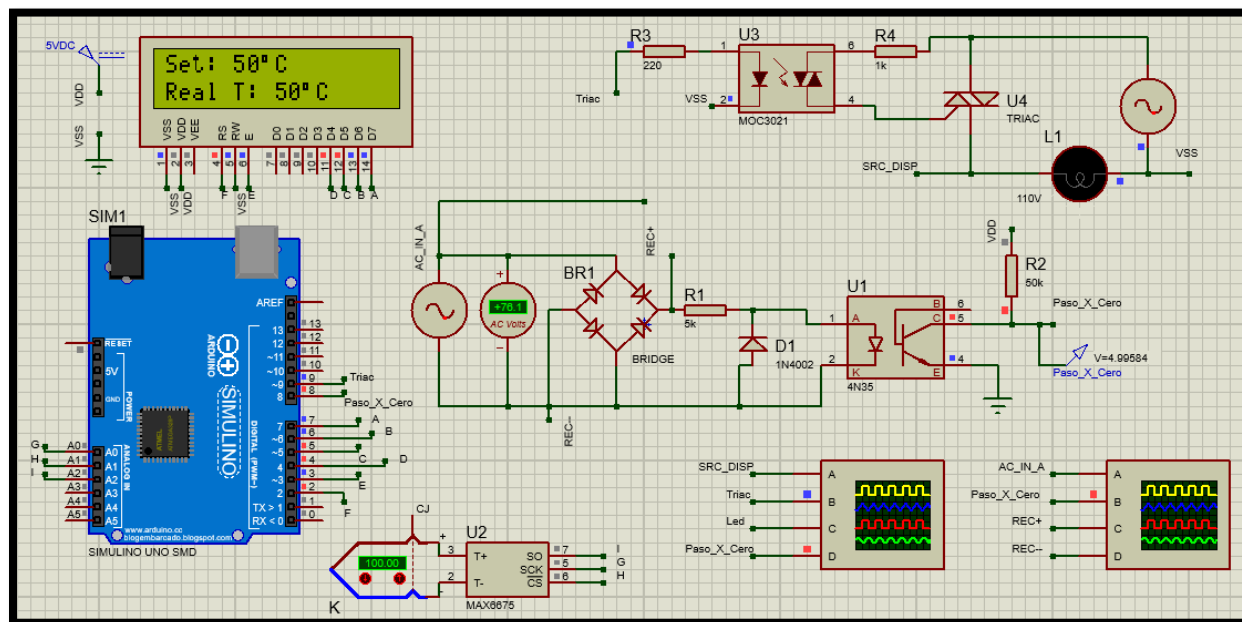


Figura 38. Esquemático del prototipo

Anexo B

Código del proyecto

```
//Inclusión de librerías
#include "max6675.h"
#include <LiquidCrystal.h>
//Definición de pines para MAX6675 y LCD
#define CONFIG_TCCK_PIN    A0
#define CONFIG_TCCS_PIN    A1
#define CONFIG_TCDO_PIN    A2
MAX6675 thermocouple(CONFIG_TCCK_PIN, CONFIG_TCCS_PIN,
CONFIG_TCDO_PIN);
LiquidCrystal lcd(2,3,4,5,6,7);
//Modos de operación 1 o 2
int Modo = 2; //Lazo cerrado
// Parámetros para análisis a lazo abierto
float Potencia_1 = 0;
float Potencia_2 = 0;
// Parámetros para análisis a lazo cerrado
float Setpoint = 50;
float Kc = 8; float Tao_I = 396.85;
int Tiempo0 = 0;
float Potencia = 0;
// Declaración de variables
int pin_disparo = 9;
int pin_cruce_cero = 8;
int last_CH1_state = 0;
int detectado = 0;
int valor=0
unsigned long Tiempo_previo = 0;
unsigned long Tiempo_actual = 0;
int Read_Delay = 1000;
int Temperatura = 0;
float sp = 0;
// Variables para PID
float PID_error = 0;
float previous_error = 0;
float PID_value = 0;
float Error_INT = 0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  lcd.begin(16, 2);
```

```

//Definicion de pines
pinMode (pin_disparo,OUTPUT);
pinMode (pin_cruce_cero,INPUT);
PCICR |= (1 << PCIE0);
PCMSK0 |= (1 << PCINT0);
}
void loop() {
  Tiempo_actual = millis();
  valor = map(Potencia,0,100,7600,280);
  if (detectado)
  {
    delayMicroseconds(valor);
    digitalWrite(9,HIGH);
    delayMicroseconds(100);
    digitalWrite(9,LOW);
    detectado=0;
  }
  if(Tiempo_actual - Tiempo_previo >= Read_Delay){
    Tiempo_previo += Read_Delay;
  }
  Temperatura = thermocouple.readCelsius();
  if(Modo == 1){
    // Modo manual (lazo abierto)
    if(Tiempo_actual <= Tiempo0) {
      Potencia = Potencia_1;
    }
    else if(Tiempo_actual >= Tiempo0) {
      Potencia = Potencia_2;
    }
  }
  else if(Modo == 2){
    // Modo automático (lazo cerrado)
    if(Tiempo_actual <= Tiempo0) {
      PID_value = 0;
    }
    else if (Tiempo_actual >= Tiempo0){
      PID_error = Setpoint - Temperatura;
      Error_INT = Error_INT + PID_error*(1000/Read_Delay);
      PID_value = Kc*(PID_error + (1/Tao_I)*Error_INT);
      sp = Setpoint;
    }
  }
  if(PID_value < 0)
  {
    PID_value = 0;
  }
}

```

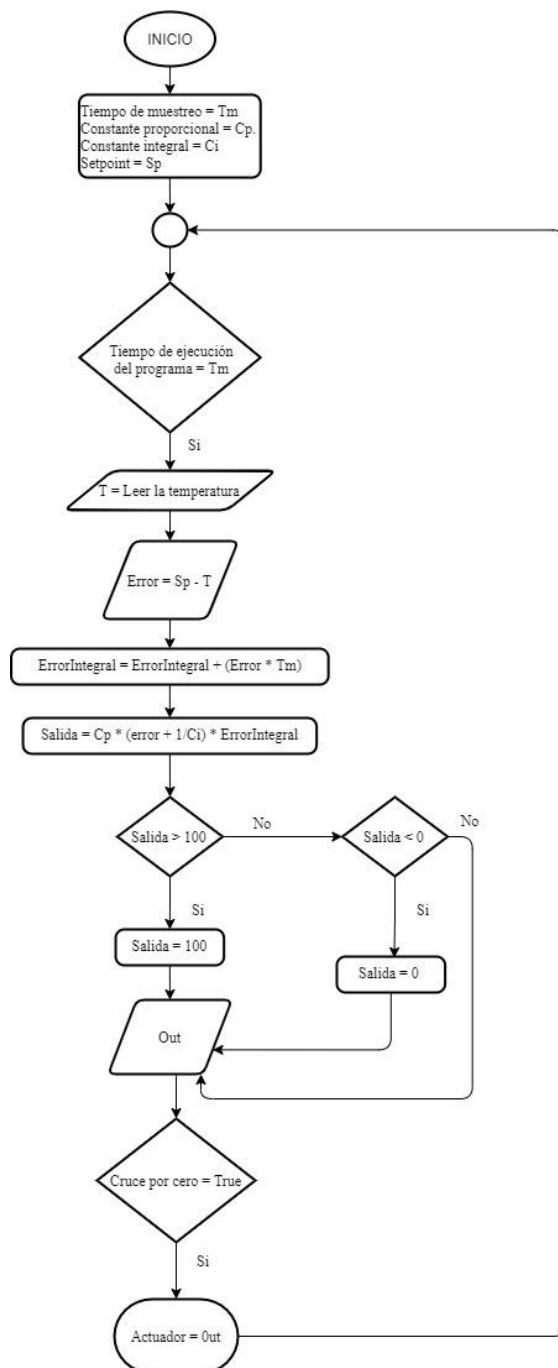
```

    if(PID_value > 100)
    {
        PID_value = 100;
    }
    Potencia = PID_value;
}
    Serial.print(Potencia);
    Serial.print(" ");
    Serial.print(Temperatura);
    Serial.print(" ");
    Serial.println(sp);
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Set: ");
    lcd.print(sp);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print("Real T: ");
    lcd.print(Temperatura);
    lcd.print((char)223);
    lcd.print("C");
}
}
}
ISR(PCINT0_vect)
{
    if(PINB & B00000001)
    {
        {
            if(last_CH1_state == 0)
            {
                detectado=1;
            }
        }
    }
    else if(last_CH1_state == 1)
    {
        {
            detectado=1;
            last_CH1_state = 0;
        }
    }
}
}

```

Anexo C

Diagrama de bloques del programa



Anexo D

Ejemplo del formato para obtención de muestras.

Nota: 70 de los 5500 Datos de la respuesta apropiada definida para el sistema, Figura 34

Tiempo de Muestreo HH/MM/SS/MLS	Tiempo S	Potencia %	Tiempo S	Temperatura °C	Setpoint °C
22:26:45.219	1	100	1	32	50.00
22:26:46.203	2	100	2	32	50.00
22:26:47.234	3	100	3	32	50.00
22:26:48.209	4	100	4	32	50.00
22:26:49.232	5	100	5	31	50.00
22:26:50.218	6	100	6	31	50.00
22:26:51.246	7	100	7	32	50.00
22:26:52.231	8	100	8	32	50.00
22:26:53.218	9	100	9	31	50.00
22:26:54.208	10	100	10	32	50.00
22:26:55.237	11	100	11	31	50.00
22:26:56.227	12	100	12	32	50.00
22:26:57.217	13	100	13	31	50.00
22:26:58.202	14	100	14	32	50.00
22:26:59.237	15	100	15	32	50.00
22:27:00.229	16	100	16	32	50.00
22:27:01.202	17	100	17	32	50.00
22:27:02.230	18	100	18	32	50.00
22:27:03.245	19	100	19	32	50.00
22:27:04.233	20	100	20	32	50.00
22:27:05.223	21	100	21	32	50.00
22:27:06.203	22	100	22	32	50.00
22:27:07.241	23	100	23	33	50.00
22:27:08.233	24	100	24	33	50.00
22:27:09.224	25	100	25	32	50.00
22:27:10.220	26	100	26	32	50.00
22:27:11.209	27	100	27	33	50.00
22:27:12.240	28	100	28	32	50.00
22:27:13.226	29	100	29	32	50.00
22:27:14.218	30	100	30	33	50.00
22:27:15.247	31	100	31	33	50.00
22:27:16.240	32	100	32	33	50.00
22:27:17.230	33	100	33	33	50.00

22:27:18.223	34	100	34	33	50.00
22:27:19.210	35	100	35	33	50.00
22:27:20.239	36	100	36	33	50.00
22:27:21.226	37	100	37	33	50.00
22:27:22.207	38	100	38	33	50.00
22:27:23.242	39	100	39	34	50.00
22:27:24.223	40	100	40	34	50.00
22:27:25.211	41	100	41	34	50.00
22:27:26.240	42	100	42	34	50.00
22:27:27.233	43	100	43	34	50.00
22:27:28.219	44	100	44	34	50.00
22:27:29.212	45	100	45	34	50.00
22:27:30.200	46	100	46	34	50.00
22:27:31.232	47	100	47	34	50.00
22:27:32.218	48	100	48	34	50.00
22:27:33.205	49	100	49	34	50.00
22:27:34.236	50	100	50	34	50.00
22:27:35.227	51	100	51	34	50.00
22:27:36.215	52	100	52	35	50.00
22:27:37.202	53	100	53	34	50.00
22:27:38.233	54	100	54	34	50.00
22:27:39.219	55	100	55	35	50.00
22:27:40.211	56	100	56	35	50.00
22:27:41.245	57	100	57	35	50.00
22:27:42.227	58	100	58	35	50.00
22:27:43.213	59	100	59	35	50.00
22:27:44.244	60	100	60	35	50.00
22:27:45.232	61	100	61	35	50.00
22:27:46.226	62	100	62	35	50.00
22:27:47.211	63	100	63	35	50.00
22:27:48.244	64	100	64	36	50.00
22:27:49.225	65	100	65	35	50.00
22:27:50.210	66	100	66	36	50.00
22:27:51.204	67	100	67	36	50.00
22:27:52.234	68	100	68	36	50.00
22:27:53.226	69	100	69	36	50.00
22:27:54.247	70	100	70	36	50.00