

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y
DE FLUJO PARA UN REACTOR A UNIDAD PILOTO DE PIRÓLISIS DE LECHO
FIJO A ESCALA LABORATORIO**

DANTE JOHAN BAYONA MENESES

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2017**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y
DE FLUJO PARA UN REACTOR A UNIDAD PILOTO DE PIRÓLISIS DE LECHO
FIJO A ESCALA LABORATORIO**

DANTE JOHAN BAYONA MENESES

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Director:

Prof. CARLOS JESÚS MUVDI NOVA

Ing. Químico, M.Sc., PhD.

Co-Director:

Prof. MARIA PAOLA MARADEI GARCÍA

Ing. Química, PhD.

CLAUDIA PATRICIA TAVERA RUIZ

Ing. Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

A Dios por darme salud, perseverancia y sabiduría para cumplir este sueño.

A mis padres Marina Meneses Chacón y Liber Gerardo Bayona Meneses, por darme motivación, su amor y enseñanzas, por ser mi guía y consejeros. Mi orgullo y admiración es para ustedes.

A mi hermano Eider Antonio Bayona Meneses, por ser más que un padre para mí, por darme la oportunidad de ser profesional, depositando toda su confianza en mí, por ser mi apoyo en los momentos de debilidad y estar cuando más lo he necesitado. Eres mi mayor ejemplo a seguir.

A Luisa Marina Ortiz Gómez, por estar conmigo en los momentos de alegría y adversidad, por su amor y compañía.

A mis tíos Deyanira Meneses y Jhon Miller Ramos, por darme la oportunidad de formarme en mi vida universitaria, por brindarme su apoyo y acogerme en su hogar como un hijo más.

A mi abuelo, mis tíos, primos y demás familiares por creer en mí, darme su confianza y ayudarme a salir adelante.

A mis amigos de la universidad Omar Rojas, Ángela Ortiz, Christian Angulo, Lina Ramos, Héctor Chona, Santiago Zuleta y todos aquellos que han hecho parte de mi vida... Gracias.

A Fabiola Rincón Quintero y familia, porque siempre me brindaron una mano y me han hecho parte de su hogar.

Y a todos aquellos que en estas cortas palabras se me escapan, solamente me queda decirles... Gracias.

Dante Johan Bayona Meneses.

AGRADECIMIENTOS

Primordialmente a Dios, por enriquecerme de valores, actitudes y aptitudes para alcanzar todos los propósitos planteados.

A mis padres, mi hermano y demás familiares por su incondicional apoyo durante el desarrollo de mi vida universitaria.

Al profesor **Carlos Jesús Muvdi Nova**, por su dedicación, sus consejos, amistad, apoyo y toda la confianza depositada en mí para el desarrollo de este proyecto.

A la profesora **María Paola Maradei García** y la ingeniera **Claudia Patricia Tavera Ruiz**, por su comprensión, apoyo y confianza.

A los técnicos **Eduardo Carreño** y **Wilson Carreño** por sus aportes en el desarrollo del proyecto.

A **Neifer David Sandoval Hernández** por sus valiosos aportes técnicos en la ejecución de este proyecto.

A los Grupos **INTERFASE**, **CICTA** y a cada uno de sus miembros, por su amistad y colaboración durante todo este proceso.

Y a la **Universidad Industrial de Santander**, por ser mi alma mater, haberme dado la oportunidad de formarme y hoy poder ser un profesional útil a la sociedad.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	14
1. OBJETIVOS.....	21
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	21
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
2. METODOLOGÍA.....	22
2.1 FASE I: DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN CON SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	23
2.2 FASE II: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS OBTENIDOS.....	24
2.3 FASE III. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.....	24
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	26
3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CON SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.....	26
3.1.1 Módulo de control.....	277
3.1.2 Sensores.....	27
3.1.3 Elementos Finales de Control (EFC).....	28

3.1.4	Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario GUI	29
4.2.	CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL SIN REACCIÓN.....	31
4.3.	EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MEDIANTE PRUEBAS CON REACCIÓN.	36
5.	CONCLUSIONES.....	39
6.	RECOMENDACIONES	41
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	42
	BIBLIOGRAFÍA.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del piloto de pirólisis que se encuentra en el grupo INTERFASE.....	20
Figura 2. Esquema metodológico ejecutado en el proyecto de grado.	22
Figura 3. Esquema de conexiones del sistema de control automático.	26
Figura 4. a) Módulo Arduino y partes fundamentales del mismo b) Flujoímetro Cole-Parmer c) Sensor de presión y d) Válvula solenoide marca Danfoss, instalados en la unidad de pirólisis.	27
Figura 5. Interfaz Gráfica de Usuario diseñada para el sistema de adquisición de datos conformada por a) Pantalla de inicio de sesión b) Plataforma de trabajo c) interfaz de ayuda.	29
Figura 6. Esquema piloto de pirólisis con sistemas de control automático implementados (señalados por los recuadros en color).....	31
Figura 7. Respuesta del flujo de salida en función del tiempo: a) Sin módulo de amortiguamiento (línea azul), b) con módulo y válvula aguja completamente abierta (línea amarillo) y c) con módulo de amortiguamiento con mínima apertura válvula aguja (línea rojo).....	32
Figura 8. Comportamiento de la presión en el módulo de amortiguamiento para $C_V=0,05$ (línea roja), $C_V=0,1$ (línea azul), $C_V=0,2$ (línea marrón), $C_V=0,3$ (línea amarilla) y Volumen de a) $0,04\text{ft}^3$ y b) $0,12\text{ft}^3$	34
Figura 9. Respuesta de los sensores durante la prueba preliminar a condiciones de 100kPa, 155ml/min y temperatura ambiente. a) flujo de alimentación, b) presión de salida del sistema.	35

Figura 10. Respuesta de los sensores durante las pruebas experimentales a $T=466^{\circ}\text{C}$, $P=82,74\text{kPa}$ y $F=155\text{ml/min}$. a) flujo de alimentación, b) presión a la salida del sistema, c) flujo de salida.....38

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros en estado estacionario para el modelamiento del módulo de expansión.	33
Tabla 2. Resultados de la evaluación de desempeño del sistema de control para Temperatura de 466°C, Presión de 82,74kPa y Flujo de alimentación de 155ml/min. [‡]	36

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y DE FLUJO PARA UN REACTOR A UNIDAD PILOTO DE PIRÓLISIS DE LECHO FIJO A ESCALA LABORATORIO*

AUTOR: DANTE JOHAN BAYONA MENESES**

PALABRAS CLAVE: Sistemas de control, Sistema de Adquisición de Datos, Piloto de laboratorio, Arduino, NetBeans, Pirólisis.

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo muestra el proceso de diseño de un sistema de control automático para controlar la presión a la salida y el flujo de alimentación de gas en un reactor de pirólisis escala laboratorio y su implementación como estrategia de mejoramiento en el desempeño operacional del equipo durante la realización de pruebas experimentales en el grupo INTERFASE.

Para ello, se realizó el diseño conceptual del sistema de control mediante el estudio de las condiciones de operación de la unidad piloto. Dentro del desarrollo se abordó el concepto de flexibilidad y economía, igualmente se definieron las condiciones de operación del piloto con una estrategia feedback de control On-Off para las variables de control, además de permitir la adaptación de elementos adquiridos previamente por el grupo INTERFASE. Para ello, se eligió una placa arduino UNO como hardware por su bajo costo y Arduino 1.8.2 y NetBeans 8.2 como software por ser de acceso libre y compatible con los elementos.

Posteriormente, se construyó el sistema de control automático a partir de los requerimientos establecidos para su uso a escala laboratorio. Dicho sistema constituido por sensores y válvulas permite operar el sistema de manera estable. La implementación de un módulo amortiguador, permitió mejorar la cuantificación de gases en la salida del proceso. Se ajustaron experimentalmente las variables de control para disminuir el tiempo de estabilización durante el arranque del proceso.

Por último, se evaluó el desempeño del sistema de control automático mediante el desarrollo de pruebas experimentales con reacción. En ellas se observó un aumento en la producción de aceite para las condiciones actualmente utilizadas, pasando de $45,58\% \pm 1,53$ bajo operación manual a $52,95\% \pm 1,71$ con el modo automático. Asimismo, se obtuvo una importante mejora en el cierre del balance pasando de un exceso de $113,82\% \pm 7,32$ bajo operación manual a $102,27\% \pm 4,78$ en modo automático.

*Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.; Codirectores: María Paola Maradei García, Ingeniera Química, Ph.D. y Claudia Patricia Tavera Ruiz, Ingeniera Química.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A CONTROL SYSTEM OF PRESSURE AND FLOW FOR A PILOT UNIT PYROLYSIS FIXED-BED REACTOR TO LABORATORY SCALE* .

AUTHOR: DANTE JOHAN BAYONA MENESES**

KEYWORDS: Control System, Data Acquisition System, Laboratory pilot, Arduino, NetBeans, Pyrolysis.

DESCRIPTIONS:

The present work shows the design process of an automatic control system intended to control the output pressure and the input gas flow in a laboratory pyrolysis reactor, looking for the improvement in the operational performance of the equipment during the experimental tests made by INTERFASE group.

For this reason, the conceptual design of the control system was made by means of the study of the pilot unit operational conditions. Within the development, the concept of flexibility and economy was approached; also the pilot operating conditions with On-Off strategy feedback control for the control variables were defined, and include the elements acquired previously by INTERFASE group. Moreover, an Arduino plate ONE like hardware was chosen because its low cost. Arduino 1.8.2 and NetBeans 8.2 as software were also selected for being free and compatible with the elements.

Subsequently, the automatic control system was constructed following the established requirements for its use on laboratory scale. This system, constituted by sensors and valves, allows the system to operate in a stable way. The implementation of a system to muffle pressure peaks led to the improvement the gas quantification in process output. Moreover, the control variables were experimentally adjusted to diminish the run-up time during the starting of the process.

Finally, the performance of the automatic control system was evaluated by means of experimental tests with reaction. An increase in the oil production was observed for the current conditions, moving from 45.58%±1.53 (manual operation) to 52.95%±1.71 (automatic operation). Similarly, an important improvement in the closing balance was obtained, moving from an excess of 113.82%±7.32 under manual operation to 102.27%±4.78 in automatic operation.

*Degree work

**Faculty of Physical-chemical Engineering. School of Chemical Engineering. Universidad Industrial de Santander. Director: Carlos Jesús Muvdi Nova, Chemical Engineer, M.Sc., Ph.D.; Co-directors: María Paola Maradei García, Chemical Engineer, Ph.D. and Claudia Patricia Tavera Ruiz, Chemical Engineer.

INTRODUCCIÓN

La pirólisis es uno de los procesos de degradación térmica realizada en reactores específicos de acuerdo al movimiento de la fase sólida y volátil [1], en el que se presentan reacciones químicas irreversibles, en un rango de temperaturas entre 350 y 700°C [2]. La pirólisis es un proceso que tiene la característica de transformar desechos que son de difícil tratamiento, y además de una baja emisión de contaminantes gaseosos tipo COx, NOx y SOx, debido a que se realiza en ausencia de oxígeno, bajo una atmósfera inerte. Para garantizar la atmósfera inerte durante el proceso pirolítico y ayudar al arrastre de los volátiles producidos en la reacción se emplean gases inertes como helio o nitrógeno [3-5].

De la pirólisis se puede obtener tres tipos de productos: líquido, sólido y gas. Actualmente, el mayor interés en relación a la pirólisis esta direccionada a la obtención de productos líquidos, debido a que poseen una alta densidad energética y una capacidad para substituir combustibles líquidos derivados del petróleo como el biodiesel o la gasolina [3,4,6,7]. Para ello, diversos estudios de las variables del proceso de pirólisis han demostrado que factores como la temperatura, la presión y la transferencia de calor son importantes para favorecer la producción de uno o varios productos [8]. Es importante mantener en el reactor las condiciones de presión, temperatura y composición en las condiciones deseadas de modo que la reacción tenga lugar [9]. Para ello, es recomendable implementar mecanismos de control automático que permita disminuir costos [10], además de tener aumentos en la productividad, mejoras en la seguridad y la calidad del producto; alcanzándose incrementos en estos factores de hasta un 25% [11,12].

El grupo de investigación INTERFASE, adscrito a la Escuela de Ingeniería Química, actualmente desarrolla investigaciones enfocadas a la producción de aceite a partir de residuos como llantas usadas, mediante procesos pirolíticos. Para ello, el grupo cuenta con un reactor de lecho fijo a escala piloto, equipado

con un sistema de control automático de temperatura [2,13]. Las otras variables, como la presión y el flujo de alimentación del gas inerte del sistema, son controladas de forma manual, lo que hace que se presenten dificultades para mantener estable el proceso. Esto genera inconvenientes en la reproducibilidad de las pruebas debido a la variabilidad en los datos obtenidos y los cierres de balance, implicando gastos dada la necesidad de repetir algunos experimentos.

Entre los estudios realizados en los últimos años por el grupo INTERFASE donde se ha involucrado la unidad piloto, se encuentran los desarrollados por Calderón & Torres [13], Álvarez [14], Tarazona [15], Mancilla [7] y Vecino [16], en la producción y viabilidad de la producción de aceites a partir de residuos orgánicos. Asimismo, se encuentran los trabajos desarrollados por Sánchez & Villamizar [2], Ferreira & Palencia [5] y Bohórquez & Camargo [17], quienes estudiaron la pirólisis de llantas usadas para la producción de combustibles. En dichos estudios se han documentado las dificultades para mantener constantes la presión del sistema, el flujo de gas de alimentación y el producido durante las reacciones, dado que este control se realiza de manera manual mediante una válvula de regulación fina, generando ciertos errores en el cierre de los balances de masa. Algunos investigadores como Calderón & Torres [13], Sánchez & Villamizar [2] y Ferreira & Palencia [5] recomiendan la implementación de un mecanismo que permita un mayor control sobre estas variables (presión y flujo de gas de alimentación) con el fin de mejorar la medición de las mismas.

Hoy en día, los avances tecnológicos han logrado ajustar las condiciones de los procesos pirolíticos mediante la implementación de sistemas de control automático, entendiéndose éstos como un ordenamiento de elementos físicos unidos o relacionados de tal forma que dirigen o regulan al mismo sistema o a otro [18]. Para efectuar el control de un proceso es necesario entender los hechos que ocurren en él para poderlo controlar [19,20]. La medición de la presión, junto a la temperatura y el nivel, son las variables de proceso más controladas a nivel industrial [21], siendo la presión la variable de medición principal para un amplio

campo de medidas de proceso. Realmente muchos tipos de medidas industriales como el flujo, el nivel, la densidad e incluso la temperatura se pueden deducir a partir de la presión [22,23]. El campo de aplicación de los medidores de presión a gran escala es amplio y abarca desde valores muy bajos (en condiciones de alto vacío) hasta presiones de miles de bar [24].

Desde el punto de vista de aplicabilidad en reactores de lecho a escala piloto, los medidores de presión han tenido un auge en los últimos años debido a que proporcionan mejores condiciones de operación. Se estima que al menos un 75% de los medidores en uso son dispositivos de presión diferencial [25]. Estudios realizados en reactores escala piloto muestran la aplicación de este tipo de medidores en el control de la presión, entre ellos se halla la implementación de medidores de presión diferencial Marca Yokogawa EJA-530A en un reactor de lecho para la caracterización de partículas sólidas [26]. Así mismo, se implementó un modelo similar de medidor en un proceso de gasificación de *char* (producto de combustión intermedio) en un reactor de lecho [27]. Igualmente, se instauró un medidor de presión diferencial marca KIMO CP115-AO en un reactor de lecho empleado en un proceso de gasificación de tres etapas [28]. Mollocana [29], emplea un medidor de presión relativa modelo S04 de la compañía *Sensor-Technik Wiedemann (STW)*, para la medición de la presión del gas en la entrada de un reactor de lecho destinado al estudio de reacciones Redox para almacenamiento termoquímico en centrales solares termoeléctricas.

National Instruments [30] recomienda el empleo de transductores de presión, los cuales son galgas extensiométricas montadas en un diafragma, de forma que cuando se aplique una presión el diafragma se deformará proporcionalmente a la presión suministrada, mientras que Parr Instrument Company [31] implementa en sus pilotos de lecho un Controlador de Flujo Másico (MFC) en combinación con un Regulador de Contrapresión (BPR) asegurando un flujo constante de gas hacia el reactor, proporcionando un alto nivel de control y reproductibilidad.

Asimismo, se han implementado diversos flujómetros para controlar la alimentación de gas inerte, entre ellos se encuentra un medidor de flujo ColeParmer 0-500ml/min empleado en un piloto para producción de biooil a partir de biomasa [13]. Bolívar [32], emplea rotámetros de gases (Ar y He) en un reactor de lecho para realizar experimentos de deposición de recubrimientos. Por otro lado, Contreras [33], emplea un flujómetro de burbuja en el estudio de la pirólisis catalítica de polietileno. En consecuencia, se pueden encontrar diversas configuraciones para medidores de presión y flujo en este tipo de pilotos, restringidos a las condiciones de diseño y operación.

Conviene destacar que los diferentes instrumentos de medición para el control automático de la presión, se pueden asociar a un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) el cual permite tomar señales físicas del medio y transformarlas en datos que posteriormente se puedan manipular [34]. La forma de adquisición de esta información es a partir de señales analógicas o digitales que pueden ser interpretadas por medio de un ordenador.

Todo SAD comparte un objetivo común, bien sea, adquirir, analizar o presentar la información [35]. A veces el sistema de adquisición es parte de un sistema de control, y por tanto, la información recibida se procesa para obtener una serie de señales del proceso [34]. Dichas señales de respuesta se deben contrastar con los objetivos establecidos, e intervenir sobre el sistema para modificar el parámetro deseado [36].

Los SAD incorporan microprocesadores, sensores/transmisores, transductores, Elementos Finales de Control (EFC), acondicionadores de señales (amplificación, filtrado, aislamiento, etc.), módulo de digitalización (*hardware*), el *software* de aplicación y un ordenador [35,37].

Cabe resaltar que existen una diversidad de SAD, cada uno conformado por *hardware* y *software* seleccionados por el usuario acorde a las necesidades del proceso. De aquí que el tipo de *software* sea un aspecto relevante en todo ello

puesto que éste puede ser pago o de libre acceso. Entre los modelos de adquisición empleados en reactores de lecho se encuentra el sistema modular expandible de adquisición de datos USB “i-NET 555” de la casa fabricante OMEGA [28]. De igual manera, se encuentra el sistema PicoLog cuya tarjeta se suministra con el *software* de adquisición de datos PicoLog el cual permite medir, registrar y analizar los datos [27]. Parr Instrument Company [31], emplea el Modelo 4871Parr, el cual ha sido desarrollado para proporcionar un sistema de control con soporte integrado para controlar, ya sea un reactor con alimentación múltiple y controles de producto, o varios reactores que operan de forma independiente o en paralelo. Por otro lado, National Instruments emplea diversos SAD, cada uno acorde a los requerimientos de sus clientes.

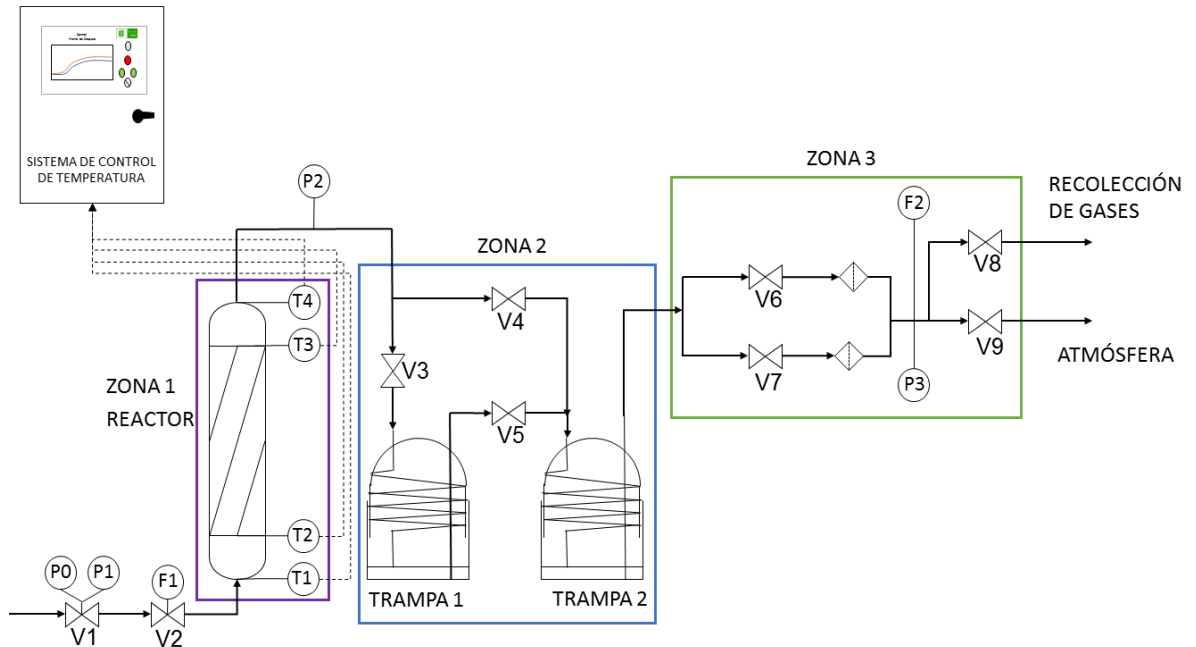
Uno de los componentes para SAD más económicos en el mercado es el empleo de una placa arduino, la cual es una plataforma de prototipos de electrónica de código abierto (*Open-Source*) fundamentado en *hardware* y *software* fáciles de usar. Éstas son económicamente más adsequibles comparada con otras plataformas microcontroladoras, su *software* puede ejecutarse en sistemas operativos como *Windows*, *Macintosh OSX* y *GNU/Linux*, lo que lo hace más ventajoso, ya que la mayoría de los *software* está limitado solo a sistemas *Windows* [38]. Asimismo, existen diversos entornos de programación compatible con el sistema arduino que permiten la digitalización por medio de una interfaz gráfica. Entre los más destacados se pueden encontrar *MyOpenLab*, cuyo entorno gráfico es similar al manejado por *LabView*, *software* elaborado por National Instruments. Es una herramienta libre disponible gratuitamente bajo una licencia GNU (*Gnu's Not Unix*) *general public license* [39].

Otros entornos empleados son *Scratch* (S4A) de arduino, un *software* libre creado por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Éste permite programar el *hardware* arduino de forma sencilla proporcionando una interfaz de alto nivel para programadores [40]. Análogamente, da Silva en 1997 publicó *Minibloq*, un entorno de programación gráfico de código abierto para Multiplo™, Arduino™, dispositivos

informáticos físicos y robots con el objetivo de llevar la computación y las plataformas robóticas de manera física a los colegios, universidades y principiantes [41]. *NetBeans* desarrollado por *Java* es otro de los entornos de acceso libre muy empleados en el desarrollo de GUI's para entablar comunicación con la placa arduino, dado que *Java* permite comunicación a través del puerto serie de la computadora facilitando mediante el uso de ciertas librerías dicha comunicación con la placa arduino [42].

Con respecto a lo antes mencionado, consideremos ahora la unidad piloto de pirólisis sobre el cual se realizará la mejora en el control de la presión y flujo de alimentación en el grupo INTERFASE. La Figura 1 es una representación esquemática del conjunto de componentes que conforman el piloto de pirólisis adoptado por el grupo. Éste consta básicamente de tres zonas: una zona de reacción, una de condensación y una zona de recolección de gases. La zona de reacción está constituida por un rotámetro para gas el cual controla la alimentación de nitrógeno a la entrada del reactor, un manómetro para medir la presión del sistema, un horno tubular con una potencia máxima de 2400W a 220V, un medidor de temperatura conectado al indicador de control y el reactor. Este último elaborado en acero inoxidable 304, con un diámetro externo e interno de 3 y 1,8cm, respectivamente, y una longitud de 30,5cm. Posee un sistema de sellado de agarraderas para evitar la salida del material sólido depositado. La zona de condensación, posee un cordón de calentamiento que recubre la tubería desde la salida del reactor hasta las trampas de enfriamiento. Dichas trampas, idénticas y en serie, están fabricadas en acero inoxidable y permiten la recuperación del aceite producido. Asimismo, posee un sistema *bypass* en caso de existir taponamiento en alguna sección de la tubería. La zona de recolección, posee un flujómetro másico para gas, dispuesto a la salida de las trampas de condensación; igualmente, se pueden recolectar muestras del gas de síntesis para análisis y caracterización [43].

Figura 1. Esquema del piloto de pirólisis que se encuentra en el grupo INTERFASE.



Fuente: Modificado de Ferreira & Palencia [5]

Se debe agregar que este sistema actualmente posee un sistema de control automático de temperatura, constituido por un autómata programable o PLC marca *SIEMENS*, un módulo de expansión analógico (el cual permite ampliar las entradas y salidas de señal del PLC) y una fuente de energía. Así mismo, posee un panel de control que permite la interacción con el usuario en cuanto a la supervisión de los valores de temperatura, permitiendo además configurar el sistema a nuevas condiciones de operación.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema de control automático de presión y flujo con sistema de adquisición de datos para un reactor a unidad piloto de pirólisis de lecho fijo a escala laboratorio e implementarlo como estrategia para mejorar el desempeño operacional del equipo durante la realización de pruebas experimentales.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

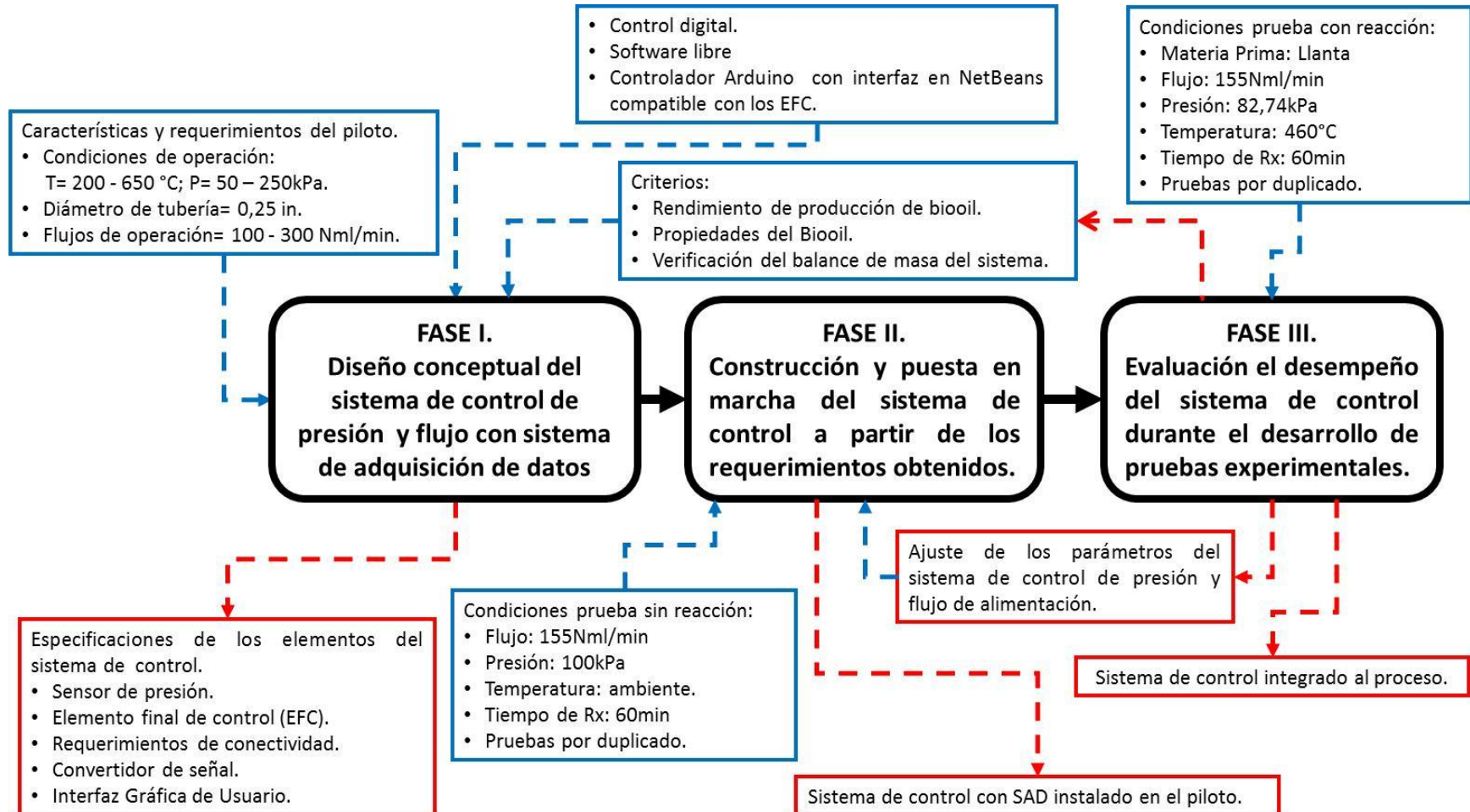
Diseñar conceptualmente el sistema de control automático para facilitar el control de la presión y el flujo de alimentación en la unidad piloto de pirólisis.

Construir el sistema de control automático a partir de los requerimientos establecidos para su uso a escala laboratorio.

Evaluar el desempeño del sistema de control automático implementado mediante el desarrollo de pruebas experimentales.

2. METODOLOGÍA

Figura 2. Esquema metodológico ejecutado en el proyecto de grado.



2.1 FASE I: DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN CON SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

Esta etapa se fundamentó en el estudio de las condiciones de operación del piloto y se determinaron las especificaciones de los elementos constituyentes del sistema de control automático. Se estableció el diseño bajo el concepto de flexibilidad y economía, donde el sistema implementado permitiera adaptar los sensores adquiridos previamente por el grupo INTERFASE. Para ello, se optó por emplear *software Open Source* como *arduino* y *NetBeans*, asimismo, una placa microcontroladora arduino por sus amplias aplicaciones y bajo costo.

Las variables de control para el proceso pirolítico en este proyecto son la presión del sistema y el flujo de alimentación del gas inerte. La temperatura no se consideró dado a que posee un sistema de control automático independiente.

Acorde a las características y requerimientos de operación del piloto, la temperatura de operación donde se encuentra el mayor rendimiento en la producción de *biooil* está comprendida entre 350 y 700°C [4,5]. De igual manera, la presión del sistema debe estar entre 50 y 250kPa; donde la presión máxima propuesta es empleada en la determinación de fugas en el sistema y debe ser alrededor del doble de la presión de operación [5]. El flujo de gas inerte debe estar alrededor de 155Nml/min^b y depende tanto del tiempo de residencia como del tipo de reacción que se lleve a cabo en el equipo [43]. La tubería del sistema posee un diámetro de 0,635cm (0,25in) y está restringida al diseño del piloto. En base a esto, se eligió una estrategia *feedback* de control *On-Off*, por ser una técnica simple, económica, de fácil instalación y ajuste [12] Velandia [44]; Gelvéz, Barajas, Quiroga & Gómez [45]; Muñoz & Solano [46].

^b Nml/min corresponde a unidades de flujo volumétrico a condiciones de temperatura y presión normales.

2.2 FASE II: CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL A PARTIR DE LOS REQUERIMIENTOS OBTENIDOS.

En esta fase, se realizó la construcción del sistema de control mediante una serie de actividades constituidas por: programación, instalación, ensamble, ajustes y pruebas preliminares del sistema. La programación se desarrolló en dos etapas, una de desarrollo del entorno gráfico GUI y otra de programación del microcontrolador junto con el sistema de adquisición de datos. Esta última, fue una de las más importantes dado a que se estudió y aprendió acerca de los diferentes lenguajes de programación de los *software* empleados, tanto en el microcontrolador como para la interfaz gráfica; el primero de manera autodidacta y el segundo bajo capacitación virtual a través del SENA (certificado N° 9221001310203CC1096215732C).

La subfase de instalación se dividió en dos etapas, una de instalación del *software* y *drivers* en el ordenador (NetBeans [47] y Arduino [48], para procedimiento de instalación), seguida de una etapa de implementación de los sensores/transmisores más los Elementos Finales de Control (EFC) en la línea de flujo de gas. Sucesivamente, se realizó el ensamble *software*-elementos del sistema de control mediante las respectivas conexiones y acondicionadores de señal análogo/digital (módulos relé, fuente de alimentación de las válvulas, placa arduino). Una vez el sistema de control se acopló al piloto de pirólisis, se realizaron pruebas de calibración en los sensores y ajustes preliminares en la sintonización del sistema mediante la realización de pruebas sin reacción, verificando la respuesta del mismo acorde a la programación y a las condiciones del proceso.

2.3 FASE III. EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN Y FLUJO DE ALIMENTACIÓN MEDIANTE EL DESARROLLO DE PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Esta fase evaluó el desempeño y la capacidad de respuesta del sistema de control implementado en el piloto de pirólisis. Para ello, se realizaron dos pruebas

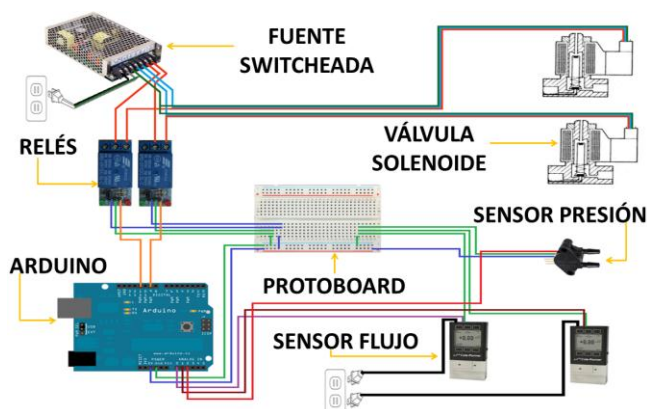
experimentales a 466°C temperatura. En ambas pruebas se empleó llanta como materia prima, y se operó a 82,74kPa y 155Nml/min, puesto que son condiciones probadas actualmente en el piloto. Cada una de estas pruebas se efectuó por duplicado para tener una buena medida del método y de la reproducibilidad de los experimentos. Los resultados obtenidos con el sistema de control, se compararon con datos obtenidos de forma manual a las mismas condiciones. Se analizó a partir de ello el efecto del sistema de control sobre el margen de error generado en el balance de masa del sistema, así como los cambios generados en el rendimiento de la producción de aceite. En ambos casos se siguió el protocolo de carga y descarga del reactor, así como el protocolo de prueba de fugas estipulado por Bohórquez & Camargo [17]. Como resultado de este proceso, se obtuvo el sistema de control automático de presión y de flujo de alimentación integrado en el piloto de pirólisis.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL CON SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de control automático, diseñado e implementado en el desarrollo de este proyecto está constituido por dos válvulas solenoides marca *Danfoss*, dos flujómetros *Cole-Parmer*, un sensor de presión *MPX5700DP*, un módulo de control arduino desarrollado por *Smart Projects*, dos módulos de relé de 1 canal 5V y una fuente *switchheada* de 24V-5A para la alimentación de las válvulas, relacionados tal como se aprecia en la Figura 3.

Figura 3. Esquema de conexiones del sistema de control automático.



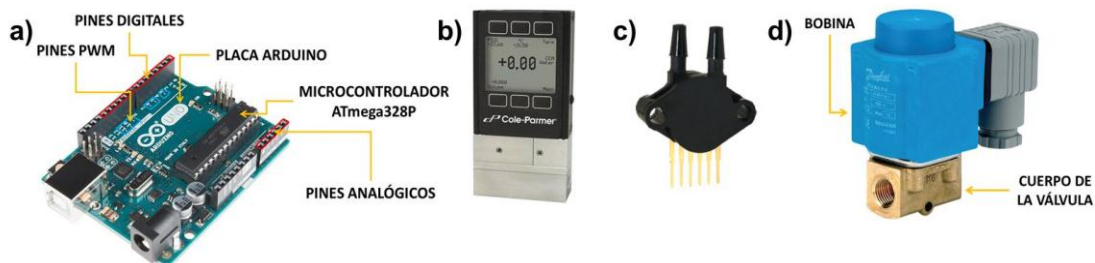
Este sistema es operado digitalmente, empleando la interfaz gráfica como SAD mediante la interacción con el módulo de control, obteniendo de éste las respectivas lecturas de los sensores con el propósito de tabularlas, graficarlas y exportarlas como archivos *Excel* para su posterior manejo.

En cuanto al modo de operación de los EFC, se programó su funcionamiento a través del *software* arduino, descargando el código al microcontrolador de la placa mediante comunicación serial.

3.1.1 Módulo de control: Este módulo está constituido por una tarjeta ARDUINO UNO rev3, con un microcontrolador ATmega328P, quien es el encargado del proceso de control permitiendo ser programado para funciones específicas [49] [50].

Asimismo, contiene un conjunto de puertos o pines donde se conectan los respectivos sensores y EFC del sistema, tal como se aprecia en la Figura 4a. La placa arduino UNO dispone de 6 puertos para recepción de datos de manera analógica proveniente de los sensores, así como 14 pines de entrada/salida digital de los cuales 6 son pines digitales PWM (Pulse-Width Modulation), empleados en el envío de una señal regulada a los EFC del sistema de control [46,49,51].

Figura 4. a) Módulo Arduino y partes fundamentales del mismo b) Flujoímetro Cole-Parmer c) Sensor de presión y d) Válvula solenoide marca Danfoss, instalados en la unidad de pirólisis.



Fuente: a) RobotShop [52]; b) Thermo Fisher Scientific Inc [53]; c) ElectroCrea [54]; d) Danfoss [55].

Arduino ofrece su propio *software Open Source* de programación para el microcontrolador, cuyo IDE permite simular, compilar y depurar la secuencia del código de programación [49,56]. Una de las ventajas de la placa arduino es que viene precargada con *bootloader*, el cual permite cargar el código sin necesidad de implementar un *hardware* adicional para cumplir esta función en el microcontrolador [68]. Esto facilita la transmisión de datos serialmente entre la placa arduino y el computador a través del puerto USB [56,57].

3.1.2 Sensores: En la Figura 4b se muestra el sensor marca Cole-Parmer empleado para la medición del flujo mediante la caída de presión a través de un elemento de flujo laminar (LFE). En el sistema se encuentra instalado

uno en la entrada del gas de arrastre y otro en la salida del sistema. Este sensor es electrónico, con escala de medición de 0 a 500SCCM (Standard Cubic Centimeters Per Minute) o de 0 a 1000SLPM (Standard Litre Per Minute), señal de salida analógica de 0,01 a 5VDC. Cabe destacar que este tipo de sensor ya había sido adquirido previamente por el grupo de investigación y se hizo su adaptación al sistema de control diseñado, disminuyendo de esta manera los costos en la adquisición de los mismos.

La Figura 4c muestra el sensor empleado en la medición de la presión. Se implementó un sensor MPX5700DP (fabricado por Freescale Semiconductor Inc.) de tipo piezoresistivo por su bajo costo. El sensor es electrónico con una escala de 0-700kPa (0-101,5psi) y voltaje de salida de 0,2 a 4,7VDC, puede aplicarse a temperaturas entre - 40 y 125°C. Este sensor tiene compensación por temperatura para evitar desviaciones en la señal de salida por variaciones en la temperatura del sistema [58].

El proceso de calibración para los sensores de flujo y de presión se realizó empleando un rotámetro para gases y un manómetro, respectivamente. Para ello, se tomó el valor de la señal de salida del sensor a través del arduino para distintos valores conocidos, para luego ajustarlos y obtener la respectiva ecuación que representa los valores de medición en el microcontrolador acorde a la señal de salida de los sensores. Hay que resaltar que ambos tipos de sensores son lineales; esto quiere decir que están representados por ecuaciones lineales.

3.1.3 Elementos Finales de Control (EFC): Los EFC empleados para el control del flujo y de la presión fueron válvulas solenoides marca Danfoss de acción directa 2/2 vías, tipo EV210B. Normalmente Cerradas (NC) (Figura 4d).

Se empleó la válvula ref.032U5708 para el control de flujo, con un rango de caudal de 0,153m³/h, presión diferencial de 0-35bar y cuerpo en latón puesto que no existe ningún riesgo de oxidación interna de la misma dado que sólo pasa a través de ella el gas inerte.

Para el sistema de presión se empleó la válvula ref. 032U5801, con un rango de caudal de 0,08m³/h y presión diferencial de 0-35bar. Su cuerpo es de acero inoxidable, puesto que pasa a través de ella gas inerte con impurezas del proceso pirolítico y puede afectarlo internamente por oxidación. Estas válvulas se conectan en los puertos digitales de la placa arduino por intermediación de un módulo relé de 1 canal 5V. Así mismo, se emplea una fuente *switchheada* de 24V-5A para la alimentación de las bobinas de las válvulas.

3.1.4 Diseño de la Interfaz Gráfica de Usuario GUI: La interfaz desarrollada permite una interacción con los componentes del sistema de forma sencilla. Esta ha sido diseñada para trabajarse en un sistema operativo Windows, pero puede ser instalada en sistemas GNU/Linux y Macintosh. En la Figura 5 se puede apreciar la interfaz diseñada, la cual está compuesta por una pantalla de inicio de sesión (Figura 5a), una plataforma de trabajo (Figura 5b) y una página de ayuda (Figura 5c). Las imágenes empleadas como fondo en las diferentes pantallas fueron tomadas de la página oficial de la Universidad Industrial de Santander en Instagram [59].

Figura 5. Interfaz Gráfica de Usuario diseñada para el sistema de adquisición de datos conformada por a) Pantalla de inicio de sesión b) Plataforma de trabajo c) interfaz de ayuda.



La función principal de esta interfaz es la de actuar como sistema de adquisición de datos, tomando los datos emitidos por los sensores en tiempo real por medio de la placa arduino bajo comunicación serial, tabularlos, graficarlos, exportarlos y

guardarlos (en formato *.xls*) para ser analizados a través de *Microsoft Excel*. De igual manera, cuenta con ingreso restringido a la plataforma de trabajo, con lo cual se previene que personal externo al grupo de investigación pueda manipular el sistema. Para facilitar la comunicación serial con la placa arduino, se instaló en el *software NetBeans* la librería *PanamaHitek_Arduino* [60].

Las funciones principales de los botones de la pantalla principal se detallan a continuación:

Activar plataforma: permite seleccionar la velocidad de conexión con el arduino y definir el puerto USB bajo el cual se hará la comunicación con la placa.

Validar conexión: esta opción permite que se active la hoja de datos, los botones para iniciar o detener la comunicación con la placa, el botón para exportar los datos y un botón para activar o desactivar las diferentes gráficas de datos emitidos por los sensores.

Activar gráfica: al seleccionarla se puede visualizar u ocultar el panel de proyección de los diferentes datos tomados en tiempo real de los sensores. De igual manera, se pueden extraer estas gráficas (en formato *.png*) para un posterior uso por el usuario.

Ayuda: esta opción permite visualizar guías de operación tanto del equipo como de la interfaz, además de abrir páginas web.

Ahora bien, para la generación del instalador para el sistema operativo *Windows*, se creó un archivo *.exe* a partir del programa diseñado en *NetBeans* mediante *Launch4j-3,9*, un *software* que permite crear ejecutables de aplicaciones *Java*. Este *software* es completamente libre de licencia y está disponible para *Windows*, *Linux*, *MacOSX* y *Solaris* [61]. Posteriormente, se creó el instalador mediante *Inno Setup Compiler* dado a que es un *software* libre y compatible con sistemas *Windows* [62].

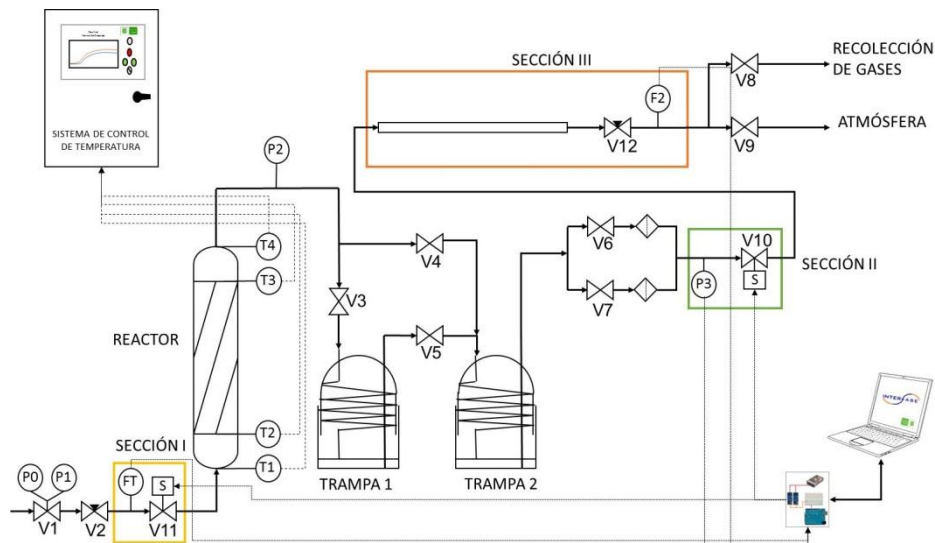
4.2. CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE CONTROL SIN REACCIÓN.

La Figura 6 representa el esquema del piloto de pirólisis con sus respectivos sistemas de control instalados. Los recuadros de color muestran las tres secciones que fueron adaptadas al sistema, siguiendo el esquema de conexión de la Figura 3.

La sección I (en amarillo) y la sección II (en verde) tienen como función controlar el flujo de alimentación de gas inerte y mantener la presión dentro del sistema pirolítico, respectivamente. Están conformadas por un sensor y una válvula solenoide, instalados según la estrategia de control adoptada.

La sección III (en anaranjado) permite cuantificar los gases en la salida del proceso. Está compuesta por un flujómetro y un módulo amortiguador, éste último actúa como facilitador en la cuantificación de gases a la salida del sistema. Barajas & Gómez [63] emplearon un sistema similar para reducir las vibraciones presentadas en un circuito de refrigeración.

Figura 6. Esquema piloto de pirólisis con sistemas de control automático implementados (señalados por los recuadros en color).



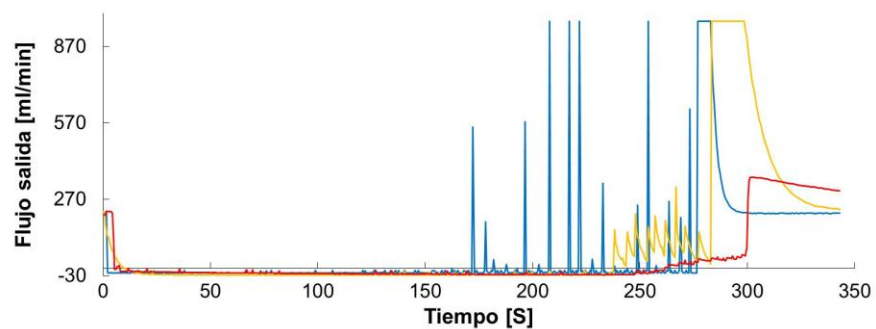
Fuente: Modificado de Ferreira & Palencia [5].

El acoplamiento del módulo amortiguador fue necesario dado al efecto causado por las 2 posiciones fijas de la válvula solenoide sobre el flujómetro, donde el alto

flujo gaseoso liberado sobrepasaba el rango de medición permitido por el sensor (Figura 7, línea azul), pudiendo incurrir en daños irreversibles a largo plazo. Con el diseño del módulo amortiguador, se buscó reducir la velocidad de salida del flujo gaseoso generando una caída de presión del gas, dada su relación de manera proporcional [64]. Igualmente, se puede apreciar el comportamiento del flujo de salida una vez acoplado el sistema. La línea amarilla y la línea roja de la Figura 7 muestran una disminución en los picos presentados cuando la válvula está completamente abierta y cuando tiene una apertura mínima, respectivamente.

Para este caso, se realizó el modelamiento de la sección III, analizando el comportamiento de la presión frente a los cambios en el flujo de gas en la entrada del módulo empleando *Simulink*. Dicho modelado se obtuvo mediante un balance de masa en estado dinámico (Ecuación 1), bajo la consideración de un sistema perfectamente agitado e isotérmico, dado que no se buscó la simulación del mismo como tal. Para ello, se empleó la relación entre la masa gaseosa y la presión del módulo de amortiguamiento a través de la ecuación de estado de los gases perfectos. De igual modo, se buscó la expresión (Ecuación 2) para representar el flujo de gases a través de la válvula de aguja [65]. Los parámetros empleados en estado estacionario se pueden encontrar en la Tabla 1.

Figura 7. Respuesta del flujo de salida en función del tiempo: a) Sin módulo de amortiguamiento (línea azul), b) con módulo y válvula aguja completamente abierta (línea amarillo) y c) con módulo de amortiguamiento con mínima apertura válvula aguja (línea rojo).



$$\rho_{N_2} F_{1(t)} - \rho_{N_2} F_{2(t)} = \frac{P_M V_{TK}}{RT_{TK}} \frac{d}{dt} (P_{1(t)}) \quad (1)$$

$$F_{2(t)} = 1360 C_V \sqrt{\frac{P_{1(t)} * (P_{1(t)} - P_2)}{(460 + T) * G_F}} \quad (2)$$

La solución del modelado en el dominio de Laplace y en términos de variables de desviación, mostró que la presión del sistema se afecta de manera proporcional a los cambios de flujo (Ecuación 3). No obstante, tanto la variación de la ganancia del proceso como la constante de tiempo de retardo dependen del inverso del coeficiente de caudal de la válvula C_V .

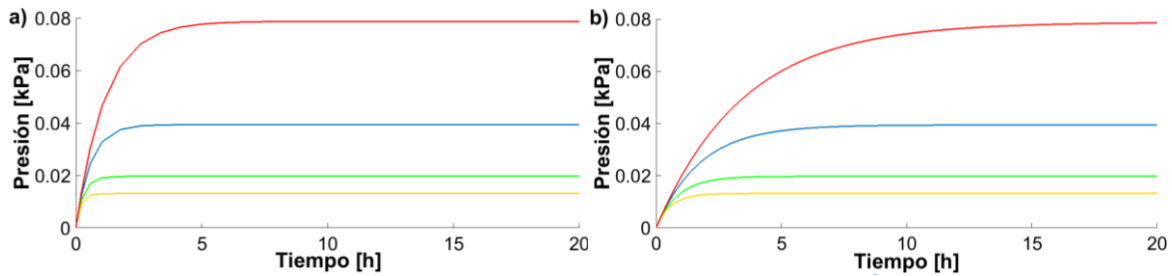
$$P_{1(s)}^D = \frac{\left(\frac{\left(\sqrt{(460+T) * G_F * \sqrt{\bar{P}_1^2 - \bar{P}_1 * P_2}} \right)}{(680 * (2\bar{P}_1 - P_2) * C_V)} \right)}{\left(\frac{\left(P_M * V_{TK} * \sqrt{(460+T) * G_F * \sqrt{\bar{P}_1^2 - \bar{P}_1 * P_2}} \right)}{(680 * R * T * (2\bar{P}_1 - P_2) * C_V)} \right) s + 1} * F_{1(s)}^D \quad (3)$$

Tabla 1. Parámetros en estado estacionario para el modelamiento del módulo de expansión.

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad del gas (ρ_{N_2})	0,0715	lb.ft ⁻³
Presión del tanque (\bar{P}_1)	14,7	psia
Presión de salida (P_2)	0	psia
Peso molecular del gas (P_M)	14	
Constante de los gases reales (R)	10,73	psia.ft ³ .lbmol ⁻¹ .R ⁻¹
Gravedad específica del gas (G_F)	0,4826	
Temperatura en la válvula (T)	77	°F
Temperatura del tanque (T_{TK})	536,67	R
Flujo de entrada al módulo (\bar{F}_1)		sft ³ .h ⁻¹ *
Flujo de la válvula (\bar{F}_2)		sft ³ /h ⁻¹ *
Volumen del tanque (V_{TK})		ft ³
Coeficiente de caudal (C_V)		gpm.psia ^{-1/2}

*sft³.h⁻¹ corresponde a unidades de flujo volumétrico a condiciones de temperatura y presión estándares.

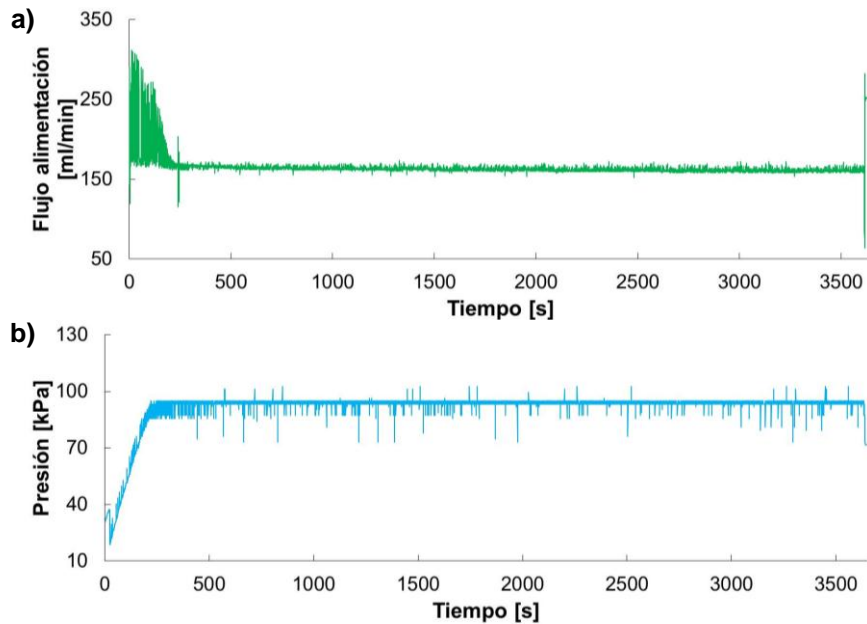
Figura 8. Comportamiento de la presión en el módulo de amortiguamiento para $C_V=0,05$ (línea roja), $C_V=0,1$ (línea azul), $C_V=0,2$ (línea marrón), $C_V=0,3$ (línea amarilla) y Volumen de a) $0,04\text{ft}^3$ y b) $0,12\text{ft}^3$.



La Figura 8 muestra el comportamiento de la presión para diferentes valores de V_{TK} y C_V ante una perturbación tipo escalón de 0,328 unidades. Como es apreciable, el proceso en circuito abierto alcanza el punto de estabilización rápidamente.

Tal como se afirmó anteriormente, tanto la ganancia como el tiempo de respuesta están influenciados por el C_V , encontrándose que entre más pequeño sea este coeficiente, el sistema presentará mayor retardo en el tiempo a un volumen constante. De igual manera, cuando se analizó el caso para dos volúmenes diferentes se obtuvo que, a mayor volumen, el sistema presenta un retardo de tiempo mayor y por ende es más lento en su respuesta, permitiendo además una acumulación mayor de gas en el sistema. Por consiguiente, se diseñó el módulo con un diámetro de 0,01905m y 3m de largo, y se ejecutó su construcción en manguera sintética superflex con refuerzo trenzado en *nylon* de alta presión por ser más asequible económicamente. Este análisis permitió dar solución al problema de los picos en la lectura del sensor de flujo de salida presentado anteriormente (ver Figura 7, línea roja).

Figura 9. Respuesta de los sensores durante la prueba preliminar a condiciones de 100kPa, 155ml/min y temperatura ambiente. a) flujo de alimentación, b) presión de salida del sistema.



Por otra parte, se realizaron una serie de pruebas preliminares con el propósito de disminuir el tiempo de estabilización en el arranque del proceso. Asimismo, se buscó reducir la amplitud de cada una de las respuestas de las variables a controlar. Las Figuras 9a y 9b representan el comportamiento presentado en el flujo de alimentación y en la presión del sistema, respectivamente.

El flujo de alimentación promedio alcanzado en dicha prueba fue de $147,82\text{ml/min} \pm 2,44$ generando una desviación en estado estable de $7,18\text{ml/min} \pm 2,44$. De igual manera, se alcanzó una presión promedio en el sistema de $93,86 \pm 1,81\text{kPa}$ ocasionando una desviación en estado estable de $6,14\text{kPa} \pm 1,81$. Es necesario recalcar que estos resultados fueron obtenidos sólo como parte del ajuste realizado en la respuesta del sistema de control, operando el piloto sin reacción y a temperatura ambiente.

4.3. EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL MEDIANTE PRUEBAS CON REACCIÓN.

Una vez se ajustó el sistema de control a una respuesta estable, se realizaron pruebas experimentales en el piloto para evaluar el desempeño del sistema de control en presencia de reacción. Para ello, se tomó como materia prima caucho de llanta usada y se utilizaron las condiciones de operación establecidas actualmente por el grupo INTERFASE para esta unidad, las cuales corresponden a 466°C; 82,74kPa y un flujo de alimentación de gas de 155ml/min. Las pruebas se realizaron por duplicado, siguiendo los protocolos carga y descarga del reactor, de fugas y de operación. La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos durante el proceso pirolítico trabajándolo en Modo Manual (MM) y en Modo Automático (MA).

Tabla 2. Resultados de la evaluación de desempeño del sistema de control a condiciones de operación de 466°C, 82,74kPa y 155ml/min.‡

Prueba	Rendimiento Aceite (%)	Rendimiento Gas (%)	Rendimiento <i>Char</i> (%)	Total (%)
466°C MM*	45,58±1,53	32,10±5,37	36,15±0,43	113,82±7,32
466°C MA**	52,95±1,71	13,47±2,68	35,95±0,39	102,37±4,78

*MM= Modo Manual. **MA=Modo Automático. ‡ Desviaciones media.

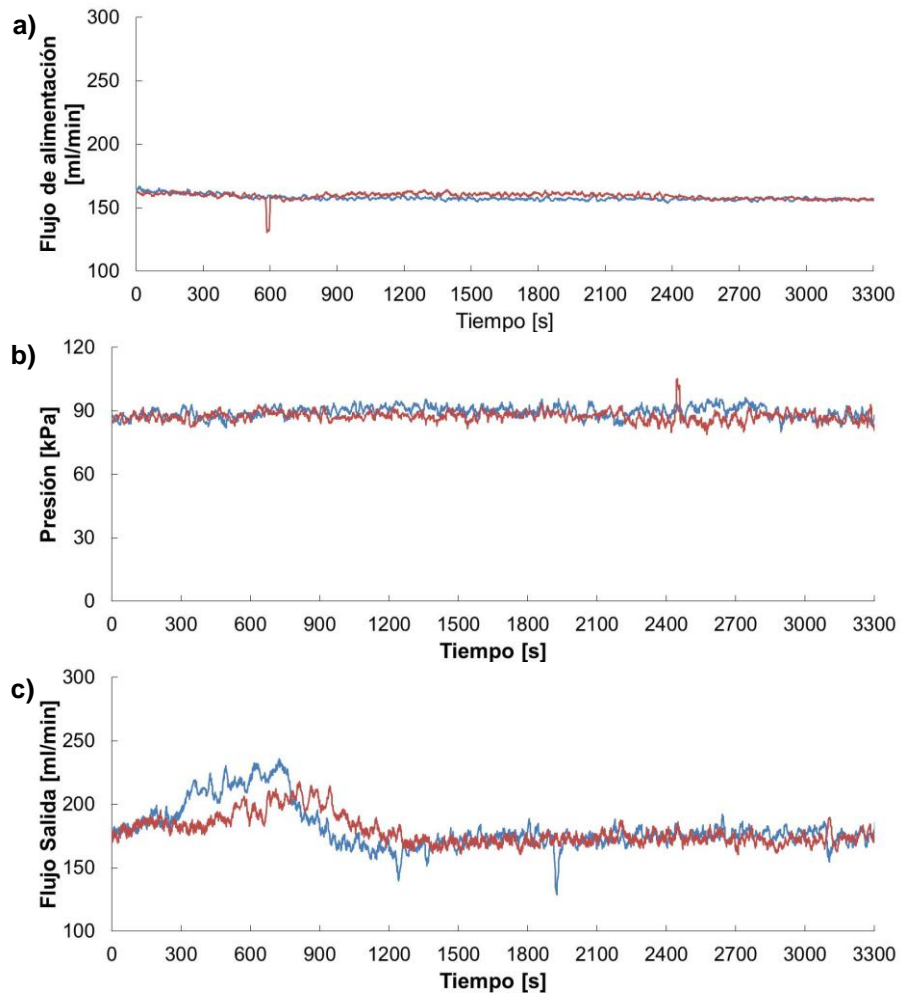
En esta tabla se puede apreciar que el rendimiento del aceite pasó de un 45,58%±1,53 de forma manual a 52,95%±1,71 con el sistema de control. Este aumento se debe a una disminución en la variabilidad del tiempo de retención de flujo dentro de las trampas de enfriamiento, lo que permitió una mayor condensación del gas, así como un mejor control en el tiempo de residencia dentro del reactor. Esto difiere del modo manual donde la apertura de la válvula de regulación fina modifica las condiciones de flujo de gas en la entrada. Igualmente, Bohórquez & Camargo [17] encontraron que el tiempo de residencia en el reactor es una variable influyente en el rendimiento de aceite, donde el mayor porcentaje se encuentra a bajos valores del mismo. De igual manera, estos autores obtuvieron un bajo rendimiento de gas para valores altos de rendimiento de aceite. Esto concuerda con los resultados obtenidos en el presente trabajo, donde el rendimiento en la producción de gases tuvo una disminución, pasando de un

32,10%±5,37 en modo manual a 13,47%±2,68 con el sistema de control. En cuando al rendimiento de *Char*, se evidenció que su generación fue similar para ambos modos de operación. Hay que mencionar además, que se observó una mejora significativa en el cierre del balance de masa pasando de 113,82%±7,32 a 102,37%±4,78 sobre balance de masa global; esto dado que se pudo cuantificar con mayor precisión la salida de gases no condensables.

El análisis de respuesta de cada uno de los sensores implementados se realizó aplicando la media móvil como herramienta estadística, suavizando las curvas obtenidas del proceso. Quispe & Purca [66] y Pérez, Mosquera & Bravo [67], emplearon dicha herramienta en sus investigaciones como técnica para suavizar y ajustar datos, facilitando su implementación en modelos predictivos.

La Figura 10 muestra la respuesta de los sensores empleados en el control del flujo de alimentación de gas, la presión del sistema y la cuantificación de gases en la salida para las dos reacciones realizadas. En ellas se puede apreciar que el flujo de alimentación durante la reacción se mantuvo en un valor promedio de 158,58ml.min⁻¹±1,05, con una desviación de -3,58ml.min⁻¹±1,05 en estado estacionario. Asimismo, la presión del sistema estuvo en un valor promedio de 88,44kPa±1,42, con una desviación en estado estacionario de -5,7kPa±1,42. También es posible apreciar mediante el flujo de salida, que la reacción de pirólisis en este piloto a dichas condiciones se da en un tiempo de 1016s±205,06 (16,94min±3,42), aproximadamente.

Figura 10. Respuesta de los sensores durante las pruebas experimentales a $T=466^{\circ}\text{C}$, $P=82,74\text{kPa}$ y $F=155\text{ml/min}$. a) flujo de alimentación, b) presión a la salida del sistema, c) flujo de salida.



Es importante aclarar que al modificar las condiciones de operación, el comportamiento del proceso en lazo cerrado podría cambiar considerablemente. Este efecto se debe a que los procesos químicos, entre ellos los sistemas reactivos, son altamente no lineales [20], regidos por modelos matemáticos no lineales; los cuales determinan la dependencia de aspectos como sensibilidad y velocidad de respuesta en función de las condiciones de operación (manifestados a partir de velocidades de reacción, coeficientes de transferencia, entre otros [69]. Motivo por el cual, el sistema de control deberá reajustarse para nuevas condiciones de operación (ej. en los tiempos de muestreo y tiempo de respuesta del EFC y valores de referencia de las variables controladas).

5. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten concluir que:

✓ Se realizó el diseño conceptual del sistema de control automático mediante el estudio de las condiciones de operación de la unidad piloto de pirólisis. Dentro del desarrollo se abordaron los temas de flexibilidad y economía, igualmente se definieron los requerimientos de operación del sistema del piloto con una estrategia *feedback* de control *On-Off*, que permitiera adaptar los sensores adquiridos previamente por el grupo INTERFASE. Dicha estrategia fue empleada para controlar el flujo de alimentación y la presión del sistema. Para ello, se seleccionó una placa arduino UNO como *hardware* por su bajo costo, de igual manera, Arduino 1.8.2 y *NetBeans 8.2* como *software* por ser de acceso libre y compatible con los elementos.

✓ Se construyó el sistema de control automático para la presión y el flujo de alimentación a partir de los requerimientos establecidos para su uso a escala laboratorio. Dicho sistema constituido por sensores y válvulas permiten operar el sistema de manera estable. La estrategia de control *On-Off* implementada tanto para el flujo de alimentación como para la presión del sistema siempre presentó un margen de error como resultado de las dos posiciones fijas de la válvula; margen que se disminuyó al acoplar un módulo amortiguador, mejorando con ello la cuantificación de gases en la salida del proceso. Se ajustaron experimentalmente las variables flujo de alimentación en $155\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ y la presión del sistema en 100kPa para disminuir el tiempo de estabilización durante el arranque del proceso, el cual fue de 252s , con una frecuencia de oscilación para el flujo de alimentación y presión del sistema de $0,21\pm 0,02$ y $0,29\pm 0,06\text{s}^{-1}$, respectivamente.

✓ Se evaluó el desempeño del sistema de control automático implementado mediante el desarrollo de pruebas experimentales con reacción. En ellas se observó que con la implementación del sistema de control se aumentó la producción de aceite para las condiciones actualmente utilizadas por el grupo

INTERFASE, pasando de $45,58 \pm 1,53\%$ bajo operación en modo manual a $52,95 \pm 1,71\%$ con el modo automático. De igual manera, se obtuvo una mejora importante en el cierre del balance pasando de un exceso de $113,82 \pm 7,32\%$ bajo operación manual a $102,27 \pm 4,78\%$ en modo automático.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda verificar el sistema de control a otras condiciones de presión, flujo de alimentación y temperatura, con el propósito de evaluar su comportamiento en base a la sensibilidad y rapidez de respuesta del sistema.

- ✓ Adquirir válvulas proporcionales y reprogramar el microcontrolador a un sistema de control PID como método alternativo, y a partir de éste, analizar el rendimiento y cierre del balance del sistema pirolítico a diferentes condiciones de operación del piloto.

- ✓ Realizar una revisión periódica a las partes internas de los elementos finales de control basados en el periodo y frecuencia de uso de los mismos, como medida preventiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] GÓMEZ, Alexánder; KLOSE, Wolfgang y RINCÓN, Sonia. Pirólisis de biomasa: Cuesco de Palma de Aceite. Alemania: Kassel University, 2008. 11-13 p. ISBN 978-3-89958-457-8.

[2] SÁNCHEZ RODRÍGUEZ, Yenny Milena y VILLAMIZAR RINCÓN, Diego Fernando. Estudio experimental de la pirólisis intermedia de caucho de llantas usada para producción de combustibles líquidos. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 17-42 p.

[3] FERNÁNDEZ DÍEZ, Yolanda. Tratamientos térmicos asistidos con microondas en procesos de valorización energética. Tesis Doctoral. España: Universidad de Oviedo. Departamento de Ingeniería Química y Tecnología del Medio Ambiente, 2010. 22-29 p.

[4] CELY VALDERRAMA, Yeniffer Viviana. Modelo matemático de la pirolisis intermedia de caucho de llantas en un reactor a lecho fijo. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 15-25 p.

[5] FERREIRA BELTRÁN, Deyanira y PALENCIA BLANCO, Cristian Giovanny. Utilización de catalizadores heteropoliácidos para el mejoramiento de la producción de aromáticos a partir de pirólisis de llanta usada. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 16-47 p.

[6] MONTEIRO MACHADO, Cristina María. Situación de los Biocombustibles de 2da y 3era Generación en América Latina y Caribe. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), 2010. 2 p.

[7] MANCILLA MANRIQUE, Álvaro Javier. Metodología de extracción de fenoles presentes en biooil a partir de biomasa residual. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 13 p.

[8] SPANEVELLO, Rolando A., SUÁREZ, Alejandra G. y SAROTTI, Ariel M. Fuentes alternativas de materia prima. Educ. quím. 2013, Vol. 24, nro. 1, pp. 124-131.

[9] PEÑA, Eliana, PÉREZ, Aída R., MIRANDA, Ander J. y SÁNCHEZ, José H. Modelado de un reactor químico tipo CSTR y la evaluación de control predictivo aplicando Matlab-Simulink. Rev. Ingeniería UC. 2008, Vol.15, nro. 3, pp. 97-112.

[10] BORZACCONI VIDAL, Liliana y LÓPEZ, Iván. En: Facultad de Ingeniería Universidad de la Republica-Uruguay. [sitio web]. Notas del curso de: Introducción al diseño de reactores. Última actualización: agosto 2009. [Consultado: 15 septiembre 2016]. Archivo pdf. Disponible en: <https://www.fing.edu.uy/iq/maestrias/DisenioReactores/materiales/notas1.pdf>

[11] LIPTÁK, Béla G. Instrument Engineers' Handbook, Process Control and Optimization. 4 ed. EEUU: CRC press, Taylor & Francis Group. 2006. vol. 2. ISBN 978-0-8493-1081-2.

[12] SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. Control Automático de Procesos: Teoría y Práctica; MANZANARES BAZURTO, Sergio D. (Trad.). México D.F, México: Limusa Wiley, 2007. 25-27 p. ISBN 978-968-18-3791-4.

[13] CALDERÓN, María Fernanda y TORRES ALBARRACÍN, Astrid. Diseño y puesta en marcha del montaje de una planta piloto a escala laboratorio para producción de Bio-Oil a partir de biomasa mediante pirólisis. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 16-41 p.

[14] ÁLVAREZ GIL, Pedro José. Optimización del proceso de producción de Bio-Oil a partir de bagazo de caña de azúcar por pirólisis intermedia. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2012. 18 p.

[15] TARAZONA CÁRDENAS, Sindy Yurany. Optimización del proceso de producción de Bio-Oil a partir de raquis de palma de aceite por pirólisis intermedia. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2013. 18-19 p.

[16] VECINO MANTILLA, Juan Sebastián. Desarrollo de un método extractivo de la fracción fenólica presente en el bio-oil producido por pirólisis intermedia. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 37-38 p.

[17] BOHÓRQUEZ RODRIGUEZ, Luis Enrique y CAMARGO ANGARITA, Catalina. Estudio de la influencia del tiempo de residencia de gases en la

producción de aceite pirolítico a partir de caucho de llanta de desecho. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 16-65 p

[18] DISTEFANO, Joseph J., STUBBERUD, Allen R. y WILLIAMS, Iván J. Retroalimentación y sistemas de control; GÓMEZ CRUZ, Rigoberto (Trad.); SANCHEZ TELLEZ, Jorge Luis (Rev.). 2 ed. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1992. 1 p. ISBN 958-600-101-6.

[19] SAUCEDO FLORES, Salvador y RODRÍGUEZ GARCÍA, José Luis. Apuntes de control automático de procesos. México: Instituto Politécnico Nacional, 2005. 21 p.

[20] SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos: Teoría y práctica; SANJUÁN, Marco E. y ANZALONE, Alessandro (Trad.). 2 ed. México D.F.: Limusa Wiley, 2014. 10-202 p. ISBN 978-607-05-0721-2.

[21] MARAÑA, Juan Carlos. Curso de Formación: Instrumentación y control de procesos. España: Idom, 2005. 20 p.

[22] ROJANO ROJAS, Santiago. Instrumentación y control en instalaciones de procesos, energía y servicios auxiliares. España: IC editorial, 2012. ISBN 978-84-16207-07-7.

[23] GARCÍA GUTIÉRREZ, Luis. Instrumentación básica de medida y control. España: AENOR ediciones, 2014. 14 p. ISBN 978-84-8143-858-1.

[24] CREUS SOLÉ, Antonio. Instrumentación Industrial. 6 ed. Santafé de Bogotá: Alfa Omega, 1997. 72 p. ISBN 958-682-135-8.

[25] BALLESTER RODRÍGUEZ, Armando, FERNÁNDEZ SANCHÉZ, José Antonio y LÓPEZ GETA, Juan Antonio. Medida y Evaluación de las Extracciones de Agua Subterránea. España: Instituto Tecnológico Geominero de España, 1999. 21-42 p. ISBN 84-7840-361-2.

[26] CARO RAMÍREZ, José Ramón. Diseño y construcción de un reactor de lecho fluido para una planta piloto. Trabajo de grado Ingeniero Químico. España: Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. Departamento de ingeniería Química y Ambiental, 2014. 55 p.

[27] LÓPEZ GARCÍA, Elisa. Gasificación de Char de Lodo en Condiciones de Lecho Fluidizado. Trabajo de grado Ingeniero Químico. España: Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. Departamento de ingeniería Química y Ambiental, 2013. 42-49 p.

[28] DÍAZ TRUJILLO, Sandra. Ingeniería de Detalle y Construcción de un Sistema de Gasificación en Tres Etapas. Trabajo de grado Ingeniero Químico. España: Universidad de Sevilla. Escuela Superior de Ingenieros. Departamento de ingeniería Química y Ambiental, 2014. 44-48 p.

[29] MOLLOCANA LARA, Juan Gabriel. Desarrollo del control de proceso en un banco de ensayos de reactores de partículas a alta temperatura. Tesis de Maestría. España: Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Diseño Industrial, 2013. 47 p.

[30] NATIONAL INSTRUMENTS. [sitio web]. Cómo hacer medidas con células de carga o transductores de presión. Última actualización: 19 agosto 2013. [Consultado: 05 agosto 2016]. Disponible en: <http://www.ni.com/tutorial/7138/es/>

[31] Parr Instrument Company. [sitio web]. Fluidized Bed Reactors. [Consultado: 25 septiembre 2016]. Disponible en: <http://www.parrinst.com/products/tubular-reactor-systems/fluidized-bed-reactors/>

[32] BOLÍVAR OSORIO, Francisco Javier. Evaluación del comportamiento a elevadas temperaturas de recubrimientos de Al, Si, y Al modificado con Si y Hf depositados mediante CVD-FBR sobre aceros ferrítico-martensíticos (9-12%Cr). Tesis Doctoral. Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Ciencias Físicas. Departamento de Física de Materiales, 2007. 97 p. ISBN 978-84-669-3115-1.

[33] CONTRERAS CANTEROS, Francisco Eduardo. Estudio de la pirólisis catalítica de polietileno en un reactor semi-batch. Tesis de Maestría. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología, 2014. 31 p.

[34] RUBIO MENA, Juan Antonio. Nociones básicas sobre adquisición de señales. En: Redeya.com. [sitio web]. Última actualización: diciembre de 2000. [Consultado: 07 julio 2016]. Disponible en: <http://redeya.bytemaniacos.com/electronica/tutoriales/adatos/adquisicion.html>

[35] LIPPI, Rodrigo Augusto y RIBEIRO, Carlos Augusto. Sistema de aquisição de dados utilizando um mestre modbus/rtu. En: DLG automação.[sitio web]. Última actualización: 2012. [Consultado: 07 julio 2016]. Archivo pdf. Disponible en:

<http://www.dlg.com.br/userfiles/files/sistema%20de%20aquisicao%20de%20dados%20utilizando%20um%20mestre%20modbusrtu.pdf>

[36] PALLÁS ARENY, Ramón. Adquisición y distribución de señales. España: Marcombo, 1993. 1-3 p. ISBN 84-267-0918-4.

[37] KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. Data Acquisition and Control Handbook: A Guide Hardware and Software for Computer-Based Measurement and Control. 1 ed. United States: Keithley Instruments, Inc., 2001.1-6 p.

[38] ENRÍQUEZ HERRADOR, Rafael. Guía del Usuario de Arduino. España: Universidad de Córdoba. Ingeniería Técnica Industrial en Sistemas, 2009. 1-49 p. (Trabajo publicado bajo licencia Creative-Commons: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/>).

[39] RUIZ GUTIÉRREZ, José Manuel. Entorno gráfico de programación para la plataforma arduino. En: Educación Secundaria y Universitaria: Robótica Control Simulación. [sitio web]. Última actualización: noviembre de 2011. [Consultado: 04 agosto 2016]. Disponible en: <http://josemanuelruizgutierrez.blogspot.com.co/>

[40] CITILAB. [sitio web]. S4A. [Consultado: 13 septiembre 2016]. Disponible en: <http://s4a.cat/>

[41] DA SILVA GUILLING, Julián. [sitio web]. Minibloq. En: Minibloq Org. [Consultado: 13 septiembre 2016]. Disponible en: <http://blog.minibloq.org/>

[42] GARCÍA GONZÁLEZ, Anthony. Java: El gran compañero de Arduino. En: PanamaHitek, conocimiento libre de Panamá para el mundo. [sitio web]. Última actualización: 28 de enero de 2013. [Consultado: 20 diciembre 2016]. Disponible en: <http://panamahitek.com/java-el-gran-companero-de-arduino/>

[43] FERREIRA BELTRÁN, Deyanira y PALENCIA BLANCO, Cristian Giovanny. Manual Técnico del Reactor de Pirólisis. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Grupo de Investigación INTERFASE, 2015. 2-11 p.

[44] VELANDIA ARDILA, Claudia Marcela. Implementación de un sistema de control de pH y temperatura para un biodigestor anaerobio de lecho fijo. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2010. 20-23 p.

[45] GELVÉZ AROCHA, Omar Armando, QUIROGA MÉNDEZ, Jabid E., BARAJAS MERCHÁN, Daniel Eduardo y GÓMEZ SARMIENTO, Martha Liliana. Estudio Experimental de las estrategias de control on-off y control continuo en un sistema de refrigeración. UIS Ingenierías. 2012, vol. 11, nro. 1. pp. 73-82. ISSN 1657-4583.

[46] MUÑOZ QUIROGA, Carlos Julián y SOLANO GÓMEZ, Richard José. Construcción e implementación de un piloto de laboratorio de evaporación de película descendente. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2014. 26-31 p.

[47] NETBEANS. [sitio web]. Instrucciones de instalación de NetBeans IDE 6.8. Última actualización: 7 de Diciembre de 2009. [Consultado: 09 septiembre 2016]. Disponible en: https://netbeans.org/community/releases/68/install_es.html

[48] ARDUINO [sitio web]. Arduino, Install the Arduino Software (IDE) on Windows PCs. Última actualización: 09 agosto 2016. [Consultado: 09 septiembre 2016]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Windows>

[49] FITZGERALD, Scott, SHILOH, Michael y IGOE, Tom. Arduino Projects Book; FERNÁNDEZ CUETO, Florentino Blas (Trad.). 1 ed. Torino, Italia: Arduino Italia, 2012. 5-169 p. (Licencia Creative-Commons: Reconocimiento–NoComercial–CompartirIgual 3.0 del 2012 por Arduino LLC)

[50] ATMEL CORPORATION. ATMEGA328/P Datasheet complete. California, Estados Unidos: ATMEL, 2016.

[51] TDROBÓTICA. [sitio web]. Guía Básica de Arduino. [Consultado: 30 noviembre 2016]. Archivo pdf. Disponible en: http://tdrobotica.co/download/Libro_kit_Basico.pdf

[52] ROBOTSHOP INC. [sitio web]. USA: RobotShop, Arduino Uno R3 USB Microcontroller. [Consulta: 20 noviembre 2016]. Disponible en: <http://www.robotshop.com/en/arduino-uno-r3-usb-microcontroller.html>

[53] THERMO FISHER SCIENTIFIC INC. [sitio web]. Cole Parmer™ Differential Pressure Flowmeters. [Consultado: 29 marzo 2017]. Disponible en: <https://www.fishersci.es/shop/products/differential-pressure-flowmeters-3/p-8003738>

[54] ELECTROCREA. [sitio web]. Sensor de presión diferencial MPX5700DP. [Consultado: 24 diciembre 2016]. Disponible en: <https://electrocrea.com/products/sensor-de-presion-diferencial-mpx5700dp>

[55] DANFOSS. [sitio web]. EV210B, Válvulas solenoides de acción directa 2/2 vías. [Consultado: 20 octubre 2016]. Disponible en: <http://products.danfoss.es/productrange/faq/industrialautomation/solenoid-valves/ev210b-direct-operated-2-2-way-solenoid-valves/#/>

[56] MONK, Simón. 30 proyectos con Arduino; POMPA, Javier (Rev.). 1 ed. Madrid, España: Estribor, 2012. 1-13 p. ISBN 978-84-940030-0-4.

[57] GARCÍA GONZÁLEZ, Anthony. Comunicación Serial con Arduino. En: PanamaHitek, conocimiento libre de Panamá para el mundo. [sitio web]. Última actualización: 27 de enero de 2013. [Consultado: 23 diciembre 2016]. Disponible en: <http://panamahitek.com/comunicacion-serial-con-arduino/>

[58] FREESCALE SEMICONDUCTOR INC. Datasheet MPX5700DP. Austin, Texas, Estados Unidos: Freescale Semiconductor Inc, 2009.

[59] UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER. En: Instagram. [en línea]. [Consultado: 28 diciembre 2016]. Disponible en: [instagram@uisenlinea](https://www.instagram.com/uisenlinea)

[60] GARCÍA GONZÁLEZ, Anthony. . Librería PanamaHitek_Arduino v2.8.2. En: PanamaHitek, conocimiento libre de Panamá para el mundo. [sitio web]. Última actualización: 13 de noviembre de 2016. [Consultado: 20 diciembre 2016]. Disponible en: http://panamahitek.com/libreria-panamahitek_arduino/

[61] WICHT, Baptiste. Présentation et utilisation de Launch4j. En: Developpez.com Club des développeurs et IT pro. [sitio web]. Última actualización: 02 octubre 2006. [Consultado: 18 enero 2017]. Disponible en: <http://baptiste-wicht.developpez.com/tutoriels/java/outils/launch4j/>

[62] RUSSEL, Jordan y LAAN, Martijn. Inno Setup. En: jrsoftware.org. [sitio web]. Última actualización: 2012. [Consultado: 08 enero 2017]. Disponible en: <http://www.jrsoftware.org/isinfo.php>

[63] BARAJAS MERCHAN, Daniel Eduardo y GÓMEZ SARMIENTO, Martha Liliana. Determinación de consumo energético de un sistema de refrigeración en carga parcial bajo esquemas de control continuo y control On-off. Trabajo de grado Ingeniería Mecánica. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica, 2009. 44-45 p.

[64] ÇENGEL, Yunus Ali y CIMBALA, John Michael. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones; CAMPOS OLGUÍN, Víctor (Trad.); FADEEVA SKNARINA, Sofía (Rev.). 1 ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 327-334 p. ISBN 970-10-5612-4.

[65] CIRCOR ENERGY. [sitio web]. Circor Energy, Needle Valves Hoke. [Consultado: 20 enero 2017]. Archivo pdf. Disponible en: http://www.hoke.com/Catalogs/Catalog_79352ENG_HOKE_Needle_Valves_10.15.13.pdf

[66] QUISPE, Carlos y PURCA, Sara. Previsión de la temperatura superficial del mar frente a la costa peruana mediante un modelo autorregresivo integrado de media móvil. Revista Peruana de Biología. 2007, Vol. 14, nro. 1, pp. 109-115.

[67] PÉREZ, Ricardo Alberto, MOSQUERA, Silvio Andrés y BRAVO, Juan José. Aplicación de modelos de pronósticos en productos de consumo masivo. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*. 2012, Vol. 10, nro. 2, pp. 117-125.

[68] Crespo, E. (17 de Noviembre de 2014). Aprendiendo Arduino. Recuperado el 2017 de Enero de 8, de <https://aprendiendoarduino.wordpress.com/tag/bootloader/>

[69] PIERRI, Francesco. Modeling, control and fault diagnosis for chemical batch reactor. *Tesi di Dottorato*. Italia: Università degli Studi della Basilicata. Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente, 2006. 6-14 p.

BIBLIOGRAFÍA

BOHÓRQUEZ RODRIGUEZ, Luis Enrique y CAMARGO ANGARITA, Catalina. Estudio de la influencia del tiempo de residencia de gases en la producción de aceite pirolítico a partir de caucho de llanta de desecho. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2016. 16-65 p

CELY VALDERRAMA, Yeniffer Viviana. Modelo matemático de la pirolisis intermedia de caucho de llantas en un reactor a lecho fijo. Tesis de Maestría. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 15-25 p.

ÇENGEL, Yunus Ali y CIMBALA, John Michael. Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones; CAMPOS OLGUÍN, Víctor (Trad.); FADEEVA SKNARINA, Sofía (Rev.). 1 ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana, 2006. 327-334 p. ISBN 970-10-5612-4.

FERREIRA BELTRÁN, Deyanira y PALENCIA BLANCO, Cristian Giovanny. Utilización de catalizadores heteropoliácidos para el mejoramiento de la producción de aromáticos a partir de pirólisis de llanta usada. Trabajo de grado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química, 2015. 16-47 p.

GARCÍA GONZÁLEZ, Anthony. Comunicación Serial con Arduino. En: PanamaHitek, conocimiento libre de Panamá para el mundo. [sitio web]. Última actualización: 27 de enero de 2013. [Consultado: 23 diciembre 2016]. Disponible en: <http://panamahitek.com/comunicacion-serial-con-arduino/>

SMITH, Carlos A. y CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos: Teoría y práctica; SANJUÁN, Marco E. y ANZALONE, Alessandro (Trads.). 2 ed. México D.F.: Limusa Wiley, 2014. 10-202 p. ISBN 978-607-05-0721-2.