

**CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES EN UN DESTILADOR DE ACEITES  
ESENCIALES QUE UTILIZA BIOCOMBUSTIBLE DEL CENIVAM-UIS**

**HAROLD HERNANDO MONROY BUITRAGO  
DIANA CAROLINA PRIETO ECHEVERRY**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

**CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES EN UN DESTILADOR DE ACEITES  
ESENCIALES QUE UTILIZA BIOCOMBUSTIBLE DEL CENIVAM-UIS**

**HAROLD HERNANDO MONROY BUITRAGO  
DIANA CAROLINA PRIETO ECHEVERRY**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
ingeniero electrónico**

**Director  
RICARDO ALZATE CASTAÑO,  
PhD en Ingeniería Informática y Automática**

**Co-Directores:  
JAIRO RENÉ MARTÍNEZ MORALES  
PhD en Química**

**SERGIO FABIÁN MUÑOZ SUÁREZ  
Ingeniero Electrónico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA**

**2016**

## DEDICATORIA

*A Dios, a mi madre Eddy Buitrago Miranda y mi padre Hernando Monroy.  
Todo lo que soy y seré, es por y para ellos...*

*En memoria de mi nona Ana Rosa Monroy, mi abuela Paulina Pinzón,  
mi madrina María Elvira Sánchez, mi tía Elvira Raquel Barragán...  
y Luis Bustamante Bazan.*

*Harold Hernando Monroy Buitrago*

## DEDICATORIA

*A Dios y a mis padres que permitieron la culminación de esta meta.*

*Diana Carolina Prieto Echeverry.*

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios, por ser esa luz que guía mi camino y por brindarme la fuerza que me impide desfallecer.*

*A mis padres, los motores de mi vida, quienes con su apoyo incondicional, sacrificio, paciencia, amor y cariño han hecho posible este logro.*

*Agradecido eternamente con estas dos maravillosas personas.*

*A mi familia, por su constante apoyo moral y afectivo. En especial a mi nona Bertha Miranda y mi tío Weizzmann Joya, por ser esas personas modelo a seguir.*

*A mi otra madre Nelly Gómez, mis hermanos Luis Alfonso Bustamante y Francisco Bustamante, por ser parte fundamental en mi vida al ofrecerme un hogar lleno de familiaridad pura y sincera.*

*A mis grandes amigos, Cesar Durán, Michael Acevedo, Anderson Atuesta, Sady Silva, Carlos Lagos, David Pacheco, Luis Lozano, Jose Monsalve, Jose Luis López, German Pico, Sergio García, Frank Bonces y Camilo Calderón, porque sin ellos este largo camino habría sido muy triste y más difícil de recorrer.*

*A mis colegas de comunidad académica y especialmente a los integrantes del grupo de investigación CEMOS por su compañía.*

*A Sergio Fabián Muñoz Suárez por su imprescindible colaboración durante estos últimos años.*

*Al profesor Ricardo Alzate Castaño por la confianza y guía en el desarrollo de este proyecto.*

*Y finalmente, al personal del CENIVAM por su cooperación para concluir esta etapa de pregrado.*

**Harold Hernando Monroy Buitrago**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A Dios por darme la fortaleza para seguir durante todo este camino.*

*A mis padres por su constante apoyo y amor.*

*A mis amigos por su compañía.*

*Al profesor Ricardo Alzate, a Sergio Muñoz y al CENIVAM por su ayuda y guía  
para el desarrollo de este proyecto.*

***Diana Carolina Prieto Echeverry.***

## CONTENIDO

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| INTRODUCCIÓN .....  | 18          |
| 1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....                    | 22          |
| 1.1. OBJETIVOS .....  | 23          |
| 1.1.1. Objetivo general .....                                       | 23          |
| 1.1.2. Objetivos específicos .....                                  | 23          |
| 2. PROCESO DE HIDRODESTILACIÓN DEL CENIVAM-UIS .....                | 24          |
| 2.1. PROCESO DE HIDRODESTILACIÓN .....                              | 24          |
| 2.1.1. Subsistema de combustión .....                               | 25          |
| 2.1.2. Subsistema de extracción .....                               | 26          |
| 2.1.3. Subsistema de recuperación .....                             | 27          |
| 2.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA .....                                    | 28          |
| 2.2.1. Elementos de actuación .....                                 | 31          |
| 2.2.2. Elementos de sensado .....                                   | 33          |
| 2.2.3. Captura de datos del proceso .....                           | 36          |
| 2.3. SISTEMA FINAL IMPLEMENTADO .....                               | 39          |
| 3. MODELADO MATEMÁTICO DEL PROCESO .....                            | 41          |
| 3.1. MODELO SIMPLIFICADO PARA UN COMBUSTOR DE BIOMASA .....         | 41          |
| 3.1.1. Subsistema de evaporación de agua del combustible .....      | 42          |
| 3.1.2. Subsistema de descomposición térmica para biomasa seca ..... | 43          |

|   |    |
|---|----|
| 3.1.3. Subproceso de transferencia de calor .....                                 | 44 |
| 3.1.4. Subproceso de temperatura de vapor de caldera .....                        | 45 |
| 3.1.5. Subproceso de temperatura inicial para humos de combustión.....            | 46 |
| 3.1.6. Subsistema de temperatura final para humos de combustión .....             | 47 |
| 3.1.7. Subsistema de porcentaje de oxígeno en humos de combustión .....           | 47 |
| 3.1.8. Modelo matemático final .....  | 48 |
| 3.2. EMISIONES CONTAMINANTES DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN .....                    | 49 |
| 4. IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS.....                                 | 53 |
| 4.1. PARÁMETROS CONOCIDOS DEL MODELO .....  | 53 |
| 4.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS DESCONOCIDOS.....                                      | 54 |
| 4.2.1. Obtención para datos experimentales de referencia.....                     | 56 |
| 4.2.2. Determinación de parámetros a través de temperatura .....                  | 57 |
| 4.2.3. Determinación de parámetros a través de porcentaje de O <sub>2</sub> ..... | 59 |
| 4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO IDENTIFICADO .....                        | 62 |
| 5. CONCLUSIONES .....   | 65 |
| 6. RECOMENDACIONES.....   | 68 |
| 7. TRABAJO FUTURO .....   | 69 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....   | 70 |
| BIBLIOGRAFIA.....   | 75 |
| ANEXOS .....  | 80 |

## LISTA DE FIGURAS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Figura 1. Ilustración para una destilación simple [4] .....   | 18          |
| Figura 2. Proceso para hidrodestilación de aceites esenciales [20].....   | 21          |
| Figura 3. Esquema de proceso de hidrodestilación CENIVAM-UIS [24].....  | 25          |
| Figura 4. Subsistema de combustión [24].....  | 26          |
| Figura 5. Subsistema de extracción [24].....  | 27          |
| Figura 6. Subsistema de recuperación [24] .....   | 29          |
| Figura 7. Diagrama de operación del proceso de hidrodestilación .....   | 30          |
| Figura 8. Diagrama de entradas y salidas para proceso de hidrodestilación .....   | 31          |
| Figura 9. Tuberías para suministro de aire [24] .....   | 32          |
| Figura 10. Panel de accionamiento.....  | 33          |
| Figura 11. Bomba para recirculación de hidrolato.....   | 33          |
| Figura 12. Instalación de dispositivos de sensado en hidrodestilador CENIVAM<br>UIS: (a) vapor cuello de cisne; gases combustión inicio (b) y final (c) .....   | 35          |
| Figura 13. Transmisor de temperatura.....   | 36          |
| Figura 14. Interfaz de usuario para captura de datos .....  | 37          |
| Figura 15. Captura de datos para variables del proceso: (a) temperatura en<br>cuello de cisne; (b) temperatura final de combustión; (c) temperatura inicio de<br>combustión y (d) porcentaje de oxígeno ..... | 38          |
| Figura 16. Esquema de conexión para sistema de adquisición de datos .....   | 39          |
| Figura 17. Planta de hidrodestilación en CENIVAM-UIS .....  | 40          |
| Figura 18. Horno de parrilla para incineración de biomasa.....  | 42          |
| Figura 19. Diagrama de bloques para modelo de combustión de biomasa .....   | 49          |
| Figura 20. Relación entre emisiones y exceso de aire [30].....  | 50          |
| Figura 21. Algoritmo de identificación de parámetros .....  | 56          |

|  |    |
|--|----|
| Figura 22. Contraste entre simulación (línea punteada) y primeros datos experimentales (línea continua) para variables de: (a) temperatura en cuello de cisne; (b) temperatura inicio de combustión y (c) temperatura final de combustión..... | 60 |
| Figura 23. Contraste entre simulación (línea punteada) y segundos datos experimentales (línea continua) para variables de: (a) temperatura en cuello de cisne; (b) temperatura inicio de combustión y (c) temperatura final de combustión..... | 61 |
| Figura 24. Contraste entre simulación (línea punteada) y datos experimentales (línea continua) para porcentaje de oxígeno en: (a) primera prueba y (b) segunda prueba .....  | 63 |

## LISTA DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Características motor suministro de aire .....                                    | 32          |
| Tabla 2. Características motor suministro de biomasa .....                                 | 32          |
| Tabla 3. Características de sensores de temperatura empleados .....                        | 34          |
| Tabla 4. Características sistema de adquisición de datos .....                             | 36          |
| Tabla 5. Emisión admisible para combustión de biomasa [33] .....                           | 52          |
| Tabla 6. Valores de parámetro reportados en la literatura .....                            | 54          |
| Tabla 7. Parámetros nominales de entrada experimental.....                                 | 57          |
| Tabla 8. Parámetros iniciales y definitivos identificados a partir de temperatura ...      | 58          |
| Tabla 9. Parámetros iniciales y definitivos identificados a partir de O <sub>2</sub> ..... | 62          |

## LISTA DE ANEXOS

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| ANEXO A – FUNCIÓN <i>fminsearch</i> DE MATLAB ..... | 80          |

## RESUMEN

**TÍTULO:** CARACTERIZACIÓN DE EMISIONES EN UN DESTILADOR DE ACEITES ESENCIALES QUE UTILIZA BIOCOMBUSTIBLE DEL CENIVAM-UIS<sup>\*</sup>

**AUTORES:** HAROLD HERNANDO MONROY BUITRAGO  
DIANA CAROLINA PRIETO ECHEVERRY<sup>\*\*</sup>.

**Palabras Clave:** Combustión de Biomasa, Control de Procesos Industriales, Emisiones Contaminantes, Hidrodestilación de Aceites Esenciales, Instrumentación Electrónica.

### Descripción:

En el presente trabajo de grado se aborda la instrumentación, el modelado matemático y la identificación de parámetros, para un proceso real de hidrodestilación de aceites esenciales disponible en las instalaciones del CENIVAM UIS. Posterior a la identificación de las variables del proceso, se llevó a cabo la selección e instalación de sensores para la captura en tiempo real, mediante el acoplo a un sistema de adquisición de datos configurado por una interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW®, de las medidas relacionadas a la temperatura y la concentración de oxígeno presente en los humos derivados de la combustión de biomasa. Por lo tanto, a partir de esta información, se procedió a realizar un ajuste de curvas que permitió, empleando rutinas de simulación en MATLAB® basadas en un modelo simplificado de combustión biomasa reportado en la literatura, replicar la tendencia del comportamiento de los datos reales del proceso inicialmente mencionado. El resultado principal del presente trabajo correspondió con la identificación de una concentración no uniforme de porcentaje de oxígeno en los humos de combustión, lo cual repercute en gran medida la generación de emisiones contaminantes al ambiente. Teniendo en cuenta lo anterior, como trabajo complementario se propone readecuar y mejorar el sistema de actuación para la alimentación de flujos de aire y combustible en el proceso, facilitando el desarrollo y ejecución de tareas de control automático

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Ricardo Alzate Castaño, Ph.D.

## ABSTRACT

**TITLE:** CHARACTERIZATION OF EMISSIONS IN AN ESSENTIAL OIL HYDRODISTILLATION PROCESS AT CENIVAM-UIS\*

**AUTHORS:** HAROLD HERNANDO MONROY BUITRAGO  
DIANA CAROLINA PRIETO ECHEVERRY\*\*

**Key words:** Biomass Combustion, Industrial Process Control, Pollutant Emissions, Essential Oil Hydrodistillation, Electronic Instrumentation.

### **Description:**

In this work, the instrumentation, mathematical modeling and parameter identification for an essential oil hydrodistillation process available at CENIVAM UIS, is performed. After identifying the relevant variables of the process, the selection and installation for a set of sensing devices was carried out to acquire real time data registers of temperature and concentration of oxygen in flue gases from a biomass combustion process, using an acquisition system configured in LabVIEW®. Therefore, data fitting procedures based on minimization of the mean square error allowed to replicate numerically the behavior of the real hydrodistillation process using MATLAB® simulation routines, executing a simplified model of biomass combustion reported in the literature and formulated in terms of a set of ordinary differential equations depicting all the phenomena involved. The most remarkable result for this project is related with detection of an erratic air/mass flow feeding the combustion process, which causes fluctuations and variations in concentration of the oxygen in the flue gas and therefore, emissions of air pollutants. Taking into account the above, as a complementary work it is proposed to improve the mechanisms for air input and fuel flows delivered to the combustion process as a preamble for further automation of hydrodistillation tasks.

---

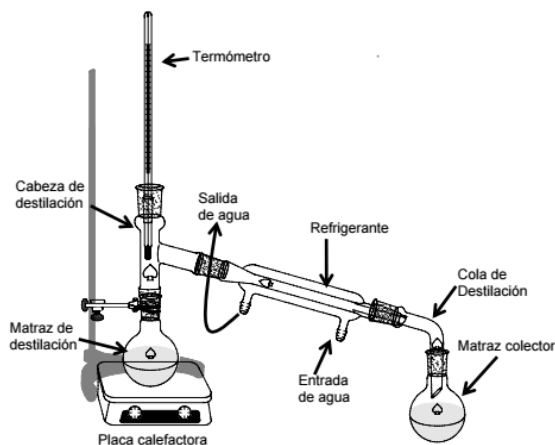
\* Degree work.

\*\* Physico-Mechanical Engineering Faculty. School of Electrical Engineering. Supervisor: Ricardo Alzate Castaño, Ph.D

## INTRODUCCIÓN

La destilación es la operación de separación de los componentes de mezclas más importante de la Industria Química. La técnica consiste en calentar la mezcla a separar hasta su punto de ebullición. En este momento los vapores en equilibrio con el líquido se enriquecen en el componente de la mezcla más volátil y a continuación los vapores se dirigen hacia un condensador que los enfría y los pasa a estado líquido. El líquido destilado tendrá la misma composición que los vapores y; por lo tanto, se consigue enriquecer el líquido destilado en el componente más volátil [1]. Es por esto, que la destilación generalmente es utilizada en la tecnología de separación, específicamente, en industrias petroleras y químicas para la purificación de productos finales, sin embargo, no sólo es aplicable hacia la separación de sustancias, sino para el mejoramiento en la transferencia de masa y la transferencia de energía térmica [2]. La Fig. 1 ilustra los elementos principales en un proceso de destilación simple o sencilla. También existe la destilación fraccionada, en la cual los ciclos de evaporación y condensación se repiten varias [3].

**Figura 1. Ilustración para una destilación simple [4]**



En cualquier caso, las variables controladas en un proceso de destilación son: la presión, los niveles de líquido en el fondo del destilador, la temperatura y la composición del producto. Específicamente, la presión y los niveles de líquido se deben mantener constantes para prevenir la acumulación de vapor y de líquido respectivamente. Si esta acumulación (positiva o negativa) no se previene, un sistema continuo no puede operar de manera estable ni alcanzar el régimen permanente [5]. Según la composición del producto y la temperatura en las cámaras de combustión del sistema, se determinan parámetros de rendimiento de la combustión ocurrente en el destilador, afectando así los tiempos de destilación, la eficiencia del proceso y la contaminación en los gases de combustión.

Este último punto, es de especial importancia dado el impacto ambiental que pueden llegar a generar las emisiones de procesos de destilación, principalmente a escala industrial, a través de la dispersión de subproductos potencialmente dañinos tales como hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOX) y otros agentes causantes del efecto invernadero y el calentamiento global [6].

En general, el control de un proceso de destilación requiere de modelos matemáticos apropiados para representar las variables del sistema. Trabajos al respecto reportados en la literatura, incluyen [7], [8], [9], [10] y [11]. Asimismo, algunos autores proponen por ejemplo, modelos físico-químicos para procesos de combustión de biomasa, como en [12], [13], [14], [15]. En particular, se destaca el trabajo de Gölles [15], quien propone un modelo simplificado para un incinerador de biomasa y realiza sobre el mismo acciones de control.

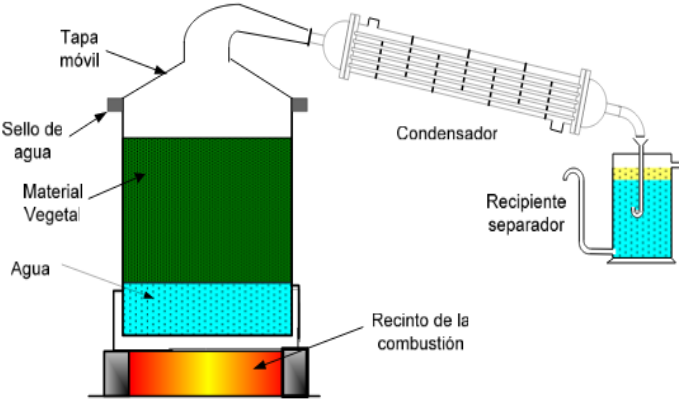
Adicional a un apropiado modelado, es bien conocida la alta dependencia del desempeño de técnicas de control, en los valores de parámetro considerados en los procedimientos de análisis y diseño. Aún si se trabaja con técnicas de control robusto, se deben conocer las cotas de incertidumbre. Debido a esto es

importante complementar un buen modelo del proceso mediante tareas de identificación de parámetros, realizadas a partir de inferencias estadísticas sobre datos experimentales, reales, del proceso [16].

De otro lado, el alto potencial de biodiversidad en Colombia ofrece una amplia variedad de opciones para una adecuada explotación de recursos naturales a escala agroindustrial [17]. Entre ellas, la extracción de aceites esenciales en plantas aromáticas posee gran acogida en la industria farmacéutica, cosmética y de alimentos en el mercado nacional [18]. Dichos extractos se obtienen de las plantas empleando métodos directos (compresión, raspado, lesiones mecánicas de la corteza), destilación (hidrodestilación, destilación con agua y vapor, destilación con vapor seco), extracción (con solventes volátiles, con solventes no volátiles, con fluidos supercríticos), enfluerage (adsorción sólido-líquido y/o sólido-gas) y headspace (purga y trampa simultáneas, purga y extracción con solvente simultáneas), entre otros [19].

En particular, el Centro Nacional para Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM) de la UIS, ha realizado estudios independientes basados en técnicas de hidrodestilación debido a su sencilla instalación, transporte y operación como también a un bajo costo y consumo energético [20] [21] [22]. En este proceso el material vegetal contenedor del aceite debe estar sumergido en agua, para después ser calentado hasta ebullición a través de algún método de calefacción como: chaquetas térmicas, serpentines de humo o resistencias eléctricas. La mezcla de vapor saturado y aceite esencial resultante de la ebullición, pasa a una etapa de condensación y es enfriada hasta la temperatura ambiente donde se obtiene una emulsión líquida que posteriormente es separada por un decantador en el cual se va acumulando el aceite esencial. La representación gráfica para el método de hidrodestilación se presenta en la Fig. 2, donde se identifican las principales partes de un destilador de aceites esenciales a lo largo de una columna de fraccionamiento [20].

Figura 2. Proceso para hidrodestilación de aceites esenciales [20]



## 1. PLANTEAMIENTO Y DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Los procesos de destilación se presentan en multiplicidad de aplicaciones industriales. Tomando en consideración que el principio fundamental de un proceso de destilación es la “separación” de compuestos en una sustancia, se generan residuos que en algunos casos representan agentes contaminantes, que deben ser controlados (e.g. emisiones gaseosas hacia el ambiente). Sin embargo, las descripciones matemáticas para los modelos de procesos de destilación son de alta complejidad, lo cual dificulta la tarea de un apropiado diseño e implementación de acciones de control sobre el sistema. Como alternativa, se propone un estudio de caso correspondiente con el proceso de extracción de aceites esenciales mediante hidrodestilación, como parte de los desarrollos del Centro Nacional para Agroindustrialización de Especies Vegetales Aromáticas y Medicinales Tropicales (CENIVAM) de la UIS. De esta manera, se cuenta con un sistema que permite producir la información de las variables reales de un proceso para efectuar posteriores tareas de identificación de parámetros y de validación de modelos (con base en información disponible en la literatura), en estudios preliminares para análisis y diseño de estrategias de control. Para poder obtener la información requerida, se deben identificar las variables físicas de interés en el sistema y dotarse de una infraestructura de instrumentación (sensores y actuadores) necesaria para acceder a las señales de estímulo y respuesta correspondientes. Con esta información a disposición debería ser posible cuantificar el comportamiento de las emisiones contaminantes en el proceso.

A partir de ello, es pertinente formular la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo formular a partir de datos experimentales un modelo matemático adecuado para las emisiones contaminantes en un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales?

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Obtener un modelo matemático para describir las emisiones contaminantes en un destilador de aceites esenciales del CENIVAM-UIS, a partir de datos experimentales del proceso.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Identificar las variables relevantes de un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales.
- Acondicionar la instrumentación requerida para sensar las variables relevantes de un destilador de aceites esenciales en el CENIVAM-UIS.
- Seleccionar con base en la literatura, un modelo apropiado para describir las emisiones contaminantes en un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales.
- Comparar el modelo del sistema con datos experimentales del proceso real.

## **2. PROCESO DE HIDRODESTILACIÓN DEL CENIVAM-UIS**

El presente Capítulo describe el proceso de hidrodestilación de aceites esenciales, sobre el cual se realizarán posteriores tareas de modelamiento y análisis de datos. Para ello se requiere acondicionar elementos de instrumentación electrónica (sensores y actuadores) que permitan adquirir los registros de señal para las variables importantes del proceso. Se realizará por tanto una descripción de los elementos empleados para dicho fin al igual que de su interconexión y modo de operación.

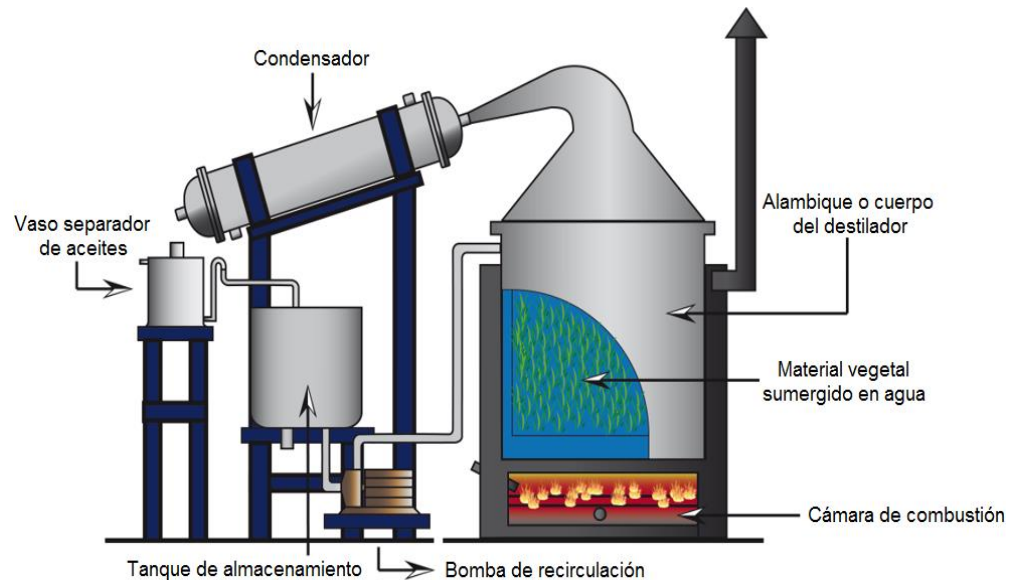
### **2.1. PROCESO DE HIDRODESTILACIÓN**

El principio de la hidrodestilación es llevar a estado de ebullición una suspensión acuosa de un material vegetal aromático, de tal manera que los vapores generados puedan ser condensados y colectados. El aceite, que es inmisible en agua, es posteriormente separado por decantación y normalmente presenta un color más oscuro respecto a los producidos por otros métodos [23].

Realizar un proceso de destilación requiere un recipiente en el cual se pueda sumergir la biomasa (material vegetal) a destilar en agua, una fuente de energía térmica para generar el vapor necesario para el arrastre de los aceites esenciales, un equipo que se encargue de condensar la mezcla de vapores generados en el recipiente de hidrodestilación, un equipo que permita separar el aceite esencial del condensado y un sistema que reenvíe el condensado hacia el recipiente donde se lleva a cabo el proceso.

Teniendo en cuenta lo anterior, la Fig. 3 muestra el sistema de hidrodestilación CENIVAM-UIS destacando cada uno de sus elementos y componentes físicos relevantes.

**Figura 3. Esquema de proceso de hidrodestilación CENIVAM-UIS [24]**



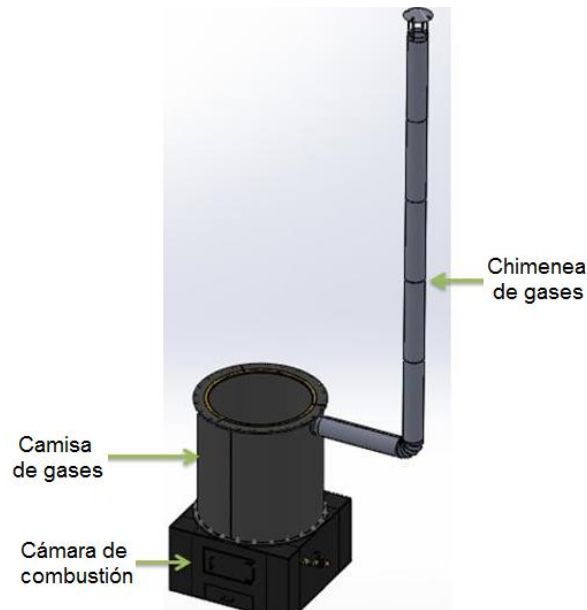
A su vez, es posible dividir el proceso en tres etapas principales tal y como se describe a continuación:

**2.1.1. Subsistema de combustión** Tiene como principal objetivo suministrar la energía térmica que se requiere para ejecutar el proceso de destilación. Para reducir costos de producción, se reutiliza la biomasa residual de los procesos de destilación. Los principales elementos que componen de este subsistema (ilustrados en la Fig. 4) son:

- *Cámara de combustión:* es donde se lleva a cabo la combustión de la biomasa. Cuenta con una conexión para un alimentador de biomasa y dos entradas para el suministro del aire primario y el aire secundario de combustión.

- *Camisa de gases*: conduce los gases producto de la combustión a lo largo de la superficie cilíndrica del alambique y los lleva hacia la chimenea, también evita que los gases de combustión se filtren hacia el exterior de la camisa y controla las pérdidas de calor.
- *Chimenea de gases*: salida de gases producto de la combustión de biomasa. El proceso de extracción de los gases se hace por medio del tiro natural [24] producido por la depresión en la presión del horno y de la cámara de combustión, debida a la altura de la chimenea.

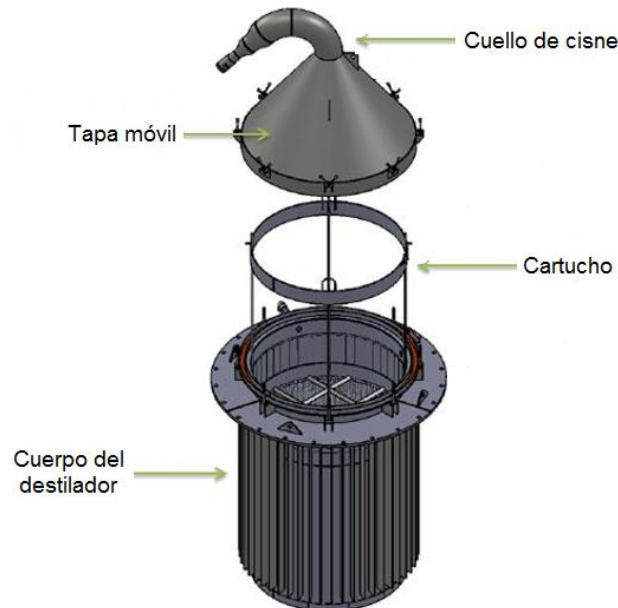
**Figura 4. Subsistema de combustión [24]**



**2.1.2. Subsistema de extracción** Encargado de la extracción del aceite esencial del material vegetal, por medio de la generación de vapor mediante el uso de energía térmica. Este vapor arrastra el aceite y es conducido a través del cuello de cisne de la tapa móvil del destilador hacia el condensador del sistema. Los elementos principales que constituyen este subsistema (ilustrados en la Fig. 5) son:

- *Cuerpo del destilador*: contiene en su interior el material vegetal a destilar. Su superficie externa es aleteada [24] para aprovechar al máximo la energía térmica de los gases de la combustión.
- *Cartucho*: alojado al interior del cuerpo del alambique para realizar carga del material vegetal a destilar.
- *Tapa móvil*: de forma cónica, para guiar el flujo de los vapores producidos durante la destilación hacia el cuello de cisne. Es móvil para facilitar el proceso de cargue y descargue del material vegetal a destilar.
- *Cuello de Cisne*: conduce los vapores hacia la condensación a través de una manguera conectada en su extremo.

**Figura 5. Subsistema de extracción [24]**



**2.1.3. Subsistema de recuperación** Tiene como fin condensar la mezcla de vapores de aceites esenciales y agua, generados en el alambique. En fase líquida,

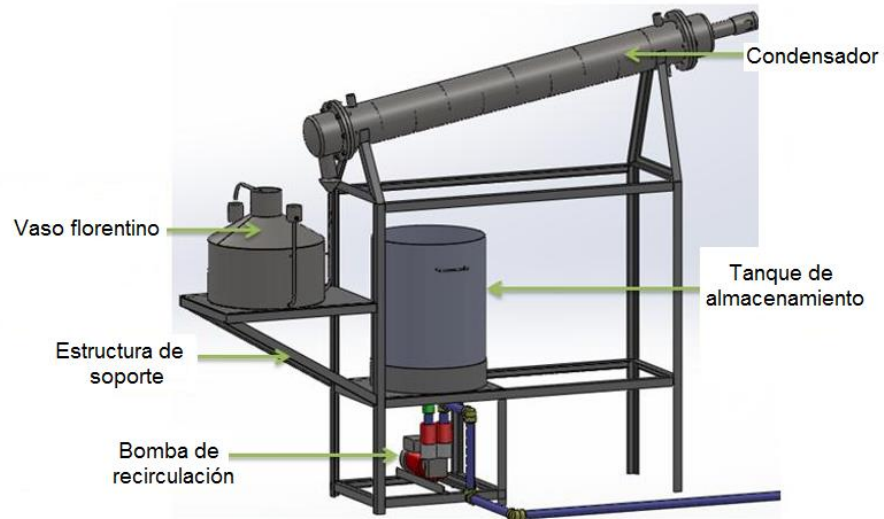
se separa la mezcla en el vaso florentino. Posteriormente, se acumula el aceite esencial en un recipiente y el hidrolato en un tanque, para ser llevado de vuelta hacia el alambique por la acción mecánica de una bomba de recirculación. Los elementos que constituyen este subsistema (ilustrado en la Fig. 6) son:

- *Condensador de casco y tubos*: tiene como fin condensar los vapores provenientes del alambique, los cuales pasan a través de sus tubos. La condensación se hace utilizando agua fresca proveniente de una torre de enfriamiento.
- *Vaso florentino*: acumula la mezcla condensada de aceite esencial y agua. Cuenta con un diseño que permite, por medio de diferencia de densidades, separar la mezcla y acumular en su interior el aceite esencial.
- *Tanque de almacenamiento*: acumula el hidrolato que sale del vaso florentino.
- *Bomba de recirculación*: conduce el hidrolato contenido en el tanque hacia el alambique.

## **2.2. OPERACIÓN DEL SISTEMA**

En la Fig. 7 se muestra el diagrama de operación del proceso de hidrodestilación de aceites esenciales. Inicialmente, es necesario llevar a cabo la carga del equipo con el material vegetal y el agua requerida para sumergir el mismo. Seguido de esto, se inicia el proceso de combustión. Para esto, es necesaria la presencia de un combustible (*flujo de biomasa seca*), un comburente (*flujos de aire primario y secundario*) y calor (*chispa inicial*).

**Figura 6. Subsistema de recuperación [24]**

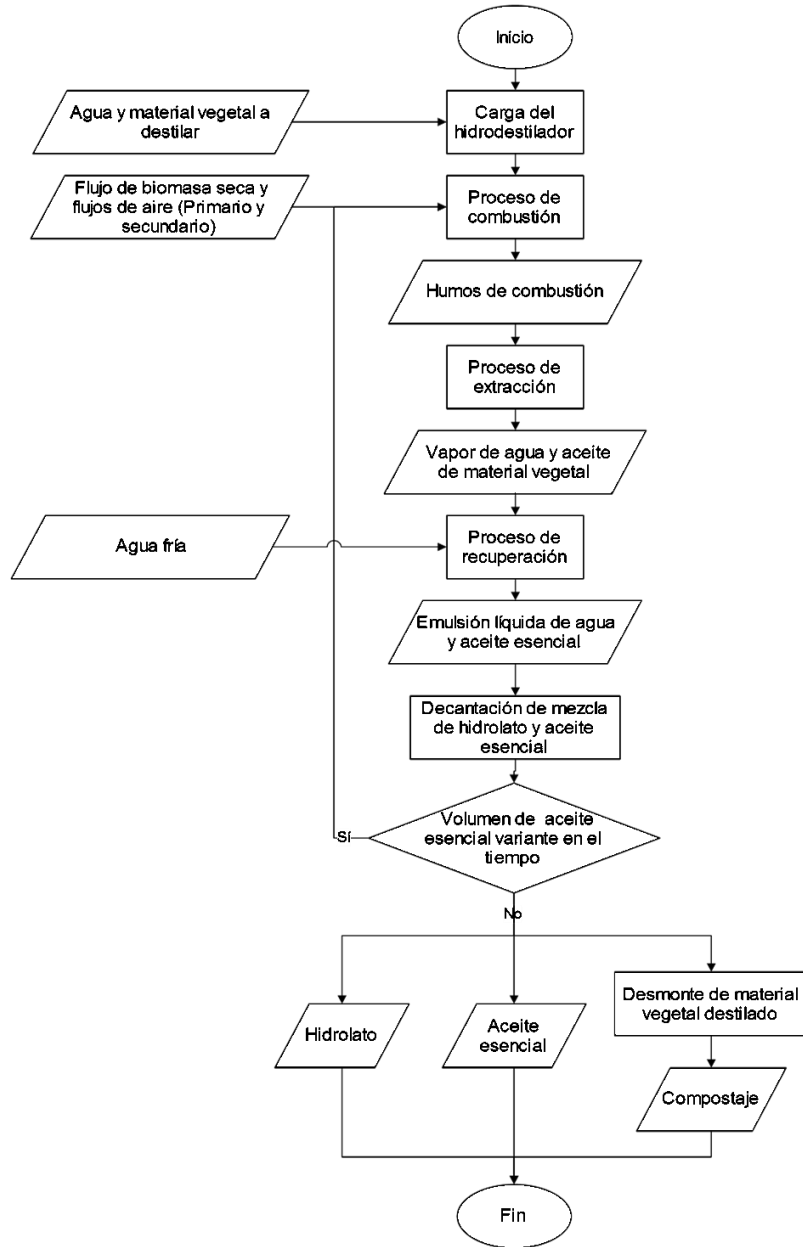


Seguidamente los gases (*humos*) de combustión producidos calientan, hasta el punto de ebullición, la suspensión acuosa de material vegetal en contacto con el agua y se da inicio al proceso de extracción. El vapor saturado generado, de agua y aceite, es transportado y guiado hacia el proceso de recuperación, en donde se condensa y se enfría a temperatura ambiente.

Como consecuencia, se origina una emulsión líquida la cual es separada por decantación, acumulando el aceite esencial debido a la inmiscibilidad de este en el agua fría cargada al inicio de este proceso y la diferencia de densidad entre estas.

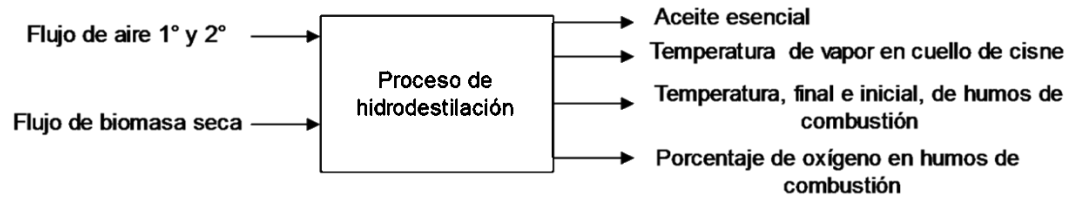
Finalmente, la hidrodestilación termina cuando se observa, por inspección visual, el volumen de este aceite esencial acumulado invariante en el tiempo, para luego utilizar el material vegetal destilado como compostaje y el agua resultante de la decantación (*hidrolato*) como agua de proceso de carga en una nueva hidrodestilación.

**Figura 7. Diagrama de operación del proceso de hidrodestilación**



A partir de esto, es posible identificar como variables de entrada y salida relevantes del sistema las indicadas en el esquema general de la Fig. 8. Por tanto, para ejecutar el proceso deberán actuarse las señales de entrada (estímulos) y sensarse las correspondientes salidas (respuestas), según se detalla a continuación.

**Figura 8. Diagrama de entradas y salidas para proceso de hidrodestilación**



**2.2.1. Elementos de actuación** Los dispositivos descritos a continuación constituyen la base de equipos necesarios para ejecutar diferentes etapas del proceso. Todos ellos fueron dimensionados y configurados previamente por personal del CENIVAM-UIS.

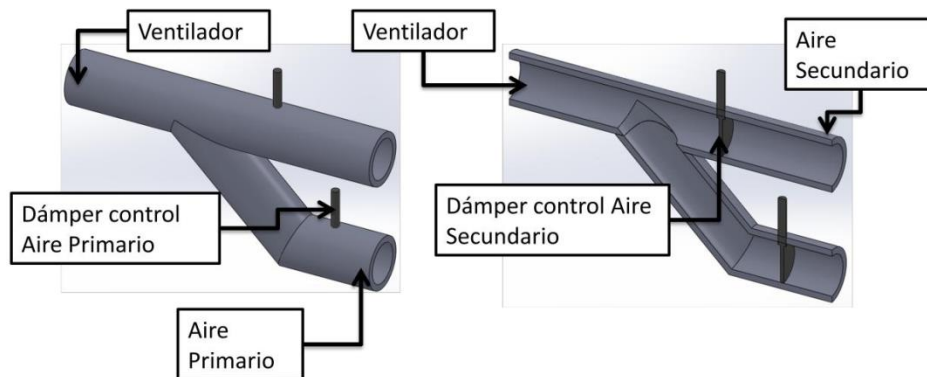
- **Flujos de aire primario y secundario.** Para constituir el suministro de aire requerido en la combustión, se crea una corriente de viento artificial a través de un ventilador impulsado por un motor eléctrico con datos de placa incluidos en la Tabla 1. De esta manera, se produce un flujo con capacidad de 150 [pie<sup>3</sup>/min] que se distribuye a través de tuberías tal y como se ilustra en la Fig. 9, permitiendo regular las corrientes de aire primario y secundario a través de manipulación en la apertura de la válvula (damper) correspondiente.
- **Flujo de biomasa.** El material combustible (biomasa) es transportado a través de un tornillo sinfín acoplado a un motor eléctrico con datos de placa incluidos en la Tabla 2, cuya velocidad de rotación es regulada a través de un variador de frecuencia mostrado en la Fig. 10 junto con otros dispositivos del panel de accionamiento (contactores, protecciones, pulsadores de arranque y parada), para suministro eléctrico. En condiciones nominales de operación es posible suministrar un flujo de 25 [kg/h] de biomasa al sistema.

**Tabla 1. Características motor suministro de aire**

| Parámetro          | Valor          |          |
|--------------------|----------------|----------|
| Marca / Modelo     | VOGES / CSK632 |          |
| Frecuencia         | 60 [Hz]        |          |
| Rotación nominal   | 3410 [rpm]     |          |
| Tensión nominal    | 110 [V]        | 220 [V]  |
| Corriente nominal  | 1.1 [A]        | 0.55 [A] |
| Potencia           | 1 [CV]         | 10 [CV]  |
| Rendimiento        | 64%            |          |
| Factor de potencia | 0.95           |          |

Fuente: [www.voges.com.br](http://www.voges.com.br)

**Figura 9. Tuberías para suministro de aire [24]**



**Tabla 2. Características motor suministro de biomasa**

| Parámetro          | Valor                   |           |
|--------------------|-------------------------|-----------|
| Marca / Modelo     | Traincol / MS 632-7 E14 |           |
| Frecuencia         | 50 [Hz]                 |           |
| Rotación nominal   | 1350 [rpm]              |           |
| Tensión nominal    | $\Delta$ 230 [V]        | Y 400 [V] |
| Corriente nominal  | 1.17 [A]                | 0.68 [A]  |
| Potencia           | 0.25 [HP]               |           |
| Rendimiento        | 57%                     |           |
| Factor de potencia | 0.95                    |           |

Fuente: [www.traincol.com.co](http://www.traincol.com.co)

**Figura 10. Panel de accionamiento**



- **Flujo de hidrolato recirculado.** El hidrolato acumulado posterior a la destilación es recirculado de vuelta al alambique (cuerpo del destilador) activando una electrobomba SEAFLO modelo SFDP1-015-160-31 (ilustrada en la Fig. 11), con capacidad para bombear hasta 5.5 [l/min].

**Figura 11. Bomba para recirculación de hidrolato**



Fuente: [www.seaflow.com](http://www.seaflow.com)

**2.2.2. Elementos de sensado** El control de operación del proceso de hidrodestilación CENIVAM-UIS es realizado enteramente de forma manual. Por

tanto, con el objetivo de posibilitar una futura automatización del proceso se procede a configurar dispositivos de medición que permitan obtener información de variables en tiempo real, para efectuar tareas de análisis y control.

Fundamentalmente, como parte de las actividades realizadas en el presente proyecto de grado se realizó la selección e instalación de una serie de sensores para determinar las temperaturas de flujo de vapor en el cuello de cisne (ver Fig. 12(a)) y de los gases de combustión al inicio (ver Fig. 12(b)) y al final (ver Fig. 12(c)) de la chimenea. Las características de los sensores de temperatura empleados para cada caso se presentan en la Tabla 3.

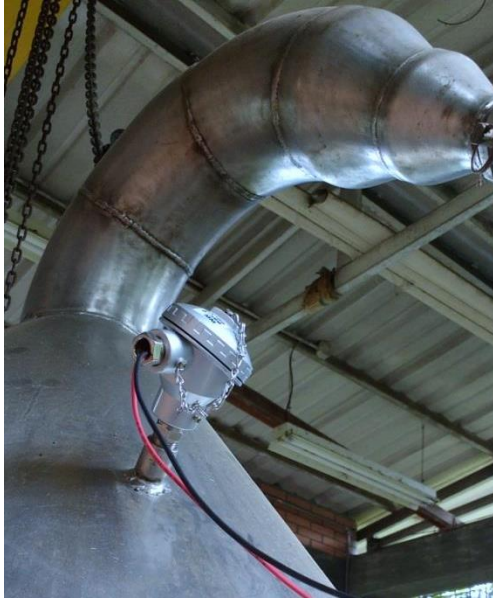
**Tabla 3. Características de sensores de temperatura empleados**

| Variable                    | Tipo de sensor  | Rango de medida |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| Vapor en el cuello de cisne | RTD PT 100      | 0 - 400 [°C]    |
| Gases de combustión inicio  | termopar tipo K | 0 - 1000 [°C]   |
| Gases de combustión final   | RTD PT 100      | 0 - 400 [°C]    |

Asimismo, se adquirió e instaló un sensor para obtener el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión al final de la chimenea (ver Fig. 12(c)), como una medida de las emisiones contaminantes del proceso. Este dispositivo (OXY-Flex Oxygen Analyser, fabricado por SST LTD), permite configurar un rango de medición de entre 0 y 21 [%].

Las señales medidas de los sensores de temperatura fueron acopladas a un transmisor TMT-181 TAISUO (ver Fig. 13), proporcionando una salida analógica por corriente de 4-20 [mA]. La calibración del rango de medida fue realizada por el proveedor del dispositivo.

**Figura 12. Instalación de dispositivos de sensado en hidroddestilador CENIVAM UIS: (a) vapor cuello de cisne; gases combustión inicio (b) y final (c)**



(a)

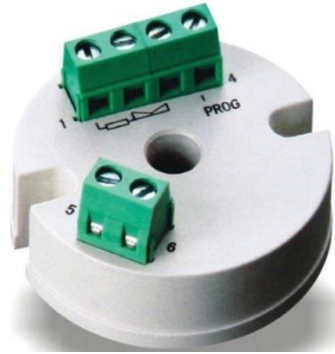


(b)



(c)

**Figura 13. Transmisor de temperatura**



Fuente: [www.directindustry.es](http://www.directindustry.es)

De otro lado, el sensor de porcentaje oxígeno fue configurado para dar una lectura analógica de corriente en el rango de 4-20 [mA] a partir de opciones disponibles para selección digital, calibradas de fábrica.

**2.2.3. Captura de datos del proceso** Las señales de temperatura y porcentaje de oxígeno sensadas, fueron acopladas a un sistema de adquisición de datos de referencia DAQ USB6008NI fabricado por *National Instruments*, con características presentadas en la Tabla 4.

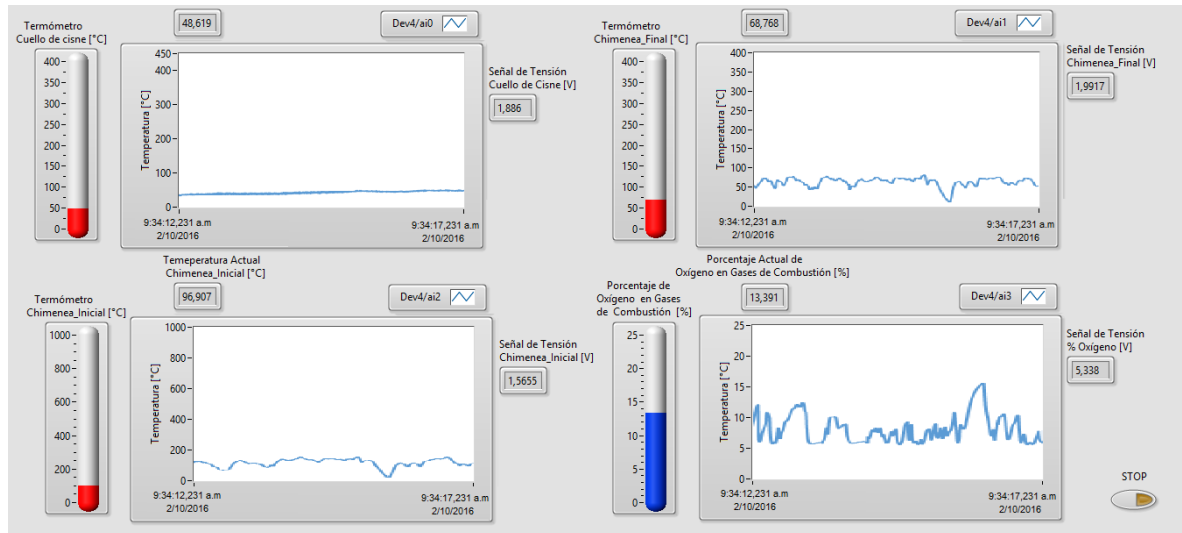
**Tabla 4. Características sistema de adquisición de datos**

| Parámetro                       | Valor         |
|---------------------------------|---------------|
| Marca / Modelo                  | NI / USB 6008 |
| Resolución de entrada analógica | 12 bits       |
| Máxima tasa de muestreo         | 10 [kS/s]     |
| Canales de entrada analógica    | 8             |
| Canales de salida analógica     | 2             |
| Rango máximo de entrada tensión | $\pm 10$ [V]  |
| Precisión                       | 7.73 [mV]     |
| Memoria interna                 | 512 Bits      |

Fuente: [www.ni.com](http://www.ni.com)

La configuración y comando del sistema de adquisición de datos fue realizado a partir de una interfaz de usuario, desarrollada a manera de instrumento virtual en LabVIEW con panel principal ilustrado en la Fig. 14.

**Figura 14. Interfaz de usuario para captura de datos**

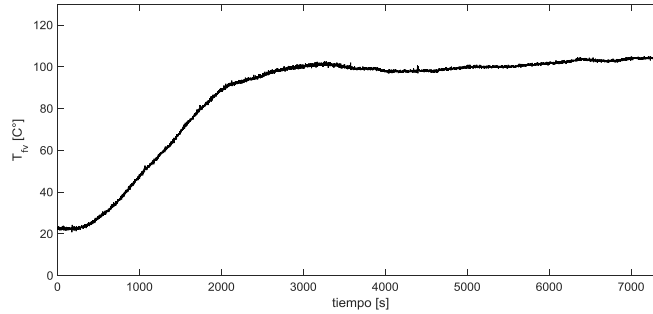


Dicha interfaz permite visualizar en tiempo real las variables del proceso, a través de diagramas de series de tiempo e indicadores en forma de barras. También es posible configurar la tasa de muestreo y visualización, además de la longitud de almacenamiento para las tramas de datos adquiridas.

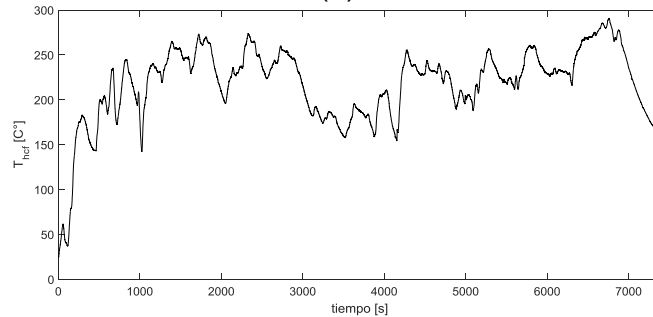
La Fig. 15 presenta a modo de ilustración registros típicos para las señales obtenidas del proceso. En el Capítulo 4 se realizará un análisis más detallado para el comportamiento de estas variables. Sin embargo, es posible verificar una tendencia de comportamiento para la temperatura en el cuello de cisne, así como medidas más erráticas para las otras temperaturas y el porcentaje de oxígeno en los gases de combustión.

La Fig. 16 ilustra el diagrama eléctrico de conexiones para sensores y acondicionadores de señal en el sistema de adquisición de datos.

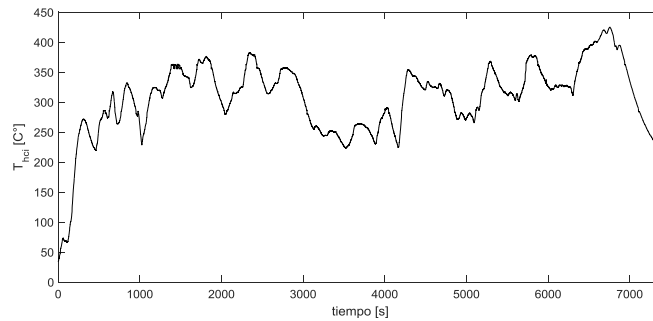
**Figura 15. Captura de datos para variables del proceso: (a) temperatura en cuello de cisne; (b) temperatura final de combustión; (c) temperatura inicio de combustión y (d) porcentaje de oxígeno**



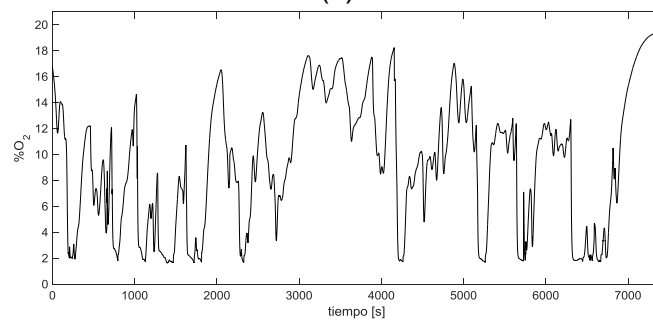
**(a)**



**(b)**

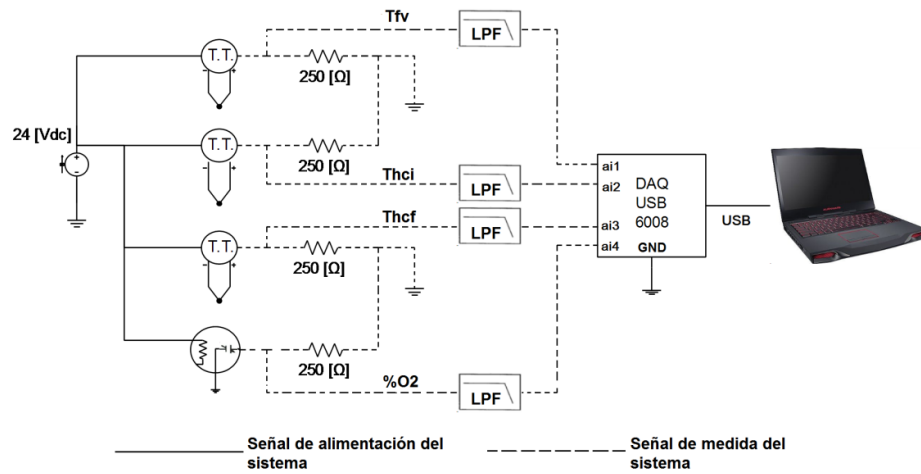


**(c)**



**(d)**

**Figura 16. Esquema de conexión para sistema de adquisición de datos**



### 2.3. SISTEMA FINAL IMPLEMENTADO

Finalmente, la Fig. 17 presenta una imagen del hidroddestilador implementado en el CENIVAM-UIS.

Figura 17. Planta de hidrodestilación en CENIVAM-UIS



### **3. MODELADO MATEMÁTICO DEL PROCESO**

Para determinar un modelo matemático que describa apropiadamente la dinámica del proceso de hidrodestilación, y en particular, de las emisiones contaminantes en los humos de combustión, se realizará en el presente Capítulo la formulación para un conjunto de ecuaciones diferenciales basadas en el modelo simplificado de un incinerador de biomasa propuesto por Gölles et al. en [15] y adaptado por Muñoz [25] en su tesis de maestría.

#### **3.1. MODELO SIMPLIFICADO PARA UN COMBUSTOR DE BIOMASA**

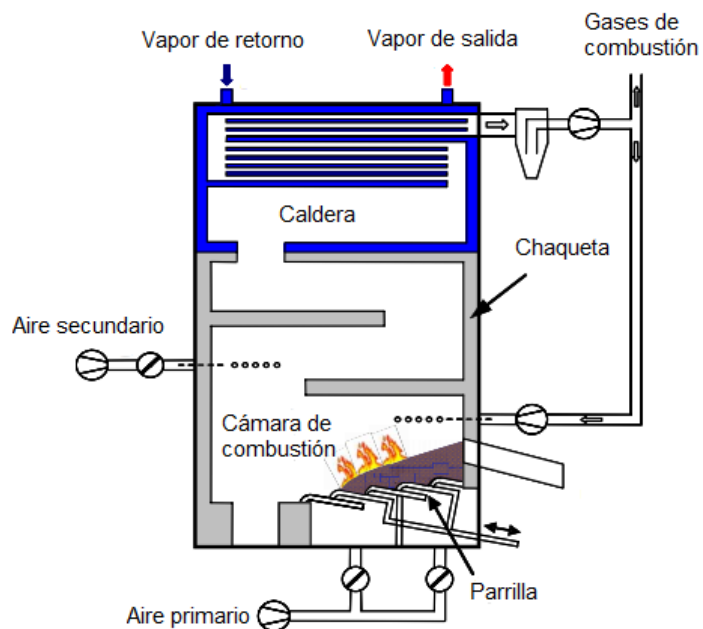
La utilización de la biomasa como combustible para la producción de calor y electricidad presenta una tendencia incremental en tiempos recientes, debido a la sustitución de las fuentes de energía fósiles por energías renovables. El proceso de combustión de biomasa es perturbado por variaciones en las propiedades del combustible, especialmente en términos de su densidad aparente y humedad [26]. Adicionalmente, la biomasa se presenta en general como mezclas de distintos tipos de material orgánico generando incertidumbre respecto a la capacidad energética del combustible, lo cual dificulta la operación de las cámaras de combustión y la generación de modelos matemáticos apropiados para el proceso [27].

En [15, 28] se desarrolló un modelo a partir de leyes y fenómenos termodinámicos, para un horno de parrilla como el presentado en la Fig. 18.

En este tipo de estructura, la biomasa se transporta de forma variable con inclinación ajustable de la parrilla para facilitar su mezcla, homogeneización, propagación de brasas y con ello la aceleración de su combustión [29].

A continuación se realizará una descripción (matemática) para las etapas más relevantes del proceso de incineración de biomasa.

**Figura 18. Horno de parrilla para incineración de biomasa**



Fuente: Modificado de [15]

**3.1.1. Subsistema de evaporación de agua del combustible** Tiene como función eliminar la humedad presente en el combustible empleado (biomasa). El modelado matemático para esta fase del proceso se realiza a partir del siguiente balance de masa:

$$\text{Acumulación de materia} = \text{Entrada de materia} - \text{Salida de materia}, \quad (1)$$

siendo  $\dot{m}_{he}$  la *entrada de materia* que relaciona el flujo de humedad en el inicio de la zona de evaporación,  $\dot{m}_{hs}$  la *salida de materia* que relaciona el flujo de humedad que se va evaporando y  $\dot{m}_h$  la *acumulación de materia* que relaciona el flujo de humedad contenido. De esta manera, (1) puede escribirse alternativamente como:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_{he} - \dot{m}_{hs} \quad (2)$$

A su vez,  $\dot{m}_{hs}$  puede expresarse en términos de la posición de la parrilla móvil de la caldera  $\alpha_{hs}$  junto con la masa de agua evaporada  $m_h$ , en el modo siguiente:

$$\dot{m}_{hs} = m_h \alpha_{hs} \quad (3)$$

Así, reemplazando esta última expresión en (2), se obtiene la ecuación diferencial que describe el comportamiento de evaporación de la humedad presente en el combustible [28]:

$$\dot{m}_h = \dot{m}_{he} - m_h \alpha_{hs} \quad (4)$$

**3.1.2. Subsistema de descomposición térmica para biomasa seca** Inicia con la eliminación de material volátil ante la primera aparición de combustible seco y finaliza con el material vegetal convertido en gas y cenizas, provocados por la combustión. Este fenómeno se describe a partir del balance de masa:

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{de} - \dot{m}_{ds}, \quad (5)$$

donde  $\dot{m}_{de}$  es el flujo de entrada de biomasa seca,  $\dot{m}_{ds}$  relaciona el flujo de salida para la biomasa en forma de gas y  $\dot{m}_d$  corresponde con el flujo másico de descomposición térmica de biomasa seca [28].

Ahora bien, es posible expresar  $\dot{m}_{ds}$  en términos de la posición de la parrilla móvil de la caldera  $\alpha_{ds}$ , de la masa del combustible en la zona de descomposición térmica  $m_d$  y del flujo de aire primario en la entrada  $\dot{m}_{ap}$ , en el modo siguiente:

$$\dot{m}_{ds} = \alpha_{ds} m_d \dot{m}_{ap} \quad (6)$$

Por tanto, sustituyendo (6) en (5) se obtiene la ecuación diferencial que describe el comportamiento de descomposición térmica del combustible:

$$\dot{m}_d = \dot{m}_{de} - \alpha_{ds} m_d \dot{m}_{ap} \quad (7)$$

**3.1.3. Subproceso de transferencia de calor** La energía en forma de calor  $Q$ , desde los humos provenientes de la combustión de biomasa hacia el agua contenida en el intercambiador de calor, se define a partir de la siguiente expresión:

$$Q = q_{w_f}(\dot{m}_{ds} - c_{ds} m_d) - 2.44 \dot{m}_{hs}, \quad (8)$$

donde el primer término del lado derecho relaciona el aporte de energía de descomposición térmica de la biomasa, formada por el flujo másico de descomposición  $\dot{m}_{ds}$  y las pérdidas por cantidad de flujo másico  $c_{ds} m_d$  [27]. El término  $q_{w_f}$  determina el valor efectivo de calor dado por el combustible seco, siendo calculado como:

$$q_{w_f} = 0.348 w_C + 0.938 w_H + 0.105 w_S + 0.348 w_N - 0.108 w_O, \quad (9)$$

en función de las fracciones molares de carbono ( $w_C$ ), hidrógeno ( $w_H$ ), azufre ( $w_S$ ), nitrógeno ( $w_N$ ) y oxígeno ( $w_O$ ).

Asimismo, el segundo término del lado derecho de (8) relaciona el comportamiento de evaporación del agua contenida en el intercambiador, siendo el parámetro 2.44 definido como el calor latente de evaporación; es decir, la energía necesaria para producir un cambio de estado ante condiciones constantes de temperatura, afectando directamente la tasa de evaporación del agua  $\dot{m}_{hs}$ .

**3.1.4. Subproceso de temperatura de vapor de caldera** Inicialmente, se plantea el modelo dinámico de una caldera a partir del siguiente balance de energía:

$$\dot{H} = \dot{H}_E - \dot{H}_S + Q, \quad (10)$$

siendo  $\dot{H}_E$  la entalpía del fluido que ingresa,  $\dot{H}_S$  la energía del fluido que sale,  $\dot{H}$  el cambio de entalpía presente en la caldera y  $Q$  la energía en forma de calor definida en (8).

A su vez, la entalpía del sistema puede denotarse mediante el producto de tres variables propias del fluido contenido en la caldera: flujo másico  $\dot{m}_{fv}$ , capacidad calorífica específica  $C_{fv}$  y temperatura de flujo de vapor  $T_{fv}$ .

Por tanto, asumiendo a  $\dot{m}_{fvE}$  como el flujo másico a la entrada del proceso,  $\dot{m}_{fvS}$  el flujo másico de salida y  $\{T_{fvE}, T_{fvS}\}$  las temperaturas del fluido, respectivamente, a la entrada y salida del proceso, es posible reescribir (10) como sigue:

$$\dot{m}_{fv} \frac{d(C_{fv}T_{fv})}{dt} = \dot{m}_{fvE}(C_{fv}T_{fvE}) - \dot{m}_{fvS}(C_{fv}T_{fvS}) + Q \quad (11)$$

Adicionalmente, aplicando la definición de densidad volumétrica al flujo másico:

$$\rho = \frac{\dot{m}_{fv}}{V},$$

la ecuación (11) puede expresarse en términos de esta cantidad, siendo reorganizada para obtener:

$$\dot{T}_{fv} = \frac{1}{\rho V} \left( \dot{m}_{fvE} T_{fvE} - \dot{m}_{fvS} T_{fvS} + \frac{Q}{C_{fv}} \right) \quad (12)$$

Finalmente, si se asume que  $\dot{m}_{fvE} \approx \dot{m}_{fvS}$  y  $T_{fvS} \approx T_{fv}$ , es posible expresar a través de la siguiente forma compacta:

$$\dot{T}_{fv} = \frac{1}{\rho V} \left( \dot{m}_{fvE} (T_{fvE} - T_{fv}) + \frac{Q}{C_{fv}} \right), \quad (13)$$

la variación de la temperatura del fluido, que de igual forma puede considerarse como la temperatura del vapor proveniente de la caldera [15].

**3.1.5. Subproceso de temperatura inicial para humos de combustión** La transferencia (distribución) de calor en el sistema, puede resumirse como:

$$Q = Q_{ch} + Q_{fv}, \quad (14)$$

siendo  $Q_{ch}$  el calor transferido a la chaqueta y  $Q_{fv}$  el calor transferido al fluido contenido en la caldera.

A su vez,  $Q_{ch}$  puede ser representado en términos de la temperatura  $T_{ch}$  de la chaqueta, la temperatura inicial de los humos de combustión  $T_{hci}$ , el flujo másico a la entrada de la chaqueta  $\dot{m}_{hcc}$  proveniente de la cámara de combustión y el calor específico  $c_{hcc}$ , a partir de:

$$Q_{ch} = \dot{m}_{hcc} c_{hcc} (T_{hci} - T_{ch}) \quad (15)$$

Es posible generar una expresión equivalente para  $Q_{fv}$  en términos del flujo másico  $\dot{m}_{hch}$  que va desde la chaqueta hacia el fluido y el calor específico  $c_{gch}$ :

$$Q_{fv} = \dot{m}_{hch} c_{hch} (T_{ch} - T_{fv}) \quad (16)$$

Ahora bien, asumiendo que tanto el flujo másico como el calor específico se mantienen constantes en cantidades  $\dot{m}_{gcc}$  y  $c_{gcc}$ , respectivamente, el reemplazo de (15) y (16) en (14) permite obtener:

$$Q = \dot{m}_{gcc} c_{gcc} (T_{hci} - T_{fv}), \quad (17)$$

a partir de lo cuál es posible expresar la temperatura inicial de los humos de combustión en el modo siguiente [15]:

$$T_{hci} = \frac{Q}{\dot{m}_{gcc} c_{gcc}} + T_{fv} \quad (18)$$

**3.1.6. Subsistema de temperatura final para humos de combustión** La temperatura  $T_{hcf}$  de los gases de combustión al final de la chimenea, o simplemente final de los humos de combustión, se determina asumiendo un sistema de primer orden con retardo de transporte  $\tau_{hc}$  y sin pérdidas, entre las temperaturas al inicio y al final de la cámara de combustión; es decir [15]:

$$\dot{T}_{hcf} = \frac{1}{\tau_{hc}} (T_{hci} - T_{hcf}) \quad (19)$$

**3.1.7. Subsistema de porcentaje de oxígeno en humos de combustión** Para determinar el porcentaje de oxígeno en los gases (humos) productos de la combustión, se toma como base la siguiente relación algebraica sugerida en [15]:

$$\%O_2 = \frac{c_1 m_d \dot{m}_{ap} + c_2 (\dot{m}_{ap} + c_6 \dot{m}_{as})}{c_3 m_h + c_4 m_d \dot{m}_{ap} + c_5 (\dot{m}_{ap} + c_6 \dot{m}_{as})}, \quad (20)$$

donde  $c_1 - c_6$  son parámetros constantes del modelo y  $\dot{m}_{as}$  el flujo de aire secundario. La deducción para esta expresión matemática supera el alcance del presente proyecto de grado y por tanto no se mencionarán mayores detalles al respecto.

**3.1.8. Modelo matemático final** El resumen para las ecuaciones que modelan el proceso de combustión de biomasa se presenta a continuación:

- Evaporación del agua:  $\dot{m}_h = \dot{m}_{he} - m_h \alpha_{hs}$
- Descomposición térmica de biomasa seca:  $\dot{m}_d = \dot{m}_{de} - \alpha_{ds} m_d \dot{m}_{ap}$
- Transferencia de calor:  $Q = q_{wf} (\dot{m}_{ds} - c_{ds} m_d) - 2.44 \dot{m}_{hs}$
- Temperatura de vapor:  $\dot{T}_{fv} = \frac{1}{\rho V} \left( \dot{m}_{fve} (T_{fve} - T_{fv}) + \frac{Q}{C_{fv}} \right)$
- Temperatura inicial de los humos de combustión:  $T_{hci} = \frac{Q}{\dot{m}_{gcc} c_{gcc}} + T_{fv}$
- Temperatura final de los humos de combustión:  $\dot{T}_{hcf} = \frac{1}{\tau_{hc}} (T_{hci} - T_{hcf})$
- Porcentaje de oxígeno en los humos de combustión:

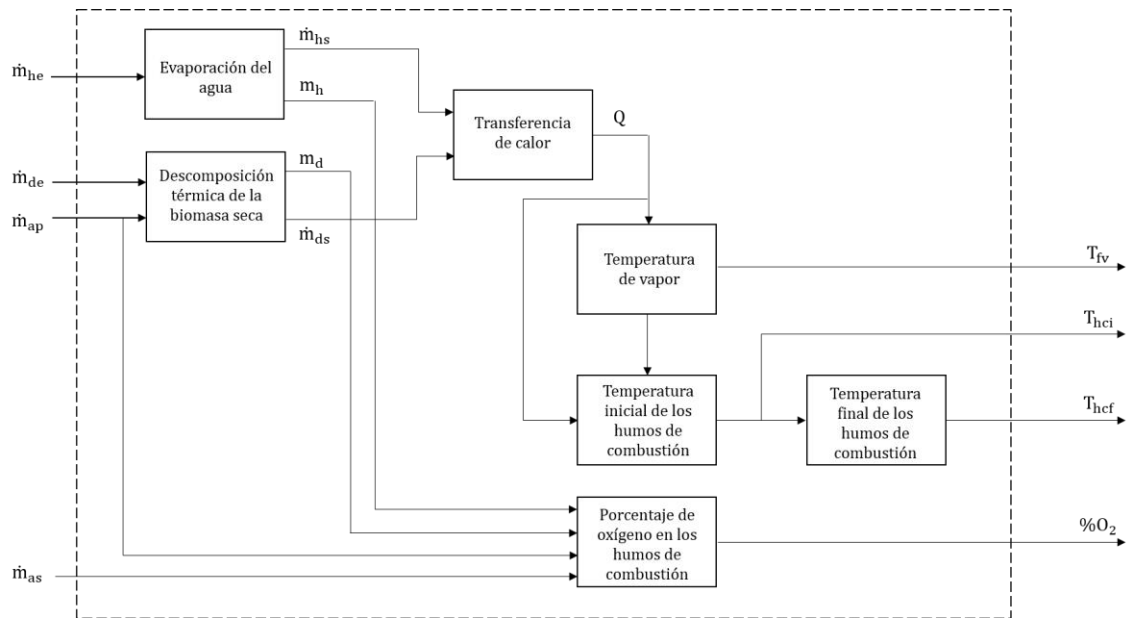
$$\%O_2 = \frac{c_1 m_d \dot{m}_{ap} + c_2 (\dot{m}_{ap} + c_6 \dot{m}_{as})}{c_3 m_h + c_4 m_d \dot{m}_{ap} + c_5 (\dot{m}_{ap} + c_6 \dot{m}_{as})}$$

Asimismo, se ilustra en la Fig. 19 la interacción de cada subproceso en el modelo.

Realizando una comparación con el diagrama de entradas y salidas para el proceso de hidrodestilación de aceites esenciales presentado en la Fig. 8, se verifica una relación directa entre la temperatura en el cuello de cisne y la temperatura del flujo de vapor  $T_{fv}$ . Para las demás variables del diagrama los nombres demuestran una equivalencia.

Asimismo, se nota cómo las ecuaciones propuestas no incluyen explícitamente la variable de aceite esencial, puesto que las mismas se limitan a modelar el subsistema de combustión descrito en la Sección 2.1.1.

**Figura 19. Diagrama de bloques para modelo de combustión de biomasa**



### 3.2. EMISIONES CONTAMINANTES DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN

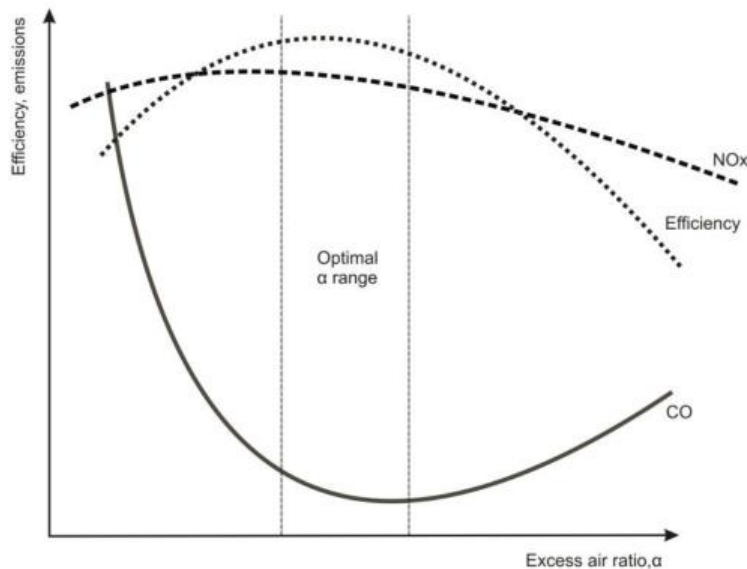
Teniendo en cuenta el tercer objetivo específico del presente trabajo de grado, es conveniente realizar en este apartado una discusión acerca de la pertinencia de la ecuación (20) y su relación con las emisiones contaminantes en un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales.

Para ello se presenta en la Fig. 20 un diagrama ilustrativo, que relaciona las emisiones de monóxido de carbono (CO) y óxido nitroso (NOx) con respecto a una variable denominada  $\alpha$ , que representa el exceso de aire en los humos de combustión y se define como [30]:

$$\alpha = \frac{21}{21 - \%O_2}, \quad (21)$$

evidenciando una dependencia explícita del porcentaje de oxígeno  $\%O_2$  formulado en (20).

**Figura 20. Relación entre emisiones y exceso de aire [30]**



De la gráfica se observa también que existe un intervalo para  $\alpha$  dentro del cual la eficiencia de la combustión es mayor.

Dicha eficiencia puede entenderse como la capacidad de consumir o transformar el combustible durante la combustión. Así, de no propiciarse las condiciones necesarias para una buena combustión, se generarán productos indeseados como consecuencia de reacciones químicas que ocurren cuando el sistema opera fuera de los valores nominales para los cuales fue diseñado.

Por tanto, una cantidad excesiva de aire (que contiene en el oxígeno al comburente) en proporción a la biomasa (combustible) hará que la temperatura de la combustión se reduzca, dificultando la vaporización del material vegetal. A esto

se le conoce como combustión con exceso de aire [6]. Si por el contrario, la cantidad de biomasa excede en proporción al aire disponible, la combustión generará humos tóxicos al igual que mayores residuos sólidos como carbón. A esto se le conoce como combustión incompleta o con defecto de aire [6].

De esta manera, idealmente debe mantenerse una relación estequiométrica (teórica o ideal) entre el aire y el combustible para asegurar una apropiada combustión y el mínimo de emisiones contaminantes al ambiente. En la práctica, se tolera un leve exceso de aire con respecto a dicha relación teórica.

Para el caso de la combustión de biomasa, estudios han permitido determinar [31] que una relación entre aire y combustible con concentración de oxígeno en el rango [5%, 10%] permite una operación favorable en términos de eficiencia de la combustión. Sin embargo, es conveniente recalcar que dichos valores dependen, entre otros, de aspectos como el tipo de material vegetal, el contenido de humedad y la construcción de la cámara de combustión.

Teniendo en cuenta lo anterior, el porcentaje de oxígeno presente en los humos de combustión (dado en (20)), determina la manera en que se comportan los elementos contaminantes generados en el proceso de combustión de biomasa, permitiendo verificar y evaluar condiciones de operación del proceso en términos de su impacto ambiental.

Específicamente en Colombia, es necesario respetar el *Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas* regido por la Resolución 909 de 2008 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el cual debe ser cumplido por cualquier actividad que involucre la emisión de gases contaminantes. Este protocolo, describe las consideraciones que se deben tener en cuenta para la elaboración de los estudios de emisiones atmosféricas, los cuales son requeridos por la autoridad ambiental competente para establecer el

cumplimiento de los estándares de emisión admisibles de contaminantes, asimismo, para identificar el tipo, concentración e impacto de contaminantes emitidos por las diferentes actividades [32].

El Artículo 18 del Capítulo VII de la mencionada Resolución, establece los estándares de emisión admisibles para equipos de combustión externa que utilicen biomasa como combustible. En la Tabla 5 se muestran los valores máximos permisibles de emisiones a condiciones de referencia, con oxígeno de referencia del 13% [33].

**Tabla 5. Emisión admisible para combustión de biomasa [33]**

| Estándares admisibles (mg/m <sup>3</sup> ) |     |
|--|-----|
| MP (material particulado)                  | NOx |
| 300  | 350 |

Adicionalmente, en el Artículo 20 se determina que es obligación controlar como variables para procesos que emplean biomasa como combustible, a las siguientes: porcentaje de peso de humedad de la biomasa, temperatura de los gases de chimenea, poder calorífico de la biomasa (en base seca) y porcentaje en volumen de exceso de oxígeno en los gases de chimenea [33].

## 4. IDENTIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE PARÁMETROS

Como etapa final del presente proyecto de grado, se aborda la identificación de los parámetros del modelo del proceso de hidrodestilación de aceites esenciales, a partir de un ajuste de curvas con respecto a registros de datos experimentales generados en el sistema real del CENIVAM UIS. Por tanto, el presente Capítulo describe las condiciones de captura y análisis de datos, al igual que los algoritmos de cómputo utilizados en el procedimiento de identificación.

### 4.1. PARÁMETROS CONOCIDOS DEL MODELO

Retomando los resultados del resumen del modelo matemático presentado en la Sección 3.1.8, es conveniente individuar los parámetros del mismo a los cuales se tiene acceso a partir de información reportada en la literatura técnica.

Es así como en la Tabla 6 se presentan los valores de parámetros conocidos del modelo, relacionando la fuente bibliográfica a partir de la cual fueron obtenidos. Dichos parámetros constituyen información *a priori*, a ser utilizada como condiciones iniciales en el algoritmo de búsqueda (identificación de parámetros desconocidos) para facilitar su convergencia.

**Tabla 6. Valores de parámetro reportados en la literatura**

| <b>PARÁMETRO</b> | <b>VALOR</b>             | <b>FUENTE</b> |
|------------------|--------------------------|---------------|
| $\alpha_{hs}$    | 0.0028 1/s               | [34]          |
| $\alpha_{ds}$    | 0 - 0.1 1/m <sup>3</sup> | [34]          |
| $c_{ds}$         | 0.0013 1/s               | [34]          |
| $q_{wf}$         | 12.75 MJ/kg              | [27, 35]      |
| $\rho V$         | 200 - 1000 kg            | [36]          |
| $T_{fvE}$        | 350 K                    | [15]          |
| $c_{gcc}$        | 0.002 - 0.004 MJ / kg K  | [20]          |
| $C_{fv}$         | 0.0041 MJ / kg K         | [6]           |

#### **4.2. CÁLCULO DE PARÁMETROS DESCONOCIDOS**

Para determinar el valor de los parámetros restantes del modelo, se emplearon métodos de cálculo numérico recursivo para reducir, a partir de ajuste de curvas, el error entre un conjunto de datos reales y los generados por el modelo matemático para un vector de parámetros  $P$  específico. Dicho error permite decidir acerca de la asignación siguiente para el vector de parámetros  $P$ , haciendo que a través de iteraciones sucesivas se elimine (el error) o al menos de reduzca hasta niveles aceptables.

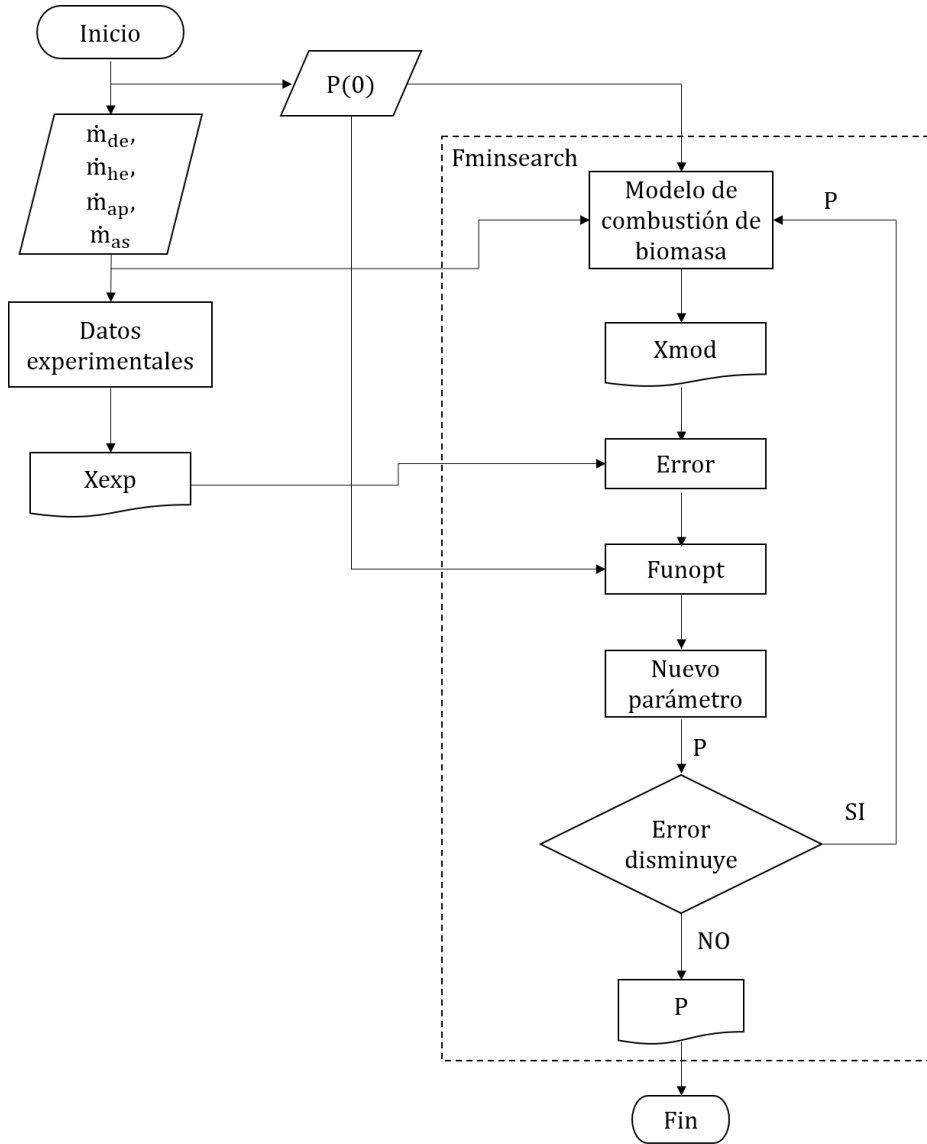
La Fig. 21 ilustra de manera gráfica este escenario de identificación, donde el bloque *fminsearch* refiere la función del paquete de herramientas de MATLAB empleada para calcular la actualización de parámetros del modelo, a partir del criterio de minimización del error cuadrático medio (ver Anexo A [25]).

Es importante mencionar que dicho proceso de identificación fue realizado en dos grandes grupos:

- El primero de ellos implicó la determinación de los coeficientes para la ecuación (20) que describe el porcentaje de oxígeno  $\%O_2$ , empleando dicha variable como la medida para calcular el error.
- En un segundo grupo se empleó la temperatura  $T_{hcf}$ , final de los humos de combustión, para determinar los coeficientes desconocidos en las ecuaciones restantes del modelo, asumiendo que dicha variable (utilizada como medida para calcular el error en este caso) contiene información suficientemente relevante para influenciar la dinámica del proceso.

A pesar del orden de mención, estos grupos fueron procesados cronológicamente atendiendo primero a los coeficientes derivados del análisis de los datos de temperatura, debido a que dicha variable afecta la dinámica de los gases de combustión a través de la descomposición de los flujos de biomasa y vapor (ver Fig. 19).

**Figura 21. Algoritmo de identificación de parámetros**



**4.2.1. Obtención para datos experimentales de referencia** Para generar el conjunto de datos experimentales, se procedió conforme explicado en el protocolo de operación del proceso ilustrado en la Sección 2.2.

En particular, se emplearon los valores nominales para variables de entrada incluidos en la Tabla 7, correspondientes con estímulos aplicados de manera constante durante alrededor de 100 *min* (6000 s).

El material vegetal utilizado fue la limonaria (con un flujo másico de 30 *kg/h* equivalente a 0.0083 *kg/s*), la cual se caracteriza por contener un 20% de humedad ( $\dot{m}_{he}$ ), y por tanto, un 80% de biomasa seca ( $\dot{m}_{de}$ ).

De otro lado, para calcular los flujos de aire se realiza la conversión del valor en *pie<sup>3</sup>/min* dado en la Sección 2.2.1 asignándolo a  $\dot{m}_{ap}$  y considerando 1/50 de esta cantidad como flujo de aire secundario  $\dot{m}_{as}$ .

**Tabla 7. Parámetros nominales de entrada experimental**

| PARÁMETRO      | VALOR                         |
|----------------|-------------------------------|
| $\dot{m}_{de}$ | 0.0067 <i>kg/s</i>            |
| $\dot{m}_{he}$ | 0.0017 <i>kg/s</i>            |
| $\dot{m}_{ap}$ | 0.07 <i>m<sup>3</sup>/s</i>   |
| $\dot{m}_{as}$ | 0.0014 <i>m<sup>3</sup>/s</i> |

Posteriormente, los registros para las señales de temperaturas en el cuello de cisne ( $T_{fv}$ ) y al inicio ( $T_{hci}$ ) y final ( $T_{hcf}$ ) de la chimenea, fueron almacenados junto con el porcentaje de oxígeno de los humos de combustión (% $O_2$ ), según ilustrado en las Secciones 2.2.2 y 2.2.3.

**4.2.2. Determinación de parámetros a través de temperatura** Con la información experimental disponible, se procedió a determinar los parámetros del modelo que dependen directamente de la variable de temperatura, siguiendo el flujograma de la Fig. 21 y a través del método computacional configurado conforme se explica en el Anexo A.

Los valores iniciales y finales obtenidos en los parámetros se muestran en la Tabla 8. A partir de ellos, se observa que los parámetros  $q_{wf}$ ,  $T_{fvE}$  y  $C_{fv}$  no fueron incluidos como parte del procedimiento de identificación, debido a la alta sensibilidad que presentan las variables simuladas ante variaciones de sus valores

teóricos (ver Tabla 6). Asimismo, los valores iniciales para los parámetros  $\alpha_{ds}$ ,  $\rho V$  y  $c_{gcc}$  fueron asignados dentro del rango sugerido en la literatura, mientras que para  $\dot{m}_{fVE}$ ,  $\dot{m}_{gcc}$  y  $1/\tau_{hc}$  (estrictamente los parámetros identificados) se realizó una elección arbitraria de 0.1 como valor inicial en ausencia de información *a priori*.

Con base en estos resultados, la Fig. 22 presenta el contraste entre las predicciones de simulación aplicando valores de entrada nominal y los correspondientes registros experimentales adquiridos.

Finalmente, a manera de comprobación, se realizó una captura adicional de datos siguiendo las mismas condiciones operacionales sugeridas en la Sección 4.2.1, permitiendo obtener el contraste de registros de datos experimentales y de simulación (sobre los mismos parámetros identificados) que se muestra en la Fig. 23.

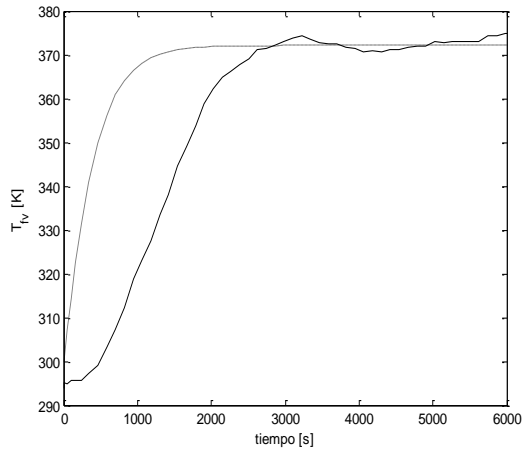
**Tabla 8. Parámetros iniciales y definitivos identificados a partir de temperatura**

| PARÁMETRO       | CONDICIÓN INICIAL | VALOR OBTENIDO  |
|-----------------|-------------------|-----------------|
| $\alpha_{hs}$   | 0.0028 Hz         | 0.003 Hz        |
| $\alpha_{ds}$   | 0.09 $1/m^3$      | 0.1 $1/m^3$     |
| $c_{ds}$        | 0.0013 Hz         | 0.002 Hz        |
| $\rho V$        | 250 kg            | 230 kg          |
| $c_{gcc}$       | 0.0025 MJ / kg K  | 0.003 MJ / kg K |
| $\dot{m}_{fVE}$ | 0.1 kg/s          | 0.66 kg/s       |
| $\dot{m}_{gcc}$ | 0.1 kg/s          | 0.14 kg/s       |
| $1/\tau_{hc}$   | 0.1 Hz            | 0.02 Hz         |

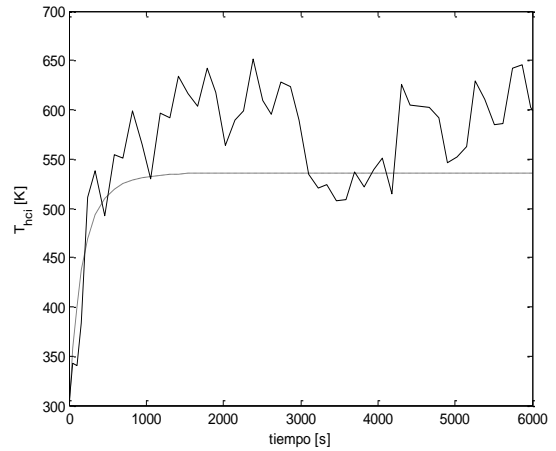
**4.2.3. Determinación de parámetros a través de porcentaje de O<sub>2</sub>** Un procedimiento similar se desarrolla para determinar los coeficientes  $c_1 - c_6$  en (20), a partir de los registros experimentales para el porcentaje de oxígeno %O<sub>2</sub> obtenidos en 4.2.1.

Los valores de parámetros determinados para este caso se incluyen en la Tabla 9, donde se observa una elección arbitraria de 0.1 como valor inicial en ausencia de información *a priori*.

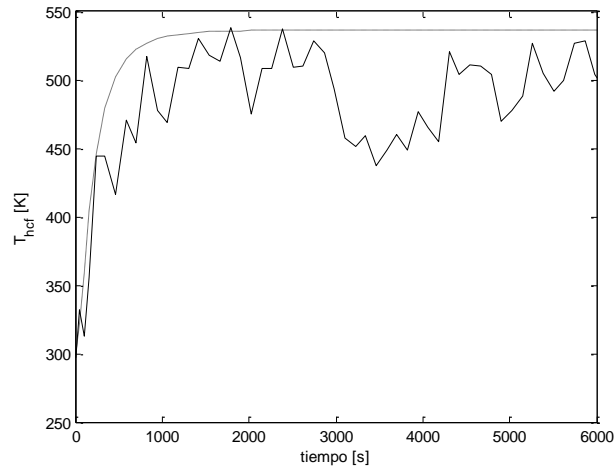
**Figura 22. Contraste entre simulación (línea punteada) y primeros datos experimentales (línea continua) para variables de: (a) temperatura en cuello de cisne; (b) temperatura inicio de combustión y (c) temperatura final de combustión**



(a)

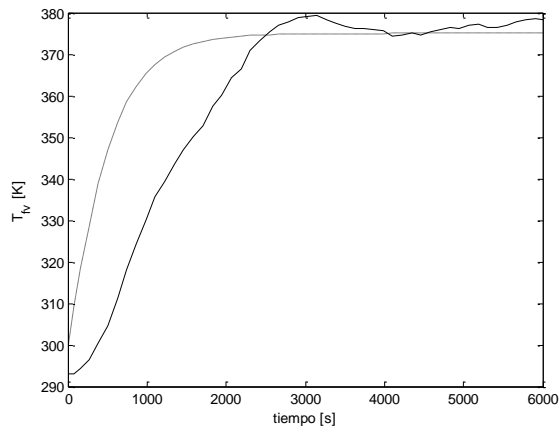


(b)

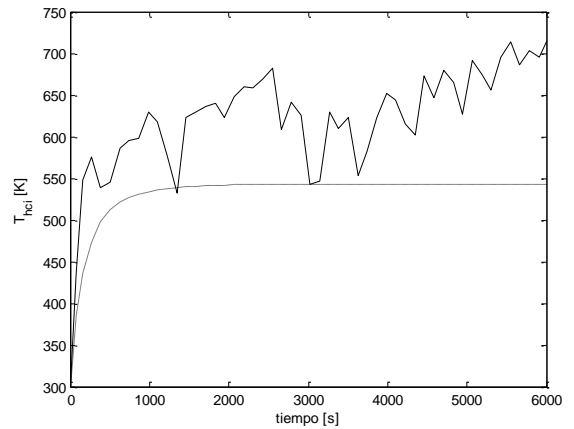


(c)

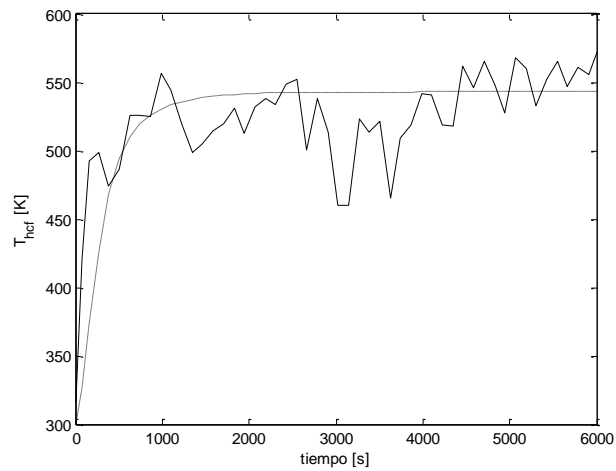
**Figura 23. Contraste entre simulación (línea punteada) y segundos datos experimentales (línea continua) para variables de: (a) temperatura en cuello de cisne; (b) temperatura inicio de combustión y (c) temperatura final de combustión**



(a)



(b)



(c)

**Tabla 9. Parámetros iniciales y definitivos identificados a partir de O<sub>2</sub>**

| PARÁMETRO | CONDICIÓN INICIAL | VALOR OBTENIDO |
|-----------|-------------------|----------------|
| $c_1$     | 0.1               | 0.248          |
| $c_2$     | 0.1               | 0.205          |
| $c_3$     | 0.1               | -0.003         |
| $c_4$     | 0.1               | 0.06           |
| $c_5$     | 0.1               | 0.012          |
| $c_6$     | 0.1               | -0.015         |

Por tanto, con base en estos parámetros identificados se realizó el contraste entre simulación y experimentos (para dos capturas de datos tomadas en las mismas condiciones) presentado en la Fig. 24.

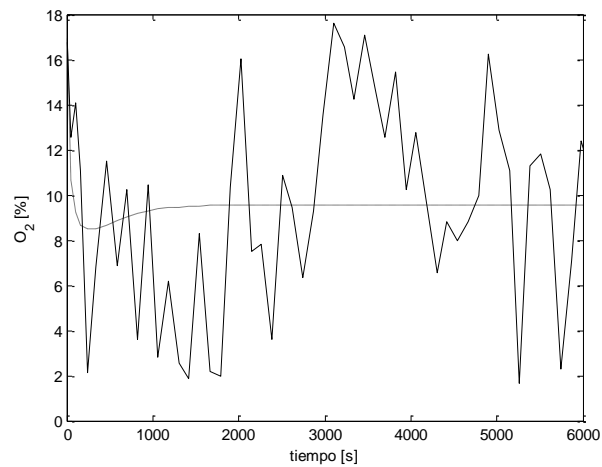
#### **4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO IDENTIFICADO**

Los resultados obtenidos en las Tablas 8 y 9, muestran convergencia del algoritmo hacia valores de parámetro identificados consistentes con el criterio de error de valor medio establecido. Es importante resaltar este detalle debido a que no es posible garantizar en todos los casos una convergencia del error hacia cero. A esto se le conoce como “estabilidad” del algoritmo de identificación. Las Figs. A.1 y A.2 del Anexo A, ilustran mejor este comentario.

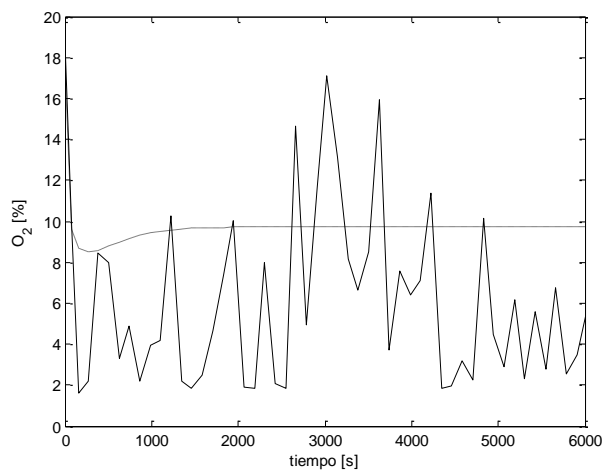
En términos del comportamiento experimental para las variables de temperatura (Figs. 22 y 23), se observa cómo la del cuello de cisne  $T_{fv}$ , presenta un comportamiento más suave (continuo) comparado con las respectivas temperaturas al inicio y final de la chimenea, mostrando mayor uniformidad dinámica en el flujo de vapor que en los humos de combustión derivados del proceso de hidroddestilación.

El comportamiento errático experimental de estos últimos se manifiesta en las curvas de porcentaje de oxígeno (Fig. 24), donde se pone de manifiesto que las condiciones de flujos constantes de entrada asumidas en la Tabla 7, no se cumplen a cabalidad en la práctica, debido al comportamiento fluctuante del sistema mecánico empleado para suministrar la biomasa y el aire al proceso.

**Figura 24. Contraste entre simulación (línea punteada) y datos experimentales (línea continua) para porcentaje de oxígeno en: (a) primera prueba y (b) segunda prueba**



(a)



(b)

Esto motiva la realización de un trabajo complementario, dedicado a mejorar e instrumentar la estructura actual del sistema de alimentación de material vegetal y de flujo de aire.

Ahora bien, en cuanto respecta a los datos obtenidos tras simular el modelo matemático del sistema con los valores de parámetro identificados, se observa una tendencia general satisfactoria en las curvas de temperatura para seguir los valores medios experimentales a pesar del comportamiento errático manifestado. Esto acontece tanto para los datos experimentales iniciales (Fig. 22) como para el segundo conjunto de datos reales (Fig. 23), demostrando una correspondencia entre el modelo y los valores de constantes propuestos para describir el fenómeno físico.

Para el caso del porcentaje de oxígeno en los humos de combustión, debido al carácter aleatorio de los datos, se hace difícil realizar conclusiones al respecto del éxito de los parámetros identificados. Sin embargo, también se observa una tendencia a mantener un valor medio con referencia a los datos experimentales, tanto para el caso inicial (Fig. 24(a)) como para la segunda prueba (Fig. 24(b)).

En términos de comportamiento para las emisiones, se verifica en general, que no se cumplen los niveles esperados de porcentaje de oxígeno sugeridos para la combustión de biomasa, que según la Sección 3.2 deben estar entre el 5% y el 10%.

También se observa durante las pruebas una superación del 13% permitido por la actual legislación colombiana, sugiriendo una revisión en los procedimientos de operación del sistema que permitan adecuarlo a estándares de calidad ambiental.

## 5. CONCLUSIONES

A partir de los desarrollos presentados y los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, es posible enunciar la siguiente conclusión general:

- Se obtuvo un modelo matemático para describir las emisiones contaminantes en un destilador de aceites esenciales del CENIVAM-UIS, a partir de datos experimentales del proceso. Con base en lo anterior, fue posible describir numéricamente el comportamiento de las principales variables físicas del sistema, y por tanto, relacionar la temperatura de los gases al final de la chimenea y el porcentaje de oxígeno presente en los mismos, con las emisiones contaminantes de un proceso real de hidrodestilación.

De manera más puntual:

- Se identificaron las variables relevantes de un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales. Como se desarrolló en la Sección 2.2 y particularmente en la Fig. 8, un hidrodestilador de aceites esenciales que usa biomasa residual como fuente de energía posee como señales principales de entrada a los flujos de aire primario y secundario al igual que al flujo de biomasa seca; Asimismo, posee como salidas a las temperaturas de vapor saturado, y de humos de combustión al inicio y al final de la chimenea, al igual que al porcentaje de oxígeno en estos últimos.
- Se acondicionó la instrumentación requerida para sensar las variables relevantes de un hidrodestilador de aceites esenciales en el CENIVAM-UIS. Tal como se presentó en las Secciones 2.2.2 y 2.2.3, de manera complementaria a los dispositivos de actuación existentes y con el objetivo de posibilitar una

futura automatización del proceso, se procedió a configurar dispositivos de medición en tiempo real para las variables de salida. Más específicamente, en la Tabla 3 y la Fig. 12, se observan detalles de los sensores empleados para capturar las temperaturas del sistema. Para determinar el porcentaje de oxígeno presente en los humos de combustión se empleó un sensor OXY-Flex Oxygen Analyser, fabricado por SST LTD. Posteriormente las señales sensadas fueron almacenadas a través de un sistema de adquisición de datos con interfaz desarrollada en LabVIEW, según se ilustra en las Figs. 14 y 15.

- Se seleccionó, con base en la literatura, un modelo apropiado para describir las emisiones contaminantes en un proceso de hidrodestilación de aceites esenciales. En el Capítulo 3, el modelo simplificado de un incinerador de biomasa propuesto por Gölles et al. en [15] y adaptado por Muñoz [25], fue abordado y complementado en el Capítulo 4 por procedimientos numéricos para identificar el conjunto de parámetros, que permitió obtener comportamientos semejantes entre las simulaciones numéricas del modelo matemático y los registros de captura experimental para las diferentes variables del proceso.
- Se comparó el modelo del sistema con datos experimentales del proceso real. Inicialmente se realizó la captura de datos experimentales de salida, sobre condiciones de operación y variables de entrada conocidas del proceso de hidrodestilación de aceites esenciales, conforme se describe en la Sección 4.2.1. Posteriormente, los registros de datos fueron sometidos a un procedimiento de ajuste de curvas basado en el criterio de mínimo error cuadrático medio, según explicado 4.2.2 y 4.2.3. A partir de ello fue posible replicar la tendencia de valor medio para las variables de temperatura del sistema, por parte de las rutinas de simulación desarrolladas. En el caso de las emisiones contaminantes, los niveles de concentración de oxígeno sensados en los humos de combustión sugieren la necesidad de revisar los

procedimientos de operación del proceso para hacer más uniforme la alimentación de aire y combustible, evitando así fluctuaciones que permitan no sólo mejorar la capacidad de actuación de los humos de combustión sino facilitar el ajuste de parámetros para este submodelo.

## 6. RECOMENDACIONES

Para la identificación de los parámetros experimentales, es importante asignar de manera apropiada el valor de las tolerancias absoluta y relativa en el algoritmo de integración, pues de estos depende la convergencia de la solución de las ecuaciones diferenciales, y por ende, el error en estado estacionario.

En cuanto a las características mecánicas del hidroddestilador CENIVAM-UIS, se requiere revisar posibles mejoras de los sistemas de alimentación de aire y combustible al proceso, para facilitar futuras tareas de control automático y una apropiada operación en modo manual. Al respecto, recomendaciones puntuales se describen en la Sección 3.2 de [36].

## **7. TRABAJO FUTURO**

A manera de trabajo futuro se propone, actualizar la instrumentación del sistema de actuación del proceso de hidrodestilación del CENIVAM-UIS, de manera tal que sea posible implementar una acción de control PID (proporcional integral derivativo) con parámetros ajustados a partir de la información del modelo matemático y valores de constantes, determinados en desarrollo del presente trabajo de grado.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. Perry, D. Green, and J. Maloney, "Manual del ingeniero químico," Sexta Edic., Mc, Graw H, 2000, pp. 13,5–13,103.
- [2] S. C. Bandpatte, R. K. Mishra, B. Kumar, R. Khalkho, and G. Gautam, "Design of Model Predictive Control for MIMO Distillation Process," Commun. Signal Process. (ICCSP), 2013 Int. Conf., pp. 111–114, 2013.
- [3] J. Valenzuela, "Control de bioprocesos: destilación," Reporte de investigación, Universidad Politécnica de Zacatecas, Frensilillo, México, 2014.
- [4] E. Serrano, "Evaluación de la máxima capacidad de operacional de las columnas E-101 y D-032 de unidad fraccionadora de NAFTA de la refinería de Puerto la Cruz, PDVSA," Tesis de pregrado, Universidad del oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2013.
- [5] S. Navas, "Control de columnas de destilación," Tesis de Maestría, Universidad de Sevilla, España, 2014.
- [6] Y. Cengel and M. Boles, "Termodinámica," Séptima Ed., M. Hill, Ed. 2011, pp. 771–815.
- [7] S. Skogestad, "The dos and don'ts of distillation column control," Chem. Eng. Res. Des., no. 152, pp. 28–43, 2006.

- [8] A. Gonzáles, “Diseño de un sistema multiagente para control de una torre de destilación binaria,” Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, 2006.
- [9] A. Visioli, “A new design for a PID plus feedforward controller,” *Process Control J.*, vol. 14, no. 4, pp. 457–463, 2004.
- [10] I. L. Chien, H. Y. Chao, and Y. P. Teng, “Design and control of a complete heterogeneous azeotropic distillation column system,” *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 15, no. C, pp. 760–765, 2003.
- [11] J. Blanco, “Automatización y control regulatorio de una comna de destilación extractiva a nivel planta piloto para la producción de ETANOL ADHIDRO,” Tesis de Maestría, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [12] J. Collazo, J. Porteiro, J. Míguez, E. Granada, and M. Gómez, “Numerical simulation of a small-scale biomass boiler,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 87–96, 2012.
- [13] P. Neuberger and M. Polák, “Experimental verifying of mathematic model for biomass combustion,” vol. 52, no. 52, pp. 89–93, 2008.
- [14] M. Žecová, J. Terpák, and L. Dor, “Mathematical model of gasification and combustion of biomass,” pp. 780–785, 2012.
- [15] M. Gölles, R. Bauer, T. Brunner, N. Dourdoumas, and I. Obernberger, “Model based control of a biomass grate furnace,” in 9th European coference on industrial furnaces and boilers, 2011, vol. 1, pp. 1–10.

- [16] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User*, Second Edi., vol. 25. 1998.
- [17] I. Tobasura, “Una visión integral de la biodiversidad en Colombia,” *Revista lunazul universidad de Caldas*. pp. 1–5, 2006.
- [18] E. E. Stashenko, *Aceites esenciales*, Primera Ed. Bucaramanga, Santander, Colombia, 2009.
- [19] E. E. Stashenko, J. F. Miranda, and R. Forero, “Aplicaciones cosméticas de los aceites esenciales y compuestos naturales en el cuidado de la piel,” Bucaramanga, Santander, Colombia, 2008.
- [20] R. Granados and A. Wilmer, “Diseño de una planta extractora de aceites esenciales por Arrastre De Vapor,” Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2007.
- [21] A. Angarita and A. Silva, “Diseño de un prototipo de alambique para la extracción de aceites esenciales en el CENIVAM, con innovación en la maniobrabilidad e incremento de la eficiencia en la destilación,” Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2012.
- [22] L. A. Torres, “Estudio de la hidrodestilación del aceite esencial DE *Lippia alba* (Mill.) N.E.Br., en un destilador a escala piloto,” Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2011.
- [23] A. Bandoni, “Los aceites esenciales. En: Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores.” *Red de editoriales universitarias*, Buenos Aires, Argentina, pp. 171–178, 2002.

- [24] J. Cuesta and D. Pedroza, "Diseño de un equipo de destilación para la extracción de aceites esenciales mediante el método de hidrodestilación y destilación agua-vapor, usando biomasa como fuente de energía," Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2013.
- [25] S. Muñoz, "Control por Modos Deslizantes para un Modelo Simplificado del Proceso de Incineración de Residuos Sólidos," Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2017.
- [26] M. Göllés, S. Reiter, T. Brunner, N. Dourdoumas, and I. Obernberger, "Model based control of a small-scale biomass boiler," *Control Engineering Practice*, vol. 22, no. 1, pp. 94–102, 2014.
- [27] J. Kortela, "Fault tolerant model predictive control (FTMPC) of the BioGrate boiler," Tesis doctoral, Aalto University, 2015.
- [28] R. Bauer, M. Göllés, T. Brunner, N. Dourdoumas, and I. Obernberger, "Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes," *Biomass and Bioenergy*, vol. 34, no. 4, pp. 417–427, 2010.
- [29] A. Grau and O. Farré, "Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020," Madrid, 2011.
- [30] J. Hrdlička, B. Šulc, S. Vrána, and V. Plaček, "Ecological Aspects of Small-Scale Biomass Combustion Control," *International Conference on Development, Energy, Environment, Economics.*, pp. 388–393, 2010.

- [31] J. Pitel' and J. Mižák, "Computational Intelligence and Low Cost Sensors in Biomass Combustion Process," pp. 165–168, 2013.
- [32] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, "Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.," Colombia, 2010.
- [33] Ministerio de ambiente vivienda y desarrollo territorial, "Resolución 909 del 5 de junio de 2008," Colombia, 2008.
- [34] J. Kortela and S. L. Jämsä-Jounela, "Modeling and model predictive control of the BioPower combined heat and power (CHP) plant," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.*, vol. 65, pp. 453–462, 2015.
- [35] H. Kaur and D. Dutt, "Anatomical, morphological and chemical characterization of lignocellulosic by-products of lemon and sofia grasses obtained after recuperation of essential oils by steam distillation," *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 83–94, 2013.
- [36] R. Serrano and C. Tavera, "Evaluación de condiciones de operación de un destilador prototipo para la extracción de aceites esenciales que usa como combustible material vegetal residual", Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2014.
- [37] L. Ljung, "System Identification: Theory for the User", Second Edition. Prentice Hall, 1999.
- [38] Mathworks, "Optimization Toolbox™ User ' s Guide," 2016.

## BIBLIOGRAFIA

ANGARITA A. and SILVA A., “Diseño de un prototipo de alambique para la extracción de aceites esenciales en el CENIVAM, con innovación en la maniobrabilidad e incremento de la eficiencia en la destilación,” Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2012.

BANDONI A., “Los aceites esenciales. En: Los recursos vegetales aromáticos en Latinoamérica, su aprovechamiento industrial para la producción de aromas y sabores.” Red de editoriales universitarias, Buenos Aires, Argentina, pp. 171–178, 2002.

BANDPATTE S. C., MISHRA R. K., KUMAR B., KHALKHO R., and GAUTAM G., “Design of Model Predictive Control for MIMO Distillation Process,” Commun. Signal Process. (ICCSP), 2013 Int. Conf., pp. 111–114, 2013.

BAUER R., GÖLLES M., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., and OBERNBERGER I., “Modelling of grate combustion in a medium scale biomass furnace for control purposes,” Biomass and Bioenergy, vol. 34, no. 4, pp. 417–427, 2010.

BLANCO J., “Automatización y control regulatorio de una comna de destilación extractiva a nivel planta piloto para la producción de ETANOL ADHIDRO,” Tesis de Maestría, Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 2011.

CENGEL Y. and BOLES M., “Termodinámica,” Séptima Ed., M. Hill, Ed. 2011, pp. 771–815.

CHIEN I. L., CHAO H. Y., and TENG Y. P., "Design and control of a complete heterogeneous azeotropic distillation column system," *Comput. Aided Chem. Eng.*, vol. 15, no. C, pp. 760–765, 2003.

COLLAZO J., PORTEIRO J., MÍGUEZ J., GRANADA E., and GÓMEZ M., "Numerical simulation of a small-scale biomass boiler," *Energy Convers. Manag.*, vol. 64, pp. 87–96, 2012.

CUESTA J. and PEDROZA D., "Diseño de un equipo de destilación para la extracción de aceites esenciales mediante el método de hidrodestilación y destilación agua-vapor, usando biomasa como fuente de energía," Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2013.

GÖLLES M., BAUER R., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., and OBERNBERGER I., "Model based control of a biomass grate furnace," in 9th European conference on industrial furnaces and boilers, 2011, vol. 1, pp. 1–10.

GÖLLES M., REITER S., BRUNNER T., DOURDOUMAS N., and OBERNBERGER I., "Model based control of a small-scale biomass boiler," *Control Engineering Practice*, vol. 22, no. 1, pp. 94–102, 2014.

GONZÁLES A., "Diseño de un sistema multiagente para control de una torre de destilación binaria," Tesis de doctorado, Instituto Politécnico Nacional, Mexico, 2006.

GRANADOS R. and WILMER A., "Diseño de una planta extractora de aceites esenciales por Arrastre De Vapor," Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2007.

GRAU A. and FARRÉ O., “Situación y potencial de valorización energética directa de residuos. Estudio Técnico PER 2011-2020,” Madrid, 2011.

HRDLIČKA J., ŠULC B., VRÁNA S., and PLAČEK V., “Ecological Aspects of Small-Scale Biomass Combustion Control,” International Conference on Development, Energy, Environment, Economics., pp. 388–393, 2010.

KAUR H. and DUTT D., “Anatomical, morphological and chemical characterization of lignocellulosic by-products of lemon and sofia grasses obtained after recuperation of essential oils by steam distillation,” *Cellul. Chem. Technol.*, vol. 47, no. 1–2, pp. 83–94, 2013.

KORTELA J. and JÄMSÄ-JOUNELA S. L., “Modeling and model predictive control of the BioPower combined heat and power (CHP) plant,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems.*, vol. 65, pp. 453–462, 2015.

KORTELA J., “Fault tolerant model predictive control (FTMPC) of the BioGrate boiler,” Tesis doctoral, Aalto University, 2015.

LJUNG L., "System Identification: Theory for the User", Second Edition. Prentice Hall, 1999.

LJUNG L., System Identification: Theory for the User, Second Edi., vol. 25. 1998.

MATHWORKS, “Optimization Toolbox™ User ’ s Guide,” 2016.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, “Protocolo para el control y vigilancia de la contaminación atmosférica generada por fuentes fijas.,” Colombia, 2010.

MINISTERIO DE AMBIENTE VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL, "Resolución 909 del 5 de junio de 2008," Colombia, 2008.

MUÑOZ S., "Control por Modos Deslizantes para un Modelo Simplificado del Proceso de Incineración de Residuos Sólidos," Tesis de Maestría, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Santander, Colombia, 2017.

NAVAS S., "Control de columnas de destilación," Tesis de Mestría, Universidad de Sevilla, España, 2014.

NEUBERGER P. and POLÁK M., "Experimental verifying of mathematic model for biomass combustion," vol. 52, no. 52, pp. 89–93, 2008.

PERRY R., GREEN D., and MALONEY J., "Manual del ingeniero químico," Sexta Edic., Mc, Graw H, 2000, pp. 13,5–13,103.

PITEL' J. and MIŽÁK J., "Computational Intelligence and Low Cost Sensors in Biomass Combustion Process," pp. 165–168, 2013.

SERRANO E., "Evaluación de la máxima capacidad de operacional de las columnas E-101 y D-032 de unidad fraccionadora de NAFTA de la refinería de Puerto la Cruz, PDVSA," Tesis de pregrado, Universidad del oriente, Puerto la Cruz, Venezuela, 2013.

SERRANO R. and TAVERA C., "Evaluación de condiciones de operación de un destilador prototipo para la extracción de aceites esenciales que usa como combustible material vegetal residual", Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2014.

SKOGESTAD S., "The dos and don'ts of distillation column control," Chem. Eng. Res. Des., no. 152, pp. 28–43, 2006.

STASHENKO E. E., Aceites esenciales, Primera Ed. Bucaramanga, Santander, Colombia, 2009.

STASHENKO E. E., MIRANDA J. F., and FORERO R., "Aplicaciones cosméticas de los aceites esenciales y compuestos naturales en el cuidado de la piel," Bucaramanga, Santander, Colombia, 2008.

TOBASURA I., "Una visión integral de la biodiversidad en Colombia," Revista lunazul universidad de Caldas. pp. 1–5, 2006.

TORRES L. A., "Estudio de la hidrodestilación del aceite esencial DE Lippia alba (Mill.) N.E.Br., en un destilador a escala piloto," Tesis de Pregrado, Universidad Industrial de Santander, 2011.

VALENZUELA J., "Control de bioprocesos : destilación," Reporte de investigación, Universidad Politécnica de Zacatecas, Frensilillo, México, 2014.

VISIOLI A., "A new design for a PID plus feedforward controller," Process Control J., vol. 14, no. 4, pp. 457–463, 2004.

ŽECOVÁ M., TERPÁK J., and DOR L., "Mathematical model of gasification and combustion of biomass," pp. 780–785, 2012.

## ANEXOS

### ANEXO A – FUNCIÓN *fminsearch* DE MATLAB

Con el fin de obtener los parámetros de un modelo que mejor se ajusten al comportamiento de sistemas reales, es necesario el empleo de técnicas de identificación las cuales pueden ser: de caja negra, cuando sólo se tiene información de las señales de entrada y salida del sistema; o de caja gris, cuando se posee algún tipo de información adicional acerca de la estructura y/o de los parámetros del modelo.

Reglas estadísticas juegan un papel muy importante en procesos de identificación de parámetros. La señal aplicada (entrada), debe excitar la mayor cantidad de componentes dinámicas del sistema, de tal manera que las señales de salida sean ricas en términos de información dinámica [37].

*Optimization Toolbox* es un conjunto de herramientas de optimización, incluido en el software MATLAB, que proporciona funciones para encontrar parámetros, incluyendo solucionadores de tipo [38]:

- Programación lineal y cuadrática
- Optimización multiobjetivo
- Optimización no lineal
- Programación lineal mixta-entera.

Por lo tanto, para iniciar el proceso de identificación de parámetros de forma numérica, es sugerido seguir los siguientes pasos:

- Elegir un algoritmo que mejor se adecúe al problema de estudio
- Definir la función objetivo a minimizar o maximizar, según sea el caso

- De ser necesario, especificar las restricciones del problema
- Ajustar las opciones de simulación propias del algoritmo
- Desarrollar una rutina para la correcta ejecución del algoritmo de optimización.

Según lo anterior, y teniendo en cuenta el modelo de estudio descrito en el Capítulo 3, se seleccionó la función *fminsearch* para la obtención de los parámetros experimentales *P* ; siendo una optimización no lineal y sin restricciones.

Este comando presenta la siguiente estructura:

$$[P, fval, exitflag] = fminsearch (Funopt, P_0, options)$$

siendo  $P_0$  y  $P$  vectores que contienen los valores iniciales y finales de los parámetros, respectivamente. *fval* es la evaluación de la solución en la función objetivo, *exitflag* la condición de salida y *Funopt* la función objetivo, correspondiente al error cuadrático medio, definido así:

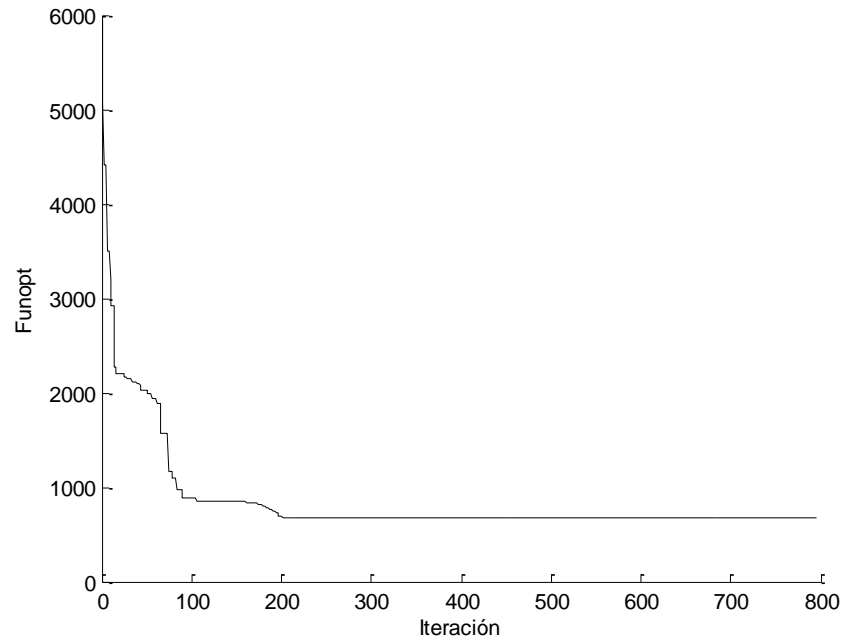
$$Funopt = \min_P \left\{ \frac{\left( x_{exp} - x_{mod}(P) \right)^2}{2} \right\}$$

Adicionalmente, en las opciones de entrada (*options*) se pueden establecer configuraciones de visualización (*Plotfcns, Display*), límite máximo de evaluaciones permitidas en la función objetivo (*MaxFunEvals*), límite máximo de iteraciones (*MaxIter*), entre otros.

A través de la opción *Plotfcns*, fue posible graficar el número de iteraciones necesarias para la identificación de los parámetros (798) y la tendencia a cero de *Funopt* (error cuadrático medio), asimismo, el tiempo requerido fue de 134.76 s;

todo esto para el proceso de optimización de la temperatura final de los humos de combustión, ilustrado en la figura A.1. Por otra parte, la optimización para las constantes experimentales de la ecuación de oxígeno el tiempo transcurrido fue de 35.65 s y se necesitaron de 247 iteraciones, según representado en la figura A.2.

**Figura A.1.** Convergencia a cero de *Funopt* para temperatura de combustión



**Figura A.2.** Convergencia a cero de *Funopt* para porcentaje de O<sub>2</sub>

