

CONTROL ÓPTIMO APLICADO AL PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN DE
RESIDUOS ORGÁNICOS

MARIA FERNANDA MORENO ZAMBRANO
JEIMMY KATHERIN QUIÑONES VASQUEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA
BOGOTÁ D.C.
2019

CONTROL ÓPTIMO APLICADO AL PROCESO DE DESCOMPOSICIÓN DE
RESIDUOS ORGÁNICOS

MARIA FERNANDA MORENO ZAMBRANO
JEIMMY KATHERIN QUIÑONES VASQUEZ

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
ELECTRÓNICA

JOSÉ GUILLERMO GUARNIZO MARÍN
DOCENTE TUTOR

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRONICA
BOGOTÁ D.C.

2019

Nota de aceptación:

Firma docente asesor

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 28 de Octubre del 2019

AGRADECIMIENTOS

Queremos expresar nuestra gratitud a nuestros padres quienes, con su amor, paciencia y esfuerzo nos han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en nosotras el ejemplo de esfuerzo, valentía y disciplina.

A nuestras familias, sobre todo a mi hermana Liliana Riveros por su cariño, sinónimos y apoyo incondicional, a lo largo de toda mi carrera universitaria, por estar conmigo en todo momento gracias.

De igual forma, agradecemos a nuestro director de trabajo de grado, que gracias a sus consejos, correcciones y dedicación hoy podemos culminar este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
3. JUSTIFICACIÓN	13
4. OBJETIVOS	15
4.1. Objetivo General.....	15
4.2. Objetivos Específicos	15
5. ESTADO DEL ARTE	16
6. MARCO CONCEPTUAL	20
6.1. Características de la planta	20
6.1.1. Lombrices de tierra.....	20
6.1.2. Lombricultura.....	20
6.2. Controladores.....	21
6.2.1. Controlador PID.....	21
6.2.2. ZIEGLER-NICHOLS	23
6.2.3. COHEN-COON.....	23
6.2.4. ITAE (Seguimiento Consigna)	23
6.2.5. ITAE (Rechazo de perturbaciones).....	23
6.3. Observador de estado	25
6.4. Controlabilidad.....	26
6.5. Observabilidad.....	26
6.6. Control óptimo LQR.....	26
7. DESARROLLO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO	28
7.1. Diseño de la planta.....	28
7.2. Selección de sensor y actuador	30
7.2.1. Actuador	30
7.2.2. Sensor	31
7.3. Descripción del sistema.....	32
7.3.1. Etapa de potencia.....	33
7.4. Función de transferencia	35
7.5. Diseño de controladores PID	36
7.5.1. Ziegler Nichols.....	37

7.5.2.	COHEN-COON.....	38
7.5.3.	ITAE (Seguimiento consigna)	39
7.5.4.	ITAE (Rechazo a perturbaciones).....	39
7.5.5.	Implementación	40
7.6.	Diseño control LQR	42
7.6.1.	Controlabilidad	42
7.6.2.	Observabilidad	43
7.6.3.	Observador de estado	44
7.6.4.	Función objetivo	46
7.6.5.	Implementación	47
8.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	50
8.1.	Implementación control COHEN-COON PID	50
8.2.	Respuesta del control LQR implementando.....	52
8.3.	Rechazo a perturbaciones	54
9.	IMPACTO SOCIAL	59
10.	CONCLUSIONES	60
12.	REFERENCIAS.....	63
13.	ANEXOS.....	67

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Partes planta de vermicompostaje</i>	<i>11</i>
<i>Figura 2. Planta de vermicompostaje sin sistema de control automático</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3. Planta de vermicompostaje sin sistema de control automático, Vista lateral</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4. Respuesta de salida ante una entrada escalón</i>	<i>22</i>
<i>Figura 5. Diagrama de bloques observador de estados.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 6. Planta vermicompostaje</i>	<i>28</i>
<i>Figura 7. Actuador planta vermicompostaje</i>	<i>29</i>
<i>Figura 8. Filtro de humus planta vermicompostaje</i>	<i>29</i>
<i>Figura 9. Respuesta de salida, primer actuador</i>	<i>30</i>
<i>Figura 10. Respuesta de salida, segundo actuador</i>	<i>31</i>
<i>Figura 11. Verificación precisión sensor DS18B20</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12. Sistema de control de temperatura</i>	<i>32</i>
<i>Figura 13. Diagrama de bloques etapa de potencia.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 14. Implementación practica circuito</i>	<i>33</i>
<i>Figura 15. Implementación practica circuito</i>	<i>34</i>
<i>Figura 16. Esquema del circuito del cruce por cero</i>	<i>34</i>
<i>Figura 17. Etapa de aislamiento y TRIAC</i>	<i>35</i>
<i>Figura 19. Función de transferencia, segundo actuador</i>	<i>36</i>
<i>Figura 20. Respuesta función de transferencia, segundo actuador.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 21. Control PID</i>	<i>37</i>
<i>Figura 22. Respuesta control PID método de sintonización Ziegler Nichols</i>	<i>37</i>
<i>Figura 23. Respuesta control PID método de sintonización COHEN-COON.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 24. Respuesta control PID método de sintonización ITAE(seguimiento consigna)</i>	<i>39</i>
<i>Figura 25. Respuesta control PID método de sintonización ITAE (Rechazo a perturbación)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 28. Esquemático control Lqr</i>	<i>44</i>
<i>Figura 29. Respuesta control lqr.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 30. Esquematico Observador de estados.....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 31. Respuesta observador de estados.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 32. Angulo vs Tiempo de impulso calculo potencia del LQR.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 33. Angulo vs Potencia calculo potencia LQR</i>	<i>49</i>
<i>Figura 34. Respuesta Control PID, practico</i>	<i>50</i>
<i>Figura 35. Control PID acercamiento estabilización</i>	<i>51</i>
<i>Figura 36. Energia consumida controlador PID</i>	<i>51</i>
<i>Figura 37. Control Lqr implementación.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 38. Control LQR acercamiento estabilización</i>	<i>53</i>
<i>Figura 39. Energia consumida controlador LQR</i>	<i>53</i>
<i>Figura 40. Perturbación control PID</i>	<i>55</i>
<i>Figura 41. Control LQR perturbación acercamiento estabilización</i>	<i>55</i>
<i>Figura 42. Energia consumida por perturbación a control PID</i>	<i>56</i>
<i>Figura 43. Perturbación control LQR</i>	<i>56</i>

<i>Figura 44. Control LQR perturbación acercamiento estabilización</i>	<i>57</i>
<i>Figura 45. Consumo de energía durante perturbación control LQR</i>	<i>57</i>

1. INTRODUCCIÓN

Los residuos sólidos han ocasionado impactos ambientales negativos por su disposición inadecuada y porque cada vez son más, asunto asociado al incremento de la población humana, a los procesos de transformación industrial (globalización), y a los hábitos de consumo de los individuos.

Una de las técnicas más usadas en Colombia para el aprovechamiento de los residuos sólidos orgánicos urbanos es el vermicompostaje el cuál se define como descomposición de residuos orgánicos por la lombriz californiana [1].

El vermicompostaje es una biotecnología que aprovecha las capacidades biológicas de las lombrices para el reciclaje de materiales orgánicos, sin embargo, la tecnología no se ha enfocado mucho en esta área, por ende, este proyecto pretende realizar un control óptimo que permita controlar la variable de temperatura de la planta ya que es uno de los aspectos más importantes para las lombrices porque de ella depende el ritmo de reproducción de esta.

Bajo este orden de ideas, es necesario encontrar en primera instancia el modelo matemático que describa el comportamiento del sistema. Luego, realizar la validación de este para determinar el porcentaje de aproximación que tiene respecto a la respuesta real del sistema. Posteriormente aplicar las diferentes técnicas de diseño de los controladores PID, e implementar el controlador que demuestre mejor comportamiento en simulación, seguido a esto diseñar e implementar el controlador óptimo en el sistema.

Finalmente, se debe analizar los resultados de la implementación de los controladores, realizando la comparación de las respuestas de los diferentes lazos de control y determinando cuál de los dos es el que presenta un menor gasto de energía y un comportamiento óptimo para el sistema.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los residuos sólidos orgánicos en Colombia constituyen cerca del 70% del volumen total de desechos generados [2], los cuáles, han ocasionado impactos ambientales negativos debido al aumento y dificultad que se presenta en su proceso de descomposición; asunto asociado al crecimiento de la población y a la falta de pedagogía acerca del manejo adecuado de dichos residuos, lo cual conlleva a una degradación del medio ambiente [1], [3].

Esta situación ha originado que en la actualidad se trabaje en la implementación de la GIRS -Gestión Integral de Residuos Sólidos -, la cual hace parte de un conjunto de procesos encargados de la descomposición de las basuras, para dar a los residuos producidos el destino más adecuado desde el punto de vista ambiental [4].

Además, se han buscado usos alternativos que beneficien al entorno y el proceso de reciclaje para la transformación de los residuos sólidos orgánicos nuevamente en materia prima, entre ellos se encuentra, el vermicompost, el cuál es una técnica que consiste en la descomposición de los residuos orgánicos a partir de la actividad que realizan ciertas especies de lombrices [5] y que finaliza con la generación de compost, el cuál proporciona nutrientes esenciales al suelo de las plantas [6].

Cabe resaltar que el compost depende directamente de las condiciones climáticas a las que se encuentren dichas lombrices, ya que si la temperatura, humedad y PH son adecuadas las lombrices tendrán más cantidad de crías.

Por consiguiente, la mayoría de las plantas de vermicompost son controladas por descarte del clima y por operadores quienes revisan la planta cada cierto tiempo, de no ser así, la planta puede presentar una elevación de temperatura y sumado a esto si el operario no la revisa, pueden ocasionarse daños a las lombrices.

Para entender un poco más al respecto, es importante conocer el funcionamiento de este tipo de plantas; las plantas de vermicompostaje inician su funcionamiento a partir del proceso alimenticio de las lombrices basado en los residuos orgánicos; estas lombrices generan un humus que es utilizado como abono para las plantas.

En la Figura 1, se puede observar una planta de vermicompostaje con sus componentes y algunos de los posibles sensores y actuadores que son utilizados en proyectos de investigación del grupo INAM-USTA de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomas, para la regulación de la temperatura en este tipo de plantas. Aunque se presentan dichos sensores y actuadores, se consideran tentativos y estarán sujetos a verificar si cumplen los requerimientos solicitados para el diseño del sistema de control:

- Sensor DHT11, el cuál proporciona los valores de temperatura y humedad
- El ventilador, este suele ser usado para disminuir la temperatura del interior de la planta.

- Una resistencia, para calentar el agua en la que se encuentra sumergida la planta y así aumentar la temperatura al interior de esta

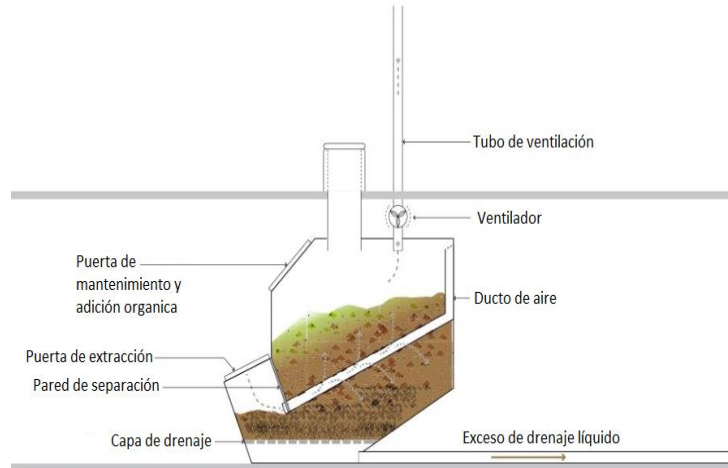


Figura 1. Partes planta de vermicompostaje

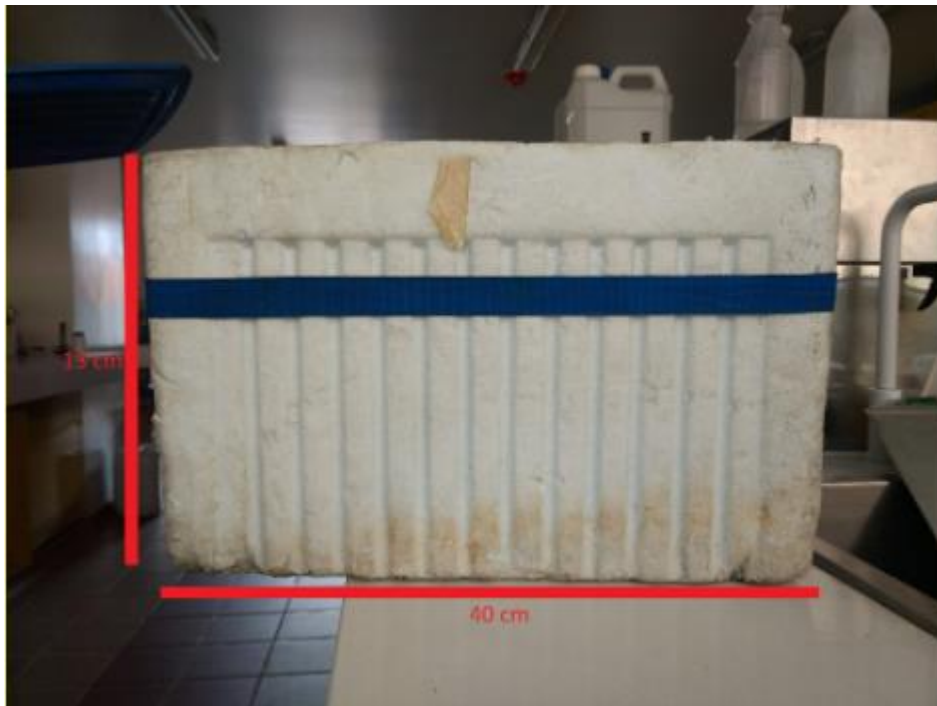
Fuente: [7]

En las Figuras 2 y 3 se presenta la planta de vermicompostaje utilizada. Es de tener en cuenta que esta planta actualmente no presenta ninguna clase de sistema de control automático.



Figura 2. Planta de vermicompostaje sin sistema de control automático

Fuente: Autores



*Figura 3. Planta de vermicompostaje sin sistema de control automático,
Vista lateral
Fuente: Autores*

Un ejemplo de monitoreo que se realiza a este tipo de plantas fue presentado en un trabajo de grado de la Facultad de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomas titulado “Evaluación De La Eficiencia De La Lombriz Roja Californiana *E. foetida* Para Estabilización De Lodos Residuales De La PTAR Salitre” en el que se realizaron 6 montajes de vermicompost, agregando diferentes componentes orgánicos en cada uno, para después comparar su proceso de vermiestabilización. Una de las recomendaciones de dicho trabajo fue: “*La temperatura y la humedad son variables que se comportan de manera independiente, y que son susceptibles a los cambios del medio por lo tanto es fundamental generar las condiciones necesarias para mantenerlas controladas. Por este motivo se recomendó agregar la sistematización al proceso*” [7].

Teniendo en cuenta la problemática anterior y gracias al desarrollo de dispositivos electrónicos programables, se plantea la posibilidad del desarrollo de un control de temperatura a una planta de vermicompost, además contribuyendo con esto con la protección al medio ambiente. Cabe en este ámbito proponer y preguntar: ¿Es viable el diseño y la implementación de un control óptimo de temperatura con el fin de regular dicha variable en una planta de vermicompost, buscando mejorar índices de desempeño de la variable controlada tales como tiempo de establecimiento, errores de estado estacionario o consumo energético de los actuadores durante el estado transitorio de la señal controlada?

3. JUSTIFICACIÓN

Los residuos orgánicos han sido algo inherente a la agricultura desde sus inicios, a causa de esto es de mucha importancia conocer y realizar el manejo adecuado de los mismos, puesto que dicho proceso conlleva bastantes ventajas como la generación de abono, lo cual hace que muchos agricultores prefieran utilizar compost como fuente de nutrientes para sus cultivos en vez de hacer uso de fertilizantes artificiales, debido a que trae muchos beneficios para el suelo. Dicha importancia se basa en que el suelo cumple una función clave como hábitat de microorganismos, manejo del agua, transformador de desechos naturales, almacén y fuente de nutrientes cuando la planta los necesita. El productor orgánico cuida el suelo de su finca no solo porque constituye una fuente de nutrientes para los cultivos, sino por su capacidad para controlar potenciales enfermedades [8].

Sin embargo, la desinformación acerca del manejo adecuado de residuos orgánicos implica la aparición de diversas consecuencias negativas, tales como: enfermedades, contaminación, etc. En vista de la gravedad y la cantidad de problemáticas que genera, nace la necesidad de facilitar el proceso de descomposición de los residuos orgánicos, haciendo que dicho proceso sea más asequible, dado que actualmente el proceso de generación de abono trae consigo un grado de complejidad considerable para el agricultor común; ya que las variables más importantes que afectan a los sistemas de compostaje pueden ser clasificados en dos tipos: parámetro de seguimiento (aquellos que han de ser medidos, seguidos durante todo el proceso y adecuados, en caso de ser necesario, para que sus valores se encuentren en los intervalos considerados correctos para cada fase del proceso) y parámetros relativos a la naturaleza del sustrato (aquellos que han de ser medidos y adecuados a su valores correctos fundamentalmente al inicio del proceso). Entre los parámetros de seguimiento se encuentran: temperatura, humedad, pH, aireación y espacio de aire libre. Entre los relativos a la naturaleza del sustrato: tamaño de partícula, relaciones C/N, C/P y nutrientes [9].

Así pues, una de las variables más importantes para el proceso de descomposición de los residuos orgánicos es la temperatura puesto que afecta a la tasa metabólica de la población de lombrices, así como los patrones de distribución y actividad de las mismas, condicionando la tasa de crecimiento y reproducción de la población de lombrices durante el vermicompostaje. Por lo tanto, si se desea conseguir una adecuada degradación de residuos en el menor tiempo posible, su temperatura durante el proceso de vermicompostaje debe mantenerse dentro de los rangos tolerables por las lombrices, tratando que sea lo más cercana a la óptima para su desarrollo [10].

Gracias a este factor se plantea la necesidad de diseñar un controlador óptimo aplicado a la variable de temperatura, dicho control garantizará que el proceso de descomposición se encuentre en un estado adecuado, y además busca minimizar el consumo de energía de los actuadores en especial durante el estado transitorio

de la señal controlada. A partir de esto, se busca implementar un control óptimo de temperatura, con el fin de facilitar el proceso de generación de abono a partir de residuos orgánicos y así lograr que dicho proceso sea más eficiente desde el punto de vista de tasa de crecimiento de las lombrices, por lo anterior se daría la degradación de los residuos en un menor tiempo.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un sistema de control óptimo de temperatura aplicado a un reactor para vermicompostaje, buscando mantener las condiciones de temperatura deseadas minimizando la energía consumida por los actuadores durante el estado transitorio de la variable controlada.

4.2. Objetivos Específicos

1. Obtener un modelo de la variable de temperatura del reactor.
2. Definir una función objetivo a cumplir por un control tanto para la variable de la temperatura como para el consumo de energía de los actuadores.
3. Diseñar un sistema de control óptimo de temperatura que garantice una temperatura adecuada para el correcto trabajo de los organismos encargados de elaborar el abono, independiente a las variaciones térmicas ambientales externas de la planta.
4. Seleccionar e Implementar los sensores y actuadores adecuados para la planta.
5. Implementar el control óptimo de temperatura al reactor de compostaje.
6. Evaluar el comportamiento del sistema a partir de comparaciones con una técnica de control clásica como el PID, en términos de tiempo de establecimiento, error de estado estacionario y consumo energético en el transitorio.

5. ESTADO DEL ARTE

La teoría de control óptimo, ha sido estudiada con el transcurrir del tiempo por varios investigadores los cuáles definen que un control es óptimo cuando permite maximizar o minimizar una función objetivo (índice de comportamiento) sujeta a restricciones o condiciones dadas, es decir consiste o tiene por objetivo, el solucionar problemas de optimización de sistemas que evolucionan en el tiempo y que son susceptibles a fuerzas externas, estableciendo una trayectoria óptima, es decir, la trayectoria que maximiza o minimiza el objetivo planteado, teniendo en cuenta la relación entre la señal de estado y la señal de control [11].

Los controles óptimos son implementados a distintos procesos como lo son: invernaderos, convertidores eléctricos, motores. A continuación, se mostrarán y explicarán a groso modo algunas de estas aplicaciones.

La Universidad Nacional del Callao, realizó un trabajo de investigación que trata sobre el diseño de estrategias de Control Óptimo y Adaptivo para el control de temperatura de un reactor químico a escala. Las estrategias de control que se han utilizado para fines de comparación son Control Óptimo Cuadrático y Control Adaptivo Autosintonizado, que permiten controlar la temperatura del reactor. Por lo anterior, se propone utilizar las técnicas de control Óptimo cuadrático y autosintonizado como formas eficientes de controlar temperatura [12].

El trabajo [13] tiene como propósito aplicar la teoría del control óptimo para mejorar el desempeño y la calidad del cultivo, controlando la temperatura y optimizando el consumo de combustible, logrando así un incremento en el margen de ganancias del productor.

En [14] se describe un sistema preciso de control de temperatura, basado en un algoritmo optimizado proporcional - integrativo - derivado -PID-. La solución propuesta también incluye un módulo de autoajuste que detecta los cambios de carga y ajusta los parámetros del algoritmo para un control óptimo de la temperatura.

La teoría de control óptimo se aplica al sistema integrado de cultivo, que se basa en cuatro variables de estado: el consumo de nutrientes, el crecimiento de las hojas y las frutas y la concentración de dióxido de carbono. Este documento [15] también contribuye al control PI de ajuste óptimo como regulador lineal cuadrático aplicado a la variable de dióxido de carbono.

En [16] se desarrolla una solución para el control del clima de invernaderos empleando una comparación entre dos controladores, el PID difuso y el PID clásico. Sabiendo que el modelo de invernadero tiene un fuerte acoplamiento, se utiliza un método de realineación y desacoplamiento de retroalimentación que emplea

perturbaciones medidas. Los resultados sugieren que el control PID difuso es un control que tiene un funcionamiento efectivo al controlar diferentes variables.

En [17] se diseña un módulo de control de temperatura óptimo, un generador de micro niebla de alta presión y un evaporador para regular la temperatura y la humedad de salida, que son las dificultades del control de la boquilla sónica. En el anterior artículo se controlan las variables de temperatura y humedad en ciertos rangos aplicando un módulo de control óptimo el cuál es preciso y estable.

En [18] se presenta el modelamiento diseño y resultados experimentales de un controlador clásico aplicado a la topología de convertidores en este caso a un reductor-elevador. En el documento anterior desarrollan un control óptimo el cuál aplican a la topología de convertidores descrita.

En este artículo [19], se presenta el diseño del control óptimo para el arranque en tiempo mínimo de un motor de inducción. Se presenta la determinación de la ley de control basada en la técnica del vector unitario y los parámetros que se obtienen por medio de optimización basada en algoritmos genéticos. Los autores diseñan un control óptimo para un sistema no lineal, basados en algoritmos genéticos los cuáles son pruebas aleatorias, que permiten encontrar de manera más rápida un intervalo en donde se obtiene la optimización del sistema.

En este trabajo [20] se estudia el efecto del modelado de un sistema en el diseño del controlador y la importancia de diferentes señales de retroalimentación. Se diseñan controladores de salida utilizando parámetros medibles y se analizan diferentes señales de retroalimentación para la mejor sustitución de los no medibles. En este trabajo aplicaron un control óptimo lineal, diseñando controladores correspondientes como una función de los estados del sistema o como una función de las salidas medibles del mismo.

Hasta este punto se han presentado distintos trabajos en los que se utilizan controladores óptimos en diferentes clases de sistemas, incluyendo controles de temperatura para entornos medioambientales y reactores químicos [11-17].

Este trabajo [21] se realizó el diseño, construcción y validación experimental de un prototipo de compostador. El prototipo realiza el compostaje de los residuos sólidos orgánicos de manera automática, el control del prototipo se realiza con un microcontrolador, teniendo las siguientes funciones; monitoreo y control de temperatura, aireado frecuente de residuos, mezcla del material y control del desplazamiento del material sobre las bandas. Los resultados de las pruebas arrojaron una composta de color pardo oscuro, sin malos olores, con temperaturas al final del proceso cercanas a la ambiental; todas estas características propias de una composta biológicamente estable.

En [22] se desarrolló un control de temperatura y humedad para acelerar el proceso de producción de una composta orgánica, el monitoreo de este proyecto se realizó utilizando la herramienta de LabVIEW, luego se diseñó un control PID y al finalizar se desarrolló un estudio económico lo cual demostró que el proyecto es una alternativa a considerar a escala mayor ya que el beneficio económico resulta altamente justificado.

En este trabajo [23] realizaron un estudio de campo a hábitats de lombrices en la universidad de Cencas Agrícolas (EE.UU.), Gandhi Krishi Vigyan Kendra (G.K.V.K), Bangalore. En la cual fue monitoreada la temperatura usando los sensores y actuadores Sun Spot los cuáles mostraron un buen desempeño y precisión de la variable monitoreada.

En el trabajo [7] de la Facultas de Ingeniería Ambiental de la Universidad Santo Tomás se realizó un montaje experimental a escala de laboratorio, se propusieron 6 tratamientos, variando el porcentaje de biosólidos y un sustrato como el estiércol en cada uno de los lechos para comparar su proceso de vermiestabilización y así mismo sus diferencias en las características finales. Se concluyó que, sin importar la composición de los lechos, la estabilización es efectiva cuando se mantienen los rangos óptimos de temperatura, pH y humedad para que la lombriz se desarrolle y produzca humus.

En este trabajo de grado realizaron el modelamiento de un invernadero a escala, para el cuál diseñaron controladores de tipo PID, LQR y borroso, para las variables de temperatura y humedad con el fin de compararlos y así concluir con cuál se obtiene mejores resultados [24].

En [25] se diseñó un sistema de control PID para generar y mantener condiciones de temperatura y humedad relativa para un ambiente cerrado en el proceso de germinación de productos agrícolas.

En [26] a través del método de identificación de parámetros por mínimos cuadrados diseñaron e implementaron un sistema de control adaptativo para una planta de temperatura, este fue comparado con un control self tuning e ITAE. Concluyendo que el control ITAE responde mejor a pesar de los cambios que afectan la planta.

En [27] se hizo el modelamiento de un horno eléctrico teniendo en cuenta los efectos no lineales que presentaba, definiendo así las regiones de atracción de los puntos de equilibrio de la planta. A dicha planta implementaron un control PID continuo, discreto y de realimentación de estados en tiempo continuo y discreto para el horno con ayuda del software LabVIEW.

En la Pontificia Universidad Javeriana disponen de un biorreactor destinado a la producción de proteínas humanas el cuál funciona con un lazo de control en cascada; para optimizar el crecimiento microbiano en el biorreactor se identificó que

controlar la variable de temperatura es de vital importancia para lo cual realizaron un control digital de tipo PI [28].

En [29] se realizó un control de temperatura y pH en un reactor por lotes con alimentación diseñado para la producción de penicilina, haciendo una comparación entre un control regulatorio y un modelo de control predictivo no lineal. Validando las diferentes respuestas del sistema se pudo observar que el control predictivo genero mejores resultados.

Se puede concluir respecto a los anteriores trabajos que el control de la variable de temperatura adquiere importancia por la dependencia que se genera en el desarrollo de las lombrices de la planta de vermicompostaje. Por otro lado se encontró que la forma más común para el control de esta variable es el controlador PID, no obstante se busca la posibilidad de explorar otro tipo de controladores tales como el control óptimo; por lo tanto, se procedió a realizar el diseño de un controlador óptimo con la intención de implementar un control a la variable de temperatura, optimizando el gasto energético de los actuadores en el estado transitorio de la variable controlada y con ello compensando el costo asociado al control.

6. MARCO CONCEPTUAL

6.1. Características de la planta

6.1.1. Lombrices de tierra

Las lombrices son consideradas ingenieras del ecosistema, ya que intervienen en la aireación del suelo, y proporcionan materia orgánica disponible para otros organismos del suelo. Se estima que hay en el planeta más de 8500 especies de lombrices, entre las cuáles la más conocida es la lombriz de tierra; sin embargo, para el manejo de desechos orgánicos se utilizan lombrices especiales, que reúnan ciertos requisitos tales como alta voracidad, alta capacidad reproductiva, fáciles de trabajar y con capacidad para adaptarse a condiciones adversas. Las especies más utilizadas en la Lombricultura y que reúnen los requisitos anteriormente citados son (coqueta roja) y (lombriz roja de California), especies utilizadas en el 80% de los criaderos a nivel mundial [30].

6.1.2. Lombricultura

Lombricultura es el proceso por el cuál la lombriz se utiliza para convertir materiales orgánicos (por lo general desechos) en un material parecido al humus conocido como vermicompost. El objetivo es procesar el material tan rápida y eficientemente como sea posible [7].

Por siglos, las lombrices han procesado toneladas de material, que posteriormente es revertido a la tierra a través de deyecciones. Estos organismos son sinónimo de tierra vegetal, productividad, fertilidad, mejoramiento y remediación. Han sido empleadas con éxito en el tratamiento de residuos de alimentos, destilería, industria de papel, estiércol de animales, entre otros [37]. En el proceso de vermicompostaje, desempeñan un rol fundamental para la fragmentación y acondicionamiento del sustrato, que incrementa la superficie para la actividad microbiológica y, por ende, genera mayor descomposición; las lombrices “muelen” la materia orgánica, alterando sus propiedades físicas, químicas y microbiológicas y homogenizando el material [31].

➤ Factores para considerar en el manejo de lombrices:

- Temperatura

La temperatura ideal para el buen desarrollo de la lombriz es de 25°C; en condiciones controladas, esta es fácil de mantener, sin embargo,

cuando se trabaja al aire libre se debe tener un buen control, alcanzarla y mantenerla. La lombriz roja Californiana vive normalmente en zonas de clima templado, su temperatura corporal oscila entre 19°C y 25°C [30].

- Humedad

La lombriz necesita de mucha humedad, ésta es requerida para que pueda moverse dentro de los desechos y facilitar la fragmentación de los mismos, así como para su respiración. La humedad recomendada es del orden de 75 a 80%. La lombriz Roja vive normalmente en humedades del 82% [30].

- Luz

La especie *Eisenia Foetida*, es fotofóbica, los rayos ultravioletas las puede matar en segundos. Por otro lado, el contacto directo del sol aumenta la temperatura del medio, alcanzando temperaturas mortales para la lombriz [30].

- Aireación

La aireación es indispensable para el correcto funcionamiento y desarrollo de la lombriz, si no se controla esta variable el consumo de alimento y la reproducción se reduce [30].

6.2. Controladores

6.2.1. Controlador PID

Es interesante señalar que más de la mitad de los controladores industriales que se usan hoy en día utilizan esquemas de control PID o PID modificado. Los controladores PID analógicos, son principalmente de tipo hidráulico, neumático, electrónico, eléctrico o sus combinaciones. En la actualidad, muchos de estos se transforman en formas digitales mediante el uso de microprocesadores. Se puede indicar que un controlador PID responde a la siguiente ecuación:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1)$$

donde $e(t)$ es el error de la señal y $u(t)$ es la entrada de control del proceso. K_p es la ganancia proporcional, T_i es la constante de tiempo integral y T_d es la constante de tiempo derivativa [32]. De tal manera que la señal del actuador se puede obtener de la siguiente forma:

$$U(S) = KP \left(1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) E(S) \quad (2)$$

En lazo abierto, muchos procesos pueden definirse según la siguiente función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{1 + \gamma_0 s} \quad (3)$$

Donde los coeficientes k_0 , τ_0 y γ_0 se obtienen de la respuesta del sistema en lazo abierto a una entrada escalón. Se parte del sistema estabilizado en $y(t) = y_0$ para $u(t) = u_0$. Se aplica una entrada escalón de u_0 a u_1 (el salto debe estar entre un 10% y un 20% del valor nominal) y se registra la respuesta de la salida hasta que se estabilice en el nuevo punto de operación [32].

Los parámetros se pueden obtener de la respuesta mostrada en la Figura 4 donde y_1 representa el impulso máximo donde se estabiliza, y_0 es el valor inicial en el que empieza la planta:

$$\tau_0 = t_1 - t_0$$

$$\gamma_0 = t_2 - t_1 \quad (4)$$

$$k_0 = \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0}$$

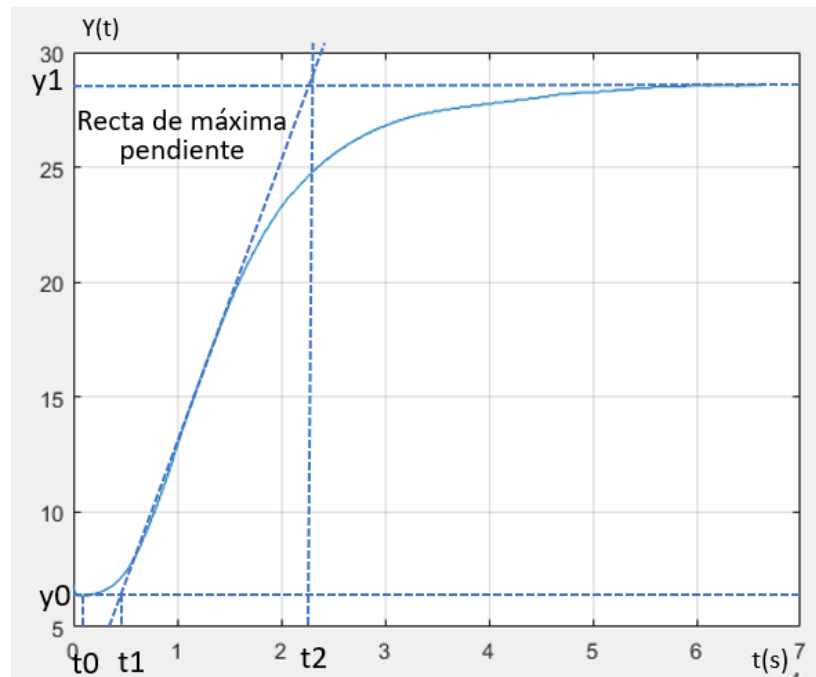


Figura 4. Respuesta de salida ante una entrada escalón

6.2.2. ZIEGLER-NICHOLS

Según Ziegler-Nichols, la relación de estos coeficientes con los parámetros del controlador son [32]:

$$K_p = 1.2 \frac{\gamma_0}{k_0 \tau_0} \quad T_i = 2\tau_0 \quad T_d = 0.5\tau_0 \quad (5)$$

6.2.3. COHEN-COON

Los parámetros del PID vienen dados por [32] :

$$K_p = \frac{1}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right) \right)$$
$$T_i = \tau_0 * \left(\frac{32 + 6(\tau_0/\gamma_0)}{13 + 8(\tau_0/\gamma_0)} \right) \quad T_d = \tau_0 * \left(\frac{4}{11 + 2(\tau_0/\gamma_0)} \right) \quad (6)$$

6.2.4. ITAE (Seguimiento Consigna)

Los parámetros del PID vienen dados por [32]:

$$K_p = \frac{0.965}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.855} \quad T_i = \frac{\gamma_0}{0.796 - 0.147 \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right)}$$
$$T_d = 0.308 \gamma_0 \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right)^{0.929} \quad (7)$$

6.2.5. ITAE (Rechazo de perturbaciones)

Los parámetros del PID vienen dados por [32]:

$$K_p = \frac{1.357}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.947} \quad T_i = \frac{\gamma_0}{0.842} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.738} \quad T_d = 0.381 \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.955} \quad (8)$$

6.2.6. Discretización del PID

1. Control proporcional: Este tipo de controlador genera una salida que es proporcional al error actuante. La ecuación de un controlador proporcional continuo está dada por:

$$m(t) = k_p e(t) \quad (9)$$

La forma discreta de la ecuación 9 es:

$$m(kT) = k_p e(kT) \quad (10)$$

Donde:

$$e(kT) = r(kT) - y(kT) \quad (11)$$

Además, $e(k)$ se define como el error de seguimiento, $y(k)$ la salida del sistema controlado y $r(k)$ la referencia [33].

2. Control integral: Existen diversos métodos para aproximar el integral entre dos periodos de muestreo. El método bilineal, trapezoidal o de Tustin define la integral entre dos periodos de muestreo como el trapecio que forman el valor actual de la función y el anterior.

Matemáticamente se puede expresar como:

$$\int_{kT}^{kt} u(\tau) d\tau = T \frac{u(kT) + u(kT - T)}{2} \quad (12)$$

De esta forma, la función integral se puede completar como [33]:

$$y(kT) = y(kT - T) + T \frac{u(kT) + u(kT - T)}{2} \quad (13)$$

3. Control Derivativo: Al igual que en el caso integral. La derivada de una función se puede aproximar por diferentes métodos. El método de diferencia hacia atrás define la derivada como el último cambio de la función dividido entre el tiempo que ha transcurrido. En términos de ecuaciones en diferencia, donde $d(kT)$ es la derivada de $u(kT)$ [33]:

$$d(kT) = \frac{u(kT) - u(kT - T)}{T} \quad (14)$$

4. Control PID digital: A partir de la combinación de cada una de las aproximaciones discretas anteriores, es posible obtener una señal de control de la siguiente manera [33]:

$$u(k) = k_p e(k) + k_i u_i(k) - k_d \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (15)$$

6.3. Observador de estado

En el método de asignación de polos para el diseño de sistemas de control, se supuso que todas las variables de estado estaban disponibles para su realimentación. Sin embargo, en la práctica no todas las variables de estado están accesibles para poder realimentarse. Entonces, se necesita estimar las variables de estado que no están disponibles. La estimación de variables de estado no medibles se denomina normalmente observación de un dispositivo (o un programa de computadora) que estima u observa las variables de estado se llama un observador de estado, o, simplemente, un observador su diagrama se puede observar en la Figura 5. Si el observador de estado capta todas las variables de estado del sistema, sin importar si algunas están disponibles por medición directa, se denomina observados de estado de orden completo [34].

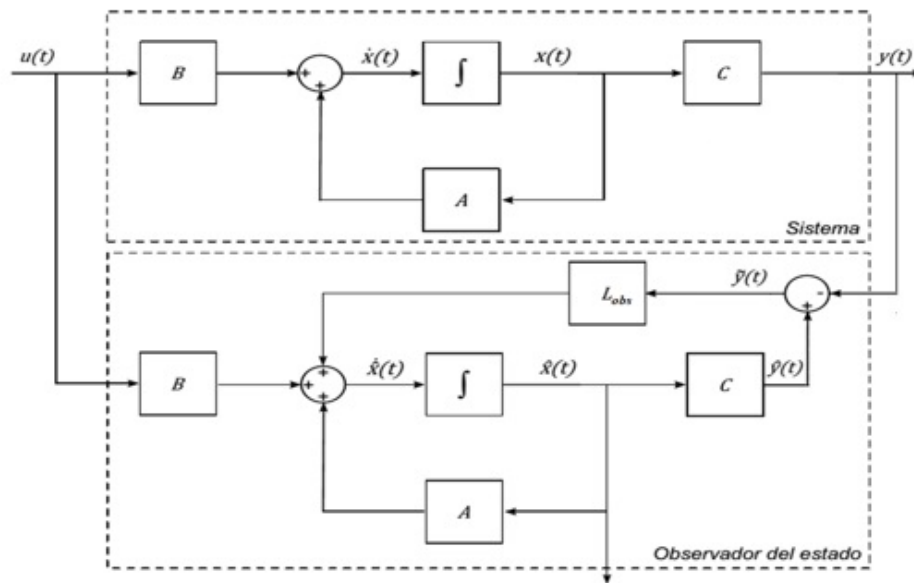


Figura 5. Diagrama de bloques observador de estados.

Fuente: [37]

6.4. Controlabilidad

Se dice que un sistema es completamente controlable, si existe una señal de control $u(kT)$, no restringida, definida a lo largo de un número finito de periodos de muestreo de manera que, partiendo de cualquier estado inicial, el estado $x(kT)$ pueda ser transferido al estado deseado x_f en n periodos de muestreo como máximo [33].

Entonces el sistema descrito es contable si:

$$Rango[B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{n-1}B] = n \quad (16)$$

6.5. Observabilidad

Se dice que un sistema es completamente observable si cualquier estado inicial $x(0)$ puede determinarse a partir de la observación de $y(k)$ en n periodos de muestreo como máximo. La condición suficiente y necesaria para que un sistema sea completamente observable es [33].

$$Rango[C' \ A'C' \ A^2C' \ \dots \ (A')^{n-1}C'] = n \quad (17)$$

6.6. Control óptimo LQR

El control LQR (por sus siglas en ingles Linear Quadratic Regulator), es un método de control óptimo con el cuál se asegura la estabilidad de un sistema en lazo cerrado a través de ganancias de realimentación. Este método busca minimizar una función de costo, la cuál, se puede definir como la sumatoria de desviaciones de los valores reales medidos a los deseados; de esta manera, lo que se pretende es encontrar aquellas ganancias del controlador que minimiza las desviaciones no deseadas [34] .

Teniendo en cuenta lo anterior, dado el sistema dinámico:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (18)$$

En donde

x = vector de estado para la planta (vector de dimensión n)

u = señal de control (escalar)

y = señal de salida (escalar)

A = matriz de coeficientes constantes de $n \times n$

B = matriz de coeficientes constantes de $n \times 1$

C = matriz de coeficientes constantes de 1 X n
X= vector de estado

Determina la matriz K del vector de control óptimo.

$$u(t) = -Kx(t) \quad (19)$$

El criterio cuadrático a ser minimizado es el mostrado en la ecuación 20.

$$J = \int_0^{\infty} (x * Qx + u * Ru)dt \quad (20)$$

Donde Q es una matriz hermética definida positiva (o semidefinida positiva) o simétrica real y R es una matriz hermética definida positiva o simétrica real. Las matrices Q y R determinan la importancia relativa del error y del coste de esta energía [34].

Donde Q y R tomaran valores de:

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = [1] \quad (21)$$

La ganancia K se determina por la primera solución de la ecuación algebraica de Riccati mostrada en la ecuación (22).

$$A * P + PA - PBR^{-1}B * P + Q = 0 \quad (22)$$

En donde P es una matriz definida positiva.
Entonces j se calcula como se muestra en la ecuación 23.

$$u(t) = -Kx(t) = -R^{-1}B * Px(t) \quad (23)$$

7. DESARROLLO Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO

7.1. Diseño de la planta

Como se observa en la Figura 6, la planta está conformada por un lombricultivo, siendo este el hábitat de las lombrices y a su vez el espacio para suministrarles alimentación; contiene un sensor de temperatura (Ds18b20) el cuál como su nombre lo indica será el encargado de sensar la temperatura dentro de este hábitat. Cuenta además con unos agujeros en los lados para permitir el ingreso de aire a las lombrices (Figura 7).



Figura 6. Planta vermicompostaje

Fuente: Autores

La planta contiene también un actuador (Figura 7) que está conformado por tres resistencias de calor conectadas en serie, su función es calentar el agua y por la técnica del baño maría elevar la temperatura del hábitat de las lombrices.



Figura 7. Actuador planta vermicompostaje

Fuente: Autores

Por último, se encuentran los agujeros que traspasan el lombricultivo permitiendo la salida del humus (Figura 8). Este humus se almacena en un recolector como se evidencia en la Figura 6.



Figura 8. Filtro de humus planta vermicompostaje

Fuente: Autores

7.2. Selección de sensor y actuador

7.2.1. Actuador

Para la elección del actuador se sometió la planta a un proceso de enfriamiento, para determinar la rapidez del actuador en calentarla, ya que el actuador no puede ser muy rápido porque si hay cambios demasiado bruscos de temperatura las lombrices pueden morir, pero si debe ser lo suficientemente rápido para realizar el proceso de control, a continuación, se muestran las pruebas realizadas con dos actuadores:

- Actuador 1:

En la Figura 9, temperatura vs tiempo, Se observa como la planta alcanza su temperatura máxima mientras se estabiliza.

Cabe resaltar que el actuador cuenta con una potencia de 20 watt.

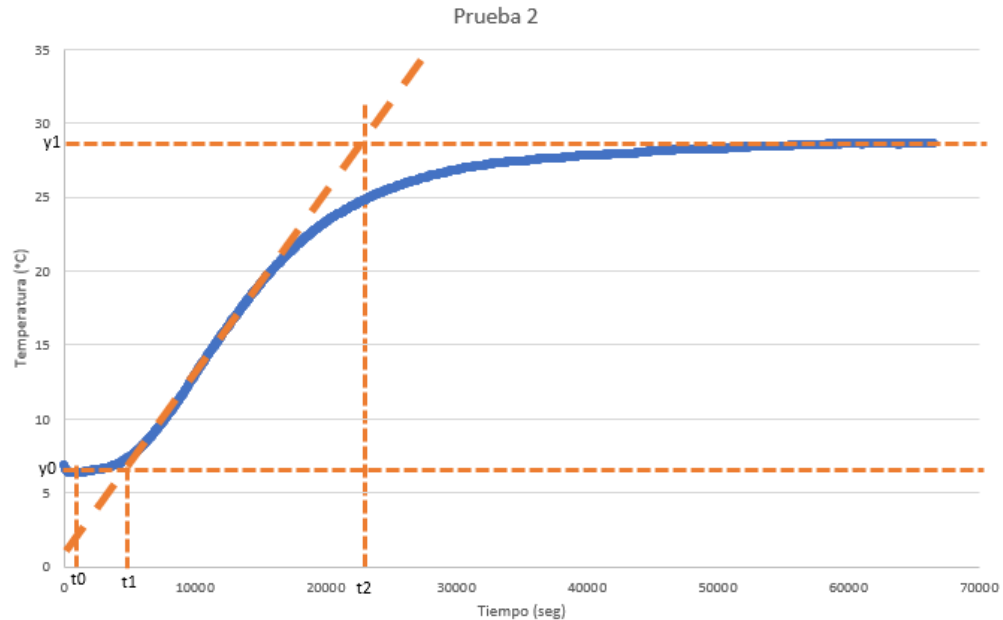


Figura 9. Respuesta de salida, primer actuador

Fuente: Autores

- Actuador 2:

En la Figura 10, temperatura vs tiempo, Se observa nuevamente como la planta alcanza su temperatura máxima mientras se estabiliza; Por tanto, en comparación con el actuador anterior se puede notar que este actuador logra estabilizar la planta en un tiempo más rápido.

Es de resaltar, que el actuador cuenta con una potencia de 377,6 watt.

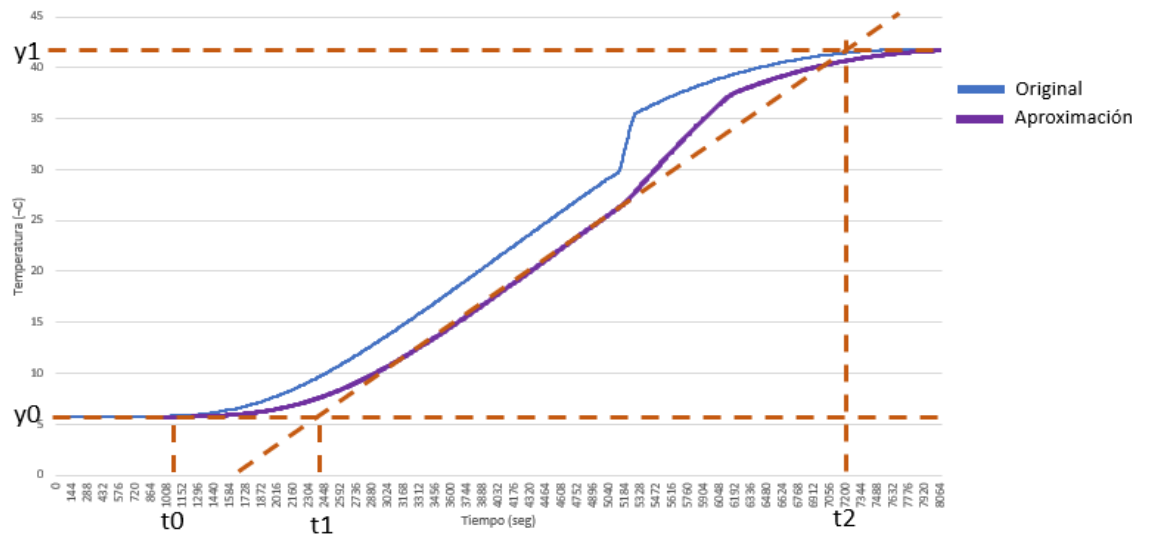


Figura 10. Respuesta de salida, segundo actuador

Fuente: Autores

Como se puede notar el actuador 2 presenta un mejor desempeño frente al actuador 1 ya que calienta la plata de forma rápida, pero sin tener cambios muy drásticos de temperatura, en cambio el actuador uno presenta una elevación de temperatura muy lenta por ende no funcionaria de manera adecuada si se implementara al control.

7.2.2. Sensor

Se realizo una tabla comparativa de los posibles sensores a usar en la planta como se ve a continuación:

Tabla 1.Comparación sensores

Sensor	Rango temperatura	Precisión	Costo
DS18B20	-55°C a +125°C	±0.5°C en un rango de -10°C a 85°C	\$ 39.865
DTH11	0°C a +50°C	±2°C	\$ 8.925
PT100	-40 °C a +125°C	±1.5°C	\$ 23.800

Fuente: Autores y Anexos 10,11,12

Se puede concluir que el mejor sensor es el DS18B20 ya que cuenta con un buen rango de medición y con la mayor precisión.

En la figura 11 se puede apreciar la comparación del sensor DS18B20 con el termómetro digital BRIXTO-THERMOMETER el cual cuenta con una precisión de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ (Anexo 9), con esta grafica se puede verificar la medición del sensor.

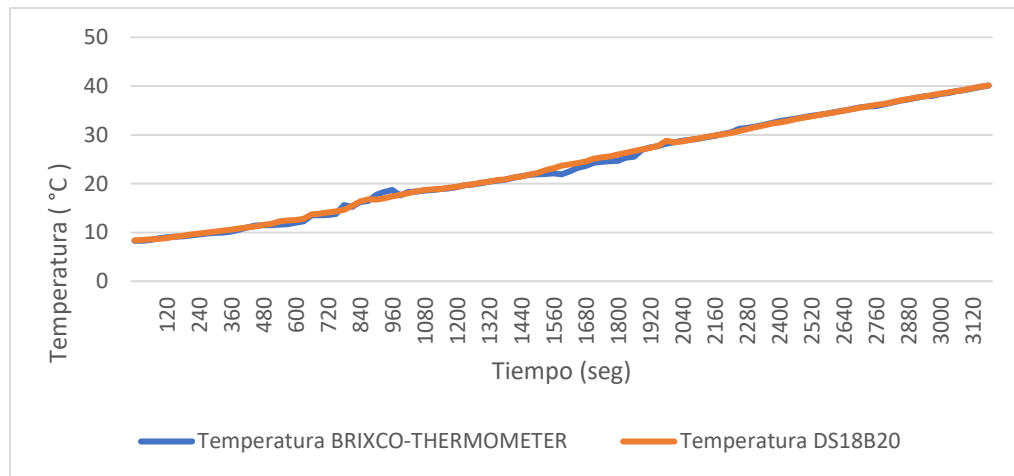


Figura 11. Verificación precisión sensor DS18B20

Fuente: Autores

7.3. Descripción del sistema

En la Figura 12, se muestra un diagrama simplificado del sistema de control de temperatura. El sistema está constituido por un controlador digital, una etapa de potencia, un sensor de temperatura y un actuador.

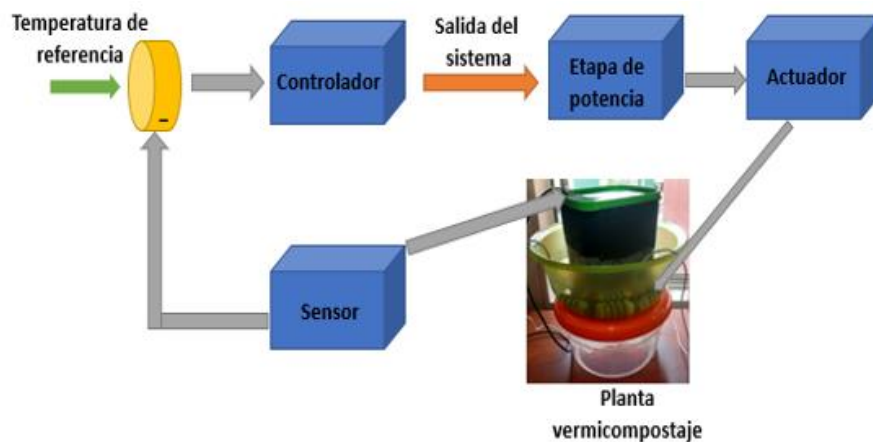


Figura 12. Sistema de control de temperatura

Fuente: Autores

7.3.1. Etapa de potencia

En la Figura 13 se puede observar el diagrama de bloques de la etapa de potencia. Este se compone de dos partes, la primera: una etapa de cruce por cero y la segunda parte está compuesta por un aislamiento y un interruptor de estado sólido (triac).

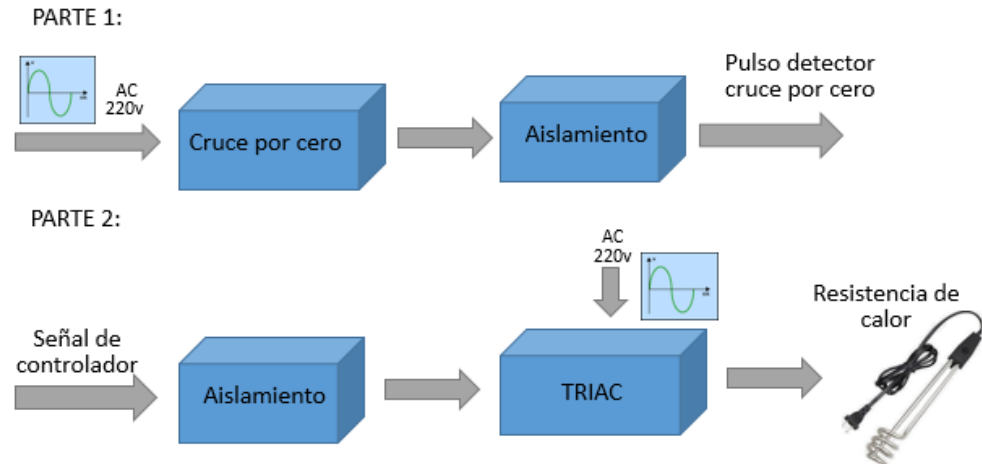


Figura 13. Diagrama de bloques etapa de potencia

Fuente: Autores

A continuación, se observa la implementación práctica de la etapa de potencia (Figura 14 y 15).

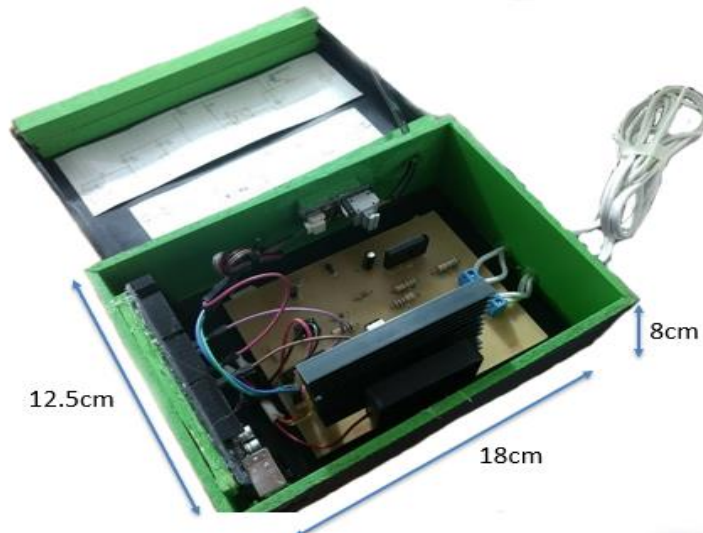


Figura 14. Implementación práctica circuito

Fuente: Autores



Figura 15. Implementación practica circuito
Fuente: Autores

- Parte 1:

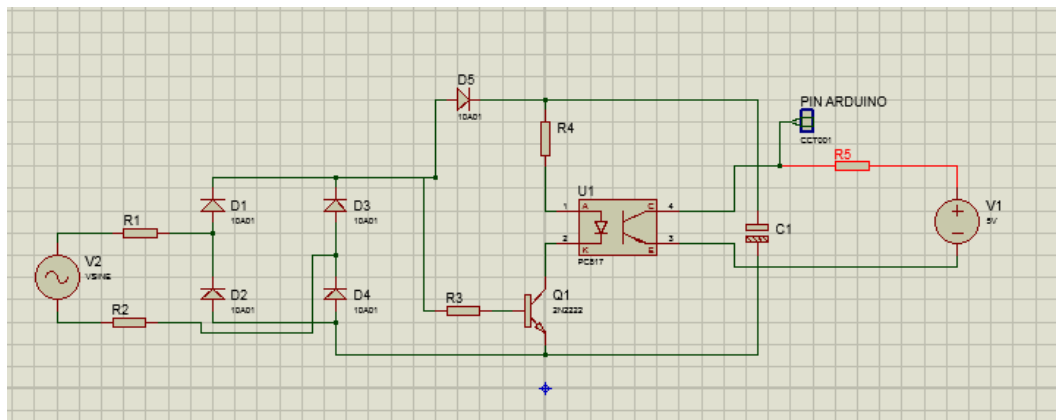
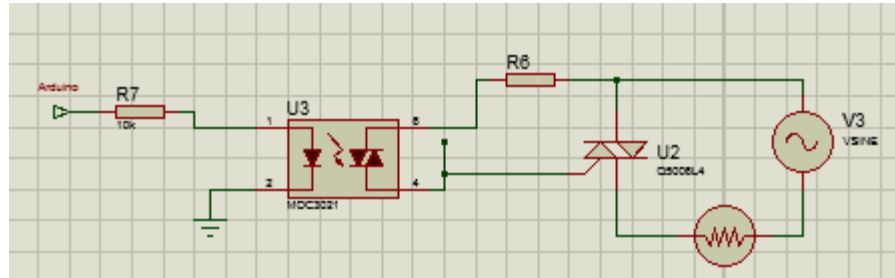


Figura 16. Esquema del circuito del cruce por cero
Fuente: Autores realizado en Proteus

En la Figura 16 se observa el esquemático del cruce por cero, es compuesto por la conexión de una fuente alterna a unas resistencias que cumplen con la función de disminuir el voltaje, éstas a su vez se conectan a un puente rectificador de diodos los cuáles, se encargan de convertir la corriente alterna en corriente directa de igual manera, se conecta a un optocoplador (PC817) para realizar el respectivo aislamiento de tierras y enviar una señal al Arduino cada vez que la onda senoidal cruce por cero.

- Parte 2:



*Figura 17. Etapa de aislamiento y TRIAC
Fuente: Autores realizado en proteus*

La parte 2 consta de un optotriac (MOC3021) sirve como aislamiento de tierras y envía la señal de disparo recibida del Arduino al triac el cuál, al activarse, activa a su vez al actuador, como se puede apreciar en la Figura 17.

7.4. Función de transferencia

Para hallar la función de transferencia se sometió la planta a un proceso de enfriamiento, luego a esto se conectó el actuador y se tomaron los datos que se encuentran en los Anexos 2; con dichos datos se procedió a realizar la respectiva gráfica (Figura 10) de la que se obtuvo la función de transferencia

Se hallaron los valores de los parámetros mostrados en la ecuación 4, dichos datos fueron tomados de la figura 10:

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 1104 \text{ seg} \\
 t_1 &= 2600 \text{ seg} \\
 t_2 &= 7050 \text{ seg} \\
 y_0 &= 5.69 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 y_1 &= 41.81 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 \tau_0 &= t_1 - t_0 \Rightarrow \tau_0 = 1496 \\
 \gamma_0 &= t_2 - t_1 \Rightarrow \gamma_0 = 4450 \\
 k_0 &= \frac{y_1 - y_0}{u_1 - u_0} \Rightarrow 1.204
 \end{aligned} \tag{27}$$

Con dichos valores se halla la función de transferencia:

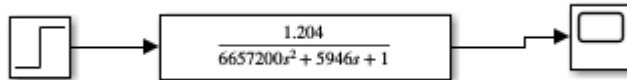
$$G(s) = \frac{K_0 e^{-s\tau_0}}{1 + \gamma_0 s} \Rightarrow \frac{1.204 e^{-s1496}}{1 + 4450s} \tag{28}$$

Se reduce la expresión resolviendo el Euler y multiplicando el resultado.

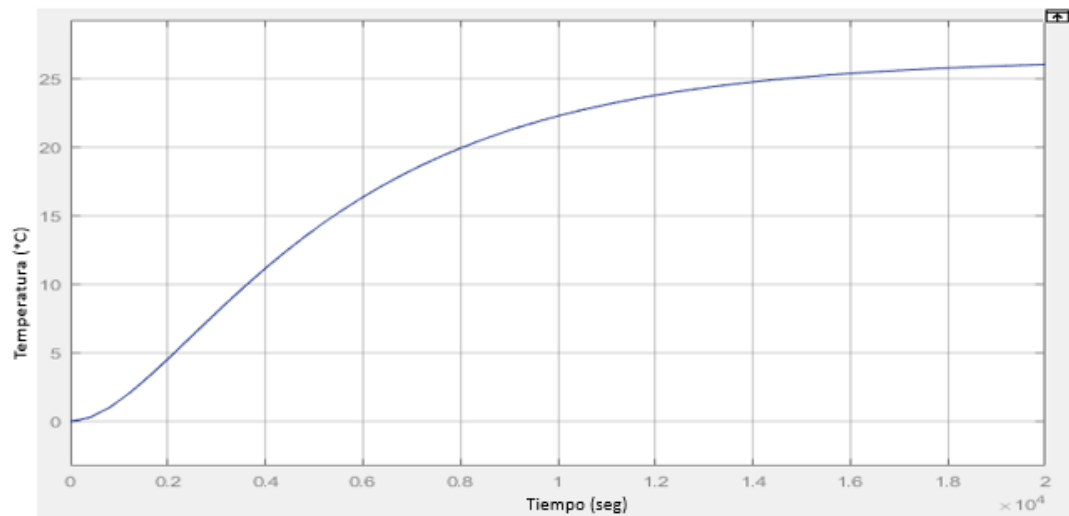
$$G(s) = \frac{1,204}{1 + 4450s} * \frac{1}{1496s + 1} \quad (29)$$

$$G(s) = \frac{1,204}{6657200s^2 + 5946s + 1}$$

Seguido a esto se simuló la función de transferencia en Simulink como se muestra en las Figuras 19, y presentando la respuesta en la Figura 20.



*Figura 18. Función de transferencia, segundo actuador
Fuente: Autores realizado en Simulink*



*Figura 19. Respuesta función de transferencia, segundo actuador
Fuente: Autores realizado en Simulink*

7.5. Diseño de controladores PID

Una vez realizadas las dos identificaciones de la planta se seleccionó el actuador 2, como se menciona anteriormente este actuador cuenta con una potencia mayor, lo que hace que la planta llegue a su temperatura máxima más rápido. Se eligieron algunas técnicas de diseño para el controlador PID (Figura 21) enumeradas a continuación.

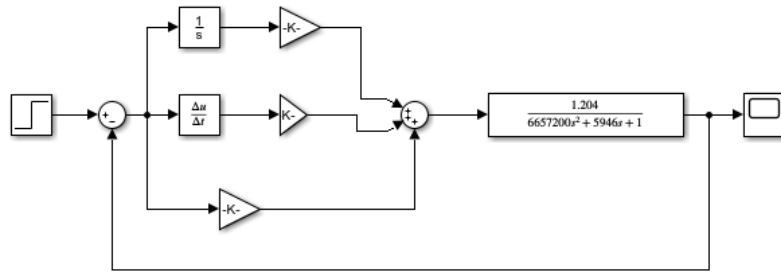


Figura 20. Control PID
Fuente: Autores realizado en simulink

7.5.1. Ziegler Nichols

AL remplazar la Ecuación 3 en la Ecuación 5 se hallan las tres ganancias del control PID, simuladas en la Figura 22.

$$K_p = 1.2 \frac{\gamma_0}{k_0 \tau_0} \Rightarrow 1.2 \frac{4450}{1.204 * 1496} \Rightarrow 2.946 \quad (30)$$

$$T_i = 2\tau_0 \Rightarrow 2 * 1496 \Rightarrow 2992$$

$$T_d = 0.5\tau_0 \Rightarrow 0.5 * 1496 \Rightarrow 748$$

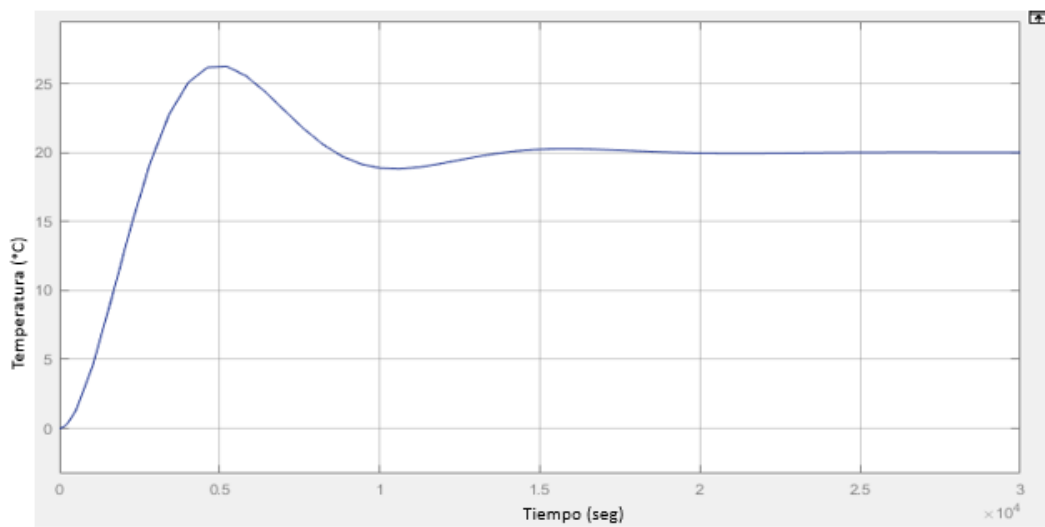


Figura 21. Respuesta control PID método de sintonización Ziegler Nichols
Fuente: Autores realizado en Simulink

En esta simulación se lograron determinar los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento: 19652.712 seg

- Sobre paso máximo: 26.19 °C

7.5.2. COHEN-COON

AL remplazar la Ecuación 3 en la Ecuación 6 se hallan las tres ganancias del control PID, simuladas en la Figura 23.

$$\begin{aligned}
 K_p &= \frac{1}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right) \right) = \frac{1}{1.204} \left(\frac{4450}{1496} \right) \left(\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{1496}{4450} \right) \right) \\
 &= 3.50 \\
 T_i &= \tau_0 * \left(\frac{32 + 6(\tau_0/\gamma_0)}{13 + 8(\tau_0/\gamma_0)} \right) = 1496 * \left(\frac{32 + 6(1496/4450)}{13 + 8(1496/4450)} \right) \\
 &= 3243.55 \\
 T_d &= \tau_0 * \left(\frac{4}{11 + 2(\tau_0/\gamma_0)} \right) = 1496 * \left(\frac{4}{11 + 2(1496/4450)} \right) \\
 &= 512.66
 \end{aligned} \tag{31}$$

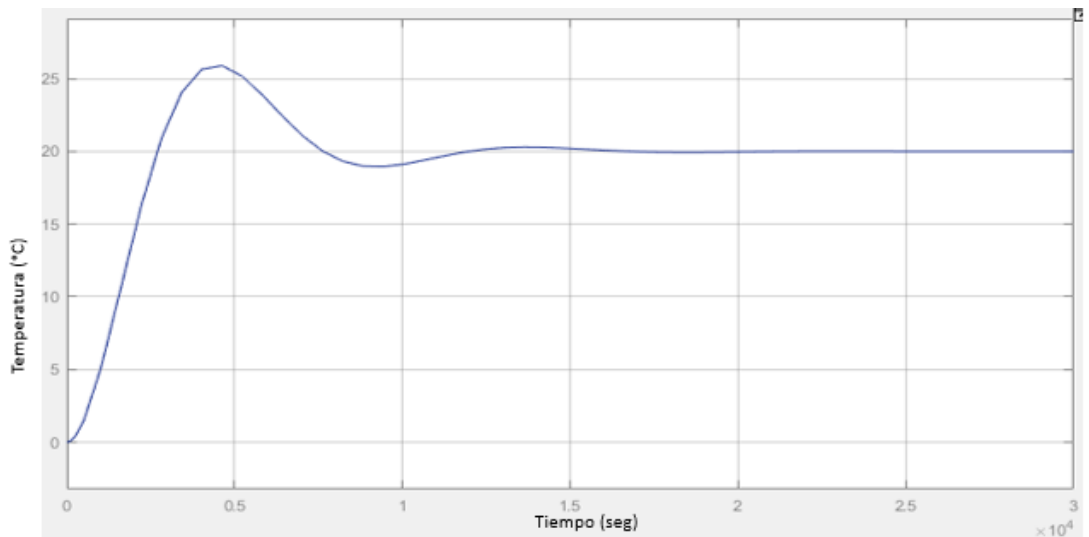


Figura 22. Respuesta control PID método de sintonización COHEN-COON

Fuente: Autores realizado en Simulink

En esta simulación se lograron determinar los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento: 16769.74 seg
- Sobre paso máximo: 25.85 °C

7.5.3. ITAE (Seguimiento consigna)

AL remplazar la Ecuación 3 en la Ecuación 7 se hallan las tres ganancias del control PID, simuladas en la Figura 24.

$$\begin{aligned}
 K_P &= \frac{0.965}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.855} = \frac{0.965}{1.204} \left(\frac{4450}{1496} \right)^{0.855} = 2.035 \\
 T_i &= \frac{\gamma_0}{0.796 - 0.147 \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right)} = \frac{4450}{0.796 - 0.147 \left(\frac{1496}{4450} \right)} = 5960 \\
 T_d &= 0.308 \gamma_0 \left(\frac{\tau_0}{\gamma_0} \right)^{0.929} = 0.308 * 4450 \left(\frac{1496}{4450} \right)^{0.929} = 497.84
 \end{aligned} \tag{32}$$

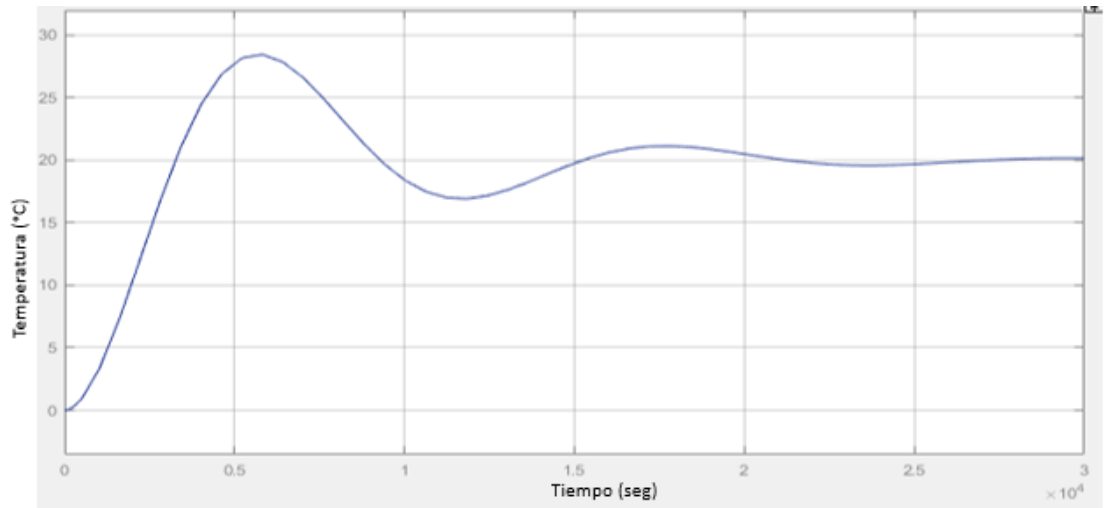


Figura 23. Respuesta control PID método de sintonización ITAE(seguimiento consigna)

Fuente: Autores realizado en simulink

En esta simulación se lograron determinar los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento: 27359.65 seg
- Sobre paso máximo: 25.41 °C

7.5.4. ITAE (Rechazo a perturbaciones)

AL remplazar la Ecuación 3 en la Ecuación 8 se hallan las tres ganancias del control PID, simuladas en la Figura 25.

$$K_P = \frac{1.357}{k_0} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.947} = \frac{1.357}{1.204} \left(\frac{4450}{1496} \right)^{0.947} = 3.16$$

$$T_i = \frac{\gamma_0}{0.842} \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.738} = \frac{4450}{0.842} \left(\frac{4450}{1456} \right)^{0.738} = 3972 \quad (33)$$

$$T_d = 0.381 \left(\frac{\gamma_0}{\tau_0} \right)^{0.955} = 0.381 \left(\frac{4450}{1496} \right)^{0.955} = 1.079$$

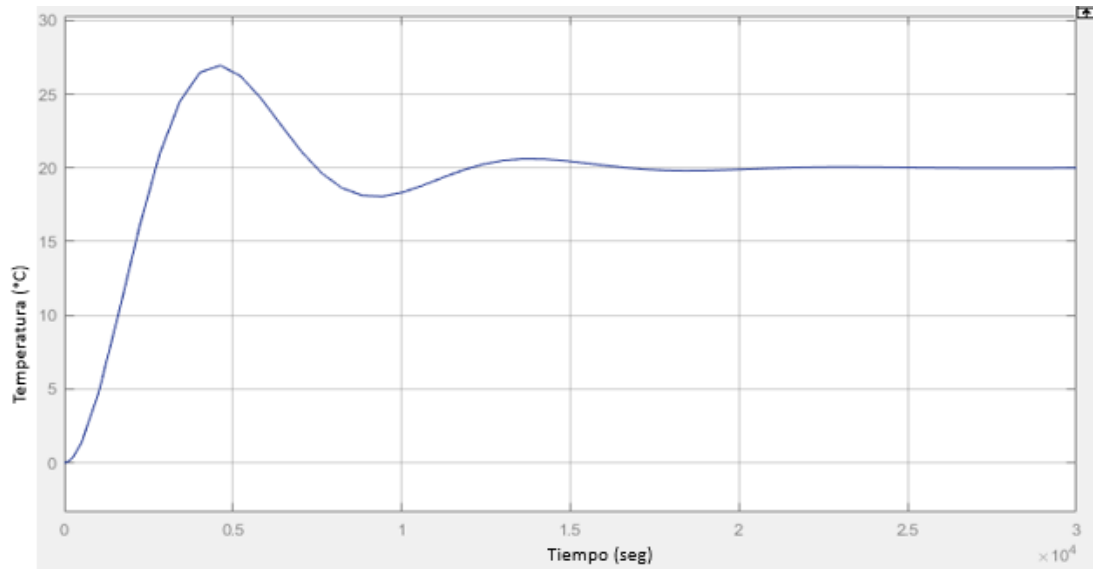


Figura 24. Respuesta control PID método de sintonización ITAE (Rechazo a perturbación)

Fuente: Autores realizado en simulink

En esta simulación se lograron determinar los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento: 21165.55 seg
- Sobre paso máximo: 26.94 °C

7.5.5. Implementación

A continuación, se realiza la comparación de los cuatro controladores diseñados y simulados anteriormente:

Tabla 2. Parámetros de desempeño de las diferentes técnicas de diseño del controlador PID

Estrategia de control PID	Tiempo de establecimiento	% Sobre paso máximo	% Error de estado estacionario
Ziegler Nichols	19652.712 seg	29%	0%
COHEN-COON	16769.74 seg	28%	0%
ITAE (Seguimiento consigna)	27359.65 seg	30%	0%
ITAE (Rechazo a perturbaciones)	21165.55 seg	33%	0%

Fuente: Autores

Comparando los 4 controladores, se evidenció que el control COOHEN-CON fue el que demostró un mejor rendimiento con un sobre paso máximo y un tiempo de establecimiento menor, por lo tanto, se implementó de la siguiente forma:

Algoritmo implementación control PID:

La implementación de un controlador digital requiere iterar cada 20 segundos el siguiente algoritmo (Anexo 4):

1. Se inicializa, los valores pasados de la señal de error $e(k-1)$, la respuesta de la planta $y(k)$.
2. Se inicia un ciclo.
3. Se define la referencia $r(k)$.
4. El Arduino adquiere el valor de la salida del sensor de temperatura en el instante actual ($Y(kT)$).
5. Se calcula el error para el instante actual kT , como la diferencia de la referencia y la salida del sistema.
6. Se calcula la acción de control para el instante actual, es decir $u(k)$.
7. Se satura $u(k)$ según el rango máximo permitido en el canal de la salida.
8. Se exporta la acción de control $u(k)$ a través de los pines análogos del Arduino.
9. Se actualizan los valores pasados de las variables con los del instante actual.
10. Se genera una pausa de un tiempo de muestreo T .
11. Se finaliza el ciclo.

7.6. Diseño control LQR

Con la ayuda del siguiente código de Matlab se encontraron las matrices de la planta en espacio de estados, mostradas en la Ecuación 34.

Tabla 3. Código realizado en Matlab para obtener las matrices de la planta en espacio de estados

```
gv=tf([1.204],[6657200 5946 1])%obtiene la función de  
transferencia  
Sis=ss(gv)% modelo en espacio de estados  
[A,B,C,D]=ssdata(Sis)% Matrices en espacio de estados
```

Fuente: Autores

$$\begin{aligned} A &= \begin{bmatrix} -0.8932 * 10^{-3} & -0.3076 * 10^{-3} \\ 0.4883 * 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} & B &= \begin{bmatrix} 0.0156 \\ 0 \end{bmatrix} \\ C &= [0 \quad 0.0237] & D &= [0] \end{aligned} \quad (34)$$

7.6.1. Controlabilidad

Con la ayuda del código de Matlab (Tabla 4), se encontró la matriz de controlabilidad (Ecuación 35) y su rango da 2 y comparando este resultado con lo explicado en el capítulo anterior se puede deducir que la función es controlable.

Tabla 4. Código Matlab controlabilidad

```
co=[B A*B] % Matriz de controlabilidad  
ran=rank(co) % tamaño matriz controlabilidad
```

Fuente: Autores

$$co = \begin{bmatrix} 0.015625 & -0.000013955 \\ 0 & 0.000007629 \end{bmatrix} \quad ran = 2 \quad (35)$$

7.6.2. Observabilidad

Se implementó el siguiente código en Matlab (Tabla 5) el cuál ayuda a encontrar la matriz de observabilidad (Ecuación 36) y su rango da 2 por lo explicado en el capítulo anterior se deduce que la función es observable.

Tabla 5. Código Matlab observabilidad

```
ob=[C;C*A] %Matriz observabilidad
ran=rank(ob) % tamaño matriz observabilidad
```

Fuente: Autores

$$ob = \begin{bmatrix} 0 & 0.02370526 \\ 0.00001157 & 0 \end{bmatrix} \quad ran = 2 \quad (36)$$

Seguido a esto se reemplazó la Ecuación 13, con las matrices halladas anteriormente, como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -0.8932 * 10^{-3} & 0.4883 * 10^{-3} \\ -0.3076 * 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P1 & P2 \\ P3 & P4 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} P1 & P2 \\ P3 & P4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -0.8932 * 10^{-3} & -0.3076 * 10^{-3} \\ 0.4883 * 10^{-3} & 0 \end{bmatrix} \\ & - \begin{bmatrix} P1 & P2 \\ P3 & P4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.0156 \\ 0 \end{bmatrix} [1] [0.0156 \quad 0] \begin{bmatrix} P1 & P2 \\ P3 & P4 \end{bmatrix} \\ & + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (37)$$

De la ecuación anterior se despeja la matriz P , obteniendo como resultado:

$$P = \begin{bmatrix} 62.4 & 62.8 \\ 62.8 & 2111.2 \end{bmatrix} \quad (38)$$

Teniendo en cuenta la Ecuación 12, la matriz de ganancias de realimentación K se obtiene como:

$$\begin{aligned} K &= [1]^{-1} \begin{bmatrix} 0.0156 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 62.4 & 62.8 \\ 62.8 & 2111.2 \end{bmatrix} \\ k &= [0.9746 \quad 0.9805] \end{aligned} \quad (39)$$

Posteriormente se simuló (Figura 28), también se implementó un pre-compensador el cuál se encarga de anular el error de estado estacionario que tiene el controlador, en la Figura 29 se puede observar el resultado de este controlador.

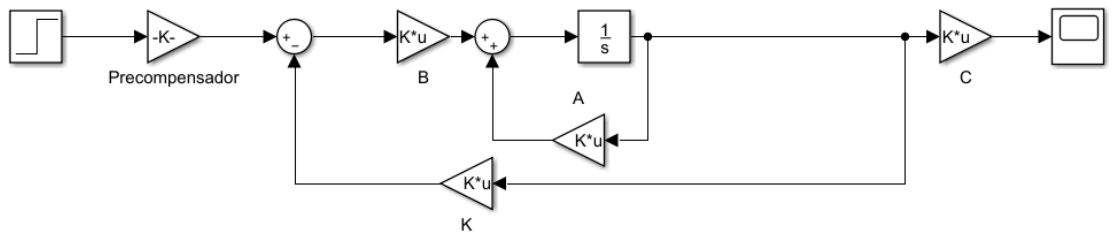


Figura 25. Esquemático control Lqr
Fuente: Autores realizado en Simulink

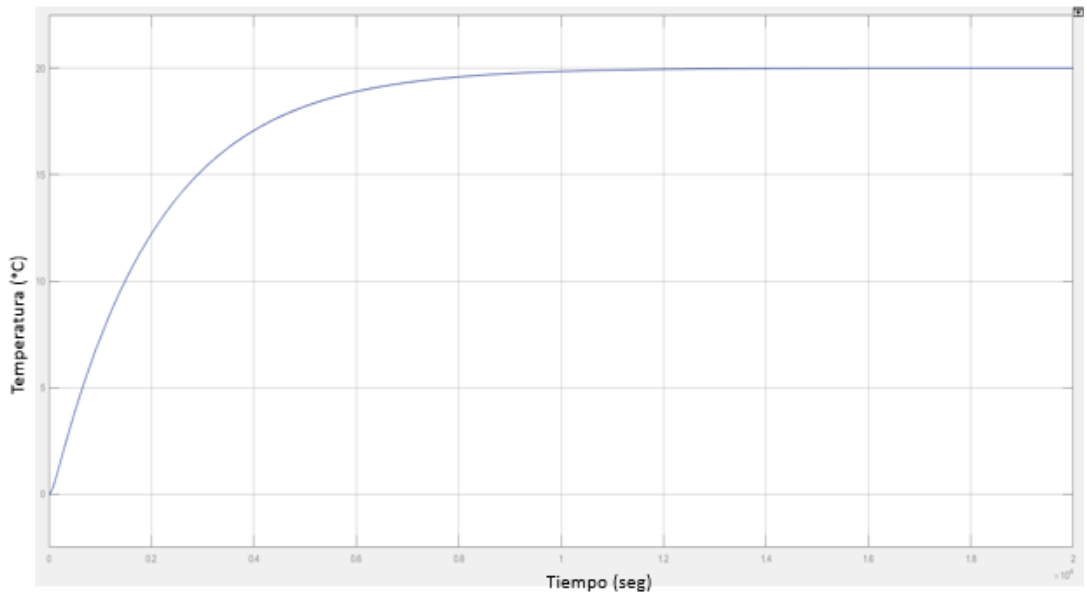


Figura 26. Respuesta control lqr
Fuente: Autores realizado en Simulink

En esta simulación se lograron determinar los siguientes parámetros:

- Tiempo de establecimiento: 14015.22 seg
- Sobrepaso máximo: 0 °C

7.6.3. Observador de estado

Con la ayuda del siguiente código de Matlab (Tabla 6) se encuentran las ganancias del observador(L):

Tabla 6. Código Matlab observador de estados

```
polosL= [-15,-15]% Polos lejanos
```

```
L= acker(A',C',polosL)' %ganancia observador de estados
```

Fuente: Autores

Este código nos permite encontrar la ganancia de L:

$$L = \begin{bmatrix} 19436000 \\ 1000 \end{bmatrix} \quad (40)$$

Una vez encontrado el valor del observador se procedió a simularlo como se observa (Figura 30,31).

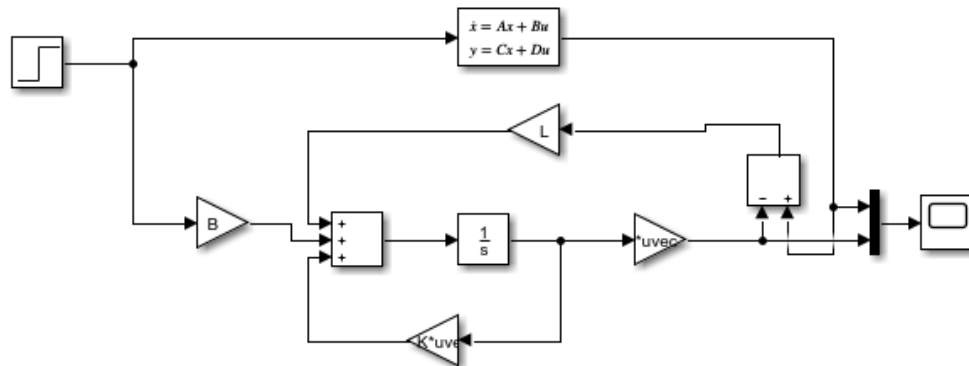


Figura 27. Esquemático Observador de estados

Fuente: Autores realizado en simulink

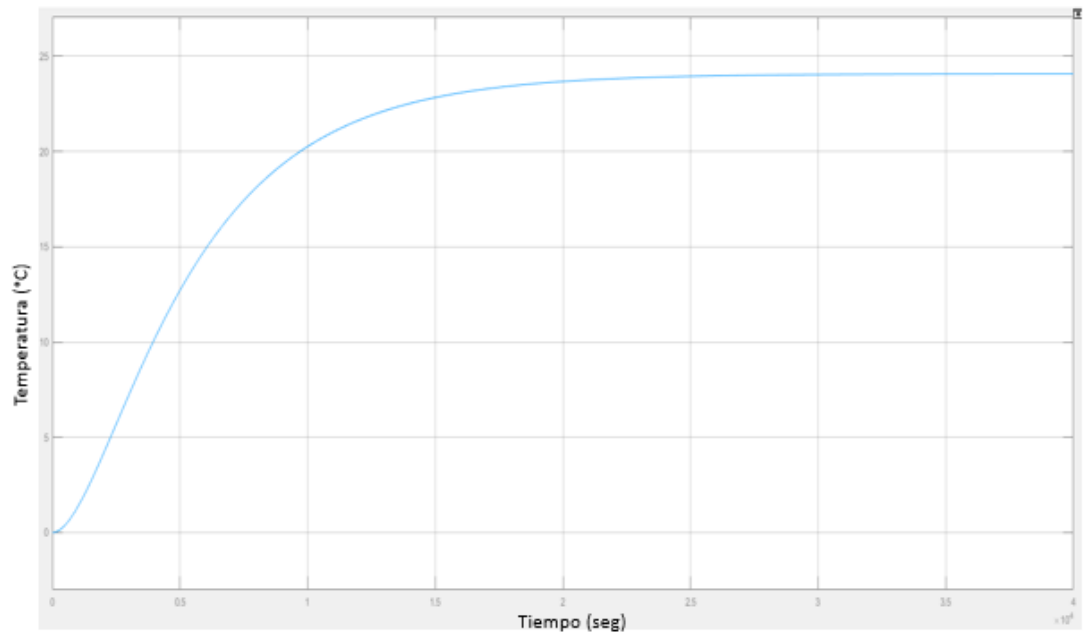


Figura 28. Respuesta observador de estados
Fuente: Autores realizado en simulink

7.6.4. Función objetivo

Una vez definidas y halladas las constantes Q , R , K (Ecuación 41) que serán las encargadas de determinar la importancia relativa del error y del coste de energía [34].

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad R = [1] \quad k = [0.9746 \quad 0.9805] \quad (41)$$

Cabe aclarar que los valores de las constantes Q y R deben tomar valores positivos [34], por otra lado se tomó como referencia el proyecto de grado [35], este consistía en la comparación del comportamiento del control LQR con diferentes valores de las variables mencionadas anteriormente, llegando a la conclusión, que las ganancias mostradas en la Ecuación (40) son las más óptimas para dicho controlador ya que siguen la referencia y no presenta un sobre impulso considerable.

Luego se procede a remplazarlas y simplificar la Ecuación 20; la cuál será la función objetivo del controlador.

$$J = \int_0^{\infty} \left(x * \begin{bmatrix} 1.9498 & 0.9555 \\ 0.9555 & 1.9613 \end{bmatrix} x \right) dt \quad (42)$$

7.6.5. Implementación

Discretizando las ecuaciones del control óptimo se hallaron las ecuaciones (39), donde tk son los instantes de muestreo, h es el periodo de muestreo, Y es el valor de la salida del sensor y r en la referencia del sistema.

$$\begin{aligned} u(tk) &= -Cx(tk) + K * r \\ X(tk - 1) &= x(tk) + h(tk)(Ax(tk) + Bu(tk) + k(y(tk) \\ &\quad - Cx(tk))) \end{aligned} \quad (43)$$

Las ecuaciones mostradas se implementan (Anexo 6) como se explica a continuación, requiere iterar el siguiente algoritmo cada 3 segundos:

1. Inicialización de matrices y variables A, B, C, D, K, L, Y, r .
2. Se inicia un ciclo.
3. El Arduino adquiere el valor de la salida del sensor de temperatura en el instante actual.
4. Se calcula la x estimada como se muestra en la Ecuación 43.
 - 4.1. Multiplica $A*x(tk-1)$.
 - 4.2. Multiplica $B*U$.
 - 4.3. $Y-C*x(tk-1)$.
 - 4.4. Se suma el resultado de las anteriores ecuaciones se almacena en una matriz llamada subtotal.
 - 4.5. Se multiplica subtotal por el tiempo de muestro se almacena en una matriz llamada *totalx*.
 - 4.6. Se suma $x(tk-1) + totalx$ se almacena en una matriz llamada X .
5. Se calcula la acción de control del sistema (U) Ecuación 43.
 - 5.1. Multiplica $K*r$.
 - 5.2. Multiplica $C*X$.
 - 5.3. Se suma el resultado de las dos operaciones anteriores y se almacena en una matriz llamada U .
6. Se satura $u(k)$ según el rango máximo permitido en el canal de la salida.
7. Se exporta la acción de control $u(k)$ a través de los pines análogos del Arduino.
8. Se actualizan los valores pasados de las variables con los del instante actual.
9. Se genera una pausa de un tiempo de muestreo T .
10. Se finaliza el ciclo.

7.7. Cálculo de la potencia

En el Anexo 8 se pueden observar los datos experimentales tomados, donde la entrada es el ángulo de disparo del triac, de estos datos se obtienen las Figuras 32 y 33 en las cuales se puede observar la conversión del ángulo al tiempo de impulso y el valor de la potencia consumida en ciertos ángulos esto se hizo con la ayuda del multímetro ya que se obtuvo el valor de la corriente, y el voltaje; al multiplicar estas variables se obtiene la potencia consumida por el actuador. De estas graficas podemos inferir que la potencia posee un comportamiento lineal.

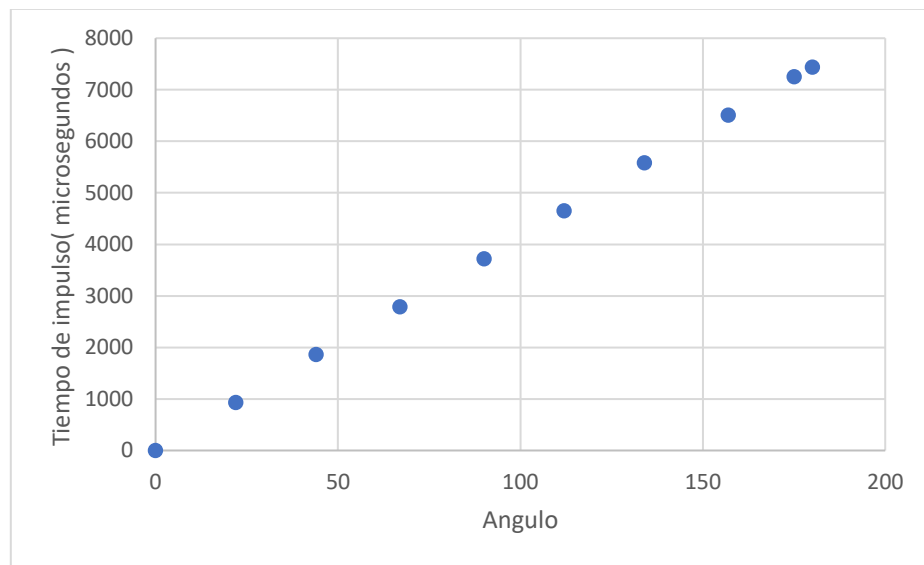


Figura 29. Angulo vs Tiempo de impulso calculo potencia del LQR
Fuente: Autores

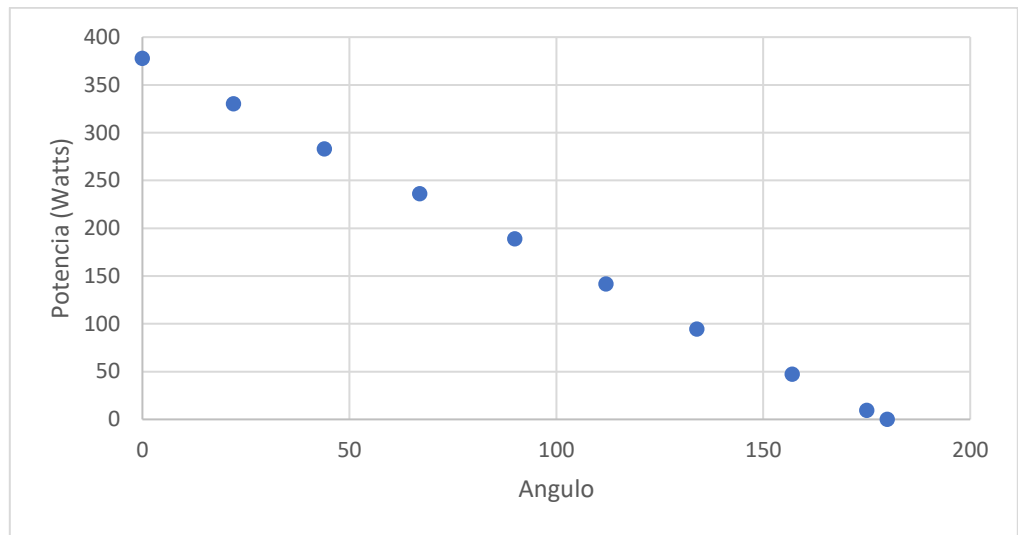


Figura 30. Angulo vs Potencia calculo potencia LQR
Fuente: Autores

Por lo tanto, para la toma de datos de las pruebas se tomaron los valores de salida del control con el Arduino y posterior a esto se realizó la regla de tres mostrada en la Ecuación 45 que nos proporciona el valor de la potencia del actuador (X).

$$\begin{array}{ccc} 22 & \text{-----} & 330,3 \text{ watts} \\ \text{Angulo} & \text{-----} & x \end{array} \quad (45)$$

$$X = (\text{Angulo} * 330,3) / 22$$

8. ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

8.1. Implementación control COHEN-COON PID

En la Figura 34 se puede apreciar que el sistema alcanza la referencia en un tiempo aproximado de 40400 segundos, con un sobre impulso al 50% y un error de estado estacionario que termina oscilado entre 20.94 °C y 19.37 °C en un periodo de 8120 segundos, esto nos da un error de estado estacionario medio de 20.15 °C como se observa en la Figura 35.

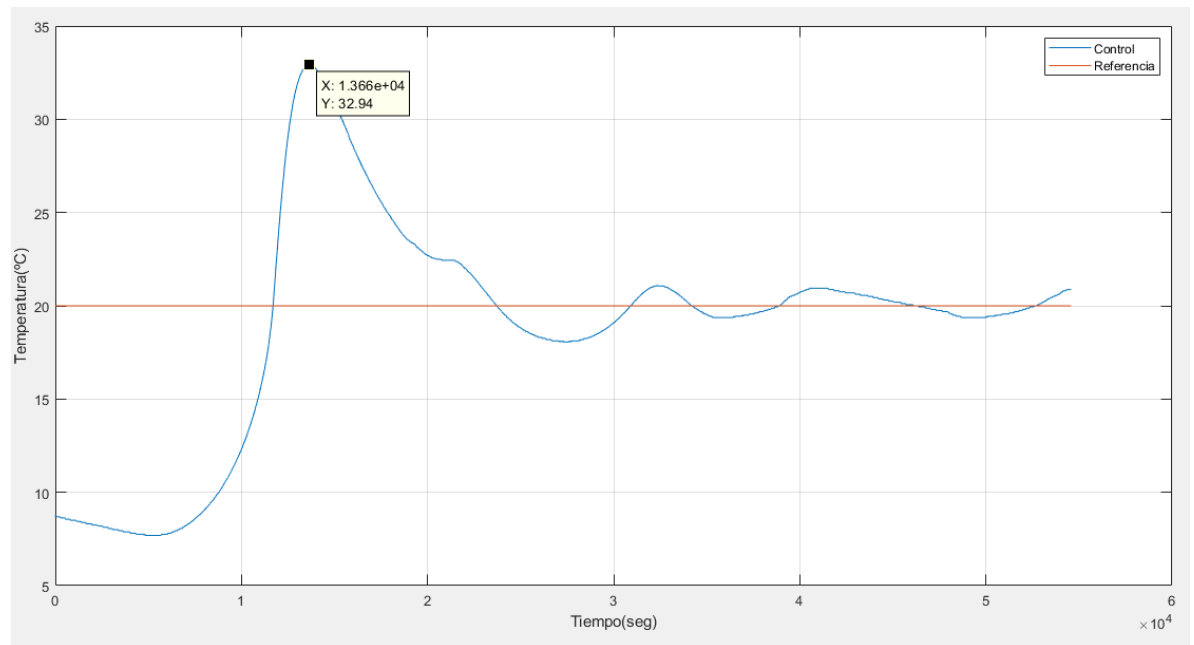


Figura 31. Respuesta Control PID, practico
Fuente: Autores realizado en Matlab

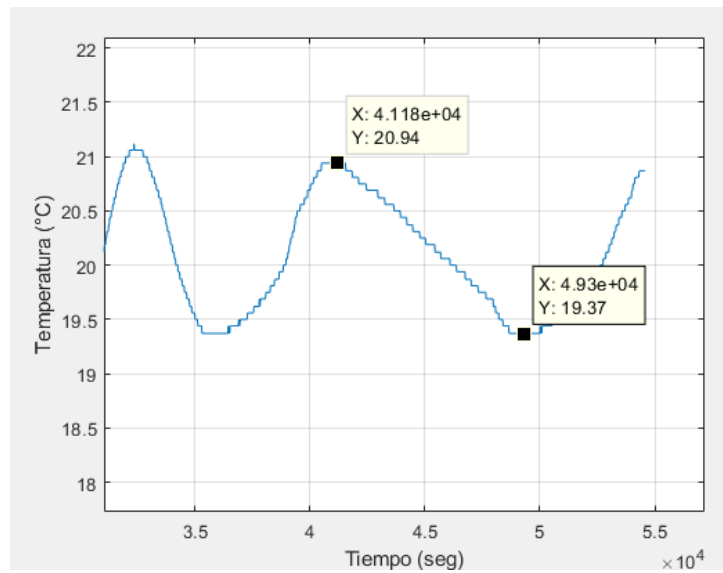


Figura 32. Control PID acercamiento estabilización
Fuente: Autores realizado en Matlab

En la Figura 36 se puede apreciar el consumo de energía de este controlador durante el tiempo de la estabilización, se observa que consume un máximo de 377.6 Watt durante el transitorio, cabe aclarar que la potencia se calcula como se muestra en la numeral 7.4.5.1 del presente documento.

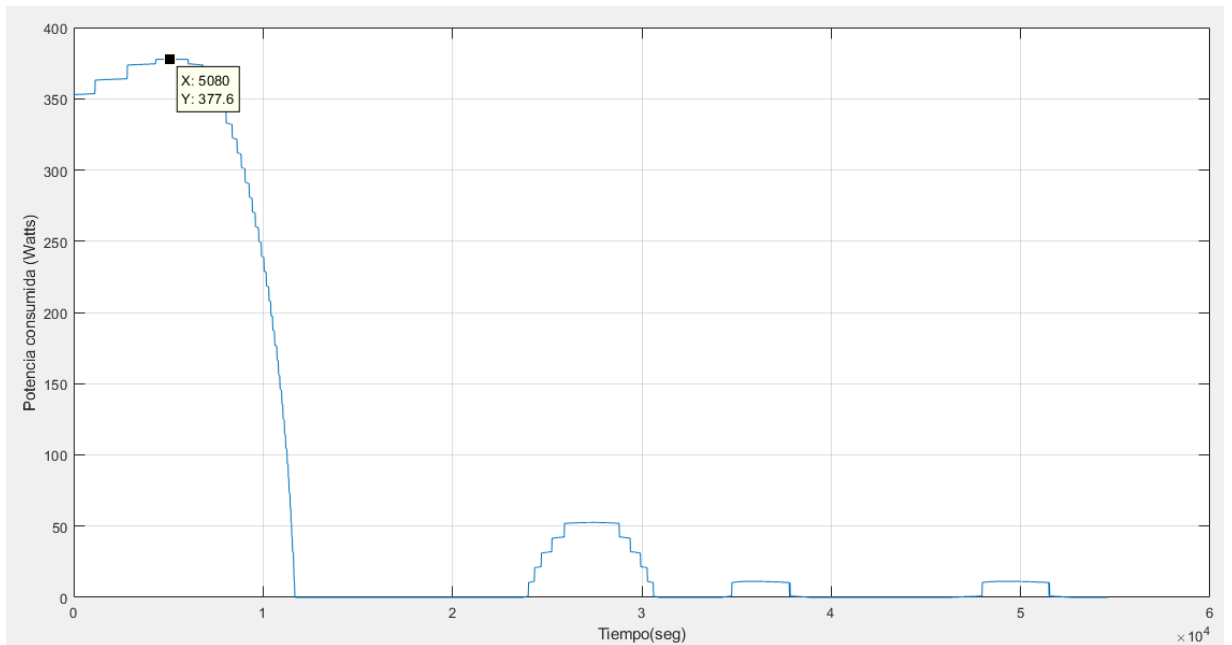


Figura 33. Energía consumida controlador PID
Fuente: Autores realizado en Matlab

8.2. Respuesta del control LQR implementando

La Figura 37 muestra los resultados obtenidos por el controlador, se puede apreciar que cuenta con un tiempo de establecimiento de 14000 segundos, no obstante, la señal de salida termina oscilando entre 19.44 °C y 18.25 °C en un periodo de 1240 segundos, esto nos da un error de estado estacionario medio de 18.84 °C, como se observa en la Figura 38.

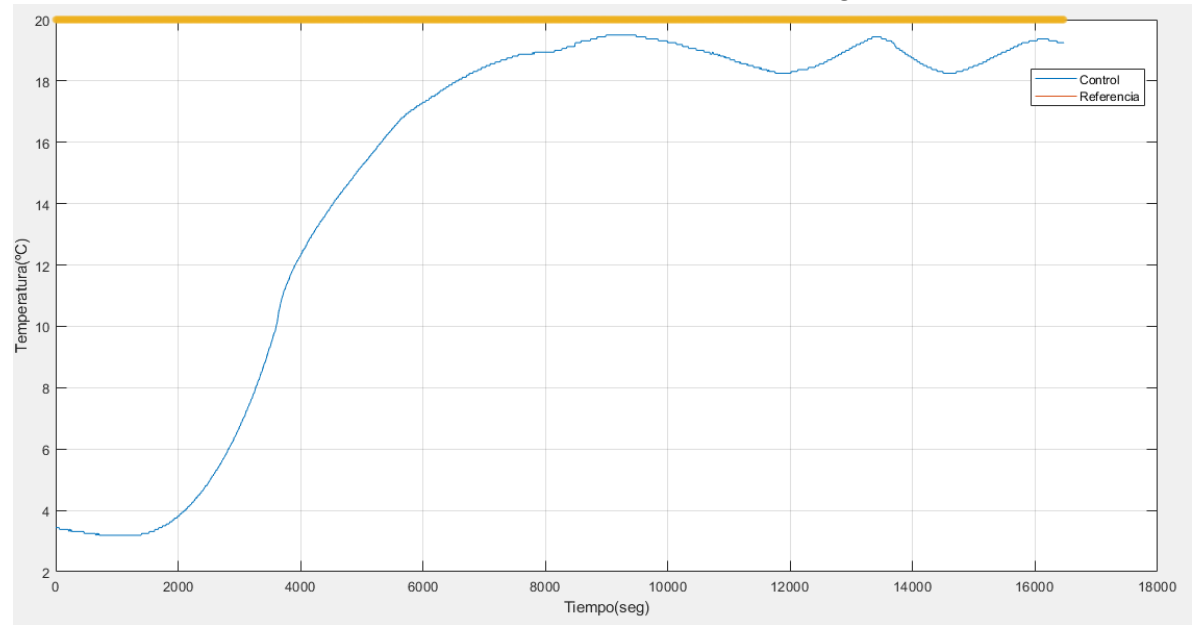


Figura 34. Control Lqr implementación

Fuente: Autores realizado en Matlab

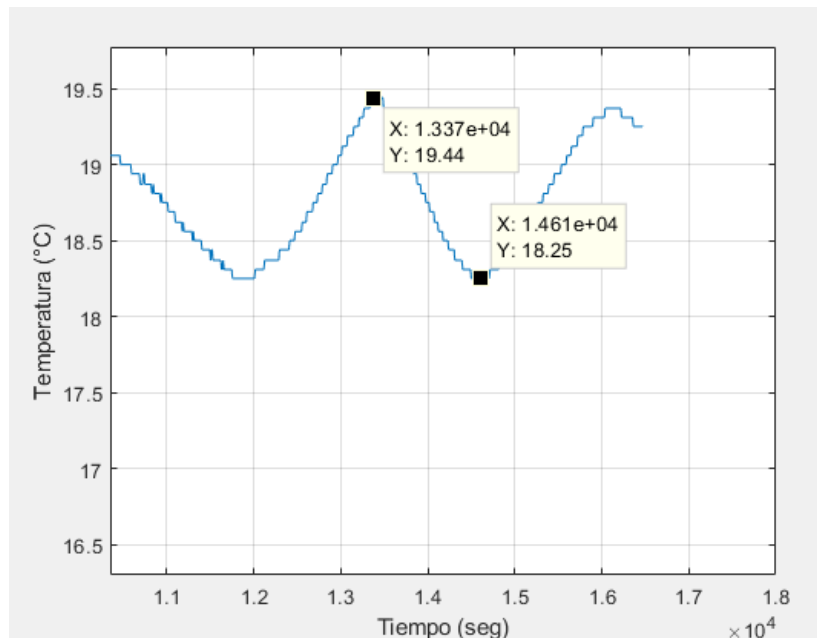


Figura 35. Control LQR acercamiento estabilización
Fuente: Autores realizado en Matlab

En la Figura 39 el consumo de energía de este controlador durante todo el proceso de estabilización de la planta cabe resalta que contó con un consumo máximo de 310 Watt durante el transitorio del sistema.

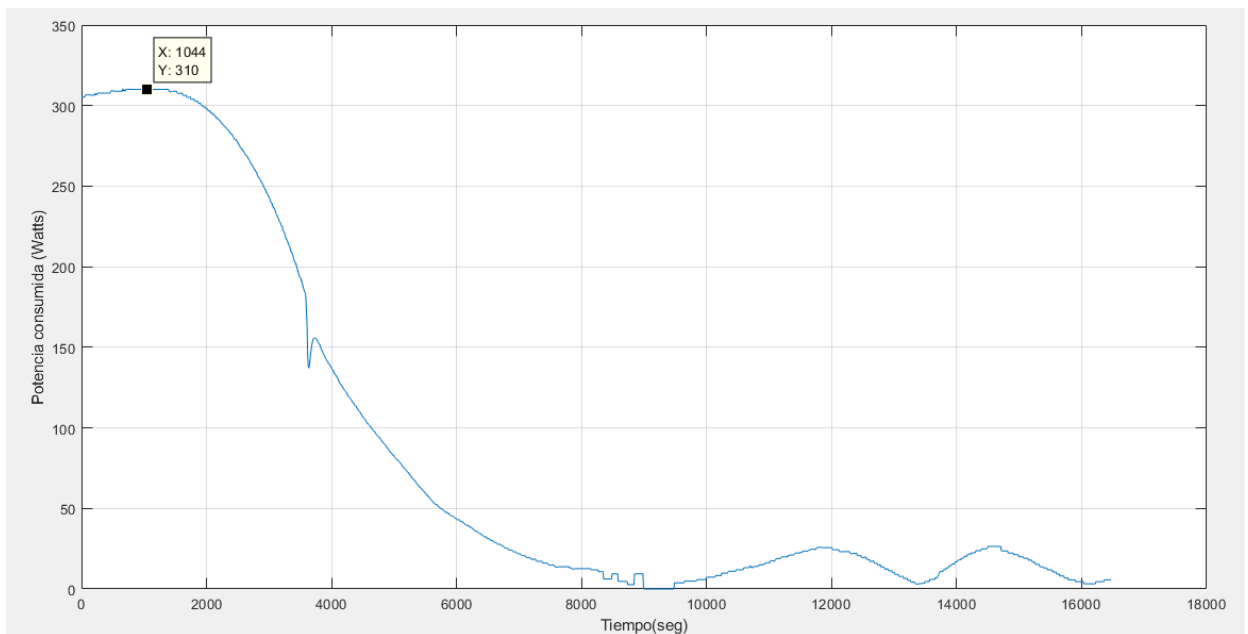


Figura 36. Energia consumida controlador LQR
Fuente: Autores realizado en Matlab

La diferencia entre la topología del control LQR con respecto a la del control PID, se hace muy evidente (Tabla 8):

Tabla 7. Parámetros de desempeño obtenidos aplicando control LQR y PID en la planta de vermicompostaje

Estrategia de control	Tiempo de establecimiento	de Sobrepaso máximo	Error de estado estacionario	Máximo consumo energético durante transitorio	el
PID	40400 seg	50%	0.15 °C	377.6 watt	
LQR	14000 seg	0%	1.16°C	310 watt	

Fuente: Autores

Como se observa, el controlador PID presenta una respuesta más lenta respecto al LQR, aunque alcanza la referencia deseada y se mantiene estable. Además, en el controlador PID se encuentra un sobre impulso que podría ser pernicioso para las lombrices, es de señalar que como no se encontraron trabajos reportados con esta técnica de control no se puede comparar dicho desempeño ya que en su estado estacionario ambos controladores presentan oscilaciones más o menos de un grado, una de las hipótesis es que el sensor se encuentra en la tierra y el actuador en el agua y la demora en la transferencia del calor entre estos elementos podría ser uno de los factores que promuevan este error en el estado estacionario.

8.3. Rechazo a perturbaciones

Una vez estabilizado el sistema se dispone a observar el desempeño de los controladores frente a perturbaciones. Para poder estudiar esta respuesta los dos controladores se someterán a una perturbación (inyectar hielo a la planta) que obligará a caer la temperatura de los sistemas a 15°C, cabe aclarar que dicha perturbación fue inducida cuando los sistemas se encontraban en su estado estacionario con el objetivo, que bajaran a la temperatura ya mencionada y alcanzaran la referencia que es de 20°C.

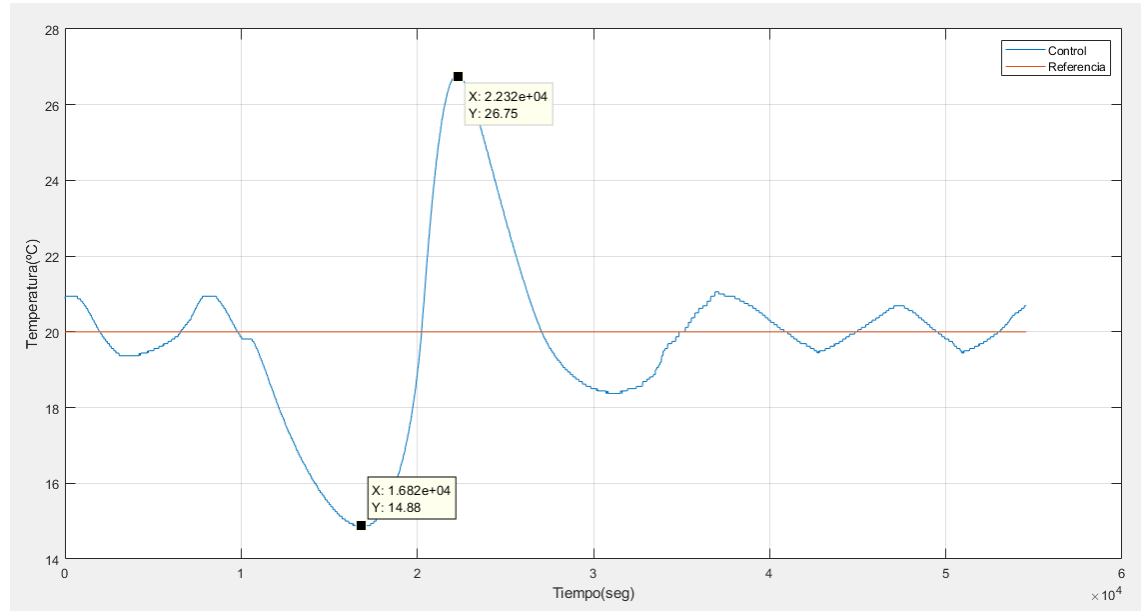


Figura 37. Perturbación control PID
Fuente: Autores realizada en Matlab

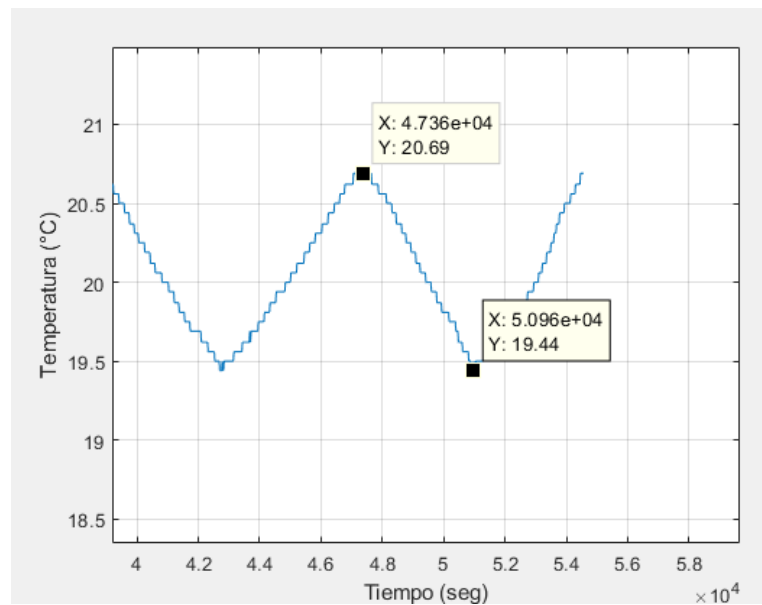


Figura 38. Control LQR perturbación acercamiento estabilización
Fuente: Autores realizado en Matlab

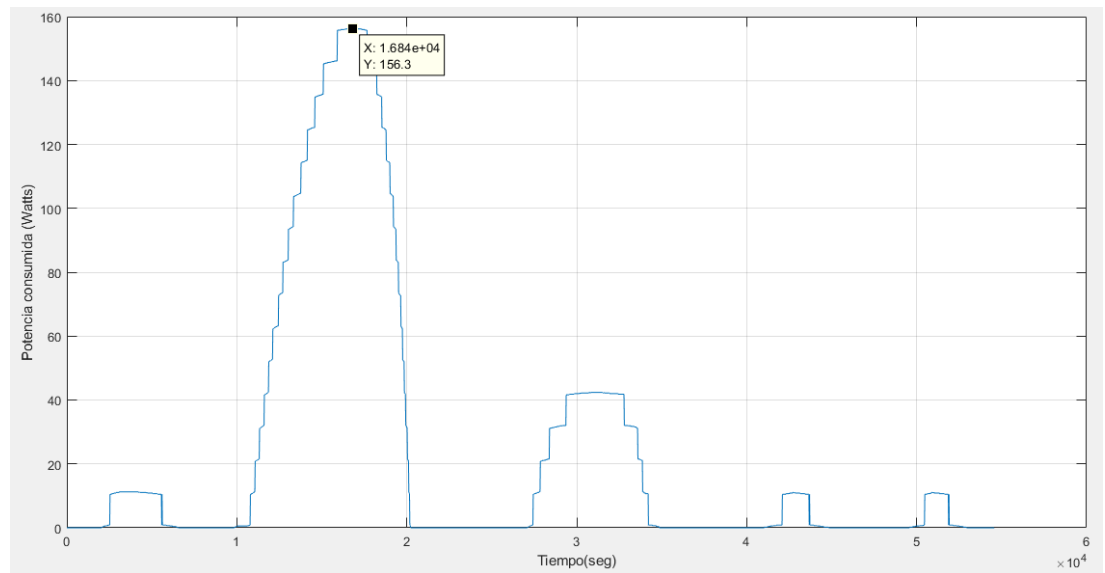


Figura 39. Energía consumida por perturbación a control PID
Fuente: Autores realizada en Matlab

En las Figura 40 se puede apreciar que para el control PID, cuando se presenta una perturbación, el sistema vuelve a la referencia en un tiempo de 30060 segundos, con un sobre impulso cercano al 28%, la señal de salida termina oscilando entre 20,69 °C y 19,44 °C en un periodo de 360 segundos, esto nos da un error de estado estacionario medio de 20.06 °C, como se observa en la Figura 41. En la Figura 42 se observa que el máximo gasto de energía durante el transitorio fue de 156.3 w

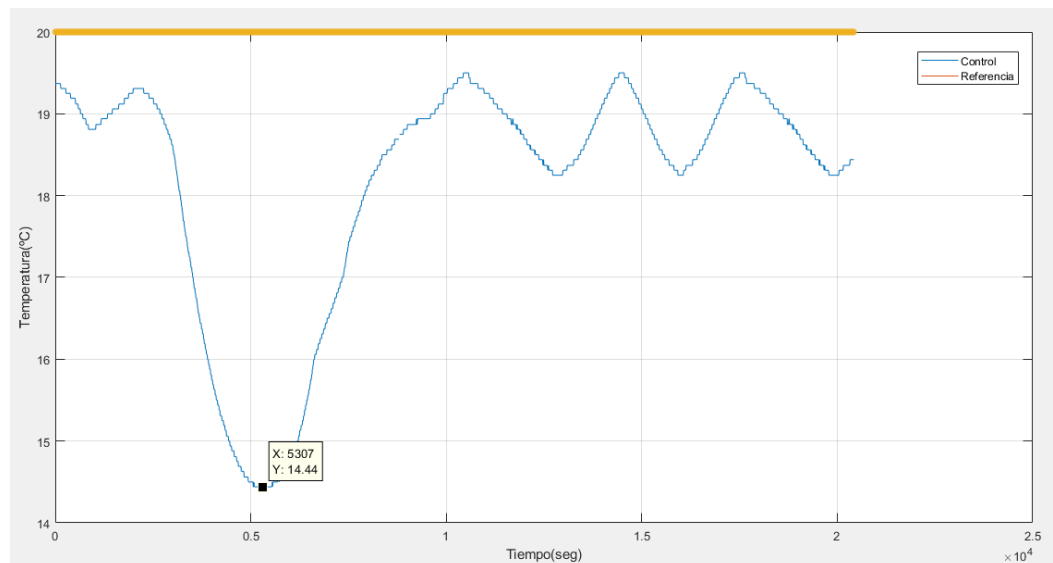


Figura 40. Perturbación control LQR
Fuente: Autores realizado en simulink

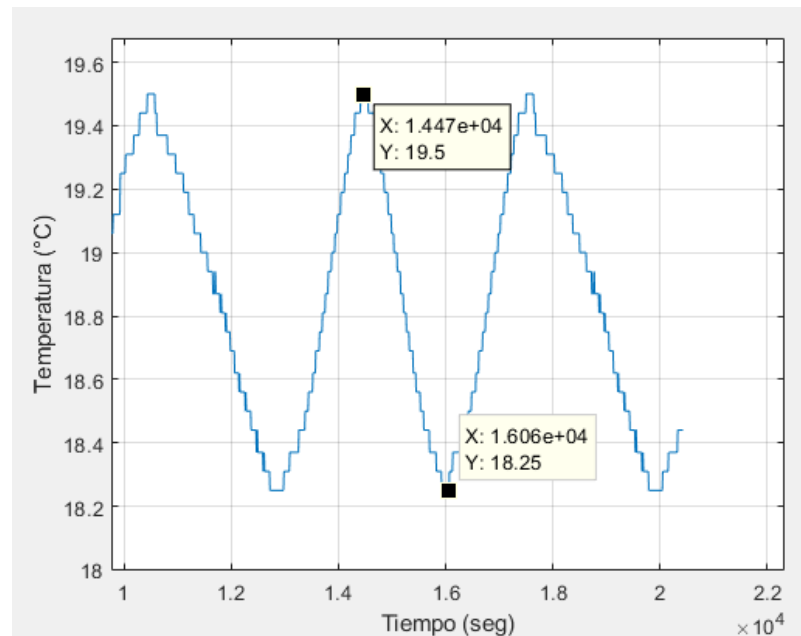


Figura 41. Control LQR perturbación acercamiento estabilización
Fuente: Autores realizado en Matlab

En la Figura 43, se puede apreciar que para el controlador LQR, cuando se presenta una perturbación, el sistema vuelve a la referencia en un tiempo aproximado de 15000 segundos, la señal de salida termina oscilando entre 19.5 °C y 18.25 °C en un periodo de 1864 segundos, esto nos da un error de estado estacionario medio de 18.87 °C, como se observa en la Figura 44.

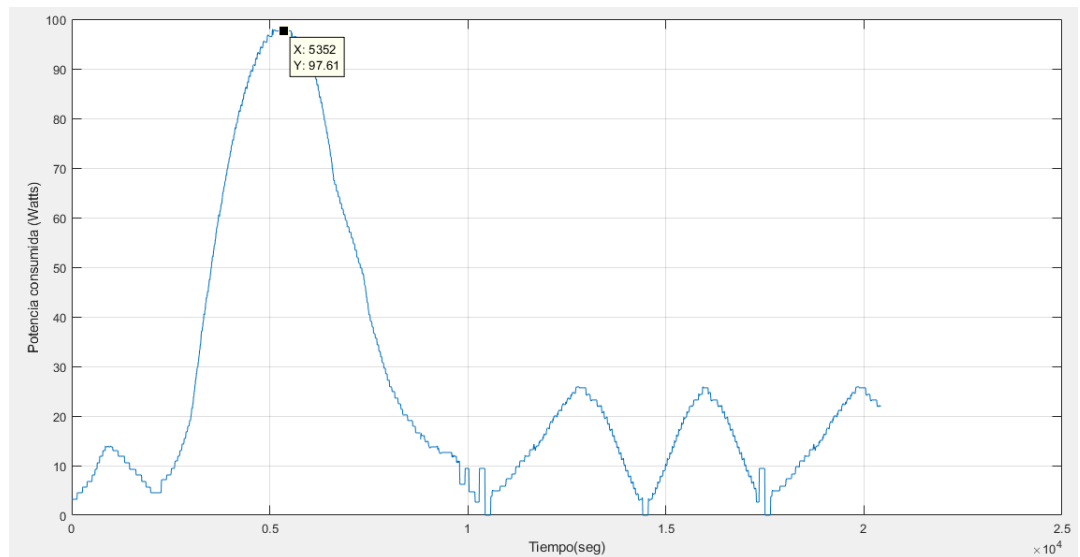


Figura 42. Consumo de energía durante perturbación control LQR
Fuente: Autores realizada en Matlab

La Figura 45 nos muestra el consumo de energía del controlador durante todo el proceso, cabe resaltar que el controlador contó con un consumo máximo de energía de 97.61 watt.

Teniendo en cuenta lo anterior en la Tabla 8 puede apreciarse la comparación del comportamiento de los dos controladores.

Tabla 8. Parametros de desempeño frente a perturbaciones

Estrategia de control	Tiempo de establecimiento	Sobrepaso máximo	Error de estado estacionario	Máximo consumo energético durante el transitorio
PID	30060 seg	28%	0.06°C	156.3watt
LQR	15000 seg	0%	1.13°C	97.62watt

Fuente: Autores

Como se evidencia, ambos controladores vuelven al punto de referencia luego de someter el sistema a perturbaciones. Se puede observar que el controlador PID genera sobre impulso aproximado al 28% y cuenta con un consumo máximo de energía elevado a comparación del LQR. Por otro lado, el control LQR es el controlador que responde más rápido, pero genera un error de estado estacionario el cual oscila con más lentitud esto es debido a que el control LQR es un control de estado estacionario proporcional el cual no cuenta con un buen rechazo a perturbaciones. Es de señalar que como no se encontraron trabajos reportados con esta técnica de control no se puede comparar dicho desempeño ya que en su estado estacionario ambos controladores presentan oscilaciones más o menos de un grado, una de las hipótesis como se dijo anteriormente es que el sensor se encuentra en la tierra y el actuador en el agua y la demora en la transferencia del calor entre estos elementos podría ser uno de los factores que promuevan este error en el estado estacionario.

Finalmente, se puede determinar que el controlador óptimo para esta planta fue el LQR pues posee un tiempo de establecimiento menor respecto al PID y muestra un menor consumo de energía. Además, el controlador LQR presenta una mayor estabilidad a perturbaciones puesto que su tiempo de establecimiento es menor y no cuenta con un sobre paso máximo que pueda afectar a las lombrices de la planta.

9. IMPACTO SOCIAL

Actualmente en Colombia se produce una gran cantidad de residuos orgánicos, debido entre algunas razones al aumento poblacional que se ha dado con el pasar de los tiempos; esta situación ha llevado al gobierno nacional a la búsqueda de nuevos espacios que se puedan utilizar como rellenos sanitarios, puesto que, los que existen no tienen la capacidad suficiente para almacenar tantos residuos.

Por lo anterior, se puede afirmar que la generación de tantos residuos orgánicos es una problemática que afecta directamente a la sociedad y necesita ser atendida con urgencia, por lo que como jóvenes interesados en la preservación del medio ambiente modificamos una planta de vermicompostaje con el fin de contribuir a la disminución de volumen de estos residuos industrializando su control.

Esta planta puede regular la temperatura del hábitat de la lombriz californiana favoreciendo la reproducción de las mismas para así generar mayor cantidad de compostaje gracias a que cuenta con un actuador y controlador que calientan el hábitat y lo mantiene a su temperatura ideal, este compostaje producido por las lombrices permite la reconstrucción de los suelos colombianos debido a que la demanda de pesticidas disminuiría y las personas lo remplazarían por el compost realizado por las lombrices que no maltrata la tierra si no que por el contrario la nutre y la hace más fértil; en otros términos podríamos llegar a denominarlo como un pesticida orgánico amigo del medio ambiente.

10. CONCLUSIONES

Luego de implementar cada uno de los controladores en la planta y de observar el comportamiento de éstos, se ha encontrado que, bajo los criterios de tiempo de establecimiento, sobre paso máximo y consumo máximo de energía, el control LQR presenta un mejor desempeño que el control PID. Se llega a esto gracias a que el control PID presenta un sobre paso máximo del 50% antes de estabilizarse lo cuál sería mortal para las lombrices; Además el control LQR frente a perturbaciones presenta un tiempo de estabilización de 15000 segundos, lo que representa la mitad del tiempo que le toma al controlador PID alcanzar la misma referencia. En cuanto a las señales de control, el regulador LQR posee una desventaja frente al PID pues cuentan con un error de estado estacionario. Es de señalar que como no se encontraron trabajos reportados con esta técnica una de las hipótesis de la oscilación en el estado estacionario es que el sensor se encuentra en la tierra y el actuador en el agua y la demora en la transferencia del calor entre estos elementos podría ser uno de los factores que promuevan este error.

Los controladores PID podrían tener un mejor desempeño si se aplicara una técnica de sincronización con el fin de mejorar el desempeño. Cabe aclarar que los métodos heurísticos como los usados en este documento para la sintonización de controladores PID representan sólo un punto de partida para el diseño de estos controladores, lo que hace que siempre sea necesario la aplicación de un ajuste fino para lograr que el lazo de control tenga el comportamiento deseado.

Cabe aclarar que, durante el proceso de identificación, se debe escoger una estructura de modelo que se aproxime al comportamiento del sistema, pero que a su vez no represente un modelo tan complejo pues esto dificulta el proceso de diseño de los controladores al aplicar técnicas de control que requieran cálculos matemáticos complejos.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es la correcta selección de los sensores y actuadores, pues éstos son los que permiten realizar el adecuado funcionamiento de los controladores, como se observó en la planta se implementaron dos actuadores, cada uno con potencias diferentes, el primer actuador demostró ser poco eficiente ya que contaba con una potencia muy baja lo que ocasionaba que la planta tardara demasiado en poderse controlar, sin embargo el actuador 2 contaba con una potencia más alta que permitía que la planta alcanzara su estado de estabilización de manera más rápida y óptima.

Por otro lado, la planta diseñada presentó un adecuado funcionamiento, porque permitía, adaptarse a la implementación del actuador sin que este interrumpiera su adecuado proceso.

Para finalizar, uno de los aportes más importantes del proyecto es disminuir la brecha entre los procesos biológicos y la tecnología, innovando en la implementación de sistemas de control en plantas de vermicompostaje dejando este proyecto como punto de partida para mejorar el control en las mismas.

11. TRABAJOS FUTUROS

Dentro de un trabajo de investigación es importante identificar las líneas de trabajo para dar continuidad al esfuerzo invertido. Por esto, esta sección pretende mostrar el trabajo futuro que es necesario realizar para seguir avanzando en el conocimiento de la planta de vermicompostaje. Estas líneas pueden resumirse en los puntos siguientes:

- Diseño e implementación de otros tipos de controladores óptimos para así comparar y determinar cuál control posee un mejor rendimiento desde los parámetros expuestos en este documento.
- Implementación de celdas fotovoltaicas o algún medio de energía renovable con el fin, que la planta se alimente de esta y sea un proceso totalmente viable para la conservación del medio ambiente.
- Estudiar otros actuadores para mantener el hábitat de la lombriz a la temperatura adecuada para así utilizar el que cumpla con la mayor eficiencia y menor consumo de energía.
- Crear un diseño de la planta más amigable y llamativo al público para incentivar el uso de las mismas.
- Implementar un control PID vectorial para comparar su rechazo a perturbaciones.
- Implementación de un control de humedad
- Implementar dicho control en un sistema embebido

12. REFERENCIAS

- [1] A. J. Padilla, «Waste disposal and households' heterogeneity. Identifying factors,» ELSEVIER, nº 74, pp. 16-36, 2017.
- [2] J. Penagos, J. Adarraga, D. Aguas y E. Molina, «Reducción de los Residuos Sólidos Orgánicos en Colombia,» Ingeniare, nº 11, pp. 37-44, 2011.
- [3] Super servicios publicos domiciliarios, «Disposición Final de residuos solidos en colombia 2013,» pp. 5-45, 2013.
- [4] M. P. M. Cuesta, «DISEÑO DE UN PLAN INTEGRAL DE GESTIÓN DE RESIDUOS SOLIDOS PARA,» Universidad Militar Nueva Granada, 2016.
- [5] M. Pirsahed, T. Khosrav y K. Sharaf, «Domestic scale vermicomposting for solid waste,» Pirsahab et al. International Journal Of Recycling of Organic Waste in Agriculture 2, pp. 2-4, 2013.
- [6] «RESPUESTA AGRONÓMICA DE Zea mays L. y Phaseolus vulgaris L. A,» Revista Luna Azul, nº 37, pp. 16-29, 2013.
- [7] E. M. Ortega Valencia y A. M. Albornoz Pineda, Evaluación De La Eficiencia De La Lombriz Roja Californiana E. foetida Para Estabilización De Lodos Residuales De La PTAR Salitre, Bogota: Universidad Santo Tomas, 2017.
- [8] G. Soto y C. Muñoz, «Consideraciones teóricas y prácticas sobre el,» Manejo Integrado de Plagas y Agroecología, nº 65, pp. 123-129, 2002.
- [9] Z. Jianhua, R. Mifeng y X. Jing, «Multi-objective optimal temperature control for Organic Rankine Cycle systems,» de Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shenyang, 2014.
- [10] P. B. Márquez, M. J. Díaz Blanco y F. Cabrera Capitán, «Factores que afectan al proceso de Compostaje,» Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (IRNAS), nº 10, pp. 15-20, 2016.
- [11] P. S. R. Paz, Control óptimo de procesos: Enfoque Hamiltoniano: Resultados teóricos y aplicaciones (Spanish Edition), España: Editorial Académica Española, 2012.
- [12] B. Saravia y . N. Raúl, Control De Temperatura De Un Reactor Químico Utilizando Estrategias De Control Optimo Y Adaptivo, Perú: Universidad Nacional del Callao, 2011.

- [13] N. P. Ramirez, J. E. M. Gutierrez Arias, J. E. Flores Mena, M. Morin Castillo, I. Lopez Cruz y R. Alba Flores, «Optimal control of temperature in a tomato greenhouse,» European Journal of Operational Research, nº 12, 2013.
- [14] V. Radu, A. Avram y V. Anghel, «Autotuned PID for accurate temperature control — A hot approach,» de Semiconductor Conference (CAS), Romania, 2016.
- [15] J. M. G. Arias, . N. d. León Puig , G. Osorio, E. Mena y J. Camacho, «Optimal control law for the concentration of carbon dioxide in a tomato greenhouse and optimal-tuning PI control as LQR for the automatic device,» International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences, nº 10, pp. 7-17, 2016.
- [16] F. Gouadria, L. Sbita y N. Sigrimis, «Comparison between self-tuning fuzzy PID and classic PID controllers for greenhouse system,» de International Conference on Green Energy and Conversion Systems, Túnez, 2017.
- [17] W. Chao, L. Daxuan y D. Hongbing , «Humidification apparatus and data analysis for supersonic condensation of moist gas,» de IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), Turín, Italia, 2017.
- [18] H. Chamorro, J. Soriano, L. Morales y N. Diaz, «Control Optimo para un Conversor Buck Boost,» de 7º encuentro de Energía, Potencia, Instrumentación y Medidas, Montevideo-Uruguay, 2018.
- [19] J. Ramirez, M. Salamanca y O. Higuera , «Control óptimo para el arranque en tiempo mínimo de un motor de inducción,» Con-Ciencias, vol. 13, nº 25, pp. 50-59, 2010.
- [20] J. Perez, Control óptimo de generadores, Mexico , 2017.
- [21] R. O. S. M. A. T. S. J. G. R. S. J. L. M. G. M. Longoria Ramírez, «Diseño, construcción y prueba de un prototipo automático para compostaje.,» Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia [en línea], 2014.
- [22] O. E. Rojas Nova, M. P. Sarabia Aguirre y E. E. Santos Ramirex, Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia [en línea], Mexico,D.F: Instituto Politecnico Nacional , 2012.
- [23] M. .Nair y D. Ashwath , Temperature Monitoring Using Sun SPOTS Applied, Estados Unidos , 2012.

- [24] D. L. Sobrino., D. L. Sobrino, Construcción de un invernadero y la implementación de diferentes técnicas de control para la humedad y la temperatura, Madrid, 2019.
- [25] B. A. A. Amauri, «Diseño de un sistema de control de temperatura y humedad relativa, basado en PID en un ambiente cerrado con fines agrícolas,» 2018.
- [26] A. G. N. J. V. Rodrigues, «Diseño e implementación de un prototipo de un sistema de control adaptativo para una planta de temperatura,» 2006.
- [27] M. M. Ortega, «Modelamiento y control digital de temperatura para horno eléctrico,» 2010.
- [28] J. M. Duarte, «Reconfiguración del sistema de control de temperatura y concentración de oxígeno en un bioreactor,» 2011.
- [29] L. R. Rodriguez, «Control óptimo de un reactor por lotes con alimentación para la producción de penicilina,» Bogotá, 2011, pp. 1-14.
- [30] H. L. H. Z. F. C. L. D. y. Q. X. C. Cai, ««Microgrid multi-source coordination optimal control based on multi-scenarios,»,» de J1457-1461.Eng, 2017.
- [31] ««How to run biotransformations At the optimal temperature control or isothermally? Mathematical assessment,»,».
- [32] P. y. M. R. O. Dana, ««Design and analysis automatic temperature control in the broiler poultry farm based on wireless sensor network,» de The Institute of Electrical and Electronics Engineers,» de Inc. (IEEE) Conference Proceedings , Indonesia, 2017, p. Yogyakarta.
- [33] J. P. G. Tamayo, «Diseño e implementación de controladores,» Scientia et Technica Año XXI, vol. 21, nº 3, Septiembre de 2016.
- [34] K. Ogata, de Ingeniería de Control Moderno , vol. 4 Edición, Madrid, Pearson Educación, 2003, pp. 855-943.
- [35] J. M. Tatiana Poveda, «Diseño e implementación de un control LQR con la tarjeta Raspberry Pi,» Universidad Distrital, Bogotá, 2016.
- [36] N. L. G. O. E. M. y. J. Arias, « «Optimal Control law for the concentration of carbon dioxide in a tomato greenhouse and optimal-tuning PI control as LQR for the automatic device,» de International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Science,» 2016.

- [37] J. Ramirez, «Optimal control of temperature in a tomato greenhouse,» European Journal of Operational Research,» 12.
- [38] L. Y. D. H. W. Chao, «Humidification apparatus and data analysis for supersonic condensation of moist gas, Italia: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference,» 2017.
- [39] B. Y. N. Raul, «Control De Temperatura De Un Reactor Quimico Utilizando Estrategias De Control Optimo Y Adaptativo, Peru: Universidad Nacional del Callao,» 2011.

13. ANEXOS

- Anexo 1, Programa en Arduino de la identificación de la planta

```
//Identificación planta
#include <OneWire.h>
#include <avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>
#define pasozero 2
#define disparo 9
//inicialización de variables
int DS18S20_Pin = 7;
int valorsalida =0;
int tiemposemicycle =16000;
int tiempodisparo =500;
float temperature_read=0;
float valorfinal;
//Constante proporcional
float kp = 20;
float PID_p = 0;
float last_kp = 0;
float set_temperature = 20; //set_point controlador
float error = 0;
float previous_error = 0;
float elapsedTime, Time, timePrev;
////////////////////////
OneWire ds(DS18S20_Pin);
void setup() {
    Time = millis();
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pasozero,INPUT);
    digitalWrite(pasozero,HIGH);
    pinMode(disparo, OUTPUT);
    attachInterrupt(0,pasoporzero, RISING);
}
void loop() {
    temperature_read = getTemp(); // el valor de la salida del sensor de temperatura
    en el instante actual
    Serial.println("Temperatura:");
    Serial.println(temperature_read);
```

```

    PID_error = set_temperature - temperature_read ; 5. Se calcula el error para el
    instante actual kT, como la diferencia de la referencia y la salida del sistema
    Serial.println("Error");
    Serial.println(PID_error);
    PID_p = 0.01*kp * PID_error; // se calcula la ganancia del proporcional
    if(PID_p < 0)
    { PID_p = 0; }
    if(PID_p > 40)
    { PID_p = 40; } //se satura segun el rango maximo permitido
    valorfinal= ((PID_p -40)*-1);
    valorsalida= map(valorfinal,0,40,0,7438);// se mapea la señal al tiempo de
    apertura de la señal senoidal
    previous_error = PID_p; // se actualiza el valor anterior
    Serial.println("Valor PID");
    Serial.println(PID_p);

    delay(2500);
}
void pasoporzero(){ //Disparo del triac
    delayMicroseconds(valorsalida);
    digitalWrite(disparo,HIGH);
    delayMicroseconds(tiempodisparo);
    digitalWrite(disparo,LOW);
}

float getTemp(){//Lectura sensor de temperatura (retorna el valor en °C)
    byte data[12];
    byte addr[8];

    if ( !ds.search(addr)){// Entra si el sensor no lee un valor coerente
        Serial.println("Desconectado");
        ds.reset_search();
        return -1000;
    }

    if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]){// Entra si el sensor no lee un valor
    coerente
        Serial.println("No valido");
        return -1000;
    }
}

```

```
    if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) { // Entra si el sensor no lee un valor
coerente
        Serial.print("No lo reconoce");
        return -1000;
    }

    ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0x44,1); // realiza la conversión

    byte present = ds.reset();
    ds.select(addr);
    ds.write(0xBE);

    for (int i = 0; i < 9; i++) {
        data[i] = ds.read();
    }

    ds.reset_search();

    byte MSB = data[1];
    byte LSB = data[0];

    float tempRead = ((MSB << 8) | LSB);
    float TemperatureSum = tempRead / 16;

    return TemperatureSum;

}
```

- Anexo 2, Datos experimentales tomados con el actuador 1 para la identificación de la planta

Temperatura	Tiempo
6,81	0
6,81	40
6,69	80
6,56	120
6,5	160
6,5	200
6,44	240
6,44	280
6,38	320
6,38	360
6,38	400
6,38	440
6,38	480
6,38	520
6,38	560
6,38	600
6,38	640
6,38	680
6,38	720
6,38	760
6,38	800
6,38	840
6,38	880
6,38	920
6,38	960
6,38	1000
6,38	1040
6,38	1080
6,38	1120
6,38	1160
6,38	1200
6,38	1240
6,38	1280
6,38	1320
6,38	1360
6,38	1400
6,38	1440

6,38	1480
6,38	1520
6,38	1560
6,44	1600
6,38	1640
6,44	1680
6,44	1720
6,44	1760
6,44	1800
6,44	1840
6,44	1880
6,44	1920
6,44	1960
6,44	2000
6,44	2040
6,44	2080
6,44	2120
6,44	2160
6,5	2200
6,44	2240
6,5	2280
6,5	2320
6,5	2360
6,5	2400
6,5	2440
6,5	2480
6,5	2520
6,5	2560
6,5	2600
6,5	2640
6,56	2680
6,56	2720
6,56	2760
6,56	2800
6,56	2840
6,56	2880
6,56	2920
6,56	2960
6,63	3000
6,63	3040
6,63	3080

6,63	3120
6,63	3160
6,63	3200
6,63	3240
6,69	3280
6,69	3320
6,69	3360
6,69	3400
6,69	3440
6,69	3480
6,75	3520
6,75	3560
6,75	3600
6,75	3640
6,75	3680
6,75	3720
6,81	3760
6,81	3800
6,81	3840
6,81	3880
6,81	3920
6,88	3960
6,88	4000
6,88	4040
6,88	4080
6,94	4120
6,94	4160
6,94	4200
7	4240
7	4280
7	4320
7	4360
7,06	4400
7,06	4440
7,06	4480
7,13	4520
7,13	4560
7,13	4600
7,19	4640
7,19	4680
7,19	4720

7,25	4760
7,25	4800
7,25	4840
7,31	4880
7,31	4920
7,31	4960
7,38	5000
7,38	5040
7,44	5080
7,44	5120
7,44	5160
7,5	5200
7,5	5240
7,56	5280
7,56	5320
7,63	5360
7,63	5400
7,69	5440
7,69	5480
7,75	5520
7,75	5560
7,75	5600
7,81	5640
7,88	5680
7,88	5720
7,94	5760
7,94	5800
8	5840
8	5880
8,06	5920

- Anexo 3, Datos experimentales tomados con el actuador 2 para la identificación de la planta

Temperatura	Tiempo
5,75	0
5,69	6
5,75	12
5,75	18
5,69	24
5,69	30
5,69	36
5,75	42
5,69	48
5,69	54
5,69	60
5,75	66
5,69	72
5,69	78
5,69	84
5,69	90
5,69	96
5,69	102
5,69	108
5,69	114
5,69	120
5,69	126
5,69	132
5,69	138
5,69	144
5,69	150
5,69	156
5,75	162
5,69	168
5,69	174
5,69	180
5,69	186
5,69	192
5,69	198
5,69	204
5,69	210
5,69	216

5,69	222
5,69	228
5,69	234
5,69	240
5,69	246
5,69	252
5,69	258
5,69	264
5,69	270
5,69	276
5,69	282
5,69	288
5,69	294
5,69	300
5,69	306
5,69	312
5,69	318
5,69	324
5,69	330
5,69	336
5,69	342
5,69	348
5,69	354
5,69	360
5,69	366
5,69	372
5,69	378
5,69	384
5,69	390
5,69	396
5,69	402
5,69	408
5,69	414
5,69	420
5,69	426
5,69	432
5,69	438
5,69	444
5,69	450
5,69	456
5,69	462

5,69	468
5,69	474
5,69	480
5,69	486
5,69	492
5,69	498
5,69	504
5,69	510
5,69	516
5,69	522
5,69	528
5,69	534
5,69	540
5,69	546
5,69	552
5,69	558
5,69	564
5,69	570
5,69	576
5,69	582
5,69	588
5,69	594
5,69	600
5,69	606
5,69	612
5,69	618
5,69	624
5,69	630
5,69	636
5,69	642
5,69	648
5,69	654
5,69	660
5,69	666
5,69	672
5,69	678
5,69	684
5,69	690
5,69	696
5,69	702
5,69	708

5,69	714
5,69	720
5,69	726
5,69	732
5,69	738
5,69	744
5,69	750
5,69	756
5,69	762
5,69	768
5,69	774
5,69	780
5,69	786
5,69	792
5,69	798
5,69	804
5,69	810
5,69	816
5,69	822
5,69	828
5,69	834
5,69	840
5,69	846
5,75	852
5,69	858
5,69	864
5,75	870
5,75	876
5,75	882
5,75	888
5,75	894
5,75	900
5,75	906
5,75	912
5,75	918
5,75	924
5,75	930
5,75	936
5,75	942
5,75	948
5,75	954

5,75	960
5,75	966
5,75	972
5,75	978
5,75	984
5,75	990
5,75	996
5,75	1002
5,75	1008
5,75	1014
5,75	1020
5,75	1026
5,75	1032
5,75	1038
5,75	1044
5,81	1050
5,81	1056
5,81	1062
5,81	1068
5,81	1074
5,81	1080
5,81	1086
5,81	1092
5,81	1098
5,81	1104
5,81	1110
5,81	1116
5,81	1122
5,81	1128
5,81	1134
5,81	1140
5,81	1146
5,81	1152
5,88	1158
5,88	1164
5,88	1170
5,88	1176
5,88	1182
5,88	1188
5,88	1194
5,88	1200

5,88	1206
5,88	1212
5,88	1218
5,88	1224
5,88	1230
5,94	1236
5,94	1242
5,94	1248
5,94	1254
5,94	1260
5,94	1266
5,94	1272
5,94	1278
5,94	1284
5,94	1290
5,94	1296
5,94	1302
6	1308
6	1314
6	1320
6	1326
6	1332
6	1338

- Anexo 4, Programa en Arduino del controlador PID

```
//Control PID tesis

#include <OneWire.h>

#include <avr/io.h>

#include<avr/interrupt.h>

#define pasozero 2

#define disparo 9

//inicialización de variables

int DS18S20_Pin = 7;

int valorsalida =0;

int tiemposemicycle =16000;

int tiempodisparo =500;

float temperature_read=0;

float valorfinal;

//Constantes PID

float kp = 30;  int ki = 3;  int kd = 1000;

float PID_p = 0;  int PID_i = 0;  int PID_d = 0;

float last_kp = 0;

float last_ki = 0;

float last_kd = 0;

float set_temperature = 20; //set_point controlador

float PID_error = 0;

float previous_error = 0;

float elapsedTime, Time, timePrev;

float PID_value = 0;

////////////////////////////////////

OneWire ds(DS18S20_Pin);

void setup() {

    Time = millis();

    Serial.begin(9600);
```



```

pinMode(pasozero,INPUT);
digitalWrite(pasozero,HIGH);
pinMode(disparo, OUTPUT);
attachInterrupt(0,pasoporcero, RISING);

}

void loop() {

    temperature_read = getTemp(); // el valor de la salida del sensor de temperatura en el instante
    actual

    Serial.println("Temperatura:");
    Serial.println(temperature_read);

    PID_error = set_temperature - temperature_read ; 5. Se calcula el error para el instante actual kT,
    como la diferencia de la referencia y la salida del sistema

    Serial.println("Error");
    Serial.println(PID_error);

    PID_p = 0.01*kp * PID_error; // se calcula la ganancia del proporcional
    PID_i = 0.01*PID_i + (ki * PID_error); // se calcula la ganancia del integral
    timePrev = Time; // se le da el valor a una variable del tiempo anterior
    Time = millis(); //se toma el nuevo tiempo

    elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000; //se calcula el tiempo de muestreo, que es la diferencia
    entre el tiempo anterior y el actual

    PID_d = 0.01*kd*((PID_error - previous_error)/elapsedTime); // se calcula la ganancia del derivativo
    PID_value = PID_p + PID_i + PID_d; // se suman las ganancias hallando el valor final del PID
    if(PID_value < 0)
    { PID_value = 0; }
    if(PID_value > 40)
    { PID_value = 40; } //se satura segun el rango maximo permitido
    valorfinal= ((PID_value -40)*-1);

    valorsalida= map(valorfinal,0,40,0,7438);// se mapea la señal al tiempo de apertura de la señal
    senoidal

    previous_error = PID_error; // se actualiza el valor anterior

    Serial.println("Valor PID");

```

```

Serial.println(PID_value);

delay(2500);
}

void pasoporcero(){ //Disparo del triac
    delayMicroseconds(valorsalida);
    digitalWrite(disparo,HIGH);
    delayMicroseconds(tiempodisparo);
    digitalWrite(disparo,LOW);
}

float getTemp(){//Lectura sensor de temperatura (retorna el valor en °C)
    byte data[12];
    byte addr[8];

    if ( !ds.search(addr)){// Entra si el sensor no lee un valor coerente
        Serial.println("Desconectado");
        ds.reset_search();
        return -1000;
    }

    if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]){// Entra si el sensor no lee un valor coerente
        Serial.println("No valido");
        return -1000;
    }

    if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {// Entra si el sensor no lee un valor coerente
        Serial.print("No lo reconoce");
        return -1000;
    }
}

```

```
ds.reset();  
ds.select(addr);  
ds.write(0x44,1); // realiza la conversión
```

```
byte present = ds.reset();  
ds.select(addr);  
ds.write(0xBE);
```

```
for (int i = 0; i < 9; i++) {  
    data[i] = ds.read();  
}
```

```
ds.reset_search();
```

```
byte MSB = data[1];  
byte LSB = data[0];
```

```
float tempRead = ((MSB << 8) | LSB);  
float TemperatureSum = tempRead / 16;
```

```
return TemperatureSum;
```

```
}
```

- Anexo 5, Datos experimentales tomados de la respuesta del controlador PID

Temperatura	Error	Potencia PID	Tiempo	Potencia real	Potencia consumida	% Potencia consumida	Referencia
8,75	11,25	37,38	0	377,6	352,8672	93,45	20
8,69	11,31	37,39	20	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	40	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	60	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	80	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	100	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	120	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	140	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	160	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	180	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	200	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	220	377,6	352,9616	93,475	20
8,69	11,31	37,39	240	377,6	352,9616	93,475	20
8,63	11,38	37,41	260	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	280	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	300	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	320	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	340	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	360	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	380	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	400	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	420	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	440	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	460	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	480	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	500	377,6	353,1504	93,525	20
8,63	11,38	37,41	520	377,6	353,1504	93,525	20
8,56	11,44	37,43	540	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	560	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	580	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	600	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	620	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	640	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	660	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	680	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	700	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	720	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	740	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	760	377,6	353,3392	93,575	20

8,56	11,44	37,43	780	377,6	353,3392	93,575	20
8,56	11,44	37,43	800	377,6	353,3392	93,575	20
8,5	11,5	37,45	820	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	840	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	860	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	880	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	900	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	920	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	940	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	960	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	980	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1000	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1020	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1040	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1060	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1080	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1100	377,6	353,528	93,625	20
8,5	11,5	37,45	1120	377,6	353,528	93,625	20
8,44	11,56	38,47	1140	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1160	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1180	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1200	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1220	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1240	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1260	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1280	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1300	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1320	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1340	377,6	363,1568	96,175	20
8,44	11,56	38,47	1360	377,6	363,1568	96,175	20
8,38	11,63	38,49	1380	377,6	363,3456	96,225	20
8,44	11,56	38,47	1400	377,6	363,1568	96,175	20
8,38	11,63	38,49	1420	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1440	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1460	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1480	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1500	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1520	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1540	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1560	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1580	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1600	377,6	363,3456	96,225	20

8,38	11,63	38,49	1620	377,6	363,3456	96,225	20
8,38	11,63	38,49	1640	377,6	363,3456	96,225	20
8,31	11,69	38,51	1660	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1680	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1700	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1720	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1740	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1760	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1780	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1800	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1820	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1840	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1860	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1880	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1900	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1920	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1940	377,6	363,5344	96,275	20
8,31	11,69	38,51	1960	377,6	363,5344	96,275	20
8,25	11,75	38,53	1980	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2000	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2020	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2040	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2060	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2080	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2100	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2120	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2140	377,6	363,7232	96,325	20
8,25	11,75	38,53	2160	377,6	363,7232	96,325	20
8,19	11,81	38,54	2380	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2400	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2420	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2440	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2460	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2480	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2500	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2520	377,6	363,8176	96,35	20
8,19	11,81	38,54	2540	377,6	363,8176	96,35	20
8,13	11,88	38,56	2560	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2580	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2600	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2620	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2640	377,6	364,0064	96,4	20

8,13	11,88	38,56	2660	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2680	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2700	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2720	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2740	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2760	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2780	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2800	377,6	364,0064	96,4	20
8,13	11,88	38,56	2820	377,6	364,0064	96,4	20
8,06	11,94	39,58	2840	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2860	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2880	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2900	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2920	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2940	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2960	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	2980	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	3000	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	3020	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	3040	377,6	373,6352	98,95	20
8,06	11,94	39,58	3060	377,6	373,6352	98,95	20
8	12	39,6	3080	377,6	373,824	99	20
8	12	39,6	3100	377,6	373,824	99	20
8	12	39,6	3120	377,6	373,824	99	20
8	12	39,6	3140	377,6	373,824	99	20

- Anexo 6, Programa en Arduino, implementación LQR

```
//Control LQR tesis
#include <OneWire.h>
#include <avr/io.h>
#include<avr/interrupt.h>
#define pasozero 2
#define disparo 9
//Inicialización variables
int DS18S20_Pin = 7;
int valorsalida =0;
float valorfinal2=0;
int tiemposemicycle =16000;
int tiempodisparo =500;
float temperature_read=0;
float valorfinal=0;
int dt= 25000;
float valorlqr=0;
float Time=0, timePrev=0,elapsedTime=0;
//Matrices
float A[2][2] = {{-0.0008932e-3,-0.0003076}, {0.0004883,0.0}};
float B[2][2] = {{0,0.0156},{0,0.0}};
float C[2] = {0.0,0.0237};
float K[2] ={0.9746,0.9805};
long long int L[2][2] ={{0, 8637900},{0, 800}};
float set_point = 20;
float X[2][2]={0.0,0.0 },{0.0,0.0}};
float Xant[2][2]={0.0,0.0 },{0.0,0.0}};
float U[2] ={0.0 , 0.0};
float AX1[2][2]={0.0,0.0},{0.0,0.0}};
```



```

float BU[2][2]={{0.0,0.0},{0.0,0.0}};
float LYCX[2][2]={{0.0,0.0},{0.0,0.0}};
float Xant5[2][2]={{0.0,0.0},{0.0,0.0}};
float YCX[2]={0.0,0.0};
float SUBTOTAL[2][2]={{0.0,0.0},{0.0,0.0}};
float TOTALX[2][2]={{0.0,0.0},{0.0,0.0}};
float CX[2]={0.0,0.0};
float KSET[2]={0.0,0.0};
float CX1[2]={0.0,0.0};
int Y=20;
float temporal=0.0;
////////////////////////////////////
OneWire ds(DS18S20_Pin);
void setup() {
    Time = millis();
    Serial.begin(9600);
    pinMode(pasozero,INPUT);
    digitalWrite(pasozero,HIGH);
    pinMode(disparo, OUTPUT);
    attachInterrupt(0,pasoporcero, RISING);

}

void loop() {
    temperature_read = getTemp();// Lectura sensor temperatura
    if ((temperature_read <50)|| (temperature_read > 0))
        temperature_read=temperature_read;
    else
        temperature_read=20.0;

    //Multiplicacion matriz A*xant1

```

```

for (int i = 0 ; i < 2 ; i++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        temporal = 0 ;
        for (int j = 0 ; j < 2 ; j++ ) //j para realizar la multiplicacion de
            {
                //los elementos de la matriz
                temporal += A[i][j] * Xant[j][k];
                AX1[i][k] = temporal ;
            }
    }
}

```

//Mutlplicación B*U

```

for (int i = 0 ; i < 2 ; i++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        temporal = 0 ;
        for (int j = 0 ; j < 2 ; j++ ) //j para realizar la multiplicacion de
            {
                //los elementos de la matriz
                temporal += B[i][j] * U[k];
                BU[i][k] = temporal ;
            }
    }
}

```

//Y -C *Xant

// C*Xant

```

for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
{
    temporal = 0 ;
    for (int j = 0 ; j < 2 ; j++ ) //j para realizar la multiplicacion de
        {
            //los elementos de la matriz
            temporal += C[j]*Xant[j][k];
            CX1[k]= temporal ;
        }
}

```

```

for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ )
{
    YCX[w]=temperature_read-CX1[w];
}

```

```

for (int i = 0 ; i < 2 ; i++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        temporal = 0 ;
        for (int j = 0 ; j < 2 ; j++ ) //j para realizar la multiplicacion de
            {
                //los elementos de la matriz
                temporal += L[i][j] * YCX[k];
                LYCX[i][k] = temporal ;
            }
    }
}

```

```

}
//// TOTAL (A*xhat1 + B*u + L*(Y-C*xhat1)
for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int r = 0 ; r < 2 ; r++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        SUBTOTAL[w][r]=AX1[w][r]+ BU[w][r]+LYCX[w][r];
    }
}

timePrev = Time;
Time = millis();
elapsedTime = (Time - timePrev) / 1000; // Tiempo de muestreo
Serial.println(elapsedTime*0.01);
for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int r = 0 ; r < 2 ; r++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        TOTALX[w][r]=0.05*SUBTOTAL[w][r];
    }
}

// TOTAL xhat1 + 5* (A*xhat1 + B*u + L*(Y-C*xhat1))
for (int i = 0 ; i < 2 ; i++ ) //i para las filas de la matriz resultante
{
    for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
    {
        X[i][k] = Xant[i][k]+ TOTALX[i][k];
    }
}

```

```
//hallar salida
```

```
//C*xhat
```

```
for (int k = 0 ; k < 2 ; k++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
```

```
{
```

```
    temporal = 0 ;
```

```
    for (int j = 0 ; j < 2 ; j++ ) //j para realizar la multiplicacion de
```

```
        {                                //los elementos de la matriz
```

```
            temporal += C[j]*X[j][k];
```

```
            CX[k]= temporal ;
```

```
        }
```

```
    }
```

```
//K*set
```

```
for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ )
```

```
{
```

```
    KSET[w]=K[w]*set_point;
```

```
}
```

```
//U SALIDA
```

```
for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ )
```

```
{
```

```
    U[w]=-CX[w]+KSET[w];
```

```
}
```

```
for (int w = 0 ; w < 2 ; w++ ) //i para las filas de la matriz resultante
```

```
{
```

```
    for (int r = 0 ; r < 2 ; r++ ) // k para las columnas de la matriz resultante
```

```
    {
```

```

        Xant[w][r]=X[w][r];
    }
}

valorfinal= U[1]; // Valor final control
if(valorfinal < 0)
{   valorfinal = 0;   }
if(valorfinal > 20)
{   valorfinal = 20;   }
valorfinal2=((valorfinal -20)*-1);// satura segun rango maximo permitido
valorsalida= map(valorfinal2,0,20,0,7438); // se mapea la señal con el tiempo de disparo
Serial.print("Temperatura :");
Serial.print(temperature_read );
Serial.print(": Valor potencia :");
Serial.print(valorfinal);
Serial.print("\r\n");

delay(1000);
}

void pasoporzero(){ //Disparo del triac
    delayMicroseconds(valorsalida);
    digitalWrite(disparo,HIGH);
    delayMicroseconds(tiempodisparo);
    digitalWrite(disparo,LOW);
}

float getTemp(){//Lectura sensor de temperatura (retorna el valor en °C)
    byte data[12];
    byte addr[8];

    if ( !ds.search(addr)) {// Entra si el sensor no lee un valor coerente

```

```
    Serial.println("Desconectado");  
    ds.reset_search();  
    return -1000;  
}
```

```
if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) { // Entra si el sensor no lee un valor coerente  
    Serial.println("No valido");  
    return -1000;  
}
```

```
if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) { // Entra si el sensor no lee un valor coerente  
    Serial.print("No lo reconoce");  
    return -1000;  
}
```

```
ds.reset();  
ds.select(addr);  
ds.write(0x44,1); // realiza la conversión
```

```
byte present = ds.reset();  
ds.select(addr);  
ds.write(0xBE);
```

```
for (int i = 0; i < 9; i++) {  
    data[i] = ds.read();  
}
```

```
ds.reset_search();
```

```
byte MSB = data[1];
```

```
byte LSB = data[0];
```

```
float tempRead = ((MSB << 8) | LSB);
```

```
float TemperatureSum = tempRead / 16;
```

```
return TemperatureSum;
```

```
}
```


- Anexo 7, Datos experimentales tomados de la respuesta del control LQR

Temperatura	Potencia	Tiempo	Potencia	Potencia real	% Potencia consumida
3,44	16,17	0	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	9	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	18	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	27	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	36	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	45	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	54	377,6	305,2896	80,85
3,38	16,23	63	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,25	72	377,6	306,8	81,25
3,38	16,25	81	377,6	306,8	81,25
3,38	16,25	90	377,6	306,8	81,25
3,38	16,24	99	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	108	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	117	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	126	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	135	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	144	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,24	153	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,23	162	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	171	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	180	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	189	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	198	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	207	377,6	306,4224	81,15
3,31	16,29	216	377,6	307,5552	81,45
3,38	16,25	225	377,6	306,8	81,25
3,38	16,24	234	377,6	306,6112	81,2
3,31	16,29	243	377,6	307,5552	81,45
3,38	16,25	252	377,6	306,8	81,25
3,31	16,29	261	377,6	307,5552	81,45
3,31	16,31	270	377,6	307,9328	81,55
3,31	16,31	279	377,6	307,9328	81,55
3,31	16,31	288	377,6	307,9328	81,55
3,31	16,3	297	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	306	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	315	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	324	377,6	307,744	81,5

3,31	16,3	333	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	342	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	351	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	360	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	369	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	378	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	387	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	396	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	405	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	414	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	423	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	432	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	441	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	450	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	459	377,6	307,744	81,5
3,25	16,36	468	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,38	477	377,6	309,2544	81,9
3,25	16,38	486	377,6	309,2544	81,9
3,25	16,37	495	377,6	309,0656	81,85
3,25	16,37	504	377,6	309,0656	81,85
3,25	16,37	513	377,6	309,0656	81,85
3,25	16,36	522	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	531	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	540	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	549	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	558	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	567	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	576	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	585	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	594	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	603	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	612	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	621	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	630	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	639	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	648	377,6	308,8768	81,8
3,19	16,42	657	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,44	666	377,6	310,3872	82,2
3,25	16,38	675	377,6	309,2544	81,9
3,25	16,36	684	377,6	308,8768	81,8
3,19	16,41	693	377,6	309,8208	82,05

3,25	16,37	702	377,6	309,0656	81,85
3,19	16,42	711	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,43	720	377,6	310,1984	82,15
3,19	16,43	729	377,6	310,1984	82,15
3,19	16,43	738	377,6	310,1984	82,15
3,19	16,43	747	377,6	310,1984	82,15
3,19	16,43	756	377,6	310,1984	82,15
3,19	16,42	765	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	774	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	783	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	792	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	801	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	810	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	819	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	828	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	837	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	846	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	855	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	864	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	873	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	882	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	891	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	900	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	909	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	918	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	927	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	936	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	945	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	954	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	963	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	972	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	981	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	990	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	999	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1008	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1017	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1026	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1035	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1044	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1053	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1062	377,6	310,0096	82,1

3,19	16,42	1071	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1080	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1089	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1098	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1107	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1116	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1125	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1134	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1143	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1152	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1161	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1170	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1179	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1188	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1197	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1206	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1215	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1224	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1233	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1242	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1251	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1260	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1269	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1278	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1287	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1296	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1305	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1314	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1323	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1332	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1341	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1350	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1359	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1368	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1377	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1386	377,6	310,0096	82,1
3,19	16,42	1395	377,6	310,0096	82,1
3,25	16,36	1404	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,34	1413	377,6	308,4992	81,7
3,25	16,34	1422	377,6	308,4992	81,7
3,25	16,35	1431	377,6	308,688	81,75

3,25	16,35	1440	377,6	308,688	81,75
3,25	16,35	1449	377,6	308,688	81,75
3,25	16,36	1458	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1467	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1476	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1485	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1494	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1503	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1512	377,6	308,8768	81,8
3,25	16,36	1521	377,6	308,8768	81,8
3,31	16,3	1530	377,6	307,744	81,5
3,31	16,28	1539	377,6	307,3664	81,4
3,31	16,28	1548	377,6	307,3664	81,4
3,31	16,28	1557	377,6	307,3664	81,4
3,31	16,29	1566	377,6	307,5552	81,45
3,31	16,29	1575	377,6	307,5552	81,45
3,31	16,29	1584	377,6	307,5552	81,45
3,31	16,3	1593	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	1602	377,6	307,744	81,5
3,31	16,3	1611	377,6	307,744	81,5
3,38	16,24	1620	377,6	306,6112	81,2
3,38	16,22	1629	377,6	306,2336	81,1
3,38	16,22	1638	377,6	306,2336	81,1
3,38	16,22	1647	377,6	306,2336	81,1
3,38	16,23	1656	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	1665	377,6	306,4224	81,15
3,38	16,23	1674	377,6	306,4224	81,15
3,44	16,17	1683	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,16	1692	377,6	305,1008	80,8
3,44	16,16	1701	377,6	305,1008	80,8
3,44	16,16	1710	377,6	305,1008	80,8
3,44	16,16	1719	377,6	305,1008	80,8
3,44	16,17	1728	377,6	305,2896	80,85
3,44	16,17	1737	377,6	305,2896	80,85
3,5	16,11	1746	377,6	304,1568	80,55
3,5	16,09	1755	377,6	303,7792	80,45
3,5	16,09	1764	377,6	303,7792	80,45
3,5	16,1	1773	377,6	303,968	80,5
3,5	16,1	1782	377,6	303,968	80,5
3,5	16,1	1791	377,6	303,968	80,5
3,5	16,11	1800	377,6	304,1568	80,55

3,56	16,05	1809	377,6	303,024	80,25
3,56	16,03	1818	377,6	302,6464	80,15
3,56	16,03	1827	377,6	302,6464	80,15
3,56	16,03	1836	377,6	302,6464	80,15
3,56	16,04	1845	377,6	302,8352	80,2
3,56	16,04	1854	377,6	302,8352	80,2
3,63	15,99	1863	377,6	301,8912	79,95
3,63	15,97	1872	377,6	301,5136	79,85
3,63	15,97	1881	377,6	301,5136	79,85
3,63	15,97	1890	377,6	301,5136	79,85
3,63	15,98	1899	377,6	301,7024	79,9
3,69	15,92	1908	377,6	300,5696	79,6
3,69	15,9	1917	377,6	300,192	79,5
3,69	15,9	1926	377,6	300,192	79,5
3,69	15,91	1935	377,6	300,3808	79,55
3,75	15,85	1944	377,6	299,248	79,25
3,75	15,84	1953	377,6	299,0592	79,2
3,75	15,84	1962	377,6	299,0592	79,2
3,75	15,85	1971	377,6	299,248	79,25
3,75	15,85	1980	377,6	299,248	79,25
3,81	15,8	1989	377,6	298,304	79
3,81	15,78	1998	377,6	297,9264	78,9
3,81	15,78	2007	377,6	297,9264	78,9
3,81	15,78	2016	377,6	297,9264	78,9
3,88	15,73	2025	377,6	296,9824	78,65
3,88	15,71	2034	377,6	296,6048	78,55
3,88	15,71	2043	377,6	296,6048	78,55
3,88	15,72	2052	377,6	296,7936	78,6
3,94	15,67	2061	377,6	295,8496	78,35
3,94	15,65	2070	377,6	295,472	78,25
3,94	15,65	2079	377,6	295,472	78,25
3,94	15,66	2088	377,6	295,6608	78,3
4	15,6	2097	377,6	294,528	78
4	15,59	2106	377,6	294,3392	77,95
4	15,59	2115	377,6	294,3392	77,95
4	15,6	2124	377,6	294,528	78
4,06	15,54	2133	377,6	293,3952	77,7
4,06	15,53	2142	377,6	293,2064	77,65
4,06	15,53	2151	377,6	293,2064	77,65
4,13	15,47	2160	377,6	292,0736	77,35
4,13	15,46	2169	377,6	291,8848	77,3

4,13	15,46	2178	377,6	291,8848	77,3
4,13	15,47	2187	377,6	292,0736	77,35
4,19	15,42	2196	377,6	291,1296	77,1
4,19	15,4	2205	377,6	290,752	77
4,19	15,4	2214	377,6	290,752	77
4,25	15,35	2223	377,6	289,808	76,75
4,25	15,33	2232	377,6	289,4304	76,65
4,25	15,34	2241	377,6	289,6192	76,7
4,31	15,28	2250	377,6	288,4864	76,4
4,31	15,27	2259	377,6	288,2976	76,35
4,31	15,27	2268	377,6	288,2976	76,35
4,38	15,22	2277	377,6	287,3536	76,1
4,38	15,21	2286	377,6	287,1648	76,05
4,38	15,21	2295	377,6	287,1648	76,05
4,44	15,16	2304	377,6	286,2208	75,8
4,44	15,15	2313	377,6	286,032	75,75
4,44	15,15	2322	377,6	286,032	75,75
4,5	15,1	2331	377,6	285,088	75,5
4,5	15,08	2340	377,6	284,7104	75,4
4,5	15,09	2349	377,6	284,8992	75,45
4,56	15,03	2358	377,6	283,7664	75,15
4,56	15,02	2367	377,6	283,5776	75,1
4,56	15,02	2376	377,6	283,5776	75,1
4,63	14,97	2385	377,6	282,6336	74,85
4,63	14,96	2394	377,6	282,4448	74,8
4,63	14,96	2403	377,6	282,4448	74,8
4,69	14,91	2412	377,6	281,5008	74,55
4,69	14,9	2421	377,6	281,312	74,5
4,75	14,84	2430	377,6	280,1792	74,2
4,75	14,83	2439	377,6	279,9904	74,15
4,81	14,77	2448	377,6	278,8576	73,85
4,81	14,76	2457	377,6	278,6688	73,8

- Anexo 8, Datos experimentales de la potencia de los controles PID y LQR

Entrada	Tiempo de impulso (microsegundos)	angulo de disparo	Potencia (Watts)
40	0	0	377,6
35	929	22	330,3
30	1859	44	283,1
25	2789	67	235,9
20	3719	90	188,7
15	4648	112	141,5
10	5578	134	94,3
5	6508	157	47,1
1	7252	175	9,3
0	7438	180	0

- Anexo 9, Termómetro digital datasheet



Termómetro Digital de Punzón WATERPROOF Ref: 5060

Especificaciones Técnicas:

- ✓ Rango de temperatura $-50^{\circ}\text{C} + 150^{\circ}\text{C}$ ($-58^{\circ}\text{F} + 302^{\circ}\text{F}$)
- ✓ Resolución: $0.1^{\circ}\text{C} / 0.1^{\circ}\text{F}$
- ✓ Precisión: $\pm 1^{\circ}\text{C} / \pm 1.8^{\circ}\text{F}$ aprox.
- ✓ A prueba de agua IP67 (WATERPROOF)
- ✓ Selección $^{\circ}\text{C}$ o $^{\circ}\text{F}$
- ✓ Largo del Punzón: 133mm
- ✓ Con estuche protector y clip
- ✓ Indicador de batería baja
- ✓ Batería LR44 (incluida)
- ✓ Empaque individual en blíster
- ✓ Disposición Final: Desechar adecuadamente**
- ✓ Vida Útil: 3 a 5 años
- ✓ Marca BRIXCO
- ✓ Unidad de empaque: caja x 30 unidades



** Disposición Final Aparatos electrónicos: Los consumidores de estos productos serán legalmente obligados a eliminar los pilas y/o baterías usadas a los puntos de recolección en su comunidad o a cualquier otro lugar donde se recogen baterías y acumuladores. Se prohíbe al desecho en la basura o desperdicio del hogar. Se debe realizar su disposición final según la Política Nacional de Gestión Integral de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos.

• Anexo 10, Datasheet PT100



DIODE MODULE 100A/800V

PT100S8

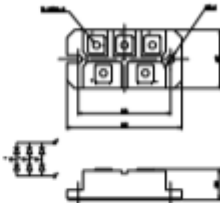
FEATURES

- * Isolated Base
- * 3 Phase Bridge Circuit
- * Designed Power Circuit Board
- * High Surge Capability
- * UL Recognized, File No. E187184

TYPICAL APPLICATIONS

- * Rectified For General Use

OUTLINE DRAWING



Maximum Ratings

Approx Net Weight:180g

Parameter	Symbol	Type / Grade	Unit
		PT100S8	
Repetitive Peak Reverse Voltage *1	V_{RRM}	800	V
Non Repetitive Peak Reverse Voltage *1	V_{RSM}	1000	

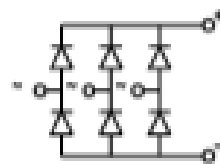
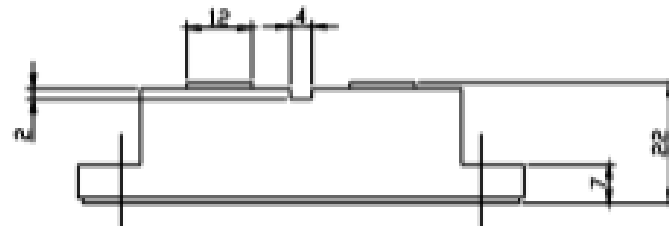
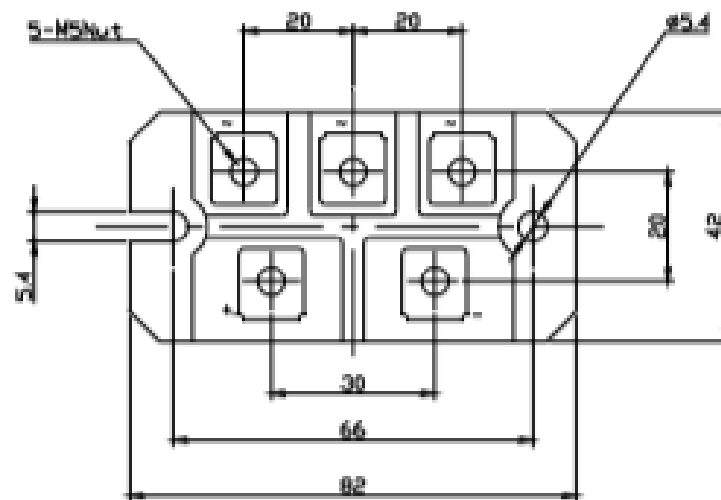
Parameter		Conditions	Max Rated Value	Unit
Average Rectified Output Current	$I_{O(AV)}$	3-Phase Full Wave Rectified $T_c=T_t(\text{Terminal})=94^{\circ}\text{C}$	100	A
Surge Forward Current *1	I_{FSM}	50 Hz Half Sine Wave, 1 Pulse Non-repetitive	1000	A
I Squared t *1	I^2t	2msec to 10msec	5000	A^2s
Operating Junction Temperature Range	T_{jw}		-40 to +150	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}		-40 to +125	$^{\circ}\text{C}$
Isolation Voltage	Viso	Base Plate to Terminals, AC1min	2500	V
Mounting torque	Case mounting	Ftor	Greased	2.4 to 2.8
	Terminals		M5 Screw	
			M5	2.4 to 2.8

Electrical • Thermal Characteristics

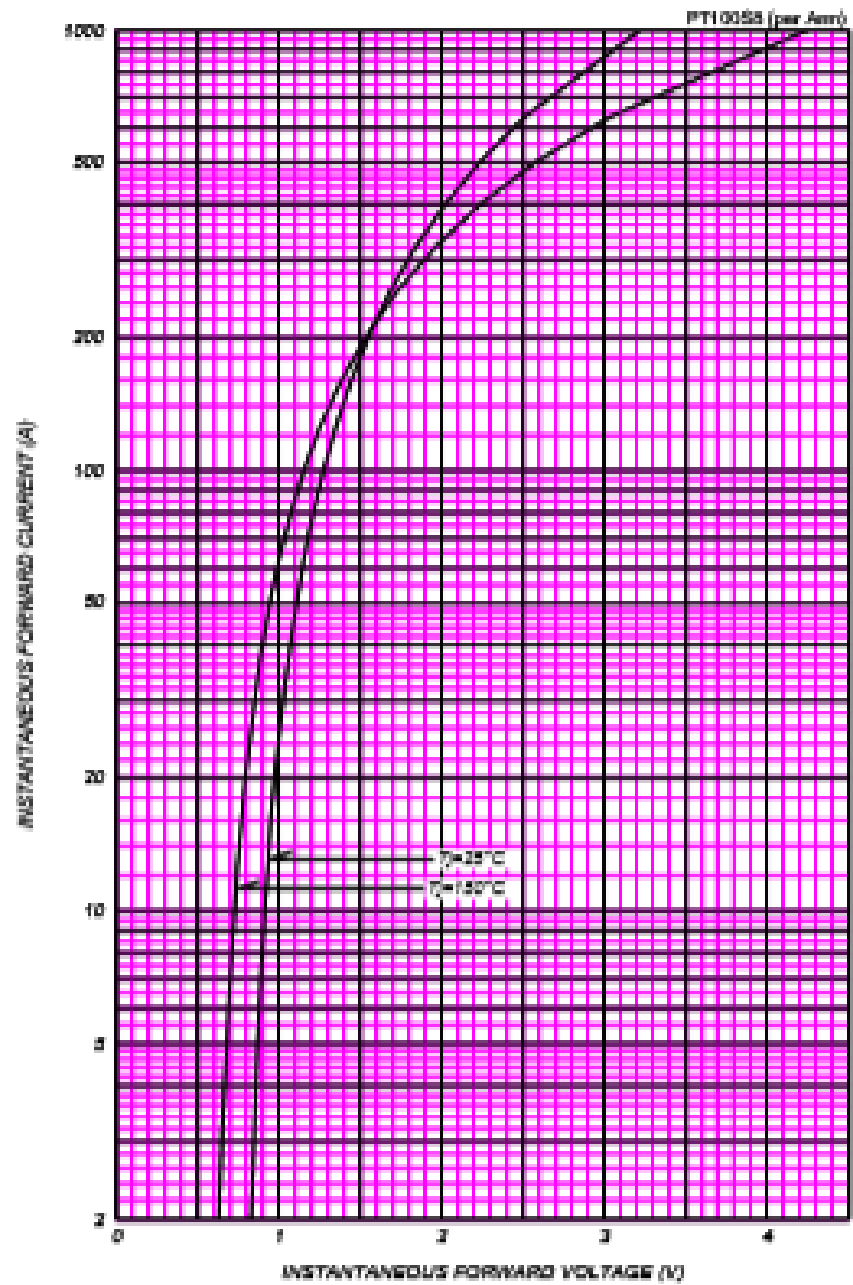
Characteristics	Symbol	Test Conditions	Max.	Unit
Peak Reverse Current *1	I_{RM}	$V_{RM}=V_{RRM}, T_j=150^{\circ}\text{C}$	10	mA
Peak Forward Voltage *1	V_{FSM}	$I_{FSM}=100\text{A}, T_j=25^{\circ}\text{C}$	1.28	V
Thermal Resistance	$R_{th(j-c)}$	Junction to Case (Total)	0.24	$^{\circ}\text{C/W}$
	$R_{th(c-f)}$	Base Plate to Heat Sink with Thermal Compound (Total)	0.06	

*1: Value Per 1Arm

PT10088 OUTLINE DRAWING (Dimensions in mm)



FORWARD CURRENT VS. VOLTAGE



- Anexo 11, Datasheet DHT11

2. Technical Specifications:

Overview:

Item	Measurement Range	Humidity Accuracy	Temperature Accuracy	Resolution	Package
DHT11	20-90%RH 0-50 °C	± 5 % RH	± 2 °C	1	4 Pin Single Row

Detailed Specifications:

Parameters	Conditions	Minimum	Typical	Maximum
Humidity				
Resolution		1%RH	1%RH	1%RH
			8 Bit	
Repeatability			± 1%RH	
Accuracy	25 °C		± 4%RH	
	0-50 °C			± 5%RH
Interchangeability	Fully Interchangeable			
Measurement Range	0 °C	30%RH		90%RH
	25 °C	20%RH		90%RH
	50 °C	20%RH		80%RH
Response Time (Seconds)	1/e(63%)25 °C , 1m/s Air	6 S	10 S	15 S
Hysteresis			± 1%RH	
Long-Term Stability	Typical		± 1%RH/year	
Temperature				
Resolution		1 °C	1 °C	1 °C
		8 Bit	8 Bit	8 Bit
Repeatability			± 1 °C	
Accuracy		± 1 °C		± 2 °C
Measurement Range		0 °C		50 °C
Response Time (Seconds)	1/e(63%)	6 S		30 S

- Anexo 12, Datasheet DS18B20



DALLAS
SEMICONDUCTOR



DS18B20-PAR
1-Wire Parasite-Power
Digital Thermometer

www.maxim-ic.com

FEATURES

- Unique 1-Wire[®] interface requires only one port pin for communication
- Derives power from data line ("parasite power")—does not need a local power supply
- Multi-drop capability simplifies distributed temperature sensing applications
- Requires no external components
- $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ accuracy from -10°C to $+85^{\circ}\text{C}$
- Measures temperatures from -55°C to $+100^{\circ}\text{C}$ (-67°F to $+212^{\circ}\text{F}$)
- Thermometer resolution is user-selectable from 9 to 12 bits
- Converts temperature to 12-bit digital word in 750 ms (max.)
- User-definable non-volatile temperature alarm settings
- Alarm search command identifies and addresses devices whose temperature is outside of programmed limits (temperature alarm condition)
- Software compatible with the DS1822-PAR
- Ideal for use in remote sensing applications (e.g., temperature probes) that do not have a local power source

PIN ASSIGNMENT



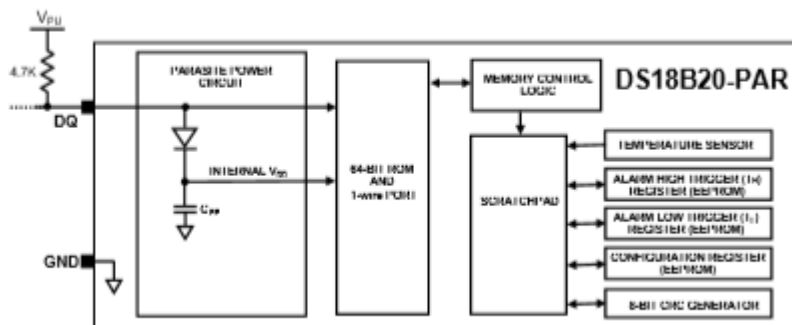
(BOTTOM VIEW)

TO-92
(DS18B20-PAR)

PIN DESCRIPTION

GND - Ground
DQ - Data In/Out
NC - No Connect

DS18B20-PAR BLOCK DIAGRAM Figure 1



TEMPERATURE REGISTER FORMAT Figure 3

	bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
LS Byte	2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
	bit 15	bit 14	bit 13	bit 12	bit 11	bit 10	bit 9	bit 8
MS Byte	S	S	S	S	S	2^6	2^5	2^4

TEMPERATURE/DATA RELATIONSHIP Table 2

TEMPERATURE	DIGITAL OUTPUT (Binary)	DIGITAL OUTPUT (Hex)
+85°C*	0000 0101 0101 0000	0550h
+25.0625°C	0000 0001 1001 0001	0191h
+10.125°C	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0.5°C	0000 0000 0000 1000	0008h
0°C	0000 0000 0000 0000	0000h
-0.5°C	1111 1111 1111 1000	FFFS8h
-10.125°C	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25.0625°C	1111 1110 0110 1111	FE6Fh
-55°C	1111 1100 1001 0000	FC90h

*The power-on reset value of the temperature register is +85°C.

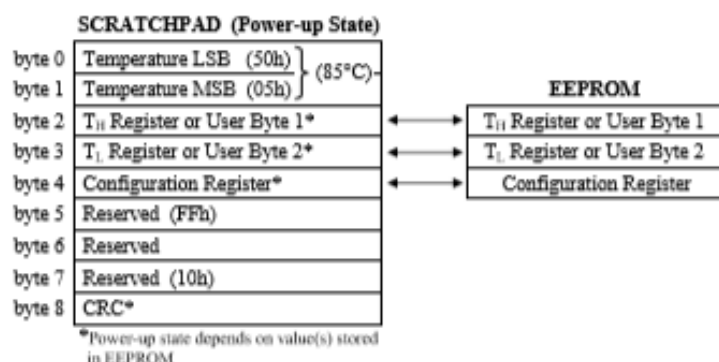
OPERATION – ALARM SIGNALING

After the DS18B20-PAR performs a temperature conversion, the temperature value is compared to the user-defined two's complement alarm trigger values stored in the 1-byte T_{H1} and T_L registers (see Figure 4). The sign bit (S) indicates if the value is positive or negative: for positive numbers $S = 0$ and for negative numbers $S = 1$. The T_{H1} and T_L registers are nonvolatile (EEPROM) so they will retain data when the device is powered down. T_{H1} and T_L can be accessed through bytes 2 and 3 of the scratchpad as explained in the MEMORY section of this datasheet.

 T_H AND T_L REGISTER FORMAT Figure 4

bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
S	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0

Only bits 11 through 4 of the temperature register are used in the T_{H1} and T_L comparison since T_{H1} and T_L are 8-bit registers. If the result of a temperature measurement is higher than or equal to T_{H1} or lower than or equal to T_L , an alarm condition exists and an alarm flag is set inside the DS18B20-PAR. This flag is updated after every temperature measurement; therefore, if the alarm condition goes away, the flag will be turned off after the next temperature conversion.



CONFIGURATION REGISTER

Byte 4 of the scratchpad memory contains the configuration register, which is organized as illustrated in Figure 7. The user can set the conversion resolution of the DS18B20-PAR using the R0 and R1 bits in this register as shown in Table 3. The power-up default of these bits is R0 = 1 and R1 = 1 (12-bit resolution). Note that there is a direct tradeoff between resolution and conversion time. Bit 7 and bits 0-4 in the configuration register are reserved for internal use by the device and cannot be overwritten.

CONFIGURATION REGISTER Figure 7

bit 7	bit 6	bit 5	bit 4	bit 3	bit 2	bit 1	bit 0
0	R1	R0	1	1	1	1	1

THERMOMETER RESOLUTION CONFIGURATION Table 3

R1	R0	Resolution	Max Conversion Time
0	0	9-bit	93.75 ms (t _{conv} /8)
0	1	10-bit	187.5 ms (t _{conv} /4)
1	0	11-bit	375 ms (t _{conv} /2)
1	1	12-bit	750 ms (t _{conv})

CRC GENERATION

CRC bytes are provided as part of the DS18B20-PAR's 64-bit ROM code and in the 9th byte of the scratchpad memory. The ROM code CRC is calculated from the first 56 bits of the ROM code and is contained in the most significant byte of the ROM. The scratchpad CRC is calculated from the data stored in the scratchpad, and therefore it changes when the data in the scratchpad changes. The CRCs provide the bus master with a method of data validation when data is read from the DS18B20-PAR. To verify that data has been read correctly, the bus master must re-calculate the CRC from the received data

DS18B20-PAR OPERATION EXAMPLE 2

In this example there is only one DS18B20-PAR on the bus. The master writes to the T_{10} , T_1 , and configuration registers in the DS18B20-PAR scratchpad and then reads the scratchpad and recalculates the CRC to verify the data. The master then copies the scratchpad contents to EEPROM.

MASTER MODE	DATA (LSB FIRST)	COMMENTS
TX	Reset	Master issues reset pulse.
RX	Presence	DS18B20-PAR responds with presence pulse.
TX	CCh	Master issues Skip ROM command.
TX	4Eh	Master issues Write Scratchpad command.
TX	3 data bytes	Master sends three data bytes to scratchpad (T_{10} , T_1 , and config).
TX	Reset	Master issues reset pulse.
RX	Presence	DS18B20-PAR responds with presence pulse.
TX	CCh	Master issues Skip ROM command.
TX	BEh	Master issues Read Scratchpad command.
RX	9 data bytes	Master reads entire scratchpad including CRC. The master then recalculates the CRC of the first eight data bytes from the scratchpad and compares the calculated CRC with the read CRC (byte 9). If they match, the master continues; if not, the read operation is repeated.
TX	Reset	Master issues reset pulse.
RX	Presence	DS18B20-PAR responds with presence pulse.
TX	CCh	Master issues Skip ROM command.
TX	48h	Master issues Copy Scratchpad command.
TX	DQ line held high by strong pullup	Master applies strong pullup to DQ for at least 10 ms while copy operation is in progress.