

Reto entrega final



**Tecnológico
de Monterrey**

Autores:

Hilda Olivia Beltrán Acosta A01251916
Andrea González Arredondo A01351820
Edgar Alexander Carrizalez Lerín A01024901
Salvador Yair Gallegos López A01707962

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY

Campus Querétaro

MR2002B

Fecha entrega: 08/09/2022

Índice

Introducción	3
Objetivo	3
Contexto	3
Reto	4
Preguntas detonadoras	4
Propuesta inicial	6
Materiales	6
Descripción de la propuesta	7
Teoría del sistema	7
Observaciones para una buena implementación del sistema	10
Comentarios	10
Implementación del sistema	11
Sistema en físico	24
Link de Youtube	25
Diagrama de Gantt	25
Conclusión	26
Referencias	27

Introducción

Los sistemas de control son el conjunto de elementos que están interconectados con el propósito de manipular el comportamiento de una estructura. En nuestra área de robótica el control es muy importante ya que permite controlar y optimizar procesos.

Existen diferentes tipos de sistemas de control, como lo son el de lazo cerrado y lazo abierto, cada uno con sus ventajas y desventajas, en este caso se usará el sistema de control a lazo cerrado, ya que se necesita una retroalimentación para minimizar el margen de error.

A lo largo de esta propuesta se conocerán los elementos teóricos y prácticos que serán utilizados para la resolución del reto, además de que nuestra forma de trabajo será expuesta para conocer cómo llevaremos a cabo nuestras actividades.

A continuación, se verá el avance de medio término, dando una pronta solución a la situación problema. Finalmente, se verá principalmente un modelo matemático que es con predicción y estadística para poder tener un sistema controlado en la temperatura en un estanque de peces Tilapia. Así como su modelación matemática y en sistema de control con diagrama a bloques.

Objetivo

Aumentar el desempeño de un proceso mediante la aplicación de un control en lazo cerrado a través de un sistema de control que permite optimizarlo y mantenerlo.

Contexto

Un sistema de control es un conjunto de elementos interconectados que trabajan para un mismo fin. Está formado por un conjunto de dispositivos de diverso orden. Puede ser tan sencillo como regular la temperatura en una pecera de peces tropicales o tan complejo como hacer que camine un robot bípedo.

A través de los años, la ingeniería de control ha sido un factor importante para el desarrollo de la tecnología. Siempre que se necesite ajustar una variable física a un valor específico, se está realizando una acción de control. Por esta razón, no es raro encontrar varios sistemas de control formando parte de un proceso de producción o dentro de un sólo dispositivo, dependiendo de la necesidad que se tenga.

Algunos sistemas de control pueden considerar retroalimentación o no, podemos definir retroalimentación como la información que regresa al lugar donde se originó. Al ser información,

debe contener algo nuevo. Cuando esta información llega se reintroduce de nuevo en el sistema con el objetivo de mantener un control y una optimización de su comportamiento.

Reto

Se realizará una implementación con lazos de control en un sistema de tipo automático. Por lo que, como proceso de diseño se pondrá en desempeño las áreas a mejorar, además de revisar criterios de desempeño solicitados y por ende, realizar una propuesta. Por lo que, ayudará a tener experiencia en el conocimiento teórico para poder aplicarlo en la vida real con un proceso o producto real.

Preguntas detonadoras

¿Cómo propones incrementar la productividad en este proceso industrial mediante el control automático?

Mediante el diseño de un sistema de control que permita desarrollarlo para un propósito en específico. La automatización permite ejecutar procesos con un nivel de precisión mucho más elevado, además de mejorar la eficiencia y disminuir el margen de error.

¿Cuáles son las variables: del proceso, referencia, manipulación, error?

Variables del proceso: Dentro del proceso para aplicar el regulador de temperatura existen algunas variables a considerar para garantizar el correcto funcionamiento del sistema; en este caso se estará trabajando con la temperatura deseada, la temperatura actual, la resistencia del calentador, el error en cada una de las entradas del controlador. Las cuales serán útiles para controlar el comportamiento del sistema y tener una salida favorable.

Variables de referencia: La variable de referencia nos permite realizar las comparaciones dentro de nuestro sistema de control retroalimentado, en este caso es la constante de temperatura a la que se desea mantener el tanque. Esto quiere decir que con esta constante se podrá tener una referencia de a dónde tiene que llegar la variable dependiente del sistema, en este caso la temperatura final del tanque de agua.

Variables de manipulación: Se considera variable de manipulación aquella que se irá modificando para poder alcanzar el objetivo planteado para la situación en cuestión. En este caso, el objetivo es lograr tener control sobre el regulador de temperatura para el tanque en el que habitan las tilapias, para de esta manera tener un sistema estable. La variable de manipulación en nuestro diseño es el valor de la resistencia del calentador para lograr el cambio de temperatura adecuado para estar lo

más cerca posible del valor de temperatura deseado. Es decir, es la variable independiente del sistema, la cual va a afectar a la variable dependiente del mismo.

Variable de error: Almacena datos en caso de que se produzca un error estándar o del sistema. Un error es una condición excepcional que puede cambiar el proceso normal de un proceso BPEL. En esta aplicación, la variable de error es representada por la diferencia entre la temperatura del estanque y la temperatura deseada dentro del mismo; la cual irá decreciendo para estabilizar el regulador que se estará aplicando al tanque.

¿Qué áreas/etapas del proceso/sistema son factibles de ser automatizadas?

Usando un modelo matemático se puede automatizar la mayoría del proceso. Las únicas áreas que no serían susceptibles a una automatización serían cuestiones enfocadas al mantenimiento. Ya que el monitoreo y control de temperatura son automatizados con un programa, el modelo y controlador PID. Además el uso de componentes como el relevador de estado sólido permiten el uso del calentador de forma automática.

¿Qué elementos se tendrían que reemplazar?

Como en todo proceso de automatización, habrá ciertas etapas del proceso, así como elementos que tendrán que ser reemplazados, siempre buscando la mejora continua para llegar de manera más rápida y sencilla al objetivo. En este caso, se utiliza un controlador PID para reemplazar a alguien que decida si subir o bajar el valor de la resistencia del calentador, esta decisión sería tomada por el controlador al momento de recibir el dato del sensor analógico de temperatura. Se tendría un sensor fijo que estuviera leyendo la temperatura del agua cada cierto tiempo, en lugar de que el sensor sea manejado por alguien y que esta persona tenga que interpretar personalmente la lectura del mismo. Es decir, todos los procesos y áreas que puedan ser automatizadas serán reemplazadas en este sistema, para permitir una mayor independencia del sistema.

¿Qué ventajas y desventajas, a corto y largo plazo visualizas ante esta automatización?

A corto y largo plazo veo la ventaja de que el sistema puede ser autónomo para el estanque de tilapias, por lo que en la mayor parte de los casos el entorno y la producción no van a ser alterados a menos de que haya un problema eléctrico. A largo plazo esto puede generar ganancias en la producción al mantener un entorno favorable para la reproducción de dicho espécimen sin embargo a corto plazo los errores debido a la adaptación del modelo matemático pueden ser relativamente frecuentes si se quiere ser preciso y maximizar la eficiencia y a largo plazo puede que el uso de este sistema incrementa la confianza en la supervisión pero para no caer en esos errores (una desconfiguración) sería recomendable incluir un termómetro analógico para tener una mayor seguridad.

¿Qué contenidos teóricos, procedimentales y actitudinales deberás aplicar para realizar el reto?

Control, ingeniería de control, clasificación de los sistemas de control, sistemas dinámicos lineales y no lineales, sistemas de control en lazo abierto y cerrado, modelado de sistemas físicos, controlador automático, sistemas básico de retroalimentación, la retroalimentación y sus efectos, álgebra de bloques, sistemas térmicos, principios de estabilidad, sistema de control experimental, transformada de Laplace, variable compleja, frecuencia complejo, función exponencial, polos y ceros, tipos de señales de entrada y salida.

Propuesta inicial

Materiales

Cubeta (Cubeta y todo lo que lleva adentro):

Es un material cóncavo que permite almacenar sustancias y pueden ser de distintos materiales. Sus materiales con los que están hechos son de suma importancia para poder vaciar sólidos en particular respecto al experimento o actividad que se desee realizar con él.

Controlador PID:

También conocido como regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. El controlador PID está compuesto por tres elementos que proporcionan una acción proporcional, integral y derivativa. Estas tres acciones son las que le dan nombre al controlador PID.

Relevador (actuador):

Los relevadores tienen una bobina conectada a una corriente, cuando esta se activa produce un campo electromagnético, el cual provoca que el contacto del relé que se encuentra normalmente abierto se cierre y de esta forma, permite el paso de la corriente por un circuito para ejercer cierta acción, en este caso encender nuestro calentador.

Resistencia (Calentador de agua):

Consisten en resistencias calefactoras que consiste en una fabricación con estándares altos. Sus materiales como el níquel, cromo y óxido de magnesio electrofundido permiten evitar la corrosión, vibración e impactos. Finalmente, es usado desde la idea de calentar agua, aceite, calefaccionar ambientes, etc.

Sensor de temperatura (termopar impermeable):

Este consiste en un sensor permite comportarse como cable de aislamiento a prueba de agua, además de ser sonda de sensor de temperatura hermética.

Algunas de sus características son:

- Resistente al óxido con material de acero inoxidable
- Mantiene una temperatura de 0 a 500 °C, con precisión 0.2
- Cable de metal de 2m
- Soporta hasta temperaturas de 600°C

Descripción de la propuesta

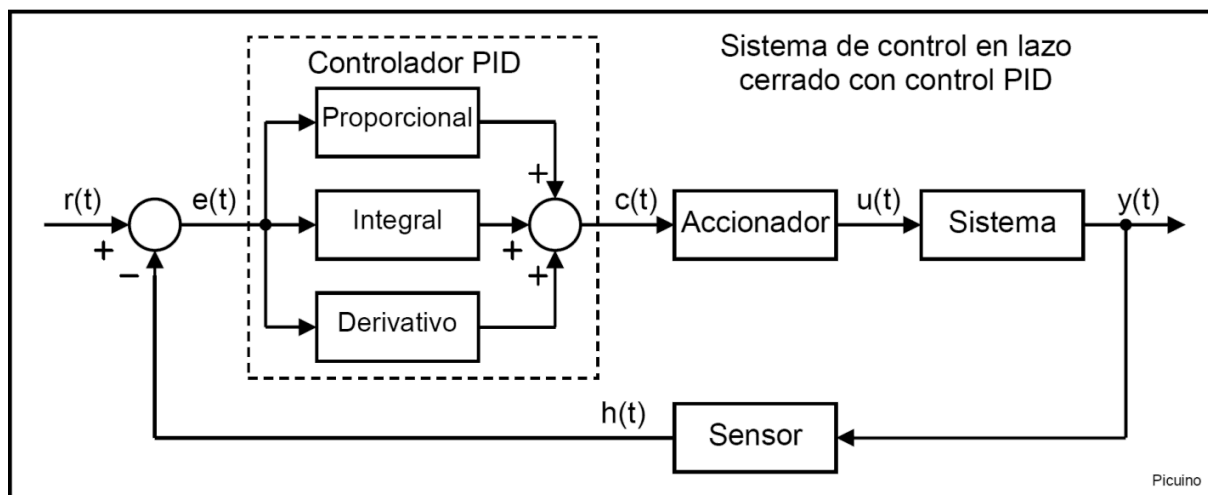


Figura 1. Sistema de control en lazo cerrado con control PID

Teoría del sistema

La función de transferencia es la relación que se define entre la señal de salida con alguna de las señales de entrada o de control; es el modelo matemático que nos permite conocer o predecir el comportamiento del sistema. Esto es mediante la relación de la transformada de Laplace de la variable de salida con la transformada de Laplace de la variable de entrada; esta transformada es utilizada para la resolución de ecuaciones diferenciales.

Para lograr el correcto funcionamiento del sistema, se debe obtener el modelo matemático para comprobar la estabilidad del sistema, lo cual se identificará por medio de los polos. Esta estabilidad es completamente necesaria para asegurar que el sistema estará trabajando dentro de los rangos de error permitidos. Obteniendo así una señal de salida estable y precisa, dirigida a resolver la

situación problema presentada desde un inicio, esto tomando en cuenta las variables de control, de referencia, de error y de proceso.

El sistema es retroalimentado para poder llevar a cabo una comparación entre el valor de salida y la variable de referencia, que en este caso es la temperatura del tanque con la temperatura deseada. Dependiendo del error, representado por la diferencia anteriormente mencionada, es la acción que llevará a cabo el controlador PID para determinar la resistencia térmica que se le aplicará al agua dentro del tanque. Esta resistencia térmica será la encargada de calentar el agua en proporción a los grados que falte o sobre para alcanzar la temperatura deseada, esto será determinado por el error en el sistema.

Un sistema de lazo cerrado es aquel que identifica el error y toma medidas para poder reducirlo con la cantidad de iteraciones que sean necesarias, por lo cual se está leyendo constantemente el dato captado por el sensor. Estos pueden ser de primer y segundo orden, la diferencia entre estos es la cantidad de polos con los que cuentan al momento de evaluar la estabilidad del sistema. Los de primer orden son más utilizados para representar sistemas físicos de la industria o un poco más cotidianos.

La variable de control se encuentra como la señal de salida del sistema, esta es la variable dependiente que se estará viendo afectada por las perturbaciones, señales de entrada, señales de referencia, entre algunos otros elementos del sistema. La transferencia de calor es el proceso en que el calor se propaga de un cuerpo a otro, lo cual se puede dar por medio de la conducción, la convección o la radiación.

Al aislar un espacio dentro del universo se conoce como sistema termodinámico, el cual limita las variables y aumenta la posibilidad de controlar el entorno y su comportamiento. Esto se usa en muchas áreas de la industria incluida la agroalimentaria al usarse en invernaderos para controlar la temperatura. En nuestro caso (como vimos en el CAETEC) contar con un método para controlar la temperatura ambiente no solo la del agua podría ser útil sin embargo el estanque de tilapias puede ser considerado un sistema termodinámico. Otra definición encontrada de un sistema térmico es uno que puede controlar su temperatura y mantenerla estable mediante monitoreo y control.

Capacidad térmica, es la cantidad de calor que se requiere para que un material cambie 1 grado centígrado. También se le conoce como calor específico.

La eficiencia eléctrica se refiere a la relación entre resultados y entrada/consumo energético. Por lo que se mide con la fórmula

$$\frac{\text{Resultados}}{\text{Entrada Total de Energia}}$$

Impulso unitario es la base de las señales discretas, es una función generalizada que permite obtener señales de primer orden que nos dan información acerca del sistema en retroalimentación en cuestión

del tiempo y su comportamiento de incremento o decremento en cuestiones de señales específicas a estudiar.

¿Cómo se va a implementar?

El sistema de control a desarrollar está compuesto por los elementos anteriormente descritos, tenemos una señal de entrada, que en el diagrama está representada por $r(t)$, después pasa a ser $e(t)$ que es la que entra a nuestro controlador PID, obtenemos $c(t)$ que es la entrada a nuestro actuador que en este caso es el relevador que permite que $u(t)$ sea la entrada a nuestro sistema donde activa a la resistencia, finalmente se hace una retroalimentación $h(t)$ que nos permite corregir el margen de error respecto a la variable manipulada.

Como se puede observar el control PID proporciona una variación continua de las salida dentro de un mecanismo de retroalimentación de bucle de control para controlar con precisión el proceso, eliminación de la oscilación y aumento de eficiencia. Mediante este controlador se recibe un impulso que le permite al actuador que en este caso es el relevador que permite el paso de corriente y convierte el impulso en una acción, que en este sistema de control sería calentar el agua de nuestra planta, donde el encargado es la resistencia. y con el sensor creamos un control a lazo cerrado ya que tenemos nuestra retroalimentación.

La propuesta consiste en tener un sistema de control que incluya todos los elementos y características antes mencionados, que permita optimizar el proceso, y sea de manera automática. Buscamos que esté fundamentado en todos los principios matemáticos y teóricos que estuvimos investigando, para que así sea un sistema de control de calidad.

El diagrama y descripción final siguiente es nuestra propuesta a implementar para la resolución de la problemática: El sistema de control retroalimentado para resolver el reto, con un contexto a manera de propuesta inicial se compondrá de variables, elementos, sensores, actuadores, limitaciones, rangos de operación y requerimientos energéticos de los dispositivos:

El sistema empieza con una entrada de referencia que permitirá ser recibida la información de la temperatura y cantidad de agua a controlar, que será mediante el controlador PID, que nos ayudará a organizar nuestra jerarquía del proceso a seguir para todo nuestro sistema, es decir, para poder continuar con lo siguiente y dejar pasar la retroalimentación dada.

En el mismo sistema de control PID tenemos una variable llamada " $C(t)$ ", que nos permitirá saber en cualquier momento errores que existan en dicho sistema. Además de una variable " $u(t)$ " que será el relevador y permitirá activar la resistencia. Por otro lado, tendremos nuestra planta que será el estanque con peces Tilapia, donde nos enfocaremos en mantener una temperatura ideal de entre 28°C a 32°C.

Finalmente, tendremos la variable “ $H(t)$ ” que es nuestro sensor de temperatura para medir los grados centígrados del agua y una retroalimentación llamada “ $Y(t)$ ” que, será nuestra variable de salida para poder obtener información útil del sistema, además, de tener resultados de operación del mismo sistema de control.

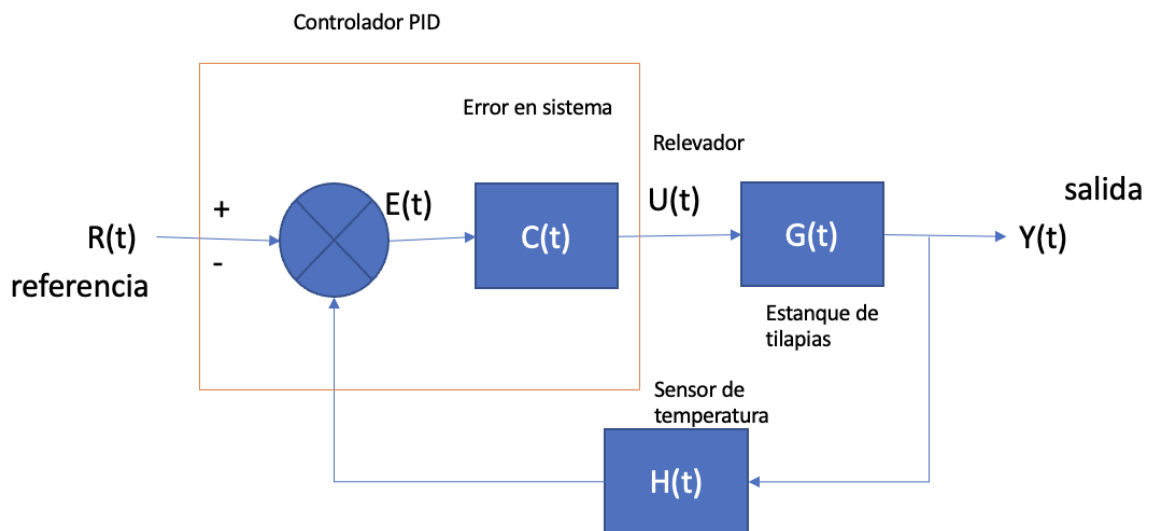


Figura 2. Sistema de control de lazo cerrado para estanque de peces Tilapia

Observaciones para una buena implementación del sistema

- Conocer el volumen del estanque, posibles errores en los dispositivos electrónicos, perturbaciones.
- Tiempo suficiente para controlar temperatura del estanque
- Información de referencia y salida deseada. Dependerá de nuestro objetivo que es medir temperatura para poder controlarla y poder ser eficientes.
- Conocer el tamaño y tipo de dispositivos electrónicos para el control de un estanque en específico.

Comentarios

- Nuestro sistema será retroalimentado, es decir, disminuirá la señal de error debido a perturbaciones.
- El sistema de control será un flujo de señales que dependen de funciones de transferencia para su estudio principalmente.

- El medio energético para que pueda funcionar nuestro sistema será mediante corriente alterna y es necesario tener en cuenta que solo debemos suministrar energía de entre 110 VAC a 220 VAC para no dañar el sistema.

Implementación del sistema

Para probar que nuestros componentes funcionarán, decidimos conectarlos para observar cómo se comportan y de igual forma conocer la ecuación que modela nuestro sistema con los valores que vienen predeterminados. De ser así, la temperatura del agua comenzó en temperatura ambiente, por lo que teníamos 26°C desde el inicio de las pruebas, por lo que nuestro sistema se comportó de manera lineal como se muestra en las siguientes imágenes.

Para cumplir con ello pusimos la resistencia en el agua, y comenzamos a tomar el tiempo y la temperatura cada 30 segundos. Obtuvimos los siguientes datos, después los graficamos para ver su comportamiento como se muestra en las siguientes imágenes.

Tiempo	Temperatur	Predicción
0.00	26	25.395
0.50	27	25.94135
1.00	27	26.4877
1.50	27	27.03405
2.00	27	27.5804
2.50	28	28.12675
3.00	28	28.6731
3.50	29	29.21945
4.00	30	29.7658
4.50	30	30.31215
5.00	31	30.8585
5.50	31	31.40485
6.00	32	31.9512
6.50	32	32.49755
7.00	33	33.0439
7.50	33	33.59025
8.00	34	34.1366
8.50	35	34.68295
9.00	35	35.2293
9.50	36	35.77565
10.00	36	36.322
10.50	37	36.86835
11.00	37	37.4147
11.50	38	37.96105
12.00	38	38.5074
12.50	39	39.05375
13.00	40	39.6001
13.50	40	40.14645
14.00	41	40.6928
14.50	42	41.23915
15.00	42	41.7855
15.50		42.33185

Figura 3. Tabla de datos obtenidos

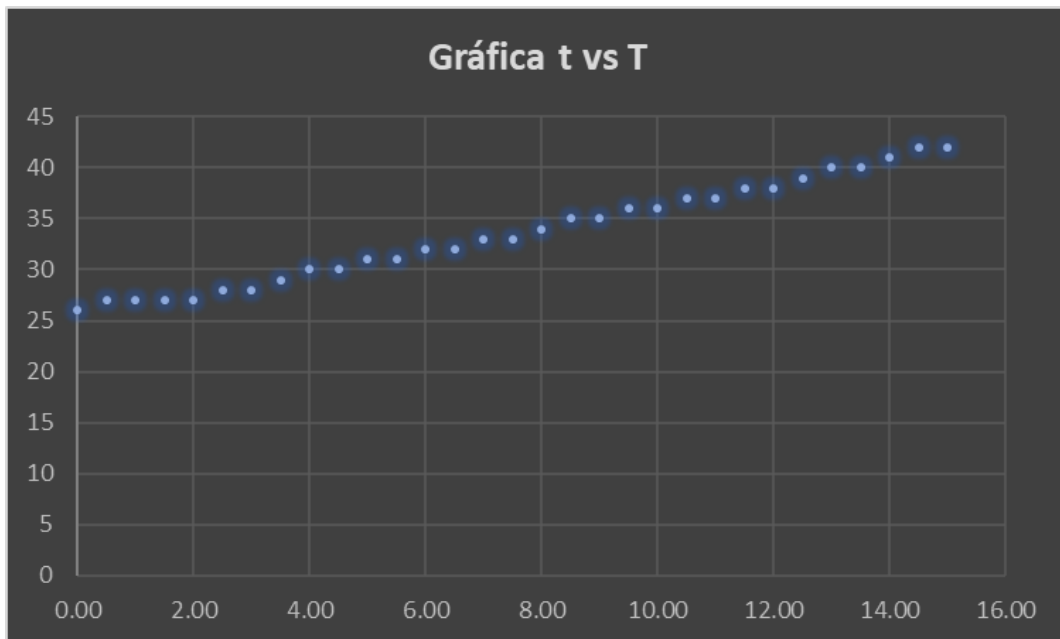


Figura 4. Gráfica que modela la temperatura vs tiempo

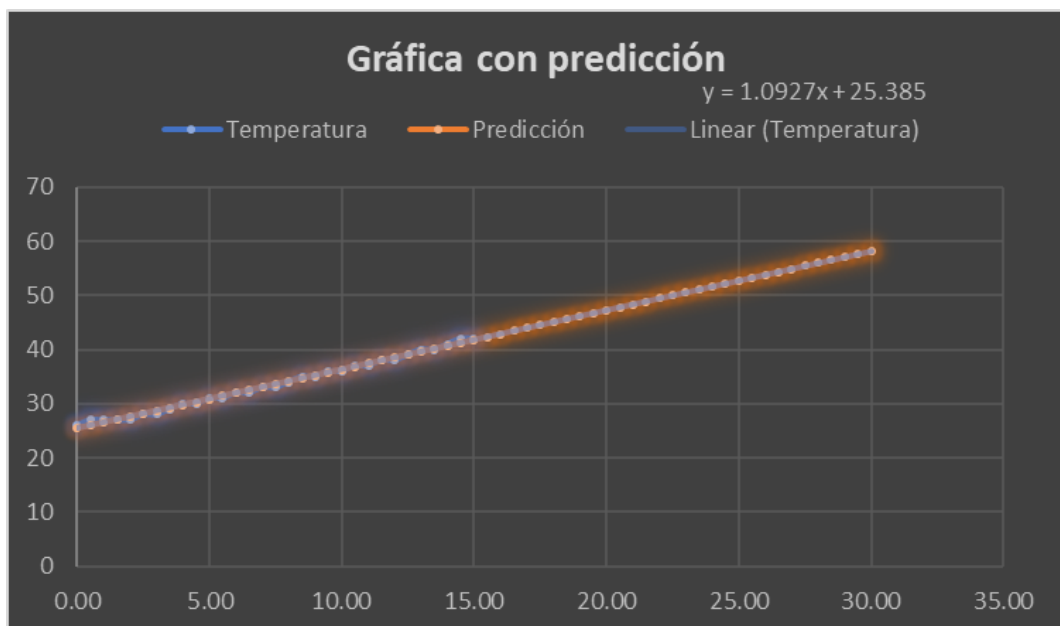


Figura 5. Gráfica que modela la ecuación de nuestro sistema

Como se puede observar en ambas gráficas, las dos muestran un comportamiento lineal, esto pasa porque el tiempo va aumentando y la temperatura también. Los datos obtenidos nos permitieron modelar mediante una ecuación nuestro sistema, para poder predecir la temperatura en diferentes momentos de tiempo. La ecuación que resultó es la siguiente:

$$y = 1.0927x + 25.385$$

Decidimos hacer una predicción de los valores hasta el minuto 30, donde la temperatura alcanzaría 58° grados centígrados.

Este experimento se vuelve lineal ya que comenzamos a temperatura ambiente, por lo tanto decidimos congelar nuestro sensor para que este comenzará en 0° C, y observar cómo se comporta todo el sistema, obteniendo los siguientes resultados.

Column1	Column2	Columnr
0	0	2.5517
0.25	2	3.326048
0.50	4	4.335382
0.75	6	5.651013
1.00	10	7.365889
1.25	14	9.601168
1.50	18	12.51477
1.75	24	16.31255
2.00	27	21.26282
2.25	28	27.71531
2.50	29	36.12589
2.75	29	47.08878
3.00	30	61.37851
3.25	30	80.00465
3.50	31	104.2832
3.75	31	135.9293
4.00	31	177.1789
4.25	32	230.9462
4.50	32	301.03
4.75	31	392.3816
5.00	32	511.4551
5.25	32	666.6631
5.50	32	868.971
5.75	33	1132.672
6.00	33	1476.397
6.25	32	1924.429
6.50	33	2508.424
6.75	33	3269.639
7.00	33	4261.855

Figura 6. Tabla de datos empezando desde una temperatura de 0° C



Figura 7. Gráfica que modela los datos obtenidos con el sensor cada 15 segundos empezando en 0°C

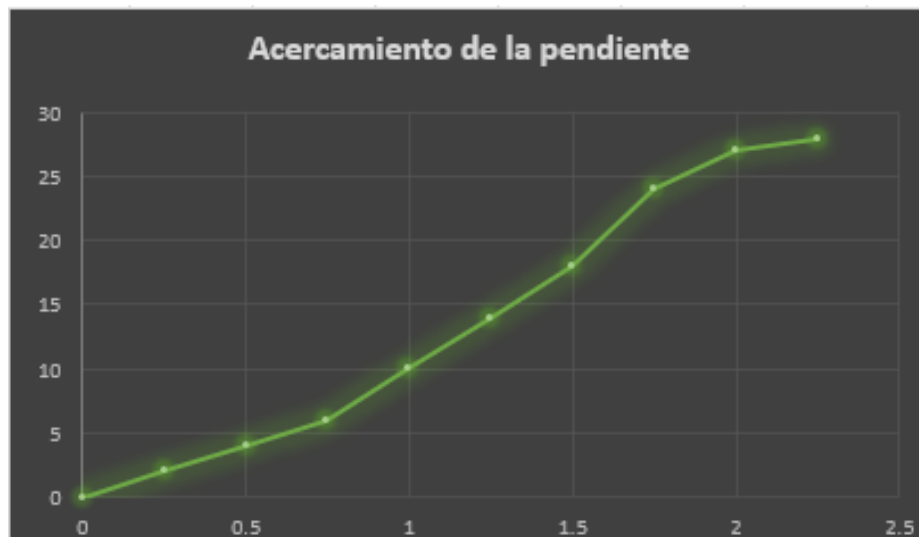


Figura 8. Gráfica que modela la pendiente obtenida por el cambio de temperatura



Figura 9. Gráfica con ecuación exponencial que modela la pendiente

Como se puede observar la tabla de datos es un poco parecida a los datos obtenidos, pero solamente durante la pendiente, ya que llega un momento donde nuestro sistema se vuelve relativamente estable pero sigue aumentando, por lo que después de llegar a temperatura ambiente se vuelve lineal, aunque para llegar ahí pasa por una pendiente muy inclinada que puede ser interpretada con una ecuación exponencial, como la que se observa en la gráfica anterior.

De acuerdo a lo que pudimos observar, es muy diferente el cambio de temperatura cuando el agua comienza en temperatura ambiente a que cuando comienza en 0°C , esto provoca que la pendiente cambie de manera constante, hasta que el sistema se estabilice. La ecuación que modela nuestro sistema hasta llegar a temperatura ambiente es la siguiente:

$$y = 2.5517e^{1.0601x}$$

Mientras que la ecuación lineal que anteriormente obtuvimos con la tabla anterior, es la que modelaría de igual manera la parte lineal de la gráfica cuando llega a temperatura ambiente.

Para obtener resultados más exactos, decidimos hacer de nuevo las mediciones y obtener los datos hasta que llegara a 90° grados, por lo que obtuvimos los siguientes resultados.

Segundos ▼	Datos ▼
15	0
30	0
45	0
60	0
75	0
90	1
105	1
120	1
135	1
150	1
165	1
180	2
195	4
210	6
225	10
240	14
255	18
270	24
285	27
300	27
315	27
330	27
345	28
360	28
375	28
390	28
405	29
420	29
435	29

Figura 10. Tabla de datos empezando desde una temperatura de 0° C hasta que se vuelve estable

En estas mediciones dejamos que nuestra resistencia calentara hasta 90° grados, para esto nuestros datos se comportaron con un pequeño delay al inicio, después de manera exponencial y finalmente en 405 segundos se estabilizó en 29°C, y aproximadamente cada minuto o minuto y medio, subía un grado.

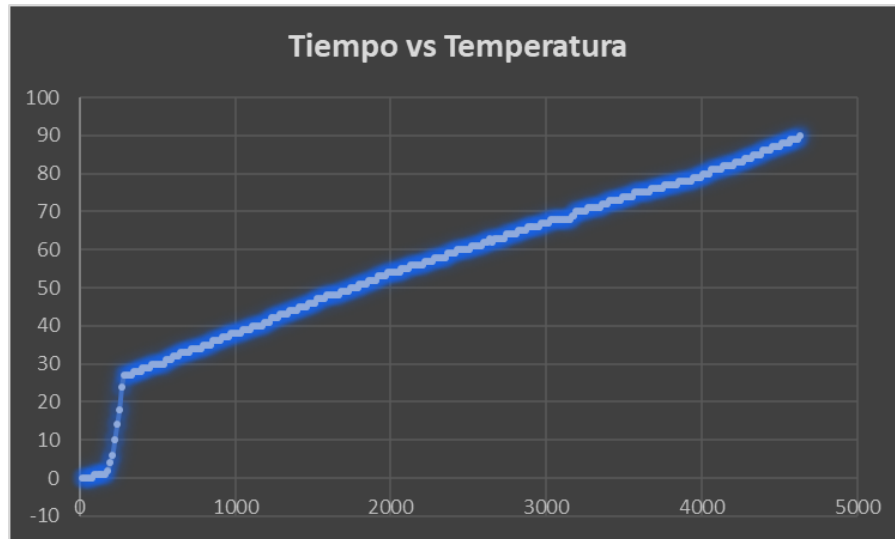


Figura 11. Gráfica que representa la temperatura obtenida contra el tiempo

La gráfica anterior nos muestra cómo se comportan nuestros datos, hasta llegar al punto máximo, cada 15 segundos registramos la temperatura. Para poder modelar nuestro sistema, decidimos seleccionar solamente los datos de 0 a 420 segundos ya que es cuando más se nota el cambio de temperatura antes de que se estabilice, por lo que la gráfica de estos datos nos quedó como se observa a continuación:

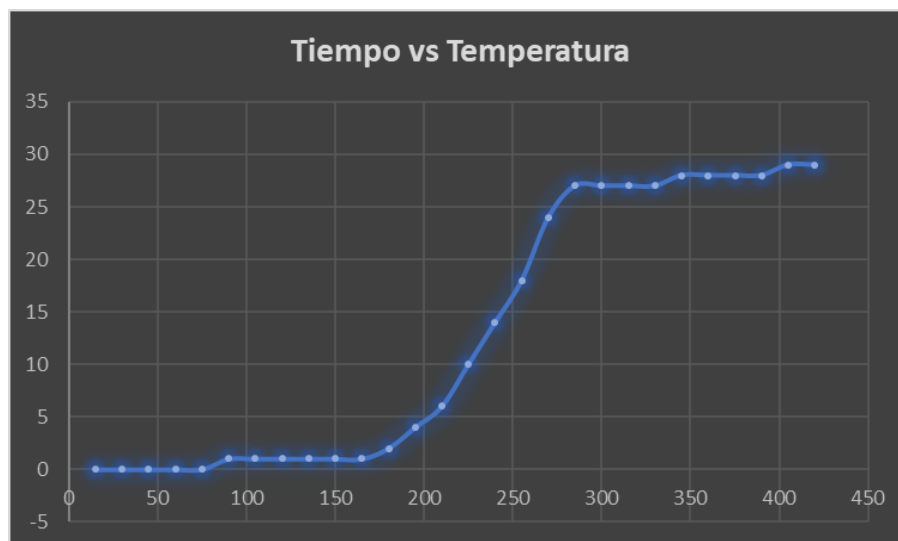


Figura 12. Gráfica que muestra la pendiente que toman los datos antes del establecimiento

En la figura anterior se percibe el retardo de nuestro sistema, y la pendiente que muestra el cambio de la temperatura, por lo que se trató de encontrar a una medida meramente estimada de nuestro delay y el tiempo en que se llega a la temperatura máxima.

Entonces se obtuvieron los siguientes valores de manera aproximada:

$$T = 570s$$

$$L = 180s$$

Por otro lado para poder sacar nuestra función de transferencia y controlador PID debemos de optar por lo siguiente:

El rango que existe entre el valor inicial en 0°C respecto a la temperatura y el valor máximo de 99 °C (Vmax) será un valor de 4 T (Tao, Tc (tiempo de calentamiento final)). Por lo que, esto nos ayudará a tener un comportamiento en nuestra ecuación de transferencia de función, además del tiempo de retraso, donde tendremos la siguiente relación matemática:

$$(V_{max}/T_c + 1) * e^r$$

Entonces respecto a nuestros valores la ecuación se denota de la siguiente manera:

-Tiempo de delay

$$L = 189.35798$$

-Tiempo en llegar a temperatura máxima (esta temperatura es ideal que llegue entre 97 a 98 °C y será determinado mediante el punto de inflexión) (tmax)=

Relación entre 4T

$$T = 353.0627$$

Para poder encontrar el valor de nuestra planta, tenemos que definir la variable de delay (L) que toma el comportamiento de la gráfica, así como el valor que hay después del tiempo de retraso hasta el punto máximo de temperatura (T). A esto se le conoce como curva en respuesta de S. Por lo que, obtendremos la respuesta de nuestro sistema de primer orden con atraso de transporte:

Donde L = 189.3578 seg de delay con el tiempo que tarda en ello es de 353.0627 seg en T. Además, nuestra temperatura máxima es de 92°C.

El valor de L y T los obtuvimos mediante un código de MATLAB que nos ayuda a adecuar una polinomio que nos permite encontrar los puntos de inflexión para poder extraer la recta más cercana a nuestra pendiente. En este caso fue un polinomio de grado 8, con 6 puntos de inflexión, graficamos todos, para encontrar cuál es el que más se acerca, y el punto de inflexión más cercano fue el 4, que tiene un valor de 243.5802177711877944. Y así tenemos la siguiente representación, que nos muestra la gráfica de excel y nuestra recta que se acercó más a nuestro punto de inflexión.

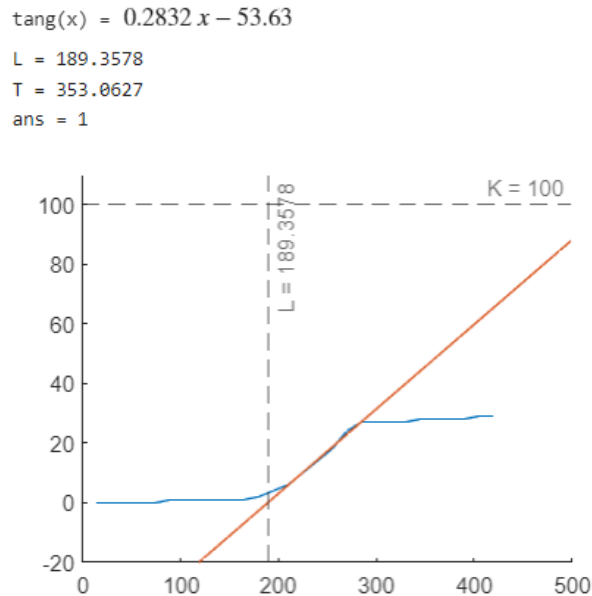


Figura 13. Representación de MATLAB de la tabla de datos excel y su punto de inflexión

Como se demuestra en la figura 13, nos damos cuenta que nuestro sistema tuvo cierto delay, después la recta naranja nos demuestra exactamente el punto de inflexión de la misma, que es donde comienza a cambiar la pendiente, y se vuelve más pronunciada. Y es así como se obtienen los valores anteriormente mencionados, proseguimos sustituyéndolos en la siguiente ecuación que modela nuestro sistema y el retardo del mismo.

$$G(s) = k * \frac{1}{Ts+1} * e^{-Ls}$$

$$G(s) = 92 * \frac{1}{353.0627s+1} * e^{-189.35798s}$$

Donde nuestra planta o función de transferencia sería la siguiente:

$$G(s)_c = \frac{100}{353.06275s+1}$$

Ahora bien, utilizaremos la teoría de sintonización mediante el método 1 visto en clase para encontrar nuestro controlador PID sintonizado mediante la siguiente función de transferencia y usando Tabla 1. Valores de sintonización de método uno:

Donde L (tiempo de retraso) = 189.3578 , T (tau, tiempo después del retraso hasta la máxima temperatura)=353.0627.

$$Gc(s) = 1.2 * \frac{T}{L} (1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls)$$

$$Gc(s) = 1.2 * \frac{353.0627}{189.3578} (1 + \frac{1}{2*(189.3578)} + 0.5(189.3578)s)$$

$$G_c(s) = 2.23743221 * (1 + \frac{1}{378.7156} + 94.6789)$$

$$G_c(s) = 0.6T \frac{(s + \frac{1}{L})^2}{s}$$

$$G_c(s) = 0.6(353.0627) * \frac{(s + \frac{1}{189.3578})^2}{s}$$

$$G_c(s) = 211.83762 * \frac{(s + \frac{1}{189.3578})^2}{s}$$

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 * (\frac{T}{L})$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 * \frac{T}{L}$	$2 * L$	$0.5 * L$

Tabla 1. Valores para sintonización, método uno.

Ahora queremos obtener los valores de nuestro PID respecto al tiempo, por lo que se sustituyen las fórmulas de la tabla anterior, y nos da el siguiente resultado:

Proporcional

$$K_p = 1.2 * \frac{T}{L}$$

$$K_p = 2.2374$$

Integral

$$Ti = 2 * L$$

$$Ti = 378.7156$$

Derivativo

$$Td = 0.5 * L$$

$$Td = 94.6789$$

Los valores calculados anteriormente son los que se usarán para configurar nuestro controlador PID, ya que están en base al tiempo.

Para complementar los cálculos de nuestro sistema, desarrollamos la siguiente fórmula en un programa en MATLAB, que nos permitió simular nuestro diagrama de bloques usando funciones como series, conv, tf y feedback, como se muestra a continuación.

$$G_c(s) = 0.6T \frac{(s + \frac{1}{L})^2}{s}$$

De esta forma solo definimos el valor de las variables que habíamos obtenido, para que se sustituyeran automáticamente al momento de correr el programa, en este caso primero hicimos la función de transferencia que ya habíamos calculado, y después se generó la segunda función de transferencia con la fórmula anteriormente mencionada, ya con esto se ocupó la función “series” que nos permite fusionar ambas, a través de una multiplicación, finalmente hicimos un feedback que nos da como resultado la retroalimentación del sistema, y graficamos un impulso para ver cómo se comporta nuestro sistema cerrado.

```
Continuous-time transfer function.
G_c =

      211.8 s^2 + 2.237 s + 0.005908
      -----
              s

Continuous-time transfer function.
sys_ol =

      2.118e04 s^2 + 223.7 s + 0.5908
      -----
      353.1 s^2 + s

Continuous-time transfer function.
sys_cl =

      2.118e04 s^2 + 223.7 s + 0.5908
      -----
      2.154e04 s^2 + 224.7 s + 0.5908
```

Figura 14. Funciones de transferencia obtenidas

Obtuvimos estos resultados, que son las funciones de transferencia calculadas, hasta llegar al último resultado que es la que se gráfica, lo que nos da como respuesta:

```
%Sistema abiertos y cerrado
num = [K];
den = [T 1]
G_p = tf(num, den)

z2 = [1 1/L];
num1 = 0.6*T*conv(z2, z2);
den1 = [1 0];
G_c = tf(num1, den1)

sys_ol = series(G_c, G_p)

sys_cl = feedback(sys_ol, 1)
step(sys_cl)|
```

Figura 15. Código que genera la gráfica

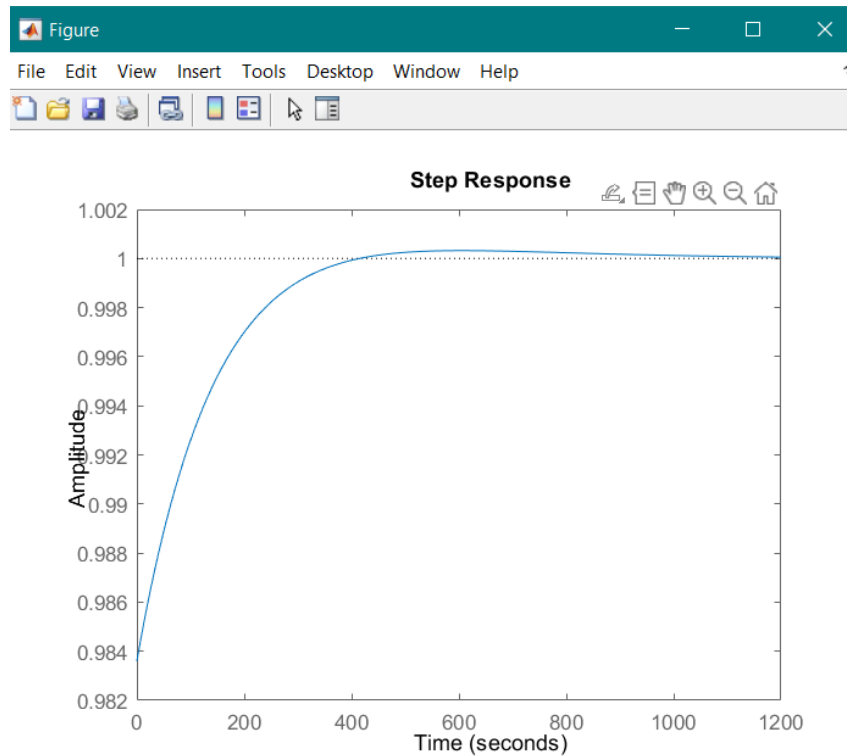


Figura 16. Representación del código y los resultados obtenidos anteriormente

Como se puede observar, ya tenemos nuestra interpretación sobre la función de transferencia con los resultados previamente conseguidos, nos da la impresión de una curva con un pequeño sobreimpulso que es casi nulo, aunque si tarda cierto tiempo en llegar a un estado de establecimiento. Por lo que decidimos usar Simulink, que es una herramienta que gracias a su función “Tune” nos permite encontrar los valores más cercanos para obtener una mejor respuesta.

Para poder realizarlo se necesitan las ganancias que nos van a permitir modificar los valores de nuestro controlador PID, entonces las calculamos a través de una de las siguientes fórmulas:

$$Kp = (1.2 * (T/L))$$

$$Ki = (1.2 * (T/L) * (1/(2 * L)))$$

$$Kd = (1.2 * (T/L) * (0.5 * L))$$

Y los resultados fueron:

$$Kp = 2.2374$$

$$Ki = 0.0059$$

$$Kd = 211.8376$$

Ya teniendo los datos para nuestro controlador, podemos ponerlos en la simulación de Simulink, pero primero hacemos el diagrama de bloques que corresponde al sistema.

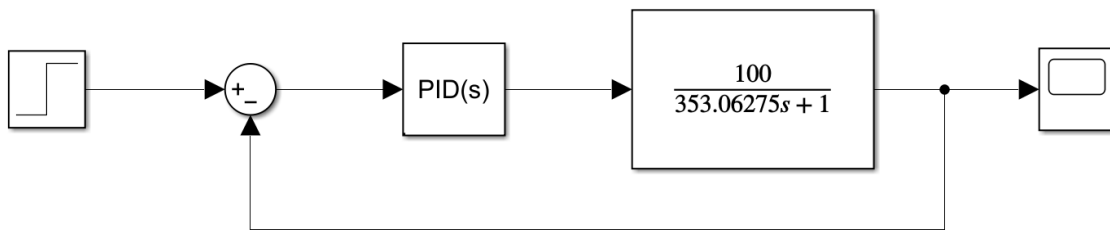


Figura 17. Diagrama de bloques del sistema

Por tanto, sustituimos los valores en nuestro controlador PID, como se muestra en la siguiente figura

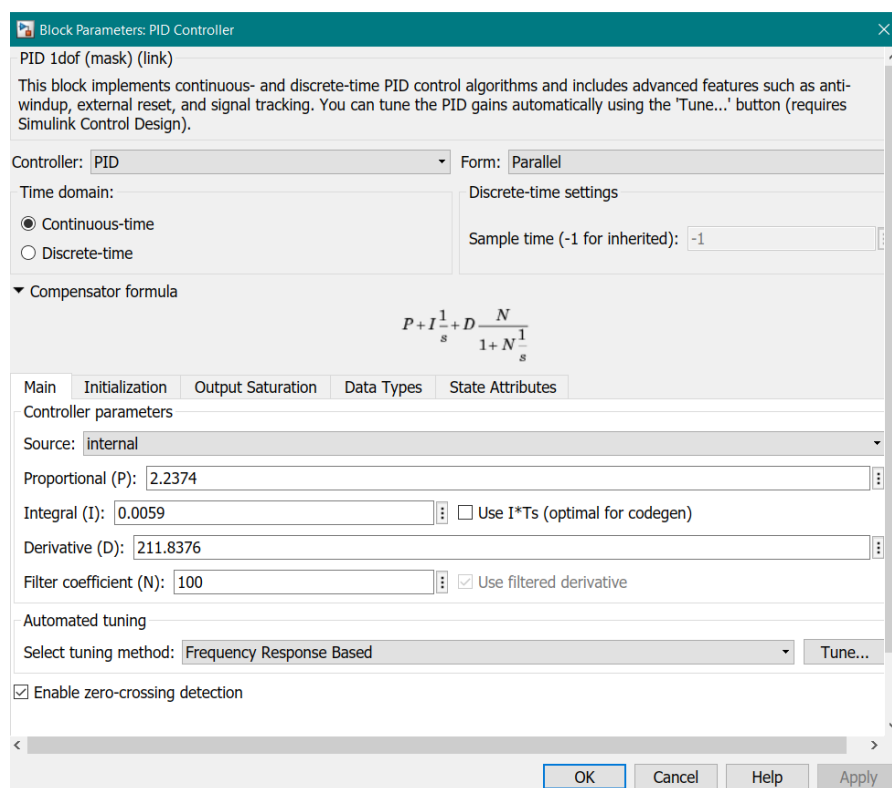


Figura 18. Parámetros del controlador

Sistema en físico



Figura 19. Vista superior del sistema



Figura 20. Vista frontal del sistema

Link de youtube

<https://www.youtube.com/watch?v=exVNPgCziEg>

Diagrama de Gantt completado



Figura 21. Diagrama de Gantt actualizado para organización de actividades semanales

Conclusión

El proceso de diseño e implementación de un sistema regulador de temperatura para un tanque de agua requiere la integración de las competencias adquiridas a lo largo de la carrera; haciendo uso de las habilidades matemáticas y de programación para implementar un sistema de lazo cerrado de la mejor manera.

Para poder lograr esto, fue indispensable llevar a cabo una investigación sobre los temas de interés para formalizar nuestra propuesta de diseño inicial, de esta manera, fortalecimos los conceptos vistos en clase con algunas fuentes confiables. Una vez comprendida la teoría detrás del sistema, fue importante conocer los componentes físicos que serían necesarios para implementar la propuesta; mismos cuyos requieren de cuidados especiales dentro del contexto en el que los estaremos utilizando. Por esto mismo, contemplamos un espacio destinado a la parte electrónica del circuito para poder prevenir un mal funcionamiento del sistema debido a que el agua pueda dañar alguno de los componentes.

Es importante conocer el funcionamiento del sistema para ajustar detalles en el controlador PID, en las conexiones, entre algunos otros, lo cual fue posible por medio del experimento realizado con el circuito. El primer experimento fue el comenzar con una cubeta con agua a temperatura ambiente para conocer en cuánto tiempo logra llegar a 58°C. Aunque nos interesaba conocer el comportamiento desde una temperatura menor, por lo que decidimos congelar el sensor para lograr que se comenzara a graficar desde una temperatura de 0°C; con los datos recopilados se pudo encontrar la ecuación que modela ambos sistemas, siendo esta lineal.

Para cerrar nos gustaría mencionar que durante el resto de la materia tendremos que pulir esta información, por lo que la investigación no se da por concluida ya que en el camino antes de entregar el trabajo final tendremos que tener un avance mucho mayor. Esperamos que el documento sirviera para aclarar dudas de nuestra propuesta inicial y que haya reflejado el conocimiento adquirido durante nuestra investigación lo cual será complementado con el conocimiento adquirido en clase. Además de mostrar el funcionamiento de nuestra implementación del circuito físico para regular la temperatura del agua de manera estable y precisa.

Referencias

- Dr. Rubén Estrada (2020) Que es un relevador o un relé. [Sitio web] recuperado de <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/que-es-un-relevador-o-rele/>
- Vaello Ramon (2014) El Relé. [Sitio web] recuperado de <https://automatismoindustrial.com/curso-carnet-instalador-baja-tension/d-automatizacion/1-2-control-de-potencia-aparamenta-electrica/el-rele/#:~:text=Un%20rel%C3%A9%20es%20un%20actuador,un%20rel%C3%A9%20los%20siguientes%20bloques.>
- SDI (2021) Relevadores. [Sitio web] Recuperado de <https://sdindustrial.com.mx/blog/relevadores/#:~:text=Los%20relevadores%20tienen%20una%20bobina,cierta%20acci%C3%B3n%20C%20como%20arrancar%20un>
- PRAGMA (2019) Control PID. [Sitio Web] Recuperado de <https://pragma-a.com/controlador-pid/>
- FACET. (2015). Función transferencia. [Sitio web]. Recuperado de https://catedras.facet.unt.edu.ar/sistemasdecontrol/wp-content/uploads/sites/101/2015/12/CL03_Funci%C3%B3n_Transferencia_Modelado_y_an%C3%A1lisis_de_sistemas_2015.pdf
- Castaño, S. (s.f). Sistemas Dinámicos de Primer Orden. [Sitio web]. Recuperado de <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/sistemas-dinamicos-de-primer-orden/>
- PRODEL. (s.f). TRANSFERENCIA DE CALOR. [Sitio web]. Recuperado de: <https://www.prodel.es/subareas/transferencia-de-calor/>
- UNR (s.f) Sistemas Térmicos. [Documento en línea] Recuperado de https://www.fceia.unr.edu.ar/dsf/files/sistemas_termicos.PDF
- Guzman, D. (2022). *Quora*. Retrieved from ¿Qué tipo de corriente eléctrica utilizamos en nuestras casas?: <https://es.quora.com/Qu%C3%A9-tipo-de-corriente-el%C3%A9ctrica-utilizamos-en-nuestras-casas>
- KhanAcademy (s.f) Capacidad Térmica. [Sitio web] Recuperado de <https://es.khanacademy.org/science/ap-chemistry-beta/x2eef969c74e0d802:thermodynamics/x2eef969c74e0d802:heat-capacity-and-calorimetry/v/heat-capacity>
- Gobierno del Estado de Sonora (s.f) Eficiencia energética ¿Que es? [Sitio web] Recuperado de <https://coees.sonora.gob.mx/eficiencia-energetica/contenido-eficiencia/eficiencia-energetica-que-es.html>

Carakenio. (2020). La función impulso unitario. [Sitio web]. Recuperado de <https://dademuch.com/2020/09/11/la-funcion-impulso-unitario/>