

Información Importante

La Universidad Santo Tomás, informa que el(los) autor(es) ha(n) autorizado a usuarios internos y externos de la institución a consultar el contenido de este documento a través del catálogo en línea, página web y Repositorio Institucional del CRAI-USTA, así como en las redes sociales y demás sitios web de información del país y del exterior con las cuales tenga convenio la Universidad.

Se permite la consulta a los usuarios interesados en el contenido de este documento, para todos los usos que tengan **finalidad académica**, siempre y cuando mediante la correspondiente cita bibliográfica se le dé crédito al trabajo de grado y a su autor, nunca para usos comerciales.

De conformidad con lo establecido en el Artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, la Universidad Santo Tomás informa que “los derechos morales sobre documento son propiedad de los autores, los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.”

Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación, CRAI-USTA

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

Diseño de un sistema de control de temperatura, haciendo uso de técnicas de control para optimizar un proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirólisis.

Oscar Libardo Guio Diaz y Andrea Carolina Navarro Zagarra

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

Director

Ing. Deisy Carolina Páez Casas



Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

2019

Dedicatoria

Dedicamos este trabajo de grado a nuestras familias por el apoyo incondicional durante nuestra etapa universitaria, porque por ellos somos lo que somos. Para nuestros padres por sus consejos, comprensión, amor, ayuda en los momentos más difíciles. Nos han dado todo lo que somos como personas, valores, principios, carácter, empeño, perseverancia y el coraje para alcanzar nuestros objetivos.

Agradecimientos

Gracias a nuestras familias y amigos que fueron los principales promotores de nuestros sueños, gracias a ellos por cada día confiar y creer en nosotros y en nuestras expectativas, gracias por cada consejo y por cada una de sus palabras que nos guiaron durante este proceso.

Gracias a Deivy, el auxiliar del laboratorio integrado de mecatrónica, que nos apoyó durante todo el proceso de nuestra investigación.

Gracias a los compañeros estudiantes de Ingeniería Mecatrónica que brindaron su conocimiento en las áreas de control como apoyo al desarrollo del proyecto, a nuestra directora por dedicar su tiempo y conocimiento para las correcciones presentadas durante el desarrollo. Finalmente, gracias a la vida por este nuevo triunfo y a todas las personas que apoyaron y creyeron en la realización de esta tesis.

Contenido

Introducción	19
1. Diseño de un sistema de control de temperatura, haciendo uso de técnicas de control para optimizar un proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirólisis	20
1.1. Motivación y Formulación Del Problema.....	20
1.1.1. Equipo de Trabajo- Pasantía de Investigación.	21
1.1.2. Trabajo Interdisciplinario - Pasantía de Investigación.	21
1.1.3. Problema.....	22
1.1.4. Condiciones iniciales del proyecto.....	23
1.2. Objetivos	24
1.2.1. Objetivo General.	24
1.2.2. Objetivos Específicos.....	24
1.3. Aportes del Trabajo.....	25
2. Marco de Referencia	26
2.1. Marco Teórico.....	26
2.1.1. Proceso de pirólisis.....	26
2.1.2. Concepto de control aplicado en un sistema.	28
2.1.3. Adquisición de señales.	29
2.1.4. Identificación del sistema.....	30
2.1.5. Modelado.....	31

2.1.6.	Técnicas de control.....	37
2.2.	Marco Conceptual	40
2.2.1.	Pirólisis.....	40
2.2.2.	HDPE (Polietileno de alta densidad).....	41
2.2.3.	Polipropileno.	41
2.3.	Marco Legal	41
2.3.1.	Colombia.	41
2.3.2.	México.....	43
2.4.	Marco tecnológico y científico (Estado del arte).....	43
3.	Diseño Conceptual	50
3.1.	Conociendo la planta y sus componentes	50
3.1.1.	Identificación de la maquina	50
3.1.2.	Prueba de pirolisis	52
3.1.3.	Identificación de instrumentación	56
3.2.	Criterios de diseño	58
3.2.1.	Identificación del cliente.	58
3.2.2.	Expectativas del cliente.	59
3.2.3.	Lista de requerimientos.	60
3.2.4.	Seguridad.....	60
3.2.5.	Estética.	61

3.2.6.	Valor y utilidad.....	61
3.2.7.	Requerimientos imprescindibles.	61
3.2.8.	Requerimientos no imprescindibles.	62
3.2.9.	Selección de soluciones.....	62
3.2.10.	Diseño detallado.	63
3.3.	Sistema.....	66
3.3.1.	Sistema de control.	66
3.3.2.	Sistema electrónico.	67
3.4.	Módulos	67
3.4.1.	Módulo de Temperatura.	68
3.4.2.	Módulo de peso.	68
3.5.	Componentes simples	68
3.5.1.	Resistencias eléctricas de calentamiento.....	68
3.5.2.	Galgas extensiométricas.....	69
4.	Desarrollo	69
4.1.	Adquisición de datos.....	70
4.1.1.	Implementación general.	70
4.1.2.	Medición de Temperatura.	71
4.2.	Identificación del sistema	79
4.2.1.	Aplicación para la medición #2 (PP tapas).	79

4.2.2.	Aplicación para la medición #3 (HDPE virutas).....	93
4.2.3.	Aplicación para la medición #5 (PP escamas).	99
4.2.4.	Conclusión Aplicación de los métodos.	106
4.3.	Diseño del controlador.....	107
4.3.1.	Aplicación para la medición #2 (PP en tapas).....	108
4.3.2.	Aplicación para la medición #3 (HDPE virutas).....	125
4.3.3.	Aplicación para la medición #6 (PP escamas).	132
4.3.4.	Conclusión Aplicación técnicas de control.	140
4.4.	Instrumentación.....	142
4.4.1.	Selección de instrumentación.....	143
4.4.2.	comparación de sensores.....	146
4.4.3.	PLC (Controlador Lógico Programable).....	148
5.	Conclusiones y Trabajos Futuros	149
5.1.	Observaciones y Conclusiones	150
5.1.1.	Identificación.....	150
5.1.2.	Control.....	151
5.1.3.	Instrumentación.	152
5.2.	Trabajos Futuros	152
	Bibliografía	154

Resumen

La producción de plástico a nivel global ha ido aumentando con los años debido a las inmensas aplicaciones en muchos sectores; su continua demanda, mal uso e incorrecta disposición final ha provocado en el transcurso del tiempo un gran impacto ambiental negativo para el planeta tierra llevando al agotamiento de recursos no renovables como el petróleo y causando contaminación en distintos ecosistemas especialmente los acuáticos. El enfoque de este proyecto consiste en el diseño de un controlador aplicado a un sistema de pirólisis el cual es empleado para la conversión de residuos plásticos (polipropileno y polietileno de alta densidad) en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis, efectuado por el departamento de Ingeniería Mecánica y Química del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, este diseño basado en la metodología en V y herramientas como QFD busca responder a las necesidades originadas en el pirolizador (sistema de pirólisis) mediante la implementación del análisis y selección de técnicas de control, adquisición y registro de datos. Obteniendo como resultado principal un software (interfaz gráfica) de monitoreo y registro en tiempo real del proceso de pirólisis agradable al usuario, además de la corrección de errores en el proceso haciendo uso del sistema de control seleccionado.

Palabras Clave: *Pirolisis, Biocombustibles, Sistemas de control, Adquisición de datos, Hidrocarburos Líquidos, Gestión de residuos, Polipropileno (PP), Polietileno de alta densidad (HDPE).*

Abstrac

The production of plastic worldwide has been increasing over the years due to the immense applications in many sectors; its continuous demand, misuse and incorrect final disposal has caused in the course of time a great negative environmental impact for the planet earth leading to the depletion of non-renewable resources such as oil and causing pollution in different ecosystems, especially aquatic ones. The focus of this project is the design of a controller applied to a pyrolysis system which is used for the conversion of plastic waste (polypropylene and high density polyethylene) into liquid hydrocarbons by pyrolysis, carried out by the Department of Mechanical Engineering and Chemistry of the Irapuato-Salamanca campus of the University of Guanajuato, this design based on the V methodology and tools such as QFD seeks to respond to the needs originated in the pyrolysis (pyrolysis system) by implementing the analysis and selection of control techniques, acquisition and registration of data. Obtaining as a main result a software of monitoring and real-time recording of the pleasant pyrolysis process to the user, in addition to the correction of errors in the process making use of the selected control system.

Keywords: *Pyrolysis, Biofuels, Control systems, Data acquisition, Liquid Hydrocarbons, Waste management, High density polyethylene, Polypropylene*

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.</i>	34
Tabla 2. <i>Constantes para la identificación de los modelos de segundo orden más tiempo muerto.</i>	34
Tabla 3. <i>Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).</i>	39
Tabla 4. <i>Respuestas a Tópicos 1, 2, 3 y 4.</i>	49
Tabla 5. <i>Condiciones de operación y productos obtenidos en el proceso de pirolisis.</i>	53
Tabla 6. <i>Dispositivos y características.</i>	64
Tabla 7. <i>Representación general de cada medición.</i>	72
Tabla 8. <i>Resultados generales en aplicación a modelos de primer y segundo orden.</i>	82
Tabla 9. <i>Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para PP en tapas.</i>	90
Tabla 10. <i>Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para HDPE en virutas.</i>	97
Tabla 11. <i>Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para PP en escamas.</i>	103
Tabla 12. <i>Resumen resultados de la identificación del sistema.</i>	107
Tabla 13. <i>Programación de cálculos para solución a las variables de cálculo.</i>	119
Tabla 14. <i>Resultados y análisis de aplicación de control-observador al sistema.</i>	121
Tabla 15. <i>Modelo de los sistemas controlados en presencia de perturbaciones.</i>	123
Tabla 16. <i>Resumen resultados del diseño del control.</i>	140

Tabla 17. <i>Tipo de termopares.</i>	143
Tabla 18. <i>Características PT100.</i>	145
Tabla 19. <i>Tipos de termistor según su funcionamiento.</i>	146
Tabla 20. <i>Comparación de sensores de temperatura según sus características.</i>	146
Tabla 21. <i>Descripción característica de los sistemas de cómputo.</i>	147
Tabla 22. <i>Características de funcionamiento según tipo de PLC.</i>	147
Tabla 23. <i>Tipos y series de expansión en PLC's.</i>	149
Tabla 24. <i>Características FP0-C14RS</i>	159
Tabla 25. <i>Características FP0TC4.</i>	160
Tabla 26. <i>Características Regulador de fase.</i>	161
Tabla 27. <i>Características Fuente PS5R SB24.</i>	163
Tabla 28. <i>Características K8AK.</i>	164
Tabla 29. <i>Características AQA211VL.</i>	165
Tabla 30. <i>Características Relés LY1F y LY2F.</i>	166

Lista de Figuras

<i>Figura 1.</i> Diagrama esquemático del pirolizador utilizado.	27
<i>Figura 2.</i> Bucle típico de control, elementos y señales características.	28
<i>Figura 3.</i> Partes de un sistema DAQ.	30
<i>Figura 4.</i> Curva de reacción del sistema ante entrada escalón.	33
<i>Figura 5.</i> Respuesta de un sistema de segundo orden subamortiguado ante un escalón de magnitud A.....	35
<i>Figura 6.</i> Respuesta de un sistema de segundo orden sub y sobreamortiguado.....	36
<i>Figura 7.</i> Grafica de Smith.	37
<i>Figura 8.</i> Respuesta de una planta ante un escalón unitario.....	38
<i>Figura 9.</i> Curva de respuesta en forma de 'S'.	39
<i>Figura 10.</i> Tabla de modos del controlador y fórmulas de ajuste para síntesis Dahlin.....	40
<i>Figura 11.</i> Vista frontal pirolizador en estado de reposo para limpieza.....	51
<i>Figura 12.</i> Vista frontal pirolizador en estado de marcha.	51
<i>Figura 13.</i> Materia prima.....	53
<i>Figura 14.</i> Pantalla de operación.	54
<i>Figura 15.</i> Hidrocarburo líquido condensado.....	54
<i>Figura 16.</i> Producto final drenado.....	54
<i>Figura 17.</i> Separación por decantación.	55
<i>Figura 18.</i> Hidrocarburo líquido puro.	55
<i>Figura 19.</i> Residuos sólidos alojados en el reactor	55
<i>Figura 20.</i> Instrumentación del pirolizador.	56

<i>Figura 21.</i> Termocupla parte media del reactor y Termocupla de seguridad.....	57
<i>Figura 22.</i> Termocupla parte baja del reactor.	57
<i>Figura 23.</i> Termocupla del quemador de gases.....	57
<i>Figura 24.</i> Punto de llegada de la señal de las termocuplas.	58
<i>Figura 25.</i> Diagrama del proyecto.....	62
<i>Figura 26.</i> Diagrama de proceso.	65
<i>Figura 27.</i> Esquema general del análisis en los plásticos.....	69
<i>Figura 28.</i> Enlace cableado DAQ a Señales de temperatura.....	70
<i>Figura 29.</i> Conexión de señal a la DAQ.....	71
<i>Figura 30.</i> Interfaz gráfica del programa en funcionamiento.....	71
<i>Figura 31.</i> Curva de temperatura de pirolisis de polipropileno PP #1.	74
<i>Figura 32.</i> Curva de temperatura de pirolisis de polipropileno PP #2.	75
<i>Figura 33.</i> Curva de temperatura de pirolisis de polietileno de alta densidad HDPE #1.	76
<i>Figura 34.</i> Curva de temperatura de pirolisis de polietileno de alta densidad HDPE #2.	77
<i>Figura 35.</i> Curva de temperatura de pirolisis de polipropileno PP #3.	79
<i>Figura 36.</i> Curva de reacción del proceso de la medición 2.	79
<i>Figura 37.</i> Respuesta del sistema de primer orden más tiempo muerto.....	83
<i>Figura 38.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.	85
<i>Figura 39.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.	88
<i>Figura 40.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado más tiempo muerto por análisis gráfico.	89
<i>Figura 41.</i> Comparación funciones de transferencias de la planta polipropileno.	92
<i>Figura 42.</i> Curva de reacción del proceso de la medición #3.	93

<i>Figura 43.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.	94
<i>Figura 44.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.	96
<i>Figura 45.</i> Comparación funciones de transferencias de la planta Polipropileno.	98
<i>Figura 46.</i> Curva promedio de la reacción del proceso de la medición #5.	99
<i>Figura 47.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.	100
<i>Figura 48.</i> Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.	102
<i>Figura 49.</i> Comparación funciones de transferencias de la planta Polipropileno.	105
<i>Figura 50.</i> Características de la función de transferencia representativa del PP en tapas.	108
<i>Figura 51.</i> Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.	109
<i>Figura 52.</i> Adición y ubicación de polo y cero al sistema.	110
<i>Figura 53.</i> Lugar geométrico de las raíces de la planta de la medición 2.	112
<i>Figura 54.</i> Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos por LGR.	114
<i>Figura 55.</i> Resultado aplicación técnica por análisis gráfico.	115
<i>Figura 56.</i> Resultados aplicación técnica por compensación por LGR.	116
<i>Figura 57.</i> Diagrama de bloques de la aplicación del control.	120
<i>Figura 58.</i> Bloque de perturbación en la aplicación de la técnica de control 2.	122
<i>Figura 59.</i> Bloque de perturbación en la aplicación de la técnica de control 1.	123
<i>Figura 60.</i> Características de la función de transferencia representativa del HDPE en virutas.	126
<i>Figura 61.</i> Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.	127
<i>Figura 62.</i> Adición y ubicación de polo y cero al sistema.	127
<i>Figura 63.</i> Resultado aplicación del control al sistema.	128

<i>Figura 64.</i> Ubicación de polos deseados en el LGR de la planta.	129
<i>Figura 65.</i> Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos.	131
<i>Figura 66.</i> Resultados aplicación del control.	132
<i>Figura 67.</i> Características de la función de transferencia representativa del PP en escamas.	133
<i>Figura 68.</i> Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.	134
<i>Figura 69.</i> Adición y ubicación de polo y cero al sistema.	134
<i>Figura 70.</i> Resultado aplicación del control al sistema.	135
<i>Figura 71.</i> Ubicación de polos deseados en el LGR de la planta.	137
<i>Figura 72.</i> Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos.	138
<i>Figura 73.</i> Resultados aplicación del control.	139
<i>Figura 74.</i> Termopar.....	143
<i>Figura 75.</i> RTD con cabeza de conexión.	145
<i>Figura 76.</i> Termistor NTC.....	146
<i>Figura 77.</i> PLC + módulos.	148
<i>Figura 78.</i> Instrumentación del pirolizador.	158
<i>Figura 79.</i> Diagrama de bloques del programa	160
<i>Figura 80.</i> Módulo de temperatura FP0TC4.	161
<i>Figura 81.</i> Esquema SSNP-15F.....	162
<i>Figura 82.</i> Fuente PS5R SB24.....	163
<i>Figura 83.</i> Relé térmico K8AK.	164
<i>Figura 84.</i> Relé de estado sólido AQA211VL.	165
<i>Figura 85.</i> Relé LY1F y LY2F.....	167
<i>Figura 86.</i> Resistencias eléctricas del reactor.....	167

Figura 87. Termocupla tipo k marca RKC.....	168
<i>Figura 88.</i> Herramienta Ident-Matlab.....	170
<i>Figura 89.</i> System Identification function.....	171
<i>Figura 90.</i> Workspace Tool.....	171

Lista de Apéndices

Apéndice A. Arquitectura del Pirolizador	158
Apéndice B. Configuración ToolBox	169

Introducción

A partir de una metodología secuencial en la cual a través de la investigación y la aplicación de los conocimientos adquiridos en el trascurso académico universitario se logra crear un proyecto cuyas actividades planteadas y desarrolladas están encaminadas a contribuir con investigaciones y proyectos macros encargados en la solución de problemas de contaminación ambiental producida por los residuos plásticos desechados en el sector agrícola.

Este trabajo contribuye en investigaciones y proyectos de maestría desarrollados por el departamento de Ingeniería Mecánica y Química del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato, por otro lado los objetivos están encaminados a dar solución a múltiples problemas e inconvenientes generados en dichas investigaciones, por lo que su finalidad es generar soluciones que logren contribuir de forma directa e indirecta con los problemas de contaminación ambiental generados por los residuos plásticos.

1. Diseño de un sistema de control de temperatura, haciendo uso de técnicas de control para optimizar un proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos por medio de pirolisis

1.1. Motivación y Formulación Del Problema

Actualmente los procesos que permiten la reducción o reutilización de residuos son altamente significativos debido al aporte que representan como solución ante la problemática ambiental. Uno de los principales contaminantes, son los productos derivados del petróleo, como el plástico, puesto que sus propiedades lo hacen ideal para diversas aplicaciones, motivo por el cual se genera una elevada demanda del uso del producto ocasionando sobrepoblación de éste.

El consumo de plástico a nivel mundial es aproximadamente 300 millones de toneladas que provienen únicamente del 4 - 6% del petróleo y teniendo en cuenta que este ha tenido una sobreoferta en los últimos años, se puede estimar que la producción de plástico seguirá siendo bastante optimista. Ahora bien, el problema del plástico radica en su grado de contaminación, puesto que su tiempo de descomposición oscila entre 6 meses como el látex biodegradable (globos) hasta más de 600 años como el plástico utilizado en el hilo de pescar [1], [2].

Colombia no es la excepción en este contexto mundial y también sufre de una grave contaminación plástica. Los elementos plásticos tienen una alta penetración en el mercado colombiano, se consumen aproximadamente 24 kg per cápita, lo que implica un volumen anual de consumo en plásticos de 1.250.000 toneladas. El país genera unos 12 millones de toneladas de residuos sólidos al año y solo recicla el 17%. En el caso de Bogotá, se generan unas 7.500 toneladas al día y se reciclan entre el 14% y el 15%, incluso por debajo del promedio nacional. En Colombia el 74% de los envases va a parar a los rellenos sanitarios [3].

1.1.1. Equipo de Trabajo- Pasantía de Investigación.

El departamento de Ingeniería Mecánica y Química del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato situada en México, ha diseñado un proyecto con el fin de solucionar parte de esta problemática, la cual consiste en la conversión de residuos plásticos provenientes de la agricultura en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis. Este proyecto como se menciona ha sido desarrollado principalmente por docentes y estudiantes de ingeniería mecánica y química. Es por esto, que actualmente la planta ya se encuentra en funcionamiento, sin embargo, el desarrollo se ha basado en la parte termodinámica y los análisis químicos adquiridos experimentalmente, no en el control y automatización del proceso.

1.1.2. Trabajo Interdisciplinario - Pasantía de Investigación.

El grupo de investigadores encargados del proyecto en Guanajuato manifiestan que el proceso no tiene siempre los mismos resultados, varía dependiendo del residuo plástico empleado y la temperatura a la cual trabaja, por otro lado, la obtención de datos es un proceso tedioso, debido a que se realiza de forma manual en intervalos de tiempo y el proceso de pirolisis tarda aproximadamente entre 7 y 9 horas; por lo que surge la necesidad de monitorear los datos obtenidos, principalmente de temperatura, y controlar en la medida de lo posible el error entre las temperaturas de trabajo del reactor con el fin de obtener resultados más concisos y un producto final homogéneo.

1.1.3. Problema

1.1.3.1. *Problema Global.*

El estado de Guanajuato-México es caracterizado por sus grandes extensiones de cultivos de diferentes productos agrícolas principalmente maíz, trigo, sorgo, alfalfa, fresa, cebolla y sandía, los cuales por los grandes terrenos que abarcan, emplean para su desarrollo grandes cantidades de plástico, principalmente PP, HDPE, LDPE y EPS, específicamente en las actividades de fertirriego y el cubrimiento en la etapa de germinación. Debido al uso de pesticidas, fertilizantes y demás aditivos químicos empleados en los cultivos, la gran cantidad de plásticos utilizados no pueden tener una disposición final por método convencional como el reciclaje o rellenos sanitarios. Respondiendo a una problemática en el control de la disposición final de estos plásticos, el grupo de investigación del departamento de Ingeniería Mecánica y Química del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato situada en México ha trabajado en el proyecto “*conversión de residuos plásticos provenientes de la agricultura en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis*” desde el año 2016.

1.1.3.2. *Problema particular.*

Mediante entrevistas con el grupo de investigadores encargados del proyecto en Guanajuato se evidencia que el proceso de pirolisis no tiene siempre los mismos resultados, varía dependiendo del residuo plástico empleado y la temperatura a la cual trabaja, por otro lado, la obtención de datos se realiza de forma manual. A partir de esto se evidenciaron las siguientes necesidades:

- Monitorear y registrar de manera continua los datos de temperatura

- Controlar el error entre las temperaturas de trabajo del reactor con el fin de obtener un producto final del pirolizador homogéneo.

A partir de estas necesidades se plantea la pregunta de investigación, como sigue:

- ¿Cómo ajustar el pirolizador para que el error de establecimiento de la temperatura sea mínimo?

Las preguntas orientadoras para solucionar el problema son:

1. ¿Cuáles son los residuos plásticos empleados en el proceso de pirolisis?
2. ¿Cuál es el perfil o curva de temperatura característico de cada uno los plásticos usados?
3. ¿Cuáles son las variables a monitorear?
4. ¿Cuáles son las variables a controlar?

1.1.4. Condiciones iniciales del proyecto.

El punto de partida del proyecto nace de un desarrollo previo titulado “Diseño, construcción y pruebas de prototipo para la conversión termoquímica de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos”, proyecto desarrollado en la Universidad de Guanajuato por el cuerpo académico de termo fluidos de la división de ingenierías del campus Irapuato-Salamanca y liderado por el Dr. José Manuel Riesco Ávila.

En este proyecto se planteó el diseño, construcción y pruebas de un prototipo a escala de laboratorio, para la conversión termoquímica de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos y es una continuación de los trabajos iniciados entre la empresa RECICLA.LO, S.A. DE C.V. y la Universidad de Guanajuato en el año 2015.

Se estudió la pirolisis térmica y catalítica de residuos de poliestireno expandido, polietileno de baja y alta densidad, y polipropileno, variando parámetros como la temperatura, el catalizador y la

relación entre el catalizador y el residuo plástico. Los hidrocarburos líquidos obtenidos mediante este proceso fueron caracterizados para obtener sus propiedades fisicoquímicas y se analizó su potencial para ser usados como combustibles alternativos en motores de combustión interna u otro dispositivo térmico como calderas.

Todas las actividades planteadas en este proyecto están encaminadas a resolver un problema de contaminación ambiental, producida por la gran cantidad de residuos plásticos que se producen en la actualidad y de los cuales sólo una cantidad muy pequeña se recicla, apenas un 10% [4].

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General.

Diseñar el sistema de control de temperatura del proceso de pirólisis usado, para el proceso de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos

1.2.2. Objetivos Específicos.

1. Observar y documentar el proceso de pirólisis para dos tipos de plásticos con el fin de obtener gráficas del comportamiento de las variables a controlar.
2. Adquirir los datos de temperatura del reactor de pirólisis para obtener graficas de comportamiento de esta variable en el proceso, mediante una DAQ.
3. Investigar diversas técnicas de control de temperatura en reactores de pirólisis, con el propósito de identificar y simular diferentes técnicas, usando un modelo aproximado del proceso de pirolisis evaluando la eficiencia de éstas respecto al proceso no controlado y seleccionar la de mayor viabilidad.

4. Determinar la instrumentación (sensórica, electrónica, informática, etc.) necesaria para la implementación del sistema del control en el reactor de pirolisis.

1.3. Aportes del Trabajo

El desarrollo final del proyecto deja múltiples aportes que benefician tanto al cliente principal, que en este caso es el Dr José Manuel Riesco y su grupo de investigación, dentro de los cuales se destacan:

- Sistema de monitoreo desarrollado para la adquisición y archivo de los datos más importantes del proceso (Tiempo y Temperatura) que suple la necesidad de tomar los datos manualmente y crea una base para realización de las curvas características de cada plástico,
- Caracterización del comportamiento de la temperatura del pirolizador parados tipos de plásticos (polipropileno y polietileno de alta densidad) y en dos tipos de estados iniciales (bagazo y pellets).
- El diseño sistema de control de temperatura para corregir y regular el error en las temperaturas operadas actualmente por el pirolizador con el fin de obtener un producto final homogéneo y lograr reducir algo de tiempo del proceso,
- El esquema del sistema eléctrico del pirolizador el cual informa como está conformado eléctricamente la maquina además de brindar una idea amplia del funcionamiento del sistema y de cada uno de sus componentes.

Dichos aportes pueden ser aplicados en áreas afines a la investigación ya sea en el sector educativo o industrial y empresas de tratamientos térmicos como metalúrgicas, hornos de

producción, refrigeración industrial y cualquier sistema que requiera un monitoreo continuo de temperatura y el uso de un control para la corrección del error de esta.

Por otro lado la disposición final del proyecto podrá generar impactos a corto y mediano plazo los cuales servirán como retroalimentación y profundización en la investigación en el área, un ejemplo claro a corto plazo será el uso continuo del sistema de monitoreo del proceso de pirólisis para la obtención de mediciones de manera sistemática y a mediano plazo puede ser el uso de los datos archivados para realizar un artículo en donde se enfoque solo en el análisis y comparación de la eficiencia energética generada por cada plástico.

2. Marco de Referencia

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Proceso de pirólisis.

La pirólisis consiste en la descomposición química de los materiales plásticos por degradación térmica en ausencia de oxígeno. Los residuos plásticos son introducidos en una cámara, donde son sometidos a altas temperaturas, entre 350 °C y 500 °C, y los gases generados se condensan con el fin de obtener un destilado de hidrocarburos.

En el proyecto implementado por parte del departamento de Ingeniería Mecánica de la División de Ingenierías y el departamento de Química de la División de Ciencias Naturales y Exactas del campus Irapuato-Salamanca de la Universidad de Guanajuato se utilizó un reactor por lotes (batch reactor) para la descomposición del plástico mediante el proceso de pirólisis. Este reactor consiste

en un recipiente de acero inoxidable, aislado térmicamente, que contiene dos resistencias eléctricas controladas mediante dos termopares. Una vez que el residuo plástico es introducido en el reactor, éste se sella herméticamente y se inicia el proceso de calentamiento mediante las resistencias eléctricas. Conforme la temperatura se incrementa en el reactor, el aire contenido en el mismo es desalojado a través de un tubo que desemboca en un baño de agua, el cual sirve de sello hidráulico impidiendo que el aire regrese al reactor y produciendo así, una atmósfera inerte dentro del mismo. Cuando se alcanzan las temperaturas de descomposición del plástico y en ausencia de oxígeno, se produce el proceso de pirólisis. Los gases producidos son desalojados hacia el baño de aceite donde se condensan. Debido a la menor densidad del aceite condensado, éste se separa del agua y de ahí se recupera a través de una válvula de desagüe. El reactor también incluye un filtro de carbón activado, por donde son desalojados los gases no condensables que se producen en la pirólisis, y una válvula para el drenado del agua. En la Figura 1 se presenta el diagrama esquemático de este reactor [5].

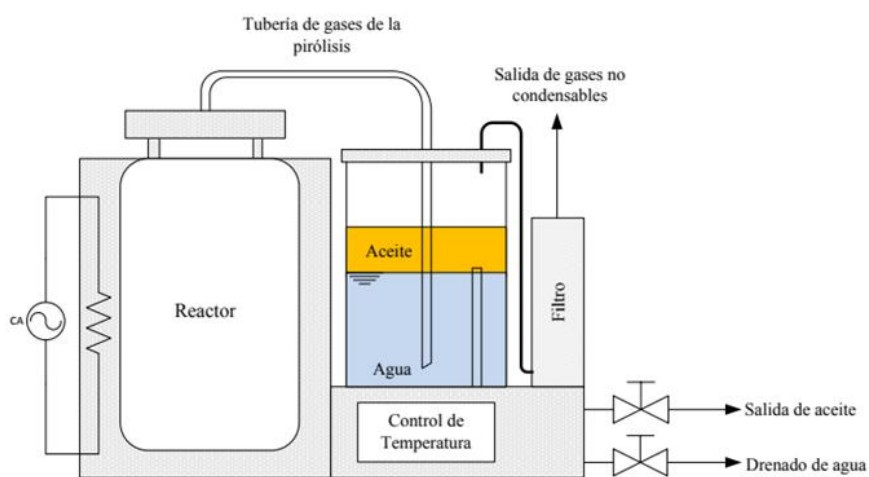


Figura 1. Diagrama esquemático del pirolizador utilizado.

Adaptado de [5].

2.1.2. Concepto de control aplicado en un sistema.

Dado un cierto sistema, la resolución de un sistema de control consiste en la determinación de las entradas y de sus valores más apropiados, con el objeto de que el comportamiento de la salida(s) se ajusten a unas características establecidas, llevando al éxito de la solución propuesta, depender de la relación existente entre entrada y salida, así como la calibración y exactitud de la instrumentación a utilizar.

Si el proceso o sistema es conocido de forma exacta, es posible asociar a este un modelo matemático que represente su comportamiento, y, si se considera dicho sistema aislado del entorno exterior, el planteamiento del análisis en lazo abierto bastaría para resolución del problema de control. Sin embargo, si en dicho sistema se asume la existencia de perturbaciones externas o las relaciones de entrada / salida no son exactamente conocidas, es preciso considerar un esquema de control en lazo cerrado. De forma clásica y general, los sistemas de control se pueden clasificar según dos grupos:

- Servosistemas.
- Sistemas de regulación.

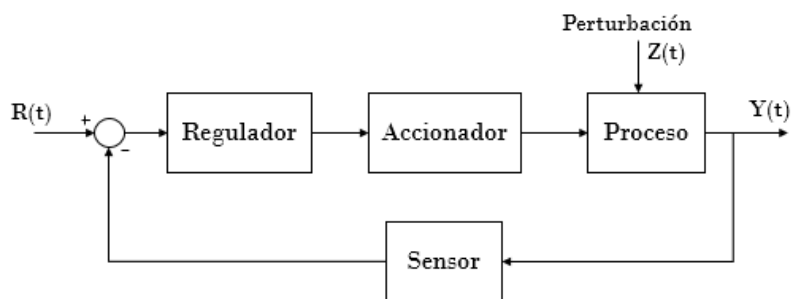


Figura 2. Bucle típico de control, elementos y señales características.

Adaptado de [6].

La metodología del diseño del control puede partir de dos componentes como:

- Síntesis: se parte de las especificaciones propuestas y se determina de forma analítica el tipo de compensación necesaria y la magnitud de los parámetros del regulador. Suele presentar como inconvenientes su complejidad, y su excesiva especificidad con la siguiente pérdida de robustez.
- Análisis: partiendo de la función de transferencia de lazo abierto y procediendo por tanteo y ajuste, se van contemplando distintas estructuras de reguladores con configuraciones experimentadas y comercializadas, hasta que se obtienen las especificaciones de diseño deseadas.

Entre los reguladores más utilizados, se pueden considerar aquellos que implementan las acciones de control tales como:

- acción de dos posiciones o de sí/no
- acciones proporcional, derivativa e integral.

su consideración simple y combinada conlleva a los clásicos reguladores P, PD, PI y PID [6].

2.1.3. Adquisición de señales.

Para cada proceso industrial es necesario adquirir, medir u obtener distintos tipos de variables según sea la aplicación, ya que, de esto, dependerá la toma de decisiones para realizar una siguiente actividad. Es decir, en un proceso de vaciado y llenado de tanques, es necesario tener sensores de nivel que permitan regular o advertir el paso de flujo con el fin de prevenir desbordamientos en los tanques, también pueden ser útiles para dar paso a una siguiente acción, es decir, si se cumple un nivel determinado en un tanque proceda a verter una mezcla. Por tanto, el uso de dispositivos

que permitan al usuario adquirir los datos del proceso poseen un sin número de utilidades y son de carácter importante en los procesos.



Figura 3. Partes de un sistema DAQ.

Adaptado de [7].

La adquisición de datos (DAQ) es el proceso de medir con una PC un fenómeno eléctrico o físico como voltaje, corriente, temperatura, presión o sonido. Un sistema DAQ consiste de sensores, hardware de medidas DAQ y una PC con software programable. Comparados con los sistemas de medidas tradicionales, los sistemas DAQ basados en PC aprovechan la potencia del procesamiento, la productividad, la visualización y las habilidades de conectividad de las PC's estándares en la industria proporcionando una solución de medidas más potente, flexible y rentable [7].

2.1.4. Identificación del sistema.

Antes de buscar y aplicar una técnica de control en el sistema que mejor responda a las necesidades de este, se debe identificar previamente la dinámica del proceso que se va a controlar. Para ello existen diversos procedimientos de identificación, que lo que buscan es crear un modelo o “modelar ” lo más aproximado al sistema real posible debido a que por las características del proceso, que en su mayoría se expresan de forma física, no puede ser trabajado de forma analítica; estos procesos de identificación están basados en la curva de respuesta del proceso en donde

algunos son respaldados analíticamente mediante procesos gráficos y de ecuaciones medianamente complejas, tal como el método de dos puntos, método de la tangente y otros empleados mediante herramientas de softwares matemáticos como la función (ToolBox) *SystemIdentification* de MATLAB.

2.1.5. Modelado.

Cuando surge la necesidad de estudiar en profundidad un sistema se suele acudir a un modelo del mismo, de tal forma que en muchas ocasiones los vocablos del sistema y modelo se emplean indistintamente debido a la asunción de que se tiene un modelo tan aproximado y descriptivo de un sistema, que erróneamente se le considera como si fuera el mismo sistema.

Un modelo del sistema es una representación inteligible (abstracta y consistente dentro de un marco experimental), que representa un sistema real simplificado en un periodo de tiempo y una extensión espacial, donde se incluyen las entidades con sus interacciones, para enfatizar los aspectos que nos interesan según los objetivos del estudio planteado. Existen distintas clases de modelos.

- *Físicos*: Suelen ser prototipos a pequeña escala del sistema real. Por ejemplo, túnel de viento.
- *Analíticos*: Suelen ser simbólicos, están basados en razonamiento y permiten obtener soluciones generales al problema (ecuaciones diferenciales). Las soluciones particulares se obtendrán reemplazando los valores simbólicos por los valores numéricos. Los problemas complejos pueden llegar a ser de difícil tratamiento analítico.
- *Cualitativos*: basados en el conocimiento

- Otros, generados pensando en diferentes procedimientos y herramientas que facilitarán su uso: por ejemplo, basados en lenguajes de programación-simulación, etc [6].

2.1.5.1. Método de dos puntos.

La mayoría de los métodos de sintonización de controladores se basan en los parámetros de un modelo de orden reducido que permita representar sistemas dinámicos de orden alto y por esta razón los más empleados son los de primer o segundo orden más tiempo muerto, cuyas funciones de transferencia son:

Primer orden más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} d \quad \text{Ec. 1}$$

Segundo orden sobre amortiguado más tiempo muerto

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad \text{Ec. 2}$$

Para identificar dos parámetros que requiere el modelo, la constante de tiempo y el tiempo muerto aparente del sistema, se pueden establecer dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la curva de reacción. De este modo se garantiza que la respuesta del modelo coincida con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo.

El primero en proponer y aplicar este método fue Smith, quien propuso el análisis de dos puntos de tiempo para dos puntos de porcentajes de respuesta en la curva, es decir como primer parámetro, el tiempo obtenido cuando la curva alcanza un 28.3% y como segundo parámetro, el tiempo obtenido cuando la curva alcanza un 63.2%. A este procedimiento de análisis a la curva se le conoce como método de Smith.

Basándose en el mismo procedimiento de Smith surge un método de dos puntos general en donde se establecen ecuaciones generales, con el fin de identificar un modelo de primer orden más tiempo muerto establecido en la ecuación (1) con base en los tiempos requeridos para alcanzar dos puntos específicos en la curva de reacción del proceso.

Si p_1 y p_2 son dos valores porcentuales del cambio en la respuesta del sistema y t_1 y t_2 son los tiempos requeridos para alcanzar dichos valores, tal como se muestra en la figura 4, entonces los parámetros de un modelo de primer orden más tiempo muerto se pueden obtener de:

$$\tau = at_1 + bt_2 \quad \text{Constante de tiempo} \quad \text{Ec. 3}$$

$$t_m = ct_1 + dt_2 \quad \text{Tiempo muerto} \quad \text{Ec. 4}$$

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad \text{Ganancia del sistema} \quad \text{Ec. 5}$$

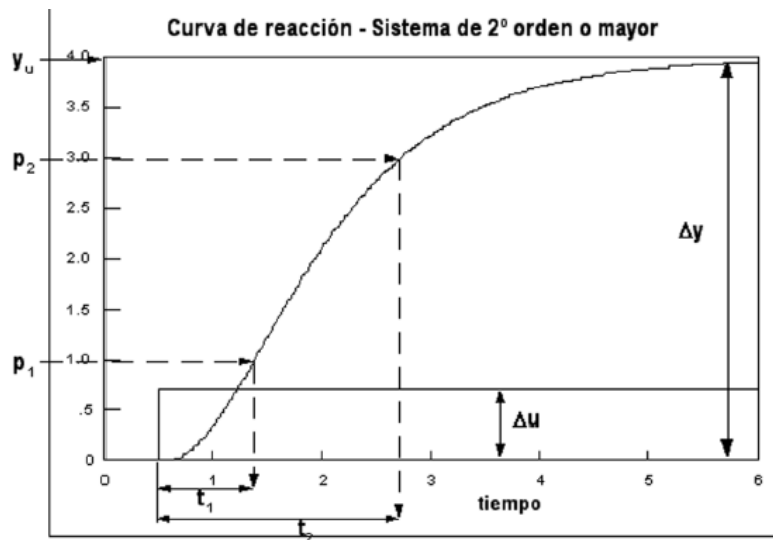


Figura 4. Curva de reacción del sistema ante entrada escalón.

Adaptado de [8].

Los porcentajes del cambio en la respuesta para la determinación de los dos tiempos requeridos por el procedimiento de identificación, así como los valores de las constantes a, b, c y d para los métodos de Alfaro, Bröida, Chen y Yan, Ho et al, Smith y Vitecková et al, se resumen en Tabla 1 y 2 [8].

Tabla 1. *Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.*

Método	%P1(t1)	%P2(t2)	A	b	c	d
Alfaro	250	75	-0.91	0.91	1.262	-0.262
Bröida	28	40	-5.5	5.5	2.8	-1.8
Chen y Yang	33	67	-1.4	1.4	1.54	-0.54
Ho et al	35	85	-0.67	0.67	1.3	-0.29
Smith	28.3	63.2	-1.5	1.5	1.5	-0.5
Vitecková et al	33	70	-1.245	1.245	1.498	-0.498

Nota: Constantes halladas por cada autor para la identificación de sistemas de primer orden.

Adaptado de [8].

Tabla 2. *Constantes para la identificación de los modelos de segundo orden más tiempo muerto.*

Método	%P1(t1)	%P2(t2)	A	B	c	d
Ho et al	35	85	-0.463	0.463	1.574	-0.574
Vitecková et al	33	70	-0.749	0.749	1.937	-0.937

Nota: Constantes halladas por cada autor para la identificación de sistemas de segundo orden.

Adaptado de [8].

2.1.5.2. *Sistemas de segundo orden subamortiguados.*

Un sistema de segundo orden subamortiguado ($0 > \xi < 1$) está caracterizado por la siguiente función de transferencia:

$$G_p(s) = \frac{w_n^2 K}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad \text{Ec. 6}$$

ξ : Coeficiente de amortiguamiento. Es un parámetro dinámico que da una medida de la fuerza de roce en los sistemas reales.

w_n : Frecuencia natural de oscilación. Es también un parámetro dinámico.

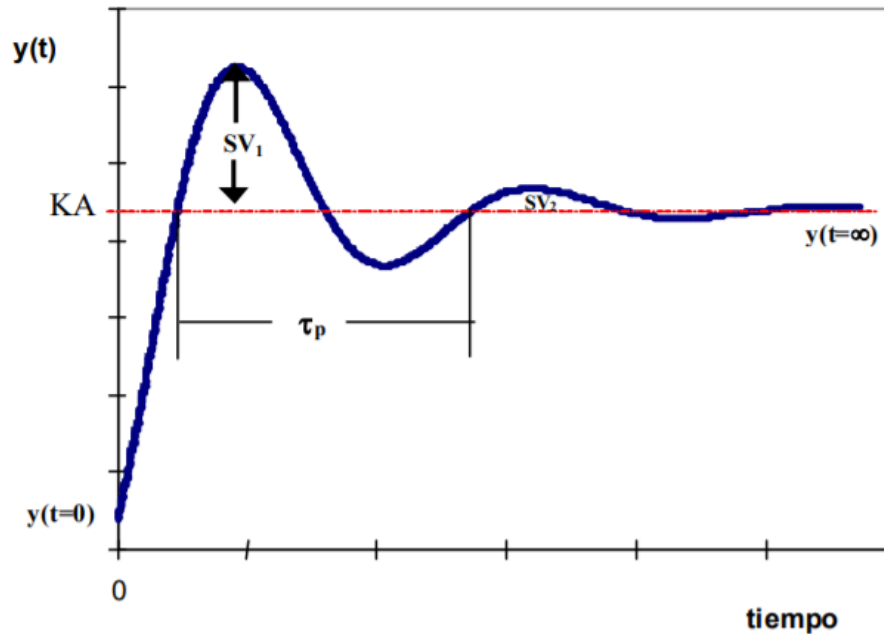


Figura 5. Respuesta de un sistema de segundo orden subamortiguado ante un escalón de magnitud A .

Adaptado de [9].

1. De la respuesta temporal que se obtiene se miden tres magnitudes:

- El período propio de oscilación (τ_p)
- El primer sobre valor (SV_1)
- El segundo sobre valor (SV_2)

2. Procesamiento de los datos:

- Cálculo de la frecuencia propia de oscilación: $\tau_p = \frac{2\pi}{\omega_p} \rightarrow \omega_p$

- Cálculo del coeficiente de amortiguamiento: $RA = \frac{SV_2}{SV_1} = e^{\frac{-2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \rightarrow \xi$
- Cálculo de la frecuencia natural: $\omega_p = \omega_n \sqrt{1-\xi^2}$

2.1.5.3. Método de Smith.

Este método se aplica a cualquier sistema de segundo orden descrito por la función de transferencia de la ecuación 6. El método se basa en el cálculo de t_{20} y t_{60} que son los tiempos para alcanzar respectivamente una respuesta fraccional del 20 y del 60 % por primera vez con respecto al valor final alcanzado. Es por eso que se lo designa también como un método de dos puntos. Las figuras siguientes muestran el significado de ambos tiempos para sistemas sub y sobreamortiguados [9].

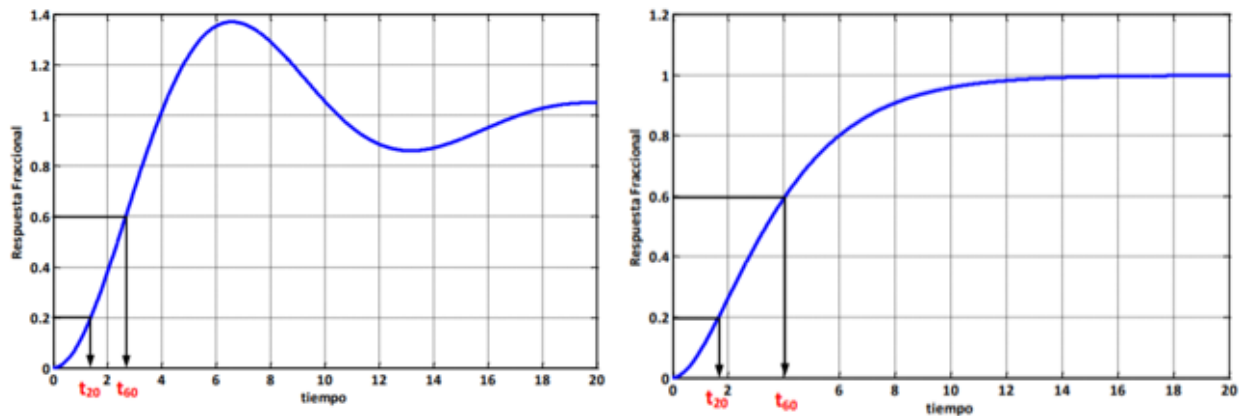


Figura 6. Respuesta de un sistema de segundo orden sub y sobreamortiguado.

Adaptado de [9].

La grafica siguiente permite obtener los valores de ω_n y ξ [9].

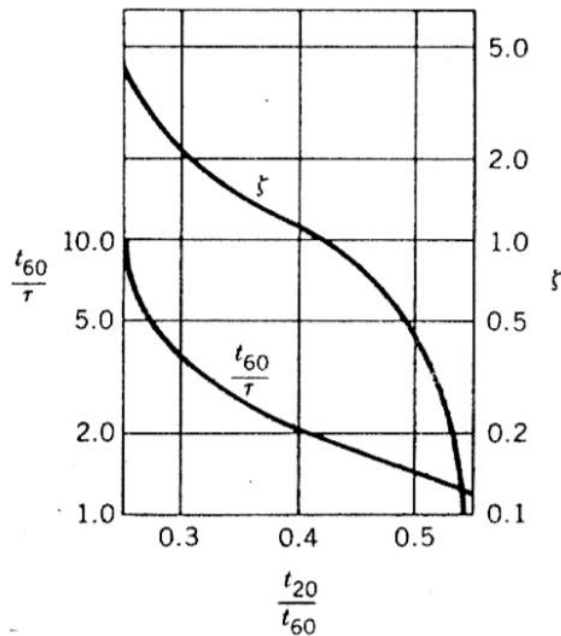


Figura 7. Grafica de Smith.

Adaptado de [9].

Si $0 < \xi < 1$ la identificación dinámica está concluida (Sistema subamortiguado). Si $\xi \geq 1$ (Sistema sobreamortiguado), conociendo la frecuencia natural ω_n y el coeficiente de amortiguamiento ξ se evalúa las constantes de tiempo con:

$$S_{1,2} = -\xi\omega_n \pm \omega_n \sqrt{\xi^2 - 1} \quad \tau_{1,2} = -\frac{1}{S_{1,2}}$$

2.1.6. Técnicas de control.

2.1.6.1. Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID.

Ziegler y Nichols propusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o

sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols han aparecido numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos controladores.) Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación, se hace una breve presentación del primer método.

2.1.6.1.1. Primer método.

En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la Figura 8. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 9. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t)\%K$, tal como se muestra en la figura 8.

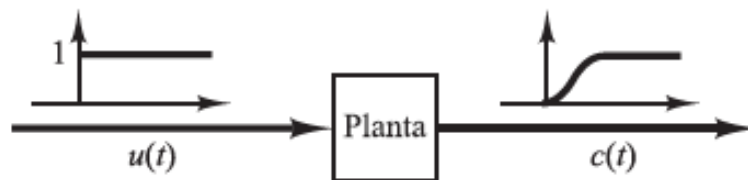


Figura 8. Respuesta de una planta ante un escalón unitario

Adaptado de [10].

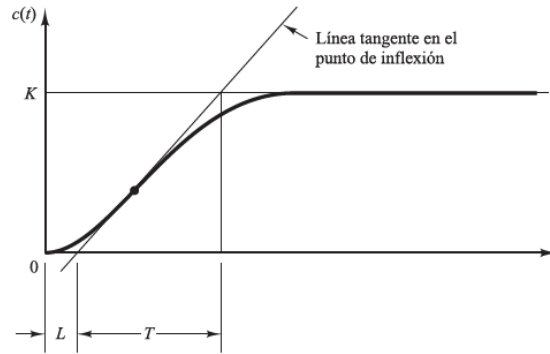


Figura 9. Curva de respuesta en forma de 'S'.

Adaptado de [10].

Tabla 3. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).

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

Nota: Constantes establecidas por Ziegler-Nichols para la determinación de controladores tipo P, PI, PID. Adaptado de [10].

En este caso, la función de transferencia $C(s)/U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con un retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

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

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce

$$G(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) = 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}$$

Por tanto, el controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s=1/L$ [10].

2.1.6.2. Control sintético de Dahlin.

Proceso	Controlador	Parámetros de ajuste
$G(s) = K$	I	$K_c = 1 / K\tau_c$ ajustable
$G(s) = K / (\tau s + 1)$	PI	$K_c = \tau / K\tau_c$ ajustable $\tau_f = \tau$
$G(s) = K / (\tau_f s + 1)(\tau_2 s + 1)$ $\tau_f > \tau_2$	PID	$K_c = \tau_f / K\tau_c$ ajustable $\tau_f = \tau_f$ $\tau_D = \tau_2$
$G(s) = Ke^{-t_0 s} / (\tau s + 1)$	PI, PID (PI $\Rightarrow \tau_D = 0$) (PID si $t_0 > \tau/4$)	$K_c = \tau / K(t_0 + \tau_c)$ ajustable $\tau_f = \tau$ $\tau_D = t_0 / 2$

Figura 10. Tabla de modos del controlador y fórmulas de ajuste para síntesis Dahlin.

Adaptado de [11].

2.2. Marco Conceptual

2.2.1. Pirólisis.

La pirólisis es la degradación de la biomasa por el efecto del calor en la ausencia de oxígeno, es decir, en una atmosfera completamente inerte [12].

2.2.2. HDPE (Polietileno de alta densidad).

Es un polímero sintético, termoplástico miembro de las poliolefinas obtenido a partir de una reacción conocida con el nombre de polimerización del polietileno elaborado a partir de etano, un componente del gas natural. El Polietileno de alta densidad es semicristalino (70 – 80%), incoloro, inodoro, no toxico, lácteo y se puede encontrar en todas las tonalidades transparentes y opacas [13].

2.2.3. Polipropileno.

Es un termoplástico que es obtenido por la polimerización del propileno, subproducto gaseoso de la refinación del petróleo. Todo esto desarrollado en presencia de un catalizador, bajo un cuidadoso control de temperatura y presión. El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos (homopolímero, copolímero rándom y copolímero de alto impacto), los cuales pueden ser modificados y adaptados para determinados usos [14].

2.3. Marco Legal

2.3.1. Colombia.

El instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, **ICONTEC**, organismo nacional de normalización, según el Decreto 2269 de 1993 (**GTC53-2**) a través de la norma y guía GTC 53-2 (Guía para el aprovechamiento de los residuos plásticos), ratificada por el consejo directivo del 2004-07-28, provee información que permite realizar una gestión integral de los residuos plásticos provenientes de la posindustria o del posconsumo, incluyendo lo relacionado con las

etapas de separación en la fuente y la recolección selectiva. Las principales características de esta norma son:

Clasificación de los tipos de resinas plásticas aprovechables.

Clasificación de las fuentes generadoras de residuos plásticos.

Reducción en la fuente por cambio en los productos o cambio en los procesos.

Reutilización

Aprovechamiento de los residuos plásticos mediante reciclaje mecánico (posindustrial[primario] y posconsumo [secundario]).

Aprovechamiento de los residuos plásticos mediante reciclaje químico (Terciario).

Aprovechamiento de los residuos plásticos mediante incineración con recuperación de energía (Reciclaje cuaternario).

Disposición en rellenos sanitarios.

Este estatuto junto con las normas del mismo sector NTC 3205:1991, GTC 24:2003 y GTC

86:2003 beneficia en términos prácticos y sapientes el desarrollo de este tipo de proyectos, por el hecho de no solo informar y caracterizar la información sobre el plástico desde su etapa de producción hasta su disposición final, sino guiar y dar a conocer los métodos de reciclaje más convenientes según el tipo de plástico, creando así un punto de partida ante la conciencia ambiental y el correcto uso de los plásticos [15].

2.3.2. México.

En México actualmente no existen normas, guías o leyes gubernamentales que respalden específicamente el sector de los residuos sólidos plásticos y su disposición final, sin embargo opera el Plan Nacional Privado Colectivo de Manejo de Residuos de Envases Post-Consumo de PET, PEAD, Aluminio y otros materiales folio de registro ante SEMARNAT PM-ROTR-008-2013 (Plan de manejo por la Secretaría de medio ambiente y recursos naturales) y ante SEDEMA-CDMX PMRCL-L008/2017 (Plan de manejo implementado por la secretaria del medio ambiente por el gobierno de la ciudad de México), creado por ECOCE, primer organismo en México en proponer acciones concretas sobre el manejo adecuado de los residuos de envases y empaques. ECOCE es una asociación civil ambiental creada y auspiciada por la industria de productos de consumo. Líder en sustentabilidad ambiental y herramienta de la responsabilidad social empresarial (RSE) de sus asociados, a través de la recuperación de residuos de envases y empaques de sus productos, para su reciclaje y buena disposición final [16].

2.4. Marco tecnológico y científico (Estado del arte).

Para orientar el análisis de estado del arte del proyecto de investigación se definieron 4 temas de búsqueda, como sigue:

Tema 1. Materia Prima

- a) ¿Qué tipo de materiales son implementados en el proceso de pirolisis?
- b) ¿Qué cantidad de producto es ingresado para la pirolización?
- c) ¿Cuál es la temperatura de descomposición del material?

Tema 2. Sistema de Control

- a) ¿Emplea algún sistema de control?

- b) ¿Qué tipo de sistema de control es empleado?
- c) ¿Bajo qué técnica es desarrollado el sistema de control?

Tema 3. Producto Final

- a) ¿Qué producto se obtiene después del proceso?
- b) ¿El producto obtenido es empleado dentro del mismo proceso?
- c) ¿Qué uso se le da al producto final?

Tema 4. Sistema General de Pirolisis

- a) ¿Qué tipo de energía emplea el sistema para su funcionamiento?
- b) ¿Qué elementos conforman el sistema de pirolisis?
- c) ¿El sistema de pirolisis trabaja de forma continua?

De la revisión de artículos de investigación se elaboró la Tabla 4.

Título: Robust Control and Optimization for a Petrochemical Pyrolysis Reactor

Autor: Mădălina Mircioiu, Elena-Margareta Cimpoeșu, Cătălin Dimon. University “Politehnica” of Bucharest, Department of Automatic Control and Computer Science, 2010

Resumen: El principal objetivo del trabajo fue el diseño de una solución para el proceso químico y petroquímico del reactor de etileno considerando que el proceso posee una estructura multivariable no-lineal, posteriormente el diseño fue implementado en una plataforma petroquímica de Pitesti, Rumania.

Las autoras plantean que una solución de automatización estándar para el proceso debe ser capaz de manejar dos requisitos básicos, la posibilidad de mantener una buena proporción entre las cantidades de reactivos que se alimentan a la instalación y mantener la presión y temperatura en las condiciones precisas para el correcto cumplimiento de las reacciones químicas

En primera instancia, las autoras hallaron el modelado matemático de los dos procesos mediante señales pseudo-aleatorias. Teniendo las ecuaciones, realizaron un control PI (Proporcional-Integrador), usando el método de ubicación de polos para determinar los parámetros del controlador que garantizan una ganancia unitaria y que no posee overshoot. Con esto, pudieron observar que dicho control no era suficiente para combatir las perturbaciones que se producen en el proceso de pirólisis, por tanto, realizaron dos controladores por medio de algoritmo de control RST, teniendo los polinomios y evaluando en lazo cerrado la respuesta escalón del modelo se pudo apreciar que las perturbaciones generan altas amplitudes de variación en cortos periodos de tiempo, lo cual haría que se produjera un malfuncionamiento en el proceso físico.

Para evaluar la solidez de un controlador, utilizan como indicadores una función de sensibilidad de salida y el margen del módulo de dicha función representa la influencia de la perturbación. Realizando el modelado de la función representante de las perturbaciones y añadiendo un par de polos complejos auxiliares, generan un nuevo controlador, el cual vuelven a simular por medio de Matlab, notando así, que las perturbaciones a pesar de que siguen afectando, la reacción es mínima y despreciable para el funcionamiento de la planta. De esta manera, a partir de las simulaciones y los cálculos matemáticos realizados, las autoras emplean el modelo en la planta petroquímica en Rumania [17].

Conclusiones:

- En todo proceso que se desee controlar, es necesario primeramente realizar el modelado matemático de la planta a controlar.
- El método de ubicación de polos permite de manera no tan compleja aplicar un control que intente corregir el comportamiento de la planta por medio de controladores de tipo: P, I y/o D.

- Dependiendo del tipo de sistema se debe tener en cuenta las perturbaciones que afectan al mismo.

Título: Diseño y construcción de una unidad de investigación en pirólisis continua de biomasa

Autor: Antonio José Fajardo Villaquirán. Universidad del valle, Santiago de Cali, Feb-2011

Resumen: El trabajo se realizó con el fin de diseñar y construir una “Unidad de Investigación en Pirólisis Continua de Biomasa” (UIPCB), proceso consistente en la descomposición térmica de la materia orgánica en ausencia de oxígeno u otros agentes gasificantes, obteniendo residuos como gases, líquidos (alquitranes y aceites) y residuo carbonoso (char). Por otro lado, profundizaron en la tecnología con el fin de apropiar conocimiento para proyectos aplicados a fuentes de energía renovables en Colombia específicamente en la región azucarera del Valle del Cauca, debido a su alto potencial energético en la biomasa.

Empleando como materia prima la biomasa a partir de los Residuos Agrícolas Cañeros (RAC), dan solución a los residuos de bagazo de la caña apartados en el terreno del cultivo; además realizan una valoración energética de la biomasa, como también del proceso y selección de la tecnología de pirólisis más apropiada, para así diseñar los elementos constitutivos de la unidad; Proponiendo así que el pirolizador definitivo sea móvil, es decir que la planta sea la que se desplace al cultivo y realice el proceso [18].

Conclusiones:

- El proceso ejecutado por la Unidad de pirólisis continua de biomasa emplea el mismo concepto del proceso realizado por la conversión de residuos plásticos provenientes de la agricultura en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis.

- Ambos procesos emplean una materia prima para la obtención de los residuos ricos en energía, pero se diferencian en que el proyecto anteriormente descrito emplea biomasa a partir de los residuos agrícolas cañeros y el proyecto a realizar emplea residuos plásticos provenientes de la agricultura.

Título: Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Web SCADA Systems

Autores: Yuriy Kondratenko 1, Oleksiy Kozlov 2, Oleksandr Gerasin 2, Andriy Topalov 2, Oleksiy Korobko. Petro Mohyla Black Sea National University and National University of Shipbuilding, Ukraine, 2017

Resumen: El proyecto se basa en el desarrollo de un sistema Web SCADA para el monitoreo, automatización y control de un proceso de complejos especializados en pirólisis (SPC) para los residuos de polímeros municipales. En el artículo se describe la importancia del control de procesos y se presentan dos métodos de medida para su realización. El primero es el método directo, en el cual el autor explica que genera muchos inconvenientes, principalmente por las condiciones de operación en el reactor de pirólisis, en el cual existe variación de densidad por parte de los residuos, alta viscosidad, altas temperaturas, distintos puntos de ebullición y posibles adherencias en los elementos de detección. El segundo método es el indirecto, el cual ayuda a resolver el problema del método anterior, al medir la velocidad de flujo de los valores de combustible gaseoso (Q_{gf}) y fracciones líquidas (Q_{lf}), el valor de temperatura en el reactor y el movimiento lineal (Y_{hd}) del pistón actuador. Con esto, mediante una serie de fórmulas que plantea el autor se calcula el valor actual de nivel de carga del reactor, permitiendo la implementación del sistema Web SCADA SPC.

Este sistema permite integrar todos los sistemas a gran escala en las plantas industriales, empresas o fábricas. Automatizar el envío de información en caso de emergencia a cualquier usuario de la compañía, además de, visualizar todos los parámetros principales del proceso en tiempo real con una alta precisión y exactitud. Por último, tiene la capacidad de transmitir a nivel local y a nivel remoto a través de internet, comunicando por sistema inalámbrico o alámbrico según requiera la aplicación del sistema [19].

Conclusiones:

- El método indirecto es una solución que permite resolver el problema de lectura de datos debido a las condiciones del proceso del pirolizador.
- El sistema Web SCADA tiene la capacidad de suministrar una alta exactitud de las variables en tiempo real que ocurren en el proceso y transmitir a todas las unidades requeridas.
- Según el tipo de aplicación que se desee emplear, será necesario el uso de sistemas más robustos y complejos para la comunicación y envío de información en las unidades que se demanden.

Tabla 4. Respuestas a Tópicos 1, 2, 3 y 4.

Artículos	Tema 1			Tema 2			Tema 3			Tema 4		
	Q a	Q b	Q c	Q a	Q b	Q c	Q a	Q b	Q c	Q a	Q b	Q c
(Kondratenko, Kozlov, Gerasin, Topalov, Korobko, 2017) [19]	Residuos Polímeros		+500 °C	Si	Tiempo Real	SCADA				Hidráulica		
(Obando, 2015) [20]	ROS (Residuos Orgánicos Sólidos)		450°C y 600 °C	No			Biochar	No	Fertilizante Orgánico	Solar		
(Fajardo, 2011) [18]	Biomasa											
(Urbieta) [21]	Agua	1 litro	25°C a 75°C	Si	PID	Ziegler & Nichols						
(Benitez, Pérez, Batlle, García, 2011) [22]	Palanquillas de Acero	30,60,90	1157°C a 1177°C	Si	PID	Ganancia Programada						
(Ríos, 2011) [23]	PET, PVC, PE, PS, RSU	36 T/día	400°C y 700 °C	No			Crudo de pirólisis	Si	Combustible	Térmica		No
(Mircioiu, Cimpoeșu, Dimon, 2010) [17]	Residuos Plásticos		820°C a 860°C	No	PI	Ubicación de Polos						

Nota: Respuesta a las preguntas planteadas en los tópicos respecto a cada uno de los artículos de investigación.

3. Diseño Conceptual

Para el desarrollo del proyecto se siguió la metodología VDI, usando técnicas como QFD para el levantamiento de requisitos, modelado de sistemas.

3.1. Conociendo la planta y sus componentes

En este apartado se desarrolla la familiarización con el pirolizador, donde, empleando herramientas como el manual de usuario, se conoce las pautas, programación y recomendaciones necesarias para el uso adecuado al efectuar el proceso de pirólisis, y, la observación y recopilación (registro) fotográfica, se conoce el hardware del dispositivo, los elementos que lo conforman y la ubicación de cada uno, sirviendo como base fundamental para la creación de un esquema eléctrico que ilustra el funcionamiento de cada componente que lo conforma, dejando un registro técnico adicional que complementa la información del pirolizador aparte del manual de usuario. Además de realizar una prueba de pirolisis para conocer el proceso e identificar las variables importantes.

3.1.1. Identificación de la maquina

Como primer paso y haciendo uso del manual del usuario identificamos el cuerpo de la máquina y los nombres de cada pieza que lo compone. En la figura 11 y 12 se ilustra los componentes principales del pirolizador. (a) reactor, (b) pantalla de operación, (c) filtro de gases, (d) válvula de salida de agua e hidrocarburo líquido, (e) cubierta de protección y aislación térmica, (f) tubo

condensador de gases, (g) condensador tanque de agua, (h) conducto de gases no condensados, (i) válvula antirretorno.



Figura 11. Vista frontal pirolizador en estado de reposo para limpieza.

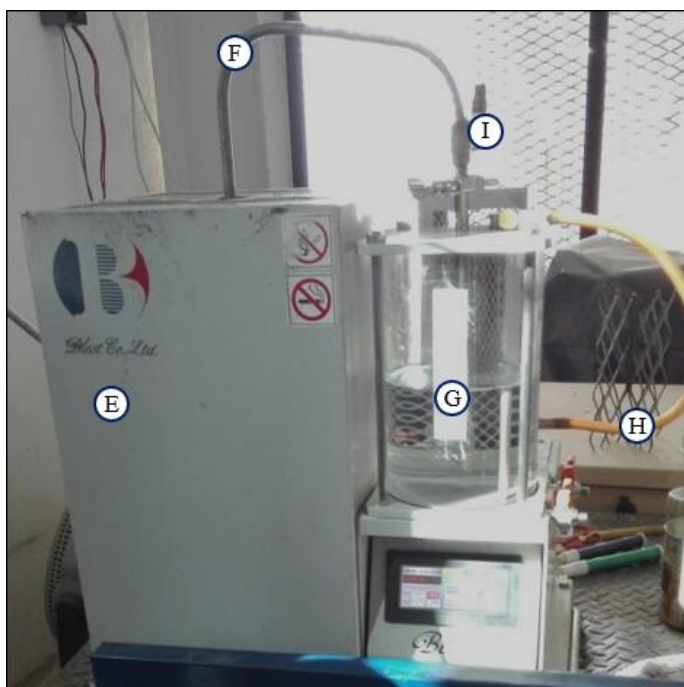


Figura 12. Vista frontal pirolizador en estado de marcha.

3.1.2. Prueba de pirólisis

Después de haber comprendido el manual del usuario y conocido el pirolizador de forma general, con asistencia de los integrantes del grupo de investigación principal, se realizó una prueba de pirólisis para comprender el proceso y documentar las variables importantes del mismo. En la prueba se empleó 150 gr de PP como materia prima en presentación de tapas de botellas plásticas, ver figura 13, un Setpoint de temperatura de 380°C para la parte superior del reactor (Upper), y un Setpoint de 425°C para la parte baja del reactor (Lower), ver Figura 14. Una vez transcurridos aproximadamente dos horas del proceso, se puede evidenciar claramente en la figura 14 como el material es transformado en hidrocarburo líquido. El sistema de finalización del proceso se hace de forma manual y empleando la observación del usuario, es decir que la única forma actual de determinar cuando finaliza la pirólisis es observando el comportamiento del agua en el tanque condensador, cuando deja de fluir gas a través del conducto que conecta al reactor con el condensador, ya no hay presencia de “burbujas” en el agua estimando así que ya no hay más descomposición del material dentro del reactor. Finalizado el proceso, se drenó el producto final de hidrocarburo obtenido y el pirolizador se deja en estado de reposo para su posterior limpieza.

Debido a que el hidrocarburo líquido es condensado en un tanque de agua, su extracción no se puede realizar de manera pura directamente del dispositivo de pirólisis, ver figura 16, por lo que fue necesario el uso de un decantador para separar el hidrocarburo del agua, tal como se muestra en la figura 17.

Por último, una vez obtenido el hidrocarburo líquido puro, se realizó la limpieza del reactor con el fin de conocer el porcentaje de residuos sólidos obtenidos (char), completando el 100% del

proceso para posteriormente analizar los resultados obtenidos y obtener conclusiones del mismo que aportaran las ideas base para el desarrollo del proyecto.

Tabla 5. *Condiciones de operación y productos obtenidos en el proceso de pirolisis.*

<i>Descripción</i>	<i>Resultados</i>
<i>Tipo de plástico empleado</i>	Polipropileno
<i>Cantidad de material empleado</i>	150 gramos
<i>Tiempo total del proceso</i>	11376 segundos (3,16 Horas)
<i>Producto final obtenido</i>	Hidrocarburo liquido
<i>Cantidad de producto final</i>	Aprox 106 mL (70 gramos)
<i>Cantidad de residuos solidos</i>	24 gramos
<i>Cantidad estimada de gases no condensados</i>	56 gramos

Nota: Resumen de las características y resultados obtenidos en la primera prueba de pirolisis.



Figura 13. Materia prima.



Figura 14. Pantalla de operación.



Figura 15. Hidrocarburo liquido condensado.



Figura 16. Producto final drenado.



Figura 17. Separación por decantación.



Figura 18. Hidrocarburo líquido puro.



Figura 19. Residuos sólidos alojados en el reactor

3.1.3. Identificación de instrumentación

Una vez observado el pirolizador de forma general, se continuó con la observación detallada de los componentes eléctricos y electrónicos que conforman el funcionamiento del sistema, para ello fue necesario la previa autorización del tutor a cargo del proyecto, ya que como se muestra en la figura 20 era necesario hacer un desmantelamiento temporal del pirolizador para determinar sus componentes y su respectiva ubicación.



Figura 20. Instrumentación del pirolizador.

Esta sección representa un avance importante que da apertura a la identificación de la instrumentación del sistema, dentro de la cual se halló la ubicación detallada de cada sensor de temperatura, ver figura 21, 22 y 23. (A) termocupla ubicada entre las paredes externas del reactor encargada de sensar la temperatura general del reactor, sirviendo como referencia para la protección térmica que posee, (B) Termocupla ubicada en la parte interna baja del reactor, encargada de sensar la temperatura que se representa en la HMI como LOWER. (C) Termocupla ubicada en el filtro quemador de gases, encargada de sensar la temperatura a la cual se están quemando los gases no condensados.



Figura 21. Termocupla parte media del reactor y Termocupla de seguridad.



Figura 22. Termocupla parte baja del reactor.

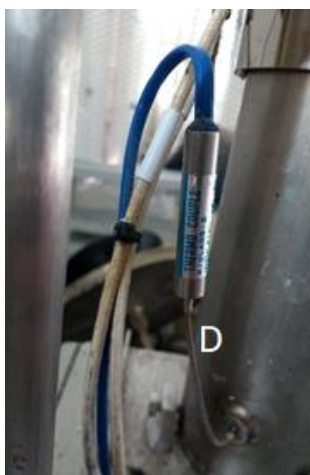


Figura 23. Termocupla del quemador de gases.

Posterior a la ubicación de los sensores se logró determinar los puntos a donde es adquirida las señales de temperatura, de los cuales 3 residían en los canales del módulo de temperatura FP0-TC4 Panasonic (TT1, TT2, TT3) y uno residía en un canal del relé térmico K8AK Omron (TT4).



Figura 24. Punto de llegada de la señal de las termocuplas.

La ubicación específica y la descripción detallada de cada componente que conforma la instrumentación total del pirolizador se encuentra en el apéndice A.

3.2. Criterios de diseño

3.2.1. Identificación del cliente.

3.2.1.1. Clientes externos.

- Empresas de reciclaje tal como Recicla.lo (Empresa actual)
- Petroleras
- Industrias que empleen procesos térmicos en la manufactura del producto final.

- Entidades educativas especialmente las pertenecientes a facultades de ingeniería química, ambiental, mecánica, como por ejemplo el equipo de trabajo de la división de ingeniería mecánica y química de la UG.
- Director de proyecto actual Dr. José Manuel Riesco.

3.2.1.2. Clientes internos.

- Equipo de investigación: Estudiantes de Maestría encargados actualmente del uso y manejo del pirolizador.
- Autor: diseñador y fabricante principal.
- Director de proyecto Macro Dr. José Manuel Riesco.

3.2.2. Expectativas del cliente.

A partir de las entrevistas con los interesados se definieron las expectativas

- Sencillo y fácil de utilizar.
- Interfaz organizada y agradable a la vista.
- Control de temperatura estable, con error mínimo.
- Almacenamiento de datos
- Advertencia de finalización del proceso
- Fácil implementación
- En cualquier evento de paralización la eficiente del producto final sea mayor a 60%

3.2.3. Lista de requerimientos.

- Control de temperatura en el reactor de pirólisis que permita estabilizar la temperatura debido a que actualmente dentro del proceso una vez se llega a la temperatura deseada (Setpoint) el reactor empieza a oscilar una diferencia térmica de +40 grados con el control on/off que posee, lo cual es un valor demasiado elevado repercutiendo a un error de la misma magnitud. Además, que permita disminuir la rampa de calentamiento, con el fin de que está se pueda realizar de manera más lenta.
- Adquirir los datos de todas las termocuplas del sistema (actualmente sólo se hace la lectura de dos) y comunicar dicha información con un ordenador, para así, almacenar los datos y realizar de manera óptima las curvas características de los plásticos.
- Desarrollar un entorno virtual en paralelo a la información suministrada comúnmente por la HMI en donde represente gráficamente el proceso de calentamiento respecto al tiempo, además de servir como puente de comunicación para la adquisición y archivo continuo y permanente de los datos.
- Adicionar un sensor de temperatura en la parte media interna del reactor con el fin de tener en cuenta la incidencia térmica del plástico.
- Implementar un sensor de flujo de gas para tener en cuenta el final del proceso de pirolisis evitando gasto innecesario de energía.

3.2.4. Seguridad.

Respaldo de seguridad de la información de los datos adquiridos.

3.2.5. Estética.

- Mejorar la interfaz gráfica de la HMI, ya que, actualmente no es muy agradable al usuario.
- Una interfaz gráfica agradable al usuario donde logre observar a gusto los datos adquiridos y las gráficas en tiempo real.

3.2.6. Valor y utilidad.

- Porcentaje de producción mayor al 60% de materia prima utilizada.
- Reducción del error de temperaturas a un valor menor al 1%.
- Desarrollo de un sistema de control para su respectivo plástico, en este caso solo se manejan 2 (Polipropileno y HDPE).

3.2.7. Requerimientos imprescindibles.

- Control de temperatura, para temperatura estable.
- Almacenamiento de información en ordenador.
- Interfaz gráfica de la adquisición de datos en tiempo real.
- Reducción del error a un valor menor al 1%.
- Control para cada tipo plástico.

3.2.8. Requerimientos no imprescindibles.

Se hace una valoración siguiendo el modelo de la matriz de calidad, comparando los requerimientos dos a dos y dando un punto a favor del de mayor importancia, al final se suman los puntos acumulados por cada requisito.

3.2.9. Selección de soluciones.

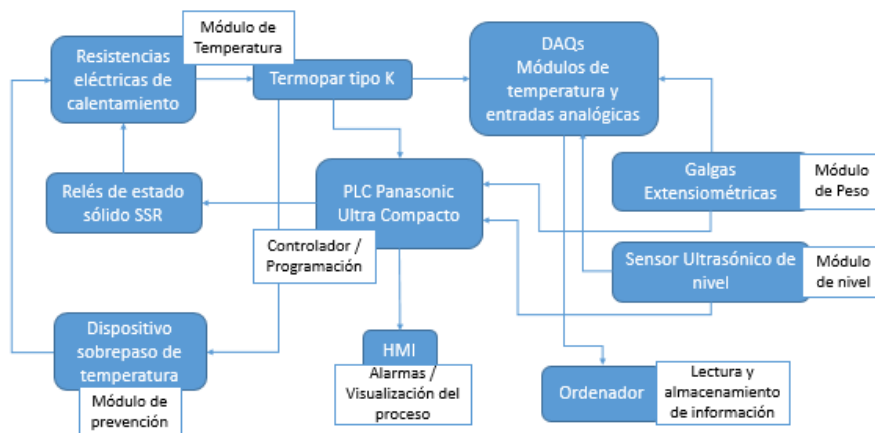


Figura 25. Diagrama del proyecto.

Para la ejecución de un diseño mejorado del pirólizador se optaron por las siguientes soluciones:

- El control de temperatura estará determinado por uno de tipo PID, debido a que es un control más robusto, que gracias a su acción integral permite reducir el error a casi cero, además por su componente derivativa es posible cambiar la rampa o tiempo de establecimiento. Por otra parte, se elegirá un PLC, como dispositivo de control, debido a que son precisamente diseñados para aplicaciones industriales y debido a las condiciones a las cuales estará sometido el reactor, benefician más el uso de éstos. Además, se implementará el uso de Relés de estado sólido, debido a su funcionamiento

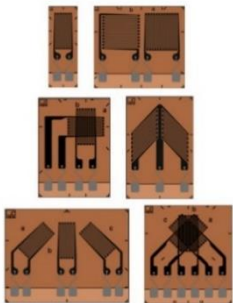
de conmutación a altas velocidades y debido a la sencillez de control de voltaje en comparación al de frecuencia.

- Para la adquisición de datos se opta por el uso de una DAQ, ya que así se evita el uso de circuitos externos para el acondicionamiento y amplificación de señal para cada uno de los termopares, además las DAQ de entradas de temperatura ya contienen una caracterización específica para cada tipo de termopar y así mismo se complementa con el software de programación LabVIEW, por lo cual está todo integrado y resulta más sencillo de implementar, sin mencionar que permite un mejor diseño a la interfaz gráfica en el ordenador, por su condición de programación gráfica.
- Para determinar la finalización del proceso, se propone por medio de la incrustación de galgas extensiométricas al interior del reactor, debido a que, el medidor de flujo podría leer un flujo no deseado causado por los gases no condensables, mientras que con las galgas se estaría leyendo directamente el peso del plástico sometido a pirólisis, el cual es precisamente el que indicará el fin del proceso.
- La interfaz gráfica se diseñará desde cero, ya que, la anterior está determinada por una compañía en específico.
- Se harán pruebas desde el inicio con el fin de, observar el comportamiento de producción de hidrocarburos líquidos y no tener inconvenientes al finalizar el proceso.

3.2.10. Diseño detallado.

En la tabla 6 se presentan los dispositivos seleccionados para el diseño del control del proceso de pirólisis.

Tabla 6. *Dispositivos y características.*

Dispositivo	Características
PLC Panasonic Ultra Compacto FP0R 	AFP0RC10CRS • Programación Control FPCWIN Pro – Lenguaje Ladder • 6 entradas, 4 salidas a relé • 2 puertos RS232C, puerto de programación USB 2.0 • Memoria de programa: 16000 a 32000 pasos • Memoria de datos; 12315 a 32765 palabras • PROFIBUS, Ethernet TCP/IP, Modbus, S-link, CC-Link, PLC Link • Avanzadas funciones de posicionamiento incorporadas.
DAQ NI USB 9211 	Módulo de entrada de temperatura de la Serie C • 4 canales para termopares • Filtros anti-aliasing (filtro paso bajo para limpieza de señal antes de conversión análoga-digital). • Detección de termopares abiertos. • Compensación de unión fría. • Inmunidad a ruido. • Aislamiento de canal a tierra para seguridad.
HBM Strain gages 	High temperature and resistance – Serie Omega. • Resistencia 350 – 1000 Ω • Tolerancia: $\pm 0.3\%$ • Factor de Tolerancia: $\pm 1.5\%$ (longitud menor a 3 mm), $\pm 0.7\%$ (longitud menor o igual a 3 mm). • Temperaturas de operación entre -200 y 572 grados centígrados. • Alta resistencia a cargas alternadas.
DAQ NI USB 6009 	Dispositivo E/S Multifunción • 8 entradas analógicas (14 Bits, 48 kS/s) • 2 salidas analógicas (150 S/s) • 12 E/S Digitales • Contador de 32 bits.

El termopar que se encuentra en la parte media del reactor es el encargado del módulo de prevención de temperatura, los de la parte inferior y superior, se encargan de controlar las tres resistencias eléctricas de calentamiento que se encuentran contenidas en el reactor (se asume: dos en espiral que rodean al reactor y una en la cama o parte inferior). La última resistencia se encuentra en el filtro de gases no condensables y es determinada precisamente por el termopar allí contenido.

El control de tipo PID es operado por el PLC de Panasonic, el cual recibe la información de los termopares por medio de un módulo de temperatura FPOTC4 y así mismo envía la información a los relés de estados sólidos SSR, teniendo en cuenta un módulo de fase, por medio de los relés llega el accionamiento de señal a las resistencias eléctricas de calentamiento.

Por otra parte, están las galgas extensiométricas donde su proceso de implementación es complejo, ya que, éstas suministran un voltaje muy pequeño (mV), por tanto, se hace necesario el uso de una etapa de acondicionamiento y amplificación de señal, con el fin de producir un voltaje en un rango estándar como (0-5Vdc), para que así el PLC y la DAQ, sean capaces de adquirir la información y registrarla en pantalla.

3.3. Sistema

3.3.1. Sistema de control.

Es el sistema más complejo de la máquina, ya que, de éste dependerá la obtención final del producto que genere la máquina, es decir, entre mayor sea la robustez de este sistema, mayor será la estabilización de temperatura para que el plástico se descomponga a la temperatura precisa en la cual generará mayor hidrocarburo líquido (producto final deseado).

El sistema está dado por un control PID obtenido después de realizar la caracterización de los plásticos, obtener la planta característica con ayuda del software de simulación Matlab y por último determinar las constantes de proporcionalidad, integral y derivativa. Dicha formulación a futuro podrá ser programada mediante lenguaje Ladder en el software Control FPCWIN Pro para el PLC Panasonic de la serie FP (Unidad central usada actualmente por el Pirolizador). De esta manera el sistema de control se basa básicamente en la lectura de los termopares tipo K, por parte del controlador programado en el PLC y del cual se obtiene la señal de salida para la resistencias eléctricas de calentamiento a través de relés de estado sólido, controlando así la temperatura interna en el reactor.

3.3.2. Sistema electrónico.

Este sistema comprende toda la instrumentación requerida para el diseño del control para el reactor de pirólisis, es decir, desde los sensores de temperatura, hasta el PLC, la HMI y tarjeta de adquisición (DAQ). Y es el que permite realizar la transmisión de todas las señales necesarias para realizar el control de temperatura, la adquisición de los datos y la visualización del sistema en tiempo real por medio de la implementación del software de adquisición realizado en LabView.

3.4. Módulos

3.4.1. Módulo de Temperatura.

Se encarga de leer la temperatura y almacenarla en un ordenador, esto mediante una DAQ NI USB 9211, la cual contiene 4 entradas de termopar y donde se envía la información a un ordenador que mediante el software de LabVIEW recibe la información y la almacena en formato .xsl (Hojas de cálculo Excel).

3.4.2. Módulo de peso.

A partir de las galgas extensiométricas ubicadas en la parte inferior del reactor, éstas envían una señal que por medio de un puente wheatstone pasa de ser resistiva a estar dada por mV y con una configuración de opams es amplificada la señal siendo recibida por el PLC y configurado para obtener la relación de resistencia/peso de la materia y determinar cuando el proceso ha finalizado (Descomposición total de la materia).

3.5. Componentes simples

3.5.1. Resistencias eléctricas de calentamiento.

Instrumento que permite la quema o descomposición térmica de la materia, al inducirle un voltaje elevar su temperatura oscilando en los 500°C a una potencia máxima de 650 W.

3.5.2. Galgas extensiométricas.

Al aplicarse una fuerza externa se produce un cambio en la resistencia, al estar configuradas como puente wheatstone, es posible obtener una señal en mV, la cual puede ser amplificada con el fin de facilitar su lectura.

4. Desarrollo

El desarrollo de la pasantía se basó en la adquisición de datos con el propósito de controlar la temperatura del paralizador. Para esto se registraron los datos de 5 pruebas diferentes. Se registró el comportamiento de dos polímeros en estados y cantidades diferentes, como se presenta en la figura 27.

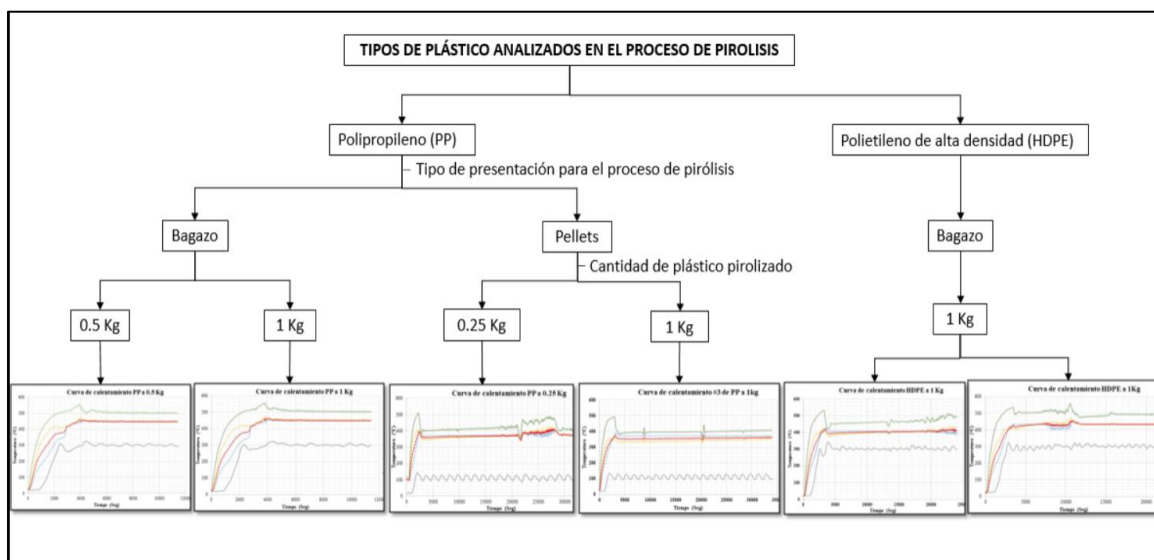


Figura 27. Esquema general del análisis en los plásticos.

4.1. Adquisición de datos

La adquisición de los datos de temperatura del proceso de pirólisis se había estado realizando de manera manual, por tanto, en esta etapa se desarrolló la implementación de la adquisición de datos por medio de una DAQ, para facilitar y agilizar la obtención de ellos, además de poder realizar las gráficas de comportamiento de forma rápida y efectiva.

4.1.1. Implementación general.

Empleando una tarjeta de adquisición de datos para módulo de temperatura, cable de termopar tipo K y el software LabVIEW; se desarrolló el sistema de adquisición de datos en donde principalmente se procedió al enlace cableado de la tarjeta de adquisición a los canales de temperatura de cada uno de los termopares conectados al módulo de temperatura del PLC, tal como se muestra en la figura 25. Los números del 1 al 4 ilustran los cables de termocupla tipo K empleados para enlazar la señal de cada sensor de temperatura a la DAQ.



Figura 28. Enlace cableado DAQ a Señales de temperatura.

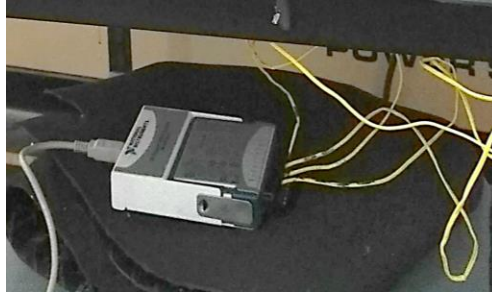


Figura 29. Conexión de señal a la DAQ.

y se finalizó con la creación de un programa en LabVIEW el cual se encargó de adquirir, mostrar mediante una interfaz gráfica y guardar en formato Excel los datos de temperatura.



Figura 30. Interfaz gráfica del programa en funcionamiento.

4.1.2. Medición de Temperatura.

4.1.2.1. Sistema de medición.

Una vez fue implementado el sistema de adquisición de datos en el pirolizador se realizaron 8 pruebas de pirólisis de las cuales una fue con el fin de, corroborar que la lectura de las temperaturas fuese correcta partiendo como referencia los datos de temperatura indicados en la HMI del pirolizador, cuatro empleando Polipropileno y 2 empleando Polietileno de Alta Densidad (HDPE). Para cada una de las pruebas se estableció el mismo tiempo de muestreo y se tomó el tiempo de inicio y fin del proceso, llevando un registro detallado de éstas, además de poder analizar la curva del comportamiento de la temperatura con respecto al tiempo de muestreo. Se denominaron y registraron los 4 puntos de temperatura:

- TT-1: Termocupla ubicada en parte interna baja del reactor
- TT-2: Termocupla ubicada en la parte interna media del reactor
- TT-3: Termocupla ubicada en el filtro quemador de gases,
- TT-4: Termocupla ubicada en la pared externa del reactor

Tabla 7. *Representación general de cada medición.*

Medición Numero	Fecha y Hora (dd/mm/aa)	Material (Peso [Kg])	Tiempo muestreo [seg]	Número total de muestras	Tiempo total de medición en [Seg]	Temperatura de referencia (Set Point [°C])
1	07/03/2018 11:15	PP (0.5 kg)	3	3807	11418	450
2	08/03/2018 10:45	PP (1 kg)	3	3794	11379	450
3	15/03/2018 12:42	HDPE (1 kg)	3	8001	24000	400
4	20/03/2018 12:32	HDPE (1 kg)	3	7211	21630	430
5	08/05/2018 10:44	PP (0.25 kg)	3	11784	35349	365
6	09/05/2018 9:45	PP (1 kg)	3	11309	33924	330 y 370

Nota: Características y resultados obtenidos en cada medición.

En cada una de las gráficas representativas de cada medición se presentan los cuatro puntos de medición de temperatura (TT-1, TT-2, TT-3, TT-4) y la temperatura promedio calculada con los puntos TT-1 y TT-2 (T. Promedio).

4.1.2.2. Medición 1: Pirólisis de polipropileno – PP.

Se realiza el proceso de pirólisis para 0.5 kg de PP, el set point se configuró en 450°C. El periodo de muestreo es de 3 segundos y se registraron en total 3807 muestras. Ver figura 31.

Observaciones:

- En el segundo 4000 la curva de temperatura TT-1 y TT-2 tienen un sobre pico máximo de aproximadamente 443°C y 466°C.
- El sobre pico de la curva de temperatura TT-4 es de 560°C, además se observa que a partir del segundo 4800 desciende la temperatura hasta estabilizarse aproximadamente en 500°C a partir de los 8000 segundos.
- El comportamiento de la temperatura en el filtro TT-3 mantiene oscilaciones en un rango entre 290°C y 325°C continuas a partir del segundo 4000.
- La temperatura promedio refleja una curva ideal para emplearla en la identificación del sistema, ya que al tener en cuenta las temperaturas baja y media del reactor maneja un margen más cercano al Setpoint.

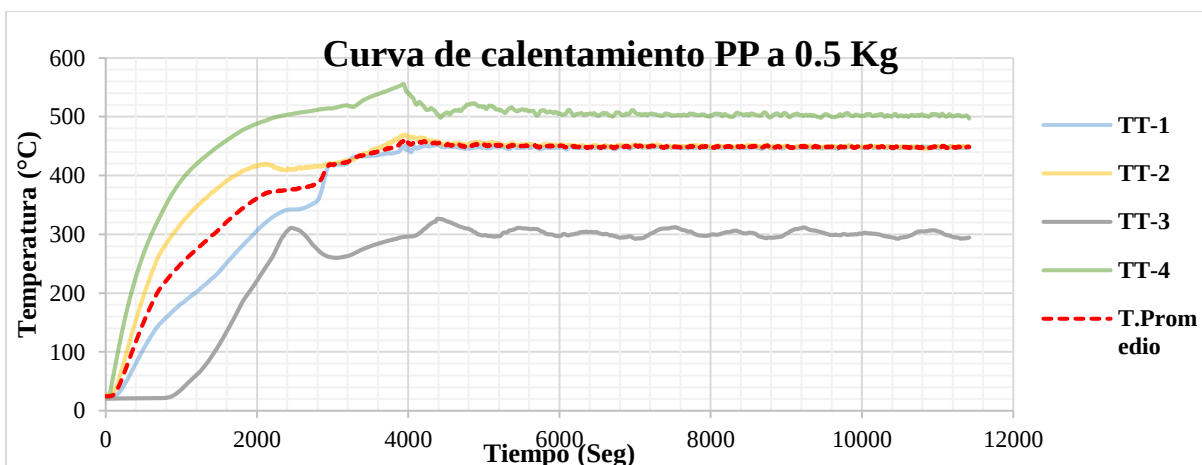


Figura 31. Curva de temperatura de pirólisis de polipropileno PP #1.

4.1.2.3. Medición 2: Pirólisis de polipropileno – PP.

Se inicia el proceso de pirólisis para 1 kg de PP, el set point se configuró en 450°C. El periodo de muestreo es de 3 segundos y se registraron en total 3794 muestras. Ver figura 32.

Observaciones:

- La curva de temperatura TT-1 y TT-2 tienen un sobre pico máximo de aproximadamente 453°C y 471°C en el mismo intervalo de tiempo (3837 segundos).
- El sobre pico de la curva de temperatura TT-4 es de 552°C, además se observa que a partir del segundo 4400 desciende la temperatura hasta estabilizarse aproximadamente en 500°C a partir de los 7600 segundos.
- El comportamiento de la temperatura en el filtro TT-3 mantiene oscilaciones en un rango entre 290°C y 325°C continuas a partir del segundo 4000.

- La temperatura promedio refleja una curva ideal para emplearla en la identificación del sistema, ya que al tener en cuenta las temperaturas baja y media del reactor maneja un margen más cercano al Setpoint.

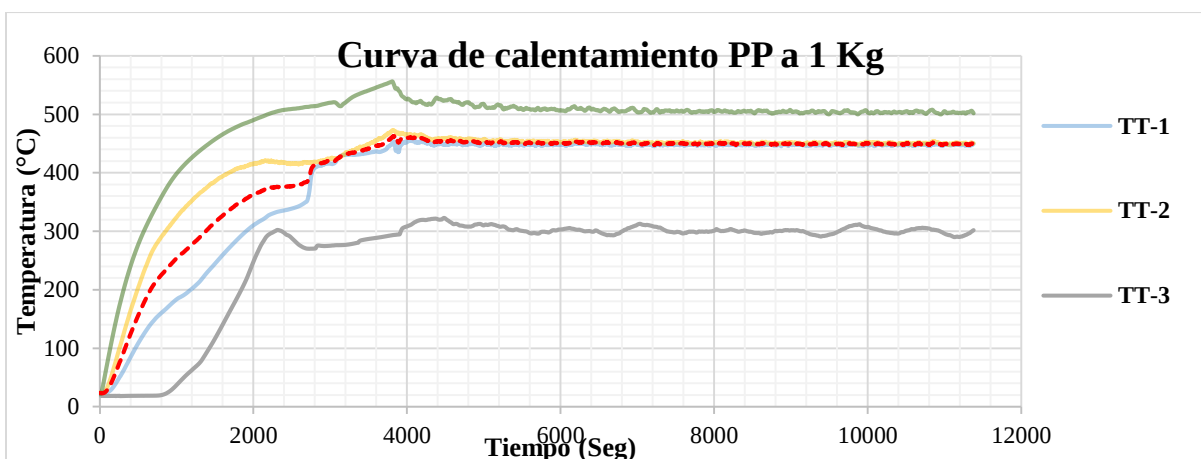


Figura 32. Curva de temperatura de pirólisis de polipropileno PP #2.

4.1.2.4. Medición 3: Pirólisis de polietileno de alta densidad – HDPE.

Se inicia el proceso de pirólisis para 1 kg de HDPE (Capacidad máxima de pirolizador) el set point se configuró en 400°C. El periodo de muestreo es de 3 segundos y se registraron en total 8001 muestras. Ver figura 33.

Observaciones:

- La curva de temperatura TT-1 y TT-2 tienen un sobre pico máximo similar de aproximadamente 430°C entre los 3345 y 3612 segundos.
- El sobre pico de la curva de temperatura TT-4 es de 527°C, además se observa que a partir del segundo 4500 se estabiliza en un promedio de 450°C por un periodo demostrando un comportamiento creciente.

- El comportamiento de la temperatura en el filtro TT-3 mantiene oscilaciones en un rango entre 288°C y 324°C continuas a partir del segundo 5000.
- La temperatura promedio refleja una curva ideal para emplearla en la identificación del sistema, ya que al tener en cuenta las temperaturas baja y media del reactor maneja un margen más cercano al Setpoint.

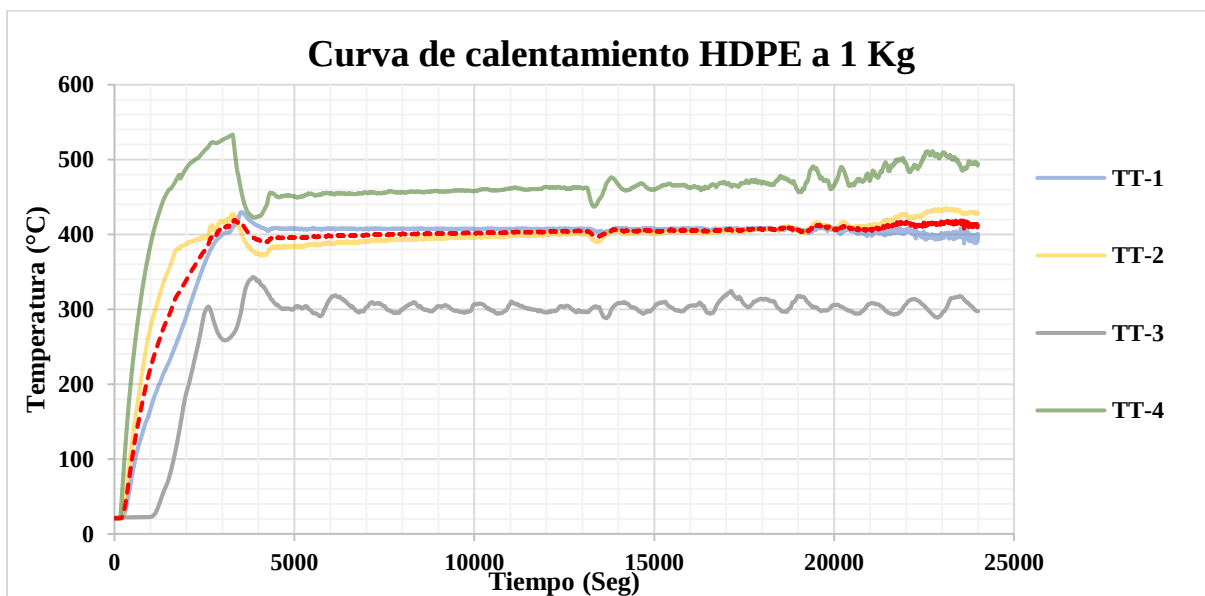


Figura 33. Curva de temperatura de pirólisis de polietileno de alta densidad HDPE #1.

4.1.2.5. Medición 4: Pirólisis de polietileno de alta densidad – HDPE.

Se inicia el proceso de pirólisis para 1 kg de HDPE (Capacidad máxima de pirolizador) el set point se configuró en 430°C. El periodo de muestreo es de 3 segundos y se registraron en total 7211 muestras. Ver figura 34.

Observaciones:

- La curva de temperatura TT-1 y TT-2 tienen un sobre pico máximo similar de aproximadamente 430°C entre los 3345 y 3612 segundos.
- El sobre pico de la curva de temperatura TT-4 es de 527°C, además se observa que a partir del segundo 4500 se estabiliza en un promedio de 450°C por un periodo demostrando un comportamiento creciente.
- El comportamiento de la temperatura en el filtro TT-3 mantiene oscilaciones en un rango entre 288°C y 324°C continuas a partir del segundo 5000.
- La temperatura promedio refleja una curva ideal para emplearla en la identificación del sistema, ya que al tener en cuenta las temperaturas baja y media del reactor maneja un margen más cercano al Setpoint.

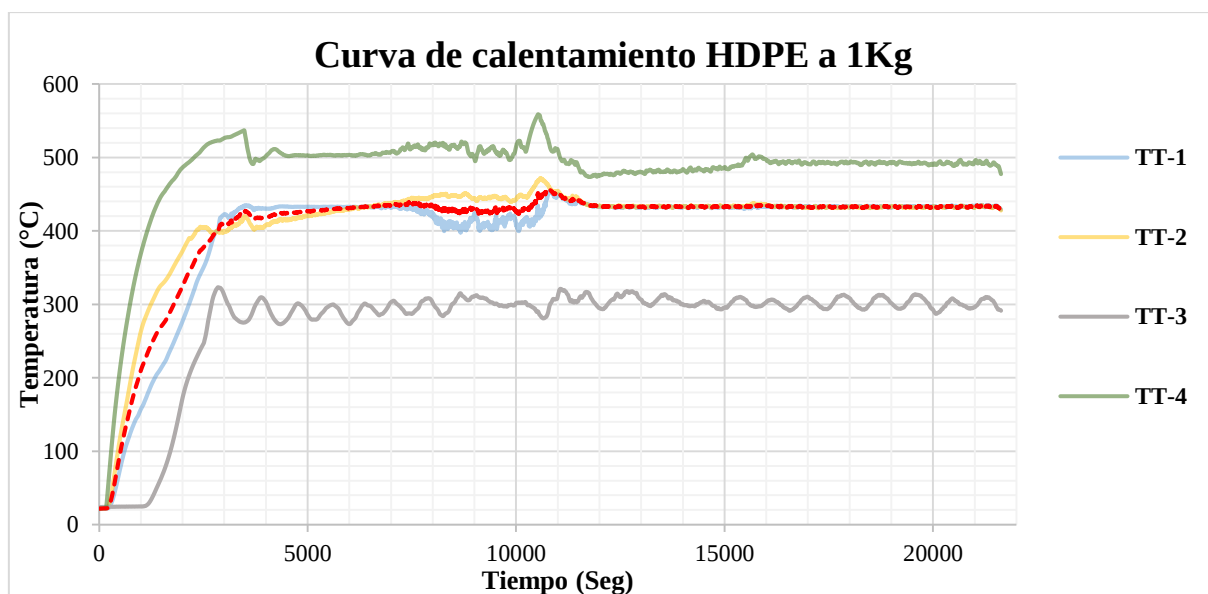


Figura 34. Curva de temperatura de pirolisis de polietileno de alta densidad HDPE #2.

4.1.2.6. Medición 5: Pirólisis de polipropileno – PP.

Se inicia el proceso de pirólisis para 1 kg de PP, el set point se configuró en 330°C para TT-2 y 370°C para TT-1. El periodo de muestreo es de 3 segundos y se registraron en total 11309 muestras. Ver figura 35.

Observaciones:

- La curva de temperatura TT-1, TT-2 se comportan de manera ideal ilustrando un error mínimo, la única diferencia es la temperatura a la cual se estabilizan.
- El sobre pico de la curva de temperatura TT-4 es de 490°C, pero transcurridos aproximadamente 4000 segundos se estabiliza en un rango de 400 °C.
- El comportamiento de la temperatura en el filtro TT-3 mantiene oscilaciones continuas en un rango de $\pm 20^{\circ}\text{C}$ al margen de los 100°C a partir de los 1500 segundos hasta el final del proceso.
- Observando el comportamiento de ambos plásticos, por medio de las gráficas se puede notar que la velocidad de descomposición para el PP, HDPE es independiente de la masa suministrada al reactor. Esto debido a que la razón de incremento de la temperatura es constante en ambos procesos.

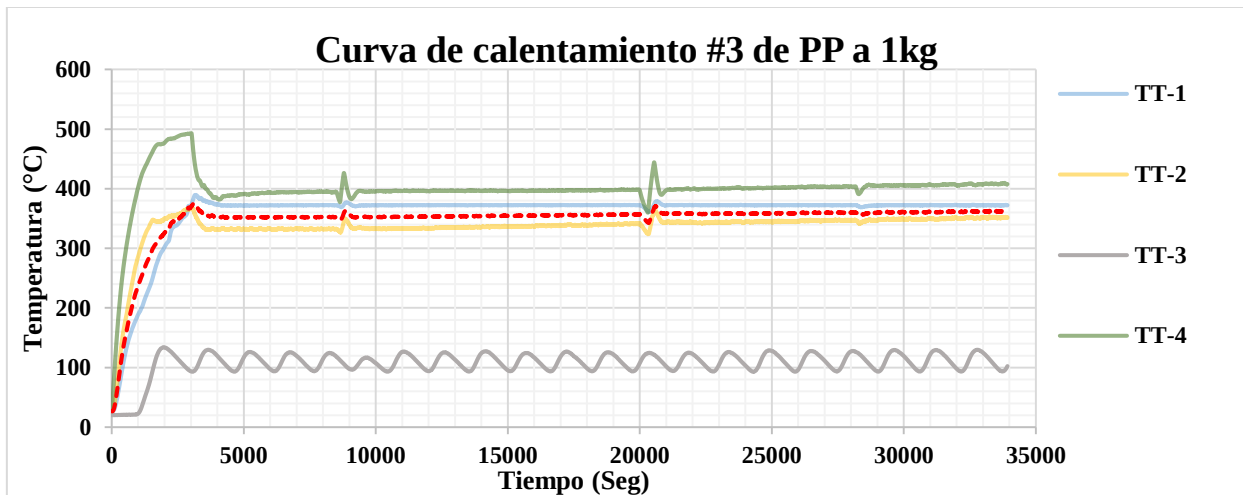


Figura 35. Curva de temperatura de pirolisis de polipropileno PP #3.

4.2. Identificación del sistema

4.2.1. Aplicación para la medición #2 (PP tapas).

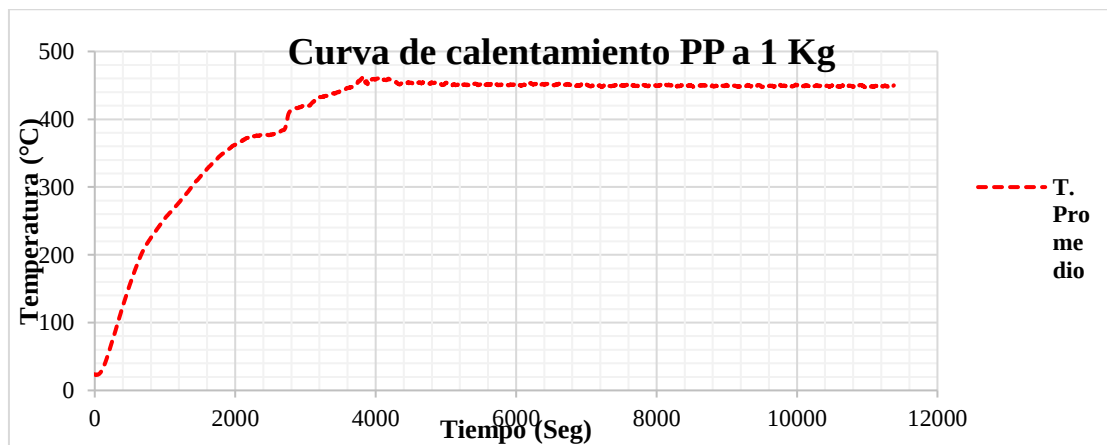


Figura 36. Curva de reacción del proceso de la medición 2.

4.2.1.1. Método 0. Método de 2 puntos general para identificación de sistemas sobrearmortiguados de primer y segundo orden

En el caso de requerirse un modelo de primer orden más tiempo muerto, se recomienda utilizar el método de Ho y otro de los métodos de dos puntos, como el de Alfaro ó el de Chen y Yang. En el caso de requerirse modelos de segundo orden, se recomienda utilizar el método de Ho y el de Stark [8].

A partir de las recomendaciones, se determinaron las constantes de tiempo (τ) y tiempo muerto (tm) empleando las constantes de identificación propuestas por *Alfaro y Ho et al*, expresadas en la tabla 1 para modelos de primer orden más tiempo muerto y en la tabla 2 para modelos de segundo orden más tiempo muerto.

4.2.1.1.1. Modelo de primer orden más tiempo muerto.

Método Alfaro

$$\begin{aligned} a &= -0.910 & b &= 0.910 & c &= 1.262 & d &= -0.262 \\ \%P1 &= 25.0 & \%P2 &= 75.0 \\ t1(25\%) &= 366 \text{ seg} & t2(75\%) &= 1698 \text{ seg} \end{aligned}$$

Los valores de $t1$ y $t2$ se obtienen al evaluar el tiempo obtenido en los valores porcentuales $P1$ y $P2$ del cambio ante la reacción de la curva.

Al reemplazar las constantes en las ecuaciones 3 y 4 obtenemos el valor para la contante de tiempo y el tiempo muerto.

$$\tau = (-0.910)(366) + (0.910)(1698) = 1212.12 \text{ seg}$$

$$tm = (1.262)(366) + (-0.262)(1698) = 17.016 \text{ seg}$$

Teniendo las constantes de los tiempos, y tomando el valor de la ganancia $K_p = 1$, se evalúa en la ecuación 1 obteniendo con valores aproximados:

$$Gp(s) = \frac{(1)e^{-17s}}{1212s + 1}$$

Método Ho et al

$$a = -0.670 \quad b = 0.670 \quad c = 1.300 \quad d = -0.290$$

$$\%P1 = 35.0 \quad \%P2 = 85.0$$

$$t1(35\%) = 504 \text{ seg} \quad t2(85\%) = 2646 \text{ seg}$$

Los valores de $t1$ y $t2$ se obtienen al evaluar el tiempo obtenido en los valores porcentuales $P1$ y $P2$ del cambio ante la reacción de la curva.

Al reemplazar las constantes en las ecuaciones 3 y 4 obtenemos el valor para la constante de tiempo y el tiempo muerto.

$$\tau = (-0.670)(504) + (0.670)(2646) = 1435.14 \text{ seg}$$

$$tm = (1.300)(504) + (-0.290)(2646) = -112.14 \text{ seg}$$

Teniendo las constantes de los tiempos, y tomando el valor de la ganancia (K_p) como 1, se evalúa en la ecuación 1 obteniendo con valores aproximados:

$$Gp(s) = \frac{(1)e^{112s}}{1435s + 1}$$

4.2.1.1.2. Modelo de segundo orden con polo doble.

Método Ho et al

$$a = -0.463 \quad b = 0.463 \quad c = 1.574 \quad d = -0.574$$

$$\%P1 = 35.0 \quad \%P2 = 85.0$$

$$t1(35\%) = 504 \text{ seg} \quad t2(85\%) = 2646 \text{ seg}$$

Los valores de $t1$ y $t2$ se obtienen al evaluar el tiempo obtenido en los valores porcentuales $P1$ y $P2$. del cambio ante la reacción de la curva

Al reemplazar las constantes en las ecuaciones 3 y 4 obtenemos el valor para la constante de tiempo y el tiempo muerto.

$$\tau = (-0.463)(504) + (0.463)(2646) = 991.75 \text{ seg}$$

$$tm = (1.574)(504) + (-0.574)(2646) = -725.51 \text{ seg}$$

Teniendo las constantes de los tiempos, y tomando el valor de la ganancia (Kp) como 1, se evalúa en la ecuación 1 obteniendo con valores aproximados:

$$Gp(s) = \frac{(1)e^{725.5s}}{(992s + 1)^2}$$

4.2.1.2. Resultados Método 0.

Tabla 8. Resultados generales en aplicación a modelos de primer y segundo orden.

Modelo	Métodos constantes	t1	t2	τ	tm	Planta (FT)	Implementación	Grafica
Primer orden más tiempo muerto	Alfaro	366	1698	1212.12	17.016	$\frac{e^{-17s}}{1212s + 1}$	Si	8
	Ho et al	504	2646	1435.14	-112.14	$\frac{e^{112s}}{1435s + 1}$	No. Debido a que no cumple con $tm \geq 0$	x
	Ho et al	504	2646	991.75	-725.51	$\frac{e^{725.5s}}{(992s + 1)^2}$	No. Debido a que no cumple con $tm \geq 0$	x
Segundo orden con polo doble								

Nota: Características y resultados obtenidos de la aplicación a modelos de primer y segundo orden.

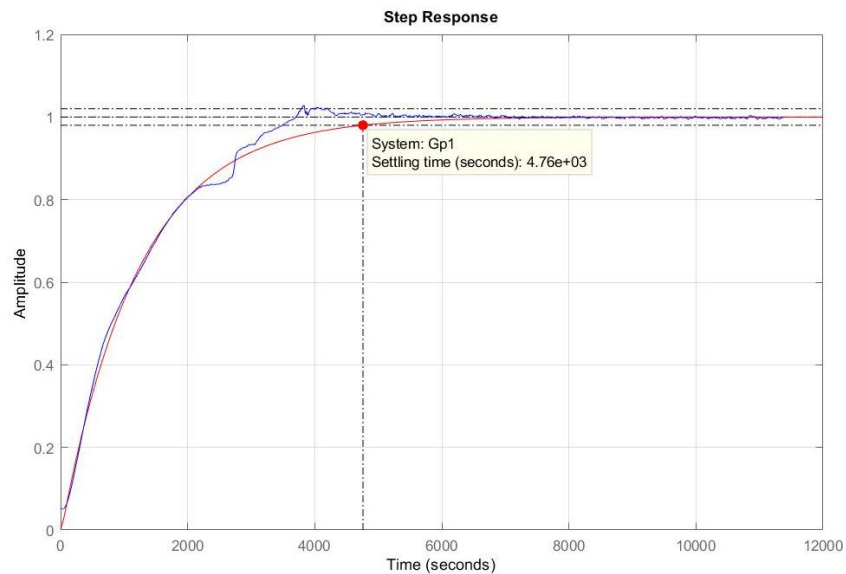


Figura 37. Respuesta del sistema de primer orden más tiempo muerto.

Observaciones

- En la aplicación del método de dos puntos general para modelos de primer y segundo grado, se obtuvo que, de los tres métodos de constantes aplicadas solo una representa resultados correctos para el análisis, implementado el método Alfaro, tal como se muestra en la tabla anterior.
- La aplicación del método de constante Ho et al tanto para el sistema de primer orden como el de segundo orden con polo doble, no genera resultados fiables, ya que en ambos casos se obtiene un tiempo muerto menor a cero, lo cual es inconcluso por su inexistencia, por lo cual no se puede generar una respuesta gráfica.

- De la figura 37 se puede observar que la única característica similar del modelo de primer orden a la curva de reacción es el tiempo de establecimiento, ya que el método de dos puntos general al ser aplicado solo para sistemas sobreamortiguados no se puede representar el sobre pico que tiene el sistema real, por lo tanto, se descarta la aplicación el Método 0 para las otras mediciones.

4.2.1.3. *Método 1. Método de Smith para la identificación de sistemas de segundo orden subamortiguados.*

Los valores de t_1 y t_2 se obtienen al evaluar el tiempo obtenido en los valores porcentuales P1 y P2 (20% y 60% establecidos por la gráfica de Smith) ante la reacción de la curva. Al tener estas constantes de tiempo y haciendo uso de la gráfica de Smith, ilustrada en la figura 7, se obtienen los valores para ω_n y ξ .

$$\%P1= 20\% \quad \%P2= 60$$

$$t_1(20\%) = 300 \text{ seg} \quad t_2(60\%) = 1140 \text{ seg}$$

$$\frac{t_{20}}{t_{60}} = \frac{300}{1140} \approx 0.26$$

$$\frac{t_{60}}{\tau} = \omega_n t_{60}$$

$$\omega_n t_{60} \approx 8$$

$$\omega_n = \frac{8}{1140} \approx 7.02 \times 10^{-3}$$

$$\xi \approx 0.8$$

Asumiendo un valor de $K=1$ y reemplazando los valores determinados en la ecuación 6, obtenemos que:

$$G_p(s) = \frac{4.93 \times 10^{-5}}{s^2 + 11.232 \times 10^{-3}s + 4.93 \times 10^{-5}}$$

4.2.1.4. Resultados Método 1.

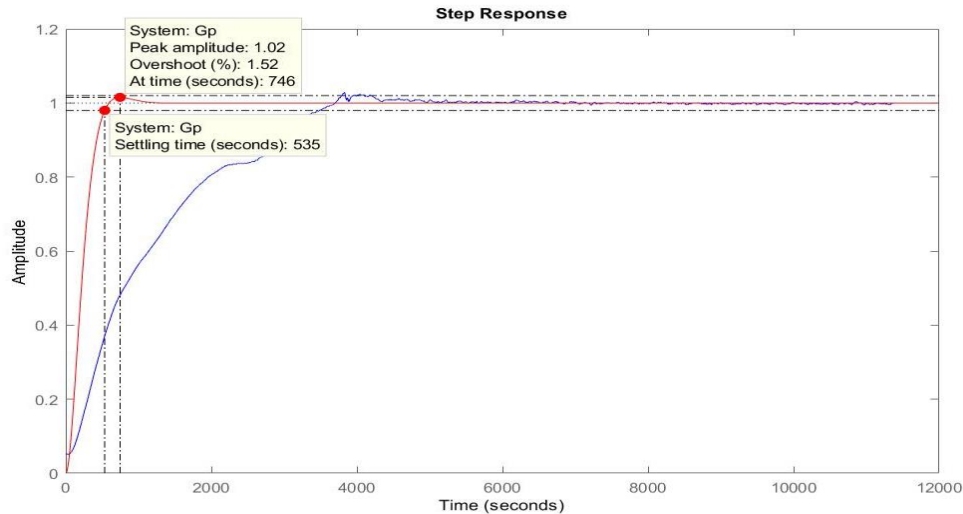


Figura 38. Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.

Observaciones

- De la figura 38 se puede observar que a diferencia del método 0, del modelo de segundo orden se pueden determinar características como el tiempo de establecimiento y el valor sobre pico, debido a que el método Smith se puede implementar para sistemas subamortiguados o sobreamortiguados, de manera que se puede tener en cuenta el sobre pico presentado en el sistema real.
- Los tiempos en los que se establece el sistema y se llega al sobre pico del modelo de segundo orden subamortiguado, son muy pequeños en comparación a los valores estimados en la gráfica del sistema real, de modo que el modelo de segundo orden hallado por este método no se aproxima en nada al sistema real.

4.2.1.5. Método 2. Análisis gráfico.

Teniendo en cuenta la representación de los sistemas de segundo orden subamortiguado expresada en la ecuación 6, y las siguientes fórmulas (ecuaciones).

$$\%OS = \frac{T_{max} - V_{final}}{V_{final} - T_{min}} * 100 \quad \text{Porcentaje de overshoot}$$

$$OS = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \quad \text{Valor sobre pico (overshoot)}$$

$$ts_{2\%} = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad \text{Tiempo de establecimiento al 2\%}$$

$$ts_{5\%} = \frac{3}{\xi\omega_n} \quad \text{Tiempo de establecimiento al 5\%}$$

$$\xi = -\frac{\ln(OS)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(OS)^2}} \quad \text{Factor de amortiguamiento}$$

$$\omega_n = \frac{4}{\xi ts_{2\%}} \quad \text{Frecuencia natural}$$

para la determinación de las características que componen los sistemas de segundo orden; se puede realizar un análisis gráfico al comportamiento de la curva de reacción del plástico, con el fin de obtener una función de transferencia aproximada al comportamiento del sistema real.

Hallando el valor sobre pico

Los valores se extraen de los datos adquiridos

$T_{max} = 462.7587 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_{min} = 22.9387 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Valor final = 450°C

$$\%OS = \frac{462.7587 - 450}{450 - 22.9387} * 100 \approx 3\%$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 2%

Se determina el valor de la temperatura para adicionar o quitar con respecto al valor final para conocer el rango de temperatura en el cual se encuentra la estabilidad a una tolerancia del 2%.

$$T_{ref} = OS(V_{final} - T_{min}) = 0.01(450 - 22.9387) \approx 4.27^{\circ}\text{C}$$

$$V_{ref} = V_{final} \pm T_{ref}$$

El tiempo de establecimiento es el tiempo en el cual la curva alcanza el menor valor de referencia (V_{ref}).

$$V_{ref_{min}} = 450 - 4.27 = 445.73^{\circ}\text{C}$$

$$V_{ref_{max}} = 454.27^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{2\%} = 4299 \text{ seg}$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 5%

Se determina el valor de la temperatura para adicionar o quitar con respecto al valor final para conocer el rango de temperatura en el cual se encuentra la estabilidad a una tolerancia del 5%.

$$T_{ref} = OS(V_{final} - T_{min}) = 0.025(450 - 22.9387) \approx 10.68^{\circ}\text{C}$$

$$V_{ref_{min}} = 450 - 10.68 = 439.32^{\circ}\text{C}$$

$$V_{ref_{max}} = 460.32^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{5\%} = 4050 \text{ seg}$$

Hallando el factor de amortiguamiento

$$\xi = -\frac{\ln(0.03)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.03)^2}}$$

$$\xi \approx 0.745$$

Hallando la frecuencia natural

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_{s2\%}} = \frac{4}{(0.745)(4299)} \approx 1.25 \times 10^{-3}$$

Con todos los valores obtenidos se reemplazan en los sistemas de segundo orden subamortiguado y segundo orden subamortiguado más tiempo muerto.

$$G_p(s) = \frac{1.56 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.86 \times 10^{-3}s + 1.56 \times 10^{-6}} \quad \text{Segundo orden}$$

$$G_p(s) = \frac{1.56 \times 10^{-6} * e^{-57s}}{s^2 + 1.86 \times 10^{-3}s + 1.56 \times 10^{-6}} \quad \text{Segundo orden mas tiempo muerto}$$

4.2.1.6. Resultados Método 2.

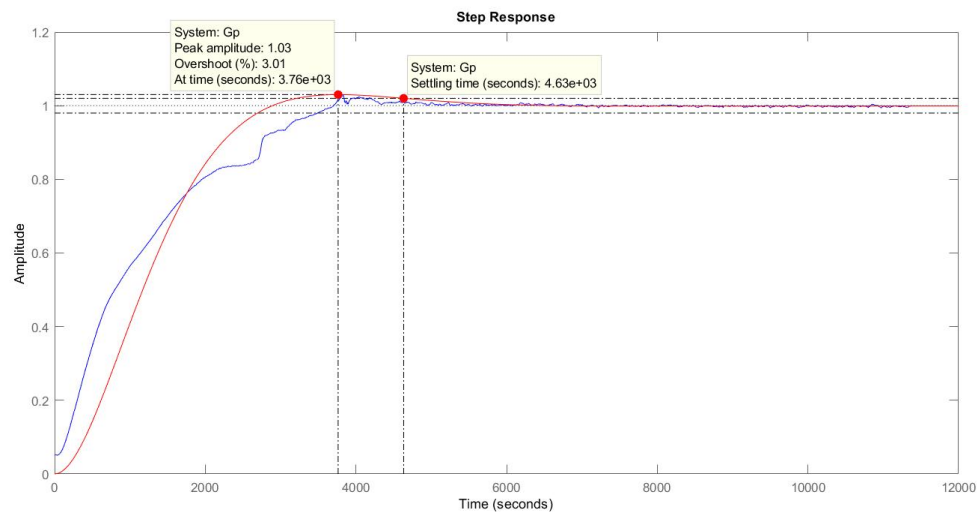


Figura 39. Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.

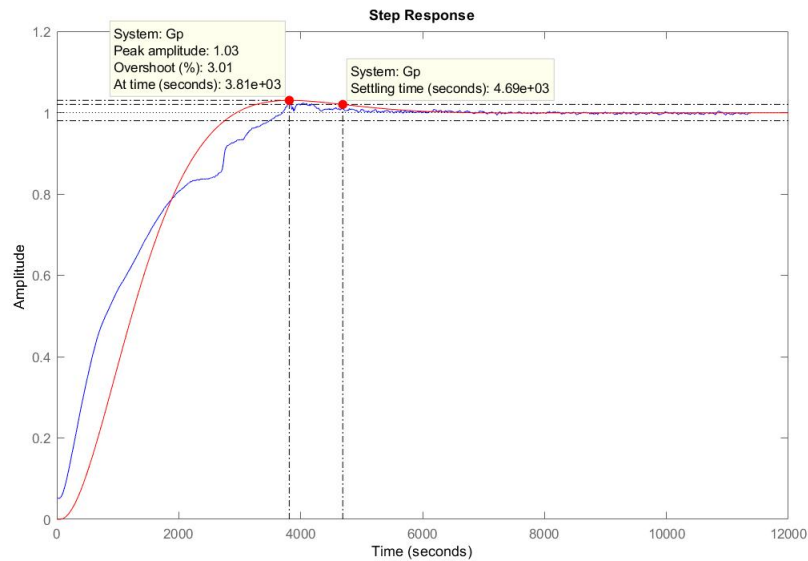


Figura 40. Sistema de segundo orden subamortiguado más tiempo muerto por análisis gráfico.

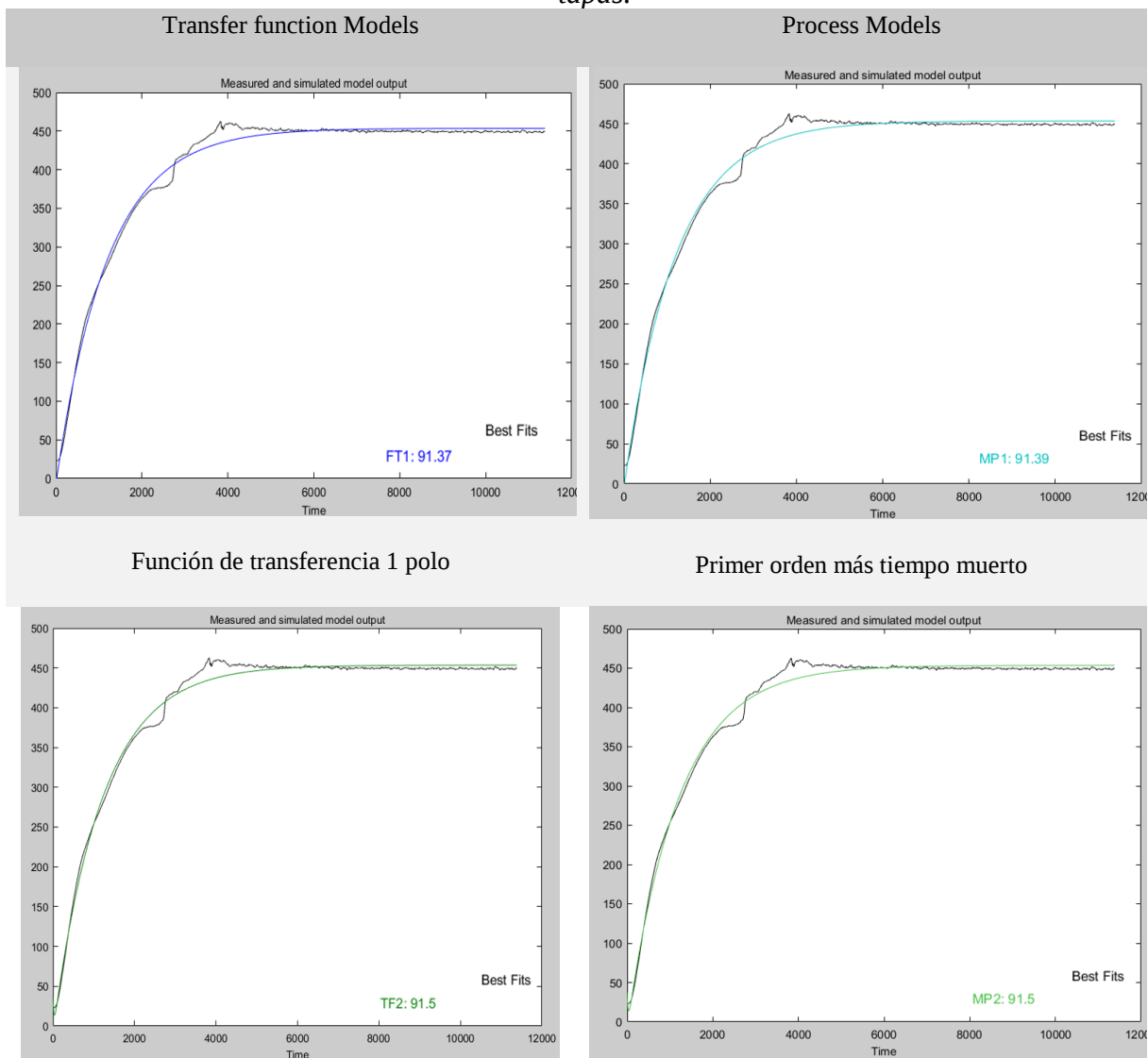
Observaciones

- De la figura 40 se puede observar que el comportamiento del sistema de segundo orden es subamortiguado, al mismo tiempo las características obtenidas se acercan a las determinadas por medio analítico y gráfico tal como se observa en el porcentaje de sobre pico (Overshoot) y el tiempo a la cual tiende a estabilizarse el sistema (t_s), sin embargo, los datos de temperatura en el estado transitorio, en el rango de 0 a 4700 segundos del modelo de segundo orden, se encuentran muy alejados con respecto a las temperaturas del sistema real.
- De la figura 40 se observa que el comportamiento del sistema es similar al expuesto en la figura 39 manteniendo el mismo valor del sobre pico, pero aumentando el valor en los tiempos, debido a que en el sistema de segundo orden se tuvo en cuenta el tiempo muerto, tiempo en el que se demora en romper la inercia térmica en la curva de reacción.

4.2.1.7. Método 3. Empleando ToolBox de MATLAB System Identification.

Para el correcto uso de la herramienta *SystemIdentification* se debe tener en cuenta los datos necesarios obtenidos del proceso, como la curva de reacción y sus parámetros de entrada; en el apéndice B se enuncia por pasos el uso básico de la herramienta para obtener una planta que identifique el proceso independientemente del modelo empleado.

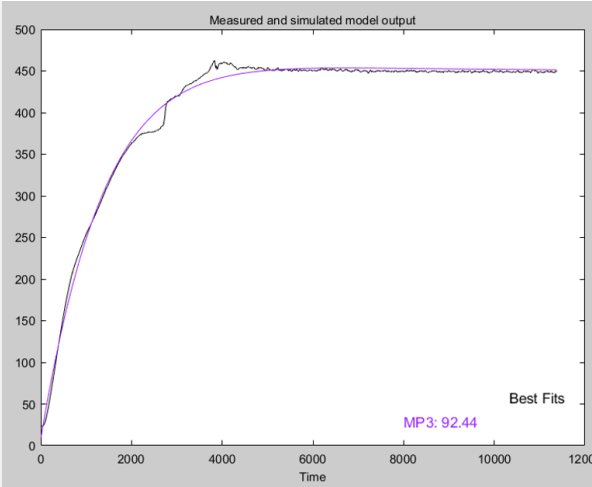
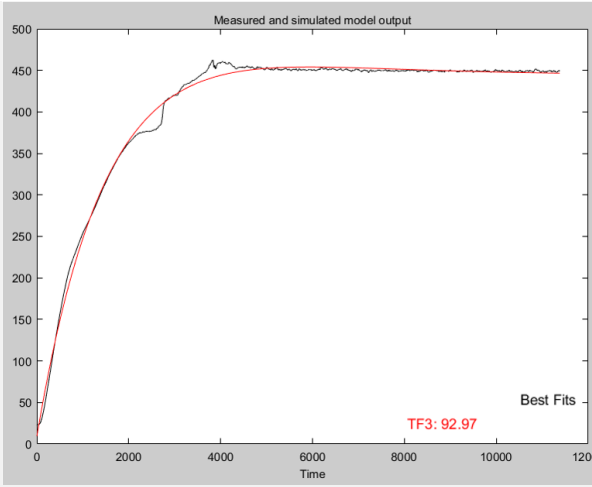
Tabla 9. Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para PP en tapas.



Función de transferencia 2 polos

Segundo orden más tiempo muerto

Tabla 9. (Continuación).



Función de transferencia 1 cero y 2 polos

Tercer orden más tiempo muerto

4.2.1.8. Resultados Método 3.

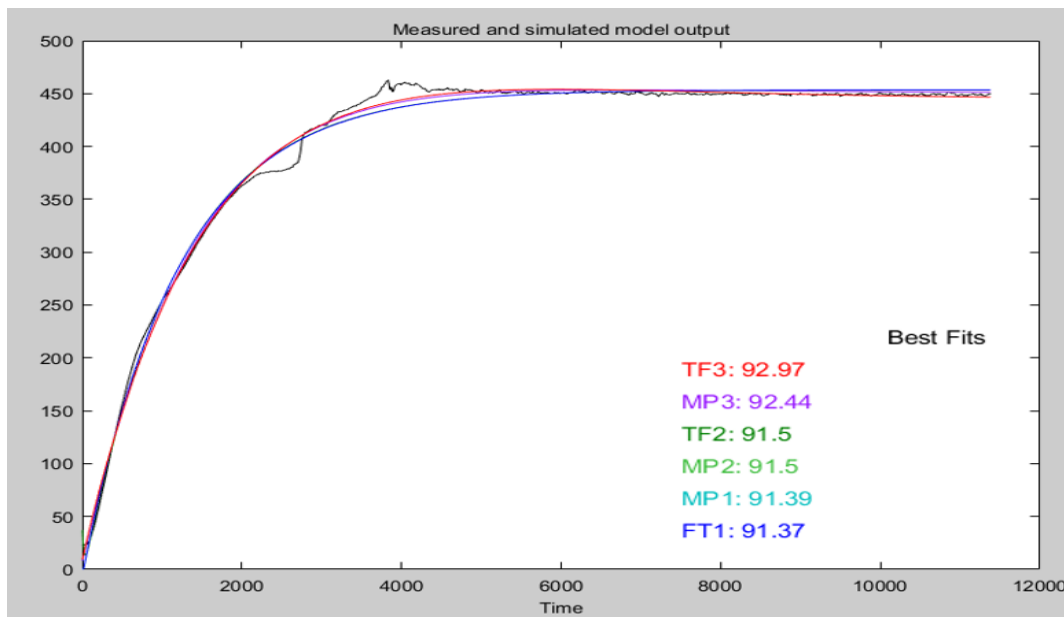


Figura 41. Comparación funciones de transferencias de la planta polipropileno.

Observaciones

- La figura 41 ilustra de manera general que todos los modelos denotan una buena aproximación al sistema real por encima del 91%, sin embargo, el sistema con mayor aproximación a la curva de reacción del proceso es la función de transferencia **TF3** conformada por 2 polos y 1 cero, manteniendo un sistema de segundo grado.
- La tabla 9 ilustra de manera individual cada uno de los modelos determinados por el método 3, de modo que se puede comparar uno a uno, evidenciando que, de los 6 modelos las funciones TF3 y MP3 son las que mejor representan al sistema real, sin embargo, TF3 denota ser la más apropiada no solo por su porcentaje de aproximación

del 92.97%, sino también porque se mantiene un sistema no tan complejo de segundo orden.

4.2.2. Aplicación para la medición #3 (HDPE virutas).

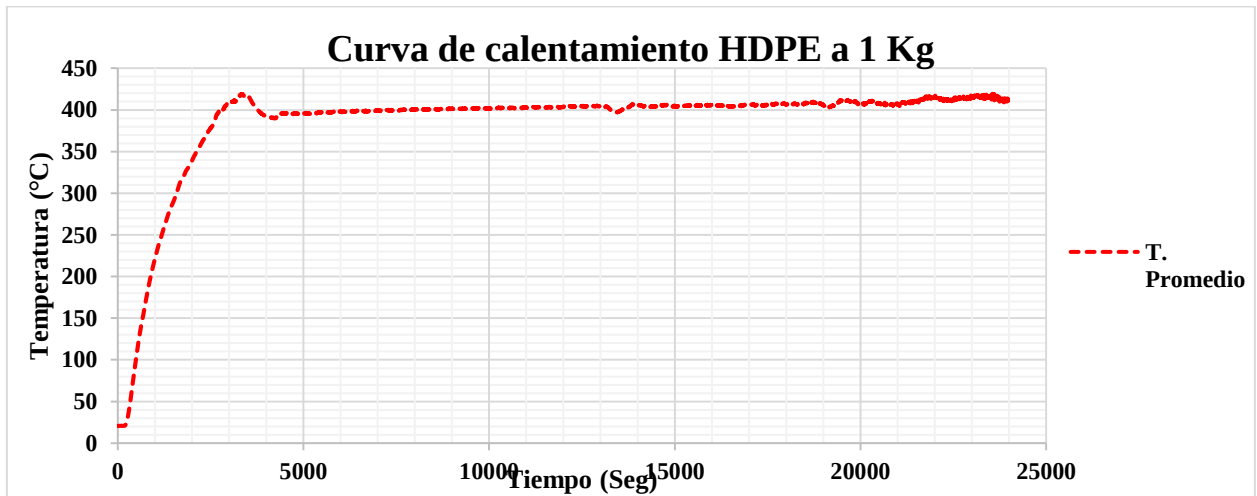


Figura 42. Curva de reacción del proceso de la medición #3.

4.2.2.1. Método 1. Método de Smith para la identificación de sistemas de segundo orden subamortiguados.

$$\%P1 = 20$$

$$\%P2 = 60$$

$$t1(20\%) = 429 \text{ seg}$$

$$t2(60\%) = 1116 \text{ seg}$$

$$\frac{t_{20}}{t_{60}} = \frac{429}{1116} \approx 0.38$$

$$\frac{t_{60}}{\tau} = \omega_n t_{60}$$

$$\omega_n t_{60} \approx 2.6$$

$$\omega_n = \frac{2.6}{1116} \approx 2.33 \times 10^{-3}$$

$$\xi \approx 0.26$$

Asumiendo un valor de $K=1$ y reemplazando los valores determinados en la ecuación 6, obtenemos que:

$$G_p(s) = \frac{5.43 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.21 \times 10^{-3}s + 5.43 \times 10^{-6}}$$

4.2.2.2. Resultados Método 1.

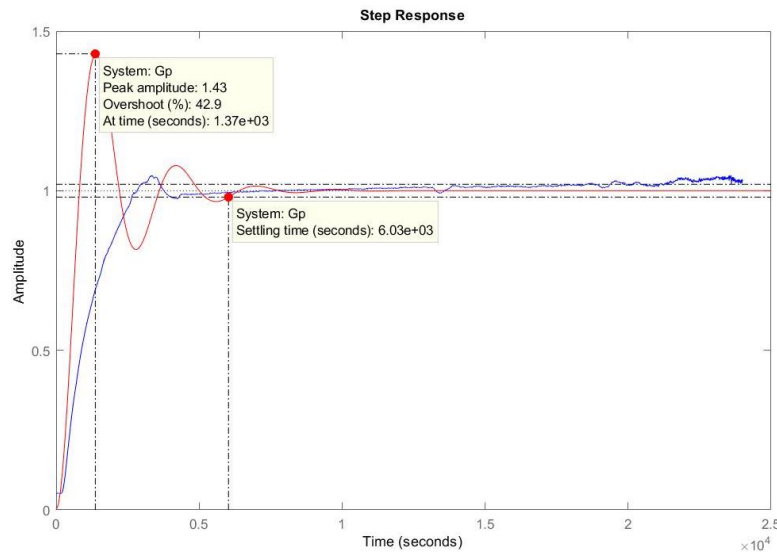


Figura 43. Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.

Observaciones

- De la figura 43 se puede observar que el modelo de segundo orden tiene un comportamiento subamortiguado con un factor de amortiguamiento cercano a 0, lo que explica los sobre picos en la curva.
- Debido al comportamiento del modelo de segundo grado obtenido por este método, no existe una aproximación con respecto al sistema real, los sobre picos y los valores de tiempo están lejos del comportamiento real, tal como se aprecia en la figura 43.

4.2.2.3. Método 2. Análisis gráfico.

Los valores se extraen de los datos adquiridos: $T_{\max} = 419.3175\text{ }^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = 20.644\text{ }^{\circ}\text{C}$; Valor final = 400°C

$$\%OS = \frac{462.7587 - 400}{400 - 20.644} * 100$$

$$\%OS \approx 5\%$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 2%

$$T_{\text{ref}} = 0.01(400 - 20.644) \approx 3.8^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\min}} = 396.2^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\max}} = 403.8^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{2\%} = 5298\text{ seg}$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 5%

$$T_{\text{ref}} = 0.025(400 - 20.644) \approx 9.48^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\min}} = 390.52^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\max}} = 409.48^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{5\%} = 4269\text{ seg}$$

Hallando el factor de amortiguamiento

$$\xi = -\frac{\ln(0.05)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.05)^2}}$$

$$\xi \approx 0.69$$

Hallando la frecuencia natural

$$\omega_n = \frac{4}{(0.69)(5298)}$$

$$\omega_n \approx 1.09 \times 10^{-3}$$

Reemplazando valores en el modelo de segundo grado

$$G_p(s) = \frac{1.19 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.5042 \times 10^{-3}s + 1.19 \times 10^{-6}} \quad \text{Segundo orden}$$

4.2.2.4. Resultados Método 2.

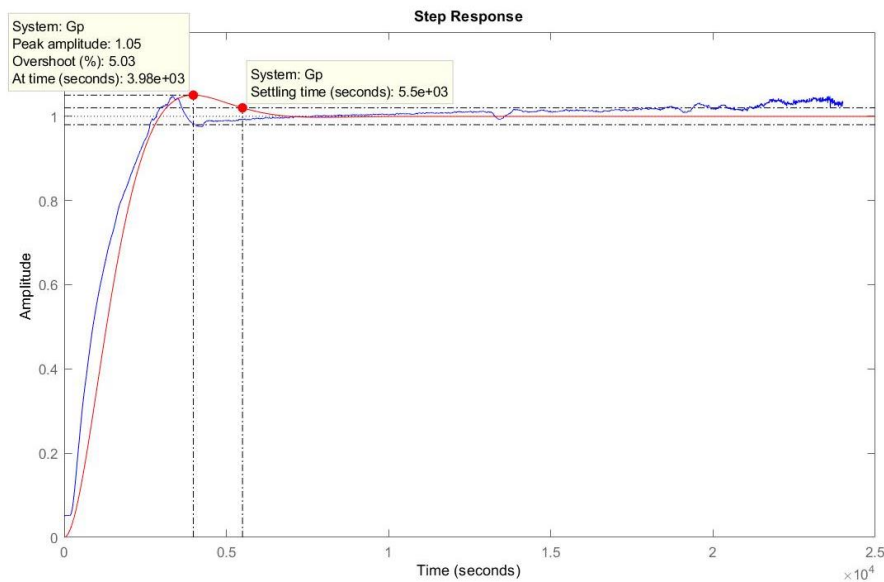


Figura 44. Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.

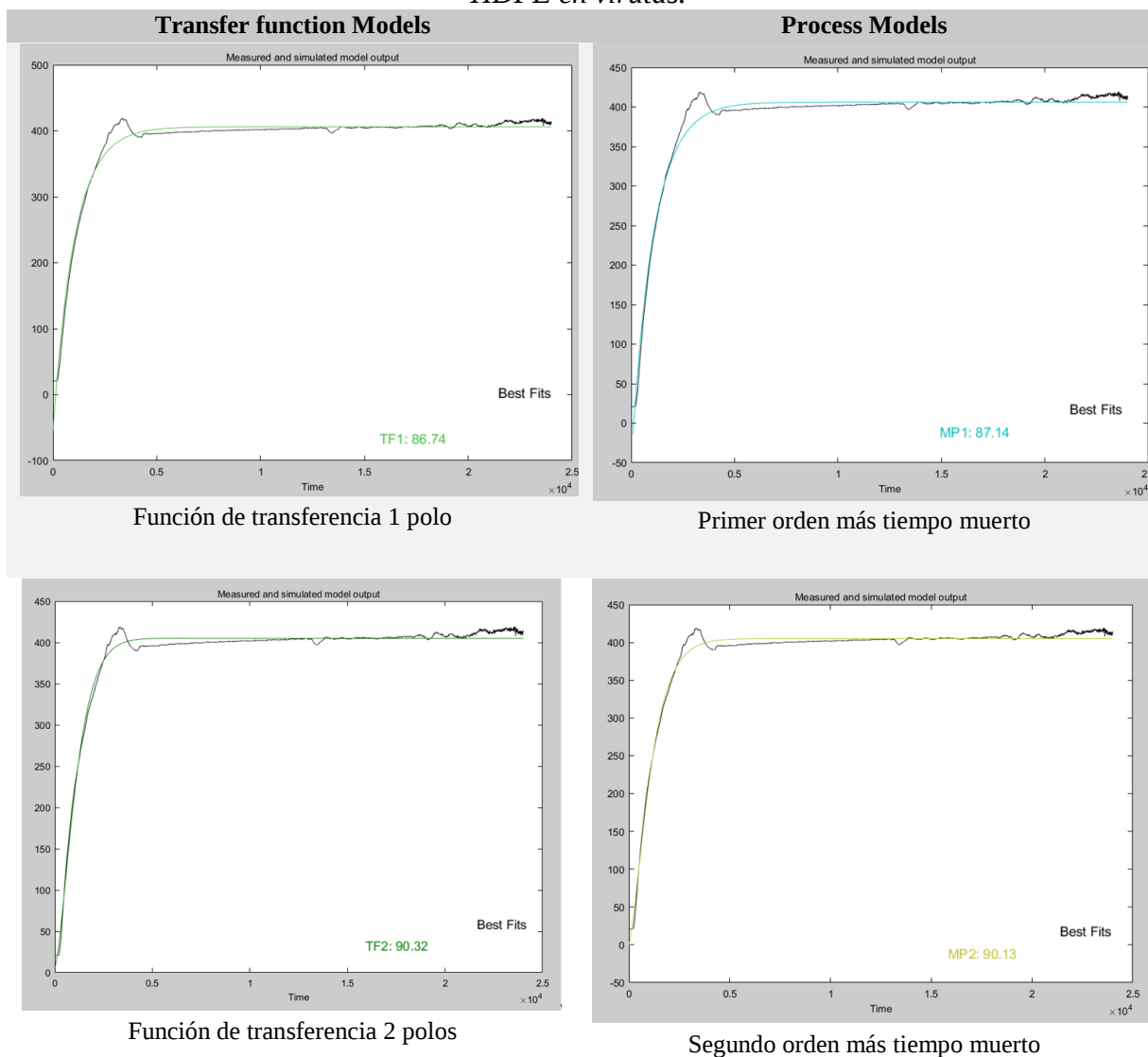
Observaciones

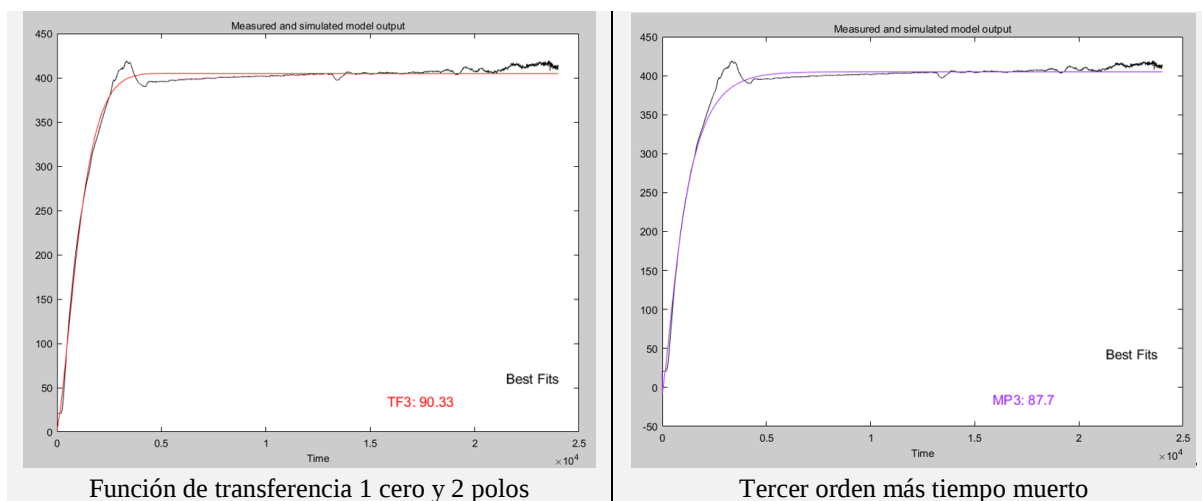
- De la figura 44 se puede observar que el comportamiento del sistema de segundo orden es subamortiguado, al mismo tiempo las características obtenidas se acercan a las determinadas por medio analítico y gráfico tal como se observa en el porcentaje de sobre pico (Overshoot) y el tiempo a la cual tiende a estabilizarse el sistema (ts). De modo que el modelo obtenido por este método podría presentar una posibilidad de representar el

sistema real, sin embargo, los datos de temperatura en el estado transitorio, en los rangos de 0 a 2600 y 3000 a 6000 segundos del modelo de segundo orden, se encuentran muy alejados con respecto a las temperaturas del sistema real.

4.2.2.5. Método 3. Empleando ToolBox de MATLAB System Identification.

Tabla 10. Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para HDPE en virutas.





4.2.2.6. Resultados Método 3.

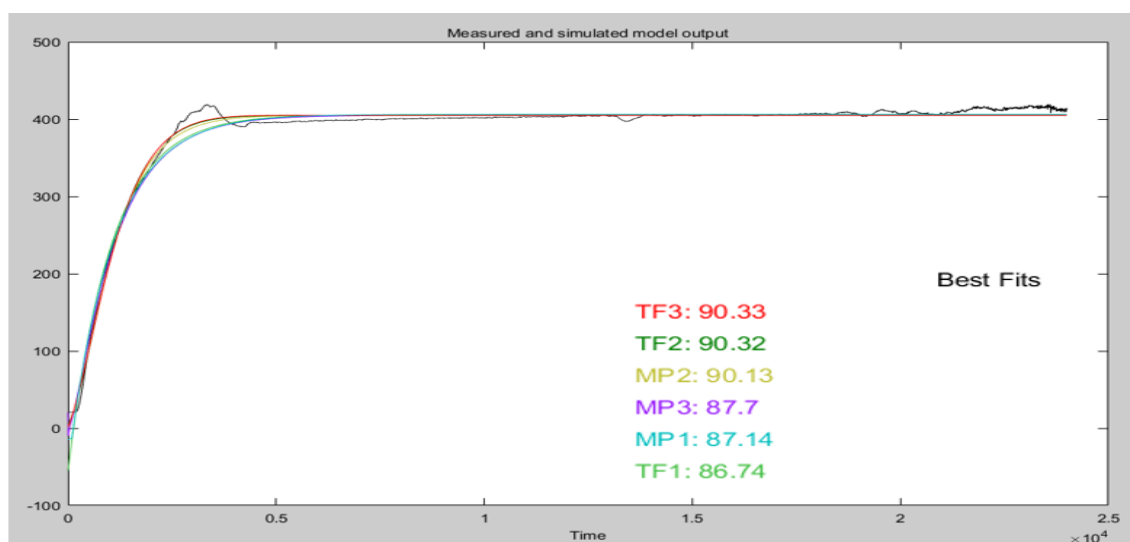


Figura 45. Comparación funciones de transferencias de la planta Polipropileno.

Observaciones

- La figura 45 ilustra de manera general que todos los modelos denotan una buena aproximación al sistema real por encima del 86%, sin embargo, el sistema con mayor aproximación a la curva de reacción del proceso es la función de transferencia **TF3** conformada por 2 polos y 1 cero.

- La tabla 10 ilustra de manera individual cada uno de los modelos determinados por el método 3, de modo que se puede comparar uno a uno, evidenciando que, de los 6 modelos las funciones TF3, TF2 y MP2 son las que mejor representan al sistema real con una aproximación por encima del 90%, sin embargo, de estas 3 funciones la diferencia de TF2 con respecto a TF3, no es muy significativa, por tanto, se podría considerar utilizar la función de TF2, por ser más sencilla y brindar un resultado aceptable para la representación del sistema real.

4.2.3. Aplicación para la medición #5 (PP escamas).

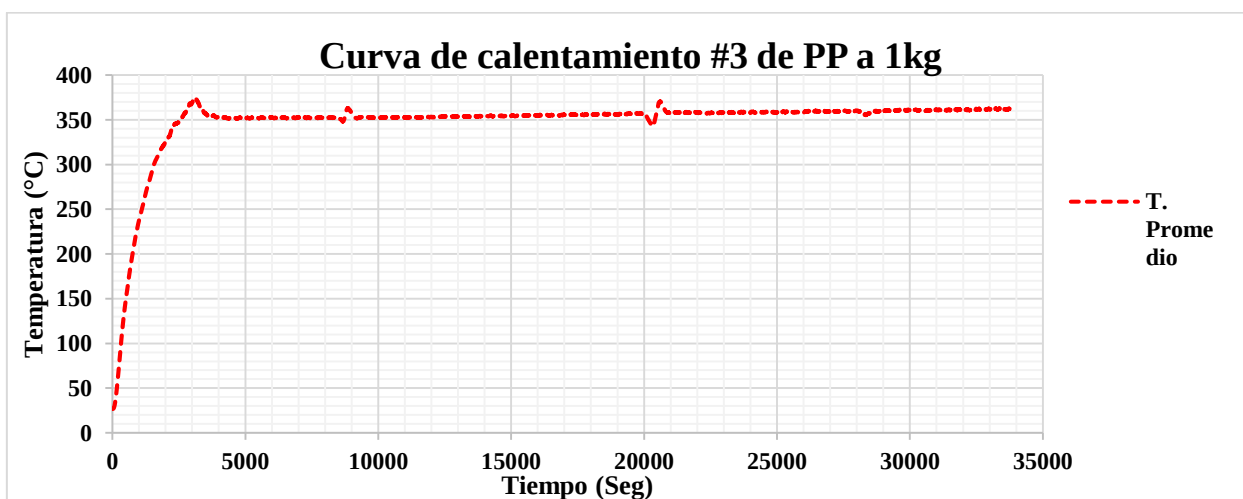


Figura 46. Curva promedio de la reacción del proceso de la medición #5.

4.2.3.1. Método 1. Método de Smith para la identificación de sistemas de segundo orden subamortiguados.

$$\%P1 = 20$$

$$\%P2 = 60$$

$$t1(20\%) = 240 \text{ seg}$$

$$t2(60\%) = 852 \text{ seg}$$

$$\frac{t_{20}}{t_{60}} = \frac{240}{852} \approx 0.28$$

$$\frac{t_{60}}{\tau} = \omega_n t_{60}$$

$$\omega_n t_{60} \approx 4.2$$

$$\omega_n = \frac{4.2}{852} \approx 4.93 \times 10^{-3}$$

$$\xi \approx 0.42$$

$$G_p(s) = \frac{2.43 \times 10^{-5}}{s^2 + 4.14 \times 10^{-3}s + 2.43 \times 10^{-5}}$$

4.2.3.2. Resultados Método 1.

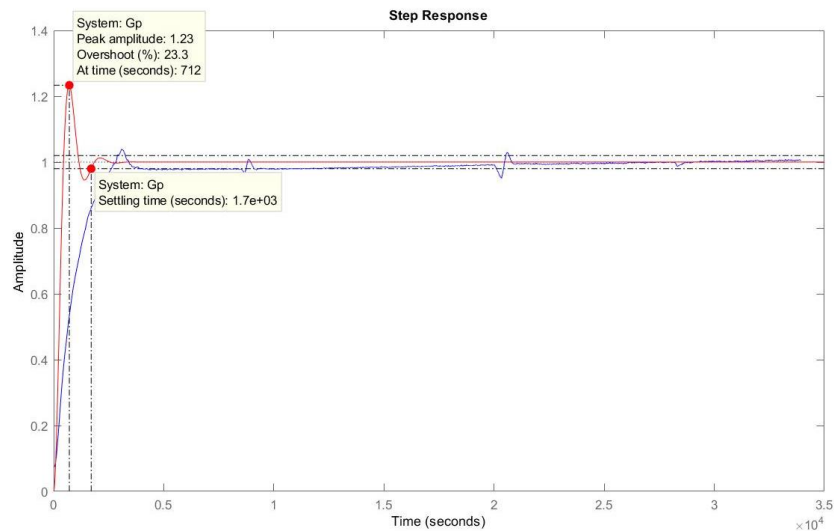


Figura 47. Sistema de segundo orden subamortiguado por método de Smith ante entrada escalón.

Observaciones

- De la figura 47 se puede observar que el modelo de segundo orden tiene un comportamiento subamortiguado con un factor de amortiguamiento cercano a 0, lo que explica los sobre picos en la curva.

- Debido al comportamiento del modelo de segundo grado obtenido por este método, no existe una aproximación con respecto al sistema real, los sobre picos y los valores de tiempo están lejos del comportamiento real, tal como se evalúa en la gráfica.

4.2.3.3. Método 2. Análisis gráfico.

Hallando el valor sobre pico

Los valores se extraen de los datos adquiridos: $T_{\max} = 374,1206^{\circ}\text{C}$; $T_{\min} = 26,6639^{\circ}\text{C}$; Valor final = 360°C

$$\%OS = \frac{374.1206 - 360}{360 - 26.6639} * 100 \approx 4.2\%$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 2%

$$T_{\text{ref}} = 0.01(360 - 26.6639) \approx 3.3^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\min}} = 356.7^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\max}} = 363.3^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{2\%} = 20742 \text{ seg}$$

Hallando el tiempo de establecimiento al 5%

$$T_{\text{ref}} = 0.025(360 - 26.6639) \approx 8.3^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\min}} = 351.7^{\circ}\text{C}$$

$$V_{\text{ref}_{\max}} = 368.3^{\circ}\text{C}$$

$$ts_{5\%} = 20661 \text{ seg}$$

Hallando el factor de amortiguamiento

$$\xi = -\frac{\ln(0.042)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.042)^2}}$$

$$\xi \approx 0.71$$

Hallando la frecuencia natural

$$\omega_n = \frac{4}{(0.71)(20742)} \approx 2.72 \times 10^{-4}$$

Reemplazando valores en el modelo de segundo grado

$$G_p(s) = \frac{7.4 \times 10^{-8}}{s^2 + 3.86 \times 10^{-4}s + 7.4 \times 10^{-8}} \quad \text{Segundo orden}$$

4.2.3.4. Resultados Método 2.

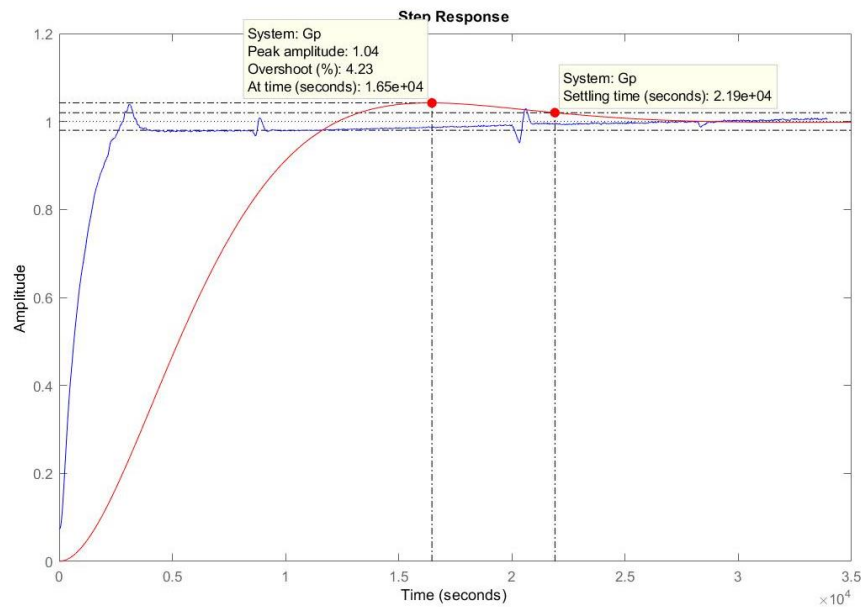


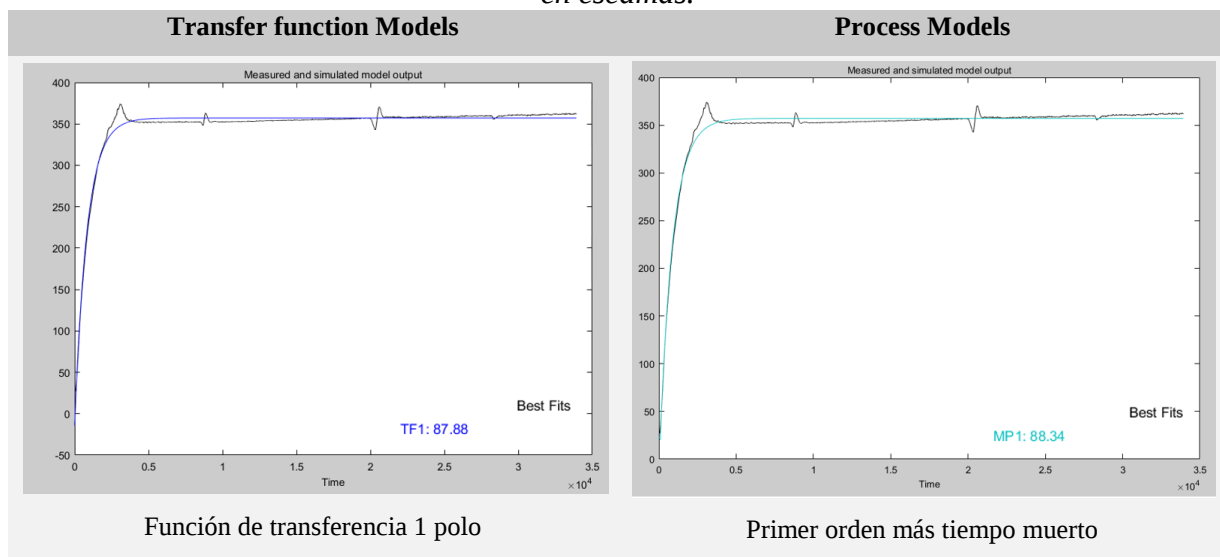
Figura 48. Sistema de segundo orden subamortiguado por análisis gráfico.

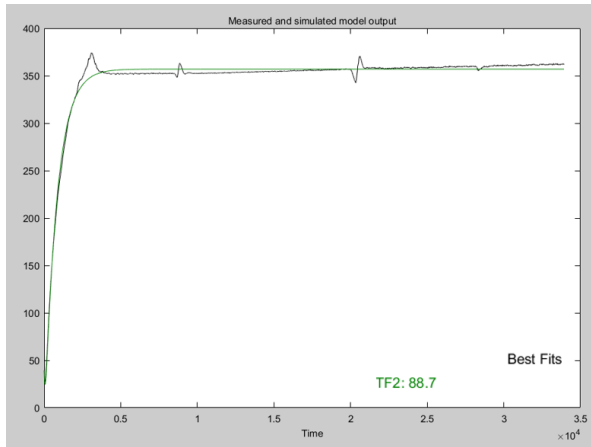
Observaciones

- De la figura 48 se puede observar que el comportamiento del sistema de segundo orden es subamortiguado, al mismo tiempo las características obtenidas se acercan a las determinadas por medio analítico y gráfico tal como se observa en el porcentaje de sobre pico (Overshoot) y el tiempo a la cual tiende a estabilizarse el sistema (t_s), sin embargo, los datos de temperatura en el estado transitorio se encuentran muy alejados con respecto a las temperaturas del sistema real, de modo que el modelo determinado por este método no presenta la aproximación suficiente.

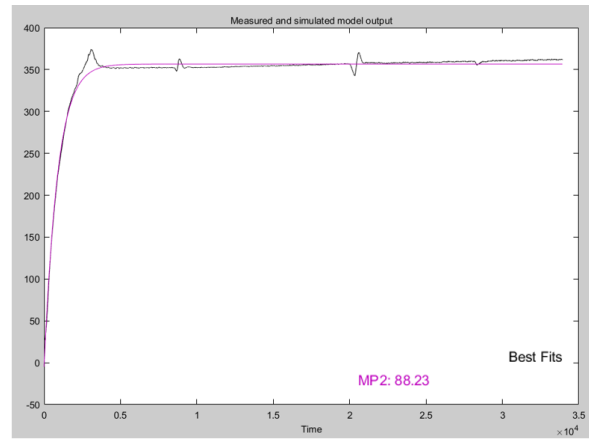
4.2.3.5. Método 3. Empleando ToolBox de MATLAB System Identification.

Tabla 11. Comparación de las funciones de transferencias obtenidas con MATLAB para PP en escamas.

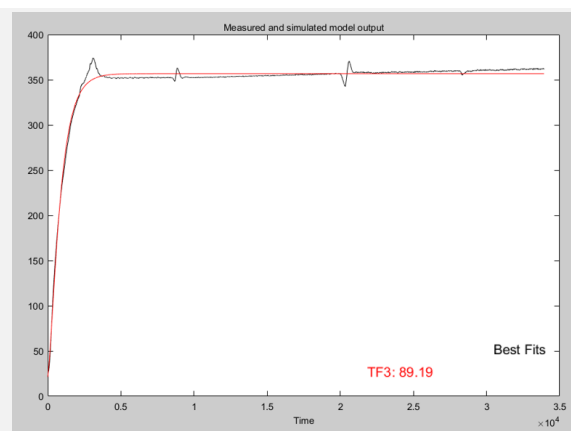




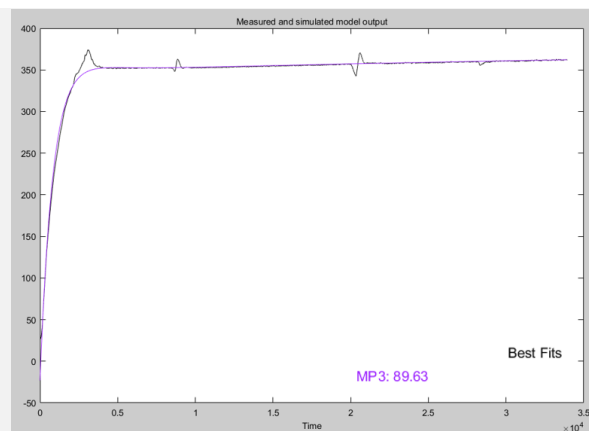
Función de transferencia 2 polos



Segundo orden más tiempo muerto



Función de transferencia 1 cero y 2 polos



Tercer orden más tiempo muerto

4.2.3.6. Resultados Método 3.

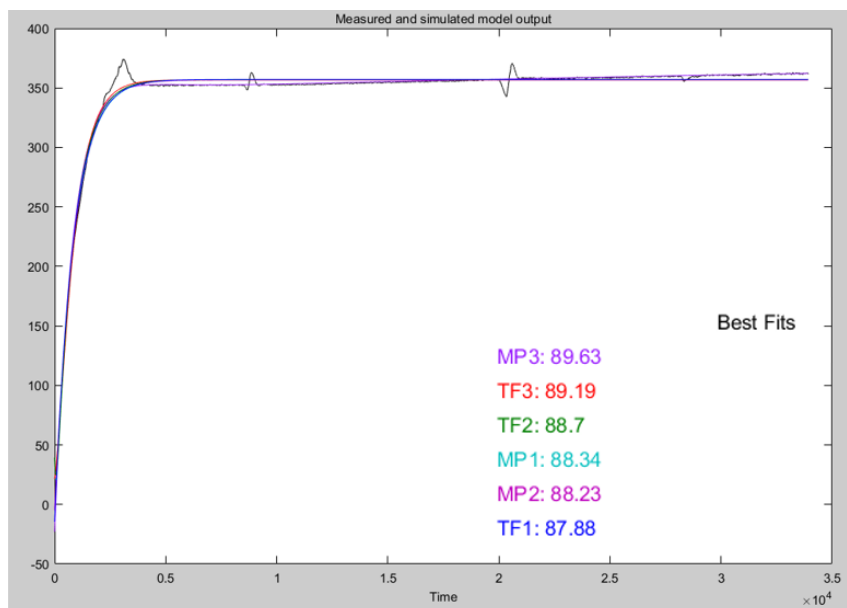


Figura 49. Comparación funciones de transferencias de la planta Polipropileno.

Observaciones

- La figura 49 ilustra de manera general que todos los modelos denotan una buena aproximación al sistema real por encima del 87%, sin embargo, el sistema con mayor aproximación a la curva de reacción del proceso es la función de transferencia **MP3** representada por un modelo de tercer orden más tiempo muerto.
- La tabla 11 ilustra de manera individual cada uno de los modelos determinados por el método 3, de modo que se puede comparar uno a uno, evidenciando que, de los 6 modelos TF3 y MP3 son las que mejor representan al sistema real con una aproximación por encima del 89%, sin embargo, TF3 denota ser más apropiada no solo por su porcentaje de aproximación del 89.19%, sino también por su simple sistema de segundo orden.

4.2.4. Conclusión Aplicación de los métodos.

Analizando todos los resultados obtenidos, se puede concluir que: en la parte analítica en los métodos 0 y 1 al solo tener en cuenta dos valores porcentuales de la curva de reacción, la respuesta no logra ser lo suficientemente óptima al sistema, ya que, se pierden datos de información y la curva representativa del sistema real presenta errores en el comportamiento los cuales se buscan corregir a partir del control, y al utilizar dicho método, no se tendrían en cuenta. En el análisis grafico del método 2, algunas de sus respuestas logran aproximarse al sistema real teniendo en cuenta características como el valor sobre pico y el tiempo de establecimiento, sin embargo, en todas las respuestas el estado transitorio presenta una diferencia considerable que reduce en gran porcentaje su aproximación con respecto al sistema real. En cuanto al método 3, empleando la Toolbox *SystemIdentification*, los resultados obtenidos se aproximan en mayor porcentaje a la curva de reacción, esto debido a que la herramienta empleada tiene en cuenta factores importantes como la cantidad de información y el tiempo de muestreo, además de brindar la opción de simular distintos modelos. Debido a lo indicado anteriormente se concluye que el modelo que representará al sistema real se obtiene de la aplicación del método #3.

Tabla 12. Resumen resultados de la identificación del sistema.

Tipo de plástico y presentación	Método	Tipo de Sistema	Planta	Selección final
 Tapas de botella [PP]	0	Primer orden más tiempo muerto	$\frac{e^{-17s}}{1212s + 1}$	TF3
	1	Segundo orden (2P-0C)	$\frac{4.93 \times 10^{-5}}{s^2 + 11.232 \times 10^{-3}s + 4.93 \times 10^{-5}}$	
	2	Segundo orden (2P-0C)	$\frac{1.56 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.86 \times 10^{-3}s + 1.56 \times 10^{-6}}$	
		Segundo orden más tiempo muerto	$\frac{1.56 \times 10^{-6} * e^{-57s}}{s^2 + 1.86 \times 10^{-3}s + 1.56 \times 10^{-6}}$	
	3	Segundo orden (2P-1C)	$\frac{7.461 \times 10^{-4} s + 2.823 \times 10^{-7}}{s^2 + 0.001045 s + 2.856 \times 10^{-7}}$	
 Escamas [PP]	1	Segundo orden (2P-0C)	$\frac{2.43 \times 10^{-5}}{s^2 + 4.14 \times 10^{-3}s + 2.43 \times 10^{-5}}$	TF3
	2	Segundo orden (2P-0C)	$\frac{7.4 \times 10^{-8}}{s^2 + 3.86 \times 10^{-4}s + 7.4 \times 10^{-8}}$	
	3	Segundo orden (2P-1C)	$\frac{0.0007198 s + 5.159 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.005041 * s + 5.133 \times 10^{-6}}$	
 Virutas [HDPE]	1	Segundo orden	$\frac{5.43 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.21 \times 10^{-3}s + 5.43 \times 10^{-6}}$	TF2
	2	Segundo orden	$\frac{1.19 \times 10^{-6}}{s^2 + 1.5042 \times 10^{-3}s + 1.19 \times 10^{-6}}$	
	3	Segundo orden (2P-0C)	$\frac{2.515 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.002997 s + 2.485 \times 10^{-6}}$	

4.3. Diseño del controlador

En esta etapa se profundiza el análisis de las técnicas de control para el mejoramiento del sistema, se observará la estructura de los mismos y los resultados obtenidos de la aplicación en cada uno de los plásticos, sirviendo como base para determinar que técnica implementar. Posteriormente, de acuerdo con la información obtenida, se realizará el diseño y simulaciones de distintas técnicas aplicando un modelo aproximado del proceso de pirólisis, para así evaluar la eficiencia de éstas

respecto al proceso no controlado (actual) y a partir de la comparación de los resultados, seleccionar la que representa la mayor viabilidad.

4.3.1. Aplicación para la medición #2 (PP en tapas).

$$G_p(s) = \frac{7.461 \times 10^{-4} s + 2.823 \times 10^{-7}}{s^2 + 0.001045 s + 2.856 \times 10^{-7}} \quad \text{Función de transferencia representativa}$$

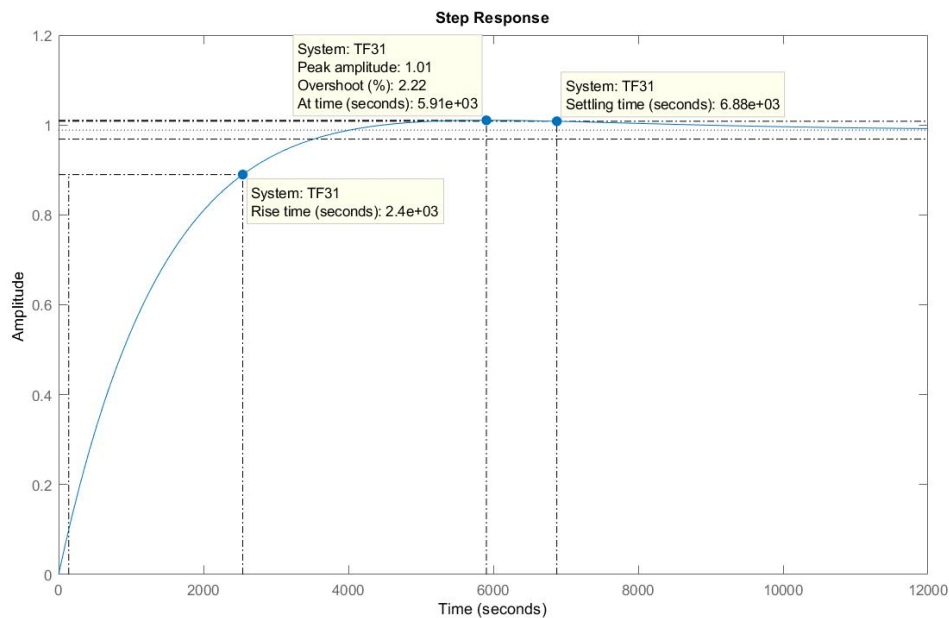


Figura 50. Características de la función de transferencia representativa del PP en tapas.

$$\%OS = 2.22 \quad \text{Valor sobre pico (overshoot)}$$

$$t_s = 6880 \text{ seg} \quad \text{Tiempo de establecimiento}$$

$$t_r = 2400 \text{ seg} \quad \text{Tiempo de asentamiento subida}$$

$$e_{ss} = \frac{1}{1 + K_p} \quad \text{Error en estado estacionario con entrada escalón}$$

$$K_p = \lim_{s \rightarrow 0} G_p(s) \quad \text{Constante de error ante entrada escalón}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{7.461 \times 10^{-4} s + 2.823 \times 10^{-7}}{s^2 + 0.001045 s + 2.856 \times 10^{-7}} \right)$$

$$Kp \approx 0.99$$

$$e_{ss} \approx 0.5$$

4.3.1.1. Técnica de control 1. Compensación por análisis gráfico.

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la gráfica 21, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error y el tiempo de proceso.

Criterios de diseño

$$\%OS \leq 1 \quad t_s \leq 4500 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

Teniendo en cuenta los criterios establecidos para el diseño, por medio de la Toolbox *sisotool* de Matlab se halla la región para la ubicación de los polos y ceros que conformaran el control

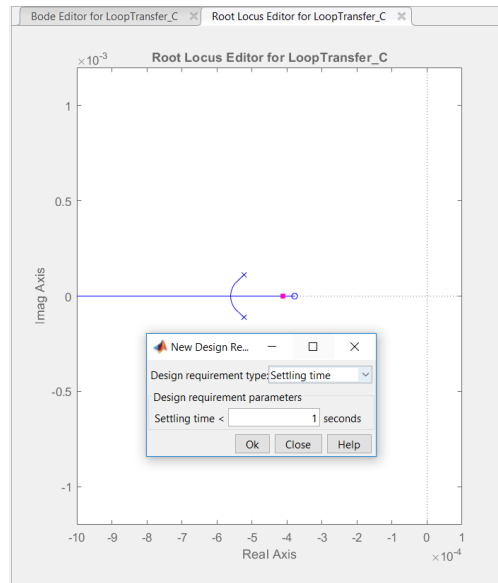


Figura 51. Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.

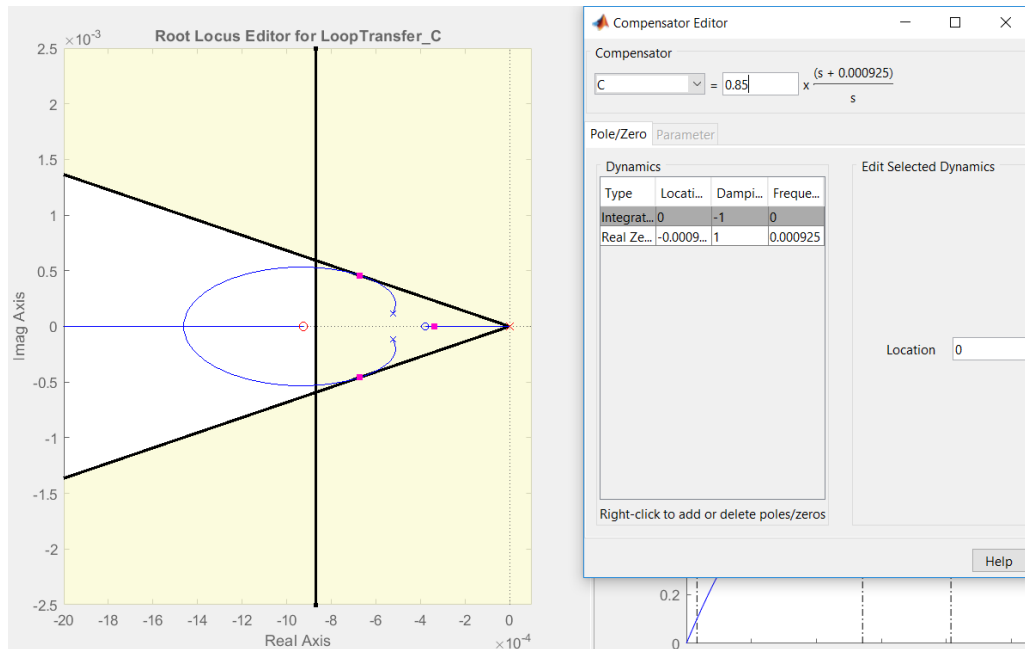


Figura 52. Adición y ubicación de polo y cero al sistema.

Se realiza la compensación de un polo ubicado en el origen que hará representación de integral del sistema que se encargará de corregir el error en estado estable reduciéndolo a 0; la ubicación del cero en el sistema junto con la determinación de la constante K se determina de tal forma que el sistema logre alcanzar los criterios deseados.

Al determinar la ubicación del polo y el cero junto con la constante K satisfaciendo los criterios deseados, se establece el controlador de la siguiente forma:

$$G_c(s) = 0.85 * \frac{s + 9.25 \times 10^{-4}}{s} \quad \text{Función de transferencia del controlador}$$

$$G_c(s) = 0.85 + \frac{7.8625 \times 10^{-4}}{s}$$

$$K_p = 0.85 \quad K_i = 7.8625 \times 10^{-4}$$

4.3.1.2. **Técnica de control 1. Compensación por Lugar Geométrico de las Raíces.**

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la gráfica 21, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error y el tiempo de proceso.

Paso 1. Se establecen los criterios de diseño

$$\%OS \leq 1 \quad t_s \leq 4500 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

Paso 2. A partir de los criterios de diseño se determinan los factores necesarios para establecer los polos deseados que determinan mi diseño

$$Pd = -\xi\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\xi^2} \quad \text{Polos dominantes deseados}$$

$$OS = 0.01$$

$$\xi = -\frac{\ln(0.01)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.01)^2}}$$

$$\xi \approx 0.8$$

$$ts_{2\%} = 4500$$

$$\omega_n = \frac{4}{(0.8)(4500)} = 1.11 \times 10^{-3}$$

$$Pd = -(0.8)(1.11 \times 10^{-3}) \pm j(1.11 \times 10^{-3})\sqrt{1 - (0.8)^2} = -8.88 \times 10^{-4} \pm j6.66 \times 10^{-4}$$

Paso 3. Se verifica si con el ajuste de la ganancia del compensador se obtiene los polos de lazo cerrado deseados.

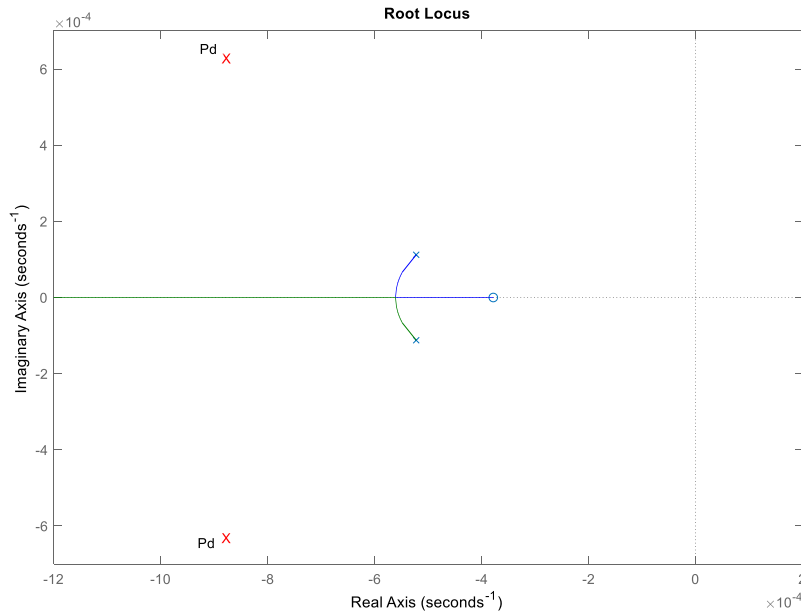


Figura 53. Lugar geométrico de las raíces de la planta de la medición 2.

Paso 4. Encontrar la contribución en ángulo de la planta y determinar cuál debería ser la contribución del compensador para lograr que el lugar geométrico pase por los polos deseados.

$$\sum \theta_{Zeros} - \sum \theta_{Polos} = \pm 180^\circ$$

$$\theta_{z1} - (\theta_{p1} + \theta_{p2}) = \pm 180^\circ$$

Determinación de ángulos de polos y ceros por geometría

$$\theta_{z1} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{6.66 \times 10^{-4}}{5.1 \times 10^{-4}} \right) = 127.44^\circ$$

$$\theta_{p1} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{5.54 \times 10^{-4}}{3.655 \times 10^{-4}} \right) = 123.42^\circ$$

$$\theta_{p2} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{7.78 \times 10^{-4}}{3.655 \times 10^{-4}} \right) = 115.16^\circ$$

$$127.44^\circ - (123.42^\circ + 115.16^\circ) = \pm 180^\circ$$

$$-111.14^\circ = \pm 180^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -180^\circ + 111.14^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -68.86^\circ \quad \text{Angulo que debe contribuir el compensador}$$

Debido a que la contribución es negativa el diseño se establecerá en la compensación en atraso, la cual se basó en proponer la ubicación del polo para posteriormente calcular la ubicación del cero. Siguiendo la expresión de la ecuación 7 se estableció:

Paso 5. Ubicación del polo y el cero del compensador de tal forma que de la suma de sus ángulos se obtenga el ángulo de contribución

Con el fin de asegurar que el error en estado estable sea cero, se añade un integrador al compensador, de modo que el polo será ubicado en el origen.

$$p_c = 0$$

$$\theta_{pc} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{6.66 \times 10^{-4}}{8.88 \times 10^{-4}} \right)$$

$$\theta_{pc} = 143.13 \quad \text{Angulo del polo del compensador}$$

Teniendo en cuenta la ubicación y el ángulo de contribución del polo del compensador, por geometría, se calcula el ángulo de contribución del cero y su respectiva posición.

$$\theta_{zc} - \theta_{pc} = -68.86^\circ$$

$$\theta_{zc} = -68.86^\circ + 143.13^\circ$$

$$\theta_{zc} = 74.27^\circ \quad \text{Angulo del cero del compensador}$$

$$z_c = -8.88 \times 10^{-4} - \frac{6.66 \times 10^{-4}}{\tan(74.27^\circ)} = -1.08 \times 10^{-3}$$

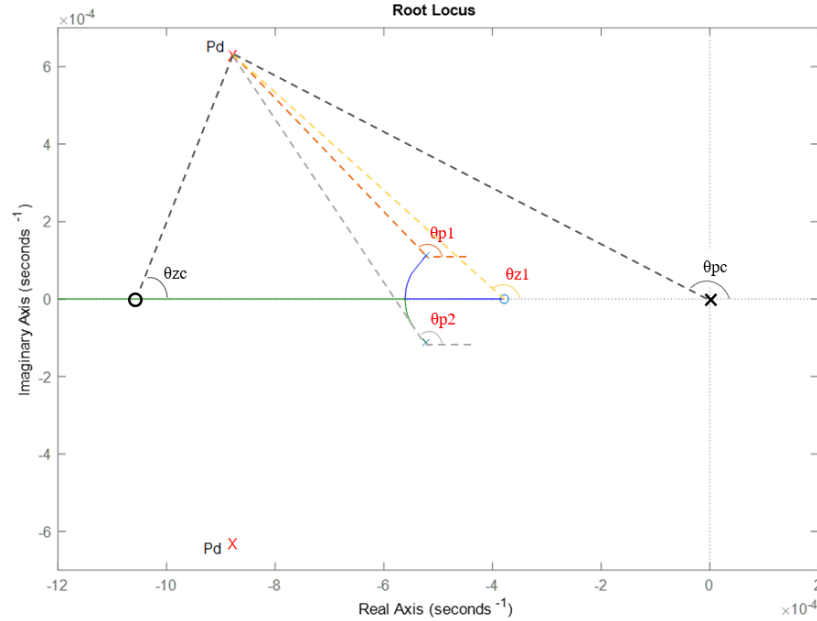


Figura 54. Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos por LGR

Paso 6. Determinación de la ganancia (K_c) del compensador usando la condición de magnitud.

$$\left| K_c \frac{(s + z_c)}{(s + p_c)} * \frac{7.461 \times 10^{-4} s + 2.823 \times 10^{-7}}{s^2 + 0.001045 s + 2.856 \times 10^{-7}} \right|_{s=-8.88 \times 10^{-4} + j6.66 \times 10^{-4}} = 1$$

$$\left| K_c \frac{(s + 1.08 \times 10^{-3})}{s} * \frac{7.461 \times 10^{-4} s + 2.823 \times 10^{-7}}{s^2 + 0.001045 s + 2.856 \times 10^{-7}} \right|_{s=-8.88 \times 10^{-4} + j6.66 \times 10^{-4}} = 1$$

$$K_c \approx 1.458$$

Paso 7. Determinación final del compensador y su aplicación

$$G_c(s) = 1.458 \frac{s + 1.08 \times 10^{-3}}{s} = 1.458 + \frac{1.57 \times 10^{-3}}{s} \quad \text{Función de transferencia controlador}$$

$$K_p = 1.458 \quad K_i = 1.57 \times 10^{-3}$$

4.3.1.3. Resultados Técnica 1.

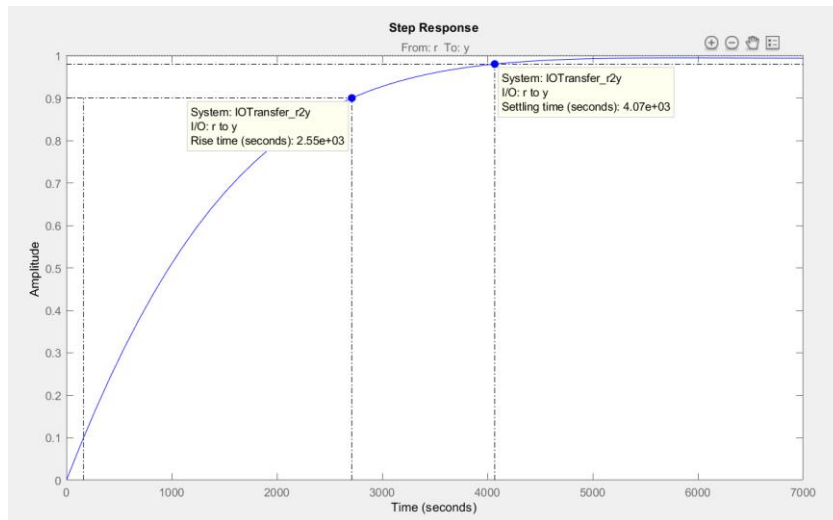


Figura 55. Resultado aplicación técnica por análisis gráfico.

Se puede observar que tras emplear la Toolbox sisotool se obtuvo como representación un control PI, conformado por una parte proporcional y una parte integral, en donde la proporcional se encargó de los tiempos del sistema y la integral se encargó de reducir el error en estado estable a cero, cumpliendo con los criterios de diseño establecidos, tal como se observa en la gráfica 23, de modo que gracias a la forma del control más los resultados de su aplicación en el sistema, se puede establecer esta técnica como un buen método de obtención de control.

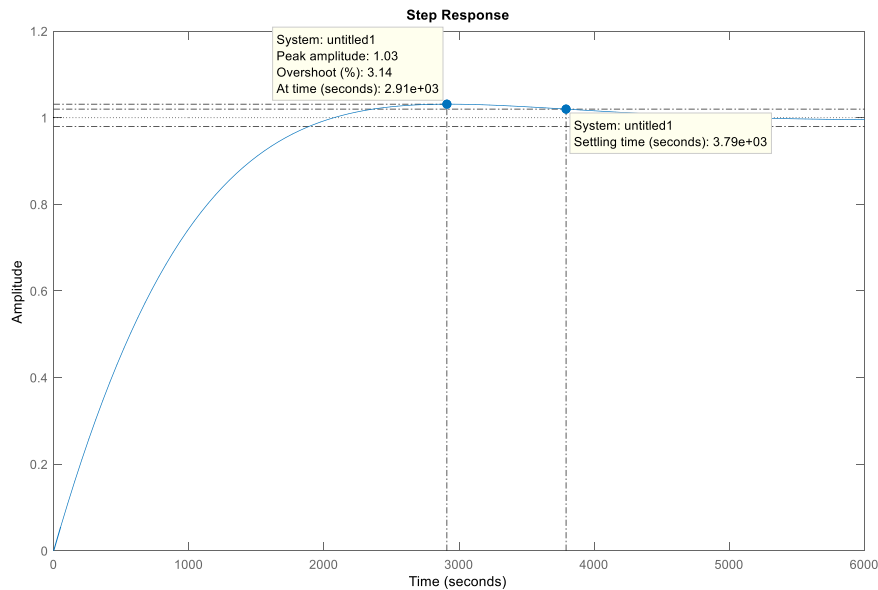


Figura 56. Resultados aplicación técnica por compensación por LGR.

Se puede observar en las características obtenidas de la gráfica 24, que se logró reducir el tiempo de establecimiento en aproximadamente 3000 segundos y el error en estado estable a 0%, sin embargo, el valor de sobre pico se incrementó en un 0.92% incumpliendo parte de los criterios deseados. Aunque los criterios establecidos no se cumplieron en su totalidad, se puede determinar que la aplicación de control por compensación por LGR, expresa muy buenos resultados, ya que el valor de incremento fue mínimo, por otro lado, en la aplicación física es típico encontrar valores pico en las rampas de calentamiento debido a la conservación térmica del material.

4.3.1.4. Técnica de control 2. Diseño de controlador-Observador por espacio de estados.

Antes de realizar la representación de estados basado en la función de transferencia se debe tener en cuenta el tipo de planta del sistema, es decir el número de polos existentes en el origen o integradores presentes en el sistema. Cuando la planta es de tipo 0, como en este caso, se debe

insertar en conjunto con el control, un integrador en el camino directo entre el comparador de error y la planta.

Basado en la función de transferencia representativa de la medición #2 se determinan las siguientes variables de estado:

$$A = \begin{bmatrix} -0.0010 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad C = [7.461 \times 10^{-4} \quad 3 \times 10^{-7}]$$

Antes de realizar el diseño para el control, se debe determinar si el sistema representado en espacio de estados es controlable y observable:

$$Co = [B \quad AB \quad A^2B] = \begin{bmatrix} 1 & -0.0010 & 0 \\ 0 & 1 & -0.0010 \end{bmatrix} \text{ Matriz de controlabilidad}$$

$$\text{rango}Co = 2$$

$$Ob = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.461 \times 10^{-4} & 3 \times 10^{-7} \\ -5 \times 10^{-7} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ Matriz de observabilidad}$$

$$\text{rango}Ob = 2$$

Se considera que el sistema es observable y controlable cuando el rango de las matrices **Ob** y **Co** es igual a la dimensión de las matrices constantes de estado.

Conociendo lo anterior, se emplean los siguientes criterios para determinación de los polos deseados en lazo cerrado

$$\%OS = 1 \quad t_s = 4500 \text{ seg}$$

se utiliza el método de asignación de polos para el diseño del sistema, donde las raíces $\mu_{1,2}$ se determinan aplicando la fórmula de polos deseados, y μ_3 se adiciona a una distancia lejana al eje por la parte izquierda, asegurando la estabilidad.

$$\mu_{1,2} = -8.88 \times 10^{-4} \pm j6.66 \times 10^{-4} \quad \mu_3 = -5$$

La matriz de ganancias de realimentación del estado **K** y **K_i** para este caso se obtiene del modo siguiente:

$$Kg = [K : K_i] \quad K = [5.0007 \quad -0.0064] \quad K_i = -20.5071$$

Donde la ganancia **K_i** es la ganancia establecida del integrador insertado.

Usando esta matriz de ganancias de realimentación del estado **K**, la señal de control por realimentación del estado observado **u** está dada por:

$$u = -K\tilde{x} = -[7.328 \times 10^{-4} \quad 9 \times 10^{-7}] \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \end{bmatrix}$$

Los polos del observador se determinan teniendo en cuenta que los polos del observador deben ser de 2 a 5 veces más rápidos que los polos del controlador.

$$t_s = \frac{4500}{3} \text{ seg} = 1500 \text{ seg} \quad \text{tiempo de establecimiento 3 veces más rápido}$$

$$\mu_{1,2} = -0.0027 \pm 0.0018i$$

Con los polos deseados anteriormente expresados se obtiene la matriz de ganancias del observador **K_e**:

$$K_e = \begin{bmatrix} 140 \\ -3.4192 \times 10^5 \end{bmatrix}$$

La ecuación del observador se obtiene mediante la siguiente ecuación

$$\dot{\tilde{x}} = (A - K_e C - BK)\tilde{x} + K_e y$$

$$u = -K\tilde{x}$$

Donde:

$$AA = [A - K_e C - BK] \quad BB = [K_e] \quad CC = [K]$$

$$AA = \begin{bmatrix} -5.1026 & 0.0064 \\ 256.1048 & 0.0965 \end{bmatrix} \quad BB = \begin{bmatrix} 140 \\ -341920 \end{bmatrix} \quad CC = [5.0007 \quad -0.0064]$$

El programa MATLAB 1.0 produce las matrices anteriormente expresadas, tanto las matrices de estado del sistema, como las matrices K y Ke del diseño del control-observador.

Tabla 13. Programación de cálculos para solución a las variables de cálculo.

MATLAB programa 1.0
<pre> % Función de transferencia s=tf('s'); Gp=(7.461e-04*s+2.823e-07)/(s^2+0.001045*s+2.856e-07) % Ingreso de la función de transferencia en vectores num=[7.461e-04 2.823e-07] den=[1 0.001045 2.856e-07] % Calculo matrices constantes de las variables de estado [A,B,C,D]=tf2ss(Gp.num{1},Gp.den{1}); %La forma canónica controlable es importante cuando se analiza el método de asignación de polos % Matrices para insertar el integrador Ag=[A zeros(2,1);-C 0]; Bg=[B;0]; % Matriz de Controlabilidad Co=[B A*B A^2*B]; rangoCo=rank(Co) % Matriz de Observabilidad Ob=[C;C*A;C*A^2]; rangoOb=rank(Ob) % Asignación de polos por realimentación % Diseño de los polos deseados en lazo cerrado OV=1/100; ts=4500; z= abs(log(OV))/sqrt(pi^2+log(OV)^2); wn=4/(ts*z); Pd=roots(conv([1 2*z*wn wn^2],[wn^2])), %-0.00038 0.002 Kg=acker(Ag,Bg,[Pd(1) Pd(2) -5]) Ki=Kg(end); % Ganancia del integrador insertado K=Kg(1:end-1); </pre>

```
% Observador de estados
% Diseño de los polos deseados en lazo cerrado
nOV=OV; nts=ts/3;
nz= abs(log(nOV))/sqrt(pi^2+log(nOV)^2);
```

Tabla 13. (Continuación)

```
nwn=4/(nts*z);
Po=roots(conv([1 2*nz*nwn nwn^2],[nwn^2]));
Ke=acker(A',C',Po);
```

4.3.1.5. Resultados Técnica 2.

Para determinar aptitud de la aplicación del control-observador por espacio de estados, se realizó la simulación y experimentación por medio diagramas de bloques en SIMULINK .

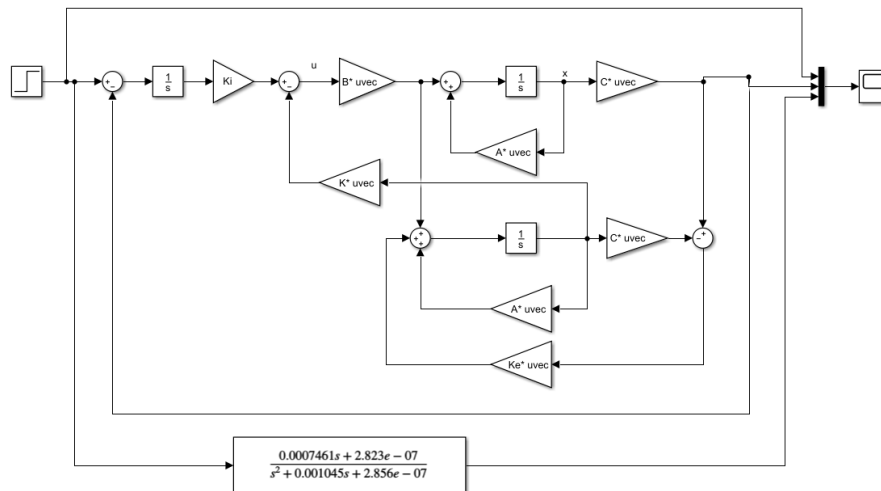
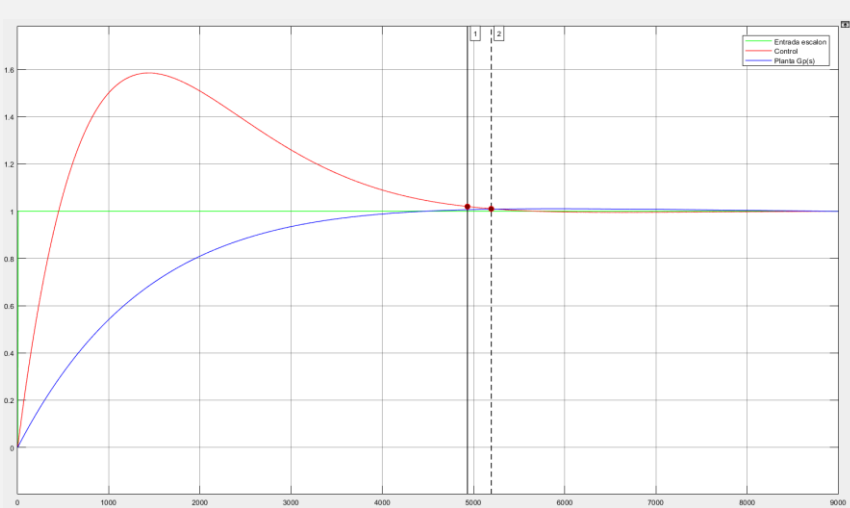
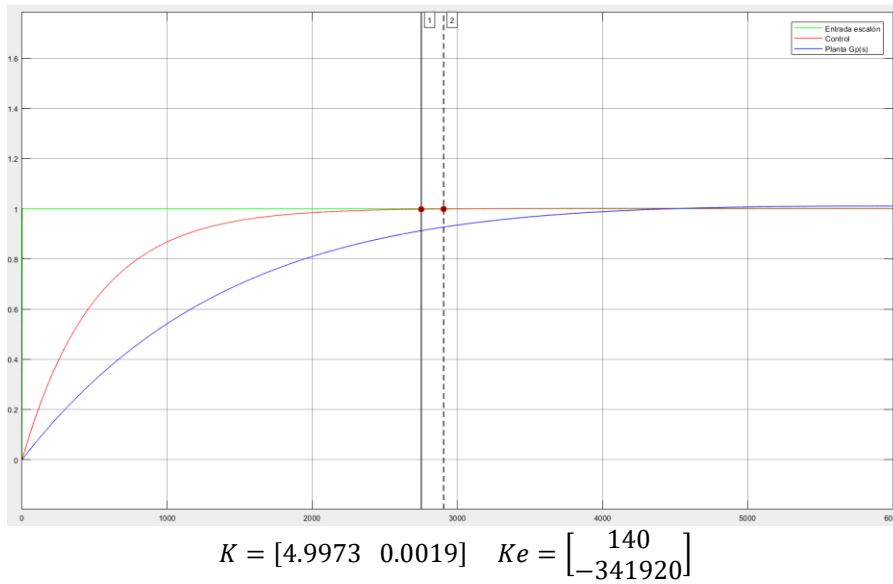


Figura 57. Diagrama de bloques de la aplicación del control.

Tabla 14. Resultados y análisis de aplicación de control-observador al sistema

Resultados	Análisis
Polos deseados en lazo cerrado establecidos por criterios de diseño $\mu_{1,2} = -8.88 \times 10^{-4} \pm j6.66 \times 10^{-4} \quad \mu_3 = -5$  $K = [5.0007 \quad -0.0064] \quad K_e = \begin{bmatrix} 140 \\ -341920 \end{bmatrix}$	Tal como se observa en la gráfica como resultado, La determinación de los polos deseados en lazo cerrado por los criterios de diseño, no determinan un valor para las matrices K y Ke del controlador-observador, que satisfagan los requerimientos del diseño, obtenido como resultados un overshoot elevado de aprox. 58% y un tiempo de establecimiento entre 4930 y 5100 seg, causando que el error disminuya en tiempos elevados.
Polos deseados en lazo cerrado establecidos por variación $\mu_1 = -0.00038 \quad \mu_2 = -0.002 \quad \mu_3 = -5$	Después de variar las raíces de los polos deseados, tal como sugiere el autor en “la sección 10-5 del libro de Ingeniería de control moderna”, para la determinación de las matrices K y Ke del controlador-observador, son estas los criterios que suplen los requerimientos del



diseño, estableciendo un error de estado estable = 0 y un tiempo de establecimiento entre los 2750 y 2900 segundos.

4.3.1.6. Pruebas de simulación ante perturbaciones.

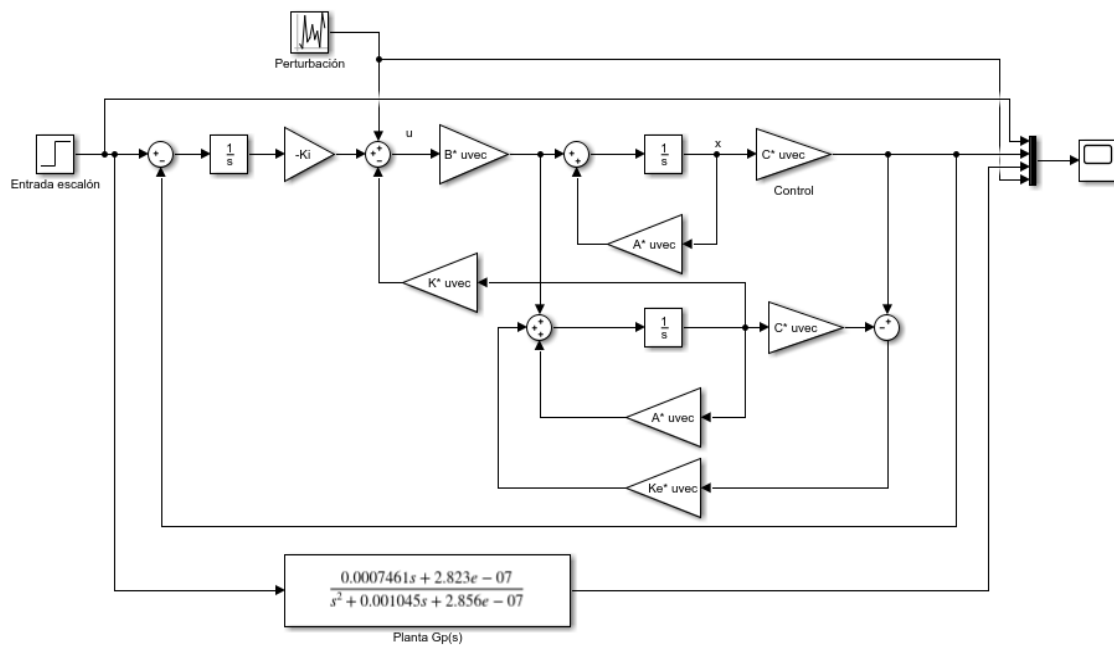


Figura 58. Bloque de perturbación en la aplicación de la técnica de control 2.

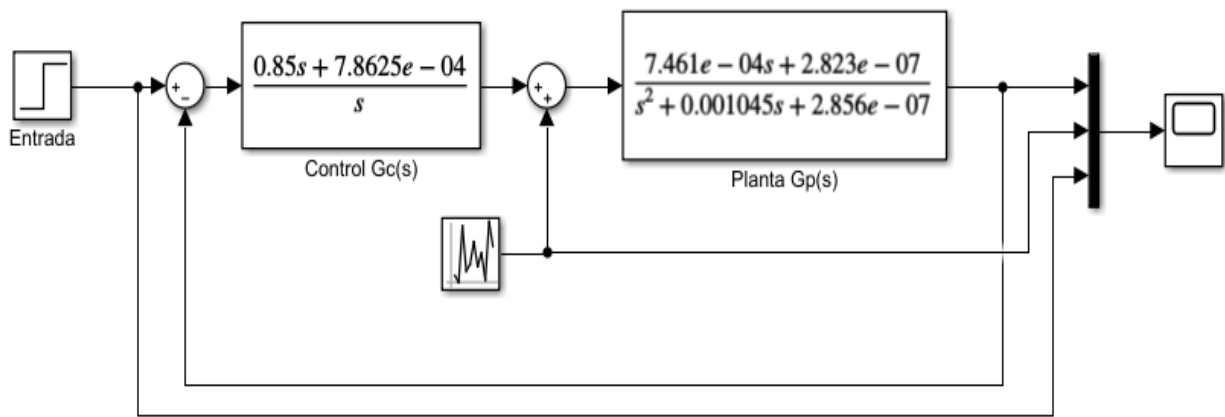
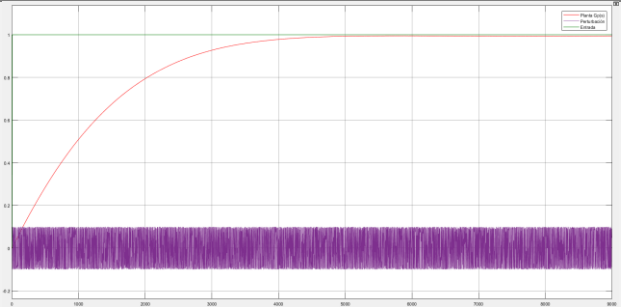
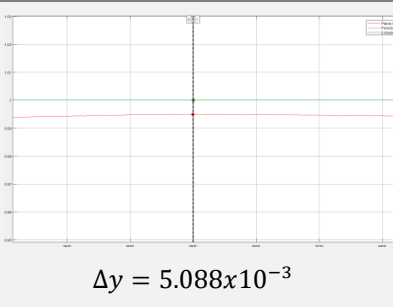
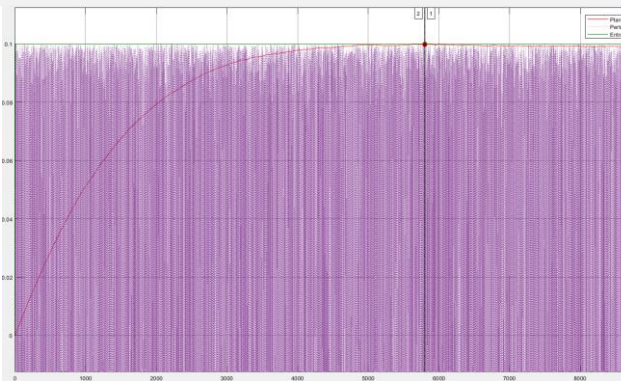
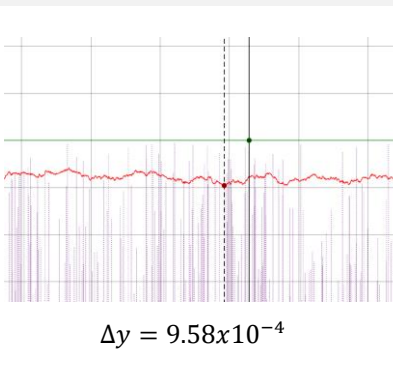


Figura 59. Bloque de perturbación en la aplicación de la técnica de control 1.

Tabla 15. *Modelo de los sistemas controlados en presencia de perturbaciones.*

Entrada escalón		Salida del sistema	Error
Técnica de control 1: Compensación por análisis gráfico	1		 $\Delta y = 5.088 \times 10^{-3}$
	0.1		 $\Delta y = 9.58 \times 10^{-4}$

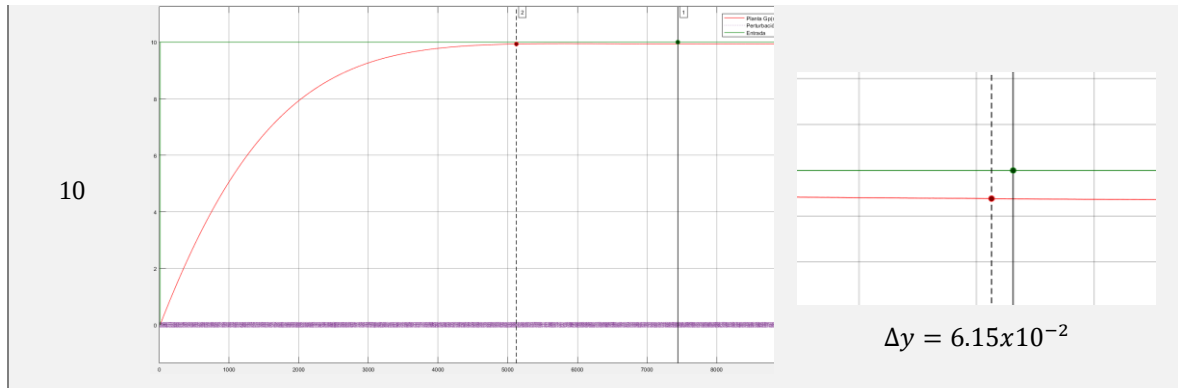
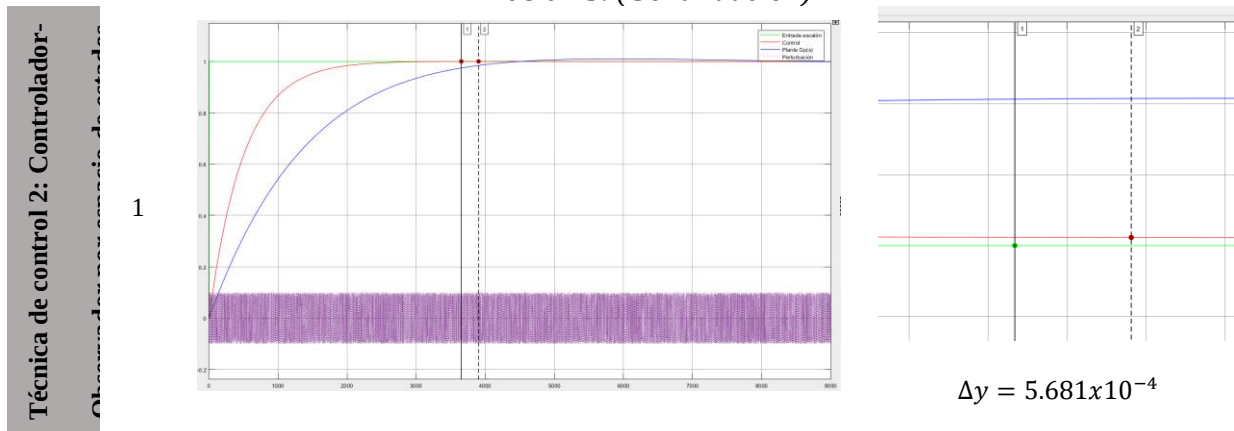
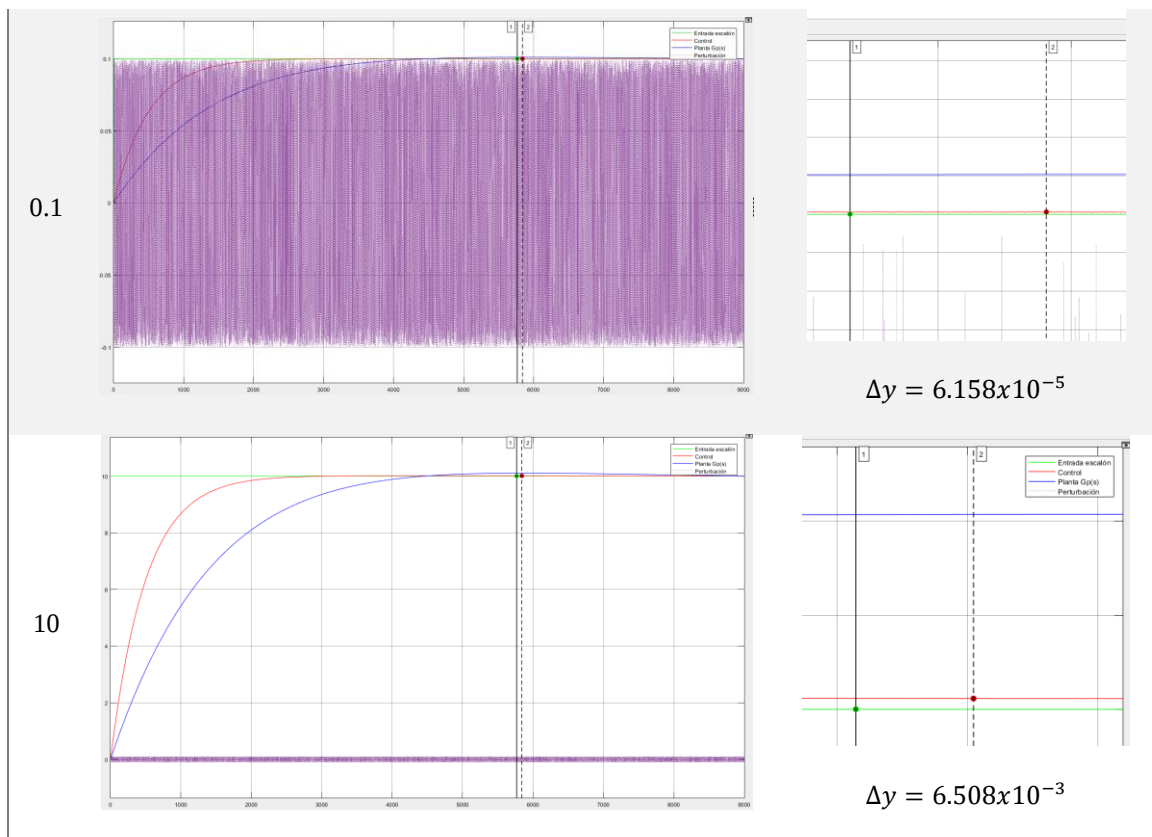


Tabla 15. (Continuación)





Se puede observar de las gráficas obtenidas ante perturbaciones tanto en la técnica de control 1 como en la técnica de control 2, que la perturbación afecta en una mínima medida al control del sistema ya que error es muy cercano a cero como se puede apreciar en la tabla 15.

4.3.2. Aplicación para la medición #3 (HDPE virutas).

$$G_p(s) = \frac{2.515 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.002997s + 2.485 \times 10^{-6}} \quad \text{Función de transferencia representativa}$$

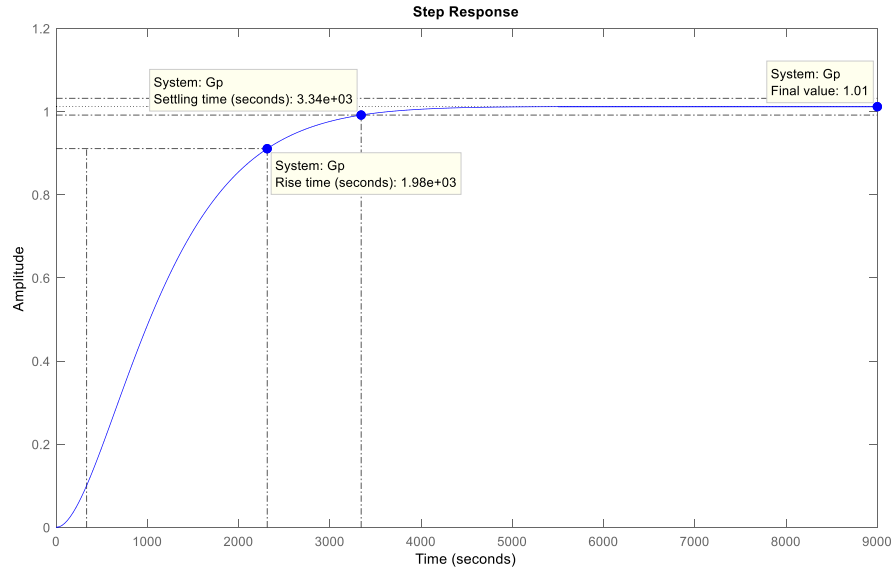


Figura 60. Características de la función de transferencia representativa del HDPE en virutas.

$$\%OS = 0 \quad t_s = 3340 \text{ seg} \quad t_r = 1980 \text{ seg}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} Gp(s)$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{2.515 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.002997 s + 2.485 \times 10^{-6}} \right)$$

$$Kp \approx 1.01$$

$$e_{ss} \approx 0.5$$

4.3.2.1. Técnica de control 1. Diseño de control por análisis gráfico.

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la gráfica 26, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error y el tiempo de proceso y aumentar el valor de sobre pico; con el fin de tener en cuenta el valor pico presentado en las rampas de temperatura presentados en la mayoría de los procesos térmicos robustos.

Criterios de diseño

$$3 \geq \%OS \geq 1 \quad t_s \leq 3000 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

Teniendo en cuenta los criterios establecidos para el diseño, por medio de la Toolbox *sisotool* de Matlab se halla la región para la ubicación de los polos y ceros que conformaran el control

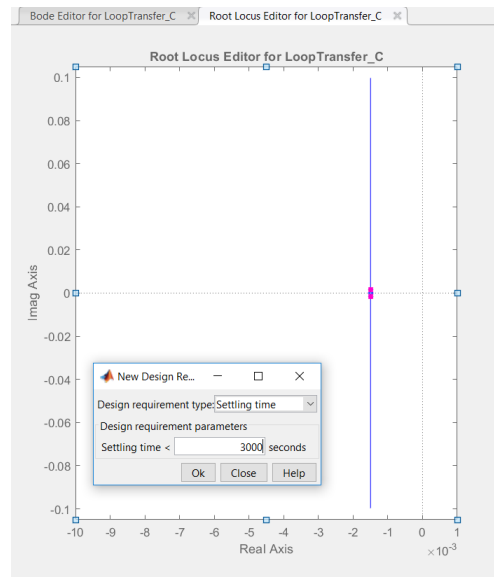


Figura 61. Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.

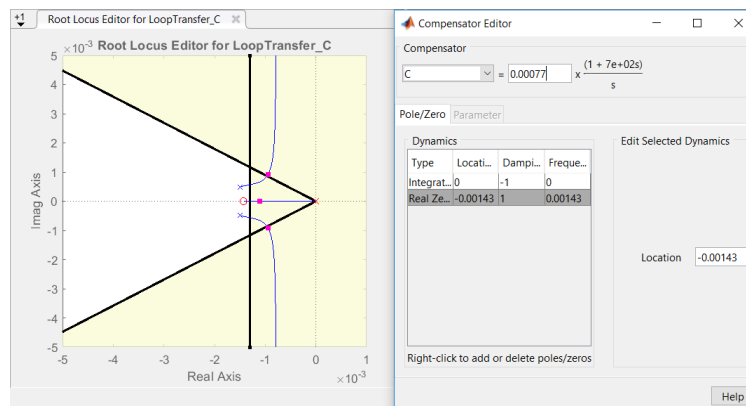


Figura 62. Adición y ubicación de polo y cero al sistema.

Al determinar la ubicación del polo y el cero junto con la constante K satisfaciendo los criterios deseados, se establece el controlador de la siguiente forma:

$$G_c(s) = 0.539 \frac{s + 1.43 \times 10^{-3}}{s} \quad \text{Función de transferencia del controlador}$$

$$G_c(s) = 0.539 + \frac{7.71 \times 10^{-4}}{s}$$

$$K_p = 0.539 \quad K_i = 7.71 \times 10^{-4}$$

4.3.2.2. Resultados Técnica 1.

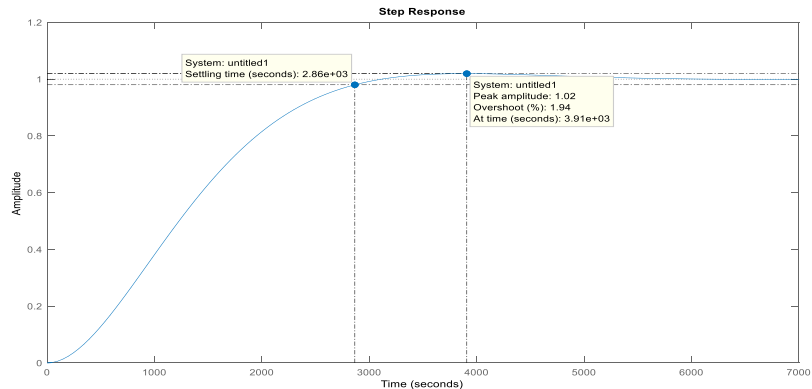


Figura 63. Resultado aplicación del control al sistema.

Se puede observar que tras emplear implementar un control PI con la adición de un cero en el eje real menor a 0 y un polo en el origen, multiplicado a un valor constante, en este caso el valor proporcional, se cumplen con los criterios de diseño establecidos, tal como se observa en la gráfica 26, de modo que gracias a la forma del control más los resultados de su aplicación en el sistema, se puede establecer esta técnica como un buen método de obtención de control.

4.3.2.3. Técnica de control 2. Compensación por Lugar Geométrico de las Raíces.

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la figura 63, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error, el tiempo de proceso y aumentar el valor de sobre pico.

Criterios de diseño

$$3 \geq \%OS \geq 1 \quad t_s \leq 3000 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

$$OS = 0.015$$

$$\xi = -\frac{\ln(0.015)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.015)^2}}$$

$$\xi \approx 0.8$$

$$t_{s2\%} = 3000$$

$$\omega_n = \frac{4}{(0.8)(3000)}$$

$$\omega_n = 1.66 \times 10^{-3}$$

$$Pd = -(0.8)(1.66 \times 10^{-3}) \pm j(1.66 \times 10^{-3})\sqrt{1 - (0.8)^2} = -1.33 \times 10^{-3} \pm j9.96 \times 10^{-4}$$

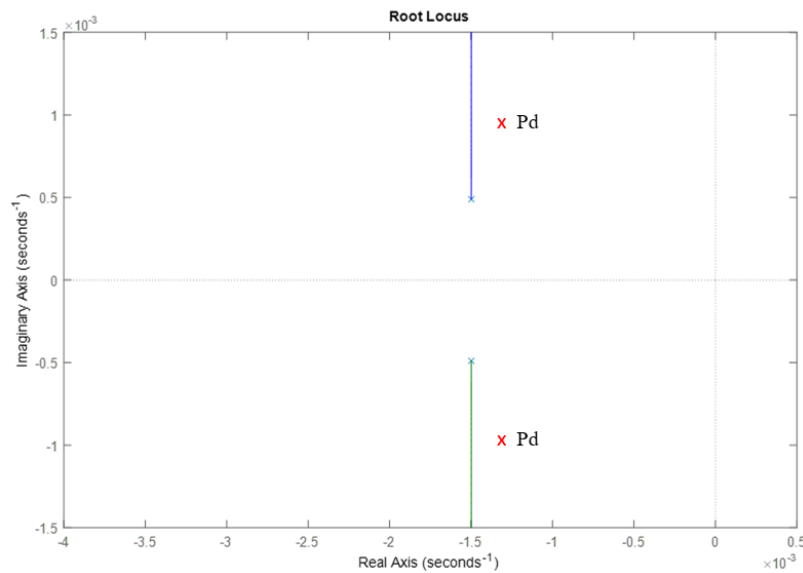


Figura 64. Ubicación de polos deseados en el LGR de la planta.

$$-(\theta_{p1} + \theta_{p2}) = \pm 180^\circ$$

Determinación de ángulos de polos por geometría

$$\theta_{p1} = \tan^{-1} \left(\frac{9.96 \times 10^{-4} - 4.9 \times 10^{-4}}{1.5 \times 10^{-4} - 1.33 \times 10^{-3}} \right)$$

$$\theta_{p1} = 71.4^\circ$$

$$\theta_{p2} = \tan^{-1} \left(\frac{9.96 \times 10^{-4} + 4.9 \times 10^{-4}}{1.5 \times 10^{-4} - 1.33 \times 10^{-3}} \right)$$

$$\theta_{p2} = 83.5^\circ$$

$$-71.4^\circ - 83.5^\circ = \pm 180^\circ$$

$$-154.9^\circ = \pm 180^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -180^\circ + 154.9^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -25.1^\circ \quad \text{Angulo que debe contribuir el compensador}$$

Debido a que la contribución es negativa el diseño se establecerá en la compensación en atraso. Con el fin de asegurar que el error en estado estable sea cero, se añade un integrador en el compensador, de modo que el polo será ubicado en el origen.

$$p_c = 0$$

$$\theta_{pc} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{9.96 \times 10^{-4}}{1.33 \times 10^{-3}} \right)$$

$$\theta_{pc} = 143.2^\circ \quad \text{Angulo del polo del compensador}$$

Teniendo en cuenta la ubicación y el ángulo de contribución del polo del compensador, por geometría, se calcula el ángulo de contribución del cero y su respectiva posición.

$$\theta_{zc} - \theta_{pc} = -25.1^\circ$$

$$\theta_{zc} = -25.1^\circ + 143.2^\circ$$

$$\theta_{zc} = 118.1^\circ \quad \text{Angulo del cero del compensador}$$

$$z_c = -1.33 \times 10^{-3} + \frac{9.96 \times 10^{-4}}{\tan(180 - 118.1)} = -0.8 \times 10^{-3}$$

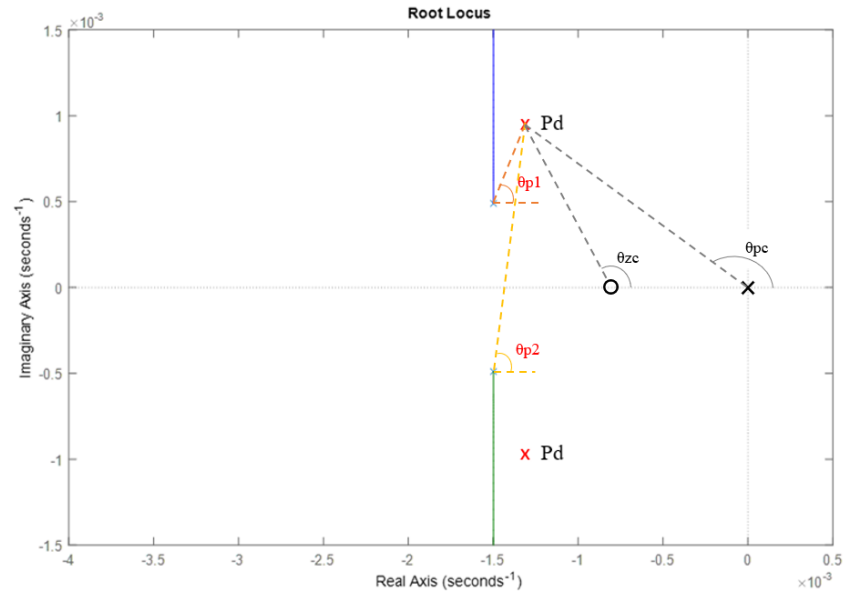


Figura 65. Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos.

Determinación de la ganancia (K_c) del compensador usando la condición de magnitud.

$$\left| K_c \frac{(s + 0.8 \times 10^{-3})}{s} \frac{2.515 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.002997 s + 2.485 \times 10^{-6}} \right|_{s = -1.33 \times 10^{-3} + j 9.96 \times 10^{-4}} = 1$$

$$K_c \approx 0.469$$

Forma final del compensador

$$G_c(s) = 0.469 \frac{s + 0.8 \times 10^{-3}}{s} \quad \text{Función de transferencia del controlador}$$

$$G_c(s) = 0.469 + \frac{3.752 \times 10^{-4}}{s}$$

$$K_p = 0.469 \quad K_i = 3.752 \times 10^{-4}$$

4.3.2.4. Resultados Técnica 2.

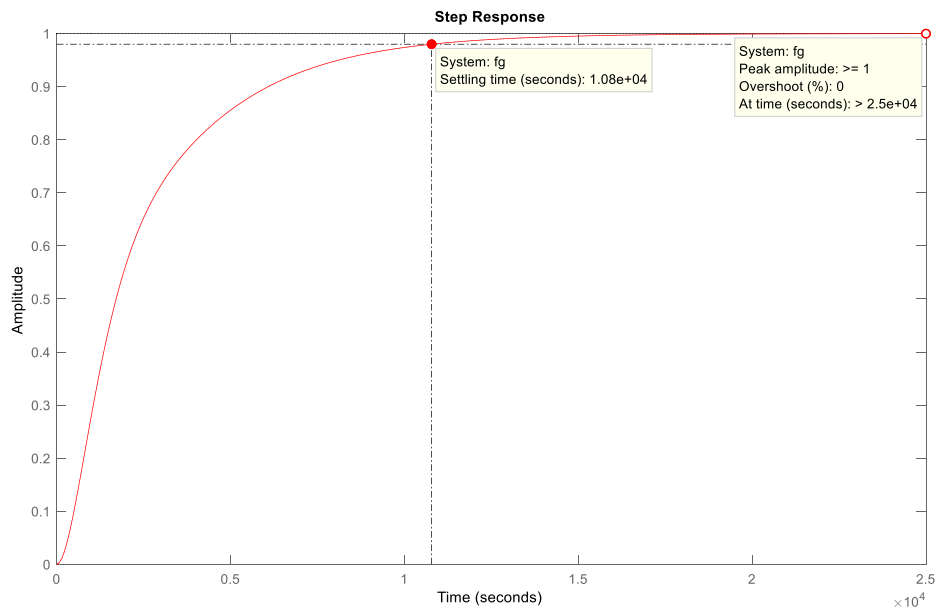


Figura 66. Resultados aplicación del control.

Se puede observar en las características obtenidas de la figura 66, que el tiempo de establecimiento aumento a 10800 segundos, el valor de sobre pico no se incrementó permaneciendo en 0% y el error en estado estable es 0, debido al componente integrador; dichas características no cumplieron los criterios deseados a excepción del error. Aunque los criterios establecidos no se cumplieron en su totalidad, se puede determinar que la aplicación de control por compensación por LGR en esta planta, no expresa muy buenos resultados, ya que el valor de incremento en el tiempo de establecimiento es muy grande (7460 seg), por lo tanto, no se tendrá en cuenta la aplicación de esta técnica para la determinación del control en esta planta.

4.3.3. Aplicación para la medición #6 (PP escamas).

$$G_p(s) = \frac{0.0007198 s + 5.159 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.005041 s + 5.133 \times 10^{-6}} \quad \text{Función de transferencia representativa}$$

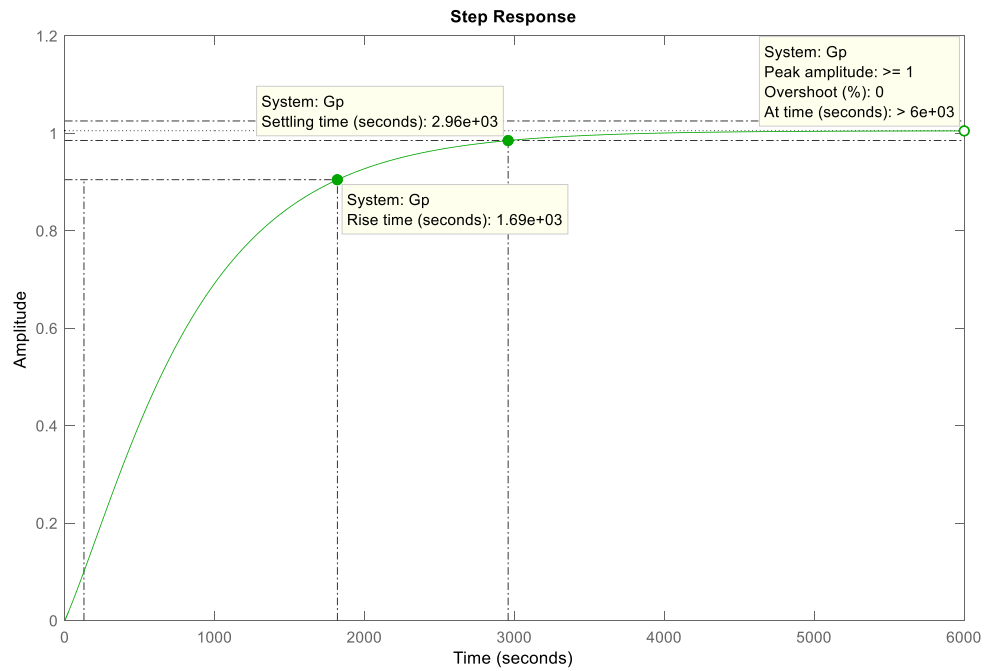


Figura 67. Características de la función de transferencia representativa del PP en escamas.

$$\%OS = 0 \quad t_s = 2960 \text{ seg} \quad t_r = 1690 \text{ seg}$$

$$Kp = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{0.0007198 s + 5.159 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.005041 s + 5.133 \times 10^{-6}} \right)$$

$$Kp \approx 1$$

$$e_{ss} \approx 0.5$$

4.3.3.1. Técnica de control 1. Diseño de control por análisis gráfico.

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la figura 67, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error y el tiempo de proceso y aumentar el valor de sobre pico; con el fin de tener en cuenta el valor pico presentado en las rampas de temperatura presentados en la mayoría de los procesos térmicos robustos.

Criterios de diseño

$$3 \geq \%OS \geq 1 \quad t_s \leq 2900 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

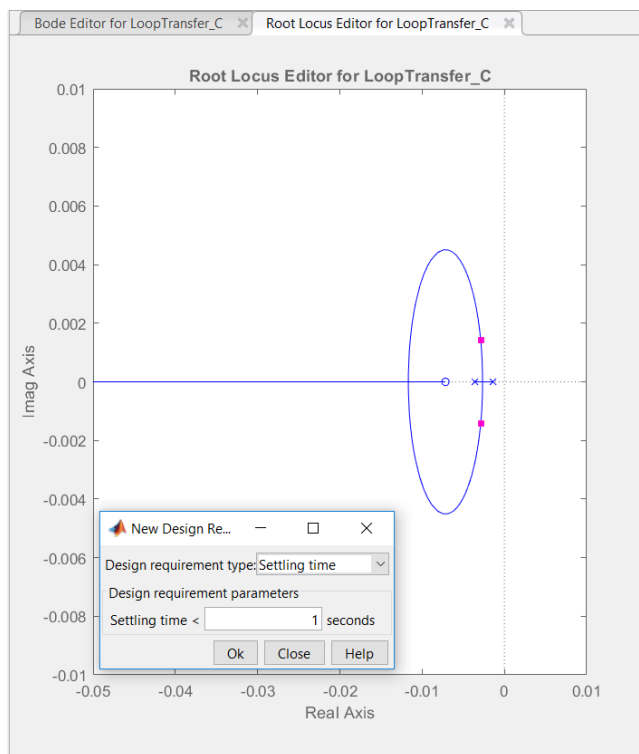


Figura 68. Aplicación de requerimientos al LGR del sistema.

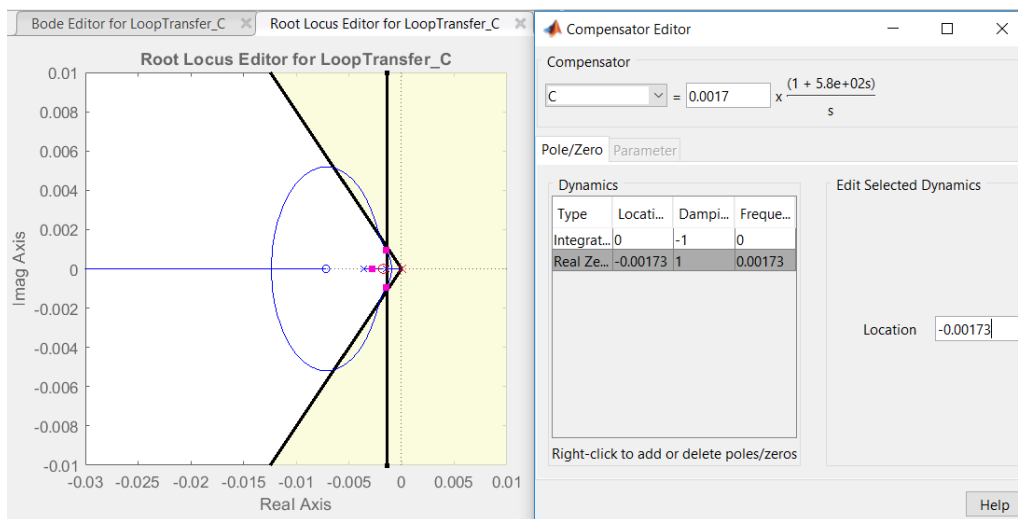


Figura 69. Adición y ubicación de polo y cero al sistema.

Al determinar la ubicación del polo y el cero junto con la constante K satisfaciendo los criterios deseados, se establece el controlador de la siguiente forma:

$$G_c(s) = 0.983 \frac{s + 1.73 \times 10^{-3}}{s} \quad \text{Función de transferencia del controlador}$$

$$G_c(s) = 0.983 + \frac{1.70 \times 10^{-3}}{s}$$

$$K_p = 0.983 \quad K_i = 1.70 \times 10^{-3}$$

4.3.3.2. Resultados Técnica 1.

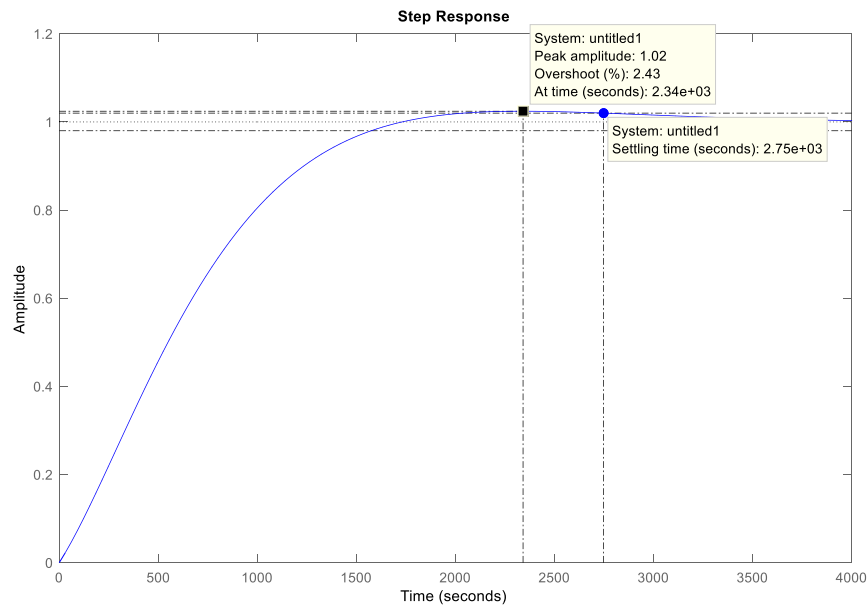


Figura 70. Resultado aplicación del control al sistema.

Se puede observar que tras emplear implementar un control PI con la adición de un cero en el eje real menor a 0 y un polo en el origen, multiplicado a un valor constante, en este caso el valor proporcional, se cumplen con los criterios de diseño establecidos, tal como se observa en la figura 70, de modo que gracias a la forma del control más los resultados de su aplicación en el sistema, se puede establecer esta técnica como un buen método de obtención de control.

4.3.3.3. Técnica de control 2. Compensación por Lugar Geométrico de las Raíces.

Basados en las características obtenidas de la planta ilustradas en la gráfica 31, se establecen los criterios de diseño, buscando disminuir el error, el tiempo de proceso y aumentar el valor de sobre pico.

Criterios de diseño

$$3 \geq \%OS \geq 1 \quad t_s \leq 2900 \text{ seg} \quad e_{ss} \leq 0.01 \text{ seg}$$

$$OS = 0.02$$

$$\xi = -\frac{\ln(0.02)}{\sqrt{\pi^2 + \ln(0.02)^2}} \quad \text{factor de amortiguamiento}$$

$$\xi \approx 0.78$$

$$ts_{2\%} = 2700$$

$$\omega_n = \frac{4}{(0.78)(2700)} = 1.9 \times 10^{-3}$$

$$Pd = -(0.78)(1.9 \times 10^{-3}) \pm j(1.9 \times 10^{-3})\sqrt{1 - (0.78)^2} = -1.48 \times 10^{-3} \pm j1.19 \times 10^{-3}$$

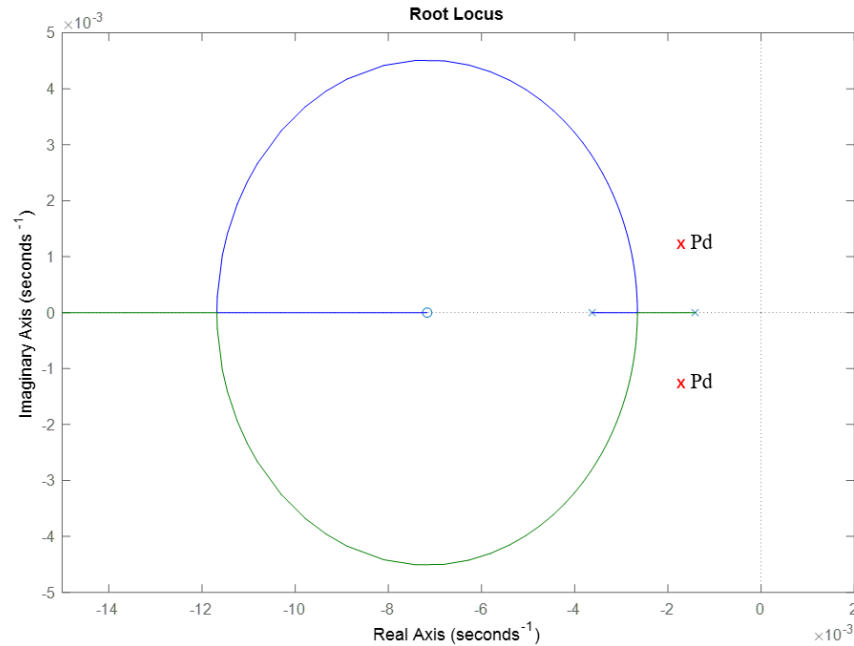


Figura 71. Ubicación de polos deseados en el LGR de la planta.

$$\theta_{z1} - (\theta_{p1} + \theta_{p2}) = \pm 180^\circ$$

Determinación de ángulos de polos por geometría

$$\theta_{z1} = \tan^{-1} \left(\frac{1.19 \times 10^{-3}}{7.17 \times 10^{-3} - 1.48 \times 10^{-3}} \right) = 11.8^\circ$$

$$\theta_{p1} = \tan^{-1} \left(\frac{1.19 \times 10^{-3}}{3.62 \times 10^{-3} - 1.48 \times 10^{-3}} \right) = 29.1^\circ$$

$$\theta_{p2} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{1.19 \times 10^{-3}}{1.48 \times 10^{-3} - 1.42 \times 10^{-3}} \right) = 92.9^\circ$$

$$11.8^\circ - 29.1^\circ - 92.9^\circ = \pm 180^\circ$$

$$-110.2^\circ = \pm 180^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -180^\circ + 110.2^\circ$$

$$\theta_{Pd} = -69.8^\circ \quad \text{Angulo que debe contribuir el compensador}$$

Debido a que la contribución es negativa el diseño se establecerá en la compensación en atraso.

Ubicación de polo y cero del compensador

$p_c = 0$ Posición del polo del compensador

$$\theta_{pc} = 180^\circ - \tan^{-1} \left(\frac{1.19 \times 10^{-3}}{1.48 \times 10^{-3}} \right)$$

$\theta_{pc} = 141.2^\circ$ Ángulo del polo del compensador

$$\theta_{zc} - \theta_{pc} = -69.8^\circ$$

$$\theta_{zc} = -69.8^\circ + 141.2^\circ$$

$\theta_{zc} = 71.4^\circ$ Ángulo del cero del compensador

$$z_c = -1.48 \times 10^{-3} - \frac{1.19 \times 10^{-3}}{\tan(71.4)}$$

$z_c = -1.9 \times 10^{-3}$ Posición del cero del compensador

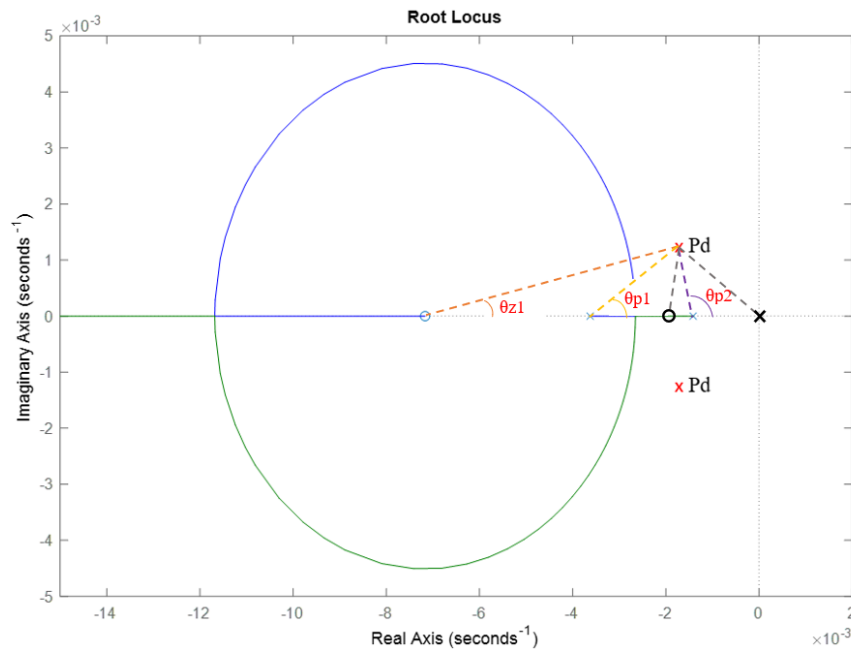


Figura 72. Ilustración geométrica de los ángulos obtenidos.

Determinación de la ganancia (K_c) del compensador usando la condición de magnitud.

$$\left| K_c \frac{(s + 1.9 \times 10^{-3})}{s} \frac{0.0007198 s + 5.159 \times 10^{-6}}{s^2 + 0.005041 s + 5.133 \times 10^{-6}} \right|_{s = -1.48 \times 10^{-3} + j1.19 \times 10^{-3}} = 1$$

$$K_c \approx 1.052$$

Forma final del compensador

$$G_c(s) = 1.052 \frac{s + 1.9 \times 10^{-3}}{s} \quad \text{Función de transferencia del controlador}$$

$$G_c(s) = 1.052 + \frac{1.99 \times 10^{-3}}{s}$$

$$K_p = 1.05 \quad K_i = 1.99 \times 10^{-3}$$

4.3.3.4. Resultados Técnica 2.

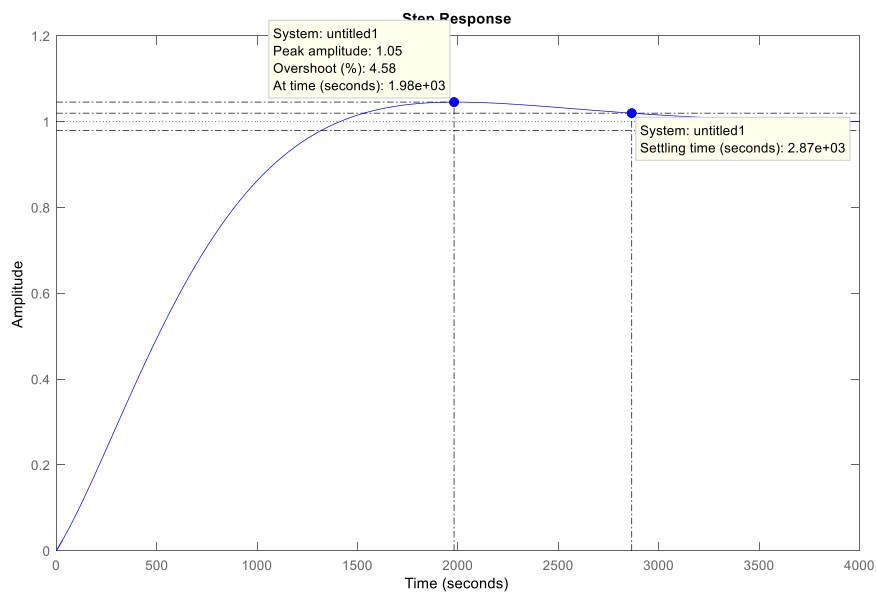


Figura 73. Resultados aplicación del control.

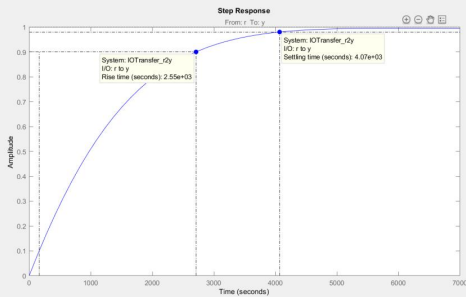
Se puede observar en las características obtenidas de la figura 73, que el valor sobre pico incrementó un 1.58% por encima del valor deseado, el tiempo de establecimiento disminuye solo 30 segundos ingresando en el valor deseado y el error en estado estable es 0, debido al componente

integrador; dichas características cumplieron los criterios deseados a excepción del overshoot. Aunque los criterios establecidos no se cumplieron en su totalidad, se puede determinar que la aplicación de control por compensación por LGR en esta planta, expresa muy buenos resultados, ya que el valor de incremento en el overshoot es pequeño, se puede tener en cuenta en el pico de temperatura en la rampa de calentamiento, por lo tanto, se podría tener en cuenta la aplicación de esta técnica para la determinación del control en esta planta.

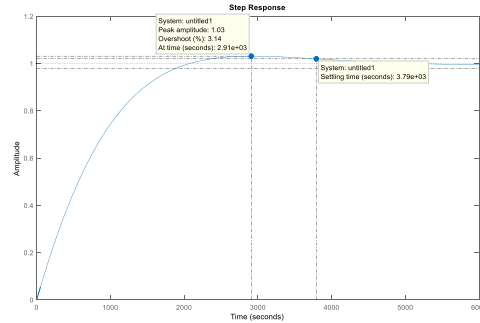
4.3.4. Conclusión Aplicación técnicas de control.

En la tabla 16 se expresan los resultados tras la aplicación de las técnicas de control 1, de las cuales tras las observaciones en cada una sus resultados, el diseño de compensación por análisis gráfico, fue la que mejor responde a criterios deseados satisfaciendo los requisitos del proyecto macro, por ende, es la seleccionada para la aplicación final de control. Las filas sombreadas de color azul denotan los resultados seleccionados tras la aplicación de la compensación por análisis gráfico.

Tabla 16. Resumen resultados del diseño del control.

Nombre y características del sistema	Control	Ilustración grafica del control	Características del sistema controlado
Medición #2 (PP en tapas) %OS = 2.22 % $t_s = 6880$ seg $t_r = 2400$ seg $e_{ss} \approx 0.5$	$0.85 + \frac{7.8625 \times 10^{-4}}{s}$	 Técnica de control 1: Compensador por análisis gráfico	%OS = 0 % $t_s = 4070$ seg $e_{ss} = 0$

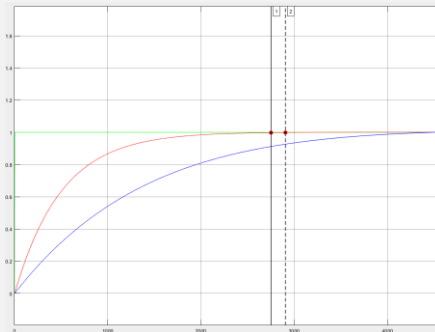
$$1.458 + \frac{1.57 \times 10^{-3}}{s}$$



$$\begin{aligned} \%OS &= 3.14 \% \\ t_s &= 3790 \text{ seg} \\ e_{ss} &= 0 \end{aligned}$$

Técnica de control 1: Compensador por LGR

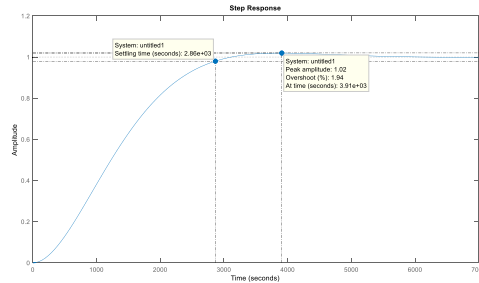
$$\frac{40.7179s + 0.0757}{s^2 + 5.0067s - 0.0071}$$



$$\begin{aligned} \%OS &= 0 \% \\ t_s &= 2800 \text{ seg} \\ e_{ss} &= 0 \end{aligned}$$

Técnica de control 2: Control-Observador por espacio de estados

$$0.539 + \frac{7.71 \times 10^{-4}}{s}$$



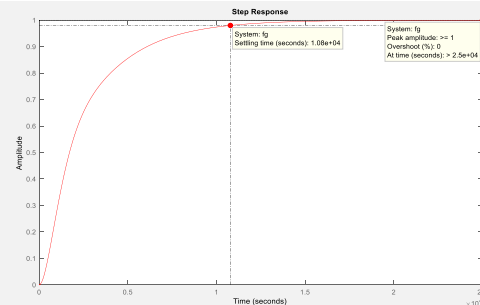
$$\begin{aligned} \%OS &= 1.94 \% \\ t_s &= 2860 \text{ seg} \\ e_{ss} &= 0 \end{aligned}$$

Técnica de control 1: Compensador por análisis gráfico

Medición #3
(HDPE en virutas)

$$\begin{aligned} \%OS &= 0\% \\ t_s &= 3340 \text{ seg} \\ t_r &= 1980 \text{ seg} \\ e_{ss} &\approx 0.5 \end{aligned}$$

$$0.469 + \frac{3.752 \times 10^{-4}}{s}$$



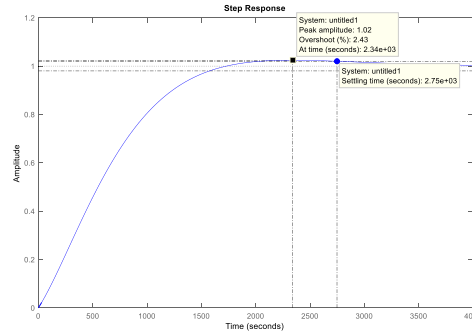
$$\begin{aligned} \%OS &= 0 \% \\ t_s &= 10800 \text{ seg} \\ e_{ss} &= 0 \end{aligned}$$

Técnica de control 1: Compensador por LGR

Medición #5 (PP
en escamas)

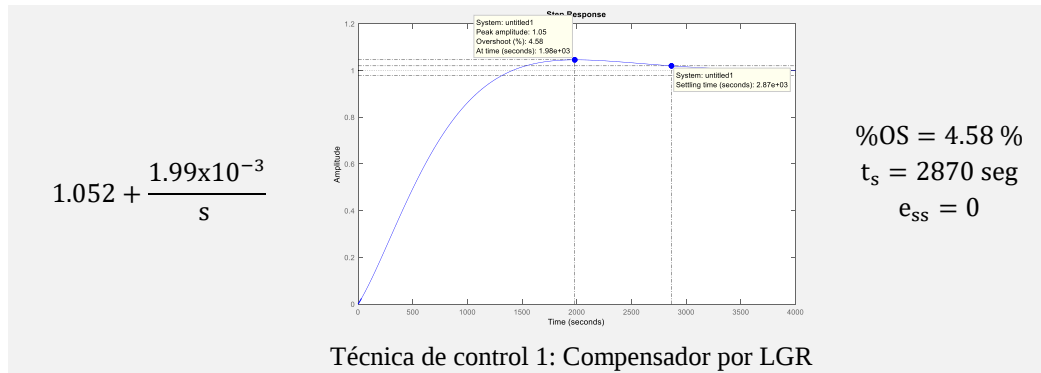
$\%OS = 0\%$
 $t_s = 2960 \text{ seg}$
 $t_r = 1690 \text{ seg}$
 $e_{ss} \approx 0.5$

$$0.983 + \frac{1.70 \times 10^{-3}}{s}$$



$\%OS = 2.43 \%$
 $t_s = 2750 \text{ seg}$
 $e_{ss} = 0$

Técnica de control 1: Compensador por
análisis gráfico



$\%OS = 4.58 \%$
 $t_s = 2870 \text{ seg}$
 $e_{ss} = 0$

Técnica de control 1: Compensador por LGR

4.4. Instrumentación

De acuerdo con la técnica de mayor viabilidad seleccionada, se procederá a determinar una instrumentación adecuada para la implementación de dicho sistema de control.

Se buscarán distintos tipos de instrumentos (sensores, dispositivos electrónicos, informática, etc.) que cumplan con la función requerida para el proceso, luego se hará una comparación entre ellos, viendo la eficiencia, tolerancia, exactitud, precisión, costo, entre otras. Y a partir de esto se seleccionará la instrumentación que sea de mayor factibilidad según el presupuesto y los requisitos del proyecto de conversión de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos mediante pirólisis de la Universidad de Guanajuato.

4.4.1. Selección de instrumentación.

4.4.1.1. Sensor de Temperatura.

4.4.1.1.1. Termopares.

Son los más empleados en los sistemas de medición de temperatura, los cuales son económicos, con una precisión ajustada a distintos procesos y de sencilla instalación.

Su funcionamiento se basa en dos hilos metálicos de diferentes materiales unidos por un extremo, el cual se conoce como junta caliente o junta de medición. Cuenta con otro extremo separado, llamado junta fría, cuya diferencia de temperaturas entre ambas juntas produce un diferencial de tensión que será la señal enviada al dispositivo electrónico.



Figura 74. Termopar

Adaptado de [24].

Según los materiales de lo que estén compuestos, los más comunes son:

Tabla 17. Tipo de termopares.

Termopar	Material	Rango de Temperatura	Uso
----------	----------	----------------------	-----

Tipo J	Combinación de hierro y constatan (aleación de cobre y níquel)	0 °C a 750 °C	Limitado en entornos oxidantes.
Tipo T	Alambre de cobre y otro de constatan	-250 °C a 350 °C	Recomendado en entornos de humedad.
Tipo K	Una junta de Chromega (aleación de cromo y níquel) y alomega (aleación de aluminio y níquel)	-200 °C a 1250 °C	Recomendado para medidas entre 300 y 1100 °C
Tipo E	Combinación de materiales de Chromega y Constatan	200 °C a 900 °C	

Nota: Descripción de los tipos de termopares existentes.

Dentro de los cuales, el Termopar tipo k es el sistema de captación de temperatura más extendido debido a que su rango de temperatura es bastante amplio.

4.4.1.1.2. RTD (*Resistance Temperature Detector*).

Este tipo de sensor basa su funcionamiento en la resistencia a la temperatura del material del que está compuesto. Su estructura general se suele componer de un alambre bien enrollado con un núcleo de vidrio o cerámica a su alrededor.

- **Aplicaciones:** mediciones en entornos industriales, gracias a su inmunidad ante el ruido eléctrico.
- **Materiales:** platino, el molibdeno, el cobre y el níquel.



Figura 75. RTD con cabeza de conexión.

Adaptado de [25].

Tabla 18. Características PT100.

RTD	Descripción	Rango de Temperatura
Pt100	Su nombre hace referencia a los 100 ohm que muestra a los 0°C. Su resistencia aumenta a medida que aumenta la temperatura y su precisión dependerá del modelo que se monte (Din-B, Din-A, 1/3Din o 1/10Din)	-200 °C a 850 °C

Nota: Descripción sencilla sobre las principales características de las RTD.

4.4.1.1.3. Termistores.

Compuestos de materiales semiconductores cuya resistencia a la temperatura varía dependiendo de los grados de esta. Sus electrodos internos detectan el calor, midiéndolo por impulsos eléctricos.



Figura 76. Termistor NTC.

Adaptado de [26].

Tabla 19. *Tipos de termistor según su funcionamiento.*

Termistor	Descripción	Material
NTC	Amplios rangos de temperaturas. A más temperatura, menos resistencia	Magnesio, cobre, níquel o cobalto
PTC	Cambios drásticos en la resistencia y la temperatura que se desea controlar. A mayor temperatura, mayor resistencia	Titanio de bario

Nota: Descripción sencilla sobre las principales características de los termistores.

4.4.2. comparación de sensores.

Tabla 20. *Comparación de sensores de temperatura según sus características.*

INSTRUMENTO	TERMOCUPLA	TERMORESISTENCIA	TERMISTOR
Rango	-200 a 2800 °C	-200 a 850 °C	
Tipos	J, K, S, E	RTD, Pt100	NTC, PTC
Estabilidad	Baja	Alta	
Exactitud	Media	Alta	
Ventajas	Económico	Más estable	Señal de salida alta
	Autoalimentado	Más Preciso	Rápido
	Amplia gama de temperaturas	Más lineal que los termopares	Medición a dos hilos
	Diferentes formas		Más sensible
Desventajas	No lineal	Costoso	No lineal
	Menos estable	Necesita fuente de alimentación	Necesita fuente de alimentación
	Menos sensible	Lento	Frágil
	Bajo voltaje (señal)	Poca variación en la resistencia	Temperatura limitada

Requiere referencia Autocalentamiento Autocalentamiento

Nota: Descripción característica sobre las ventajas y desventajas presentes en cada sensor de temperatura.

4.4.2.1. Electrónica.

Tabla 21. Descripción característica de los sistemas de cómputo.

MICROCONTROLADOR	FRESCALE	PIC	ATMEL
Aplicaciones	Diseños en los que el manejo del espacio es crítico los requerimientos de procesamiento no son muy grandes		
Lenguaje de Programación		Ensamblador, C, C++, Basic	C, C++, Basic
IDE (Ambiente integrado de Desarrollo)		MPLAB PICSIMULATOR PICBASIC	AVRstudio Ensamblador BASCOM
Interfaces de Programación		Puerto serial, realizada a alto voltaje >5Vdc (Uso de circuitos externos).	Puerto serial Puerto Paralelo Programador USB
Señal		Cristal externo que hará la función de oscilador de reloj	Bloque oscilador formado por un arreglo RC
Potencia		Consumo más alto que los microcontroladores ATMEL	Reducido consumo tanto en voltaje como corriente
Costo		Económicos	Más económicos que los PIC

Tabla 22. Características de funcionamiento según tipo de PLC.

	ATMEL ATMEGA16	Microchip PIC16F877A	Freescall MC68HC908AP16
RAM	1024	368	1024
ROM	16KBytes	14.3KBytes	16KBytes
EEPROM	512Bytes	512Bytes	×
Puertos I/O	32	33	32
Oscilador	Interno 8MHz Externo 16MHz	Externo 20MHz	Interno 32 MHz

Tiempos de instrucción	1-5 Cicl. reloj	4/8 Cicl. reloj	1-7 Cicl. reloj
Arquitectura	RISC	RISC	CISC
Registros de Trabajos	32	1	1
USART	✓	✓	✗
I ² C	✓	✓	✓

Tabla 22. (Continuación).

SPI	✓	✓	✓
ADC	8 Canales 10 bits	8 Canales 10 bits	8 Canales 10 bits
JTAG	✓	✗	✗
Multiplicador	✓	✗	✓
Estado	Activo	Activo	Obsoleto

4.4.3. PLC (Controlador Lógico Programable).

Son dispositivos electrónicos muy usados en Automatización Industrial. Un PLC controla la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales, procesan y reciben señales digitales y analógicas y pueden aplicar estrategias de control. Diseñado para programar y controlar procesos secuenciales en tiempo real.



Figura 77. PLC + módulos.

Adaptado de [27].

Las principales características de los PLCs que Logicbus ofrece son:

- Fácil de usar y potentes conjuntos de instrucciones
- Driver de comunicación abierto
- Entorno operativo de fácil uso y gratuito
- Tecnología del núcleo SoC
- Potentes funciones de comunicación

Existen 2 familias de PLC, la versión básica con posibilidades de expandirse, y la versión avanzada cuya frecuencia de estradas es superior, así como número de entradas y salidas a las cuales puede extenderse. A continuación, se describe las características principales de cada familia:

Tabla 23. *Tipos y series de expansión en PLC's.*

PLC Expandibles Serie FBs	Expandible Serie B1	No Expandibles Serie B1z
Función de comunicación (hasta 5 puertos, incluyendo RS232, RS485, USB, Ethernet, CANopen y comunicación inalámbrica GSM y ZigBee)	Función de comunicación (hasta 2 puertos, incluyendo RS232, RS485, USB, Ethernet y ZigBee)	Función de comunicación (1 puertos RS232, USB)
Frecuencia Máxima de 200 KHz (920 KHz modelo Fbs-MN) en las Entradas/Salidas Digitales	Frecuencia Máxima de 50Khz en las Entradas/Salidas Digitales	Frecuencia Máxima de 50Khz en las Entradas/Salidas Digitales
Expandible hasta 256 entradas y 256 salidas digitales Reloj RTC integrado	Expandible hasta que la suma de entradas y salidas = 80	No expandible
PLC Avanzado		

5. Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1. Observaciones y Conclusiones

5.1.1. Identificación.

En el desarrollo del proceso de identificación del sistema se presentan seis mediciones de pirolisis a dos tipos de plástico (HDPE y PP) en diferentes presentaciones, cantidades y temperaturas, dentro de las cuales se observa de manera general que:

- El comportamiento térmico de ambos plásticos muestra que la velocidad de descomposición es independiente de la masa suministrada al reactor, pero dependiente de la presentación del material a pirolisar.
- La temperatura promedio es una curva que representa el comportamiento de la temperatura dentro del reactor con esta se puede realizar la identificación del sistema para construcción de su modelo matemático.
- Todas las curvas de temperatura presentan un comportamiento subamortiguado debido a los sobre picos presentados en la primera rampa de calentamiento.

Con esto se concluye que las curvas de temperatura varían de acuerdo con las características de presentación del material y del Setpoint; ya que dependiendo su presentación la incidencia térmica cambia. Debido a lo anterior fue necesario establecer 3 sistemas diferentes, todos subamortiguados, de los cuales están presentes los dos tipos plásticos (HDPE y PP), pero uno de ellos en dos presentaciones: PP en escamas y PP en tapas.

5.1.2. Control.

Se diseñó el control mediante dos técnicas de control diferentes, técnica de control de compensación por LGR y compensación por análisis gráfico (Técnica de control 1), la cual está basada en control convencional y la técnica de control-observador por espacio de estados (Técnica de control 2), basada en control moderno.

La técnica de control 1, se aplicó a cada una de las plantas manteniendo un esquema PI (Proporcional- integral) dado que el requisito de control es la disminución del error. Tras su implementación de compensación por LGR y por análisis gráfico, se observó que los resultados obtenidos son similares, diferenciándose solo en que la compensación por LGR no siempre cumple al 100% con los criterios deseados, especialmente en las características del tiempo de establecimiento y overshoot, pero en el e_{ss} en todas logra un valor de cero, mientras que la compensación por análisis gráfico cumple correctamente los criterios establecidos según la compensación grafica realizada. Por lo cual se concluye que de estas dos implementaciones la que mejor representa la técnica de control 1 es la compensación por análisis gráfico.

Por otro lado, la técnica de control 2 fue aplicada solo a una de las plantas con el fin de analizar su comportamiento, ya que la técnica de control 1 representa una buena opción para la implementación final de control, sin embargo, en sus resultados se observa que la técnica de control por espacio de estados también representa una buena respuesta de control del sistema cuando tenemos en cuenta la variación de los polos deseados para su diseño. Finalmente, después de realizar pruebas de simulación ante perturbaciones de las dos técnicas de control, plasmadas en las gráficas de la tabla 11, se concluye que ambos controles presentan una buena estabilidad ante la posibilidad de perturbaciones y distintas entradas. A pesar de ello la técnica de control 1 de

compensación por análisis gráfico, revela ser la mejor opción de control, no solo por sus resultados obtenidos, si no por su fácil implementación a comparación del control por espacio de estados. Concluyendo que para este tipo de sistema SISO se prefiere emplear la teoría de control convencional para la aplicación del control, ya que esta teoría se especializa en este tipo de sistemas, mientras que la representación de estados en la teoría de control moderna al ser aplicable a sistemas más complejos con múltiples entradas y salidas (MIMO), su aplicación representa mayor complejidad.

5.1.3. Instrumentación.

En la sección 3.2 del libro están plasmados los requerimientos por parte del cliente que buscan mejorar no solo en la parte del software del sistema, sino también su funcionamiento en el hardware, por lo cual se plantearon algunas alternativas en la parte de instrumentación, plasmadas sección 3.2.3 y 4.5, las cuales se podrán tener en cuenta en aplicaciones y mejoras físicas futuras del proyecto. De modo que se concluye que el desarrollo de este proyecto se basó netamente en el diseño, sin embargo, se plantean soluciones para tener en cuenta en una aplicación física futura.

5.2. Trabajos Futuros

El desarrollo del diseño en este proyecto soluciona la necesidad de mejorar el proceso térmico del sistema de pirolisis encontrado actualmente en el campus Irapuato-Salamanca de la universidad de Guanajuato, sin embargo, la responsabilidad de su implementación física ya sea en el sistema actual o en el desarrollo futuro de un nuevo prototipo mejorado de pirolizador esta acargo de la Universidad de Guanajuato. Por otra parte el proyecto no solo deja como base de investigación las

mediciones realizadas, el proceso de identificación del sistema y los resultados obtenidos de la aplicación de las técnicas de control, si no también anexos que complementan la información del sistema de pirolisis actual, tal como el esquema eléctrico y la explicación de funcionamiento, además del planteamiento de ideas de implementación en la instrumentación que se deben tener en cuenta en un futuro cuando el grupo de investigación inicie en el desarrollo del proyecto de la elaboración de un sistema de pirolisis continua.

Finalmente, para una implementación futura del control diseñado se recomienda se incluya en el diseño del pirolizador un PLC que permita el registro de las temperaturas y el ajuste de los parámetros del controlador, dado que, aunque como muestra esta investigación se requiere un control PI las constantes del controlador varían con relación al tipo de plástico y su presentación.

Bibliografía

- [1] Greenpeace , «GREENPEACE,» 2 Agosto 2018. [En línea]. Available: <https://es.greenpeace.org/es/trabajamos-en/consumismo/plasticos/datos-sobre-la-produccion-de-plasticos/#>. [Último acceso: 27 Noviembre 2017].
- [2] DINERO, «Hacia un mundo que consume menos pastico: ¿Qué pasa con Colombia?,» *Dinero*, 2016.
- [3] Greenpeace, *La contaminación plastica en Colombia y el mundo*, Publicaciones Greenpeace, 2018.
- [4] J. M. R. Ávila, *Diseño, construcción y pruebas de prototipo para la conversión termoquímica de residuos plásticos en hidrocarburos líquidos*, Salamanca, 2016, p. 7.
- [5] J. M. Riesco Ávila, C. I. Barrpon Hernandez, J. B. Vásquez Hernández, F. Elizalde Blancas, R. A. Zárraga Núñez y M. V. Basavanag Unnamatla, *Conversión de residuos plásticos provenientes de la agricultura en hidrocarburos líquidos mediante pirolisis*, Salamanca, 2017, pp. 3-4.
- [6] J. J. Salt, A. Cuenca , V. Casanova y A. Correcher, *CONTROL AUTOMATICO Tiempo Continuo y Tiempo Discreto*, Barcelona, España: Reverté, S.A, 2016, pp. 15, 25 .
- [7] National Instruments, «NATIONAL INSTRUMENTS,» [En línea]. Available: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. [Último acceso: 12 Noviembre 2017].

- [8] V. M. Alfaro, *Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto*, San José, 2001.
- [9] Universidad Nacional de Tucumán FACET, *Determinación de parámetros dinámicos y estáticos de funciones de transferencia*, p. 6.
- [10] K. Ogata, «Controladores PID y Controladores PID,» de *Ingeniería de control moderna*, Madrid, PEARSON EDUCACIÓN, 2010, pp. 567-648.
- [11] Anonimo, *Componentes sistemas de control*, pp. 52-69.
- [12] E. B. CEUPE, «Centro Europeo de Postgrado,» octubre 2018. [En línea]. Available: <https://www.ceupe.com/blog/que-es-la-pirolisis.html>. [Último acceso: 09 Marzo 2019].
- [13] I. E. R. Girón, *Estudio de las propiedades y aplicaciones industriales del polietileno de alta densidad (PEAD)*, 2005, p. 17.
- [14] PETROQUIM, «Que es el polipropileno,» [En línea]. Available: <http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/>. [Último acceso: 9 marzo 2019].
- [15] ICONTEC, *GUIA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS PLÁSTICOS*, Bogotá: ICONTEC, 2004.
- [16] ECOCE, «ECOCE,» 2002. [En línea]. Available: <http://ecoce.mx/quienes-somos.php>. [Último acceso: 9 Marzo 2019].
- [17] E.-M. C. Mădălina Mircioiu, *Robust Control and Optimization for a Petrochemical Pyrolysis Reactor*, Cătălin Dimon, Morocco , 2010.

- [18] A. J. F. VILLAQUIRAN, *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA UNIDAD DE INVESTIGACION EN PIRÓLISIS CONTINUA DE BIOMASA*, Santiago de Cali, 2011.
- [19] O. K. O. G. A. T. O. K. Yuriy Kondratenko, *Automation of Control Processes in Specialized Pyrolysis Complexes Based on Web SCADA Systems*, Bucarest, 2017.
- [20] G. A. Obando, *Condiciones de diseño de un Reactor de Pirolisis a escala de laboratorio para la obtención de Biocarbón a partir de Residuos Orgánicos Sólidos (ROS)*, Manizales, 2015.
- [21] R. U. Parrazales, «Diseño, Simulación y Construcción de un Control PID Aplicado a un Sistema Térmico,» *POLIBITS*, vol. II, n° 15, pp. 11-19, 1995.
- [22] R. R.-P. V. F.-B. F. C.-G. Ivón O. Benitez González, *DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DEL PROCESO DE VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LA ZONA DE IGUALACIÓN EN EL HORNO DE CALENTAMIENTO DE PALANQUILLAS*, 2011.
- [23] P. Ríos, *PROYECTO DE BIOCOMBUSTIBLE: PLANTA DE PIRÓLISIS*, Buenos Aires, 2011.
- [24] «geekfactory,» 14 Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/termopar-con-arduino-y-max6675-medicion-de-temperatura/>. [Último acceso: Marzo 2019].
- [25] Noshok, «NOSHOK,» [En línea]. Available: https://noshok.com/temp_910_series_industrial.shtml. [Último acceso: Marzo 2019].

- [26] Electronica.HH, «Mercado Libre,» [En línea]. Available: https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-670879036-ntc-8d-20-ntc8-ntc8d-ntc8d2-termistor-_JM. [Último acceso: Marzo 2019].
- [27] Logicbus, «Logicbus,» [En línea]. Available: <https://www.logicbus.com.mx/plc.php>. [Último acceso: Marzo 2019].
- [28] Panasonic, *FP0 Series Programmable Controller*, 2004, p. 28.
- [29] Panasonic, *FP0 Thermocouple Unit Technical Manual*, 2011.
- [30] R. I. INC, *Single Phase Controller*.
- [31] P.-S. S. P. Suplies, *IDECPS5R-S Switching Power Suplies*, 2013.
- [32] R. I. INC., *Temperature Sensors*, 1995.
- [33] Panasonic Corporation, *AQ-Q RELAYS*, 2012.
- [34] OMRON, *General Purpuse Relay*.
- [35] R. I. INC, *Single Phase Power Controller*.

Apéndices

Apéndice A. Arquitectura del Piroлизador

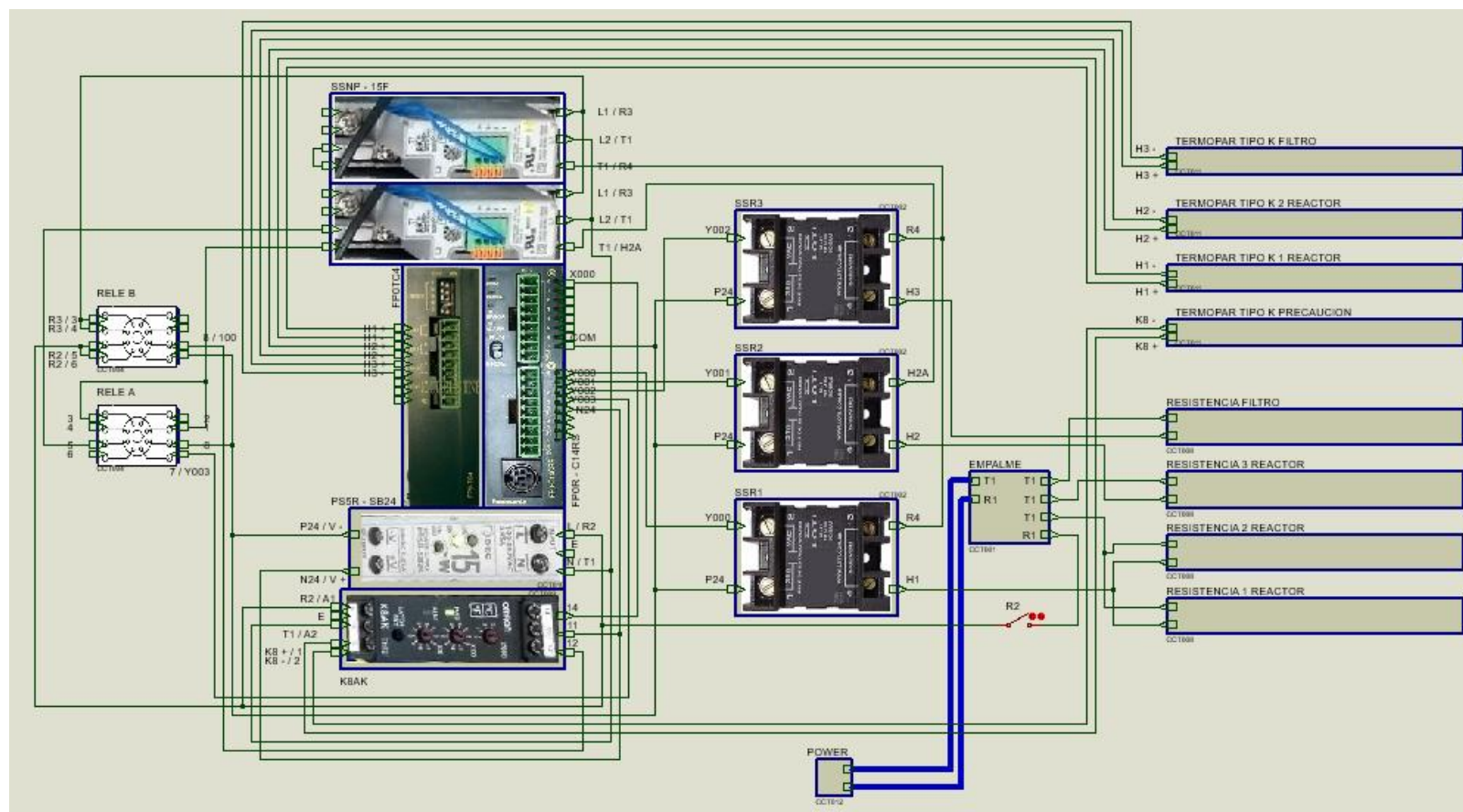


Figura 78. Instrumentación del piroлизador.

La composición interna del reactor de pirólisis se encuentra determinada por la estructura presentada en la figura 78, a continuación, se enumeran los instrumentos electrónicos que lo componen y se hace una breve descripción acerca de la función que cumple cada componente en el reactor, lo cual se determinó mediante las distintas pruebas realizadas con el equipo y la indagación de la funcionalidad de los dispositivos llegando a la siguiente conclusión.

1. PLC FP0 – C14RS

El reactor tiene como dispositivo principal un PLC FP0-C14 RS de Panasonic, este dispositivo se encarga de recibir la información suministrada por tres de los termopares tipo K ($H1\pm$, $H2\pm$ y $H3\pm$), a través del módulo de temperatura FP0TC4 (tres primeros canales) y del cual mediante el control de temperatura programado por el fabricante, se envía la señal deseada a los tres relevadores de estado sólido presentes. Además, se encarga de transmitir la información del sistema a la HMI.

Tabla 24. *Características FP0-C14RS*

Número de E/S	Sin expansión (solamente control): 8 (E) y 6 (S) W/ expansión 1: Máx 62 W/expansión 2: 110
Memoria de programa	EEPROM
Capacidad de programa	2.7 K steps
Tipos de instrucciones	Básicas: 83 Nivel alto: 115
Velocidad de operación	0.9µs (instrucciones básicas)
Número de pasos ladder	128
Número de subrutinas	16 subrutinas
Contador de alta velocidad	1 fase/4 puntos (10 kHz) 2 fases/2 puntos (2kHz)
Interrupciones	7 programas (externo 6 puntos, interno 1 punto)
Interrupción periódica	0.5ms a 30s
Escáner constante	Disponible
Voltaje de operación	24 VDC (21.6 a 26.4 VDC)
Temperatura de ambiente	0°C a 55°C
Temperatura de almacenamiento	-20°C a 70°C
Humedad ambiente	30 a 85% RH (no condensable)
Humedad de almacenamiento	30 a 85% RH no ondensable

Resistencia de vibración

10 a 55 Hz, 1 sweep/min. Amplitud doble de 0.75 mm, 10 min. En 3 ejes

Inmunidad de ruido

1,00V(p-p) con ancho de pulso de 50ns 1 ms (usando un simulador de ruido)

Condición de operación

Libre de gases corrosivos

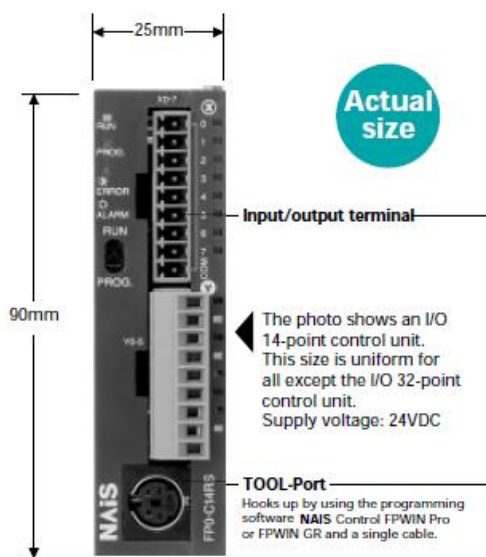


Figura 79. Diagrama de bloques del programa

Adaptado de [28].

2. Módulo de temperatura FP0TC4

Tabla 25. Características FP0TC4.

Entradas	4 canales
Rango de entradas	Termopar tipo K, J: -100°C a 500°C Termopar tipo T: -100°C a 400°C Termopar tipo R: 0°C a 1500°C
Resolución	0.1°C
Ciclo	300 ms: usando 2 canales de entrada 500 ms: usando 4 canales de entrada
Exactitud	K y J: 0.8°C T: 0.8°C R: 3°C (0° a 99.9°C), 2.5°C (100°C a 299.9°C), 2°C (300°C a 1500°C)
Impedancia de entrada	Más de 1MΩ



Figura 80. Módulo de temperatura FP0TC4.

Adaptado de [29].

3. Reguladores de fase SSNP-15F

El reactor cuenta con dos controladores de fase, encargados de controlar la carga de resistencia del circuito. Si la carga tiene una inductancia mayor, la fase actual se retrasa en comparación con el voltaje y puede causar una mal operación al cambiar el flujo de corriente. En pocas palabras el regulador de fase está encargado de dar paso a la alimentación de las resistencias eléctricas y a su vez controlar que esta alimentación se mantenga en condiciones de tensión y corriente reguladas para que no existan fallos en las resistencias por corrientes picos o caídas de voltaje antes de su activación.

Tabla 26. Características Regulador de fase.

Impedancia de Entrada	$250\Omega \pm 20\%$
Rango Corriente de Entrada	4 a 20 mA DC
Rango Voltaje de Carga	85 a 264 VAC rms (Onda senoidal)
Rango Corriente de Carga	100 mA AC rms a máx corriente de carga
Voltaje de caída estado On	Debajo de 3.0 VAC rms (a máx potencia de salida)
Off State Leakage Current	Debajo de 9 mA AC rms (Voltaje de carga 200 Vrms, 60 Hz)

Rango de ajuste de potencia	0 a 95%
Rango Frecuencia de voltaje de carga	50 Hz/ 60Hz Cambio-automático 47 a 53 Hz / 57 a 63 Hz
Consumo de corriente Entrada analógica	5.1 mA rms (100 Vrms, 50 Hz)
Tiempo de respuesta	Below 1 cycle without soft start
Tiempo Rampa de subida/Rampa de bajada	Aprox. 0.5 s a 13 s
Peso	Aprox 260 g
Estándar	UL508 categoría No. NRNT2

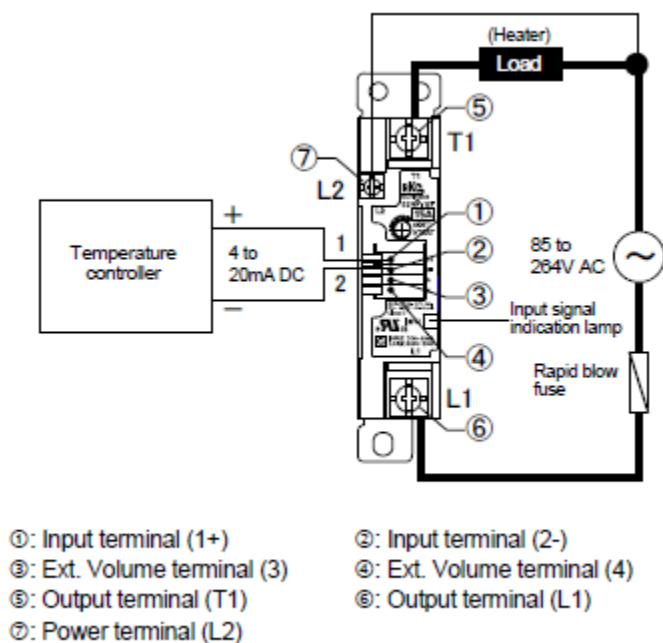


Figura 81. Esquema SSNP-15F

Adaptado de [30].

4. Fuente PS5R-SB24

La fuente básicamente posee 5 puertos de los cuales se utilizan cuatro, dos de entrada correspondientes a la fase L (R2) y Neutro (T1), y las salidas V+ (N24) y V- (P24). La

nomenclatura en paréntesis es la utilizada como referencia en toda la conexión de los cables del circuito.

Tabla 27. *Características Fuente PS5R SB24.*

Voltaje de entrada	100 a 240 V AC (Rango de voltaje: 85 a 264 V AC/100 a 370V DC)
Frecuencia de entrada	50/60 Hz
Corriente de entrada	A 100V AC: 0.45A máx A 200V AC: 0.3A máx
Eficiencia típica de entrada	A 5V DC: 69% A 12V DC: 75% A 24V DC: 79%
Voltaje/Corriente de salida	24V/0.65A
Rango ajustable de voltaje	±10%
Tiempo de inicio	200 ms máx
Tiempo de levantamiento	100 ms máx
Temperatura de operación	-10°C a 65°C (sin congelamiento)
Temperatura de almacenamiento	-25°C a 75°C (sin congelamiento)
Humedad de operación	20 a 90% RH (sin condensación)
Resistencia vibración	10 a 55 Hz, amplitud de 0.375 m, 2 horas cada uno en 3 ejes



PS5R-SB12
PS5R-SB24

Figura 82. Fuente PS5R SB24.

Adaptado de [31].

5. Relé térmico K8AK

Actúa como módulo de precaución en caso de que el sistema se sobrecargue y adquiriera una temperatura superior a 600 °C, teniendo en cuenta que en las características del reactor la temperatura máxima que se establece es de 500 °C. El módulo posee 7 puertos en uso los cuales son: los puertos de entrada A1 (R2 o fase), A2 (T1), 1 (K8 + Termopar tipo K de precaución) y 2 (K8 -), además de los puertos de salida 11, 12 y 14 correspondientes a N24, X000 (Entrada 1 del PLC) y 100 conectado al puerto 8 del Relé B de control de fase.

Tabla 28. Características K8AK.

Rango de voltaje permitido	85% a 110% de voltaje de poder
Potencia consumida	5 VA Máx
Entrada de sensores	Termopares: K, J, T, E; PT100, Pt1000
Salida de relé	SPDT relé (5 A a 250 VAC, carga resistiva)
Temperatura de ambiente de operación	-20°C a 55°C (no condensación)
Humedad de ambiente de operación	Humedad relativa: 25% a 85%
Temperatura de almacenamiento	-25°C a 65°C
Ciclo de muestreo	100 ms



Figura 83. Relé térmico K8AK.

Adaptado de [32].

6. Relés de estado sólido AQA2

El pirolizador cuenta con tres relés de estado sólido normalmente cerrado, de los cuales el primero se encarga de controlar la tensión en las resistencias 1 y 2 del reactor (H1), que en el análisis que se hizo del sistema se presume que se encuentran en espiral alrededor del reactor, un segundo encargado de controlar una resistencia en la parte inferior (H2) y finalmente un relé para la resistencia que se encuentra en el filtro de gases (H3). Para los tres relés, los puertos de entrada están determinados por P24 (negativo del sistema digital) y Y000, Y001 y Y002, salidas directas del PLC. En el campo correspondiente a la carga, se encuentra la fase R4 (Controlador de fase 2), para los relés 1 y 3. Para el segundo relé (Resistencia inferior) se encuentra la fase H2A del controlador de fase 1.

Tabla 29. Características AQA211VL.

Serie	AQ-A
Circuito	SPST-NO
Tipo de salida	AC, Zero Cross
Corriente de carga	15 ^a
Voltaje – Entrada	4 a 32 VDC
Voltaje – Carga	75 a 250 V
Tiempo de operación	Max. ½ cycle of voltage sine wave + 1ms



Figura 84. Relé de estado sólido AQA211VL.

Adaptado de [33].

7. Relés LY1F y LY2F

Los relés LY1F y LY2F cumplen un papel muy importante en el uso y activación de los controladores de potencia de fase, en el caso del Relé A (LYF2) su función es la conmutación alterna de resistencias en la configuración del controlador de potencia de fase 1, simulando un cambio de resistencias como si fuese un potenciómetro, el cual emplea para adecuar las características del controlador de potencia empleada en la resistencia térmica del quemador de gases, la acción de dicho relé es activada por la salida **Y003** del PLC, en donde se asume que por condiciones de programación del fabricante se quiere controlar en ciertos casos la potencia suministrada a la resistencia térmica del quemador. Por otro lado la función del relé B (LFY1) es desactivar la función de los controladores de potencia de fase 1 y 2 en caso de que el sistema total falle por sobrecalentamiento en el reactor, es decir cuando el relé monitor de temperatura es activado por una temperatura mayor a la temperatura de referencia estipulada por el fabricante, en ese momento la activación es ejecutada por el pin 12 del relé monitor en donde debido al fallo de temperatura el pin pasa de estar normalmente cerrado (NC) a normalmente abierto (NA), inhibiendo así el funcionamiento de ambos controladores de potencia dejando el sistema total en estado de alarma deteniendo el proceso.

Tabla 30. *Características Relés LY1F y LY2F.*

Resistencia de contacto	50 mΩ máx.
Tiempo de operación	25 ms máx.
Frecuencia de operación	Mecánica: 18000 operaciones/hora Bajo carga: 1800 operaciones/hora
Fuerza Dieléctrica	2000 VAC, 50/60 Hz por 1 minuto 1000 VAC, 50/60 Hz por 1 minuto entre contactos de la misma polaridad
Temperatura ambiente de operación	-40°C a 70°C
Humedad	35 a 85% RH
Peso	SPDT: 40 g (1.41 oz).



Figura 85. Relé LY1F y LY2F.

Adaptado de [34].

8. Resistencias eléctricas

El sistema contiene cuatro resistencias eléctricas de calentamiento de 455W, éstas resistencias se cree han de estar ubicadas dos alrededor de las paredes del reactor, probablemente en forma de espiral, una en la parte inferior del reactor y otra en el filtro de gases no condensables, sin embargo esta información no se afirma con total veracidad, debido a que, en el manual no se encuentra ninguna información acerca de la estructura interna del reactor y éste nunca ha sido desarmado por parte del grupo de investigación.



Figura 86. Resistencias eléctricas del reactor.

9. Termopares Tipo K

Se cuenta con cuatro termopares tipo K, que se encargan de sensar la temperatura en el filtro de gases no condensables (H3±), en la parte inferior del reactor (H1±), en la parte media del reactor (H2±) y por último estar alerta a una sobrecarga y elevación no deseada de temperatura (K8±).



Figura 87. Termocupla tipo k marca RKC.

Apéndice B. Configuración ToolBox

Descripción de pasos para la configuración:

1. Identificar los parámetros de entrada y salida del proceso de pirólisis, los cuales varían dependiendo el tipo de plástico empleado.
2. Guardar los parámetros en forma de vector en el workspace de Matlab, posteriormente importarlos para la construcción de la función de transferencia, una vez llamada la función *SystemIdentification*; se debe tener en cuenta que los vectores de entrada y salida deben tener las mismas dimensiones.
3. Ejecutar el comando *SystemIdentification* en el workspace de Matlab, donde se abrirá una ventana, tal como se muestra en la gráfica 5; en la parte izquierda en los espacios marcados seleccionar la opción ***import data*** para importar los parámetros de entrada y salida del sistema en forma de vector, en el caso de la curva de reacción de temperatura, la entrada del sistema es el Setpoint o temperatura referencia para la pirólisis y la salida del sistema será la respuesta del proceso realizando el calentamiento hasta alcanzar el Setpoint, es decir los datos de temperatura en el tiempo hasta alcanzar el rango estimado.

En el recuadro de ***Data Information*** se podrán ingresar los parámetros de tiempo de muestreo y tiempo de inicio del sistema.

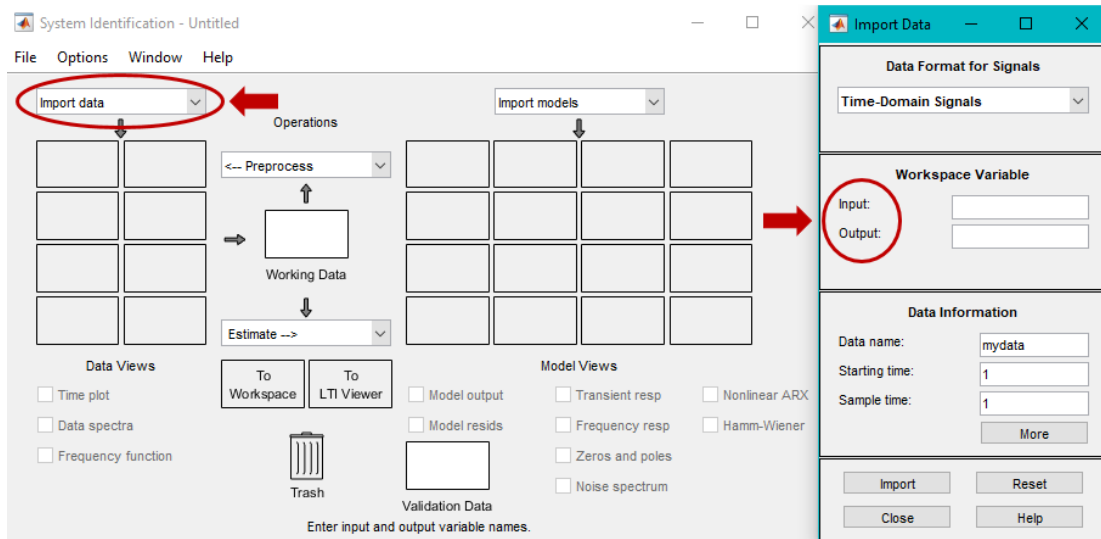


Figura 88. Herramienta Ident-Matlab.

- Una vez escritas las variables de entrada y salida se ingresan seleccionando el botón import, donde aparecerá una pequeña muestra de grafica en un recuadro como lo ilustra la gráfica 6, después se debe seleccionar en el recuadro llamado *estimate* -c el modelo de identificación a emplear; en este caso se empleará *-Transfer function Models* modelo que emplea la asignación de polos y ceros para la obtención de la función de transferencia del sistema.

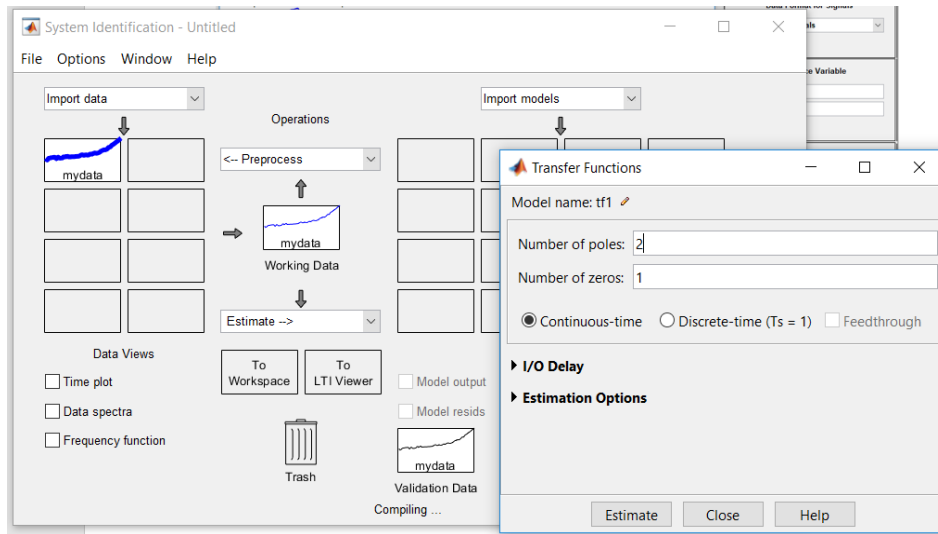


Figura 89. System Identification function.

5. Por último, una vez se selecciona el botón **estimate** la herramienta Ident realiza un proceso de identificación obteniendo como resultado una función de transferencia reflejada en la pequeña grafica del recuadro derecho, la cual se debe arrastrar hasta el recuadro **To Workspace** para visualizar la función en el espacio de trabajo.

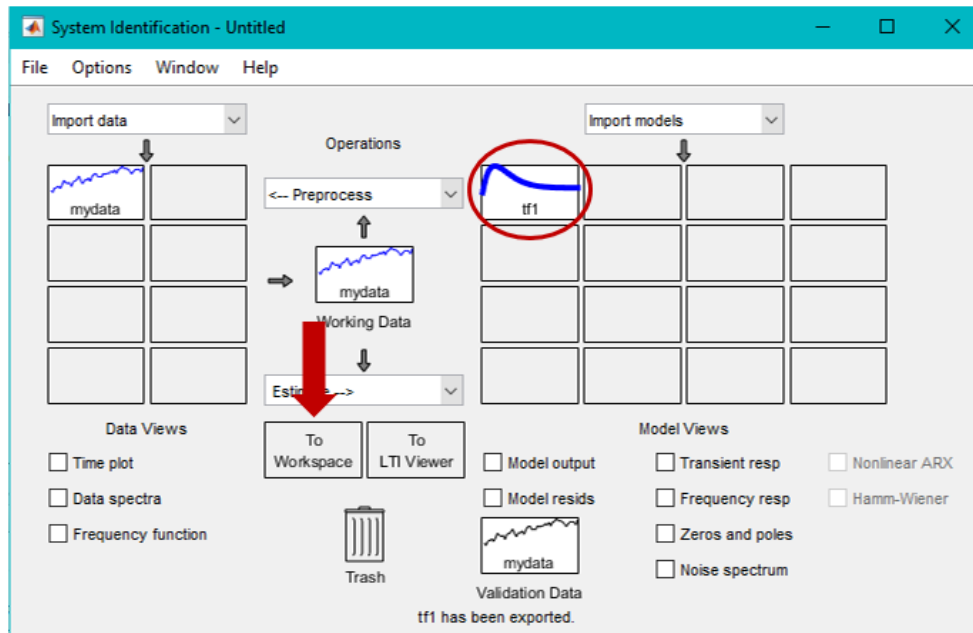


Figura 90. Workspace Tool.