

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

Diseño y construcción de un controlador PID para un reactor de Biochar

Daniel Carrión Espín

Ingeniería Mecánica

Trabajo de integración curricular presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 6 de diciembre de 2019

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERIA**

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**

Diseño y construcción de un controlador PID para un reactor de biochar

Daniel Carrión Espín

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Juan Sebastián Proaño Aviles, PhD.

Firma del profesor:

Nombre del profesor, Título académico

Marco Francisco León Dunia, M.Sc.

Firma del profesor:

Quito, 6 de diciembre de 2019

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Daniel Carrión Espín

Código:

00104483

Cédula de Identidad:

0502915572

Lugar y fecha:

Quito, 6 de diciembre de 2019

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla un controlador PID para un reactor de biochar. El reactor de biochar está representado por un horno eléctrico donde se degrada térmicamente la biomasa en una atmosfera parcialmente llena de nitrógeno. La biomasa está representada por astillas de *Eucalyptus Globulos* (4mmx20mmx0.5mm), la cual proviene de los residuos de tala de árboles de eucalipto. Con ayuda de una señal paso se encuentra la curva de respuesta de la planta. Se aproxima la curva de respuesta con cinco funciones de transferencia, las cuatro primeras obtenidas de forma analítica y la quinta obtenida con ayuda de MATLAB. Se utilizó un controlador PID de la librería del Arduino, se modeló en Simulink el controlador PID utilizado y se encontró los parámetros (tuning) K_p , K_i y K_d que permitieron una respuesta con un sobre disparo menor que el 10%. El modelo en Simulink con la cuarta función de transferencia (aproximación #4) obtenida de forma analítica fue la que mejor predijo el comportamiento dinámico del sistema bajo una señal paso (Setpoint, posición). Sin embargo, la aproximación #4 no pudo predecir el comportamiento del sistema bajo una señal rampa. Se infirió que esto es porque los datos experimentales con los cuales se obtuvo la función de transferencia #4 no contienen datos de estabilización de la planta. Es así como, se recurrió a un tuning manual para obtener los parámetros adecuados bajo una señal rampa (tasa de calentamiento). Finalmente, en base a los resultados experimentales del sistema bajo una señal de velocidad (tasa de calentamiento), se concluyó que la pendiente de la curva de respuesta experimental máxima indica en cada punto la tasa de calentamiento máxima que puede seguir el sistema en forma constante.

Palabras clave: Arduino, Simulink, controlador PID, tasa de calentamiento.

ABSTRACT

In this work a PID controller for a biochar reactor is developed. The biochar reactor is represented by an electric furnace where biomass is thermally degraded in an atmosphere partially filled with nitrogen. The biomass is represented by chips of *Eucalyptus Globulos* (4mmx20mmx0.5mm), which comes from the waste of felling of eucalyptus trees. The response curve of the plant is found with the help of a step signal. The response curve is approached with five transfer functions, the first four obtained analytically and the fifth obtained with the help of MATLAB. A PID controller from the Arduino library was used, the PID controller used was modeled in Simulink and the parameters (tuning) K_p , K_i and K_d were found that allowed a response with an over-trip of less than 10%. The Simulink model with the fourth transfer function (approximation # 4) obtained analytically was the one that best predicted the dynamic behavior of the system under a step signal (Setpoint, position). However, approach # 4 could not predict the behavior of the system under a ramp signal. It was inferred that this is because the experimental data with which transfer function # 4 was obtained does not contain plant stabilization data. Thus, a manual tuning was used to obtain the appropriate parameters under a ramp signal (heating rate). Finally, based on the experimental results of the system under a speed signal (heating rate), it was concluded that the slope of the maximum experimental response curve indicates at each point the maximum heating rate that the system can constantly follow.

Keywords: Arduino, Simulink, PID controller, heating rate.

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	10
2.	Marco teórico	12
	2.1 Control PID	12
3.	Metodología	17
	3.1 Análisis del sistema de control.....	17
	3.2 Modelo experimental de la planta.....	21
4.	Resultados y discusión	38
5.	Conclusiones.....	49
6.	Recomendaciones.....	50
7.	Referencias.....	51
8.	Anexos.....	53
	Anexo A. Factores de corrección de gravedad específica	53
	Anexo B. Coeficiente de temperatura de la resistencia de varias aleaciones nickel-chromium	54
	Anexo C. Diagrama eléctrico del sistema de control.....	55
	Anexo D. Manual de Operación y Mantenimiento.....	56
	Anexo E. Dimensiones del Reactor de Biochar.....	63
	Anexo F. Código Arduino del Sistema de Control.....	64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Reglas de tuning de Ziegler-Nichols basadas en una respuesta Paso (Ziegler & Nichols, 1942)	16
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloques del sistema	12
Figura 2. Diagrama de bloques de un controlador PID	14
Figura 3. Control PID de la planta (Reactor).....	15
Figura 4. Parámetros de interés en el método Ziegler-Nichols para una entrada paso unitario (Unit Step) (Ogata, 2010).....	16
Figura 5. Fenómeno patada derivativa (Derivative Kick) en un controlador PID (Beauregard, 2011).....	17
Figura 6. Solución al fenómeno patada derivativa de un controlador PID (Beauregard, 2011)	18
Figura 7. Problema Windup en un controlador PID (Beauregard, 2011)	19
Figura 8. Código que elimina el Windup en un controlador PID (Beauregard, 2011).....	19
Figura 9. Reset Windup implementado en un controlador PID (Beauregard, 2011).....	20
Figura 10. Modelo en Simulink del controlador PID desarrollado por Brett Beauregard (The MathWorks, 2015)	20
Figura 11. Modelo del reactor: a) Modelo 3D (Dassault Systemes, 2016), b) Modelo experimental	21
Figura 12. Modelo 3D de la planta/reactor [mm] (Dassault Systemes, 2016).....	21
Figura 13. Cortes del reactor: a) Corte transversal, b) Corte longitudinal (Dassault Systemes, 2016).....	22
Figura 14. Posición de la termocupla en la bandeja.....	22
Figura 15. Muestra de biomasa (Eucalyptus Globulus) de 300g, astillas de 4mmx20mmx0.5mm aprox.	23
Figura 16. Porcentaje de potencia versus porcentaje de señal de control (Gavazzi, 2018)	24
Figura 17. Corriente y voltaje en la planta para una señal de control del 100% (PWM=255) (Sealed Unit Parts, 2012)	24
Figura 18. Respuesta de la planta a una señal de control PWM=255 (The MathWorks, 2015)	25
Figura 19. Curva de respuesta máxima de la planta y su primera curva de aproximación (The MathWorks, 2015)	27
Figura 20. Curva de respuesta máxima de la planta y su segunda curva de aproximación (The MathWorks, 2015)	29
Figura 21. Curva de respuesta máxima de la planta y su tercera curva de aproximación (The MathWorks, 2015)	31
Figura 22. Curva de respuesta máxima de la planta y su cuarta curva de aproximación (The MathWorks, 2015)	33
Figura 23. Curva de respuesta máxima de la planta y su quinta curva de aproximación (The MathWorks, 2015)	35
Figura 24. Modelo en Simulink del sistema de control (The MathWorks, 2015)	37
Figura 25. Respuesta del sistema a un Setpoint de 265.25°C, región transitoria y de estabilización (The MathWorks, 2015).....	38
Figura 26. Respuesta del sistema a un Setpoint de 265.25°C, región de estabilización (The MathWorks, 2015)	39
Figura 27. Respuesta del sistema a un Setpoint de 424.75°C, región transitoria y de estabilización (The MathWorks, 2015).....	40
Figura 28. Respuesta del sistema a un Setpoint de 424.75°C, región de estabilización (The MathWorks, 2015)	41
Figura 29. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min, primer tuning (The MathWorks, 2015).....	43

Figura 30. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de $2.65^{\circ}\text{C}/\text{min}$, tuning #1 y #2 (The MathWorks, 2015).....	44
Figura 31. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de $2.65^{\circ}\text{C}/\text{min}$, tuning #1 y #3 (The MathWorks, 2015).....	45
Figura 32. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de $2.65^{\circ}\text{C}/\text{min}$, tuning #4	46

1. INTRODUCCIÓN

El biochar es un producto rico en carbono resultado de la degradación térmica de la biomasa (materia procedente de la fotosíntesis: madera, hojas, etc.) en ausencia de poco oxígeno o nada (Lehmann & Joseph, 2015; Schmidt et al., 2016). El carbón de uso corriente puede ser distinguido del biochar por su forma de producción y su aplicación. El carbón de uso común por lo general se lo emplea como combustible, mientras que el biochar tiene aplicaciones para el secuestro de carbono y manejo ambiental (Ahmad et al., 2014). En el aspecto ambiental, el biochar tiene cuatro aplicaciones principales: mejoramiento del suelo, manejo de desechos, mitigación del cambio climático y producción de energía (Lehmann et al., 2008). La biomasa que ha sido ampliamente usada en la producción de biochar incluye residuos de cosechas, desechos forestales, desechos de procesamiento de alimentos y desechos municipales (Brick & Lyutse, 2010; Cantrell, Hunt, Uchimiya, Novak, & Ro, 2012; Chen et al., 2011; Enders, Hanley, Whitman, Joseph, & Lehmann, 2012). La conversión de biomasa a biochar para aplicación en suelos ha sido propuesto como una de las mejores maneras de mitigar el cambio climático por el secuestro de carbono en el suelo (Lehmann et al., 2008). Esto se debe a la microestructura porosa del biochar y su alto contenido de carbono.

El biochar puede ser producido por una descomposición termoquímica de la biomasa en temperaturas de 200-900°C en la presencia de poco oxígeno o nada, este proceso es conocido como pirolisis (Demirbas & Arin, 2002). La pirolisis se le divide en rápida, intermedia y lenta dependiendo del tiempo de residencia y temperatura (Mohan, Pittman Jr, & Steele, 2006). La pirolisis rápida con cortos tiempos de residencia (<2s) es a veces usada para producir bio-oil, el porcentaje de bio-oil producido es alrededor del 75% (Mohan et al., 2006). La pirolisis intermedia y lenta posee tiempos de residencia de pocos minutos a algunas horas logrando producir 25-35% de biochar (Boateng, Garcia-Perez, Mašek, Brown, & del

Campo, 2015). La pirolisis lenta es el método más empleado para la obtención de biochar a razón de que esta produce el mayor porcentaje de biochar (Manyà, 2012).

Los parámetros claves que determinan las propiedades del biochar incluyen temperatura de la pirolisis, tiempo de residencia, tasa de calentamiento y tipo de biomasa empleada (Ahmad et al., 2014). Esto muestra claramente que controlar la temperatura durante el proceso de pirolisis es primordial para obtener biochar con ciertas propiedades específicas. Es así como uno de los principales objetivos de este proyecto es diseñar y construir un controlador PID que controle la temperatura de la biomasa en su transformación a biochar durante el proceso de pirolisis. Los parámetros claves que pueden influir en el control de la temperatura son la potencia eléctrica instalada, capacidad volumétrica, aislamiento térmico de las paredes y cantidad y tipo de biomasa dentro de la planta.

La planta está representada por un reactor eléctrico, y esta al igual que los hornos industriales eléctricos disponen de alta no linealidad (Ogata, 2010). Para controlar tal planta industrial hace falta implementar nuevas estrategias de control. El controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) es el más comúnmente empleado en la mayoría de procesos industriales, esto en vista de que este tipo de controlador puede ser ajustado en el sitio y se lo puede aplicar a la mayoría de sistemas (Ogata, 2010). Una utilidad especial del controlador PID es cuando el modelo dinámico de la planta no está disponible o no se conoce (Ogata, 2010). En este caso se ha comprobado que el controlador PID ha sido la mejor opción para obtener un control satisfactorio de un proceso o sistema. Y en vista que dentro del reactor suceden reacciones físicas y termoquímicas complejas (pirolisis), la aplicación del controlador PID es lo más acertado con el fin de controlar la temperatura de la biomasa dentro del reactor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Control PID

Existen diferentes tipos de controladores usados para el control de la temperatura en hornos, entre aquellos uno de los más utilizados en la industria es el controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), a continuación, se describe su funcionamiento.

La operación del controlador PID depende de las magnitudes relativas de tres parámetros, ganancia proporcional, ganancia integral y ganancia derivativa.

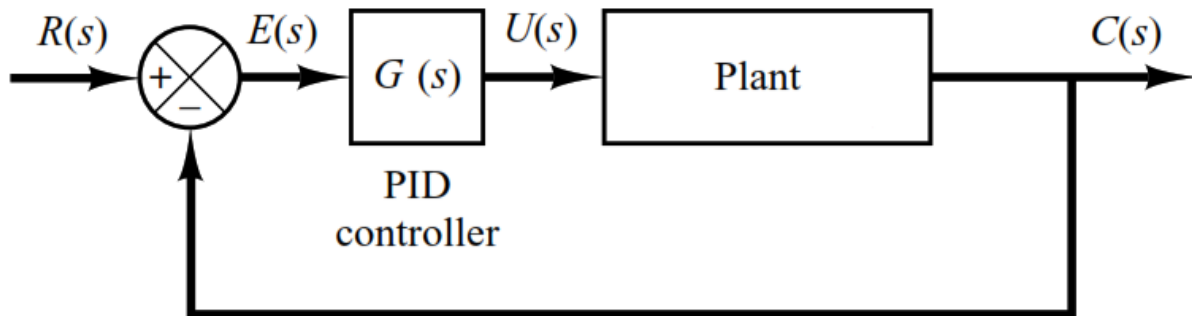


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema

Para un controlador con una acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y el error de la señal de actuación $e(t)$ es:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (1)$$

En transformada de Laplace:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (2)$$

Donde K_p es conocida como ganancia proporcional. Es así que, el controlador proporcional es esencialmente un amplificador con una ganancia ajustable K_p .

Para un controlador con una acción de control integral, el cambio del valor de la salida del controlador $u(t)$ es directamente proporcional a la señal de error de actuación $e(t)$.

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i e(t)$$

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (3)$$

Es decir, la señal de salida del controlador es directamente proporcional a la señal de error de actuación $e(t)$ acumulada hasta el tiempo t . En transformada de Laplace se tiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_i}{s} \quad (4)$$

Donde K_i es la ganancia integral. Para un controlador con una acción de control derivativa, el valor de la salida del controlador $u(t)$ es directamente proporcional al cambio temporal de la señal de error de actuación $e(t)$.

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_d s \quad (5)$$

Donde K_d es la ganancia derivativa. La combinación de la acción de control proporcional, integral y derivativa es conocida como acción de control proporcional-integral-derivativa (PID). Esta acción de control tiene las ventajas de cada acción de control individual. La ecuación de un controlador con esta acción combinada es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (7)$$

En transformada de Laplace se tiene:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \quad (8)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (9)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = G(s) = \frac{K_p (1 + T_i s + T_i T_d s^2)}{T_i s} \quad (10)$$

Donde K_p , K_i y K_d son la ganancia proporcional, integral y derivativa respectivamente. T_i es el tiempo integral y T_d es el tiempo derivativo. A la ecuación (8) se le conoce como forma paralela del controlador PID, y a la ecuación (9) como la forma estándar. A partir de las ecuaciones (8) y (9) se obtiene la relación entre las constantes de cada tipo de controlador:

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad K_d = K_p T_d \quad (11)$$

Es así que, el controlador PID puede ser entendido como un controlador que toma el presente, pasado y futuro del error de actuación para emitir una señal de control a una planta. La relación $U(s)/E(s)$ se conoce como función de transferencia $G(s)$, y está definida como la relación entre la transformada de Laplace de la salida $U(s)$ y la transformada de Laplace de la entrada $E(s)$ cuando todas las condiciones iniciales son cero. El diagrama de bloques de este sistema puede ser representado como el de la Figura 2.

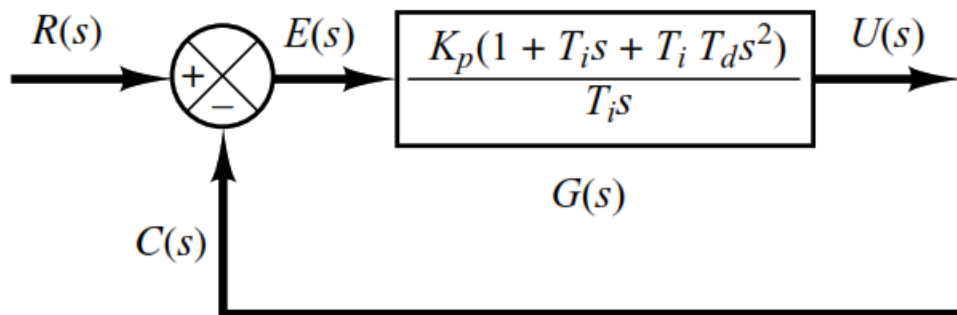


Figura 2. Diagrama de bloques de un controlador PID

En la Figura 2, la señal de error de actuación $E(s)$ es igual a la diferencia entre la señal de referencia $R(s)$ del sistema y la señal controlada $C(s)$ que proviene de la salida de la planta. Es así como el sistema puede ser representado como la Figura 3.

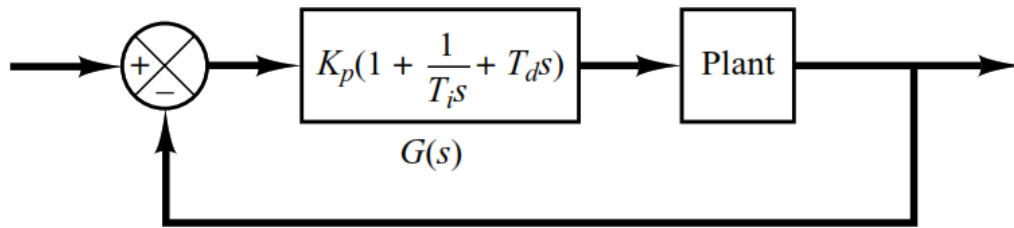


Figura 3. Control PID de la planta (Reactor)

Por lo visto el controlador PID de forma estándar posee tres parámetros: ganancia proporcional (K_p), tiempo integral (T_i) y tiempo derivativo (T_d). El rendimiento del controlador PID depende sobre las magnitudes relativas de estos tres parámetros. La determinación de las magnitudes relativas de estos tres parámetros se conoce como “*tuning*” del controlador (Ogata, 2010). A este respecto, Ziegler y Nichols propusieron ciertas reglas de tuning para un controlador PID basado en la respuesta experimental de una planta a una entrada paso unitario (*Unit Step*). El método propuesto por Ziegler y Nichols aplica cuando la respuesta a una entrada paso exhibe una forma de *S*. Los parámetros K_p , T_i y T_d iniciales obtenidos con este método son un punto de partida en el tuning del controlador. Si la respuesta del sistema con los parámetros iniciales no cumple las especificaciones predeterminadas entonces será necesario realizar una nueva búsqueda hasta que se cumpla las especificaciones deseadas.

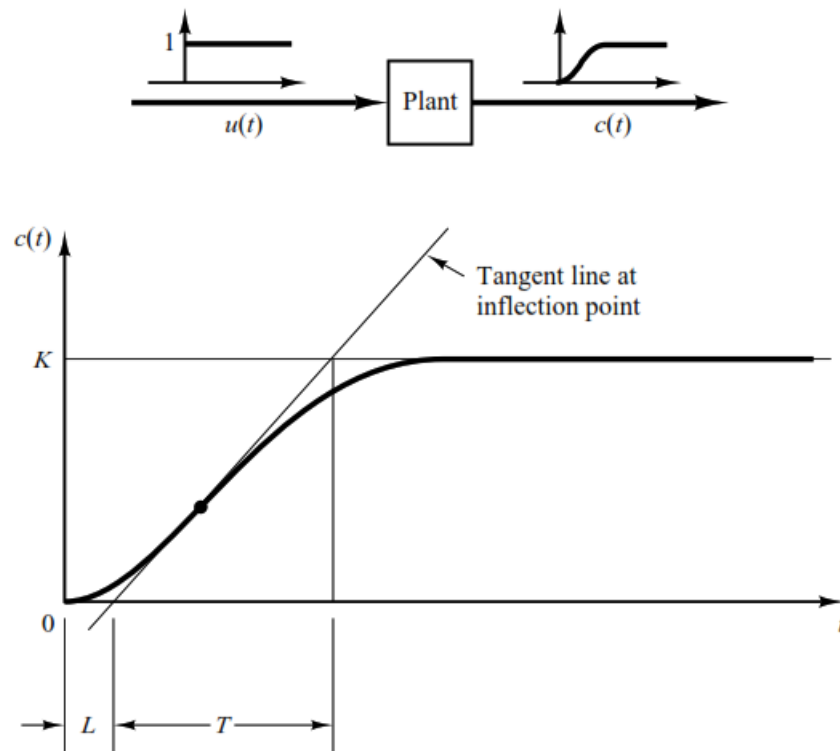


Figura 4. Parámetros de interés en el método Ziegler-Nichols para una entrada paso unitario (Unit Step) (Ogata, 2010)

La curva de respuesta aproximada aplicando el método ZN (Ziegler-Nichols) tendrá la siguiente función de transferencia:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = G_{ZN}(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (12)$$

Donde, K es la ganancia de la función de transferencia de la planta, L es el tiempo de retardo y T es la constante de tiempo. Con la función de transferencia G_{ZN} , Ziegler y Nichols sugirieron establecer los parámetros K_p , T_i y T_d del controlador PID según la Tabla 1.

Tabla 1. Reglas de tuning de Ziegler-Nichols basadas en una respuesta Paso (Ziegler & Nichols, 1942)

Controlador	K_p	T_i	T_d
PID	$1,2 * T / KL$	$2L$	$0,5L$

3. METODOLOGIA

3.1 Análisis del sistema de control

El controlador PID utilizado en el reactor proviene de la librería del Arduino, en este ámbito existen muchos controladores PID disponibles, se elige el desarrollado por Brett Beauregard (Beauregard, 2011), ya que dispone de una explicación amplia del código empleado, y con esto se puede recrear un modelo en Simulink para la búsqueda de los parámetros del controlador (tuning). La filosofía empleada por Brett es la misma que la del controlador PID tradicional, pero incorpora mejoras que logran que un controlador PID sea eficiente y robusto. A continuación, se detalla las principales características del controlador desarrollado por Brett.

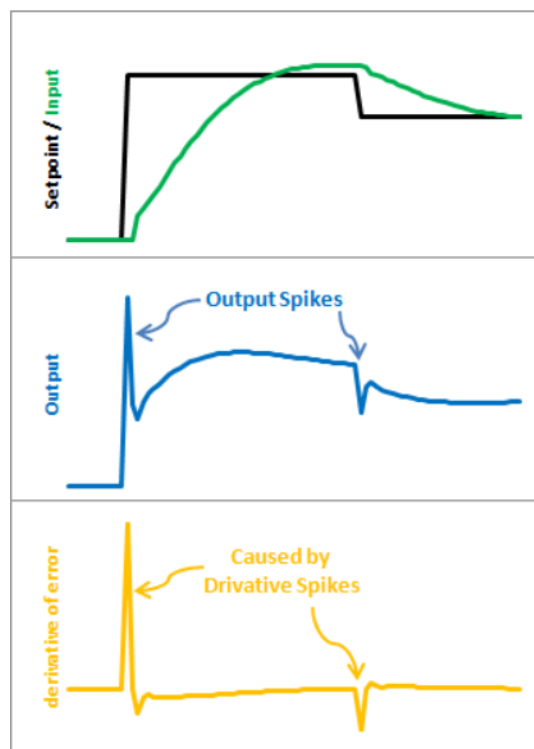


Figura 5. Fenómeno patada derivativa (Derivative Kick) en un controlador PID (Beauregard, 2011)

La Figura 5 ilustra el problema denominado patada derivativa (*Derivative Kick*), el sobresalto de la salida por este fenómeno sucede cuando hay un cambio repentino del

Setpoint, esto provoca tener un gran valor del término derivativo. La solución para este problema es:

$$\frac{d(\text{Error})}{dt} = \frac{d(\text{Setpoint} - \text{Input})}{dt}$$

$$\frac{d(\text{Error})}{dt} = \frac{d(\text{Setpoint})}{dt} - \frac{d(\text{Input})}{dt}$$

Cuando el Setpoint es constante:

$$\frac{d(\text{Error})}{dt} = -\frac{d(\text{Input})}{dt}$$

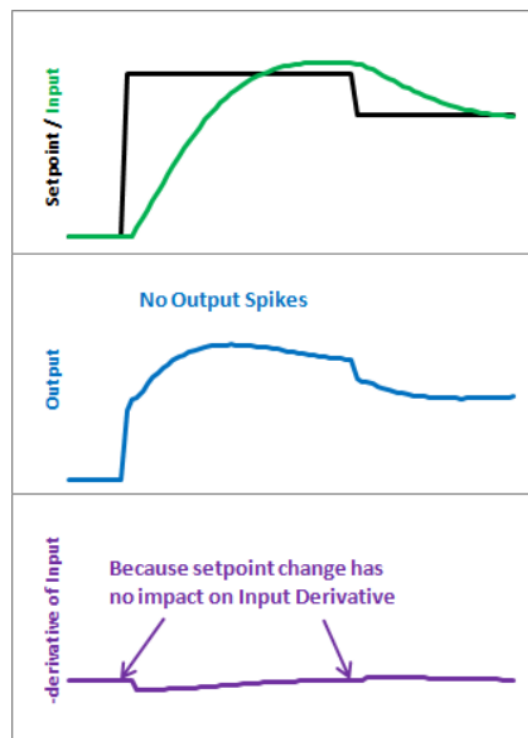


Figura 6. Solución al fenómeno patada derivativa de un controlador PID (Beauregard, 2011)

En la Figura 6, se muestra el resultado de aplicar la corrección al fenómeno patada derivativa, es así que, ya no se tiene sobresaltos en la salida del controlador. Otra importante característica que debe tener un controlador PID robusto es el *Reset Windup*. Esto sucede cuando el controlador no sabe que la salida dispone de un límite. Por ejemplo, la salida PWM (*Pulse Width Modulation*) del Arduino acepta valores entre 0-255, y si el Arduino envía un

valor mayor que 255, no sucederá ningún cambio en la salida, ya que el sistema está limitado al valor de 255. En este proceso, el Arduino sigue enviando valores más altos esperando obtener una respuesta.

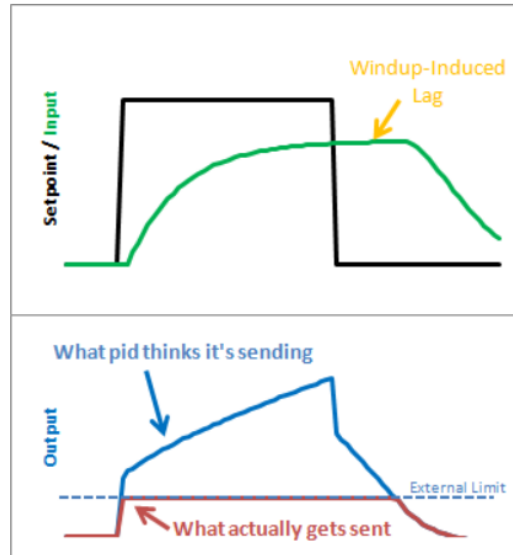


Figura 7. Problema Windup en un controlador PID (Beauregard, 2011)

En la Figura 7, se muestra el fenómeno Windup descrito anteriormente, por efecto de este fenómeno el controlador tarda en responder a un cambio del Setpoint. La solución es limitar la salida del controlador, la mayor contribución a la salida proviene del término integral, es así que, se limita ambos términos, el término integral y la salida.

```

8 void Compute()
9 {
10     unsigned long now = millis();
11     int timeChange = (now - lastTime);
12     if(timeChange>=SampleTime)
13     {
14         /*Compute all the working error variables*/
15         double error = Setpoint - Input;
16         ITerm+= (ki * error);
17         if(ITerm> outMax) ITerm= outMax;
18         else if(ITerm< outMin) ITerm= outMin;
19         double dInput = (Input - lastInput);
20
21         /*Compute PID Output*/
22         Output = kp * error + ITerm- kd * dInput;
23         if(Output > outMax) Output = outMax;
24         else if(Output < outMin) Output = outMin;
25
26         /*Remember some variables for next time*/
27         lastInput = Input;
28         lastTime = now;
29     }
30 }

```

Figura 8. Código que elimina el Windup en un controlador PID (Beauregard, 2011)

En la Figura 8, se detalla el código que elimina el Windup del controlador PID. Y, en la Figura 9 se aprecia la aplicación de este código

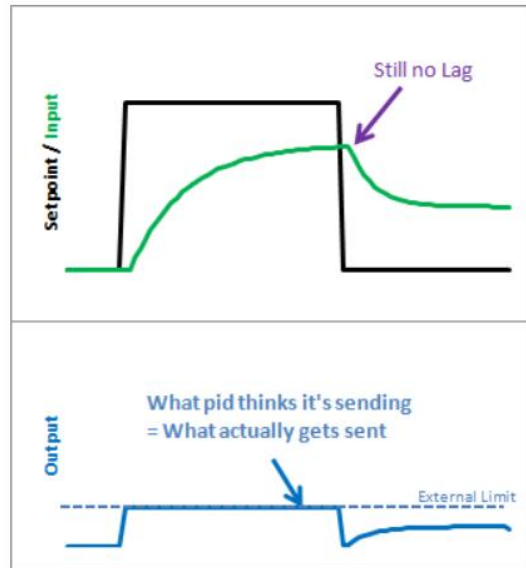


Figura 9. Reset Windup implementado en un controlador PID (Beauregard, 2011)

El PID desarrollado por Brett debe ser implementado en un modelo Simulink con el fin de obtener respuestas de la planta para distintos valores de K_p , K_i y K_d del controlador PID.

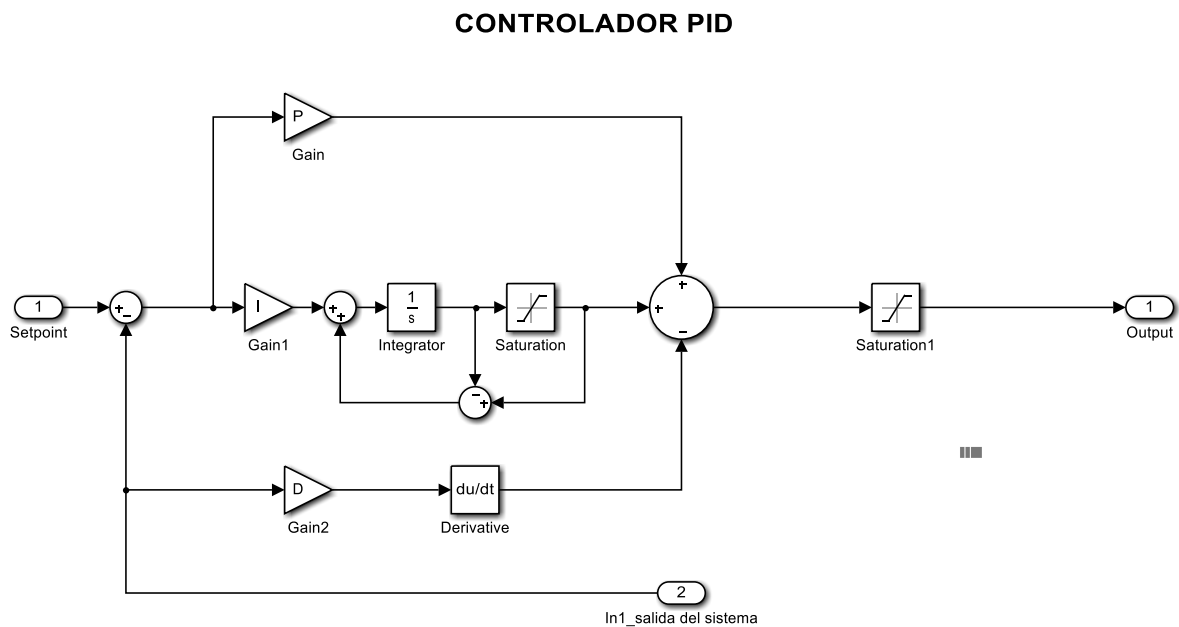


Figura 10. Modelo en Simulink del controlador PID desarrollado por Brett Beauregard (The MathWorks, 2015)

A continuación, se desarrolla el modelo experimental del reactor

3.2 Modelo experimental de la planta

El reactor de biochar representa la planta a controlar, su configuración de construcción se puede apreciar en las siguientes figuras.

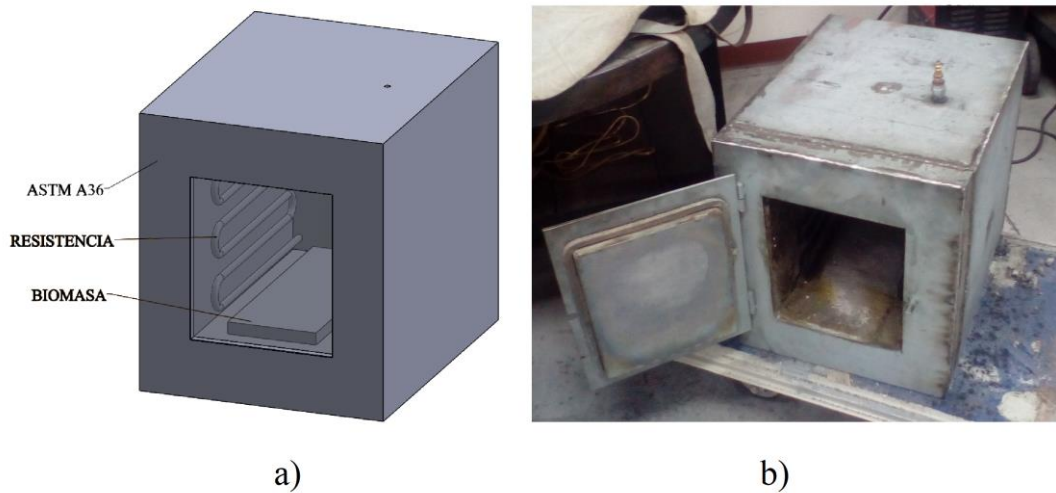


Figura 11. Modelo del reactor: a) Modelo 3D (Dassault Systemes, 2016), b) Modelo experimental

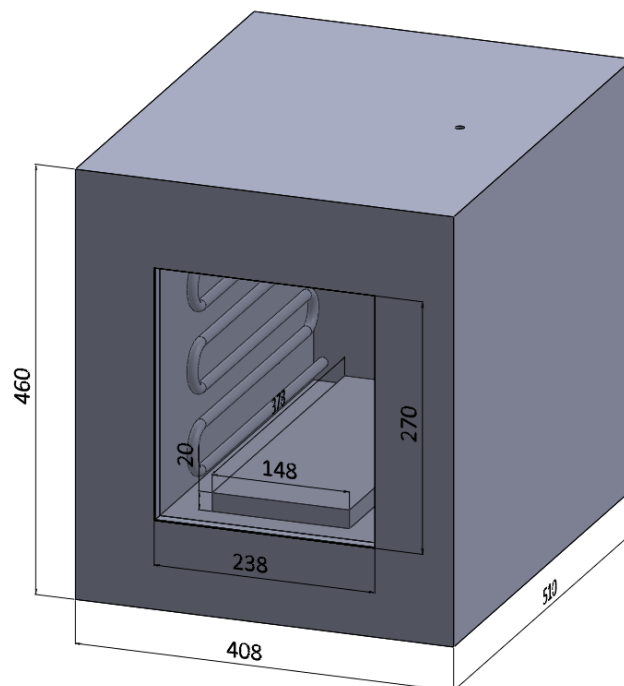


Figura 12. Modelo 3D de la planta/reactor [mm] (Dassault Systemes, 2016)

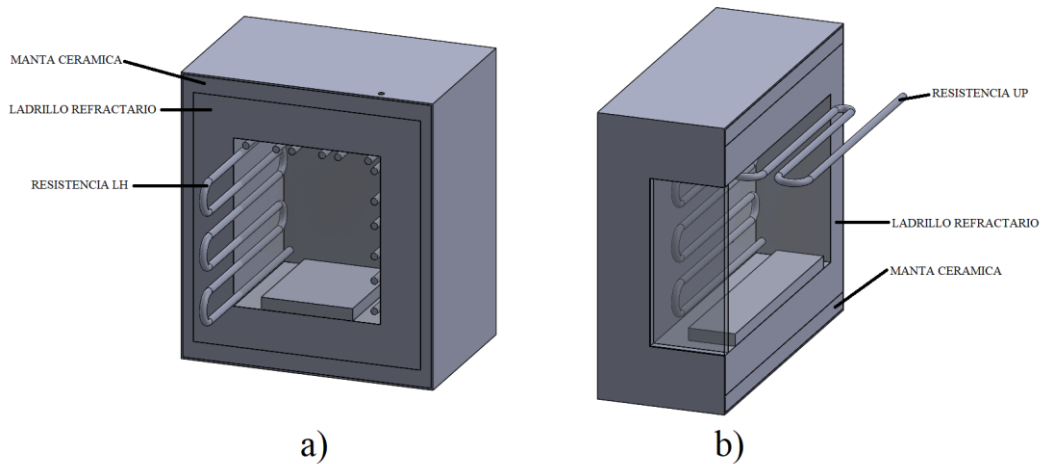


Figura 13. Cortes del reactor: a) Corte transversal, b) Corte longitudinal (Dassault Systemes, 2016)

El punto de obtención de la temperatura de referencia de la biomasa se encuentra ubicado a once centímetros de la parte posterior de la bandeja (ver Figura 14).



Figura 14. Posición de la termocupla en la bandeja

La muestra de biomasa está representada por astillas de eucalipto (*Eucalyptus Globulus*) con una masa aproximada de 300g la cual se ubica homogéneamente en la bandeja. La biomasa utilizada proviene de los residuos de tala de árboles de eucalipto, después fue sometida a un secado en un horno eléctrico a una temperatura de 50°C aproximadamente por tres días con el fin de eliminar la humedad. Las astillas de eucalipto tienen las dimensiones promedio de 4mmx20mmx0.5mm (ver Figura 15).



Figura 15. Muestra de biomasa (*Eucalyptus Globulus*) de 300g, astillas de 4mmx20mmx0.5mm aprox.

La atmosfera inerte de la cámara del reactor está formada por flujo de nitrógeno constante de 5,6 LPM (litros por minuto), la entrada de nitrógeno es por la pared izquierda parte inferior (agujero de diámetro 3/8 de pulgada, 9.5mm), y la salida de los gases es por el techo del reactor (agujero de diámetro 3/8 de pulgada, 9.5mm). El flujo constante de nitrógeno hacia el reactor es mantenido por alrededor de cinco minutos antes de activar el calentamiento de la biomasa, esto con el fin de asegurar el desplazamiento de oxígeno presente en la cámara del reactor. Para obtener el modelo experimental de la planta se somete a la misma a una entrada paso (Step). La entrada paso corresponde con la potencia que se le puede suministrar a la planta. Esta potencia suministrada a la planta está controlada por un relé de estado sólido proporcional (Solid State Relay Proportional Switching Controller, modelo RGC1P23V50ED), es decir que para una señal de control de 100% hacia el relé de estado sólido se tendrá en la planta una potencia del 100%. Este funcionamiento se puede apreciar en la Figura 16.

Mode 1: Phase Angle Switching

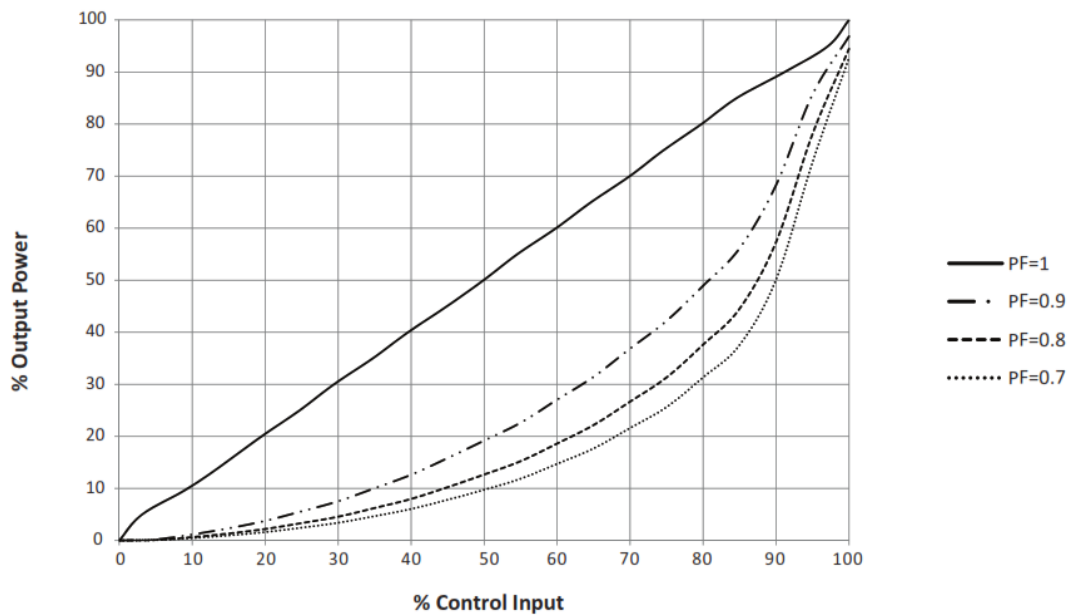


Figura 16. Porcentaje de potencia versus porcentaje de señal de control (Gavazzi, 2018)

La señal de control proviene de una señal PWM (Pulse Width Modulation) del Arduino, por lo que la señal de control está en el rango de 0-255 (0-5VDC).

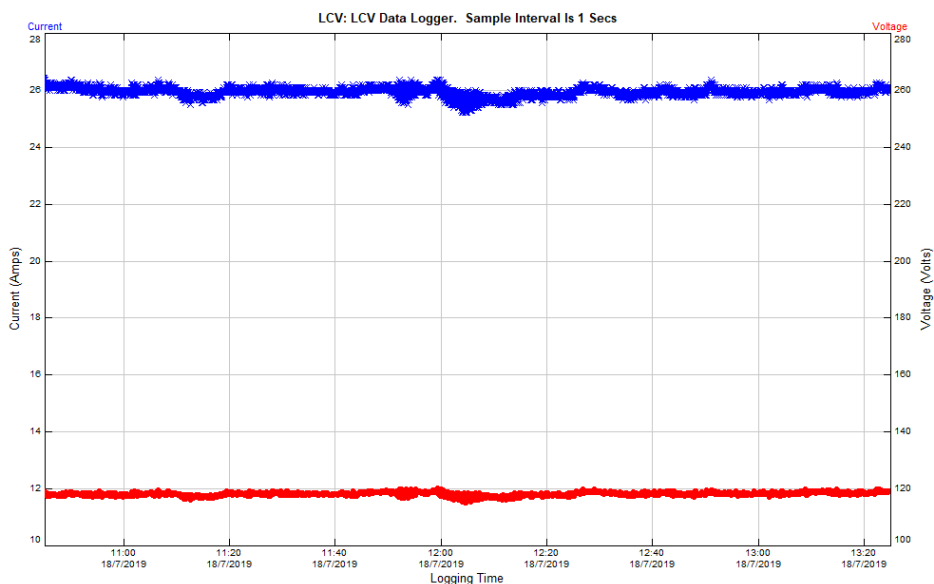


Figura 17. Corriente y voltaje en la planta para una señal de control del 100% (PWM=255) (Sealed Unit Parts, 2012)

En la Figura 17, se encuentra los datos de corriente y voltaje cuando a la planta se le somete a una señal de control de 100% (PWM=255=5V), la corriente promedio es 26A y el

voltaje promedio es 118VAC. Por lo tanto, se puede calcular la potencia experimental máxima de la planta:

$$P_{exp} = V * I \quad (13)$$

$$P_{exp} = 118V * 26A$$

$$P_{exp} = 3068W$$

Por lo que la potencia máxima de la planta es aproximadamente 3000 W. Esta potencia máxima estará distribuida equitativamente en las tres resistencias, ya que cada resistencia tiene el mismo valor en ohmios, 14Ω.

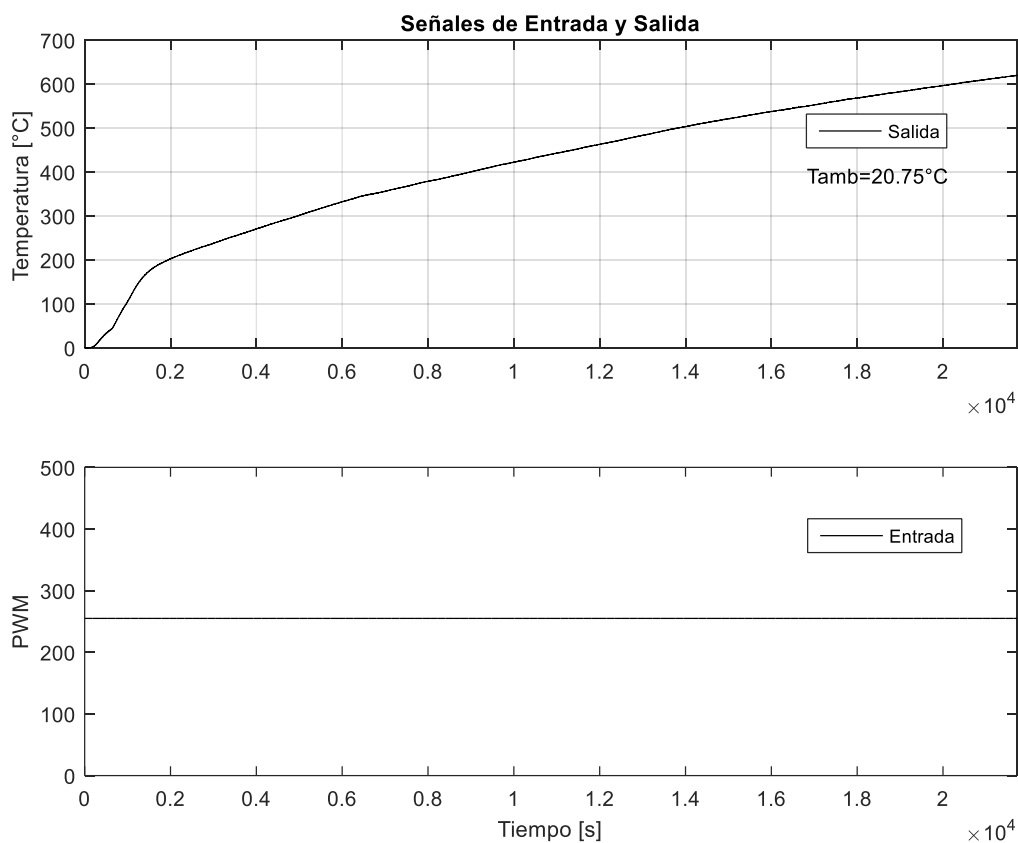


Figura 18. Respuesta de la planta a una señal de control PWM=255 (The MathWorks, 2015)

En la Figura 18, se presenta la curva de respuesta de la planta cuando se le somete a una señal paso de 255 (100% de potencia). El tiempo muestral de la adquisición de datos experimentales es de un segundo. La curva de respuesta de la Figura 18 parte superior se

encuentra encerrada, ya que parte de un punto en equilibrio, la cual es su temperatura ambiente, 20.75°C . A partir de esta curva de respuesta experimental máxima (ver Figura 18) se puede obtener su curva aproximada y su función de transferencia $G(s)$. La curva de respuesta máxima puede ser aproximada con una primera función exponencial de la siguiente forma:

$$y_1(t) = T_{\infty}(1 - e^{-\frac{t}{T}}) \quad (14)$$

Donde, T_{∞} es la temperatura de estabilización y T es la constante de tiempo. Esta curva de respuesta es una buena aproximación del sistema, ya que cumple las condiciones de borde que suceden en la planta:

$$y(\infty) = T_{\infty} \quad (15)$$

$$y(0) = 0 \quad (16)$$

La primera condición está muy de acuerdo con los límites operacionales de la planta, en vista de que la potencia máxima del sistema provocara obtener una temperatura máxima o temperatura límite de estabilización, T_{∞} . La segunda condición obedece que la planta parte de un estado estacionario, es decir una temperatura de estabilización, en este caso, la temperatura ambiente, 24°C . La curva de respuesta con esta primera aproximación tendrá la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_1(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (17)$$

Donde, K es la ganancia de la función de transferencia de la planta, L es el tiempo de retardo y T es la constante de tiempo.

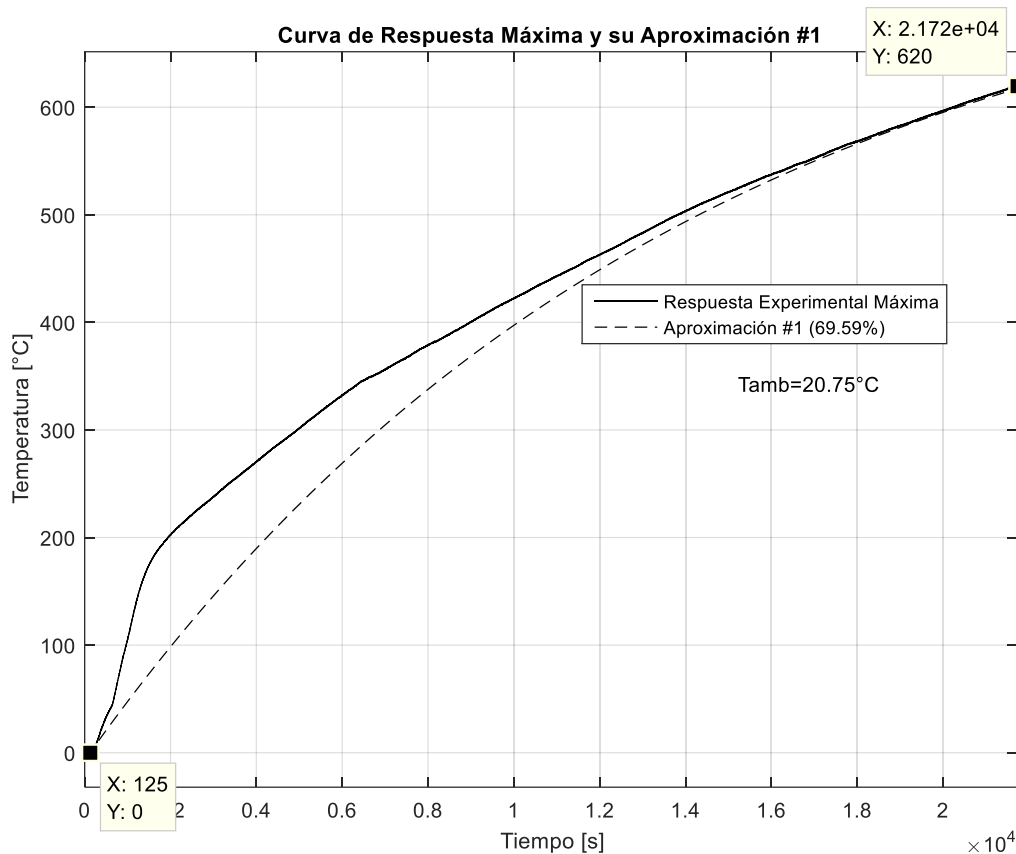


Figura 19. Curva de respuesta máxima de la planta y su primera curva de aproximación (The MathWorks, 2015)

En la Figura 19, la línea entrecortada representa la primera curva de aproximación de la respuesta experimental máxima de la planta. Esta curva de respuesta aproximada tiene la siguiente función de transferencia:

$$G_1(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} = \frac{3.0784 e^{-125s}}{14000s + 1}$$

$$K=3.0784 \quad L=125s \quad T=14000s$$

Como se puede apreciar en la Figura 19, la primera curva aproximada se ajusta a los datos experimentales un 69.59%. Para obtener este porcentaje de ajuste entre los datos experimentales y de simulación se utilizó el comando *compare* de MATLAB. Con el fin de aumentar el porcentaje de ajuste de la curva aproximada se recurre a una segunda función de la siguiente forma:

$$y_2(t) = T_\infty(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} + e^{-\frac{t}{T_3}}) \quad (18)$$

Donde: T_∞ , es la temperatura de estabilización; T_1 , T_2 y T_3 son las constantes de tiempo. Por simple inspección se puede comprobar que esta segunda aproximación cumple las condiciones de borde de la planta. La función de transferencia de esta segunda aproximación es:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{U(s)} &= G_2(s) \\ &= Ke^{-Td}s \frac{s^2(-T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3) + 2T_3s + 1}{s^3T_1T_2T_3 + s^2(T_1T_2 + T_1T_3 + T_2T_3) + s(T_1+T_2 + T_3) + 1} \end{aligned} \quad (19)$$

Donde: K es la ganancia de la función de transferencia de la planta, Td es el tiempo de retardo; T_1 , T_2 y T_3 son las constantes de tiempo.

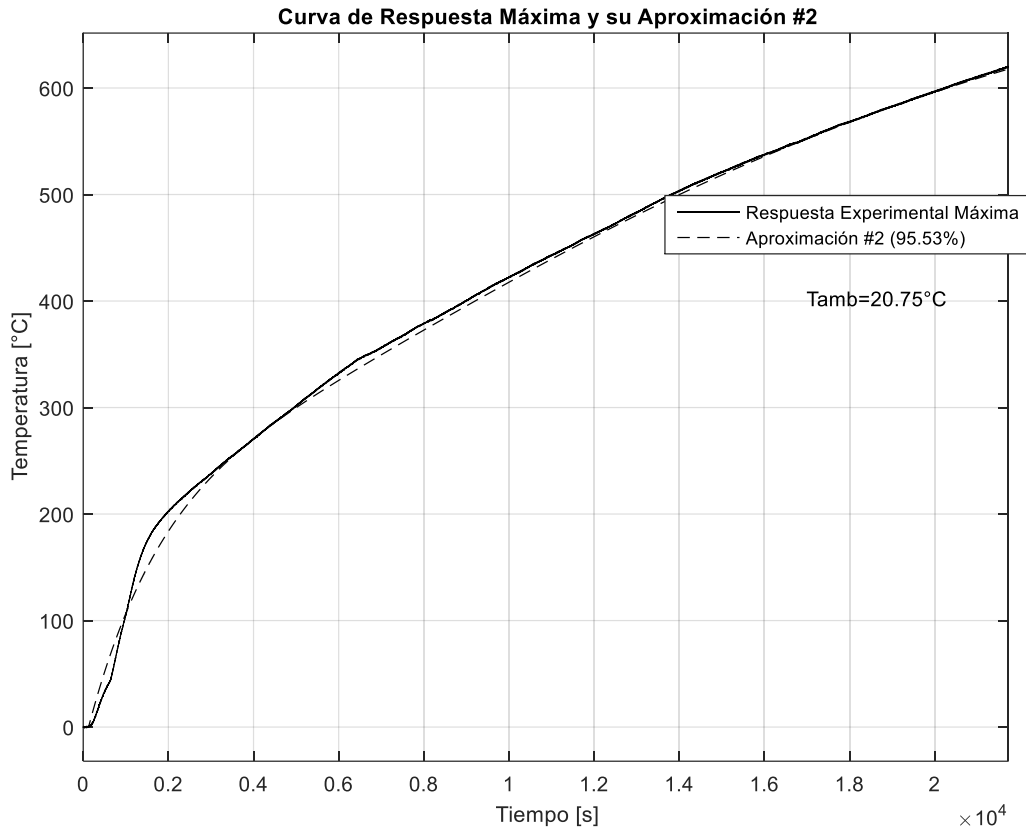


Figura 20. Curva de respuesta máxima de la planta y su segunda curva de aproximación (The MathWorks, 2015)

En la Figura 20, la línea entrecortada representa la segunda curva de aproximación, esta se obtuvo al variar los tres parámetros, T_1 , T_2 y T_3 , en la manera que se ajuste a la curva experimental.

$$T_1 = 2200; T_2 = 14000; T_3 = 3000$$

Esta segunda aproximación se ajusta a los datos experimentales un 95.53%. Esta curva de aproximación #2 tiene la siguiente función de transferencia:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{U(s)} &= G_2(s) \\ &= 3.0784e^{-125s} \frac{17800000s^2 + 6000s + 1}{92400000000s^3 + 79400000s^2 + 19200s + 1} \end{aligned} \quad (20)$$

Se puede aumentar el ajuste de la curva de aproximación en la región inicial de la curva de respuesta máxima si se aumenta los puntos de ajuste. Con este fin una tercera función de aproximación tiene la siguiente forma:

$$y_3(t) = T_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} + e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_4}} + e^{-\frac{t}{T_5}} \right) \quad (21)$$

Donde: T_{∞} , es la temperatura de estabilización; T_1 , T_2 , T_3 , T_4 y T_5 son las constantes de tiempo. Por simple inspección se puede comprobar que esta tercera aproximación también cumple las condiciones de borde de la planta. La función de transferencia de esta tercera aproximación es:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{U(s)} &= G_3(s) \\ &= K(e^{-Td}s(s^4(-T_1)T_2T_3T_4 + s^4T_1T_2T_3T_5 - s^4T_1T_2T_4T_5 \\ &+ s^4T_1T_3T_4T_5 + s^4T_2T_3T_4T_5 - 2s^3T_1T_2T_4 + 2s^3T_1T_3T_5 \\ &+ 2s^3T_2T_3T_5 + 2s^3T_3T_4T_5 - s^2T_1T_2 + s^2T_1T_3 - s^2T_1T_4 \\ &+ s^2T_1T_5 + s^2T_2T_3 - s^2T_2T_4 + s^2T_2T_5 + s^2T_3T_4 + 3s^2T_3T_5 \\ &+ s^2T_4T_5 + 2sT_3 + 2sT_5 + 1)) / ((sT_1 + 1)(sT_2 + 1)(sT_3 + 1)(sT_4 \\ &+ 1)(sT_5 + 1)) \end{aligned} \quad (22)$$

Donde, de la misma manera, K es la ganancia de la función de transferencia de la planta, Td es el tiempo de retardo; T_1 , T_2 , T_3 , T_4 y T_5 son las constantes de tiempo.

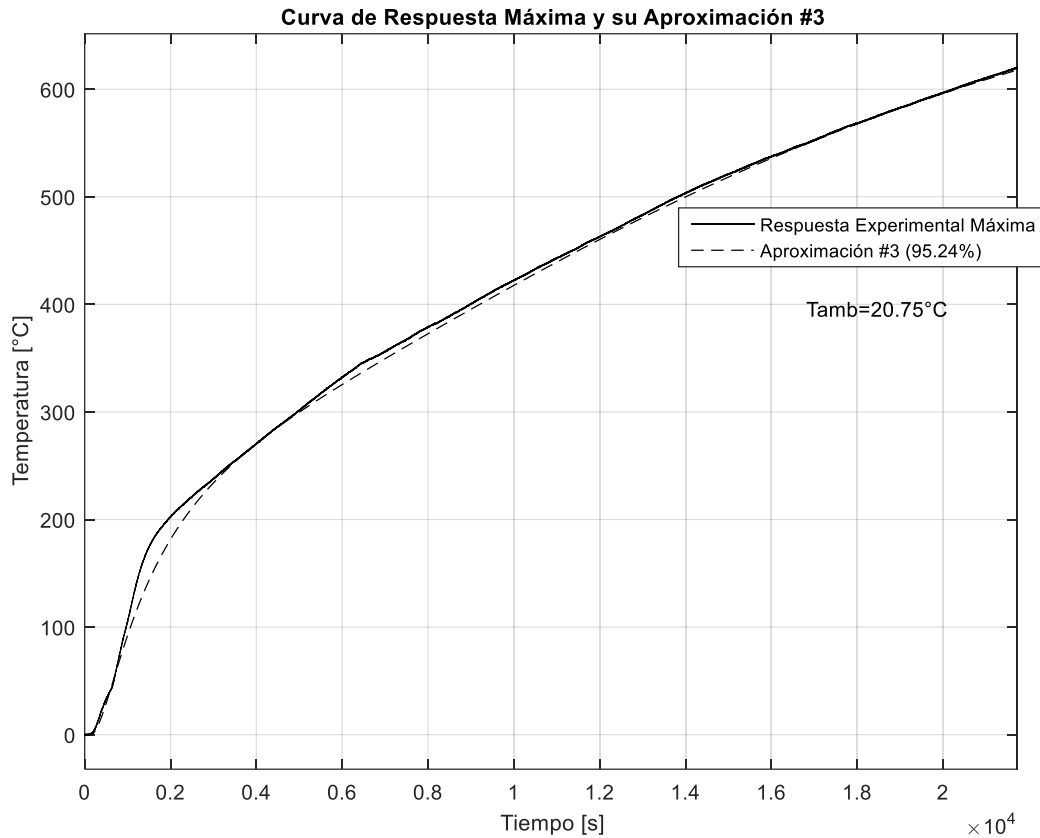


Figura 21. Curva de respuesta máxima de la planta y su tercera curva de aproximación (The MathWorks, 2015)

En la Figura 21, la línea entrecortada representa la tercera curva de aproximación, esta se obtuvo al variar los cinco parámetros, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 y T_5 en la manera que se ajuste a la curva experimental.

$$T_1 = 400; T_2 = 14000; T_3 = 3000; T_4 = 2200; T_5 = 370$$

Esta tercera aproximación se ajusta a los datos experimentales un 95.24%. Esta curva de aproximación #3 tiene la siguiente función de transferencia:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_3(s)$$

$$= -3.0784e^{-125s}(137600000000s^4 - 12212000000s^3 - 21992000s^2 - 6740s - 1)/((370s + 1)(400s + 1)(2200s + 1)(3000s + 1)(14000s + 1)) \quad (23)$$

En la figura 21, se ha aumentado el ajuste de la curva de aproximación en la parte inicial, pero no se ha logrado obtener un ajuste en la región de cambio de pendiente (~200°C), se puede aumentar el ajuste en esta región si se añade dos puntos de ajuste adicionales. Es así que, se puede utilizar una cuarta función de la siguiente forma.

$$y_4(t) = T_\infty(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}} + e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_4}} + e^{-\frac{t}{T_5}} - e^{-\frac{t}{T_6}} + e^{-\frac{t}{T_7}}) \quad (24)$$

La función de transferencia de esta cuarta aproximación es:

$$\begin{aligned} \frac{Y(s)}{U(s)} = G_4(s) = & \\ & = -((K(T_1T_2T_3T_4T_5T_6s^6 - T_1T_2T_3T_4T_5T_7s^6 + T_1T_2T_3T_4T_6T_7s^6 \\ & - T_1T_2T_3T_5T_6T_7s^6 + T_1T_2T_4T_5T_6T_7s^6 - T_1T_3T_4T_5T_6T_7s^6 - T_2T_3T_4T_5T_6T_7s^6 \\ & + 2T_1T_2T_3T_4T_6s^5 + 2T_1T_2T_4T_5T_6s^5 - 2T_1T_2T_3T_5T_7s^5 - 2T_1T_3T_4T_5T_7s^5 \\ & - 2T_2T_3T_4T_5T_7s^5 + 2T_1T_2T_4T_6T_7s^5 - 2T_1T_3T_5T_6T_7s^5 - 2T_2T_3T_5T_6T_7s^5 \\ & - 2T_3T_4T_5T_6T_7s^5 + T_1T_2T_3T_4s^4 - T_1T_2T_3T_5s^4 + T_1T_2T_4T_5s^4 - T_1T_3T_4T_5s^4 \\ & - T_2T_3T_4T_5s^4 + T_1T_2T_3T_6s^4 + 3T_1T_2T_4T_6s^4 + T_1T_3T_4T_6s^4 + T_2T_3T_4T_6s^4 \\ & + T_1T_2T_5T_6s^4 - T_1T_3T_5T_6s^4 - T_2T_3T_5T_6s^4 + T_1T_4T_5T_6s^4 + T_2T_4T_5T_6s^4 \\ & - T_3T_4T_5T_6s^4 - T_1T_2T_3T_7s^4 + T_1T_2T_4T_7s^4 - T_1T_3T_4T_7s^4 - T_2T_3T_4T_7s^4 \\ & - T_1T_2T_5T_7s^4 - 3T_1T_3T_5T_7s^4 - 3T_2T_3T_5T_7s^4 - T_1T_4T_5T_7s^4 - T_2T_4T_5T_7s^4 \\ & - 3T_3T_4T_5T_7s^4 + T_1T_2T_6T_7s^4 - T_1T_3T_6T_7s^4 - T_2T_3T_6T_7s^4 + T_1T_4T_6T_7s^4 \\ & + T_2T_4T_6T_7s^4 - T_3T_4T_6T_7s^4 - T_1T_5T_6T_7s^4 - T_2T_5T_6T_7s^4 - 3T_3T_5T_6T_7s^4 \\ & - T_4T_5T_6T_7s^4 + 2T_1T_2T_4s^3 - 2T_1T_3T_5s^3 - 2T_2T_3T_5s^3 - 2T_3T_4T_5s^3 + 2T_1T_2T_6s^3 \\ & + 2T_1T_4T_6s^3 + 2T_2T_4T_6s^3 - 2T_3T_5T_6s^3 - 2T_1T_3T_7s^3 - 2T_2T_3T_7s^3 - 2T_3T_4T_7s^3 \\ & - 2T_1T_5T_7s^3 - 2T_2T_5T_7s^3 - 4T_3T_5T_7s^3 - 2T_4T_5T_7s^3 - 2T_3T_6T_7s^3 - 2T_5T_6T_7s^3 \\ & + T_1T_2s^2 - T_1T_3s^2 - T_2T_3s^2 + T_1T_4s^2 + T_2T_4s^2 - T_3T_4s^2 - T_1T_5s^2 - T_2T_5s^2 \\ & - 3T_3T_5s^2 - T_4T_5s^2 + T_1T_6s^2 + T_2T_6s^2 - T_3T_6s^2 + T_4T_6s^2 - T_5T_6s^2 - T_1T_7s^2 \\ & - T_2T_7s^2 - 3T_3T_7s^2 - T_4T_7s^2 - 3T_5T_7s^2 - T_6T_7s^2 - 2T_3s - 2T_5s - 2T_7s \\ & - 1))/((sT_1 + 1)(sT_2 + 1)(sT_3 + 1)(sT_4 + 1)(sT_5 + 1)(sT_6 + 1)(sT_7 + 1))) \end{aligned} \quad (25)$$

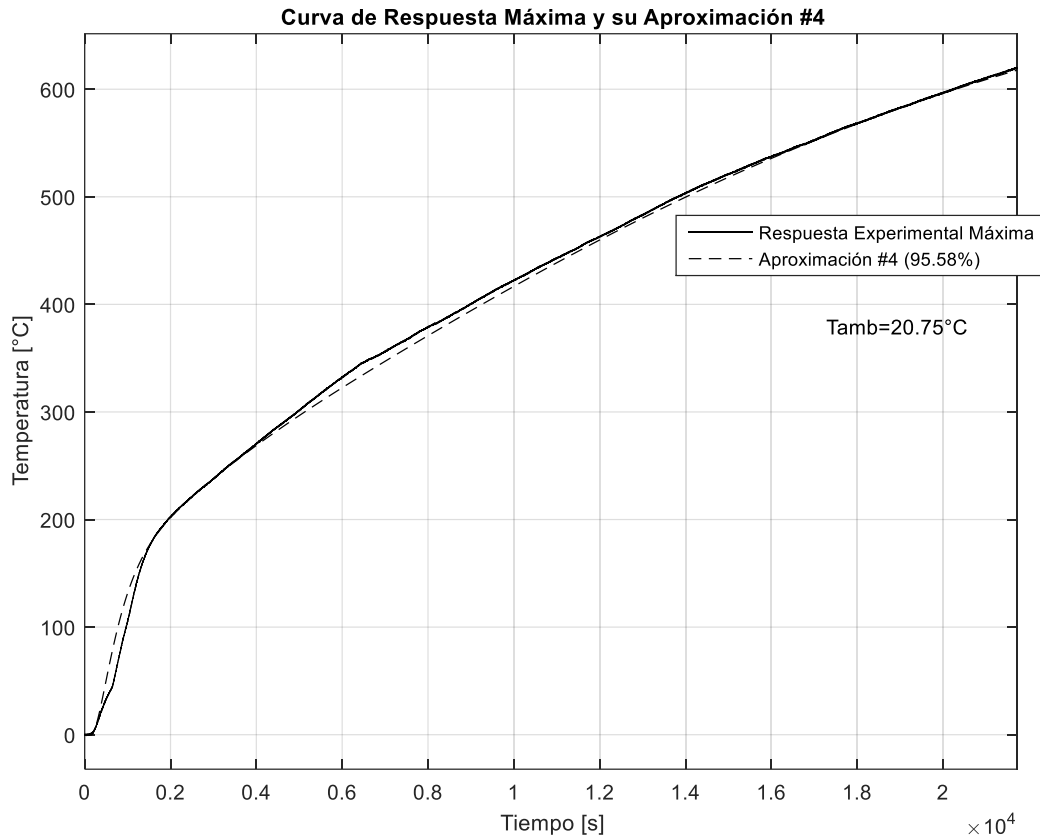


Figura 22. Curva de respuesta máxima de la planta y su cuarta curva de aproximación (The MathWorks, 2015)

En la figura 22, la línea entrecortada representa la cuarta curva de aproximación, esta se obtuvo al variar los siete parámetros, T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 , T_6 y T_7 en la manera que se ajustó a la curva experimental.

$$T_1 = 320; T_2 = 14000; T_3 = 800; T_4 = 680; T_5 = 280; T_6 = 2250; T_7 = 3000$$

La curva de aproximación #4 se ajusta a los datos experimentales un 95.58%. Esta curva posee la siguiente función de transferencia.

$$\begin{aligned}
\frac{Y(s)}{U(s)} &= G_4(s) \\
&= -3.0784e^{-125s}(19944960000000000s^6 \\
&- 8536550400000000s^5 - 37425686400000s^4 - 52124000000s^3 \\
&- 32804400s^2 - 8160s - 1)/((280s + 1)(320s + 1)(680s \\
&+ 1)(800s + 1)(2250s + 1)(3000s + 1)(14000s + 1))
\end{aligned} \tag{26}$$

Finalmente, se utiliza MATLAB para encontrar una quinta función de transferencia de la planta, aproximación #5. Al utilizar MATLAB para este fin se utiliza el toolbox *System Identification*. Dentro de *System Identification*, primero, se procede con la importación de los datos experimentales, seguido se realiza su estimación, aquí se utiliza *Transfer Function Models*, dentro de *Transfer Function Models* se utiliza 3 polos, 1 cero, y un *delay* de 125 segundos, y finalmente se importa la función de transferencia hacia el *Workspace* con el fin de realizar la comparación.

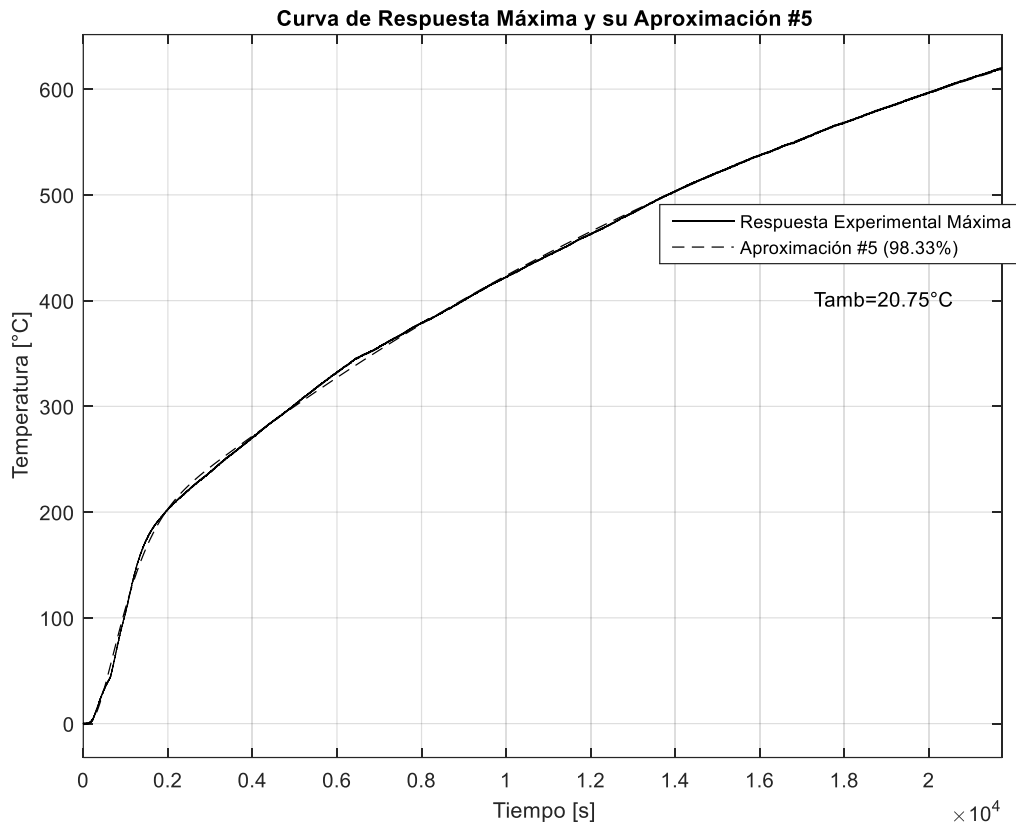


Figura 23. Curva de respuesta máxima de la planta y su quinta curva de aproximación (The MathWorks, 2015)

En la Figura 23, la función de transferencia de la aproximación #5 con ayuda de MATLAB es:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G_5(s) \quad (27)$$

$$= e^{-125s} \frac{2.816 \times 10^{-6}s + 6.807 \times 10^{-10}}{s^3 + 0.003465s^2 + 4.25 \times 10^{-6}s + 1.992 \times 10^{-10}}$$

La aproximación #5 se ajusta a los datos experimentales un 98.33%, Por lo tanto, esta función de transferencia es la que mejor se ajusta a los datos experimentales de todas las aproximaciones realizadas. La aproximación #4 y #5 se considera como modelo dinámico de la planta con objeto de inspeccionar cual predice de mejor manera el comportamiento de la planta para diferentes señales de entrada (temperatura y tasa de calentamiento) hacia el controlador PID.

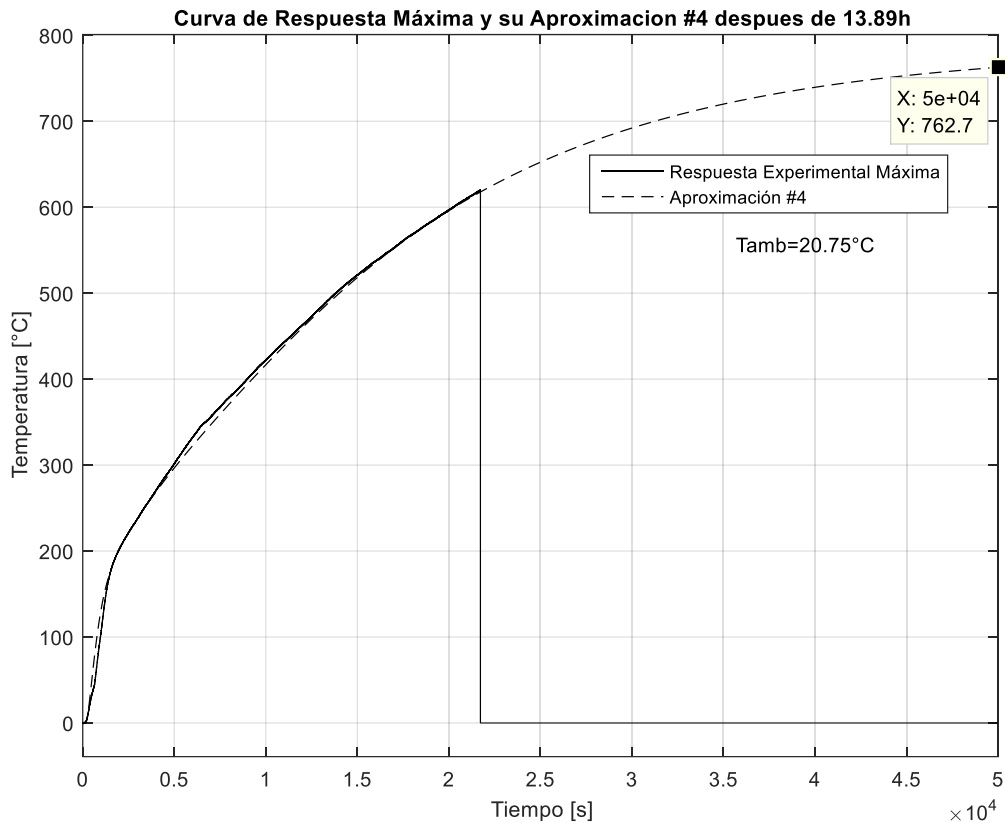


Figura 24. Curva de respuesta máxima de la planta y su cuarta curva de aproximación después de 13.89 horas (The MathWorks, 2015)

A partir de la aproximación #4 se puede calcular la temperatura máxima de estabilización, $T(\infty)$. En la Figura 24, la temperatura después de 13.89 horas (50000 segundos) es de 783.45°C. Utilizando la función de transferencia de la aproximación #4 se puede obtener la temperatura límite de estabilización, $T(\infty)$, esta es de 785°C.

Con el modelo de la planta se realiza la simulación en Simulink para diferentes valores K_p , K_i y K_d del controlador PID que permitan un sobre disparo de la señal de referencia (temperatura y tasa de calentamiento) menor que el 10%.

El modelo en Simulink del sistema de control se presenta en la siguiente figura.

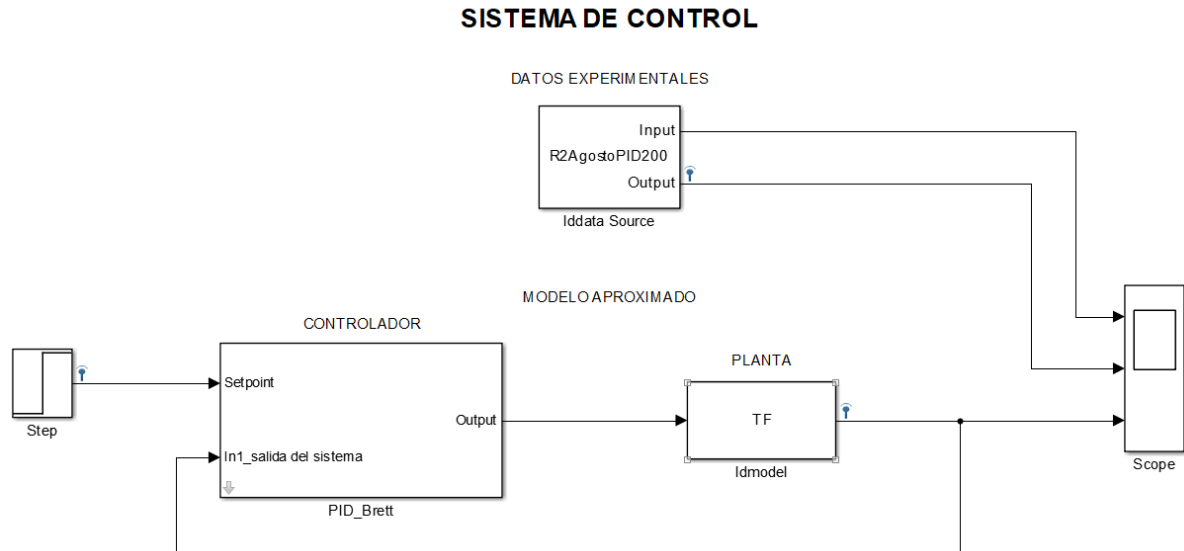


Figura 25. Modelo en Simulink del sistema de control (The MathWorks, 2015)

En la Figura 25: *Iddata Source* son los datos experimentales, es decir la respuesta real de la planta; *Idmodel* es la función de transferencia de la planta elegida, en este caso *TF* representa la función de transferencia que proviene del toolbox *System Identification*, aproximación #5; y *PID_Brett* es el modelo del controlador PID implementado en el Arduino (ver capítulo 3.1).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente figura se presenta la respuesta experimental del sistema de control a una entrada paso o Setpoint de 265.25°C. También, se muestra el resultado de la simulación en Simulink para las dos aproximaciones de la planta, #4 y #5.

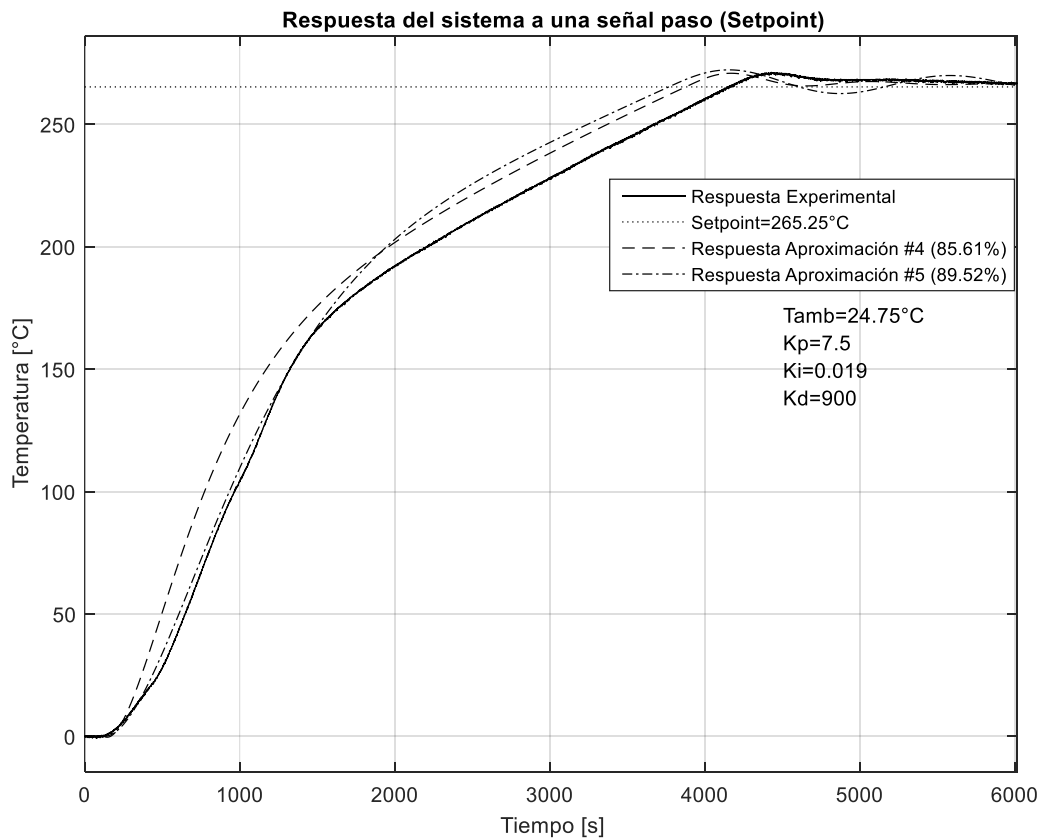


Figura 26. Respuesta del sistema a un Setpoint de 265.25°C, región transitoria y de estabilización (The MathWorks, 2015)

En la Figura 26, la respuesta de simulación utilizando la aproximación #4 (línea entrecortada) tiene un offset en toda la región transitoria lo que provoca que su ajuste a la respuesta experimental sea del 85.61%, mientras que la respuesta de simulación utilizando la aproximación #5 (línea punto raya) posee un offset después de pasar la región de cambio de

pendiente ($\sim 200^{\circ}\text{C}$). Esto provoca que la segunda respuesta de simulación (aproximación #5) se ajuste mejor a la curva de respuesta experimental, 89.52% de ajuste.

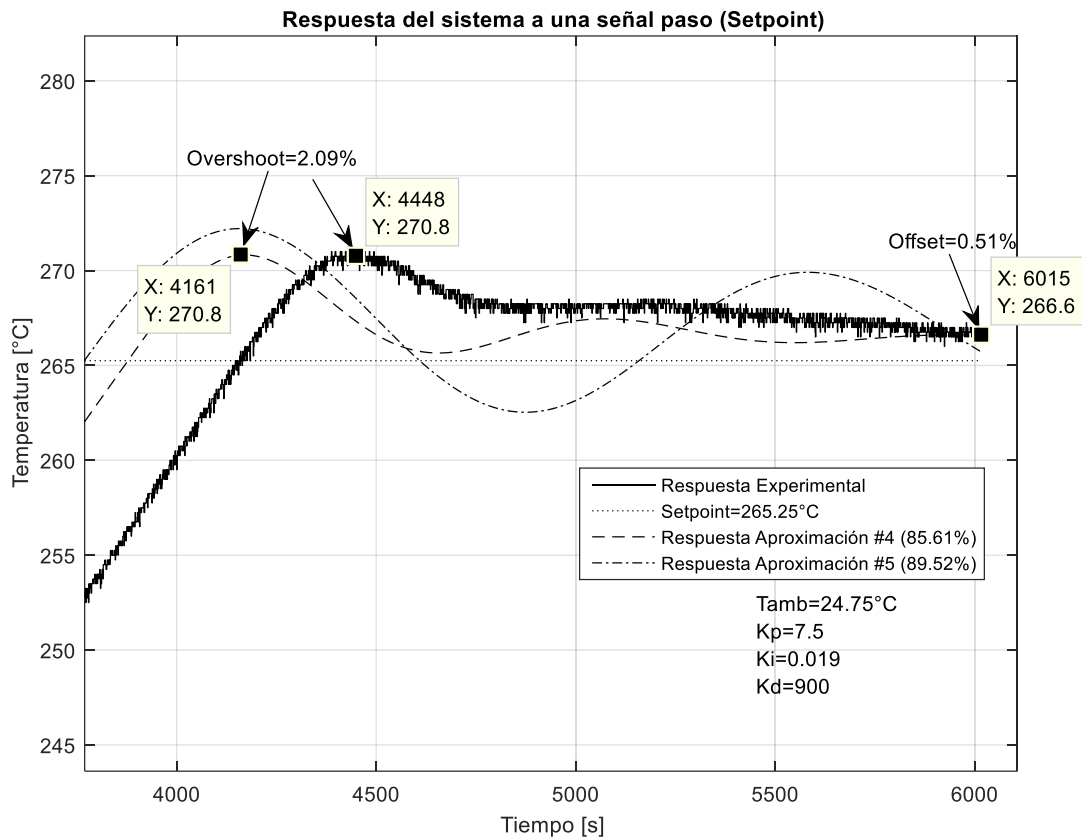


Figura 27. Respuesta del sistema a un Setpoint de 265.25°C , región de estabilización (The MathWorks, 2015)

En la Figura 27, se presenta un acercamiento a la región de estabilización de la respuesta del sistema para una entrada paso de 265.25°C con los parámetros K_p , K_i y K_d detallados en la misma gráfica. Los parámetros K_p , K_i y K_d implementados en el controlador *PID* fueron ajustados hasta obtener una respuesta de simulación con un sobre disparo (Overshoot) menor que el 10%. La respuesta de simulación utilizando la aproximación #5 (línea punto raya) presenta una oscilación en toda la región de estabilización, por lo que esta aproximación no predice el comportamiento del sistema. Por otro lado, la respuesta de simulación utilizando la aproximación #4 predice el comportamiento del sistema, en vista de que el sobre disparo (Overshoot=2.09%) coincide con la curva de respuesta experimental, y

además el offset en la parte final de ambas curvas, simulación y experimental, son iguales (Offset=0.51%). Por lo tanto, la aproximación #4 se considera como mejor aproximación del comportamiento dinámico de la planta, y por consiguiente la que mejor predice el comportamiento del sistema de control.

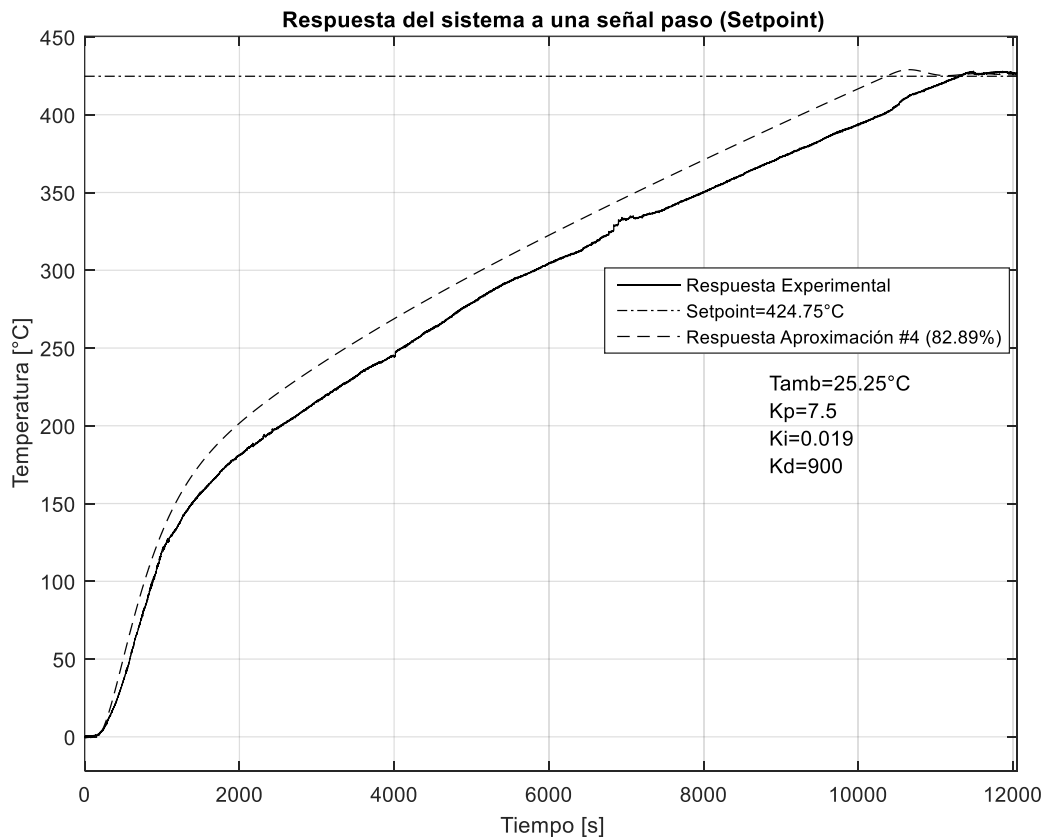


Figura 28. Respuesta del sistema a un Setpoint de 424.75°C, región transitoria y de estabilización (The MathWorks, 2015)

En la Figura 28, se muestra el resultado del sistema de control a una señal paso (Setpoint) de 424.75°C. La curva de simulación (Aproximación #4) predice el comportamiento del sistema en la región transitoria y de estabilización, su porcentaje de ajuste a la respuesta experimental es del 82.89%.

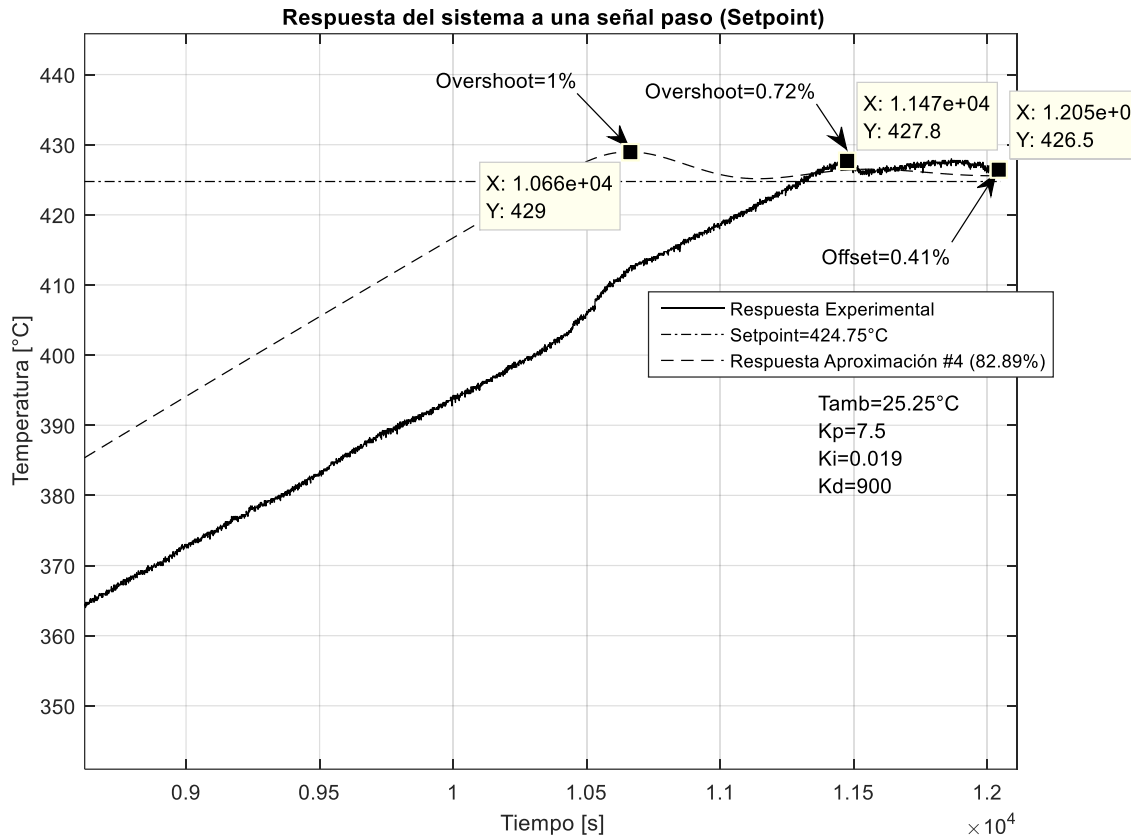


Figura 29. Respuesta del sistema a un Setpoint de 424.75°C, región de estabilización (The MathWorks, 2015)

En la Figura 29, la curva de respuesta de simulación (Aproximación #4) predice el comportamiento del sistema en la región de estabilización, ya que esta curva experimenta un sobre disparo del 1% y un offset cerca del 0.2%, y esto también sucede en la curva de respuesta experimental, la cual tiene un sobre disparo del 0.72% y un offset del 0.41%. Por lo tanto, los parámetros del controlador (K_p , K_i , K_d) utilizados se pueden fijar como parámetros finales de tuning del controlador PID para una señal paso (Setpoint).



Figura 30. Resultado del calentamiento de la Biomasa hasta una temperatura de 450°C (Biochar)

En la Figura 30, la biomasa ha sido calentada hasta una temperatura de 450°C desde una temperatura ambiente de 25.25°C (ver Figura 28). En esta figura se puede apreciar que el biochar no muestra rastros de combustión, lo cual asegura que se mantuvo la atmósfera inerte (nitrógeno) dentro del reactor durante el proceso de pirólisis.

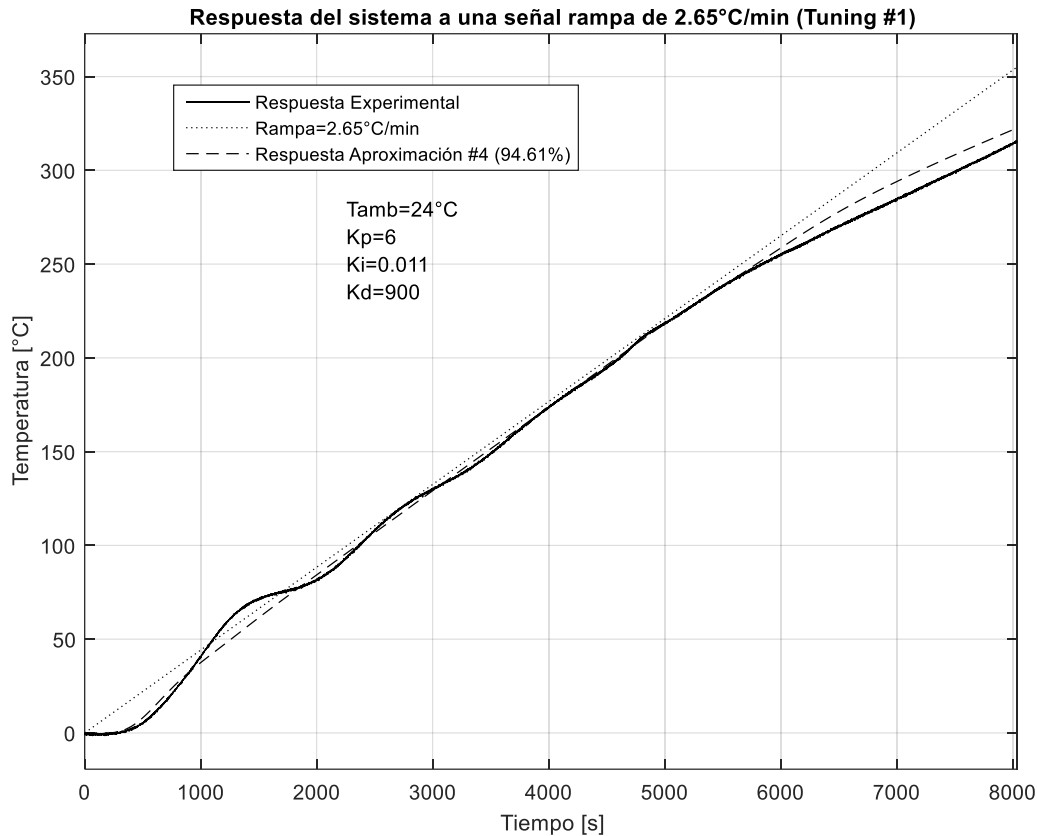


Figura 31. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min, primer tuning (The MathWorks, 2015)

En la Figura 31, el sistema de control ha sido sometido a una señal rampa (tasa de calentamiento) de 2.65°C/min (línea de puntos). La línea sólida representa la respuesta experimental del sistema ante tal señal, y la línea entrecortada representa la respuesta de simulación utilizando la aproximación #4, la misma que predice el comportamiento del sistema un 94.61%. En esta figura, la respuesta de simulación no predice el comportamiento dinámico del sistema efectivamente, en vista de que la respuesta experimental presenta oscilación en la región inicial, y esto no se observa en la respuesta de simulación. Por lo tanto, se descarta la respuesta de simulación como medio de predicción y se recurre a un tuning manual con el fin de evitar la oscilación en la región inicial de la curva de respuesta. La falta de predicción de la curva de simulación puede ser debido a que la función de transferencia de la planta utilizada no consideró todo el comportamiento de la planta, es decir, la función de transferencia utilizada no utilizó datos de estabilización experimentales.

Esto debido principalmente a que solo se adquirió datos de la respuesta máxima de la planta durante el lapso de seis horas, y como se puede ver en la Figura 18, la planta presenta una región de estabilización mayor a las seis horas.

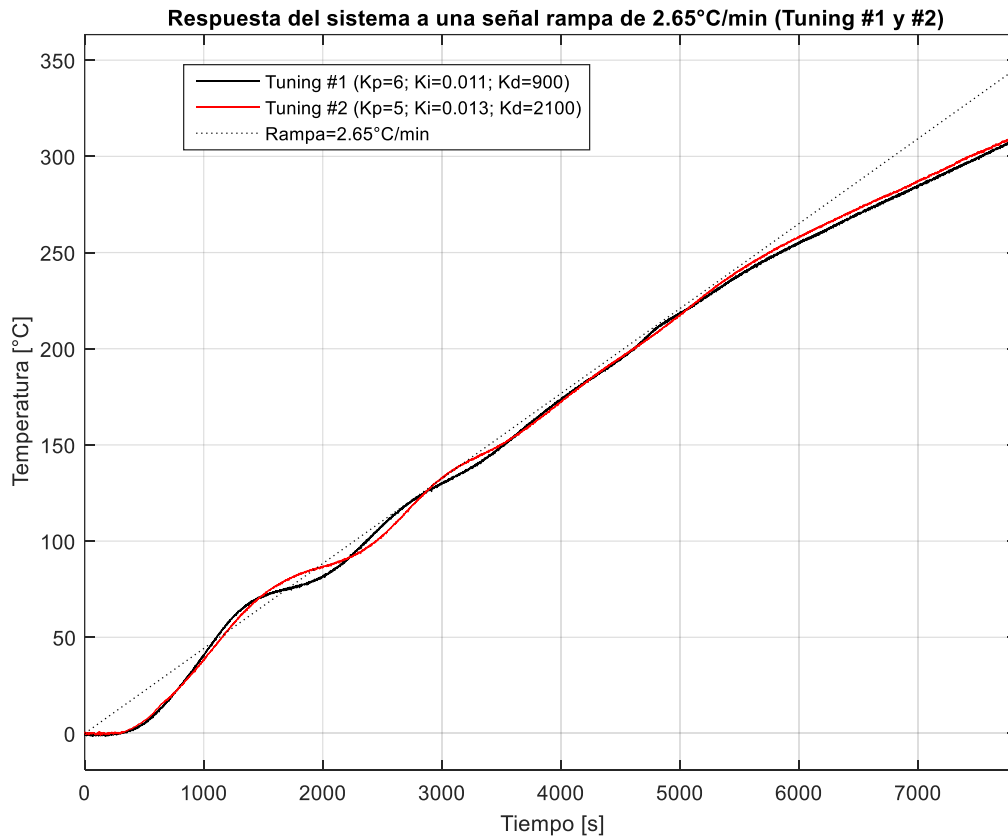


Figura 32. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min, tuning #1 y #2 (The MathWorks, 2015)

En la Figura 32, la línea sólida negra representa la respuesta experimental del sistema al primer tuning ($K_p=6$, $K_i=0.011$, $K_d=900$) y la línea sólida roja muestra la respuesta del sistema al cambio de los parámetros del controlador ($K_p=5$, $K_i=0.013$, $K_d=2100$). En esta figura, se pretendió aumentar la estabilidad con el aumento de K_i ($K_i=0.013$), y el aumento del K_d ($K_d=2100$), pero la respuesta fue en un aumento de inestabilidad, por lo que se debe proceder en sentido contrario.

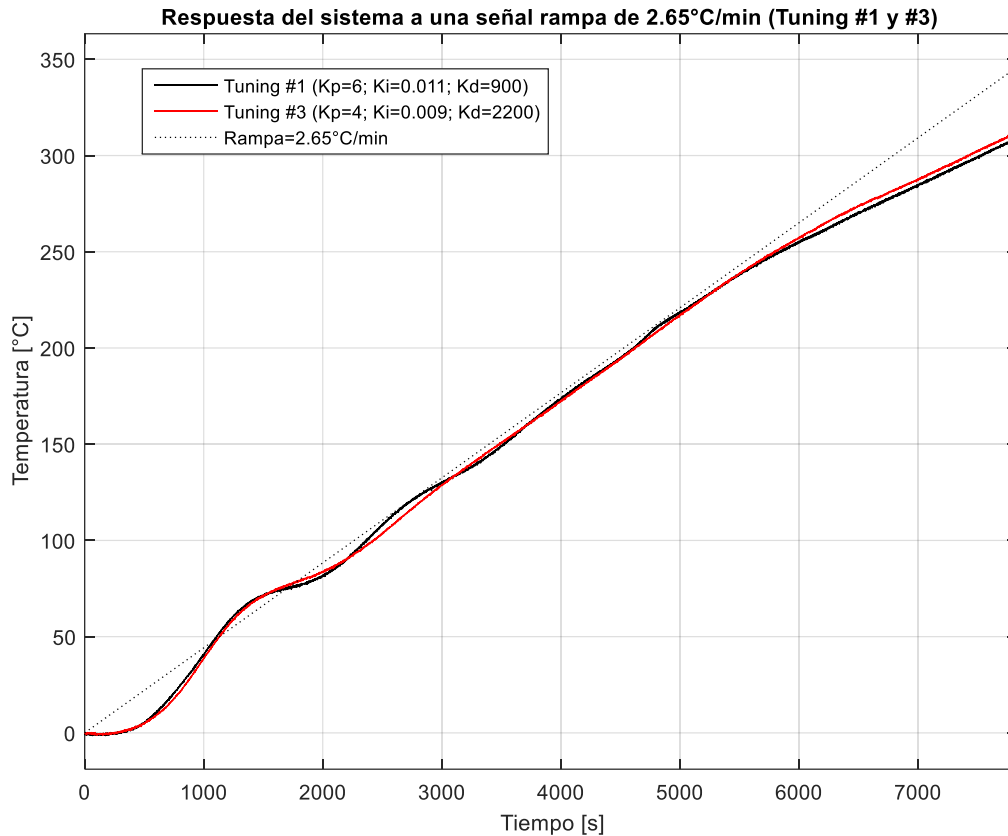


Figura 33. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min, tuning #1 y #3 (The MathWorks, 2015)

En la Figura 33, la línea sólida roja representa la respuesta del sistema al tercer cambio de los parámetros del controlador ($K_p=4$; $K_i=0.009$; $K_d=2200$), como se puede apreciar el sistema responde de la manera prevista, es decir, al disminuir el K_i se disminuye la oscilación en la región de estabilidad. No se disminuyó el K_d , por que este se encarga de la parte transitoria de la curva de respuesta. La curva de respuesta se puede mejorar aún más si se realiza un cuarto tuning con objeto de disminuir el offset en la región inicial. Por lo tanto, ahora se debe disminuir el K_d .

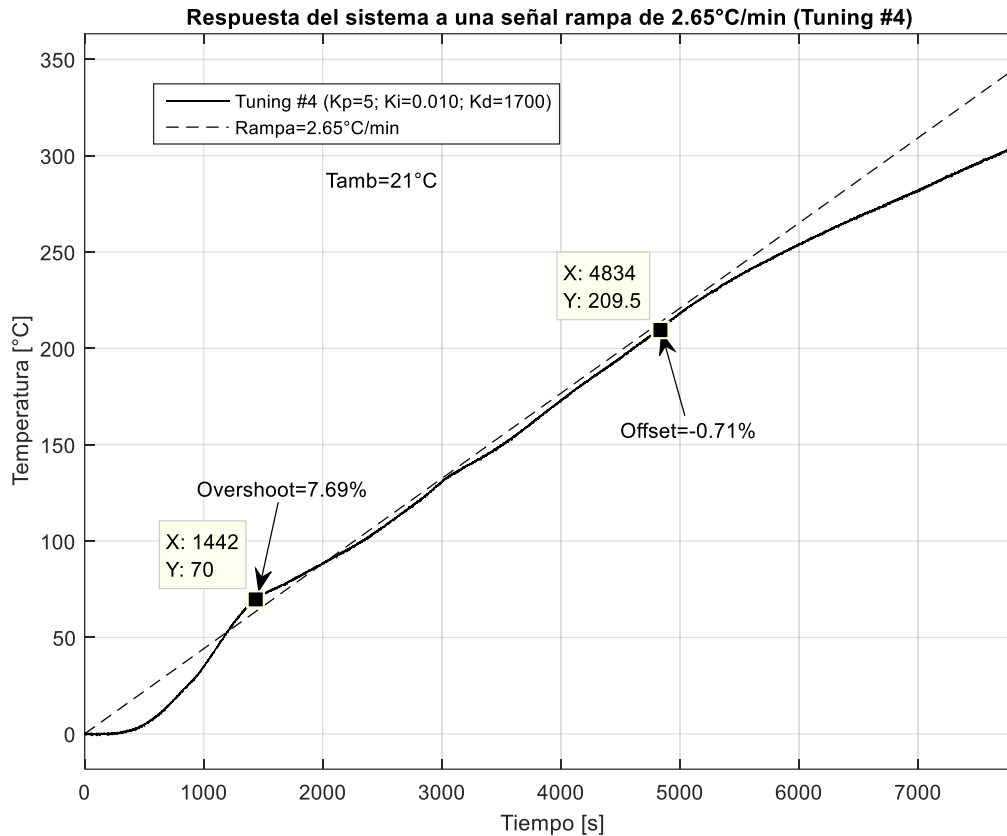


Figura 34. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min, tuning #4 (The MathWorks, 2015)

En la Figura 34, la línea sólida negra muestra la respuesta del sistema al cuarto y último tuning del controlador ($K_p=5$, $K_i=0.010$, $K_d=1700$), su resultado predice lo esperado, ya que al reducir su K_d ($K_d=1700$) la curva de respuesta se ha acercado más a la señal de velocidad (tasa de calentamiento) en la región inicial. En esta figura, la respuesta del sistema tiene un sobre disparo con referencia a la entrada rampa del 7.69%, y experimenta un offset de -0.71%. Estos resultados están dentro de la condición impuesta al sistema (Overshoot menor que el 10%), por lo que se fijan estos parámetros como idóneos para el controlador cuando se le someta a una tasa de calentamiento.

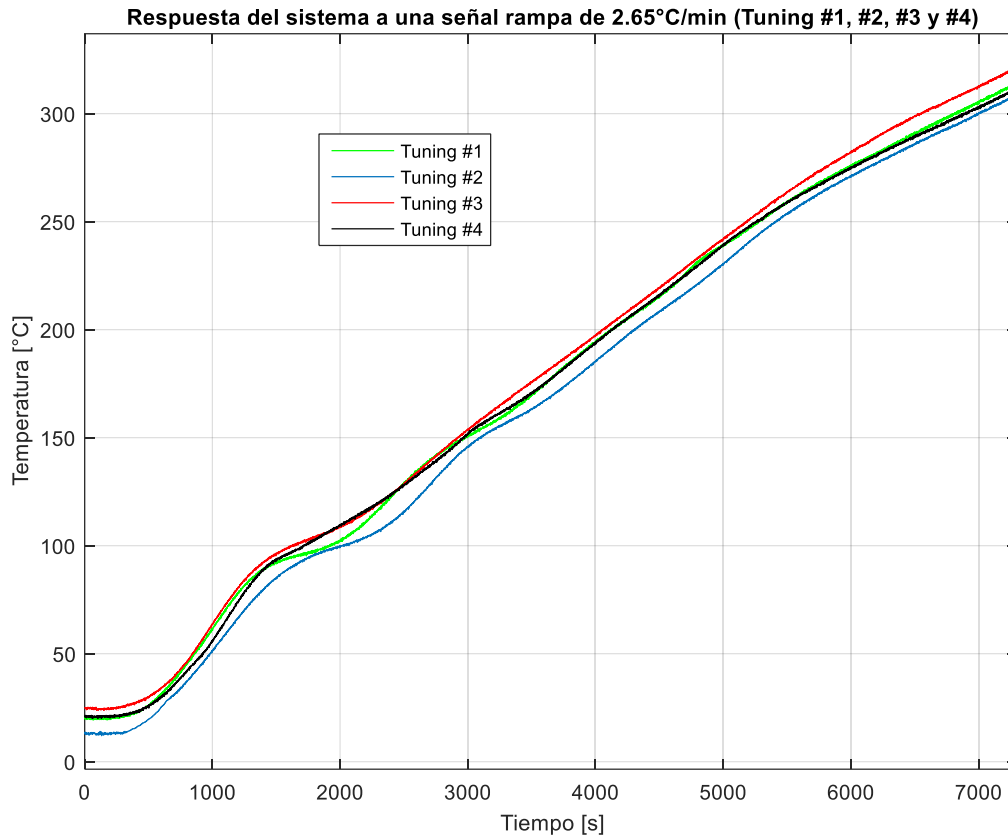


Figura 35. Respuesta del sistema a una tasa de calentamiento de 2.65°C/min (Tuning #1, #2, #3 y #4) (The MathWorks, 2015)

El sistema de control al disponer de una potencia limitada (3000W) no puede seguir la señal de velocidad por un tiempo ilimitado, en la Figura 35 se observa que el sistema intenta seguir la señal de velocidad hasta alcanzar una temperatura límite (~250°C), después de alcanzar esta temperatura límite, el sistema ya no puede seguir la señal de referencia. Es así como, el sistema de control después de alcanzar este punto máximo envía toda la potencia disponible (3000W) hacia la planta con el fin de alcanzar la señal de referencia. Esto es evidente por la forma de la curva de respuesta experimental después de sobrepasar el punto máximo o región máxima bajo una señal de rampa y la forma de la curva de respuesta experimental máxima después de la temperatura límite, ambas tienen la misma forma (ver Figura 36).

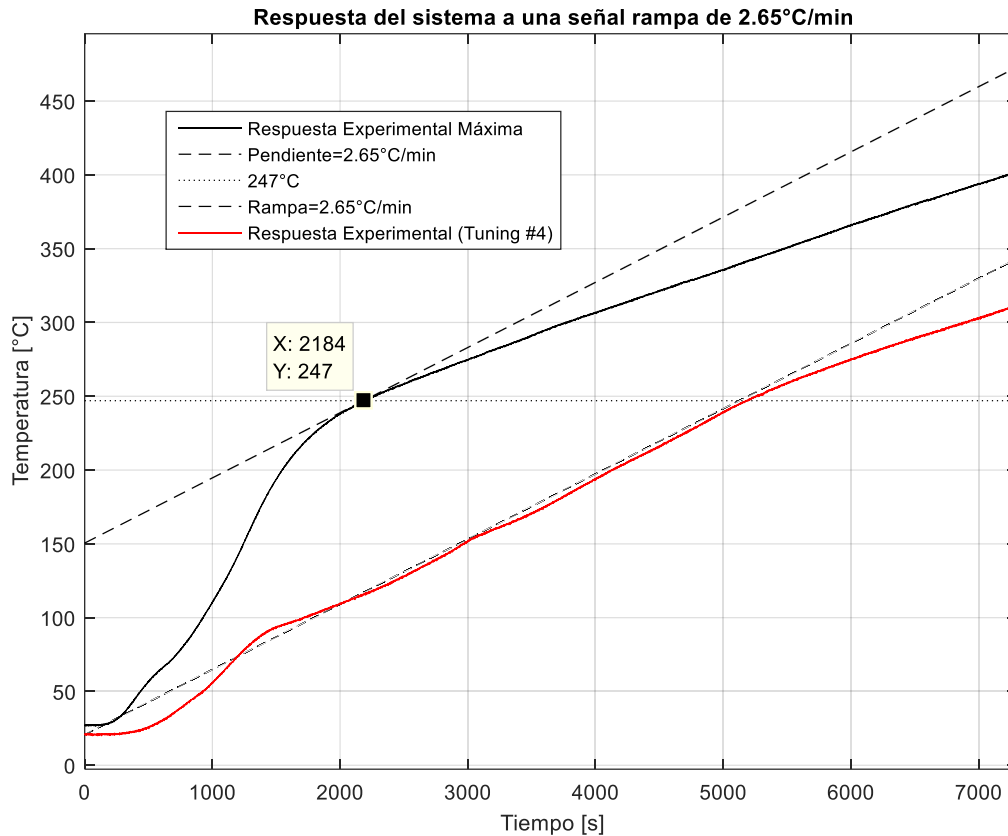


Figura 36. Respuesta del sistema a una señal rampa de 2.65°C/min (Tuning #4) y su curva de Respuesta Experimental Máxima (The MathWorks, 2015)

La tasa de calentamiento que puede seguir el sistema está relacionada con la curva de respuesta experimental máxima. En la Figura 36, el sistema es sometido a una señal de velocidad de 2.65°C/min, esta señal de velocidad coincide con la pendiente de la curva de respuesta máxima en la temperatura de 247°C. Es así que, a partir de la Figura 36, el sistema puede seguir una señal de velocidad hasta alcanzar la temperatura máxima, la cual corresponde con la pendiente de la curva de respuesta experimental máxima en esa temperatura. Es decir que, la pendiente de la curva de respuesta experimental máxima indica en cada punto con que tasa de calentamiento máxima se le puede someter al sistema para siga esta señal de velocidad en forma constante.

5. CONCLUSIONES

La función de transferencia de la planta obtenida con ayuda de MATLAB, aproximación #5, es la mejor aproximación a los datos experimentales de la planta, 98.33% de ajuste, pero esta no predice el comportamiento dinámico del sistema. Es así que, la función de transferencia obtenida analíticamente, aproximación #4, la cual tiene un ajuste a los datos experimentales del 95.58%, predice de manera satisfactoria el comportamiento dinámico del sistema para una entrada paso o Setpoint de referencia. Es así como, una aproximación sencilla (analítica, aproximación #4), pero que conlleva un poco más de tiempo obtenerla, es la mejor opción a la hora de predecir el comportamiento dinámico de un sistema.

El modelo dinámico del sistema utilizando la aproximación #4 no puede predecir la respuesta del sistema a una señal de velocidad (tasa de calentamiento). Esto puede ser debido a que esta función de transferencia no considero todo el comportamiento de los datos experimentales de la planta. Es así como, esta función de transferencia provino de una curva de respuesta sin datos experimentales de estabilización. En vista de que la aproximación #4 predice satisfactoriamente el comportamiento del sistema bajo una señal de posición (Setpoint, temperatura), se puede asumir que para predecir el comportamiento dinámico del sistema cuando es sometido a una señal de velocidad se debe conocer la curva de respuesta en su totalidad, es decir, la región transitoria y la región de estabilización.

La pendiente de la curva de respuesta experimental máxima indica en cada punto la tasa de calentamiento máxima con la cual se le puede someter al sistema para que siga esta señal de velocidad de forma constante. Es así que, para llegar a cierta temperatura con una tasa de calentamiento determinada se debe conocer la pendiente de la curva de respuesta experimental máxima en esa temperatura.

6. RECOMENDACIONES

El flujo constante de nitrógeno hacia el reactor de biochar no asegura una completa evacuación del oxígeno dentro del reactor. Para obtener una completa evacuación del oxígeno y por lo tanto una atmósfera inerte total se recomienda realizar una succión de la atmósfera presente en la cámara del reactor antes del iniciar el proceso de pirolisis, con esto se evitará una posible combustión de la biomasa en altas temperaturas.

Para aprovechar todo el gas del proceso de pirolisis se recomienda implementar un sistema de intercambiador de calor a la salida de los gases del reactor con el fin de generar bio-oil, con esto se aprovecharía al máximo toda la descomposición termoquímica de la biomasa durante el proceso de pirolisis.

El controlador de temperatura tiene el potencial de controlar cualquier sistema térmico que utilice como fuente de calor un elemento resistivo. Es así que, se recomienda probar su funcionalidad con diferentes sistemas compatibles, es decir, con aquellos sistemas que utilicen una carga resistiva como medio para elevar la temperatura de un material.

7. REFERENCIAS

- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., . . . Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere*, *99*, 19-33.
- Beauregard, B. (2011). Improving the Beginner's PID – Introduction. Retrieved from <http://brettbeauregard.com/blog/2011/04/improving-the-beginners-pid-introduction/>
- Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., Mašek, O. e., Brown, R., & del Campo, B. (2015). Biochar production technology. In *Biochar for Environmental Management* (pp. 95-120): Routledge.
- Brick, S., & Lyutse, S. (2010). Biochar: Assessing the promise and risks to guide US policy. *Natural Resources Defense Council: NRDC Issue Paper*.
- Cantrell, K. B., Hunt, P. G., Uchimiya, M., Novak, J. M., & Ro, K. S. (2012). Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar. *Bioresource technology*, *107*, 419-428.
- Chen, X., Chen, G., Chen, L., Chen, Y., Lehmann, J., McBride, M. B., & Hay, A. G. (2011). Adsorption of copper and zinc by biochars produced from pyrolysis of hardwood and corn straw in aqueous solution. *Bioresource technology*, *102*(19), 8877-8884.
- Cole-Parmer. (2018). Rotameter-Variable Area Flowmeter Technical Information. Retrieved from <https://www.coleparmer.com/tech-article/rotameters-variable-area-flowmeters-tech-info>
- Dassault Systemes. (2016). SOLIDWORKS Premium (Version 2016 SP 2.0). Retrieved from <https://www.solidworks.com/es>
- Demirbas, A., & Arin, G. (2002). An overview of biomass pyrolysis. *Energy sources*, *24*(5), 471-482.
- Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource technology*, *114*, 644-653.
- Gavazzi, C. (2018). Solid State Relays 1-Phase with Integrated Heatsink Proportional Switching Controllers Types RGC1P..AA..., RGC1P.. V.. . Retrieved from https://www.gavazzionline.com/pdf/SSR_RGC1P.pdf
- Labcenter Electronics. (2017). Proteus 8 Professional (Version 8.6 SP2). Retrieved from <https://www.labcenter.com>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2015). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*: Routledge.
- Lehmann, J., Skjemstad, J., Sohi, S., Carter, J., Barson, M., Falloon, P., . . . Krull, E. (2008). Australian climate–carbon cycle feedback reduced by soil black carbon. *Nature Geoscience*, *1*(12), 832.
- Manyà, J. J. (2012). Pyrolysis for biochar purposes: a review to establish current knowledge gaps and research needs. *Environmental science & technology*, *46*(15), 7939-7954.
- Milne, J., & Giler, R. (1990). Nickel-chromium alloys for electric resistance heating.
- Mohan, D., Pittman Jr, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review. *Energy & fuels*, *20*(3), 848-889.
- Ogata, K. (2010). Modern Control Engineering. United State, America. In: PEARSON.(5 th Edi.).
- Schmidt, H. P., Abiven, S., Kammann, C., Glaser, B., Bucheli, T., Leifeld, J., & Shackley, S. (2016). European Biochar Certificate—Guidelines for a Sustainable Production of Biochar. *European Biochar Foundation (EBC): Arbaz, Switzerland*.

- Sealed Unit Parts. (2012). LOGiTpc Interface Software (Version 2.51). Retrieved from www.supco.com
- The MathWorks. (2015). MATLAB (Version R2015a). Retrieved from <https://www.mathworks.com/>
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11).

8. ANEXOS

ANEXO A. FACTORES DE CORRECCIÓN DE GRAVEDAD ESPECIFICA

Tabla A1. Factores de corrección de gravedad específica (Cole-Parmer, 2018)

Specific Gravity Correction Factors																	
Gas Meter is Calibrated With	Gas Being Used																
	Hydrogen	Helium	Methane	Ammonia	Neon	Acetylene	Nitrogen/Carbon Monoxide	Ethylene	Air	Ethane	Oxygen	Hydrogen Sulfide	Argone	Nitrous / Carbon Dioxide	Propane	Butane	Sulfur Dioxide
Hydrogen	1	0.70	0.35	0.34	0.32	0.28	0.27	0.27	0.26	0.26	0.25	0.24	0.22	0.21	0.21	0.18	0.18
Helium	1.41	1	0.50	0.48	0.45	0.38	0.38	0.38	0.37	0.36	0.35	0.34	0.32	0.30	0.30	0.26	0.25
Methane	2.82	2	1	0.97	0.89	0.78	0.76	0.75	0.74	0.73	0.71	0.68	0.63	0.60	0.59	0.52	0.49
Ammonia	2.92	2.06	1.03	1	0.92	0.81	0.78	0.78	0.77	0.75	0.73	0.70	0.66	0.62	0.62	0.54	0.51
Neon	3.17	2.25	1.12	1.06	1	0.88	0.85	0.84	0.83	0.82	0.80	0.76	0.71	0.67	0.67	0.58	0.55
Acetylene	3.62	2.56	1.28	1.24	1.14	1	0.97	0.96	0.95	0.93	0.91	0.87	0.81	0.77	0.76	0.66	0.63
Nitrogen/Carbon Monoxide	3.74	2.64	1.32	1.28	1.18	1.03	1	1	0.98	0.96	0.94	0.90	0.84	0.80	0.79	0.68	0.65
Ethylene	3.74	2.66	1.33	1.26	1.18	1.03	1	1	1.01	0.96	0.94	0.90	0.84	0.80	0.79	0.69	0.66
Air	3.61	2.69	1.35	1.30	1.20	1.04	1.02	1.01	1	0.98	0.95	0.92	0.85	0.81	0.80	0.70	0.66
Ethane	3.90	2.76	1.38	1.33	1.23	1.08	1.04	1.04	1.02	1	0.96	0.94	0.88	0.83	0.82	0.71	0.68
Oxygen	4	2.82	1.41	1.36	1.26	1.10	1.06	1.06	1.05	1.02	1	0.95	0.90	0.85	0.84	0.73	0.70
Hydrogen Sulfide	4.15	2.94	1.47	1.42	1.31	1.15	1.11	1.11	1.09	1.06	1.04	1	0.93	0.88	0.88	0.76	0.72
Argon	4.45	3.15	1.58	1.52	1.40	1.23	1.19	1.18	1.17	1.14	1.12	1.07	1	0.94	0.94	0.82	0.78
Nitrous Oxide / Carbon Dioxide	4.70	3.33	1.67	1.61	1.48	1.30	1.26	1.25	1.24	1.21	1.18	1.13	1.06	1	0.99	0.88	0.82
Propane	4.76	3.36	1.68	1.63	1.50	1.31	1.27	1.26	1.25	1.22	1.19	1.15	1.07	1.01	1	0.87	0.83
Butane	5.46	3.66	1.93	1.67	1.72	1.51	1.46	1.45	1.43	1.40	1.37	1.32	1.22	1.16	1.15	1	0.95
Sulfur Dioxide	5.72	4.06	2.03	1.96	1.81	1.58	1.53	1.52	1.50	1.47	1.43	1.38	1.28	1.22	1.20	1.05	1

ANEXO B. COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE LA RESISTENCIA DE VARIAS ALEACIONES NICKEL-CHROMIUM

Tabla B1. Materiales usados para calentadores eléctricos (Milne & Giler, 1990)

Nickel-chromium:

A-Grade	80 Ni 20 Cr	650 Ω -CMF
70-30	70 Ni 30 Cr	710 Ω -CMF
C-Grade	60 Ni 16 Cr balance Fe	675 Ω -CMF
D-Grade	35 Ni 20 Cr balance Fe	610 Ω -CMF

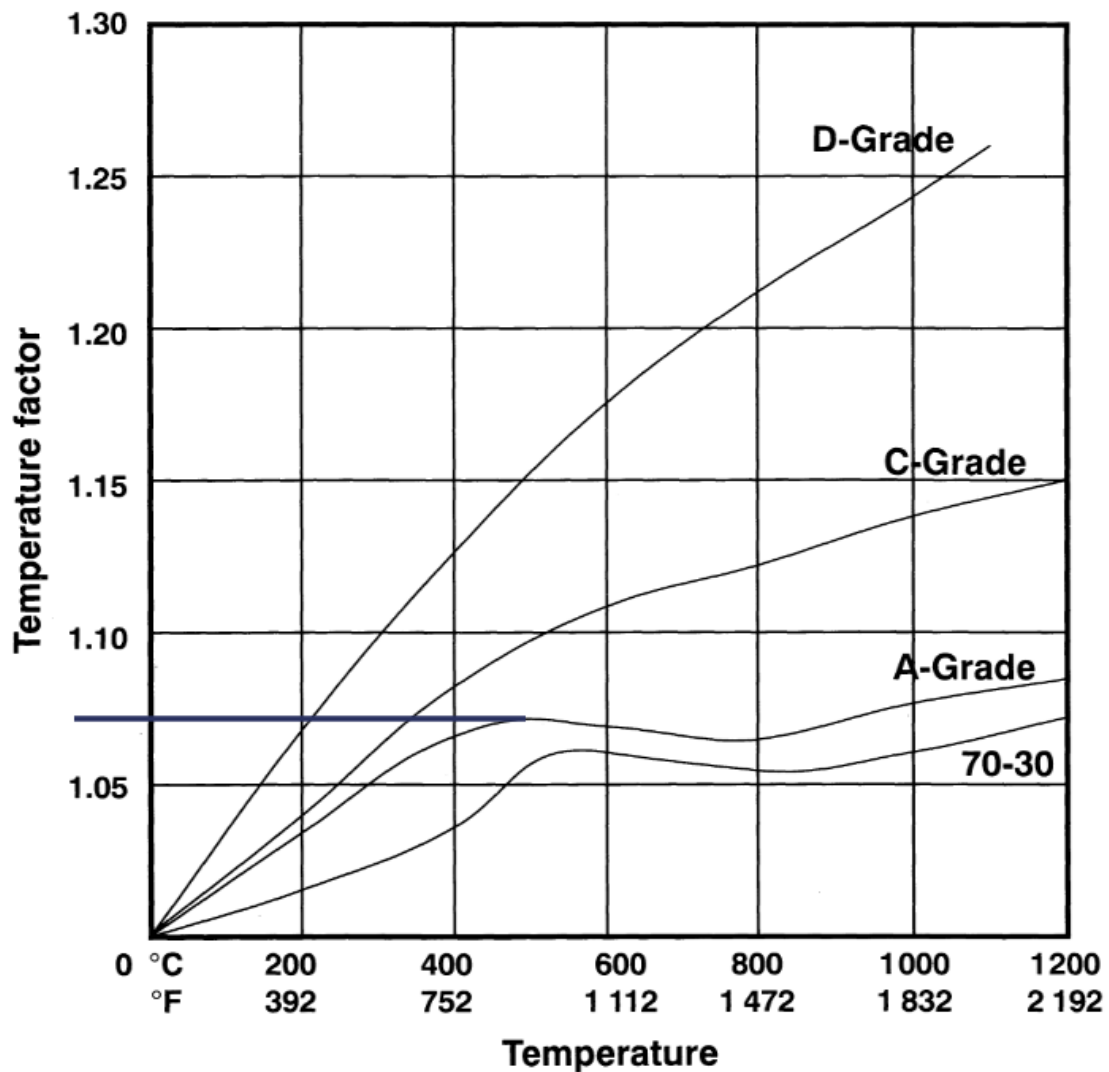


Figura B1. Coeficiente de temperatura de la resistencia de aleaciones nickel-chromium

(Milne & Giler, 1990)

ANEXO D. MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

El sistema Controlador-Reactor tiene las siguientes especificaciones:

Tabla D1. Especificaciones del controlador de temperatura

Modelo Controlador	Temp Max [°C]	Potencia Máxima [W]	Corriente Máxima [AAC]	Voltaje [VAC]
Control Temp 3025	1200*	3000	26	220 (115/FASE)

*La temperatura máxima que puede controlar el controlador es dependiente de su elemento de medición, en este caso al utilizar una termocupla tipo K, la temperatura máxima es 1200°C.

Tabla D2. Especificaciones de la planta (Reactor de Biochar)

Cámara [mm]			Capacidad Aprox [l]	Voltaje [VAC]	Temp Max [°C]	Peso Aprox [Kg]
H	W	D				
270	240	440	28	115 (F-N)	600**	200

**La temperatura máxima dentro de la planta esta limitada por su estructura. La temperatura máxima de 600°C se encuentra ubicada en la superficie de las resistencias blindadas.

Manual de Operación del controlador de temperatura Control Temp 3025

Es obligación del usuario del controlador de temperatura haber leído y entendido todo este manual de operación antes de manipular el módulo de control de temperatura Control Temp 3025 vinculado con el reactor de biochar.



Figura D1. Conexiones del reactor de biochar

En la Figura D1, la atmosfera inerte dentro de la cámara del reactor es a través del flujo constante de nitrógeno de 5.6 LPM (litros por minuto) (agujero de diámetro 3/8 de pulgada, 9.5mm). La evacuación de los gases de la pirolisis es por medio de una conexión en el techo del reactor (agujero de diámetro 3/8 de pulgada, 9.5mm).

ADVERTENCIA: Antes de operar el reactor de biochar es obligatorio asegurarse que la manguera de evacuación de los gases y el techo del reactor esté libre de obstrucciones. Con operaciones consecuentes se puede obstruir la manguera de evacuación y el agujero del techo del reactor con bio-oil. Falta en cumplir con estas precauciones puede resultar en daño grave al equipo y al personal.

En la Figura D2 se detalla los componentes del módulo de control.

- Botón CORTE DE EMERGENCIA
- Luz ON
- Switch ON/OFF
- Display
- Botones del modo Temp: -, + y ON/OFF
- Botones del modo Heating Rate: -, + y ON/OFF

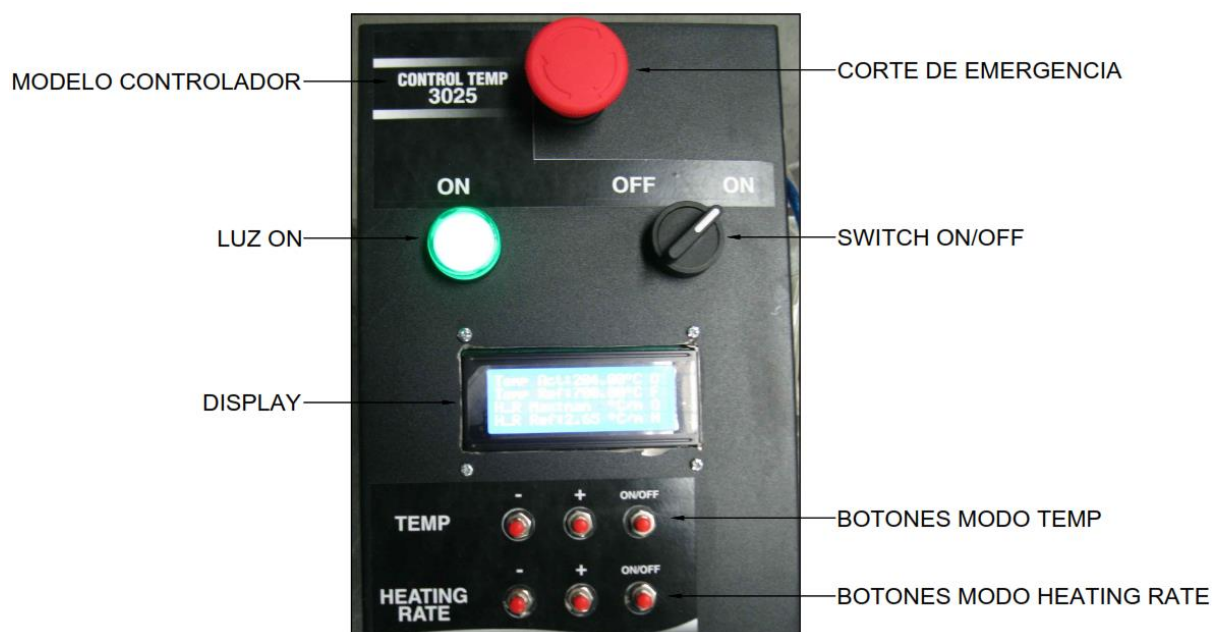


Figura D2. Vista frontal del controlador de temperatura

El Switch ON/OFF determina la energización del sistema. Una vez que este switch es girado a la posición derecha, ON, el sistema se energiza y se enciende la luz verde ON. El botón CORTE DE EMERGENCIA cuando es presionado (posición abajo) se cortará la alimentación eléctrica al sistema y se apagará la luz verde ON, cuando esto sucede el botón se auto asegura mecánicamente en la posición abajo (presionado). Para desasegurar el botón CORTE DE EMERGENCIA se debe girar este botón en sentido de las agujas del reloj. En controlador Control Temp 3025 posee dos modos de operación: *Modo Temp* y *Modo Heating Rate*.



Figura D3. Indicaciones que controlan el modo Temp y Heating Rate

Modo Temp. Este modo de operación se activa cuando se pulsa el botón *Temp ON/OFF* hasta que se visualice la palabra *ON* en el display. Para la operación de este modo se debe desactivar el modo Heating Rate. Una vez activado este modo, el controlador calienta

la biomasa hasta que su temperatura, *Temp Act*, sea igual a la temperatura de referencia, *Temp Ref*. Para modificar la temperatura de referencia, *Temp Ref*, se debe usar los botones + y - correspondientes.

Modo Heating Rate. Este modo de operación se activa cuando se pulsa el botón *Heating Rate ON/OFF* hasta que se visualice la palabra *ON* en el display. Para la operación de este modo se debe desactivar el modo Temp. Antes de activar el modo Heating Rate se debe ingresar la temperatura límite, *Temp Ref*, a la cual se requiere llegar con control de tasa de calentamiento. En este modo de operación la biomasa se calienta según el valor de la tasa de calentamiento *H_R Ref*. Para modificar la tasa de calentamiento, *H_R Ref*, se debe usar los botones + y – correspondientes. Una vez que se alcanza la temperatura de referencia, *Temp Ref*, el modo Heating Rate se desactiva automáticamente, y entra en operación el modo Temp. También, se dispone de la tasa máxima de calentamiento, *H_R Max*, a la que se puede calentar la biomasa. Esta indicación corresponde con el valor de la temperatura de referencia ingresada, *Temp Ref*. Si la temperatura de referencia ingresada es mayor que el límite de la capacidad de la planta, se visualizará una indicación *nan* (ver Figura D3).

Modo Temp/Heating Rate+Modo Heating Rate. Este modo de operación es una combinación del modo Temp o modo Heating Rate más el modo Heating Rate. Una vez que el modo Temp o el modo Heating Rate haya alcanzado la estabilización ($Temp Act = Temp Ref$), se puede activar el modo Heating Rate de la siguiente manera:

- Desactivar el modo Temp, visualización de *OF* (OFF) en la línea respectiva del display.
- Aumentar la temperatura de referencia, *Temp Ref*, al siguiente punto de estabilización.
- Ingresar la nueva tasa de calentamiento, *H_R Ref*.
- Activar el modo Heating Rate, visualización de *ON* en la línea respectiva del display.

Se puede obtener la tasa de calentamiento máxima correspondiente a una temperatura de estabilización. Para esto se debe ingresar la temperatura de estabilización, *Temp Ref*, y leer la tasa de calentamiento máxima respectiva, *H_R Max*.

Manual de Mantenimiento

La información descrita a continuación establece las condiciones óptimas de funcionamiento y un mantenimiento preventivo de los elementos que componen el reactor. Es obligación de la persona encargada del reactor mantener y controlar todos los parámetros del horno en valores óptimos. Estos valores incluyen variaciones de voltaje de entrada y evidencia de sobrecalentamiento en los componentes del reactor. Se debe obedecer todas las recomendaciones que se detallan a continuación con el fin de asegurar el buen funcionamiento del equipo y la seguridad del personal.

Procedimiento del mantenimiento preventivo

Este procedimiento es de suma importancia ya que este tipo de correcciones genera una prolongación de la vida útil de los equipos además de un adecuado funcionamiento del sistema. Los siguientes pasos se deberán realizar para tener en óptimas condiciones el funcionamiento del reactor:

1. Inspección de las condiciones ambientales a las que está sometido el equipo (Temperatura y humedad).
2. Limpieza general externa
3. Limpieza general interna
4. Inspección visual del equipo
5. Sustitución de partes intercambiables
6. Pruebas funcionales del equipo

Inspección de las condiciones ambientales a las que está sometido el equipo (Temperatura y humedad). Observar condiciones ambientales del lugar en donde se

encuentra el equipo sea en funcionamiento o en almacenamiento. Se recomienda evaluar la humedad y la presencia de polvo ya que podría afectar directamente a los componentes mecánicos y eléctricos. Se evaluará la incidencia de la humedad sobre los componentes eléctricos y mecánicos mediante la inspección visual, observando que no presente ningún tipo de oxidación en la carcasa, levantamiento en la pintura u oxidación de los elementos eléctricos. Además, se deberá verificar la temperatura ambiente, la temperatura ambiente para un funcionamiento óptimo del horno es de hasta 40 grados Celsius.

Limpieza general externa. Limpiar cualquier rastro de suciedad, polvo, desechos o moho en la carcasa del controlador de temperatura y en todas las partes externas del reactor. El procedimiento a seguir para la limpieza de la superficie es utilizar un desengrasante o limpiador líquido y un paño para frotar contra la superficie y eliminar cualquier desecho o suciedad. Cualquier tipo de limpieza o manipulación de los componentes del reactor se debe realizar con el sistema apagado.

Limpieza general interna. Limpiar cualquier rastro de suciedad o impureza en la superficie de las resistencias, es importante recalcar que esta limpieza interna se la realizará con el equipo desactivado, es decir, apagado y a una temperatura ambiente. De igual manera se puede utilizar un paño y un desengrasante para remover el polvo. Esta limpieza se la recomiendo con una frecuencia de al menos 6 meses o según la acumulación excesiva de contaminación dentro de la cámara.

Inspección visual del equipo. Conjunto con el proceso de limpieza se deberá genera una inspección visual de cada uno de los componentes del horno. La inspección visual estará enfocada a la búsqueda de corrosión, sobrecalentamiento, roturas, rastros de fugas y partes faltantes. Se debe revisar los componentes mecánicos para determinar desgaste, sobrecalentamiento o rotura de los mismos. De igual manera, la revisión de los componentes

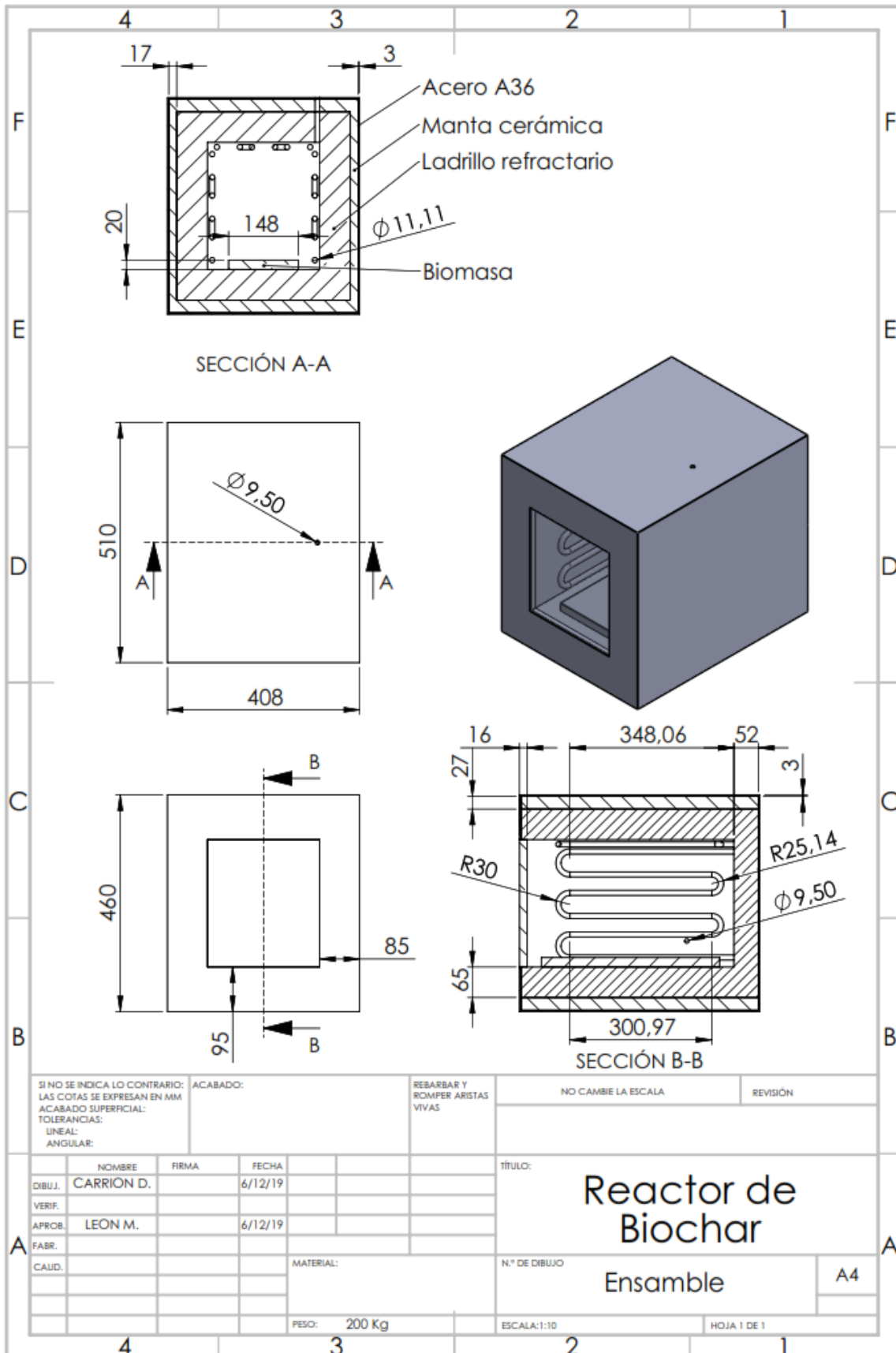
eléctricos en busca de deterioro del aislamiento, cables sueltos, y presencia de sobrecalentamiento.

Sustitución de partes intercambiables. En su mayoría los equipos presentan consumibles, los cuales con el paso del tiempo deberán ser reemplazados ya que podrían afectar el correcto funcionamiento de los otros elementos que forman el reactor. Cualquier remplazo de un componente eléctrico debe ser de acuerdo al diagrama eléctrico del sistema. Conjunto con la inspección se revisará el estado de las resistencias blindadas que se encuentran en las paredes internas en busca de desperfectos o deformaciones. Si la resistencia se encuentra deformada o presenta sobrecalentamiento se deberá cambiar tal resistencia por una que cumpla con las características especificadas en el diagrama eléctrico. También, se debe cambiar el sellante hermético de la puerta si presenta rastros de fugas, puesto que con el uso este material se ira desgastando lo cual provocará un mal funcionamiento y una pérdida de hermeticidad.

Pruebas funcionales del equipo. Se recomienda realizar pruebas funcionales periódicas cada 6 meses para verificar el correcto funcionamiento de los componentes del equipo, esta recomendación aplica si el equipo no se encuentra operando usualmente. Estas pruebas podrían reflejar fallas o un mal funcionamiento del control de temperatura o un deterioro de las resistencias.

Las aplicaciones de las normas de mantenimiento mencionadas anteriormente permitirán un correcto funcionamiento del equipo y de cada uno de los componentes mecánicos y eléctricos. Además, al establecer un mantenimiento preventivo y correctivo se logrará aumentar la vida útil del equipo y de sus componentes, garantizar la funcionalidad y la hermeticidad del reactor.

ANEXO E. DIMENSIONES DEL REACTOR DE BIOCHAR



ANEXO F. CÓDIGO ARDUINO DEL SISTEMA DE CONTROL

```

//Control de Temperatura Control Temp 3025, 120VAC 25A con control e indicacion de
HEATING RATE MAX. 1 PID
#include <max6675.h>//driver de la termocupla
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Libreria LCD_I2C
#include <Wire.h>//comunicacion i2c
#include <PID_v1.h>//Arduino PID Library by Brett Beauregard V 1.2.0
#include <math.h>// para calculo del heating rate maximo

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4);//se crea la instancia lcd

int termoDO=8;//SO, Serial Data Output
int termoCS=9;//Chip Select. Set Low para activar la interface serial
int termoCLK=10;//SCK Serial Clock Input
MAX6675 termocupla(termoCLK,termoCS,termoDO);//instancia de la termocupla

int pwmssr=3;//pin pwm hacia el SSR
int contadorHR=0;//para tomar la temp inicial de la recta heating rate (HR)
double TempIni=0;//Temperatura inicial para la recta de heating rate
double TempAmb=0;//temp inicial/Ambiente para HR max
int RegTempAmb=1;//1 para registro de temp inicial/ambiente
double K=0.122,T=280,Td=40;//parametros de la funcion de transferencia de la planta
INGRESO
double t;//para calculo de la pendiente maxima HR

int pulsaup=11;//señales de los pulsadores Temp
int pulsadown=12;
int pulsaini=13;

int pulsaupHR=5;//señales de los pulsadores Heating Rate
int pulsadownHR=6;
int pulsainiHR=7;

int inicio=0;//1 Para activar el PID modo Temp INGRESO modo directo
int cuenta=0;//para los pulsos del boton inicio

int inicioHR=0;//1 Para activar el PID modo Heating Rate INGRESO modo directo
int cuentaHR=0;

uint8_t degree[8]={140,146,146,140,128,128,128,128};//matriz para el simbolo de grado

double SetpointRef,HRref;//indicaciones de referencia
double Setpoint,Input,Output;//parametros del PID

double HRmax;//pendiente maxima HR
double Kp=5,Ki=0.010,Kd=1700;//datos desde identificacion MATLAB INGRESO
PID myPID(&Input,&Output,&Setpoint,Kp,Ki,Kd,P_ON_E,DIRECT);//instancia PID

```



```

unsigned long TiempoHR;//para la recta HR
unsigned long TiempoMuestreo;//para leer temp cada 1 segundo

unsigned long TiempoActHR2;//para activacion repentina del modo HR2
int ActHR2=0;//1 para activacion programada del modo HR2

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pulsaup, INPUT);
  pinMode(pulsadown, INPUT);
  pinMode(pulsaini, INPUT);
  pinMode(pwmssr,OUTPUT);//salida hacia el SSR

  pinMode(pulsaupHR, INPUT);
  pinMode(pulsadownHR, INPUT);
  pinMode(pulsainiHR, INPUT);

  lcd.init();
  lcd.backlight();
  lcd.clear();

  //impresion de limites del controlador
  lcd.createChar(0,degree);//simbolo de grado, el 0 es el # del simbolo creado, hay 4
disponibles
  lcd.setCursor(0,1);//(columna,fila)
  lcd.print(" CONTROL TEMP 3025 ");
  lcd.setCursor (0,2);
  lcd.print("0-700");// MOD
  lcd.setCursor (5,2);
  lcd.write((byte)0);//simbolo grado
  lcd.setCursor (6,2);
  lcd.print("C");
  lcd.setCursor (8,2);
  lcd.print("0-4.00");// heating rate critico MOD
  lcd.setCursor (14,2);
  lcd.write((byte)0);//simbolo grado
  lcd.setCursor (15,2);
  lcd.print("C/min");

  delay(1000);
  lcd.clear();//limpiar pantalla

  //Indicacion pantalla lcd
  //mostrar escritura Temperatura Actual
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Temp Act:");

  lcd.setCursor(15,0);
  lcd.write((byte)0);//simbolo grado
  lcd.setCursor(16,0);

```

```

lcd.print("C");

//Mostrar escritura temperatura Referencia (SET POINT)
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("Temp Ref:");

lcd.setCursor(15,1);
lcd.write((byte)0);
lcd.setCursor(16,1);
lcd.print("C");

//Mostrar escritura heating rate maximo
lcd.setCursor(0,2);
lcd.print("H_R Max:");

lcd.setCursor(13,2);
lcd.write((byte)0);//simbolo grado
lcd.setCursor(14,2);
lcd.print("C/m");//grados por minuto

//Mostrar escritura heating rate Ref
lcd.setCursor(0,3);
lcd.print("H_R Ref:");

lcd.setCursor(13,3);
lcd.write((byte)0);//simbolo grado
lcd.setCursor(14,3);
lcd.print("C/m");//grados por minuto

//mostrar condicion inicial de botones (default)
lcd.setCursor(18,0);//modo Temp OFF
lcd.print("O");
lcd.setCursor(18,1);
lcd.print("F");//

lcd.setCursor(18,2);//modo heating rate OFF
lcd.print("O");
lcd.setCursor(18,3);
lcd.print("F");

SetpointRef=700;//SetpointRef/Referencia default INGRESO
HRref=2.65;// °C/minuto default INGRESO

myPID.SetOutputLimits(0,255);//255 corresponde a la maxima salida del pwm (Potencia
maxima)
myPID.SetSampleTime(200);//cada 200ms se calcula el Output
myPID.SetMode(MANUAL);//modo OFF del PID

TiempoHR=millis();//tiempo inicial
TiempoMuestreo=millis();//tiempo inicial

```

```

    TiempoActHR2=millis();//para activacion programada del modo HR2
}

void loop() {

    if(inicio==1&&inicioHR==0){//Primer modo de operacion, modo Temp
        Setpoint=SetpointRef;
        myPID.SetMode(AUTOMATIC);
        myPID.Compute();//calculo del Output
        analogWrite(pwmssr,Output);

        //mostrar cambio de modo. Caso programado
        lcd.setCursor(18,0);// ON/OFF temp
        lcd.print("O");
        lcd.setCursor(18,1);
        lcd.print("N");

        lcd.setCursor(18,2);// ON/OFF heating rate
        lcd.print("O");
        lcd.setCursor(18,3);
        lcd.print("F");
    }

    if(inicio==0&&inicioHR==0){
        myPID.SetMode(MANUAL);
        Output=0;
        analogWrite(pwmssr,Output);
        contadorHR=0;//en caso de desactivacion manual del modo HR
    }

    if(inicio==1&&inicioHR==1){
        myPID.SetMode(MANUAL);
        Output=0;
        analogWrite(pwmssr,Output);
    }

    if(inicio==0&&inicioHR==1){//Segundo modo de operacion, Heating Rate
        myPID.SetMode(AUTOMATIC);//activacion para poder calcular el Output

        if((millis()-TiempoHR)>=1000){//recta HR con puntos cada 1 segundo
            Input=termocupla.readCelsius();//medicion de temperatura para caso directo
            contadorHR++;//sumar un segundo al contador
            if(contadorHR==1){//temperatura inicial
                TempIni=Input;
            }
            Setpoint=TempIni+(HRref/60)*contadorHR;//rampa de temperatura en °C/s

            TiempoHR=millis();
        }
    }
}

```

```

myPID.Compute();
analogWrite(pwmssr,Output);

if(Setpoint>=SetpointRef){//transferencia a Modo Temp en base a la rampa HRref
  inicio=1;
  inicioHR=0;
  //mostrar condicion de cambio de modo
  lcd.setCursor(18,0);// ON temp
  lcd.print("O");
  lcd.setCursor(18,1);
  lcd.print("N");

  lcd.setCursor(18,2);// OFF heating rate
  lcd.print("O");
  lcd.setCursor(18,3);
  lcd.print("F");
  contadorHR=0;//reset automatico del contador para la recta HR
}

//mostrar cambio de modo. Caso programado
lcd.setCursor(18,0);// ON/OFF temp
lcd.print("O");
lcd.setCursor(18,1);
lcd.print("F");

  lcd.setCursor(18,2);// ON/OFF heating rate
  lcd.print("O");
  lcd.setCursor(18,3);
  lcd.print("N");
}

//Mostrar temperatura y HR max cada 1 s
if((millis()-TiempoMuestreo)>=1000){
  Input=termocupla.readCelsius();//medicion de temperatura
  lcd.setCursor(9,0);//columna, fila
  lcd.print(Input);//imprimir con decimales (double)

  Serial.println(Input);//para leer por medio de MATLAB
//  Serial.print(Input);
//  Serial.print(' ');
//  Serial.print(Output);
//  Serial.print(' ');
//  Serial.print(TempAmb);
//  Serial.print(' ');
//  Serial.print(t);
//  Serial.print(' ');
//  Serial.print(HRmax);
//  Serial.print(' ');
//  Serial.println(Setpoint);
  if(RegTempAmb==1){//activacion de registro de temp ambiente

```

```

    TempAmb=Input;//temperatura ambiente para HR max
    RegTempAmb=0;//solo se toma la temp amb una vez
  }
//calculo del HR max
  t=-T*log(1-(SetpointRef-TempAmb)/(255*K))+Td;//T, K y Td desde funcion
transfencia planta (MATLAB)
  HRmax=((255*K*exp(-(t-Td)/T))/T)*60;//pendiente en °C/minuto
  lcd.setCursor(8, 2);
  lcd.print(HRmax,2);//imprimir con 2 decimales
  lcd.setCursor(12,2);
  lcd.print(' ');//borrar el espacio antes del simbolo grado
  lcd.setCursor(13,2);
  lcd.write((byte)0);//escribir simbolo grado

  TiempoMuestreo=millis();
}

//activacion programada de modo HR2
if((millis()-TiempoActHR2)>=800000){//tiempo de cambio a modo HR2, 600s

  if(ActHR2==1){
    inicio=0;//cambio a modo HR2
    inicioHR=1;
    SetpointRef=40;
    HRref=0.6;
    ActHR2=0;//desactivacion del ingreso al modo HR2
  }
}

//control de pulsadores
//Control de pulsador UP
if(digitalRead(pulsaup)){//aumentar la temperatura referencia
  delay(200);
  SetpointRef++;// se aumenta una unidad el SetpointRef
  if(SetpointRef>700){//limite de temperatura MOD
    SetpointRef=700;//MOD
  }
}
if(digitalRead(pulsaupHR)){//aumentar el heating rate referencia
  delay(200);
  HRref+=0.2;// se aumenta x.xx el heating rate referencia MOD
  if(HRref>4.00){//limite de heating rate MOD
    HRref=4.00;// MOD
  }
}
//Control de pulsador DOWN
if(digitalRead(pulsadown)){//disminuir la temperatura referencia
  delay(200);
  SetpointRef--;// se disminuye la temperatura de referencia
  if(SetpointRef<1){

```

```

    SetpointRef=0;
  }
}
if(digitalRead(pulsadownHR)){//disminuir heating rate referencia
  delay(200);
  HRref-=0.2;// se disminuye 0.xx de heating rate
  if(HRref<0.2){
    HRref=0.00;
  }
}
//pulsador INICIO
if(digitalRead(pulsaini)){
  cuenta++;
  delay(200);
  if(cuenta==1){
    inicio=1;
    lcd.setCursor(18,0);//columna 18, fila 0
    lcd.print("O");
    lcd.setCursor(18,1);
    lcd.print("N");
  }
  if(cuenta==2){
    inicio=0;//reseteo contador
    cuenta=0;//reseteo contador
    lcd.setCursor(18,0);
    lcd.print("O");
    lcd.setCursor(18,1);
    lcd.print("F");
  }
}

if(digitalRead(pulsainiHR)){
  cuentaHR++;
  delay(200);
  if(cuentaHR==1){
    inicioHR=1;
    lcd.setCursor(18,2);//columna 18, fila 0
    lcd.print("O");
    lcd.setCursor(18,3);
    lcd.print("N");
  }
  if(cuentaHR==2){
    inicioHR=0;//reseteo contador
    cuentaHR=0;//reseteo contador
    lcd.setCursor(18,2);
    lcd.print("O");
    lcd.setCursor(18,3);
    lcd.print("F");
  }
}
}

```

```
lcd.setCursor(9, 1);  
lcd.print(SetpointRef);  
lcd.setCursor(8, 3);  
lcd.print(HRref);  
  
}
```