



**Diseño de un Sistema de Control para la Combustión de la Cascara de Cacao usando el  
Software SolidWorks**

**Autores:**

**Wilmar Jiménez Bayona**

**Código: 21131528998**

**Helbert Manuel Durán Quintero**

**Código: 21131625313**

**Universidad Antonio Nariño**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica**  
**Programa de Ingeniería Electromecánica**  
**Bucaramanga**  
**2023**

**Diseño de un Sistema de Control para la Combustión de la Cascara de Cacao usando el  
Software SolidWorks**

**Autores:**

**Wilmar Jiménez Bayona**

**Código: 21131528998**

**Helbert Manuel Durán Quintero**

**Código: 21131625313**

**Director del Proyecto:**

**Ing. Lic. Esp. Juan Manuel Murcia**

**Universidad Antonio Nariño**

**Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica**

**Programa de Ingeniería Electromecánica**

**Bucaramanga**

**2023**

## **Nota de Aceptación**

El trabajo de grado titulado “Diseño de un Sistema de Control para la Combustión de la Cascara de Cacao usando el Software SolidWorks”, cumple con los requisitos para optar  
Al título de Ingenieros Electromecánicos.

---

**Firma del Tutor**

---

**Firma Jurado**

---

**Firma Jurado**

**Bucaramanga, 10 de Mayo de 2023**

## Contenido

Resumen.....	9
Abstract.....	10
Introducción .....	11
1. Antecedentes.....	14
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General .....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Justificación .....	16
4. Marco Teórico.....	18
4.1 Combustión de la Cáscara de Cacao .....	18
4.2 Especificaciones de Diseño.....	19
4.3 Análisis Computacional .....	20
4.4 Espacio de Estados .....	21
4.5 Control PID .....	22
5. Diseño Metodológico.....	24
6. Resultados y Análisis de Resultados.....	25
6.1 Modelo Matemático .....	25
6.1.1 Modelado de Tornillo Sinfín .....	25
6.1.2 Modelado de la Combustión.....	26

6.1.2.1 Ecuaciones Termodinámicas de la Combustión.....	27
6.1.2.2 Flujos y Composición Elemental.....	27
6.1.3 Modelado del Intercambiador de Calor .....	38
6.1.3.1 Razón de cambio de la transferencia de calor $q$ .....	39
6.1.3.2 Coeficiente de convección interno $h_i$ .....	45
6.1.4 Perdidas de Calor en Tuberías (conducción a través del solido).....	46
6.1.4.1 Calculo de calor perdido.....	48
6.1.5 Perdida de Energía en Accesorios .....	50
4.5.1 Perdidas en la Entrada. ....	50
6.1.5.2 Perdidas en la Salida.....	50
6.1.5.3 Caudal de Salida. ....	51
6.2 Balance General .....	51
6.2.1 Distribución de Aire Primario y Secundario .....	52
6.2.2 Balance Energético .....	52
6.2.2.1 Flujo Másico del Aire.....	53
6.2.2.2 Flujo Másico de la Biomasa. ....	54
6.2.2.3 Flujo másico de la Ceniza.....	54
6.2.2.4 Flujo Másico del Gas.....	55
6.3 Controlador.....	55
6.3.1 Espacio de Estados .....	55

6.3.2 Modelo Caja Gris.....	56
6.4 Interfaz HMI.....	59
6.5 Validación .....	62
7. Conclusiones .....	63
8. Recomendaciones .....	65
Referencias Bibliográficas .....	66

## Lista De Figuras

Figura 1. Análisis computacional .....	20
Figura 2. Lazo de control PID.....	22
Figura 3. Diagrama para Modelo de Combustión.....	26
Figura 4. Elementos del Proceso de Combustión .....	27
Figura 5. Factor de corrección flujo cruzado de un solo paso .....	41
Figura 6. Tubo de Aire Entrada SolidWorks .....	46
Figura 7. Tubo de salida de aire SolidWorks.....	47
Figura 8. Tubo en SolidWorks convección y conducción .....	48
Figura 9. Transferencia de calor por convección y radiación de tubos a temperatura.....	49
Figura 10. Balance energético.....	52
Figura 11. Ecuaciones del Sistema Caja Blanca.....	56
Figura 12. Definición de Parámetros .....	57
Figura 13. Matrices del Sistema.....	57
Figura 14. Comparación de similitud de respuesta del sistema .....	58
Figura 15. Control PID .....	58
Figura 16. Respuesta transitoria del Controlador a un Step.....	59
Figura 17. Ventana para selección de Puerto Arduino .....	60
Figura 18. Ventana para Selección de Tiempo Almacenamiento de Datos.....	60
Figura 19. Ventana para visualización de variables del proceso .....	61
Figura 20. Ventana para selección de producto y velocidad de coolers modo manual .....	61
Figura 21. Prueba controlador temperatura setpoint 50°C .....	62
Figura 22. Prueba controlador humedad setpoint 50°C .....	63

## Lista De Tablas

Tabla 1. Especificaciones para el Diseño del Controlador .....	19
Tabla 2. Factor de relleno según el tipo de carga transportada.....	26
Tabla 3. Reducción de la capacidad en función de la inclinación del transportador .....	26
Tabla 4. Elementos presentes en la Combustión .....	29



## Resumen

Este proyecto de grado tiene como propósito general, diseñar un sistema de control para quemar la cascara de cacao, usando para ello el software SolidWorks.

Este proceso inicia con la exploración de las variables que se estudiaron en el proceso de combustión de la biomasa, teniendo en cuenta los límites y cambios de las mismas. Además, se realizó un análisis para adquirir los datos que se necesitaron para el control y accionamiento, conociendo las variables que intervienen en el proceso de termodinámica. Luego, se diseñó el controlador que permite el monitoreo y la observación de las variables y por último se evaluó el sistema diseñado, con pruebas de funcionamiento y simulación.

El diseño metodológico es una metodología en V, en el cual se compara las etapas de construcción con las etapas de control de calidad.

Finalmente, se determina con la investigación que la humedad que se presenta en los pellets influye en la combustión por lo cual se deberá ejecutar un precalentamiento del horno para evaporar la mayor parte de la humedad, y garantizar un buen funcionamiento del horno con el fin de llegar a la temperatura.

**Palabras Claves:** Combustión, Diseño, Sistema de Control, SolidWorks.

## **Abstract**

This degree project has the general purpose of designing a control system to burn the cocoa shell, using SolidWorks software for it.

This process begins with the exploration of the variables that were studied in the biomass combustion process, taking into account their limits and changes. In addition, an analysis was carried out to acquire the data that was needed for the control and activation, knowing the variables that intervene in the thermodynamic process. Then, the controller that allows the monitoring and observation of the variables was designed and finally the designed system was evaluated, with performance tests and simulation.

The methodological design is a V-shaped methodology, in which the construction stages are compared with the quality control stages.

Finally, it is determined with the investigation that the humidity that appears in the pellets influences the combustion, for which a preheating of the oven must be carried out to evaporate most of the humidity, and guarantee a good operation of the oven in order to get to temperature.

**Keywords: Combustion, Design, Control System, SolidWorks.**

## Introducción

El secado del cacao es importante ya que optimiza el transporte, almacenamiento y comercialización del grano de cacao. Una vez fermentado el grano de cacao queda con aproximadamente un 55% de humedad el cual se debe reducir a un porcentaje entre el 6 al 7% para garantizar que se pueda comercializar y almacenar por un tiempo más largo. [2]

En tal sentido, el cacao se puede secar de forma natural o artificial. La actividad del secado consiste en mover el aire en los granos para bajar la humedad interna. El método que se viene utilizando actualmente para el secado es a través del aprovechamiento de la energía solar, pero existen lugares en donde la época de cosecha concuerda con la época de invierno; por ende, algunos cacao cultores utilizan procesos de secado artificial o una integración de ambos. [3]

De igual modo, el secado de la cáscara de cacao, al igual que en otros granos, se dan dos procesos: la transferencia de calor, en la cual, la radiación solar aumenta la temperatura de la cáscara haciendo posible que el agua contenida dentro se evapore. El otro proceso involucrado es la transferencia de masa: donde una corriente de aire bajo en humedad circula alrededor de la cáscara del grano y arrastra la humedad evaporada, provocando que la humedad fluya desde el interior hacia afuera de la cáscara. [3]

Para aprovechar la biomasa de la cáscara del cacao, se debe usar alrededor del 70% que es el peso de la cáscara y equivale al porcentaje de energía. En este proceso de secado de la cáscara, se obtiene un valor agregado, que representa rentabilidad para el cultivador de cacao, ya que por un lado recibe dinero por la venta de grano y por otro se pueden generar utilidades por la venta de la cascara y los derivados de su transformación.

Aunado a esto, se puede decir que en la actualidad, muchos sistemas de combustión de la cascara de cacao funcionan de forma artesanal por lo cual se necesita de una persona con conocimiento previo en el funcionamiento del sistema. Es por ello que es necesario el diseño de un sistema de control que trabaje de manera automática manteniendo estables las variables termodinámicas que garanticen el proceso de secado de la cascara de cacao.

Por lo anterior, se realizó la pregunta de investigación: ¿Cuáles son las condiciones y características que tiene el diseño de un sistema de control para la combustión de la cascara de cacao, usando para ello el software SolidWorks?

Metodológicamente, el diseño metodológico es una metodología en “V”. El enfoque es Descriptivo, puesto que se establece una descripción del paso a paso utilizado para el diseño del sistema de control, de esta manera se analizarán los resultados que pueda aportar mejoras al objeto de estudio. Asimismo, se utiliza información de bases de datos tales como: Google Académico, Redalyc, Dialnet, Scielo y Bibliotecas de Universidad.

Este proyecto de investigación está dividido en 9 capítulos, organizados así:

Capítulo 1: se presenta los antecedentes de la investigación

Capítulo 2: se presentan los Objetivos (General y específicos) que se convierten en la guía del estudio.

Capítulo 3: a través de la justificación, se exponen las razones y fundamentos por el cual se realizó este proyecto; dichos motivos se originan en distintos contextos como (lo teórico, lo institucional y lo académico).

Capítulo 4: incluye las bases teóricas de los principales conceptos.

Capítulo 5: se presenta el diseño metodológico con el tipo y enfoque de investigación, las fuentes de información.

Capítulo 6: se expone el desarrollo y la explicación detallada de los resultados de la investigación.

Capítulo 7 y 8: se exponen las conclusiones y recomendaciones, además de los potenciales trabajos que se puedan elaborar a partir de los resultados.

Capítulo 9: se encuentra la Bibliografía que consiste en el conjunto de información que nos ayuda a identificar y esclarecer las fuentes empleadas en el documento.

## 1. Antecedentes

En investigaciones realizadas se encontraron diversos proyectos del uso de la biomasa, y algunos avances utilizando los hornos de biomasa, controladas por una variedad de sistemas que ayudan al quemado de la materia prima.

El objetivo final del proceso corresponde en garantizar algunas condiciones de temperatura dentro del horno para garantizar los valores deseados. [2]

Actualmente, existe la tendencia a utilizar sistemas híbridos que permiten tener mayor control del proceso y mayores velocidades de secado debido al uso de energía térmica, complementan a la energía solar. [2]. La incineración de la biomasa es un procedimiento encaminado a la producción de energía térmica requerida para suplir diversas necesidades. se debe tener presente las características del desarrollo para realizar un control efectivo que permita una incineración eficiente de la biomasa.

Los autores Barrera y Ramírez, mencionan que el uso de energías alternativas ayuda a minimizar el impacto ambiental en los procesos industriales llevando a la biomasa a ser una alternativa muy relevante. [3].

El autor Ortega, en su investigación sugiere la construcción de un horno pirolítico, un equipo portátil que puede ser usado en trabajo de campo, el primer objetivo del equipo es la adquisición del carbón vegetal . igualmente, la utilización de varias mezclas de tierra y carbón en el estudio de la fertilización de los diversos características de suelos [4].

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Diseñar un Sistema de Control para la Combustión de la Cascara de Cacao, usando para ello el software SolidWorks.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analizar las variables que intervienen en el proceso de combustión de biomasa, teniendo en cuenta los límites y cambios de las mismas.
- Realizar un procedimiento para la adquisición de datos, accionamiento y el control de equipos, teniendo en cuenta las variables termodinámicas que influyen en el proceso de secado de la cascara de cacao.
- Diseñar un controlador que permita el monitoreo y visualización de las variables relacionadas con el proceso de combustión de biomasa.
- Evaluar el sistema diseñado, mediante pruebas de funcionamiento y simulación.

### 3. Justificación

Según Finagro, en Colombia, existen alrededor de 42.800 familias productoras de cacao para el año 2018, obteniendo un grano de una excelente calidad, también manifiestan que el departamento con mayor producción es el Santander y aporta un 42% de grano de cacao. [5].

La actividad del secado de cacao se realiza de forma tradicional, por lo cual usan herramientas tradicionales como son los machetes, tijeras para recoger el fruto del árbol, [4] igualmente lo recogen en valdes y sacos y llevados en carretas para ser despulpado y almacenado donde finalmente se le realiza el procedimiento de secado del grano, la cosecha en épocas alta producción se realiza cada 15 a 30 días, por lo tanto el proceso de secado se debe realizar en el menor tiempo posible y se debe depositar en un recipiente limpio para evitar la contaminación de las semillas evitando que el grano se pierda. [10]

Aunado a esto, el siguiente proceso tiene una relevancia y es conservar la calidad que garantizar el transporte del grano, es la deshidratación del fruto de cacao, que normalmente se realiza por medio de la radiación solar, el cual tiene un tiempo aproximado de 4 a 5 días para bajar la humedad, con el fin de que no se vea afectado por hongos los cuales echarían a perder el grano del cacao. [10]

En temporada de invierno y debido a la radiación solar, el proceso puede verse afectado alargando el tiempo estipulado para este, lo cual afecta la comercialización perjudicando a los cacao cultores, por otra parte la biomasa proveniente del cacao es tirada en los mismo cultivos a fin de que se deteriore provocando diferentes plagas al descomponerse que afectan los cultivos ocasionando reprocesos y en algunos casos pérdidas para esta industria. [11]



Es por ello que los cacao cultores deberán implementar nuevas tecnologías que le permitan optimizar el secado del grano de cacao con procesos eficientes para tal fin aprovechando la materia prima como es la biomasa proveniente del fruto garantizando un beneficio adicional a la productividad de los cultivos. [12]

Por todo lo anterior, este proyecto es importante desde el punto de vista teórico porque aporta al conocimiento científico, presentando un paso a paso de como podemos adquirir los datos, para el accionamiento y control de todos los equipos involucrados en el proceso, a fin de controlar las variables termodinámicas que influyen en la incineración de la biomasa para mantener unas condiciones de temperatura estable que garanticen el secado del grano

Asimismo, el hecho de hacer una recopilación y selección de información asociada a Sistemas de Control, resulta en la generación de un conocimiento actualizado sobre los procedimientos llevados a cabo en torno a este tema de la ingeniería, brindando a la comunidad académica y a posibles interesados en el estudio del tema una mayor claridad en cuanto a conceptos, avances e información pertinente relacionada.

En última instancia, adquiere relevancia para la ingeniería Electromecánica como normativa científica el detallar sobre conceptos que tienen relación directa con sistemas de control; igual para sus autores, que, en calidad de estudiantes, buscan investigar en esta área del conocimiento con el fin de elevar el perfil profesional de esta temática.

## 4. Marco Teórico

### 4.1 Combustión de la Cáscara de Cacao

El biogás se puede obtener con los residuos de la cascara de cacao, aprovechando la materia prima de los desechos que se generan en los cultivos de cacao y disminuyendo el impacto ambiental que genera este tipo de residuo. Para la industria de chocolate y sus derivados del cacao sólo se utiliza el fruto, que equivale a un 30% del producto. Es por ello que a fin de aprovechar este importante recurso una alternativa es utilizar el 100% del fruto con las diferentes alternativas mencionadas anteriormente. [4]

Al respecto, se puede decir que cuando se pela la semilla, uno de los residuos que queda para descomposición natural es la cascara de cacao, que en muchos casos puede representar un problema por su alta concentración de nitrógeno con amoníaco. [5]

La transformación del biogás obtenido de la cascara de cacao se puede utilizar en la industria para generar energía eléctrica utilizando turbinas, además de obtener gas natural que puede ser utilizado en otros procesos. [8]

Asimismo, se pueden obtener con la transformación de la cascara de cacao, combustibles renovables, por lo cual se produce de forma natural, siempre y cuando el ser humano adopte esta alternativa. [9]

## 4.2 Especificaciones de Diseño

Es necesario que se tenga presente en el diseño del controlador que este debe actuar sobre algunas variables que gobernarán en el proceso del secador.

**Tabla 1.** *Características y Especificaciones en el Diseño del Controlador*

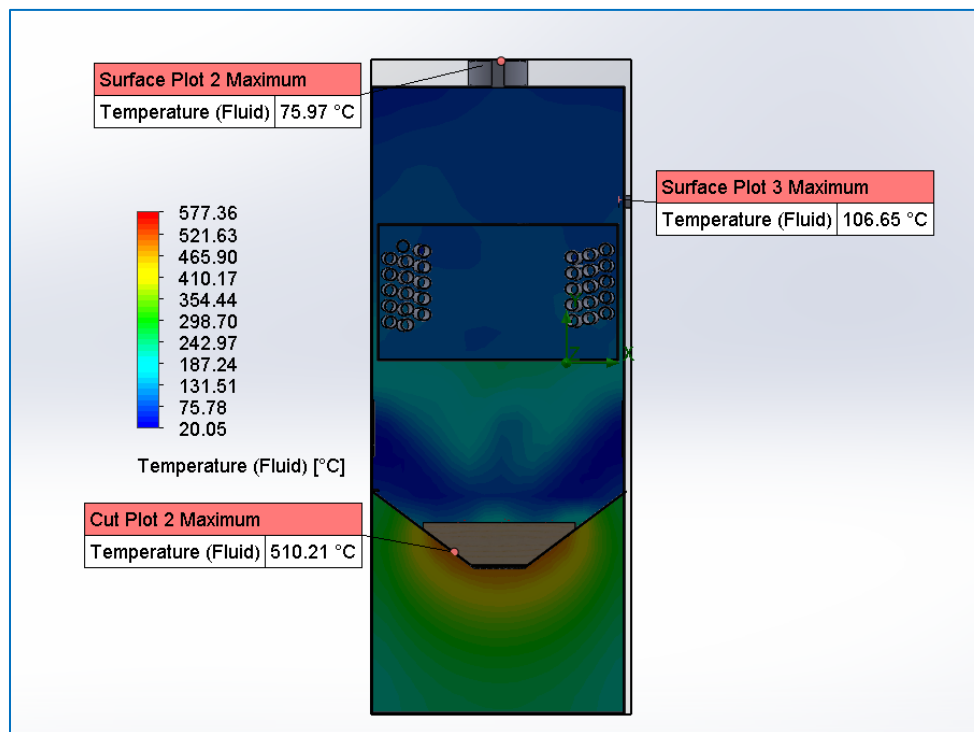
<i>Variable</i>	<b>Rango mínimo</b>	<b>Rango maximo</b>	<b>unidades</b>
<i>temperatura</i>	<b>35</b>	<b>70</b>	<b>°C</b>
<i>humedad</i>	<b>7</b>	<b>7.8</b>	<b>%</b>
<i>humedad relativa</i>		<b>30</b>	<b>%</b>
<i>flujo entrada</i>	<b>1.56</b>	<b>3.5</b>	<b>m/s</b>
<i>capacidad secador</i>	<b>20</b>	<b>40</b>	<b>Kg</b>
<i>tiempo secado</i>	<b>36</b>	<b>50</b>	<b>h</b>

Fuente: Autores

### 4.3 Análisis Computacional

El análisis realizado nos muestra un enfoque más preciso del comportamiento de los fluidos internos en el proceso de combustión en un estado estable, es de vital importancia conocer este comportamiento ya que nos dice que los fluidos en la vida real nunca son estables, por lo contrario, su naturaleza es permanecer en un estado transitorio

**Figura 1.** Análisis computacional



Fuente: (Proyecto UTS, 2018), Estudio de la Eficiencia de una Cámara de Combustión

Se puede observar que en la figura 2, las temperaturas son representadas por una serie de colores que representan variaciones en esta, identificando las diferentes aéreas de la cámara de combustión en la cual podemos observar como se redistribuye la energía térmica.

La temperatura más elevada se ubica en la parte inferior de la cámara de combustión y esta llega a una temperatura de 510 grados centígrados. Los gases producto de la combustión salen del horno a una temperatura de 76 grados centígrados y la temperatura del ambiente se eleva hasta los 106 grados centígrados para lograr un proceso estable, es por ello que las siguientes ecuaciones nos ayudan analizar la eficiencia del sistema.

$$Q = \dot{m} * C_p(\Delta T) \text{ [Ecuación 1]}$$

Es así que  $Q$  representa el calor generado,  $\dot{m}$  representa es el flujo másico del aire, el  $C_p$  representa el calor específico a presión constante y  $\Delta T$  indica la diferencia entre la temperatura de salida con respecto a la temperatura de entrada. Con la siguiente ecuación se halla la eficiencia del sistema.

$$\eta = Q_a / Q_T \text{ [Ecuación 2]}$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia,  $Q_a$  es el calor que absorbe el aire y  $Q_T$  es la potencia térmica que tiene la biomasa

#### 4.4 Espacio de Estados

El significado de espacios de estado representa una forma matricial de trabajar las ecuaciones para obtener una facilidad en la representación de los sistemas además de conocer y controlar el comportamiento dinámico interno de un sistema y su comportamiento.

La representación de estados se llevará a cabo con las siguientes dos ecuaciones.

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) \quad \text{[Ecuación 3]}$$

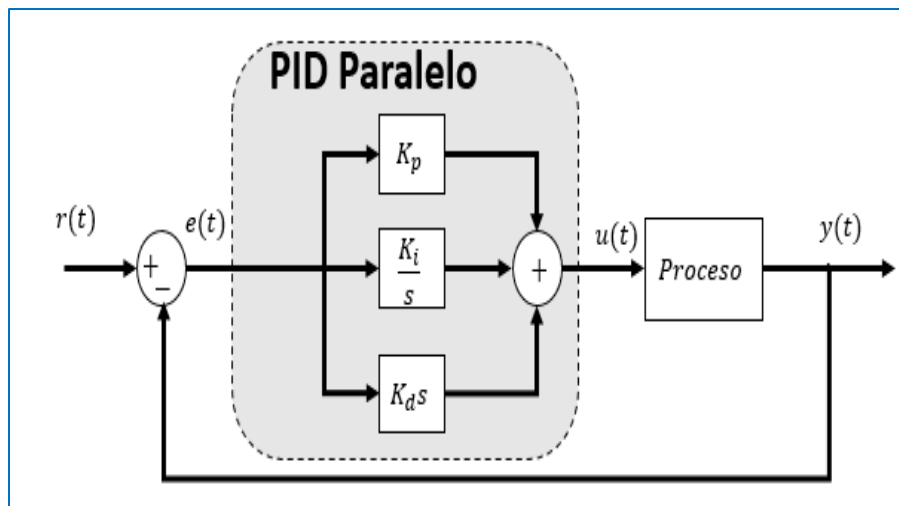
$$\dot{y}(t) = \mathbf{C}x(t) + \mathbf{D}u(t) \quad [\text{Ecuación 4}]$$

Teniendo en cuenta las dos ecuaciones anteriores  $\mathbf{A}$  nos representa la matriz de estados,  $\mathbf{B}$  nos representa la matriz de entrada,  $\mathbf{C}$  hace énfasis a la matriz de salida y  $\mathbf{D}$  es la matriz de transmisión directa.

#### 4.5 Control PID

La finalidad del controlador PID es atenuar las perturbaciones que se puedan encontrar en el sistema logrando obtener un proceso optimizado y confiable para aquellos procesos que sean poco estables y que no sean lineales.

**Figura 2.** Esquema de control PID



Fuente: Autores del Proyecto

Un control PID nos deja controlar el funcionamiento del proceso en donde se comprende básicamente 3 parámetros de control, estos se representan con una acción proporcional, derivativo e integral. Es importante sintonizar cada ganancia a fin de garantizar que el control trabaje de acuerdo a los parámetros establecidos.

Para representar el funcionamiento de un PID utilizamos la siguiente ecuación:

$$PIDc(s) = Kp + \frac{Ki}{s} + sKd \quad [\text{Ecuación 5}]$$

## 5. Diseño Metodológico

La metodología empleada para la ejecución de este proyecto es una metodología en V, en la cual hace énfasis como podemos comparar las diferentes fases del desarrollo del proyecto con aquellos controles que se deben tener presente.

Este proyecto, arranca en su primera etapa con la información acerca de la selección de las características técnicas de los diferentes sensores y actuadores que encuentran en el mercado y pueden ser funcionales para dicho proceso. En la etapa dos se analizó el controlador que puede aportar una eficiencia mayor teniendo en cuenta las variables a controlar. En la tercera etapa se tiene el diseño con la herramienta SolidWorks.

El enfoque del proyecto es Descriptivo, puesto que se establece una descripción del paso a paso utilizado para el diseño del sistema de control. Asimismo, se utiliza información de bases de datos tales como: Google Académico, Redalyc, Dialnet, Scielo y Repositorios de Universidad.

El presente proyecto está basado en la Línea de Investigación de Instrumentación y Control de la Universidad Antonio Nariño.



## 6. Resultados y Análisis de Resultados

### 6.1 Modelo Matemático

#### 6.1.1 Modelado de Tornillo Sinfín

El sistema donde encontramos el tornillo, esta formada por una tolva la cual se encarga de almacenar los *pellets* de cacao que se vierten sobre el tornillo sinfín el cual redirecciona los *pellets* a la cámara de combustión movimiento que es generado por un motor eléctrico. Como se ha mencionado en este proyecto se deberá tener los parámetros de entrada y salida conociendo la cantidad de *pellets* que entraran a la cámara de combustión para ser incinerados. (Barrera y Ramírez, 2018).

Se deberá tener presente que utilizaremos las tablas 2 y 3 en la cual encontramos algunos parámetros necesarios para hallar la frecuencia de giro del motor y su salida la cantidad de *pellets* en kg/s con lo que obtenemos la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_f = \frac{\pi \cdot (D_T^2 - D_E^2) \cdot P_T \cdot \lambda_T \cdot i \cdot \rho_{sisco} \cdot R_{eng} \cdot f_{mf}}{2 \cdot P_m} \quad [Ecuación 6]$$

Dónde:

$$\dot{m}_f = \text{Capacidad de carga del tornillo sinfin} \left[ \frac{kg}{s} \right]$$

$$D_t = \text{Diametro del tornillo} [m]$$

$$D_E = \text{Diametro del eje} [m]$$

$$P_T = \text{Paso} [m]$$

$$\lambda_T = \text{Factor de llenado} [Adimensional] - [Tablas]$$

$$\rho_{pellet} = \text{Densidad de pellet} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

$$R_{eng} = \text{Relación de engranajes} [Adimensional]$$

$i = \text{Coeficiente de inclinación [Adimensional]} - [\text{Tablas}]$

$f_{mf} = \text{Frecuencia aplicada al motor [Hz]}$

**Tabla 2.** Factor de llenado según el tipo de carga transportada

TIPO DE CARGA	FACTOR DE LLENADO
PESADA Y ABRASIVA	0,125
PESADA Y POCO ABRASIVA	0,25
LIGERA Y POCO ABRASIVA	0,32
LIGERA Y NO ABRASIVA	0,4

Fuente: Autores del Proyecto

**Tabla 3.** Reducción de la capacidad en función de la inclinación del transportador

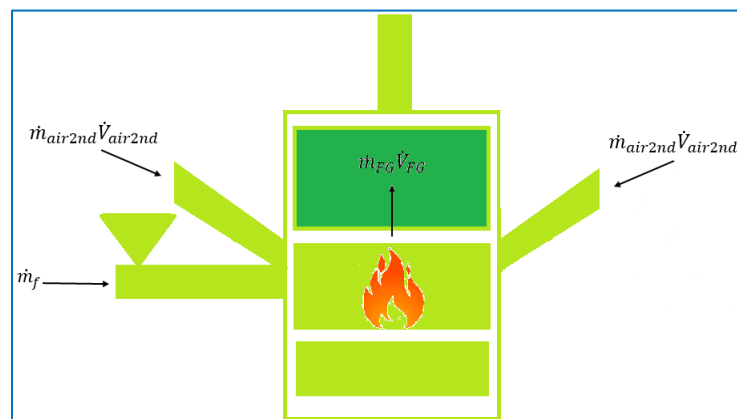
REDUCCIÓN DE LA CAPACIDAD	0°	5°	10°	15°	20°
I	1	0,9	0,8	0,7	0,6

Fuente: Autores del Proyecto

### 6.1.2 Modelado de la Combustión

Utilizamos el modelo de la combustión para encontrar la temperatura adiabática de la llama con la composición química de los pellets.

**Figura 3.** Diagrama para Modelo de Combustión



### 6.1.2.1 Ecuaciones Termodinámicas en la Combustión.

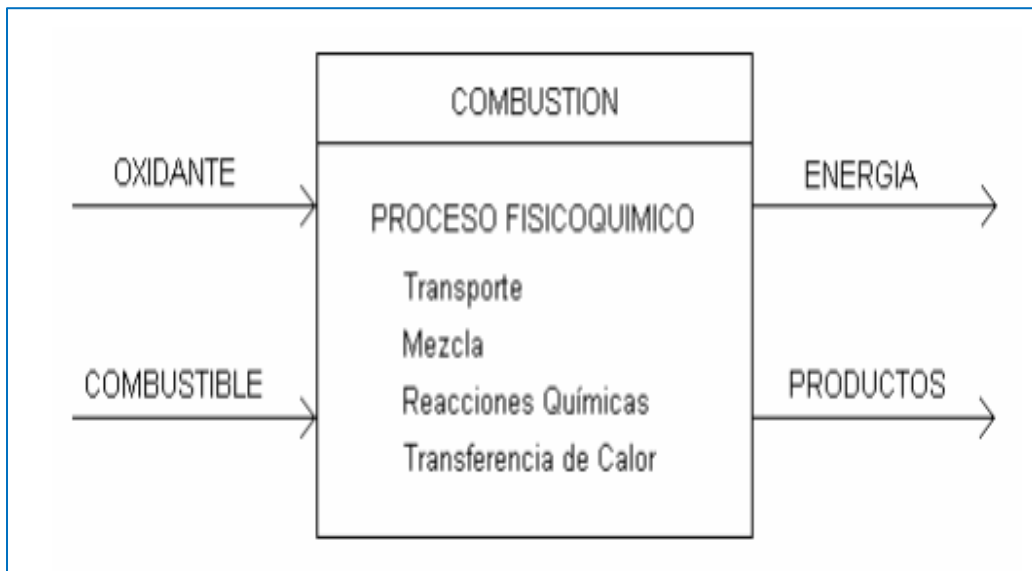
Mediante el proceso de combustión, en el cual la materia experimenta una transformación al recibir energía, y en presencia de oxígeno, se generan nuevas sustancias liberando energía.

Al existir una reacción química, con los pellets (el que arde) y el comburente, oxígeno (el que hace arder) se obtiene un subproducto como es el , CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y cenizas que son los residuos minerales los pellets.

Para modelar el sistema en teniendo en cuenta los balances masicos se tienen en cuenta las reacciones químicas estudiadas empleando aire y oxígeno.

### 6.1.2.2 Flujos y Composición Elemental.

**Figura 4.** Elementos del Proceso de Combustión



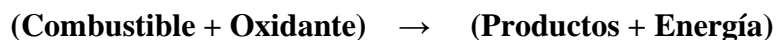
Algunos elementos más significativos en el proceso de la combustión, que podemos encontrar son:

- Combustible: es un material que genera la energía que se puede utilizar.
- Oxidante: sustancia que proporciona oxígeno y permite la combustión.
- Sistemas Auxiliares: ayudan a optimizar el proceso de combustión.
- Reactor: sistema donde se produce la reacción de combustión.
- Energía Liberada: ocurre cuando existen reacciones químicas
- Productos de Combustión: sustancia que resulta de un proceso de combustión.

El proceso para proporcionar la energía térmica que se requiere en los hornos se basa en convertir la energía de los combustibles en energía térmica mediante su incineración. En términos generales, una reacción implica la presencia de un combustible y un oxidante, y se caracteriza por la liberación de energía.

En una reacción completa se necesita suficiente oxígeno para que el carbono del combustible se transforme en dióxido de carbono y agua de lo contrario en esta reacción aparecerán otros subproductos como el monóxido de carbono. (Endesa, 2020).

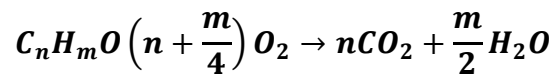
A continuación, se presenta la reacción como:



**Relación Aire Combustible:** existente una relación entre la masa de aire y la masa de combustible proporcionada al proceso de la combustión, en la cual recibe el nombre del título, y se expresa por:

$$RAC = \frac{m_{aire}}{m_{combustible}} \quad [Ecuación 7]$$

Cantidad mínima para oxidar todo el combustible



Es así que  $(n+m/4)$  es el número teórico de moles de  $O_2$ .

### Combustión Completa

Es aquella en la cual el material combustible se quema al grado máximo posible de oxidación. Siendo la causal por la cual no existirá sustancias combustibles en los humos (productos). (Endesa, 2020).

**Tabla 4.** *Elementos presentes en la Combustión*

Reactantes	Productos
$C + O_2$	$CO_2$
$H_2 + \frac{1}{2} O_2$	$H_2O$
$S + O_2$	$SO_2$
$SH_2 + 3/2 O_2$	$SO_2 + H_2O$
$CO + 1/2 O_2$	$CO_2$
$N_2$	$N_2$

Fuente: autores

## Combustión incompleta

Se produce cuando la reacción de combustión no se lleva a cabo de manera total y eficiente, formando subproductos que pueden seguir oxidándose; como es, CO. Estos productos se llaman inquemados. La presencia de estas sustancias informa que la combustión no se está realizando de manera adecuada. También encontramos inquemados como son:  $H_2$ ,  $C_n H_m$ ,  $H_2S$  y C. (Juárez, 2010).

### 6.1.2.2.1 ecuación del Calor Sensible.

Es necesario tener conocimiento de que cantidad de energía se necesita para bajar la humedad por lo tanto utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Q_{total} = Q_{util} + Q_{perdidas} \text{ [Ecuación 8]}$$

La suma del calor necesario para calentar el cacao es el calor útil ( $Q_s$ ) mientras que el calor para la evaporar el agua es ( $Q_L$ )

$$Q_s = C_p + m(\Delta T) \text{ [Ecuación 9]}$$

Según el artículo Theobroma del cacao [19] podemos utilizar la ecuación del calor específico en función de su contenido de humedad por lo que tendríamos lo siguiente:

$$C_p = 0.4156 + 0.4340M$$

Donde M es la humedad referente al grano (M=20%), y si reemplazamos se tiene que:

$$C_p = 0,5024 \frac{Btu}{lira.F}$$

Es así como :

$$Q_s = C_p + m(\Delta T)$$

$$Q_s = 0,5024 + 2204.6 \frac{(140 - 79)}{3600}$$

$$Q_s = 18.76 \frac{Btu}{s}$$

#### 6.1.2.2.2 Calor de Vaporización del Grano.

Para determinar el calor necesario para evaporar el agua que se encuentra en los granos es necesario utilizar la ecuación:

$$Q_L = \lambda_L m_{agua} \quad [Ecuación 10]$$

$$\lambda_L = (597.6 - 0.57T)(1 + 0.4062e^{-0.2365M}) \quad [Ecuación 11]$$

$$\lambda_L = (517.8)(1.3874)$$

$$\lambda_L = 718.4 \frac{btu}{libra\ agua}$$

A continuación, hallamos la masa del agua que está determinada por la humedad inicial y la humedad final del grano de cacao.

$$x_1 = \frac{m_{viniicial}}{m_s} \quad [Ecuación 12]$$

$$x_2 = \frac{m_{viniicial}}{m_s} \quad [Ecuación 13]$$

Dónde:

$m_{v\text{inicial}}$  = masa de vapor inicial kg

$m_s$  = masa de solido seco kg

$m_v$  = masa de vapor final kg

$$x_1 = 0.09$$

$$x_2 = 0.07$$

$$m_{\text{agua}} = (0.09 - 0.07) * \frac{1000}{0.4536}$$

$$m_{\text{agua}} = 44.09 \text{ libras}$$

Es así que el calor que se necesita para evaporar de manera eficiente el agua de los granos de cacao es:

$$Q_L = 718.4 * \frac{44.09}{3600} = 877.7 \frac{\text{btu}}{\text{s}}$$

Hallando  $Q_s$  y  $Q_L$  podemos hallar el calor util

$$Q_{\text{util}} = 207.93 \frac{\text{btu}}{\text{s}}$$

El modelamiento se realiza a través de las ecuaciones las cuales permiten el estudio de la combustión utilizando los balances masicos además de la termodinámica Van Loo y Koppejan nos dicen que es complejo el análisis de la combustión dado que existen diferentes variables, es por ello que a continuación se relacionan estas ecuaciones que nos permitieron trabajar en los análisis de la combustión de la biomasa.



### 6.1.2.2.3 Oxígeno Necesario ( $O_2$ ).

Asumimos el lambda, para después recalcularlo  $\lambda = 1.75$

$$\bar{m}_{O_2, \text{aire}} = \left( X_c \frac{M_{O_2}}{M_c} + \frac{X_c}{4} \frac{M_{O_2}}{M_H} + X_s \frac{M_{O_2}}{M_s} - X_o \right) (1 - X_{H_2O}) \lambda \left[ \frac{kg O_2}{kg pellet} \right] \quad [\text{Ecuación 14}]$$

Dónde:

$M_i$  = Es la Masa molecular del elemento  $i$  [  $kg \text{ kmole}$  ]

$$M_c = 12.01$$

$$M_H = 1.007$$

$$M_s = 32.06$$

$$M_{O_2} = 31.99$$

$X_i$  = fracción másica de los elemento  $i$  libre de ceniza (*daf*)

$X_{H_2O}$  = fracción de  $H_2O$  libre de ceniza mojada (*waf*)

$\lambda$  = Cantidad de aire excedido

$$\bar{m}_{O_2, \text{aire}} = \left( 0.8865 \frac{31.9988}{12.01115} + \frac{0.8865}{4} \frac{31.9988}{1.00797} + 0.1186 \frac{31.9988}{32.064} - 0.6773 \right) (1 - X_{H_2O}) 1.75 \left[ \frac{kg O_2}{kg pellet} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2, \text{aire}} = 2.361 + 7.035 + 0.1183 - 0.6773(1 - 0.08)(1.75)$$

$$\bar{m}_{O_2, \text{aire}} = 8.837 (0.86)$$

$$\bar{m}_{O_2, \text{aire}} = 7.599 \left[ \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg pellet}} \right]$$

6.1.2.2.4  $N_2$  del Aire.

$$\bar{m}_{N_2 \text{air}} = \bar{m}_{O_2 \text{air}} = \frac{Y_{N_2 \text{air}}}{Y_{O_2 \text{air}}} \frac{M_{N_2}}{M_{O_2}} \left[ \frac{\text{Kg} * N_2}{\text{Kg pellets}} \right] \quad [\text{Ecuación 15}]$$

$$\bar{m}_{N_2 \text{air}} = 7.59 \frac{1 - 0,21}{0,21} \frac{28.0134}{31.9988} \left[ \frac{\text{Kg } N_2}{\text{Kg pellets}} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2 \text{air}} = 25.026 \left[ \frac{\text{Kg } N_2}{\text{Kg pellets}} \right]$$

Donde:  $Y_{O_2}$  = Fracción de  $O_2$  en el aire (usualmente 0.21)

$$Y_{N_2, \text{air}} = 1 - Y_{O_2, \text{air}}$$

$$M_{N_2} = 28.0134$$

6.1.2.2.5 Aire.

$$\bar{m}_{\text{air}} = \bar{m}_{O_2 \text{air}} + \bar{m}_{N_2 \text{air}} \left[ \frac{\text{kg air}}{\text{kg pellets}} \right] \quad [\text{Ecuación 16}]$$

$$\bar{m}_{\text{air}} = 7.599 \left[ \frac{\text{kg } O_2}{\text{kg pellet}} \right] + 25.026 \left[ \frac{\text{Kg } N_2}{\text{Kg pellets}} \right]$$

$$\bar{m}_{\text{air}} = 32.625 \left[ \frac{\text{kg air}}{\text{kg pellets}} \right]$$

6.1.2.2.6 Masa de las variedad de gases

$$\bar{m}_{CO_2} = X_c \frac{M_{CO_2}}{M_c} (1 - X_{H_2O}) \left[ \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg pellets}} \right] \quad [\text{Ecuación 17}]$$

$$\bar{m}_{CO_2} = 0,88 \frac{44.00995}{12.01115} (1 - 0.08) \left[ \frac{\text{kg } CO_2}{\text{kg pellets}} \right] =$$

$$\bar{m}_{CO_2} = 2.966 \left[ \frac{kg CO_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{H_2O} = X_H \frac{M_{H_2O}}{M_H} (1 - X_{H_2O}) \left[ \frac{kg H_2O}{kg pellets} \right] \quad [Ecuación 18]$$

$$\bar{m}_{H_2O} = 0.1121 \frac{18.01534}{2.01594} (1 - 0.08) \left[ \frac{kg H_2O}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{H_2O} = 0,921 \left[ \frac{kg H_2O}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{SO_2} = X_S \frac{M_{SO_2}}{M_S} (1 - X_{H_2O}) \left[ \frac{kg SO_2}{kg pellets} \right] \quad [Ecuación 19]$$

$$\bar{m}_{SO_2} = 0.1186 \frac{64.0628}{32.064} (1 - 0.08) \left[ \frac{kg SO_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{SO_2} = 0.2183 \left[ \frac{kg SO_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2} = \bar{m}_{N_2air} + X_N (1 - X_{H_2O}) \left[ \frac{kg N_2}{kg pellets} \right] \quad [Ecuación 20]$$

$$\bar{m}_{N_2} = 25.026 + 0,037 (1 - 0,08) \left[ \frac{kg N_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{N_2} = 25.060 \left[ \frac{kg N_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2} = \bar{m}_{N_2air} \frac{\lambda - 1}{\lambda} \left[ \frac{kg O_2}{kg pellets} \right] \quad [Ecuación 21]$$

$$\bar{m}_{O_2} = 25.060 (1.5 - 1) \left[ \frac{kg O_2}{kg pellets} \right]$$

$$\bar{m}_{O_2} = 12.53 \left[ \frac{kg O_2}{kg pellets} \right]$$

Dónde:

$$M_{CO_2} = 44.00995$$

$$M_{H_2O} = 18.01534$$

$$M_{H_2} = 2.01594$$

$$M_{SO_2} = 64.0628$$

#### 6.1.2.2.7 Gases en Combustión

$$\bar{m}_{fg} = \bar{m}_{air} + 1 \text{ [Ecuación 22]}$$

$$\bar{m}_{fg} = 32.625 + 1$$

$$\bar{m}_{fg} = 33.625 \frac{Kg gases}{Kg pellets}$$

#### 6.1.2.2.8 Temperatura de ablandamiento

Se realizó un análisis para conocer la aproximación de la temperatura deseada de ablandamiento Toscano, Morales y Barriga (2014)

[Ecuación 23]

$$TA = 1.81 * X_{CaO} + 4.20 * X_{Al_2O_3} - 2.41 * X_{OK_2} + 5.31 * + 1017 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$TA = 1.81 * (1.8)(25.61) + 4.20 * (1.8)(8) - 2.41 * (1.8)(15.78) + 5.31 * (1.8)(4.69) + 1017 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$TA = 1.81 * (46,09) + 4.20 * (14.4) - 2.41 * (28.40) + 5.31 * (8.44) + 1017$$

$$TA = 1137.27 \text{ }^\circ\text{C}$$

Después de aplicar las ecuaciones anteriores evidenciamos que el error es 57°C equivalente a un porcentaje del 4 al 9% para la temperatura de ablandamiento.

#### 6.1.2.2.9 Temperatura adiabática

La temperatura adiabática de la llama es la temperatura que se alcanza en el punto más caliente de una llama sin tener en cuenta las pérdidas de calor hacia el entorno. Se asume el escenario en el cual no se realiza ningún trabajo mecánico y que la energía que se involucran en el trabajo es la energía interna y el trabajo de flujo. (Barrera y Ramírez, 2018).

$$T_{adiabatica\ de\ la\ llama} = T_{amb} + \frac{PCI}{\bar{m}_{FG} C_{e_{gc}}} \quad [Ecuación\ 24]$$

$T_{amb}$  = temperatura del aire a la entrada °K

$PCI$  = poder calorífico inferior de la madera  $\frac{Kj}{Kg}$

$\bar{m}_{FG} = \frac{Relacion\ de\ gases\ Kg_{gas\ combustible}}{combustibles\ Kpellets} = 8.93$

$C_{e_{gc}}$  = calor específico del gas de combustión, igual al del aire a 294K;  $(1.007 \frac{Kj}{Kg \cdot K})$

$$T_{adiabatica\ de\ la\ llama} = 298,15 + \frac{34.5485}{8.93 \cdot 1.207}$$

$$T_{adiabatica\ de\ la\ llama} = 955.664 \text{ °C}$$

Podemos observar que la temperatura es inferior a la de ablandamiento por lo tanto esta condición se debe cumplir para no fundir la ceniza, es por ello que debemos conseguir un lambda que permita ajustarse a la necesidad deseada para esto utilizamos despejamos las ecuaciones anteriores y se asume una temperatura adiabática menor a la utilizada inicialmente.

#### 6.1.2.2.10 Tiempo de Residencia

$$t_r = \frac{V_c}{\dot{m}_F \bar{m}_{FG}} \quad [\text{Ecuación 25}]$$

$t_r$  = tiempo de residencia

$V_c$  = volumen del hogar de la combustión [ $m^3$ ]

$\dot{m}_F$  = flujo de alimentación del combustible

$\bar{m}_{FG}$  = relación de gases/combustibles

Conociendo el volumen de la combustión  $V_c = 0,00012$ , posteriormente se asume el flujo del combustible  $\dot{m}_F = 1,265$  por lo cual obtenemos  $\bar{m}_{FG}$  [ecuación 26]

$$t_r = \frac{0,00012}{(1,265)(33.625)} \times 3600 = 0.10 \text{ s}$$

#### 6.1.3 Modelamiento del Intercambiador de Calor

Es necesario conocer las variables que intervienen en el proceso del intercambiador de calor además de los flujos masicos, los diferentes gases de la combustión y el aires para el secado del grano.

$$\dot{m}_h C_{p,h} T_{h,i} = q + \dot{m}_h C_{p,h} T_{h,o} + \rho_h V_h C_{p,h} \frac{dT_{h,o}}{dt} \quad [\text{Ecuación 27}]$$

Dónde:

$$\dot{m} = \text{Flujo másico} \left[ \frac{Kg}{s} \right]$$

$$C_p = \text{Es el calor específico a presión constante} \left[ \frac{Kj}{Kg.K} \right]$$

$$T_i = \text{Temperatura en la entrada} [K]$$

$$T_o = \text{Temperatura en la salida} [K]$$

$$q = \text{Razón de la variación de la transferencia de calor} \left[ \frac{Kj}{s} \right]$$

$$\rho = \text{densidad de flujo} \left[ \frac{kg}{m^2} \right]$$

$$\frac{dT_o}{dt} = \text{Variación de temperatura en el volumen de control} \left[ \frac{K}{s} \right]$$

Es así que podemos mencionar que:

- El valor obtenido a la entrada y salida es igual por lo tanto se estarían despreciando las pérdidas.
- Se asume de los fluidos son constantes al ocupar la totalidad del espacio, por lo tanto, el volumen de control también es constante.

### **6.1.3.1 Razón de cambio de la transferencia de calor $q$ .**

En un modelo de intercambiador de calor, el factor más relevante es el calor el cual nos permite conocer el comportamiento de las temperaturas en una gran variedad de materiales, además este debe obtener un cambio en la temperatura deseada utilizando una masa específica.

$$q = FUA_t (T_{h,o} - T_{c,o}) \quad [\text{Ecuación 28}]$$

$$F = \text{Factor de corrección} \quad [\text{adimensional de 0 a 1}]$$

$$U = \text{conductancia termica global} \left[ \frac{W}{m^2K} \right]$$

$A_t = \text{area de transferencia [m}^2\text{]}$

$T_{h,o} = \text{temperatura de entrada}$

$T_{c,o} = \text{temperatura de salida}$

Una cantidad positiva es la que se toma en razón del cambio de calor y este siempre se manifiesta de caliente a frío teniendo en cuenta la segunda ley de la termodinámica.

#### 6.1.3.1.1 Factor de corrección $F$

El factor de corrección se define como una desviación de que tanto varia la temperatura, por lo tanto, si tenemos dos fluidos que con el tiempo van cambiando estas condiciones no se podrán asumir a las del flujo en contra de la corriente por lo cual se determina como flujo cruzado.

En la investigación de Cengel et al., (2012) para hallar un factor de corrección se encuentra con las relaciones en la variación de las temperaturas en la entrada y salida resultando las razones  $P$  y  $R$ , la eficiencia del intercambiador al costado frío y la tasa de variación de la temperatura es la capacidad de respuesta del calor, y son las que veremos a continuación en las dos ecuaciones:

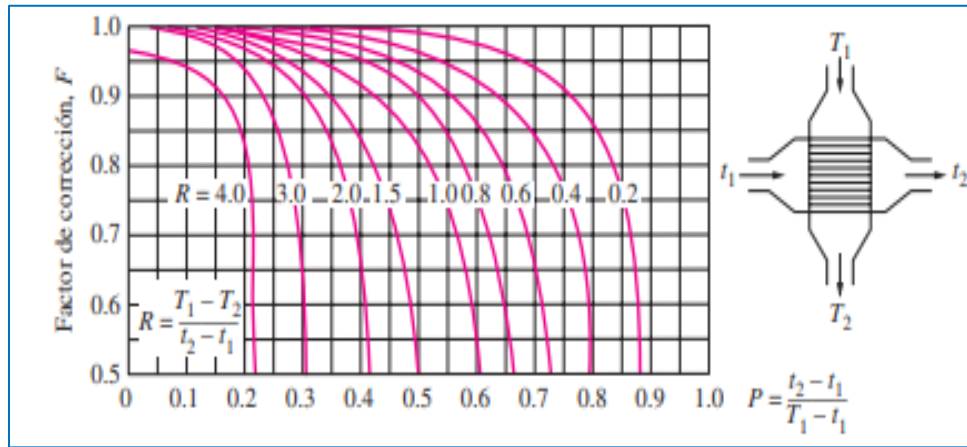
$$P = \frac{T_{c,o} - T_{c,i}}{T_{h,i} - T_{c,i}} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{max}} \quad [\text{Ecuación 29}]$$

$$R = \frac{C_c}{C_h} = \frac{T_{h,i} - T_{h,o}}{T_{c,o} - T_{c,i}} \quad [\text{Ecuación 30}]$$

En la siguiente grafica podemos hallar los factores de corrección teniendo en cuenta los parámetros mencionados anteriormente.



**Figura 5.** Grafica del factor de corrección con flujo cruzado de un solo paso



### 6.1.3.1.2 Conductancia Térmica Global U.

El termino hace referencia a una transferencia de calor medida a través de los diferentes materiales, es por eso que medimos en un tiempo determinado la cantidad de calor que se transfiere. Durante el proceso se utilizan la suma de las conductancias es por ello que en la ecuación 28 estas se representan en función de los radios de tuberías.

$$U = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i h_i} + \frac{r_o}{r_i} R_{fi} + \frac{r_o \ln(r_o/r_i)}{k} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}} \quad [\text{Ecuación 31}]$$

Dónde:

$r_o =$  Radio externo en tubos [m]

$r_i =$  Radio interno en tubos [m]

$h_i =$  Coeficiente de conveccion de fluido interno ( gases de combustión)  $\left[ \frac{w}{m^2} \right]$

$R_{fi} =$  Factor de suciedad en el fluido interno ( gases de combustión)  $\left[ \frac{m^2 w}{m^2} \right]$

$k =$  Coeficiente en la conduccion del material del tubo  $\left[ \frac{w}{m \cdot k} \right]$

$R_{fo} =$  Factor de ensuciamiento del fluido externo  $\left[ \frac{m^2 w}{m^2} \right]$

$h_o =$  coeficiente de conveccion del fluido externo (aire)  $\left[ \frac{w}{m^2} \right]$

### 6.1.3.1.3 Numero de Reynolds ( $Re$ )

Viscosidad cinemática a 60 °C es aquella temperatura de salida.

Para determinar si tenemos un flujo turbulento o laminar aplicamos la siguiente formula

$$R_e = \frac{V * D * \rho}{\vartheta} \quad [ \text{Ecuación 32} ]$$

$v =$  velocidad media del flujo  $\frac{m}{s}$

$\vartheta =$  viscosidad cinematica  $\frac{m^2}{s}$

$D =$  diametro del tubo  $m$

$\rho =$  densidad del fluido

$$R_e = \frac{(1,1792)(3,57)(0,025)}{0.000037}$$

$$R_e = 2844.4$$

6.1.3.1.4 Ecuación de Colebrook

Donde K = a la rugosidad absoluta del cobre 0.000002

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2\log\left(\frac{k}{3.1710 \cdot D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \quad [\text{Ecuación 33}]$$

$$f = \left( \frac{1}{-2\log\left(\frac{k}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right)^2} \right)$$

$$f = \left( \frac{1}{-2\log\left(\frac{0.000002}{3,7} + \frac{2,51}{51136.36\sqrt{f}}\right)^2} \right)$$

$$f = 0,01978$$

6.1.3.1.5 Coeficiente de Convección Interno  $h_i$

Existen zonas de densidad variable en las cuales encontramos zonas frías que son aquellas mas densas y zonas mas calientes que son menos densas lo que lleva a que hallar un movimiento o desplazamiento de fluidos.

Por lo que se puede definir convección como el movimiento de calor en diversas zonas teniendo en cuenta la variación de las temperaturas, Es así como se describe la convección utilizando la siguiente ecuación:

$$h_i = \frac{N_u k}{d_i} \quad [\text{Ecuación 34}]$$

El número de Nusselt se obtiene de los flujos desarrollados al interior de la tubería como lo exponen (Pinto y Rodríguez, 2022).

$$N_u = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

Válida para:  $\frac{L}{d} > 10$ ;  $0.5 < Pr < 2000$ ;  $3000 < Re < 10^6$

$$N_u = \frac{\left(\frac{0,01978}{8}\right) (2844.4 - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{2844.4}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

#### 6.1.3.1.6 Coeficiente externo de convección $h_o$

A partir de la siguiente ecuación obtenemos el coeficiente de convección en el exterior.

$$h_o = \frac{N_u k}{d_e} \quad [\text{Ecuación 35}]$$

$$v_{\max} = \frac{v \cdot S_T}{(S_T - d_e)} \quad [\text{Ecuación 36}]$$

$$v_{\max} = \frac{3.57 * 0,058}{(0,058 - 0,0254)}$$

$$v_{\max} = 6.281 \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$N_u = 0,27(1) \cdot 2844 \cdot 4^{0,63} \cdot 0,706^{0,36} \cdot \left(\frac{0,0706}{0,72}\right)^{0,25} \quad [ \text{Ecuación 37} ]$$

$$N_u = 19.99$$

$$h_o = \frac{19.99 \cdot 0.02675}{0.0213}$$

$$h_o = 25.057 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

### 6.1.3.2 Coeficiente de convección interno $h_i$

$$h_i = \frac{N_u k}{d_i} \quad [ \text{Ecuación 38} ]$$

$$h_i = \frac{19.99 \cdot 0.02675}{0.0161}$$

$$h_i = 33.213 \frac{W}{m^2}$$

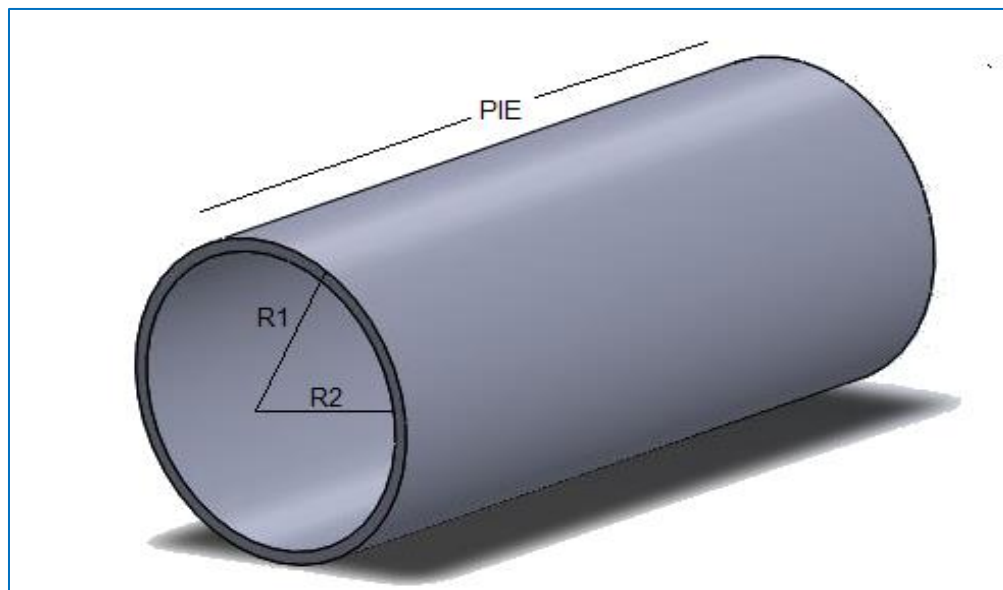
Entonces decimos que  $d_e$  representa el diámetro externo de los tubos en el intercambiador de calor

#### 6.1.4 Pérdidas de Calor en Tuberías (conducción a través del sólido)

Serna (2020) en su estudio afirma que el mayor de los problemas se da cuando en un material de acero viaja un flujo caliente perdiendo energía la cual es directamente proporcional a la pérdida de calor. Existen mecanismos de transferencia de calor en los cuales encontramos aquellos como la convección:

La Convección, se da cuando asumimos que la temperatura en el interior de la tubería es igual a la temperatura en la pared del tubo  $T_i = T_1$ .

**Figura 6.** *Tubo de Aire a la Entrada ( SolidWorks )*



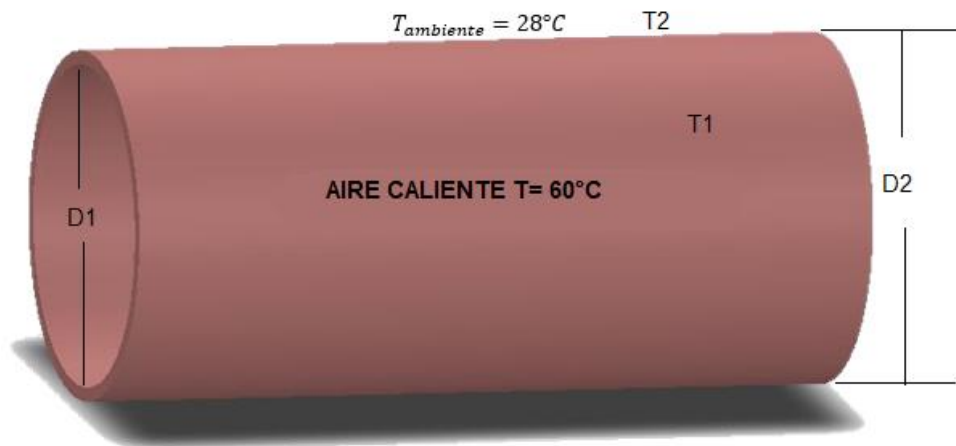
Fuente: Autores del Proyecto

Representa la conducción a través de un material sólido, es decir a través de toda la pared circundante del tubo:

$$D_2 = 2 R_2$$

$$Q = \frac{2\pi k (T_1 - T_2)}{2,3 \log \frac{D_2}{D_1}} \quad [Ecuación 39]$$

**Figura 7.** Tubo de salida de aire ( SolidWorks )



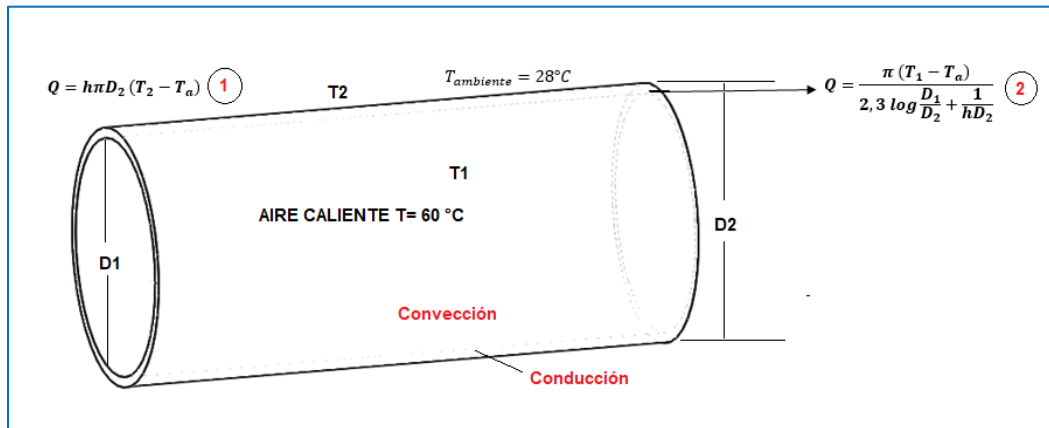
Fuente: Autores del Proyecto

Es por ello que analizando lo anterior podemos decir que en la parte externa del tubo se obtienen fenómenos de convección y radiación combinados

$$Q = h\pi D_2 (T_2 - T_a) \quad [ Ecuación 40 ]$$

Podemos decir que h= es el coeficiente convectivo del aire (el cual lo hallamos utilizando las tablas)

**Figura 8.** Tubo en SolidWorks convección y conducción



Fuente: Autores del Proyecto

Entonces despejamos  $T_2$  de la ecuación numero 1 y de la ecuación numero 2

Después Igualamos  $T_2$  de la ecuación numero 1 =  $T_2$  ecuación 2

#### 6.1.4.1 Calculo de calor perdido

$$Q = \frac{\pi (T_1 - T_a)}{\frac{2.3}{2k} \log \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{hD_2}} \quad [\text{Ecuación 41}]$$

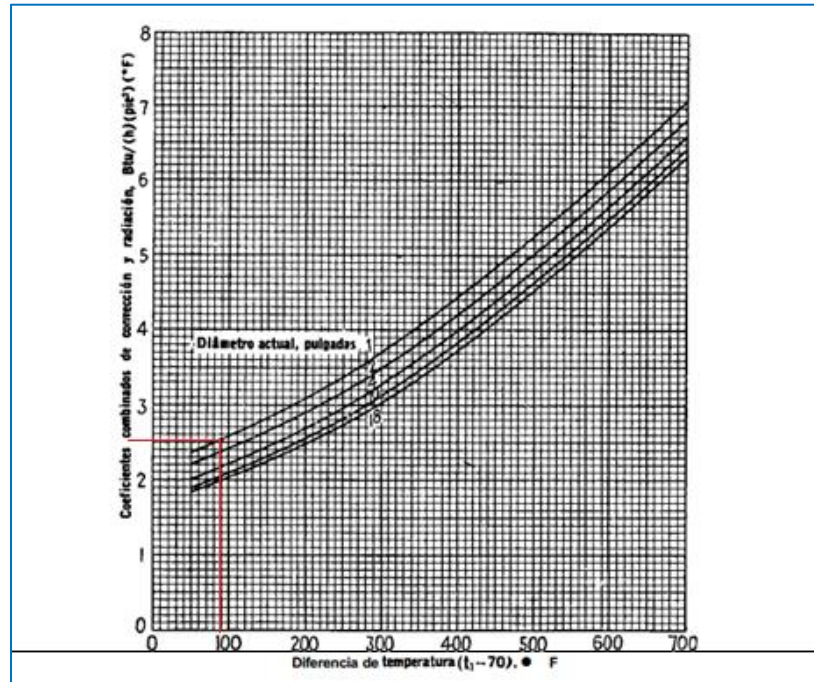
$$T_2 = 58$$

$$T_2 = 59.99 - 28 = 31.99 \approx 89.58^\circ F$$

Para hallar la h utilizamos la temperatura antes mencionada teniendo en cuenta el diámetro del tubo en pulgadas



**Figura 9.** Transferencia de calor por convección y radiación de tubos a temperatura



$$h = 2,5 \text{ BTU/h pie}^2$$

$$k = 97.13 \text{ Btu/h conductividad térmica del acero}$$

Para hallar Q utilizamos los datos para ser reemplazados en la ecuación (39)

**Para tener en cuenta:** el diámetro exterior de 2,54 pulgadas es (D2) y el espesor de la pared de 0,24 pulgadas, es así como  $D1 = 2,54 - 2 * 0,24 = 2.06$  pulgadas.

$$Q = \frac{3.1415 (60 - 28)}{\frac{2,3}{2(220)} \log \left( \frac{2,54}{2.06} \right) + \frac{1}{(2,5) * \frac{2,54}{12}}}$$

$$Q = 53,18 \text{ BTU/h}$$

En la siguiente ecuación se reemplaza la Q

$$53.18 = \frac{2 (3.1415) * (220) * (60 - T_2)}{2,3 \log \frac{2,54}{2,06}}$$

$$T_2 = 59.99 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Una vez finalizado todo el proceso, T2 se establece en 59.99 °C y el calor que se pierde es  $Q = 53,18$  BTU/h.

El calor perdido es 53,18 BTU/h y la temperatura estabilizada en 59 aproximadamente.

### **6.1.5 Perdida de Energía en Accesorios**

Usamos la ecuación (42) para obtener las pérdidas de energía a la entrada

#### **4.5.1 Perdidas en la Entrada.**

$$h_E = k \left( \frac{v_E^2}{2g} \right) \quad [\text{Ecuación 42}]$$

K= 0,78 es el valor de entrada con proyeccion

$$h_E = 0,78 \left( \frac{3,6^2}{2(9,81)} \right)$$

$$h_E = 0,515$$

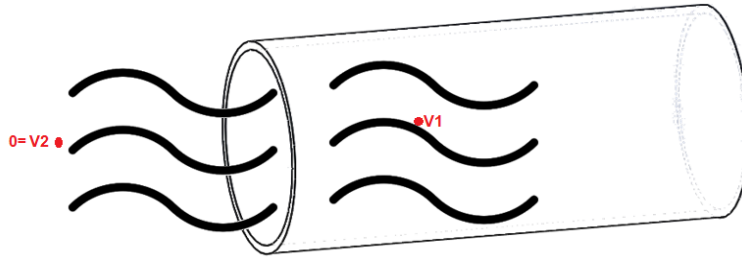
#### **6.1.5.2 Perdidas en la Salida.**

$$h_s = k \left( \frac{v_s^2}{2g} \right) \quad [\text{Ecuación 43}]$$

K=1 siempre y cuando la velocidad a la salida sea muy cercana a cero

$$h_s = 1 \left( \frac{3,5^2}{2(9,81)} \right)$$

$$h_s = 0,624$$



### 6.1.5.3 Caudal a la Salida.

$$V_2 = \frac{Q_2}{A} \quad [ \text{Ecuación 44} ]$$

$$V_2 = \left( \frac{4 * Q_2}{\pi D^2} \right)$$

$$3,87 = \frac{4 * Q_2}{\pi (0,025)^2}$$

$$Q_2 = 0,001901 \frac{m^3}{h}$$

## 6.2 Balance General

Previamente a los resultados hay que tener presente que en las ecuaciones de balance, es la conservación de la energía como lo fundamenta este principio

El principio fundamental nos determina que la rapidez con la que ingresa la energía al sistema, escatimando la velocidad que emerge del sistema, más la rapidez de inyección del calor, más la rapidez del trabajo que entra o sale del proceso, es igual al total de energía en el sistema.

Para ello utilizamos la siguiente ecuación donde la despejamos:

$$Q = \dot{m}_c C_{p,c} (T_{h,o} - T_{c,i}) = \dot{m}_h C_{p,h} (T_{h,o} - T_{h,i}) \quad [\text{Ecuación 45}]$$

### 6.2.1 Distribución de Aire Primario y Secundario

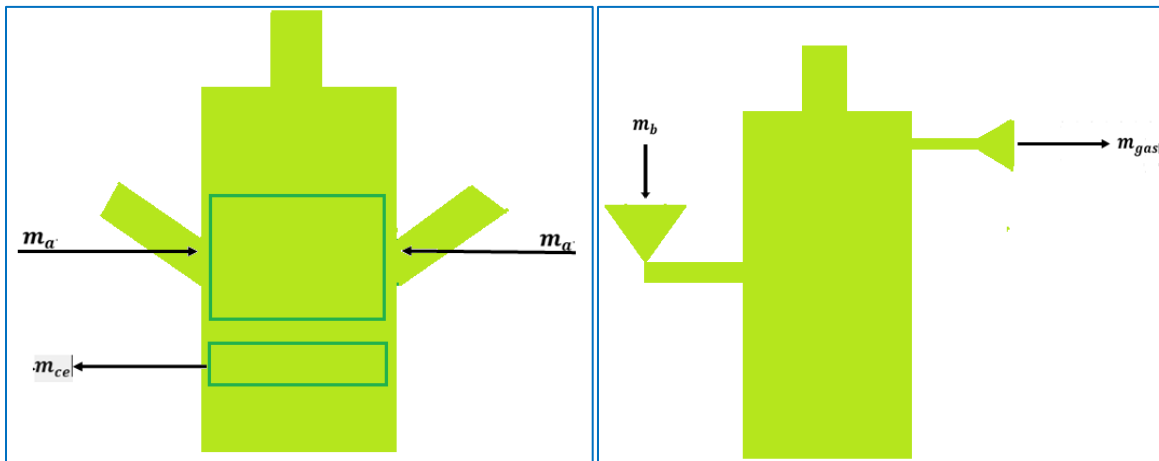
El aire se distribuye teniendo presente lo siguiente:

$$\bar{m}_{a1} = \frac{\% \text{ aire primario} \cdot \bar{m}_{air}}{\lambda} \quad [\text{Ecuación 46}]$$

$$\bar{m}_{a2} = \bar{m}_{air} - \bar{m}_{a1} \quad [\text{Ecuación 47}]$$

### 6.2.2 Balance Energético

**Figura 10.** Balance energético



Fuente: Autores del Proyecto

$$m_{ce} = \text{flujo masico de ceniza} \frac{kg}{s}$$

$$m_a = \text{flujo masico de aire} \frac{kg}{s}$$

$$m_{gas} = \text{flujo masico gas} \frac{kg}{s}$$

$$m_b = \text{flujo masico biomasa} \frac{kg}{s}$$

$$m_b + 2m_a = m_{gas} + m_{ce} \quad [\text{Ecuación 48}]$$

La relación de flujo viene dada por:

$$R_a = \frac{v_1}{v_2} \cdot 100 \quad [\text{Ecuación 49}]$$

$v_1 =$  flujo de aire a la entrada (combustión)

$v_2 =$  flujo de aire a la entrada (tubería)

### 6.2.2.1 Flujo Másico del Aire.

$$m_a = \text{flujo masico de aire} \frac{kg}{s}$$

con los datos tomados anteriormente hallamos el flujo masico



$$\dot{m} = e\hat{v} \quad [\text{Ecuación 48}]$$

$$\dot{m} = \frac{\text{masa}}{t} \quad [\text{Ecuación 49}]$$

$$\hat{v} = 3.5 \frac{m}{s}$$

$$\delta = 1.2041 \frac{kg}{m^3}$$

$$\dot{m}_a = 0.0019(1.2041)$$

$$\dot{m}_a = 2.287 \times 10^{-3} \frac{kg}{s}$$

### 6.2.2.2 Flujo Másico de la Biomasa.

$$m_b = \text{flujo masico biomasa} \frac{kg}{s}$$

$$m_b = \frac{\text{masa de biomasa (kg)}}{\text{tiempo(h)}} \quad [\text{Ecuación 50}]$$

$$m_b = \frac{2 * (kg)}{2 * (h)}$$

$$m_b = 1 \frac{kg}{h}$$

### 6.2.2.3 Flujo másico de la Ceniza.

$$m_{ce} = \text{flujo masico de aire} \frac{kg}{s}$$

$$m_{ce} = \frac{\text{masa de ceniza (kg)}}{\text{tiempo (h)}} \quad [\text{Ecuación 51}]$$

$$m_{ce} = \frac{0,25 (kg)}{2(h)}$$

$$m_{ce} = 0.125 \frac{kg}{h}$$

#### 6.2.2.4 Flujo Másico del Gas.

$$m_{gas} = \text{flujo masico gas} \frac{kg}{s}$$

$$m_{gas} = m_a + m_b - m_{ce} \quad [\text{Ecuación 52}]$$

$$m_{gas} = 2.287 \times 10^{-3} \frac{kg}{s} + 1 \frac{kg}{h} - 0,125 \frac{kg}{h}$$

$$m_{gas} = 0.877 \frac{kg}{h}$$

### 6.3 Controlador

#### 6.3.1 Espacio de Estados

Con el objetivo de realizar una comparación en busca de hallar un mejor rendimiento en los procesos se ha optado desarrollar dos controladores PID. Para ellos se obtuvieron las expresiones en espacio de estados.

$$\frac{dx}{dt} = Ax(t) + Bu(t) + Ke(t) \quad [\text{Ecuación 53}]$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + e(t) \quad [\text{Ecuación 54}]$$

A continuación, veremos las matrices asociada a la caja negra

$$A = \begin{bmatrix} x1 & x2 \\ 1.379e - 05 & 0.002162 \\ -0.0009549 & -0.003329 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} Pellets G & Frecuencia \\ 7.36e - 08 & -4.689e - 10 \\ -1.655e - 07 & -5.704e - 09 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} PelletsG & Frecuencia \\ -219.4 & -1.548 \end{bmatrix}$$

$$D =$$

$$D = \begin{bmatrix} PelletsG & Frecuencia \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} TemperaturaS \\ -0.0003906 \\ -0.001817 \end{bmatrix}$$

### 6.3.2 Modelo Caja Gris

La combinación de los sistemas entre caja blanca y caja negra nos dará como resultado la caja gris, para ello debemos tener presente que el modelo de caja negra se obtiene en base a las pruebas realizadas, es así como la combinación de ambas busca un control más óptimo en la operación.

**Figura 11.** Ecuaciones del Sistema Caja Blanca

$$\begin{aligned} \text{Eq1} &= \\ T_h &= T_a + \frac{\text{LHV } \dot{m}_f t_f}{C_{pg} V_c \rho_{FG}} \\ \text{Eq2} &= C_{ph} T_h \dot{m}_h = q + C_{ph} T_o \dot{m}_h + C_{ph} \dot{T}_h V_h \rho_h \\ \text{Eq3} &= q = -A_t F U (T_{am} - T_o) \\ \text{Eqestado} &= \\ &= \frac{C_{ph} T_o \dot{m}_h - C_{ph} \dot{m}_h \left( T_a + \frac{\text{LHV } \dot{m}_f t_f}{C_{pg} V_c \rho_{FG}} \right) + A_t F U (T_{am} - T_o)}{C_{ph} V_h \rho_h} \end{aligned}$$

Es necesario conocer que en las pruebas se deberá ajustar los parámetros definidos previamente con un margen de tolerancia para realizar los cambios que se requieran.



**Figura 12.** *Definición de Parámetros*

```
LHV = 14.0053
t_r = -0.1591
rho_FG = 4.6424
V_c = -6.2830
T_a = 947.8233
T_am = 149.4300
F = 1.6411
U = 31.7910
A_t = 1.7432
C_pg = 4.6033
C_ph = 19.4280
V_h = 101.8530
rho_h = 101.8530
dt_hi =
9.64e-5 T_o \dot{m}_h - 4.51e-4 T_o - 9.64e-5 \dot{m}_h (0.0166 \dot{m}_f + 948.0)
```

Fuente: Autores del Proyecto

Realizando los pasos anteriores obtenemos las matrices del sistema

**Figura 13.** *Matrices del Sistema*

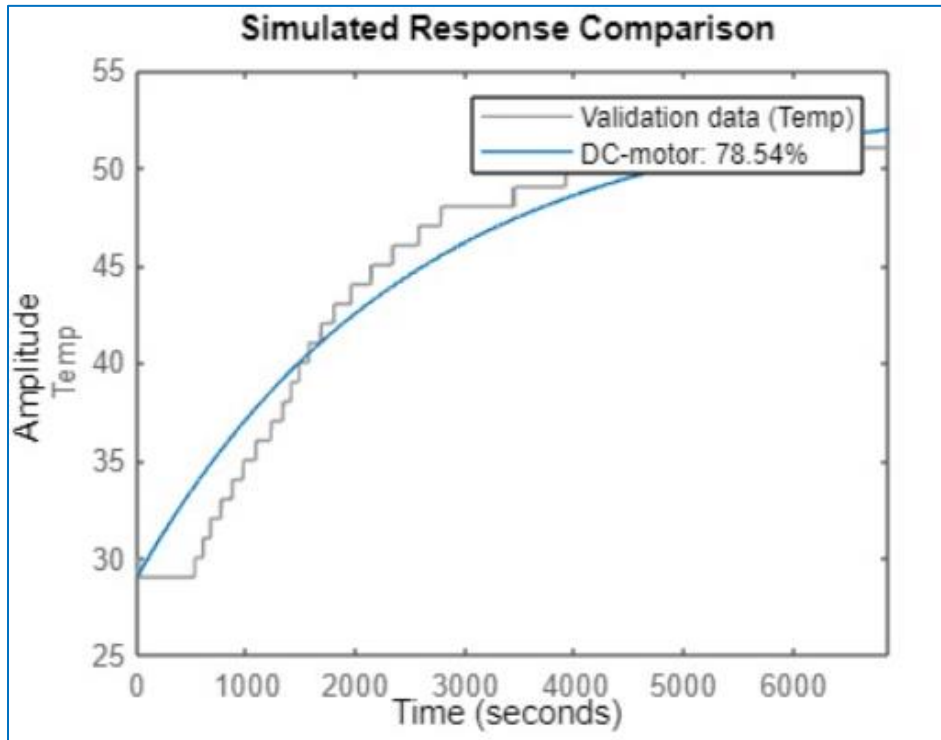
```
A =
      x1
x1  -0.0004511

B =
      u1      u2
x1  1.6e-09  0.08558

C =
      x1
y1  1

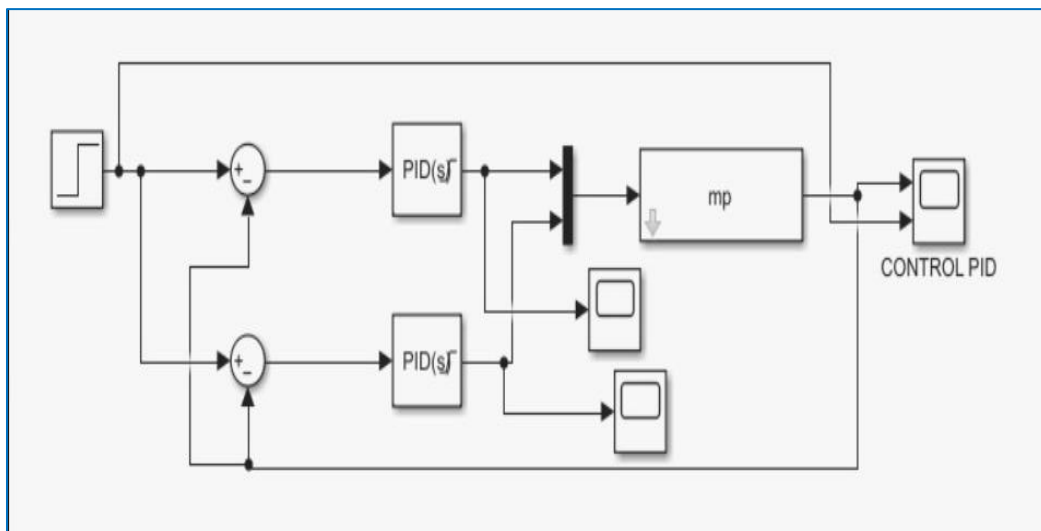
D =
      u1  u2
y1  0    0
```

**Figura 14.** Comparación de similitud de respuesta del sistema



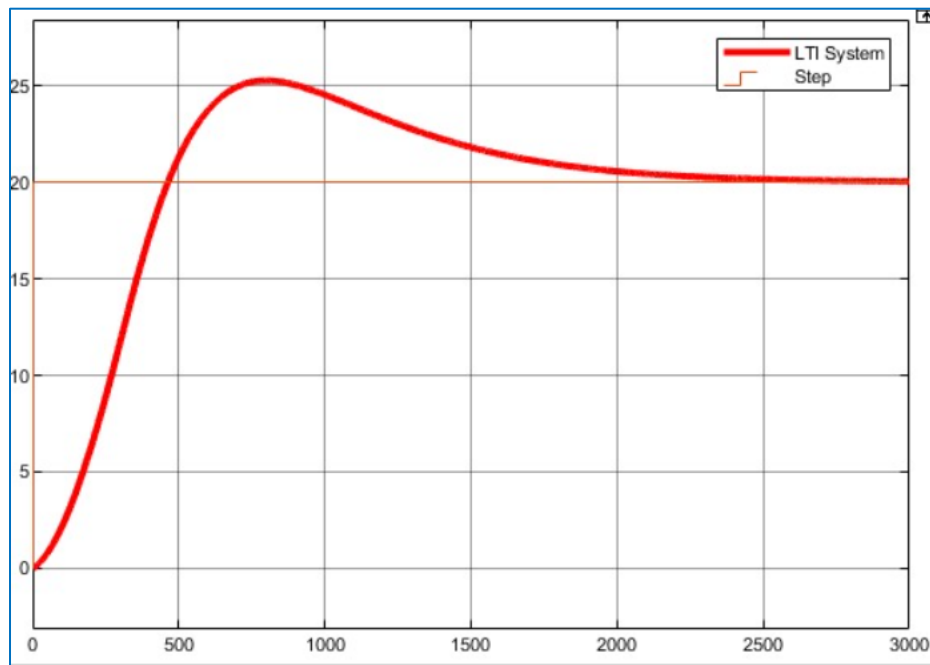
Fuente: Autores del Proyecto

**Figura 15.** Control PID



Fuente: Autores del Proyecto

**Figura 16.** *Respuesta transitoria del Controlador en el Step*



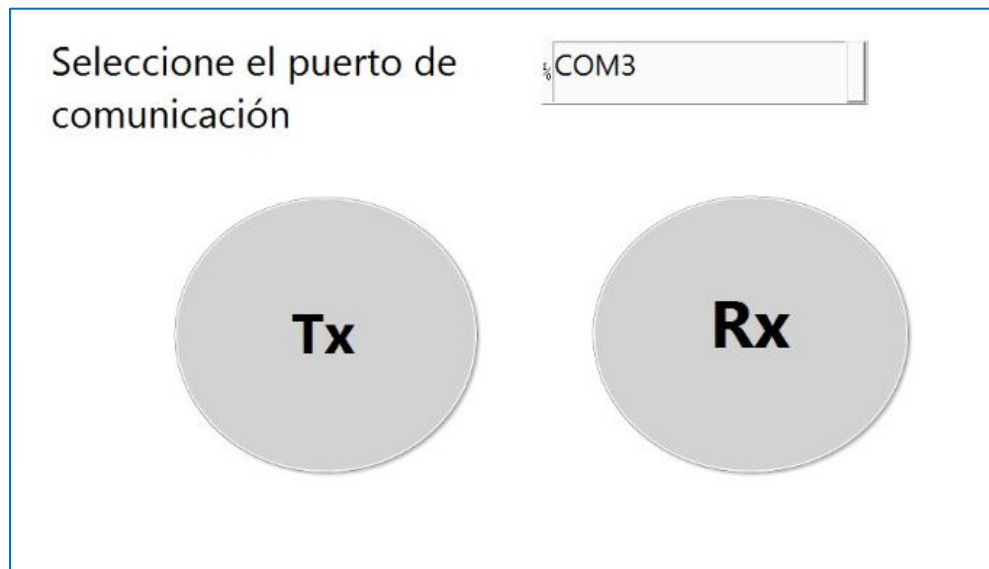
Fuente: Autores del Proyecto

Al usar el software Matlab y con los datos obtenidos y procesados con la herramienta iddnt nos arrojó un resultado del 79,07% para la respuesta al controlador

#### **6.4 Interfaz HMI**

Se diseño la interfaz con un total de cuatro ventanas en donde la primera de ellas debemos seleccionar el puerto de comunicación al cual estará conector el arduino para iniciar la comunicación y trasmisión de datos seleccionando el tipo de comunicación.

**Figura 17.** *Selección de Puerto Arduino*



Fuente: Autores del Proyecto

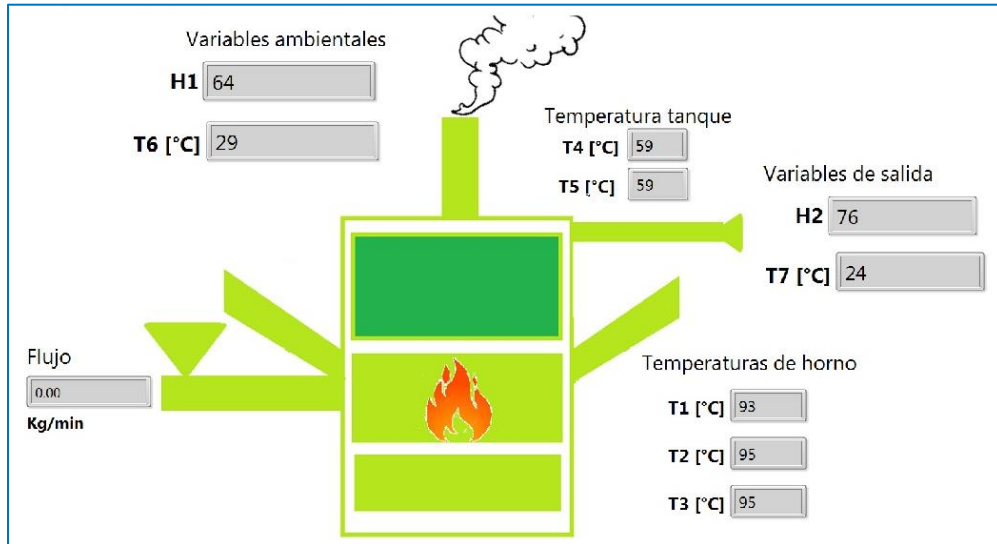
En la segunda pantalla donde se encuentra el título de nombre del archivo ubicamos el archivo donde posteriormente guardaremos los datos registrados en un tiempo establecido en la parte inferior. Se deberá tener presente que el tiempo ingresado debe darse en minutos.

**Figura 18.** *Selección de Tiempo Almacenamiento de Datos*



Fuente: Autores del Proyecto

**Figura 19.** Visualización de variables del proceso



Fuente: Autores del Proyecto

En la figura anterior encontramos el espacio donde visualizaremos todas las variables de temperaturas y su ubicación dentro del sistema para realizar el seguimiento constante. Y por último observamos la ventana donde podremos manejar el sistema de forma manual.

**Figura 20.** Ventana para selección de producto y velocidad de coolers modo manual



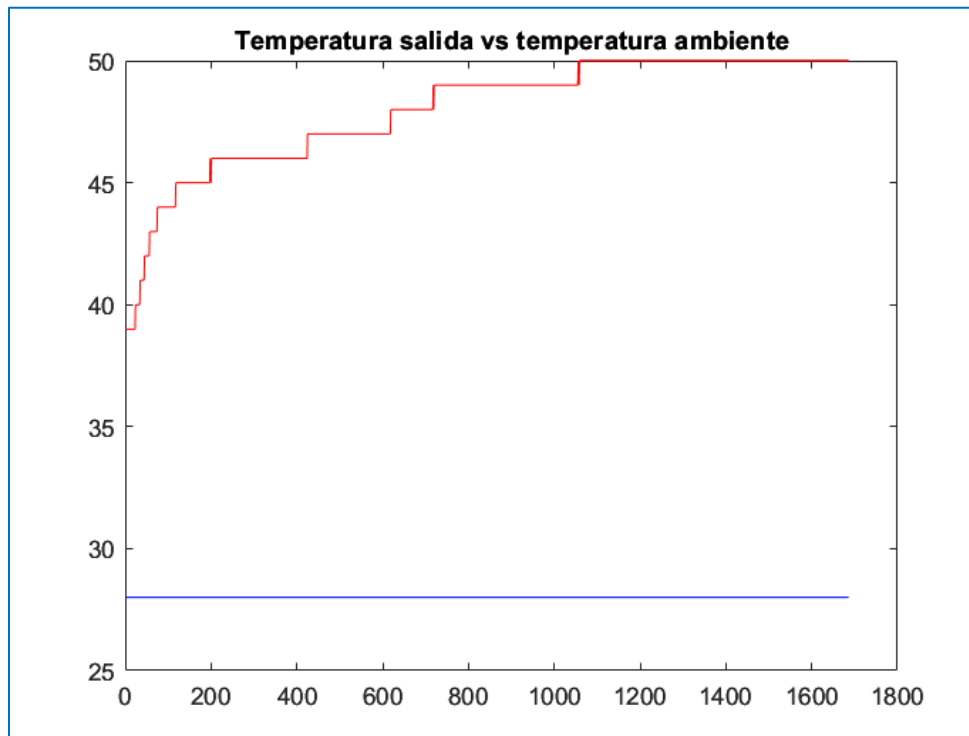
Fuente: Autores del Proyecto

## 6.5 Validación

Como finalidad del proyecto es importante recalcar que el monitoreo constante de la temperatura y humedad es el objetivo principal de la investigación, es así como garantizamos que estos parámetros se encuentren en los rangos deseados para no afectar las propiedades de calidad del cacao manteniendo unos rangos de temperatura entre 50 y 60 °C que el controlador garantizara en el tiempo de operación.

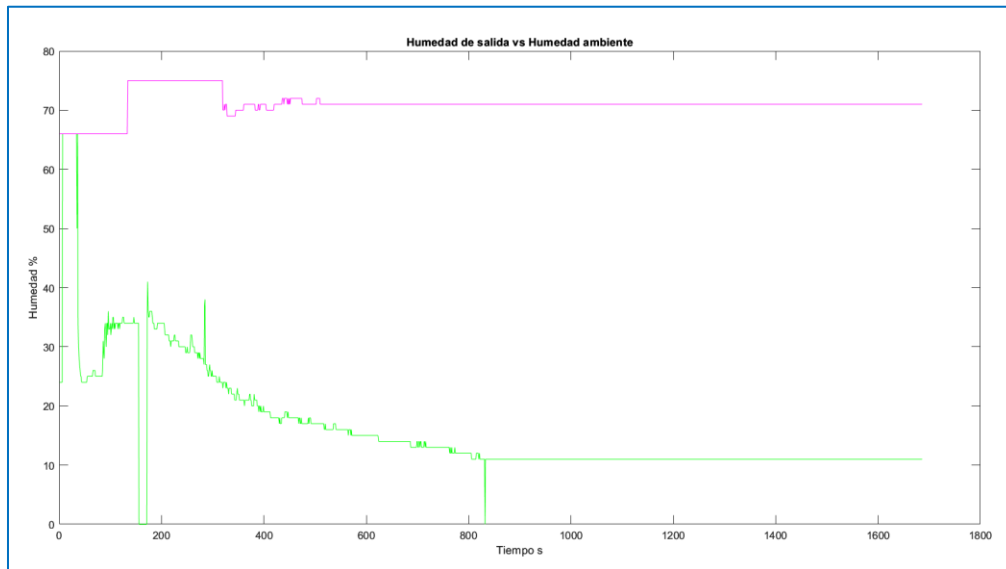
La validación de la información se obtiene ajustando las variables que intervienen en el proceso para lo cual utilizamos un setpoint de 50°C en el cual estos datos están asociados el horno de combustión. Es de aclarar que no se conto con los datos del secador por lo cual no se pudo verificar las variables de temperatura y humedad en la salida.

**Figura 21.** Prueba controlador temperatura setpoint 50°C



Fuente: Autores del Proyecto

**Figura 22.** Prueba controlador humedad setpoint 50°C



Fuente: Autores del Proyecto

Como objetivo del controlador es garantizar la temperatura a la salida y así evitar que el grano de cacao se seque por las diferentes temperaturas que se puedan presentar durante el proceso. Si observamos en la grafica de temperatura comparamos las temperaturas de salida con respecto a la del ambiente presentando variaciones debido a las oscilaciones que generan los vientos a la entrada a causa de la inyección de aire frio.

Para la gráfica de humedad observamos que es contraria a la de la temperatura dado que a medida que aumenta la temperatura la humedad disminuye, y así garantizar las condiciones ideales en la humedad del grano del cacao.

## 7. Conclusiones

- Con el desarrollo del proyecto se concluye que, aunque se diseñaron dos controladores PID y modos deslizantes, el controlador PID por el tiempo de establecimiento es la mejor opción ya que se estabiliza en 20 minutos, presentado una variación en las oscilaciones antes de que se estabilice además este proceso en un poco variable en el tiempo dado la inyección de aire y la alimentación de los pellets
- Se concluye con este proyecto, que los pellets afecta de manera directa la combustión debido a su humedad por lo cual es necesario hacerle un precalentamiento al horno a fin de evaporar toda la humedad y garantizar las condiciones iniciales del proceso.
- Finalmente, manifestamos que el sistema simulado vs el modelado nos enseña que existe una diferencia entre ambos dado a las perturbaciones que encontramos en el sistema debido a la biomasa y el proceso de combustión las cuales afectan directamente las condiciones iniciales del proceso.



## 8. Recomendaciones

- Una de las recomendaciones que damos al momento de la operación del sistema sería tratar de utilizar un sistema de extracción para garantizar el enfriamiento dentro del horno para garantizar la seguridad evacuando los gases que se puedan presentar por la combustión además de garantizar tener una temperatura inicial estable.
- Además se recomienda a la Línea de Investigación de Instrumentación y Control de la Universidad Antonio Nariño, trabajar este tipo de proyectos debido a que puede beneficiar a usuarios directos como lo son los campesinos, los cultivadores de cacao e interesados en el tema, tales como Ingenieros Agroindustriales, Ingenieros Electrónicos, entre otros.

## Referencias Bibliográficas

- [1] Picuino, A. (2020). Controlador PID y Control Automático. Arduprog. Recuperado de: <https://www.picuino.com/es/arduprog/control-pid.html>
- [2] Villajulca, J. (2020). Control ON/OFF o Todo/Nada. Instrumentación y Control. Recuperado de: <https://instrumentacionycontrol.net/control-on-off-o-todo-nada>
- [3] Barrera, J. y Ramírez, N. (2018). Combustión de biomasa: conceptos, tecnologías y aplicaciones en la agroindustria de la palma de aceite. Vol. 39, núm. 4, p. 24. Recuperado de: <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/12709/12613/>
- [4] Ortega, H. (2018). Horno pirolítico móvil de laboratorio para la obtención de biochar a partir de residuos de biomasa vegetal colombiana. Universidad Industrial de Santander UIS. Recuperado de: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2018/172725.pdf>
- [5] Compañía Nacional de Chocolates. (2019). Cosecha, beneficio y calidad del grano de cacao. Theobroma del cacao. Bogotá, Colombia.
- [6] Fedecacao. (2015). Así quedó el ranking de producción de cacao en Colombia. Recuperado de: <http://www.fedecacao.com.co/portal/index.php/es/2015-04-23-20-00-33/1193-boletin-de-prensa-asi-queda-el-ranking-de-produccion-de-cacao-en-colombia>
- [7] Finagro. (2018). Inteligencia de mercado: Cacao. Volumen II, pág. 16. Recuperado de: [https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basicpage/files/ficha\\_cacao\\_version\\_ii.pdf](https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basicpage/files/ficha_cacao_version_ii.pdf)
- [8] Acosta, E., Palencia, J., Arriaga, A. y Trujillo, C. (2010). Diseño y construcción de un prototipo de cocina que utilice biomasa como combustible, p. 127.
- [9] Czech et al. (2018). Chemical composition and speciation of particulate organic matter from modern residential small-scale wood combustion appliances. Science Total Environ., vol. 612, pp. 636–648. Recuperado de: 10.1016/j.scitotenv.2017.08.263
- [10] Parra, P. (2018). Secado Artificial De Cacao. Estado Del Arte. Universidad Politécnica Salesiana. Recuperado de: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10984>

- [11] Manrique, R, (2018). Estudio de Combustión de Pellet de Cisco de Café. Medellín.
- [12] Endesa. (2020) ¿Qué es la biomasa? Centrales de energía de la biomasa. Recuperado de: <https://www.fundacionendesa.org/es/centrales-renovables/a201908-central-de-biomasa>
- [13] Pinto, J. y Rodríguez, O. (2022). Estudio de la eficiencia de una cámara de combustión para biomasa densificada (pellets), aplicando control en la alimentación del combustible y extracción de ceniza, comparando el poder calorífico experimental con el obtenido en equipo especializado [Trabajo de grado]. Unidades Tecnológicas de Santander.
- [14] Saldias, A. (2020). Tipos de Sensores de Temperatura. Recuperado de: <https://srcsl.com/tipos-sensores-temperatura/>
- [15] Serna, P. (2019). Perdidas de calor a través de tuberías. Slideshare.net. Recuperado de: [https://es.slideshare.net/GUSTAVOLSP/perdidas-de-calor-a-traves-detuberias?from\\_action=](https://es.slideshare.net/GUSTAVOLSP/perdidas-de-calor-a-traves-detuberias?from_action=)
- [16] Torres, R., Miranda, P. y Martínez, K. (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. Revista Tecnológicas, vol. 20, no. 39, pp. 69–81.