



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ANÁLISIS TÉRMICO DE UN GASIFICADOR TIPO  
DOWNDRAFT AL COMBUSTIONAR RESIDUOS FORESTALES”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: TRABAJO EXPERIMENTAL**

**Presentado para optar al grado académico de:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**AUTOR: RAÚL GERMAN HERRERA PÉREZ**

**DIRECTOR: Msc. LENNIN SANTIAGO OROZCO CANTOS**

**RIOBAMBA – ECUADOR**

**2019**

© 2019, Raúl German Herrera Pérez

Se autoriza la reproducción total o parcial con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Yo, Raúl German Herrera Pérez, declaro que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autor, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 23 de julio de 2019

**Raúl German Herrera Pérez**

Cédula de Identidad: 050248916-4

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERIA MECÁNICA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

El Tribunal de titulación certifica que: El trabajo de titulación Tipo: Trabajo Experimental, **ANÁLISIS TÉRMICO DE UN GASIFICADOR TIPO “DOWNDRAFT” AL COMBUSTIONAR RESIDUOS FORESTALES**, realizado por el señor: **RAÚL GERMAN HERRERA PÉREZ**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Msc. Edwin Fernando Viteri Núñez <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>	 _____	<u>2019-09-03</u>
Ing. Lenin Santiago Orozco Cantos <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACION</b>	 _____	<u>2019-09-03</u>
Ing. Miguel Ángel Pérez Bayas <b>MIEMBRO DEL TRIBUNAL</b>	 _____	<u>2019-09-03</u>

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de titulación va dedicado a mi Madre Lic. Elsa Livia Pérez Jácome, por su apoyo y amor incondicional durante todo este tiempo, por las fuerzas que me dio, por cada consejo por sus palabras porque sin ella no hubiera logrado esta etapa de mi formación profesional.

A mi tío Germanio Pérez que estuvo en cada momento difícil, por cada enseñanza, que me ayudo a seguir adelante sin desmayar en este largo camino, por su ejemplo de trabajo duro, me lleno de valores, ética e integridad.

**Raúl German Herrera Pérez**

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente mi agradecimiento a Dios por haberme dado las fuerzas para continuar en este largo camino por ser mi guía en mi vida y mi aliento.

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela de Ingeniería Mecánica quien me impartió los conocimientos para una formación profesional con excelencia académica y humana.

De una manera especial a mis familiares, profesores y amigos quienes estuvieron en cada etapa de este camino y fueron la guía para culminar exitosamente mi formación profesional.

**Raúl German Herrera Pérez**

## TABLA DE CONTENIDO

INDICE DE TABLAS.....	xiii
INDICE DE FIGURAS.....	xiv
INDICE DE GRÁFICOS.....	xvi
INDICE DE ANEXOS.....	xvii
RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix

### CAPITULO I

<b>1. MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Formulación del problema.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.3.1. <i>Justificación Práctica</i> .....	2
1.3.2. <i>Justificación Teórica</i> .....	2
1.3.3. <i>Justificación Metodológica</i> .....	2
1.4. Alcance.....	2
1.5. Objetivos.....	3
1.5.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.5.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3

### CAPITULO II

<b>2. ESTUDIO DEL ARTE.....</b>	<b>4</b>
2.1. Tipos de Biocombustibles.....	4
2.1.1. <i>Biocombustibles Sólidos</i> .....	4
2.1.2. <i>Biocombustibles Líquidos</i> .....	5
2.2. Poder Calorífico.....	6

2.2.1.	<i>Poder Calorífico Inferior</i> .....	6
2.2.2.	<i>Poder Calorífico Superior</i> .....	6
2.3.	Clasificación de la Biomasa.....	6
2.3.1.	<i>Biomasa seca</i> .....	6
2.3.2.	<i>Biomasa Húmeda</i> .....	7
2.4.	Consumo de Biomasa .....	8
2.4.1.	<i>Consumo de biomasa a nivel mundial</i> .....	8
2.4.2.	<i>Consumo de biomasa a nivel de Latinoamérica y el Caribe</i> .....	9
2.4.3.	<i>Consumo de biomasa en Ecuador</i> .....	11
2.4.4.	<i>Uso de la energía de biomasa en el Ecuador</i> .....	12
2.4.4.1.	<i>Sector industrial</i> .....	12
2.4.4.2.	<i>Sector residencial</i> .....	12
2.4.5.	<i>Potencial energético de los residuos</i> .....	12
2.4.5.1.	<i>Potencial energético de plantaciones forestales</i> .....	12
2.4.5.2.	<i>Potencial energético de residuos vegetales</i> .....	13
2.4.5.3.	<i>Potencial energético de los desechos sólidos</i> .....	13
2.4.6.	<i>Generación de energía eléctrica a partir de biomasa</i> .....	13
2.5.	Parámetros para evaluar el rendimiento de operación de cualquier equipo térmico ...	14
2.5.1.	<i>Eficiencia en frío</i> .....	14
2.5.2.	<i>Eficiencia en caliente</i> .....	15
2.6.	Características de la materia prima.....	15
2.6.1.	<i>Humedad</i> .....	15
2.6.2.	<i>Contenido Volátil</i> .....	15
2.6.3.	<i>Contenido de Ceniza</i> .....	15
2.7.	Modelos dimensionales para la obtención de gas pobre.....	16
2.7.1.	<i>Modelo Cero-Dimensional (0 D)</i> .....	16
2.7.2.	<i>Modelos unidimensionales (1D)</i> .....	16
2.7.3.	<i>Modelos bidimensionales (2D)</i> .....	16
2.7.4.	<i>Modelos del proceso de volatilización (pirólisis)</i> .....	17



2.8.	Tipos de Gasificadores .....	17
2.8.1.	<i>Gasificador Downdraft o de corriente paralela</i> .....	17
2.8.2.	<i>Gasificador Updraft o en Contracorriente</i> .....	18
2.8.3.	<i>Gasificador Crosdraft o de tiro a transversal</i> .....	19
2.9.	Proceso de la gasificación.....	20
2.9.1.	<i>Secado</i> .....	20
2.9.2.	<i>Pirólisis</i> .....	20
2.9.3.	<i>Reacciones de combustión</i> .....	21
2.9.4.	<i>Reacciones de gasificación</i> .....	21
2.10.	Tipos de combustión.....	21
2.10.1.	<i>Combustión completa</i> .....	21
2.10.2.	<i>Combustión incompleta</i> .....	22
2.10.3.	<i>Combustión teórica o estequiometria</i> .....	22
2.11.	Descripción de los sensores Instalados en el gasificador .....	23
2.11.1.	<i>Tarjeta adquisición de datos</i> .....	23
2.11.2.	<i>Sensor RTD tipo Pt100</i> .....	24
2.11.3.	<i>Termocupla tipo J</i> .....	24
2.11.4.	<i>Transductor de presión MPX5500</i> .....	24

### **CAPITULO III**

<b>3.</b>	<b>ANALISIS TERMODINAMICO DEL GASIFICADOR DOWNDRAFT.....</b>	<b>25</b>
3.1.	Análisis Térmico.....	25
3.1.1.	<i>Flujo másico</i> .....	25
3.1.2.	<i>Balances de energía</i> .....	25
3.1.2.1.	<i>Balance de Energía en el Gasificador</i> .....	26
3.1.3.	<i>Cuantificación del volumen teórico de gas de síntesis</i> .....	27
3.1.4.	<i>Volumen del aire teórico (<math>V_{a^{\circ}}</math>)</i> .....	27
3.1.5.	<i>Volumen teórico de nitrógeno (<math>V_{N2^{\circ}}</math>)</i> .....	27
3.1.6.	<i>Volumen de los gases triatómicos (<math>V_{RO2^{\circ}}</math>)</i> .....	28

3.1.7.	<i>Volumen teórico del vapor de agua (<math>V_{H2O^\circ}</math>)</i> .....	28
3.1.8.	<i>Volumen de los gases producidos en el gasificador (<math>V_g</math>)</i> .....	28
3.1.9.	<i>Flujo volumétrico del gas pobre (<math>V_{gp}</math>)</i> .....	28
3.2.	<i>Balance de energía del gasificador</i> .....	29
3.2.1.	<i>Cálculo de los parámetros del calor perdido</i> .....	30
3.3.	<i>Eficiencia del proceso de gasificación</i> .....	31
3.3.1.	<i>Eficiencia en frío del proceso de gasificación</i> .....	31
3.3.2.	<i>Eficiencia en caliente del proceso de gasificación</i> .....	32
3.4.	<i>Determinación de la transferencia de calor mediante Instrumentación</i> .....	32
3.4.1.	<i>Tarjeta NI 6009</i> .....	33
3.4.1.1.	<i>Características de la tarjeta de adquisición DAQ Ni 6009</i> .....	33
3.4.1.2.	<i>Método de Conexión</i> .....	34
3.4.2.	<i>Sensor PT100</i> .....	34
3.4.2.1.	<i>Características del sensor Pt100</i> .....	34
3.4.2.2.	<i>Método de conexión</i> .....	35
3.4.3.	<i>Termocupla tipo J</i> .....	36
3.4.3.1.	<i>Características de las termocuplas tipo J</i> .....	36
3.4.3.2.	<i>Método de conexión de la termocupla tipo J</i> .....	37
3.4.4.	<i>Transductor de presión diferencial MPX5500</i> .....	37
3.4.4.1.	<i>Características del sensor MPX5500</i> .....	37
3.4.4.2.	<i>Método de conexión</i> .....	38
3.5.	<i>Programación en Labview</i> .....	39
3.5.1.	<i>Programación de Termocuplas</i> .....	39
3.5.1.1.	<i>Programación en Labview</i> .....	41
3.5.1.2.	<i>Adquisición y Lectura mediante indicadores gráficos</i> .....	43
3.5.2.	<i>Programación del sensor Pt100</i> .....	43
3.5.2.1.	<i>Programación en Labview</i> .....	44
3.5.2.2.	<i>Lectura de los sensores Pt100</i> .....	44
3.5.3.	<i>Programación de los sensores de presión diferencial</i> .....	45

3.5.3.1.	<i>Programación en Labview.....</i>	46
3.5.3.2.	<i>Lectura de los sensores de presión diferencial.....</i>	46
3.5.4.	<i>Programación del Sistema de adquisición de datos.....</i>	47
3.5.4.1.	<i>Programación en Labview.....</i>	48
3.5.4.2.	<i>Adquisición de datos.....</i>	48
3.6.	<i>Determinación de la temperatura en base a la longitud del gasificador .....</i>	49
3.6.1.	<i>Convección forzada en un flujo interno.....</i>	49
3.6.2.	<i>Variación axial de la temperatura media para el caso de la temperatura superficial constante .....</i>	49
3.6.3.	<i>Variación axial de la temperatura media para el caso de temperatura superficial constante .....</i>	50
3.6.4.	<i>Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.....</i>	51
3.6.5.	<i>Cálculo del coeficiente transferencia de calor por convección.....</i>	53
3.6.5.1.	<i>Determinación de coeficiente de transferencia de calor h1.....</i>	53
3.6.5.2.	<i>Determinación de coeficiente de transferencia de calor h2.....</i>	54
3.6.5.3.	<i>Determinación de coeficiente de transferencia de calor h3.....</i>	54
3.6.6.	<i>Determinación de las temperaturas a lo largo del gasificador.....</i>	55
3.6.6.1.	<i>Determinación de las temperaturas de en función de la longitud del gasificador.....</i>	55
3.6.7.	<i>Ejemplo de la tabla de cálculo para la obtención de la gráfica variación de temperatura en función de la longitud del gasificador.....</i>	56

## **CAPITULO IV**

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS DE CURVAS DE TEMPERATURA, FLUJOS MASICOS DE GAS Y AIRE, Y CARACTERÍSTICAS DE BIOMASA FORESTAL.....</b>	<b>57</b>
4.1.	<i>Datos de la Gasificación Numero 1 .....</i>	58
4.1.1.	<i>Curvas de temperatura vs el tiempo .....</i>	59
4.1.2.	<i>Gráfica del flujo másico de aire y de gas de síntesis.....</i>	60
4.1.3.	<i>Análisis de Cromatografico.....</i>	61
4.1.4.	<i>Simulación de Temperaturas en ANSIS.....</i>	62

4.1.5.	<i>Simulación de la Gasificación número 1.....</i>	62
4.1.6.	<i>Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador .....</i>	64
4.2.	Datos de la Gasificación Número (2) .....	65
4.2.1.	<i>Curvas de temperatura vs el tiempo .....</i>	66
4.2.2.	<i>Gráfica del flujo másico de aire y gas de síntesis .....</i>	67
4.2.3.	<i>Análisis de Cromatógrafico.....</i>	68
4.2.4.	<i>Simulación de la Gasificación número 2.....</i>	69
4.2.5.	<i>Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador .....</i>	71
4.3.	Datos de la Gasificación Numero 3 .....	72
4.3.1.	<i>Curvas de temperatura vs el tiempo .....</i>	73
4.3.2.	<i>Gráfica del flujo másico del aire y gas de síntesis .....</i>	74
4.3.3.	<i>Análisis de Cromatógrafico.....</i>	75
4.3.4.	<i>Simulación de la Gasificación número 3.....</i>	76
4.3.5.	<i>Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador .....</i>	78

## **CAPITULO V**

<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>80</b>
--------------------------	-----------

<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>81</b>
-----------------------------	-----------

## **BIBLIOGRAFIA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Biocombustibles sólidos indicada en (MJ/Nm <sup>3</sup> ) .....	4
<b>Tabla 2-2:</b> Biocombustibles líquidos .....	21
<b>Tabla 1-3:</b> Balance de energía del gasificador .....	26
<b>Tabla 2-3:</b> Composición de algunos tipos de biomásas en base seca .....	27
<b>Tabla 3-3:</b> Instrumentación instalada de acuerdo a la temperatura máxima que alcanzan las zonas de gasificación .....	32
<b>Tabla 4-3:</b> Características de la tarjeta de adquisición DAQ Ni 6009 .....	33
<b>Tabla 5-3:</b> Entradas / Salidas analógicas del borne 1 al 16.....	34
<b>Tabla 6-3:</b> Entradas / Salidas digitales, +5V y tierra del borne 17 al 32.....	34
<b>Tabla 7-3:</b> Características del sensor Pt100 .....	35
<b>Tabla 8-3:</b> Características de los Termopares .....	36
<b>Tabla 9-3:</b> Características de la termocuplas tipo J.....	36
<b>Tabla 10-3:</b> Características del sensor MPX5500.....	37
<b>Tabla 11-3:</b> Lectura de Termocuplas .....	41
<b>Tabla 12-3:</b> Adquisición y Lectura mediante indicadores gráficos .....	43
<b>Tabla 13-3:</b> Programación de los sensores Pt100 .....	45
<b>Tabla 14-3:</b> Programación del sensor de presión diferencial a la salida del gas de síntesis .....	46
<b>Tabla 15-3:</b> Programación del sensor de Presión diferencial de entrada aire .....	47
<b>Tabla 16-3:</b> Adquisición de datos .....	48
<b>Tabla 17-3:</b> Cálculo de Temperaturas a lo largo del gasificador .....	56
<b>Tabla 1-4:</b> Proceso de gasificación .....	57
<b>Tabla 2-4:</b> Datos de la gasificación número (1).....	58
<b>Tabla 3-4:</b> Análisis cromatográfico (1).....	61
<b>Tabla 4-4:</b> Datos de la gasificación número 2.....	65
<b>Tabla 5-4:</b> Análisis cromatográfico (2).....	68
<b>Tabla 6-4:</b> Datos de la gasificación número 3.....	72
<b>Tabla 7-4:</b> Análisis de la cromatográfico (3) .....	75
<b>Tabla 8-4:</b> Comparación de resultados cromatográficos.....	79
<b>Tabla 9-4:</b> Tabla comparativa de resultados de Simulación .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1-2:</b> Biocombustibles líquidos.....	5
<b>Figura 2-2:</b> Criterios para la clasificación de la biomasa.....	8
<b>Figura 3-2:</b> Mapa del uso de la biomasa en los países en desarrollo .....	9
<b>Figura 4-2:</b> Atlas bioenergética del Ecuador .....	11
<b>Figura 5-2:</b> Etapas de Gasificación de un gasificador Downdraft .....	18
<b>Figura 6-2:</b> Etapas de Gasificación de un gasificador de Updraft .....	19
<b>Figura 7-2:</b> Etapas de gasificación de un Gasificador Crosdraft .....	20
<b>Figura 8-2:</b> Diagrama P&ID .....	23
<b>Figura 9-2:</b> Tarjeta NI 6009 .....	24
<b>Figura 1-3:</b> Diagrama del balance de energía del gasificador.....	29
<b>Figura 2-3:</b> Zona de Gasificación de un reactor Downdraft .....	33
<b>Figura 3-3:</b> Método de conexión RTD.....	35
<b>Figura 4-3:</b> Conectar un Termopar Blindado.....	37
<b>Figura 5-3:</b> Sensor de Presión Integrado.....	38
<b>Figura 6-3:</b> Módulo Max 6675.....	39
<b>Figura 7-3:</b> Código de programación en arduino para las termocuplas .....	40
<b>Figura 8-3:</b> Etapa de configuración de la comunicación de Labview y el micro controlador ...	41
<b>Figura 9-3:</b> Panel frontal de configuración del programa Labview .....	41
<b>Figura 10-3:</b> Método de separación de caracteres de los sensores.....	42
<b>Figura 11-3:</b> Programación del sensor Pt100.....	44
<b>Figura 12-3:</b> Lectura de los sensores Pt100 .....	44
<b>Figura 13-3:</b> Sensor de presión diferencial MPX5500 .....	46
<b>Figura 14-3:</b> Programación del Sistema de adquisición de datos .....	47
<b>Figura 15-3:</b> Panel frontal del sistema de adquisición de datos.....	49
<b>Figura 16-3:</b> Análisis de transferencia de calor por convección.....	51
<b>Figura 1-4:</b> Análisis cromatógrafo de la primera gasificación.....	61
<b>Figura 2-4:</b> Simulación 1 de la distribución temperaturas a lo largo del gasificador .....	63
<b>Figura 3-4:</b> Ubicación de los puntos de temperatura a lo largo del gasificador.....	63
<b>Figura 4-4:</b> Flujo de calor por convección (Hflux).....	64
<b>Figura 5-4:</b> Análisis cromatográfico de la segunda gasificación .....	68
<b>Figura 6-4:</b> Simulación de la distribución temperaturas a lo largo del gasificador .....	69
<b>Figura 7-4:</b> Decrecimiento de la temperatura de acuerdo a su longitud .....	70
<b>Figura 8-4:</b> Flujo de calor por convección (Hflux).....	70
<b>Figura 9-4:</b> Análisis de cromatográfico de la tercera gasificación.....	75
<b>Figura 10-4:</b> Simulación de la distribución de las temperaturas a lo largo del gasificador .....	76

<b>Figura 11-4:</b> Decrecimiento de la temperatura de acuerdo a su longitud .....	77
<b>Figura 12-4:</b> Flujo de calor por convección (Hflux).....	77

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1-2:</b> Anuario de estadísticas energéticas y sistema de información energética de Latinoamérica y el Caribe .....	10
<b>Gráfico 2-2:</b> Generación Eléctrica en el Ecuador por medio de Biomasa .....	13
<b>Gráfico 3-2:</b> Potencia efectiva generada por diferentes tipos de fuentes de energía.....	14
<b>Gráfico 1-4:</b> Temperatura de las Termocuplas.....	59
<b>Gráfico 2-4:</b> Temperatura de los sensores Pt100 .....	59
<b>Gráfico 3-4:</b> Flujo de aire que varía manera constante .....	60
<b>Gráfico 4-4:</b> La variación del flujo másico de gas de síntesis.....	60
<b>Gráfico 5-4:</b> Temperatura máxima ubicada en la parte inferior del gasificador .....	64
<b>Gráfico 6-4:</b> Temperatura de la termocuplas .....	66
<b>Gráfico 7-4:</b> Temperaturas de los sensores Pt100.....	66
<b>Gráfico 8-4:</b> Flujo de másico de aire.....	67
<b>Gráfico 9-4:</b> Variación del flujo másico de gas pobre .....	67
<b>Gráfico 10-4:</b> Distribución de temperaturas.....	71
<b>Gráfico 11-4:</b> Temperatura de las Termocuplas.....	73
<b>Gráfico 12-4:</b> Temperatura de los sensores Pt100 .....	73
<b>Gráfico 13-4:</b> Flujo másico de aire .....	74
<b>Gráfico 14-4:</b> Fluctuaciones de gas .....	74
<b>Gráfico 15-4:</b> Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador .....	78



## ÍNDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Extracto de la Norma DIN 51718
- Anexo B:** Tarjeta de adquisición de datos NI6009
- Anexo C:** Sensor RTD modelo PT100
- Anexo D:** Datasheet de la termocupla tipo J
- Anexo E:** Transductor de presión MPX5500
- Anexo F:** Tablas de números adimensionales en base a la temperatura fílmica y tablas del calor específico de los gases
- Anexo G:** Calculo de la eficiencia en frío y caliente del proceso de gasificación
- Anexo H:** Programación completa en Labview
- Anexo I:** Tablas de las temperaturas a lo largo del gasificador
- Anexo J:** Análisis cromatógrafco emitido por Escuela Politécnica Nacional

## RESUMEN

El objetivo de este estudio es la instalación de un sistema de adquisición de datos para la cuantificación de los parámetros de funcionamiento de un gasificador de flujo descendente, en el transcurso del proceso de obtención de gas pobre. Se realizó un estudio de las temperaturas de gasificación en el proceso de pirólisis, obteniéndose un consumo promedio de biomasa forestal de 135 kg en el transcurso de 3.5 horas de gasificación. Un estudio del arte de los gasificadores de lecho descendente para producir gas pobre, encontró que los gasificadores se los diseñan dependiendo del tipo de temperaturas que soportan y la capacidad de generación de gas pobre. En el país se obtiene actualmente gas pobre a partir de biomasa seca; lo cual tiene consecuencias positivas, estos generan alternativas para fortalecimiento de la matriz energética. Esto justifica la necesidad de generar gas pobre con una producción de gas de síntesis, con un poder calorífico de  $4.86 \text{ MJ/Nm}^3$ , usado en motores de combustión. Aplicando el Sistema de adquisición de datos y la interfaz Labview con una tarjeta NI-6009, se determinó el tipo de termocupla más adecuada a lo largo del proceso de pirólisis. Luego se diseñó el programa de adquisición de datos, aplicando la programación de variables que contiene el Labview, y determinado con las ecuaciones obtenidas teóricamente. Las temperaturas alcanzadas en los tres procesos de gasificación se obtuvieron mediante la instrumentación instalada a lo largo del gasificador obteniendo una temperatura máxima de  $415^\circ\text{C}$  en la zona de reducción y una mínima de  $25^\circ\text{C}$  en la zona de secado con flujos máxicos de aire de  $0,002 \text{ Kg/s}$  y de gas de síntesis de  $0,0015 \text{ Kg/s}$ , por lo que se recomienda con continuar con más estudios.

**Palabras claves:** < TECNOLOGÍA Y CIENCIAS DE LA INGENIERIA >, < SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS >, < PIRÓLISIS >, < BIOMASA SECA>, < LECHO DESCENDENTE >, <PROGRAMACIÓN>. < INTERFAZ LABVIEW (SOFTWARE)>.

## ABSTRACT

The objective of this study is the installation of a data acquisition system for the quantification of the operating parameters of a downstream gasifier during the process of obtaining poor gas. A study of gasification temperatures in the pyrolysis process was carried out, obtaining an average consumption of forest biomass of 135 kg in the course of 3.5 hours of gasification. A study of the art of down gasifiers to produce poor gas, found that gasifiers are designed depending on the type of temperatures they support and the ability to generate poor gas. In the country, poor gas is currently obtained from dry biomass; which has positive consequences, these generate alternative for strengthening the energy matrix. This justifies the need to generate poor gas with a synthesis gas production, with calorific value of  $4.86 \text{ MJ/Nm}^3$  used in combustion engines. Applying the Data Acquisition System and the Labview interface with an NI-6009 card, the most appropriate type of thermocouple was determined throughout the pyrolysis process. Then the data acquisition program was designed, applying the programing of variables contained in the Labview, and determined with the theoretically obtained equations. The temperatures reached in the three gasification processes were obtained by means of instrumentation installed along the gasifier obtaining a maximum temperature of  $415^\circ\text{C}$  in the reduction zone and a minimum of  $25^\circ\text{C}$  in the drying zone with mass air flows of  $0,002 \text{ Kg/s}$  and synthesis gas of  $0,0015 \text{ Kg/s}$ , so it is recommended to continue with more studies.

**KEY WORDS:** <ENGINEERING TECHNOLOGY AND SCIENCES >, < DATA ACQUISITION SYSYEM >, < PYRÓLISIS >, <DRY BIOMASS>, <DESCENDING FLUX>, < EQUATIONS THEORETICALLY >, < PROGRAMMING>, <LABVIEW INTERFACE (SOFTWARE) >.

# CAPÍTULO I

## 1. MARCO REFERENCIAL

### 1.1. Antecedentes

La biomasa con bajo índice de humedad es desechada a diario en diferentes procesos por lo cual conlleva un problema de contaminación ambiental, debido al desconocimiento y los métodos adecuados para su manejo, con un proceso adecuado se puede obtener una fuente de energía renovable.

El proceso de obtención de gas de síntesis se realiza por medio de varios métodos uno de ellos, es la gasificación técnica usada antiguamente, que tuvo su apogeo en la segunda guerra mundial como fuente de energía para motores de combustión, también es usado en comunidades alejadas del tendido eléctrico.

El incremento de los costos de procesamiento de petróleo hace que se investigue nuevas fuentes de energía de bajo costo, esto ha convertido a esta energía en una alternativa debido a que se realizan los desechos como son pajas, semillas maderas, por medio de un proceso de pirólisis y reacciones químicas de oxidación reducción.

En el Ecuador el uso de este tipo de energía no se encuentra en desarrollo debido al desconocimiento y a la manera de realizarla de forma eficiente, se debería plantear una política pública de reutilización de desechos que ayudaría con el problema de contaminación existente.

En el presente trabajo se plantea la instalación de un sistema de adquisición de datos el cual nos permite conocer el funcionamiento y determinar el comportamiento del proceso de gasificación utilizando cualquier tipo de biomasa para esto se dispone de un Gasificador de flujo descendente ubicado en la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Con los datos obtenidos mediante la instrumentación instalada se plantea identificar a que temperatura se realiza el proceso de gasificación, la cantidad de flujo másico de aire, ya que este proceso se realiza con deficiencia del mismo, con esto obtener el flujo másico de gas de síntesis de una manera constante.

## **1.2. Formulación del problema**

La gasificación es un proceso complejo que se realiza por etapas dentro del gasificador de flujo descendente, por esto plantea instalar un sistema de adquisición de datos de temperatura, de flujos másicos de aire y de gas de síntesis con esto, determinar la temperatura que alcanzan las etapas en la obtención de gas de síntesis a través de reacciones químicas de oxidación y reducción que tiene este proceso.

## **1.3. Justificación**

### ***1.3.1. Justificación Práctica***

Mediante la aplicación del siguiente proyecto con la ayuda de instrumentos electrónicos y de control se puede determinar el rango de temperaturas los cuales ayudan al control del proceso, y obtener un gas de síntesis de una manera eficiente en el transcurso de las etapas de secado, pirólisis y gasificación de los residuos forestales.

### ***1.3.2. Justificación Teórica***

En este proyecto determinará las características y parámetros técnicos del funcionamiento del gasificador tipo Downdraft al combustionar residuos forestales el mismo que servirá para el futuro desarrollo de tecnología otorgando valores de funcionamiento.

### ***1.3.3. Justificación Metodológica***

Para el desarrollo del proyecto se recopila información necesaria acerca del funcionamiento del gasificador de lecho descendente (Downdraft) el mismo que se encuentra en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la ESPOCH, seguidamente se procederá a identificar las zonas de gasificación para instalar los sensores adecuados de acuerdo con la temperatura máxima alcanzada y finalmente la implementación del sistema de adquisición de datos a modo de conocer el comportamiento del proceso de gasificación.

## **1.4. Alcance**

El proyecto planteado dispone de un sistema de adquisición de datos de temperatura para identificar donde se encuentra cada zona de gasificación, además de adquirir los valores de flujo másicos de gas y aire, con lo cual se puede determinar el comportamiento del proceso de gasificación con cualquier tipo de biomasa utilizada.

## **1.5. Objetivos**

### ***1.5.1. Objetivo General***

Realizar la evaluación térmica, del comportamiento de un gasificador tipo “Downdraft” al combustionar residuos forestales

### ***1.5.2. Objetivos Específicos***

- Recopilar información de tipo académico y bibliográfico acerca de los estudios realizados previamente acerca de la obtención de gas pobre para establecer el estado del arte en el tema expuesto.
- Realizar el diagnóstico del equipo de una manera visual tanto interna como externamente con ello seleccionar e instalar la instrumentación adecuada en el gasificador de una forma eficaz.
- Realizar la programación de los instrumentos de adquisición de datos como son termocupla, termo resistores y medidores de flujo en el programa Labview.
- Realizar las pruebas para la obtención de gas pobre en los rangos de temperatura de cada etapa de gasificación en el Gasificador tipo “Downdraft” perteneciente a la (ESPOCH).
- Realizar el análisis térmico de las temperaturas y su simulación al obtener gas de síntesis.

## CAPÍTULO II

### 2. ESTUDIO DEL ARTE

#### 2.1. Tipos de Biocombustibles

##### 2.1.1. Biocombustibles Sólidos

Los biocombustibles sólidos más importantes son los combustibles de tipo primario, están constituidos por materiales lignocelulósicos procedentes del sector agrícola, forestal y de industrias de transformación que producen este tipo de residuos. La paja, los restos de poda, olivo o frutales, la leña, las cortezas y los restos de podas y aclareos de las masas forestales son materia empleada en la elaboración de biocombustibles sólidos de origen agrario. Cáscaras de frutos secos, huesos de aceitunas y de otros frutos, residuos procedentes de la extracción del aceite de orujo en las almazaras, restos de las industrias del corcho, la madera y el mueble, constituyen una materia prima de calidad que puede ser utilizada como biocombustible sólido. Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía térmica o se transforma en energía eléctrica. El poder calorífico inferior, variable con la humedad del combustible es la característica más representativa de su calidad. En la tabla 1-2 se muestran valores del poder calorífico de algunas biomásas con distinta humedad. Mediante la combustión de esta biomasa se obtiene energía que se aprovecha directamente como energía (SALVADOR, 2010).

**Tabla 1-2:** Biocombustibles sólidos indicada en (MJ/Nm<sup>3</sup>)

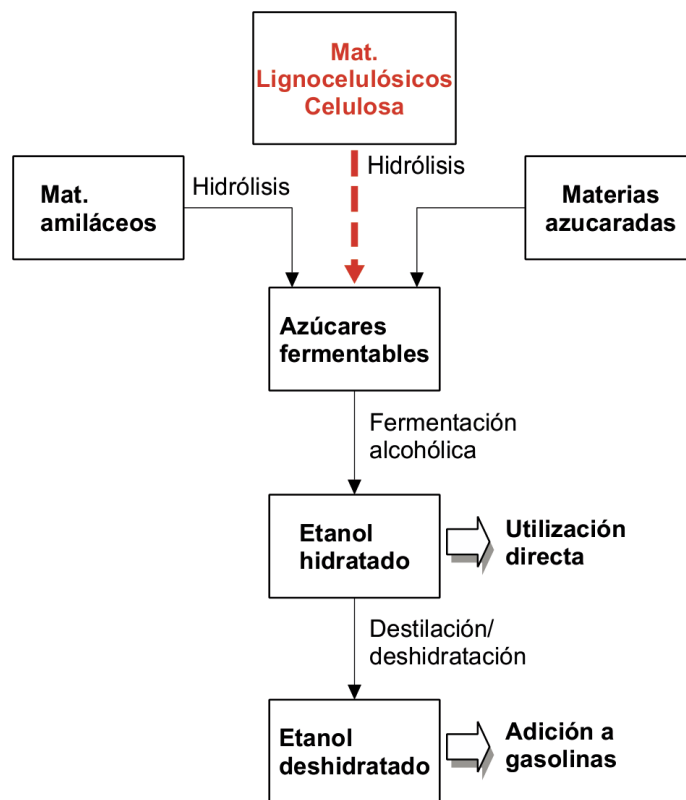
Biomasa	Seca	10% Humedad	15% Humedad
Paja cereal	4,0	3,6	3,3
Sarmientos de vida	4,2	3,3	2,3
Ramas coníferas	4,6	3,6	2,5
Ramas frondosas	4,2	3,3	2,3
Cortezas confiteras	4,7	3,6	2,6
Cáscara de almendra	4,4	3,9	3,7
Cáscara de cacahuete	3,9	3,5	3,3
Serrín/viruta. Conífera	4,9	4,5	3,8
Serrín/viruta. frondosas	4,7	4,3	3,6

Fuente: (SALVADOR, 2010)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 2.1.2. Biocombustibles Líquidos

La denominación de los biocombustibles líquidos o biocarburantes se aplica a una serie de productos de origen biológico utilizables como combustibles de sustitución de derivados de petróleo o como aditivos de estos para su uso en motores. Actualmente sólo son comerciales los de primera generación, etanol (y etilterbutil éter obtenido a partir de él) y biodiesel. En ambos casos las materias primas de las que proceden tienen también uso alimentario. Evitar que la obtención de biocarburantes compita con las fuentes de alimentación y aprovechar la mayor parte del vegetal es la razón que guía el trabajo para disponer de biocarburantes de segunda generación. Tanto la ruta bioquímica como la ruta termoquímica ofrecen caminos apropiados para transformar el material lignocelulósico en productos destinados a sustituir los carburantes derivados de los combustibles fósiles para lo que es preciso superar varias dificultades antes de implantar esta tecnología. (SALVADOR, 2010)



**Figura 1-2:** Biocombustibles líquidos

Fuente: (SALVADOR, 2010)



## **2.2. Poder Calorífico**

El poder calorífico de un material es un indicador de la energía química contenida en el combustible con relación a un ambiente estandarizado. La estandarización involucra la temperatura, el estado del agua y los productos de la combustión. Esta propiedad se da en términos de la energía liberada en los enlaces (J), por la cantidad de masa (kg). Existen dos tipos de poder calorífico inferior PCI y superior PCS. (Flórez, 2016)

El poder calorífico del gas se estima empleando la composición volumétrica de gas determinada mediante la cromatografía de gases. (Flórez, 2016)

### **2.2.1. Poder Calorífico Inferior**

Se contempla el agua en estado gaseoso. Por lo tanto, no hay aporte adicional de calor por condensación del vapor de agua. Solo se dispondrá del calor de oxidación del combustible, al cual por definición se denomina: Poder Calorífico Inferior del Combustible. (Flórez, 2016)

### **2.2.2. Poder Calorífico Superior**

Se contempla el agua en estado líquido (Flórez, 2016) la humedad de la biomasa juega un papel importante en la determinación de estos valores, ya que al estar presente en gran proporción parte de la energía química liberada en la combustión es empleada en la evaporación.

El efecto de la humedad en el PCS consiste en que al aumentar su contenido en la biomasa implícitamente existirá menor contenido de material combustible por kilogramo de combustible de biomasa. (FERNANDEZ, 2011)

## **2.3. Clasificación de la Biomasa**

### **2.3.1. Biomasa seca**

Es especialmente en forma de madera, para la generación de calor por combustión directa es un hecho cotidiano. Así la madera cubre, en promedio, hasta el 5% de las necesidades energéticas presentes en los países industrializados (porcentaje similar al cubierto por la energía nuclear), llegando a representar la fracción mayoritaria (hasta 95%) en países subdesarrollados principalmente en países del continente africano, donde la media de consumo alcanza alrededor de una tonelada por habitante por año. En conjunto se estima que la madera suministra aproximadamente el 14% del consumo energético mundial. (Carrillo, 2004)

En escala industrial, se hacen plantaciones de árboles cortando los troncos, por lo común, con un intervalo de 1 a 4 años. Las podas y los aserraderos proveen desperdicios para quemar. El calor

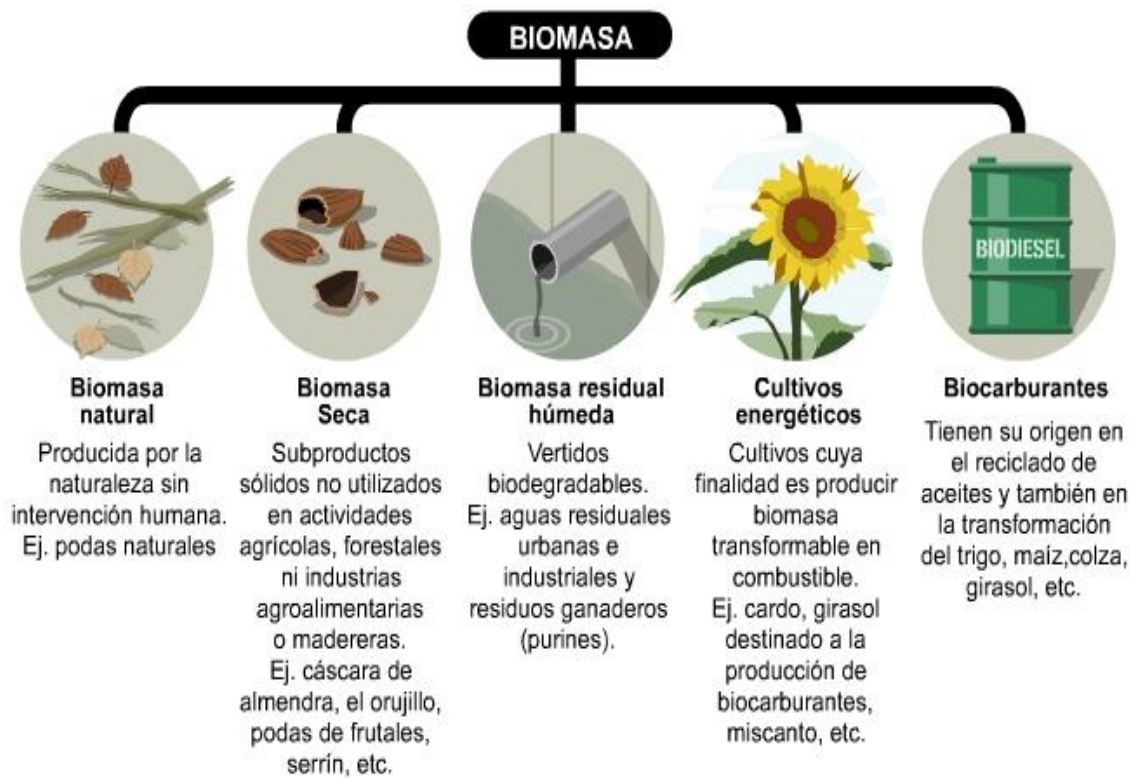
de combustión puede ser empleado directamente, o para producir vapor que genera electricidad por medio de máquinas a pistón o turbinas. La energía neta obtenible durante la combustión es de unos 8 MJ/kg madera verde, 20 MJ/kg materia vegetal seca, 40 MJ/kg, grasas, aceites naturales o ésteres de aceites de semillas, 55 MJ/kg metano, 27 MJ/kg hulla y 46 MJ/kg aceites minerales. Por otra parte, la basura urbana contiene restos de biomasa y plásticos hechos con fuentes fósiles que también son combustibles y suele ser 'paletteada' para su uso. (Carrillo, 2004)

### **2.3.2. Biomasa Húmeda**

Contiene un alto grado de humedad puede transformarse por degradación biológica, mediante procesos anaeróbicos, en metano o etanol, consiguiéndose aumentar el valor energético de la biomasa de 16 kJ/g a 30 kJ/g en el caso de etanol y a 56 kJ/g en el de metano.

Las técnicas más desarrolladas son la digestión anaeróbica de biomasa con alto contenido en celulosa (basura, plantas acuáticas y residuos agrícolas, ganaderos e industriales) para la generación de metano y la fermentación de materiales azucarados o amiláceos para la producción de etanol. En contraste con la digestión anaeróbica que emplea materias primas de escaso valor, la fermentación alcohólica utiliza como sustratos productos de alto valor económico. (Carrillo, 2004)

En la fermentación alcohólica intervienen levaduras que convierten directamente las hexosas (glucosa, etc.) en etanol. El rendimiento teórico en peso, con glucosa como sustrato, es superior al 50%, recuperándose aproximadamente el 93% de la energía contenida en el sustrato. En la práctica, el rendimiento puede estar entre el 85 y 90% del valor teórico. En la digestión anaeróbica participan sucesivamente tres categorías de bacterias cuyas funciones son: 1) hidrólisis de polímeros (celulosa, lípidos, proteínas); 2) producción de ácidos volátiles (principalmente acético), CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>; y 3) generación de metano. El rendimiento en peso es sólo del 27%, aunque el rendimiento energético es superior al 93%. Sin embargo, la naturaleza compleja de la materia procesada en los digestores y la baja eficiencia de conversión se traducen, por lo común, en rendimientos energéticos brutos del 20 al 50%. (Carrillo, 2004)



**Figura 2-2:** Criterios para la clasificación de la biomasa

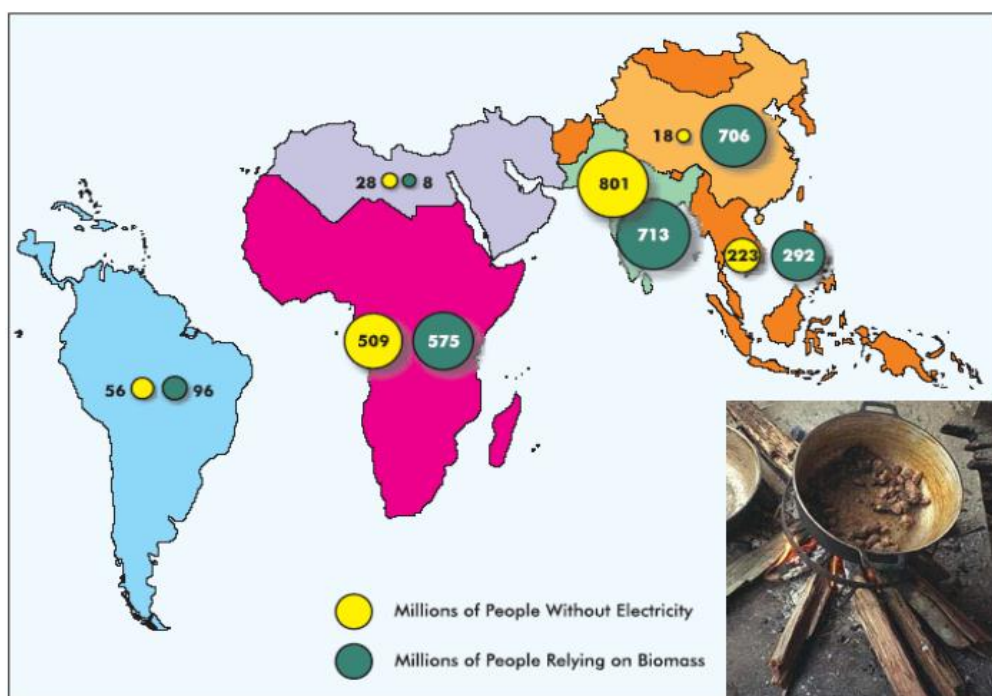
Fuente: (Arcia, 2013)

## 2.4. Consumo de Biomasa

### 2.4.1. Consumo de biomasa a nivel mundial

Actualmente y según datos de la International Energy Agency, la biomasa es la principal fuente energética para 2.400 millones de personas y suple cerca del 40% de la demanda energética de los países en desarrollo. De alguna manera, es “la energía de los pobres”.

Esto es especialmente cierto cuando se trata del uso energético tradicional de la biomasa. La mayoría de estas personas viven en la India, China y el África Subsahariana como se muestra en la gráfica. (Velo, 2009)



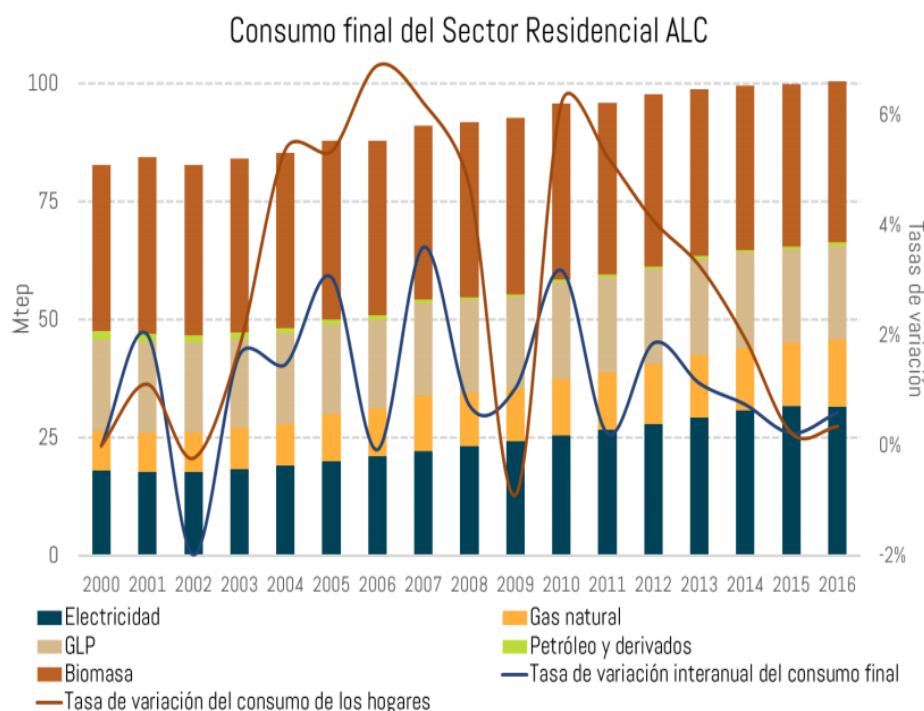
**Figura 3-2:** Mapa del uso de la biomasa en los países en desarrollo

Fuente: (Velo, 2009)

#### 2.4.2. Consumo de biomasa a nivel de Latinoamérica y el Caribe

El consumo de biomasa El sector residencial es el tercer sector de mayor consumo de energía en la región y en este se utilizan una variedad de combustibles especialmente para cocción de alimentos y calefacción; la leña es el energético más consumido conjuntamente con la electricidad y el gas natural que participaron aproximadamente con el 79.24% en el 2016.

En el 2000 la leña tenía una participación cercana al 40% en el consumo final del sector residencial, sin embargo, durante los últimos 16 años ha ido disminuyendo debido a un incremento en el consumo de la electricidad y gas natural. En el periodo 2000 – 2016 se ha dejado de consumir 1 millón de Toneladas equivalentes de petróleo (Mtep) de leña. (OLADE, 2018)



**Gráfico 1-2:** Anuario de estadísticas energéticas y sistema de información energética de Latinoamérica y el Caribe

Fuente: (OLADE, 2018)

La leña es una tecnología poco eficiente, la cual está asociada a la producción elevada de emisiones especialmente de CO<sub>2</sub>; en el sector residencial este energético aportaba en el año 2000 con el 62% de las emisiones generadas, en tanto que en el 2016 se redujo al 58%; además de ello afecta a la degradación forestal, a la erosión de suelos y provoca problemas de salud especialmente respiratorios debido a que las personas que cocinan con este combustible están expuestas a una serie de contaminantes que generan su combustión incompleta y al hollín que se produce. A nivel subregional, América Central es una de los mayores consumidores de leña y su utilización está concentrada en Guatemala, Honduras, y Nicaragua, especialmente en las zonas rurales dado que para utilizar combustibles como GLP implica que los hogares ubicados en estas áreas, deberían tener mayores ingresos que los que actualmente perciben.

Las tecnologías que se emplean en el sector energético cada vez son más eficientes, aunque esta transición se está dando de forma lenta; en el caso de la leña los gobiernos buscan continuamente que su utilización sea más racional y eficiente para lo cual se ha promovido la utilización de estufas eficientes de leña, lo cual acompañado de un programa de forestación y reforestación contribuirán a la mitigación y adaptación del cambio climático.

Al respecto, citar a iniciativas como la Alianza Global para las Estufas Limpias por sus siglas en inglés (GACC) que tiene como el objetivo promover la adopción de estufas y combustibles limpios en 100 millones de hogares para el año 2020; países como Guatemala, El Salvador y el

Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) como organismo regional se han adherido a esta estrategia. En el caso del Caribe, Haití es el mayor consumidor de leña en esta subregión y de carbón vegetal en la región; aproximadamente el 96 % de las necesidades energéticas de este país son cubiertas con estos energéticos y su consumo, contrario a la tendencia de disminución que se mantiene en la región, va en aumento. (OLADE, 2018).

### 2.4.3. Consumo de biomasa en Ecuador

La biomasa en el país del Ecuador es muy abundante, pero debido a ser un país en desarrollo todavía no se la explota como debería, la biomasa de residuos agrícolas más abundantes son el banano, café, cacao, flores, maíz, cascarilla de arroz, papas. El atlas consta de mapas que detallan la localización y la cantidad de biomasa residual disponible por cantón y su respectivo potencial energético para 10 cultivos agrícolas (banano, arroz, cacao, caña de azúcar, maíz, palma africana, piña, café, palmito y plátano), 3 actividades pecuarias (avícola, porcina y vacuna) y la actividad forestal. Se consideran dos aspectos de la biomasa residual: contenido energético, determinado a partir de información y resultado de ensayos de laboratorio de muestras tomadas en campo a nivel nacional y distribución geográfica de la biomasa residual cantonal. ( Escuela de Organización Industrial, 2017)



**Figura 4-2:** Atlas bioenergética del Ecuador

Fuente: ( Escuela de Organización Industrial, 2017)

#### **2.4.4. Uso de la energía de biomasa en el Ecuador**

##### **2.4.4.1. Sector industrial**

La producción de vapor representa un consumo intensivo de energía y emplea principalmente bagazo, diésel y fuel oíl donde el bagazo cubre más del 63% de la demanda energética para la producción de vapor, en la industria azucarera la baja eficiencia de esta fuente energética se traduce en la quema de considerables volúmenes de su producto; su contribución energética es importante por ser una fuente de energía renovable que reduce la demanda de hidrocarburos en el sector. Se ha cuantificado que existe un consumo mínimo de leña para la producción de calor de aproximadamente 71.000 Tonelada Equivalente de Petróleo (TEP). (Barriga, 2017)

##### **2.4.4.2. Sector residencial**

La distribución del consumo energético en este sector es de 1.622 Kilo Tonelada Equivalente de Petróleo KTEP/1994, el 62,6% corresponde a la energía utilizada en la zona rural, esto se explica por el tipo de fuente que se emplea, lo que tiene directa relación con la eficiencia de conversión energética, es decir, debido al bajo rendimiento de las fuentes energéticas tradicionales el consumo final energético del sector rural es mayor que el sector urbano. El uso energético con mayor porcentaje de la biomasa en los hogares es para cocción de alimentos en el sector rural, seguido por el calentamiento de agua. Cabe destacar que a pesar de la alta tasa de penetración de energéticos como el Gas Licuado de Petróleo (GLP), una gran proporción de hogares (más del 77% en el área rural y del 11% en la urbana) continúan empleando la leña y otras formas de biomasa como fuente de energía. (Barriga, 2017).

#### **2.4.5. Potencial energético de los residuos**

##### **2.4.5.1. Potencial energético de plantaciones forestales**

Las plantaciones forestales aportan con aproximadamente el 12% del requerimiento maderero. El volumen total de madera en tales plantaciones alcanza a 11,7 millones de metros cúbicos, de los cuales aproximadamente 4,7 millones serían aprovechados como madera mientras 7 millones de metros cúbicos, se considera como potencial de desechos que equivale en términos energéticos a 1,2 millones de TEP. Este potencial se ubica a lo largo del país, por lo que no se puede recomendar una explotación con fines de generación eléctrica. (Barriga, 2017).

#### 2.4.5.2. *Potencial energético de residuos vegetales.*

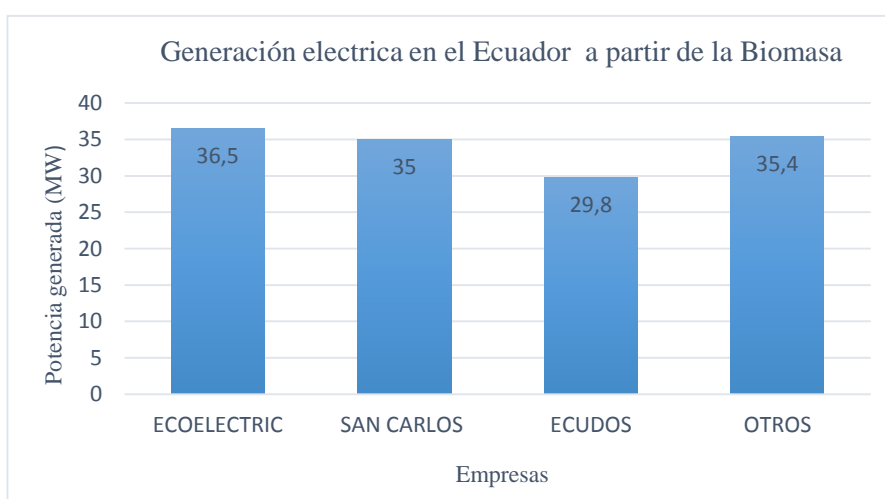
En el país se ha evaluado un total de desechos de 2.000.000 t, con un potencial energético de 365.000 TEP como combustión directa, donde el desecho de caña de azúcar aporta el 60%, que ya es utilizado con fines energéticos, el de banano 17% y el de palma africana el 14%. (Barriga, 2017)

#### 2.4.5.3. *Potencial energético de los desechos sólidos.*

El poder calorífico de los desechos sólidos, aprovechados energéticamente por combustión directa, se estima en 0,2 TEP/t. De acuerdo a datos y estudios recopilados por Fundación Natura, se estima un potencial energético de 261.300 TEP/año, siendo el sector urbano el aporte mayoritario, para una producción anual de 1.300.000 t, para este tipo de desechos se debería analizar con mayor profundidad la posibilidad de generar electricidad, por lo menos en las grandes ciudades. (Barriga, 2017).

#### 2.4.6. *Generación de energía eléctrica a partir de biomasa*

Existen algunas plantas que producen energía y vapor en un esquema de cogeneración y venden los excedentes a la red interconectada. Dichas plantas están 45 vinculadas a la industria azucarera, aunque en una de ellas no solamente se utiliza bagazo de caña, sino también otros residuos agrícolas. Las más importantes son Ecoelectric utiliza bagazo y otros residuos agrícolas, San Carlos principalmente utiliza bagazo de caña y Ecuodos utiliza residuos agrícolas en general. (Gomelsky, 2013).

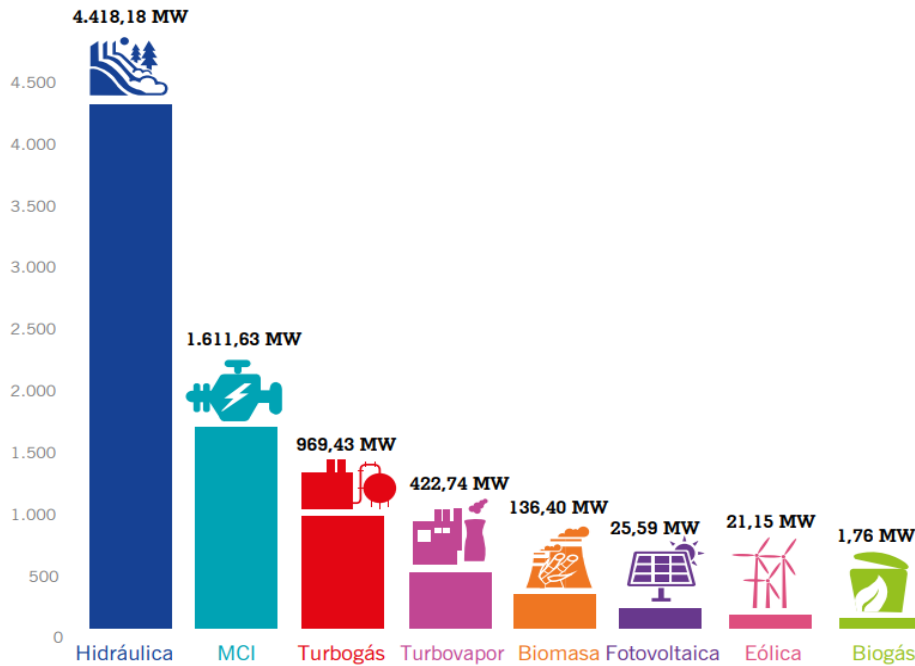


**Gráfico 2-2:** Generación Eléctrica en el Ecuador por medio de Biomasa

Fuente: (Gomelsky, 2013)



En la figura 6 -2 presenta la potencia efectiva por tipo de fuente; en la misma, se destacan las centrales hidráulicas con un 58,08% respecto al total de potencia efectiva a nivel nacional. Por otro lado, están las centrales térmicas no renovables, dentro de las cuales las (MCI) Motores de combustión interna tienen la mayor participación con un 21,19% en relación al total nacional. (Agencia de Regulacion y Control de la Electricidad, 2016).



**Gráfico 3-2:** Potencia efectiva generada por diferentes tipos de fuentes de energía  
**Fuente:** (Agencia de Regulacion y Control de la Electricidad, 2016)

## 2.5. Parámetros para evaluar el rendimiento de operación de cualquier equipo térmico

Existen dos tipos de eficiencia en este proceso tanto una eficiencia en frío y eficiencia en caliente las cuales se utilizan de diferentes maneras. La primera el gas necesariamente debe enfriarse para poder ser utilizado mayormente se usa en motores de combustión interna y turbinas y la segunda el gas es combustionado de una manera directa.

### 2.5.1. Eficiencia en frío

La eficiencia de gas frío es usualmente usada para la ejecución en una cámara de combustión posterior en el cual los vapores de alquitranes y/o residuos son removidos a temperatura ambiente. (Rodríguez, 2010)

### **2.5.2. Eficiencia en caliente**

Cuando se considera además del poder calorífico del gas de síntesis, el calor sensible de los gases, se evalúa en base a la llamada eficiencia de gas caliente. (Rodríguez, 2010)

## **2.6. Características de la materia prima**

Cada tipo de biomasa tiene propiedades específicas que determinan su desempeño como combustible. Las propiedades más importantes relacionadas con la conversión térmica son contenido de humedad, contenido de ceniza, contenido de material volátil, composición elemental, poder calorífico y densidad a granel. Las propiedades se presentan en base húmeda, base libre de ceniza, o base libre de humedad y ceniza. (Flórez, 2016)

### **2.6.1. Humedad**

El contenido de humedad es la cantidad de agua del material, expresada como porcentaje másico. La humedad de la biomasa varía entre menos del 10% para granos de cereales hasta 50 % a 70 % para residuos forestales. La humedad se determina empleando el procedimiento descrito por la norma DIN 51718 que se muestra la tabla del *Anexo A* para combustibles de biomasa alcanzando una temperatura de  $105 \pm 2^\circ\text{C}$ . (Flórez, 2016)

### **2.6.2. Contenido Volátil**

La materia volátil se refiere a la fracción de la biomasa que se libera cuando ésta es calentada entre  $400^\circ\text{C}$  y  $500^\circ\text{C}$ . Durante este proceso la biomasa se descompone en gases volátiles y carbonizado sólido. La biomasa típicamente tiene un alto contenido de volátiles ( $\geq 80\%$ ), mientras que el carbón mineral tiene un bajo contenido ( $\leq 20\%$ ), o en el caso de carbón antracítico, un contenido despreciable. (Flórez, 2016)

### **2.6.3. Contenido de Ceniza**

La ceniza corresponde al material inorgánico presente en la biomasa. El contenido de ceniza en base seca representa menos del 0,5 % en madera, 5 a 10 % en materiales derivados del cultivo agrícola a excepción de las cascarillas de arroz que contienen de 30 a 40 %. La composición de la ceniza afecta en gran medida el comportamiento de la biomasa a altas temperaturas durante la combustión o la gasificación debido al efecto catalítico que presenta. (Flórez, 2016)

## **2.7. Modelos dimensionales para la obtención de gas pobre**

### **2.7.1. Modelo Cero-Dimensional (0 D)**

Son aquellos que relacionan variables de entrada y salida prediciendo la composición final del gas pobre obtenido y la temperatura de equilibrio en función de parámetros de entrada, tales como el tipo de biomasa, la humedad, el dosado, la temperatura, entre otros. En lo que a este modelo concierne, concluye que el poder calorífico del gas se reduce al aumentar la temperatura en la zona de gasificación y la humedad de la biomasa. El poder calorífico del gas pobre obtenido disminuye a medida que se incrementa la cantidad de aire como consecuencia del incremento en el porcentaje de conversión del carbón con el consiguiente aumento de CO<sub>2</sub> y disminución de la concentración de CO, CH<sub>4</sub> y H<sub>2</sub>. Realizando algunas hipótesis que simplifican el modelo se pueden determinar los principales parámetros asociados al proceso tales como la tasa de consumo de biomasa, el dosado relativo de gasificación, la eficiencia térmica, la potencia térmica generada en el reactor, entre otros. (Pérez, 2009)

### **2.7.2. Modelos unidimensionales (1D)**

Los procesos de combustión de residuos sólidos mediante un modelo unidimensional heterogéneo consideran la volatilización del combustible, la oxidación del carbón volátiles y monóxido de carbono; estudian cómo influye la tasa de suministro de aire, el poder calorífico del combustible y el tamaño de partícula en el proceso y tienen en cuenta la intensidad de radiación como método de transferencia de calor por radiación en el lecho. Se analiza la influencia de las tasas de cinética química del proceso de pirólisis, la variación de la tasa de suministro de aire y el contenido de humedad del combustible en el proceso de combustión de residuos sólidos, utilizando para ello un modelo unidimensional heterogéneo en estado transitorio que considera las etapas de secado, de volatilización, oxidación de volátiles, alquitranes y carbón. (Pérez, 2009)

### **2.7.3. Modelos bidimensionales (2D)**

Para el desarrollo de modelos bidimensionales se ha utilizado de forma muy habitual la experimentación en procesos de combustión de residuos sólidos urbanos (Yang, 2007) cuyos datos experimentales se utilizaron para validar un modelo bidimensional (2D) transitorio de dicho proceso. Los autores presentan un modelo transitorio que considera el lecho como un medio continuo poroso dividiendo el proceso de incineración en subprocesos de secado, pirólisis, combustión de volátiles y del carbón. Este modelo considera el efecto difusivo de las ecuaciones

de conservación de masa para las diferentes especies gaseosas, área del reactor y fracción libre constante. La transferencia de calor tiene en cuenta los fenómenos de convección, conducción y radiación (flujos de intensidad de radiación), además consideran los modelos de transferencia de energía en fase sólida y están contemplados por la ecuación de conservación de energía en el sólido. (Pérez, 2009)

#### **2.7.4. Modelos del proceso de volatilización (pirólisis)**

El proceso de volatilización de biomasa es una etapa crítica en la gasificación ya que consiste en la liberación de los volátiles existentes en la matriz sólida de carbón vegetal y cenizas. Para desarrollar un modelo cinético que considera el secado y la recondensación de la humedad, donde se plantea que el proceso de pirólisis está compuesto por tres reacciones primarias paralelas y dos reacciones secundarias de craqueo de los alquitranes en volátiles y carbón. Se comprueba que para tamaños de biomasa utilizados a nivel comercial la temperatura de descomposición aumenta con el tamaño mientras que la cinética del proceso disminuye como consecuencia de los fenómenos de difusividad térmica y másica. (Pérez, J. & Agudelo J, 2011)

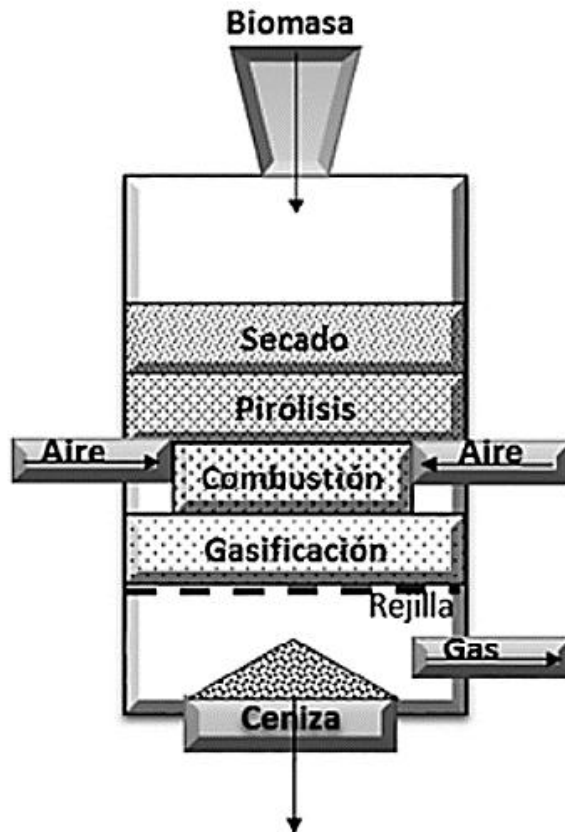
### **2.8. Tipos de Gasificadores**

En la presente sección se revisarán dos tipos de gasificadores de biomasa en los procesos de transformación de energía que ocurren dentro de ellos.

#### **2.8.1. Gasificador Downdraft o de corriente paralela**

El sólido entra por la parte superior del reactor, experimentando sucesivamente los procesos de secado y pirolisis al ser sometido a un aumento progresivo de la temperatura. Este perfil de temperaturas se debe al hecho que la conducción y radiación de calor a temperaturas suficientemente elevadas, tiene lugar desde la parte inferior, donde se está generando calor mediante combustión parcial de los productos que llegan hasta allí.

Los gases, alquitranes y carbón continúan su camino descendente y llegan a la zona de oxidación a alta temperatura, en la que se queman o craquean una parte con el oxígeno. Introducido, proporcionando la energía necesaria para mantener térmicamente el proceso y empobreciendo la calidad del gas. Los productos reaccionan entre sí, a través de las reacciones de reducción, para aumentar la cantidad y calidad como combustible de la fase gaseosa. (VELO, 2012)



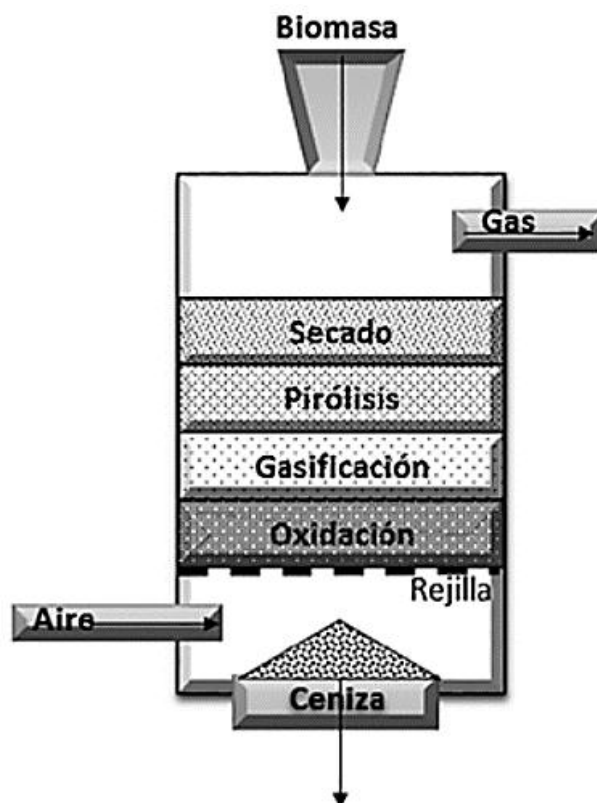
**Figura 5-2:** Etapas de Gasificación de un gasificador Downdraft

Fuente: (Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación, 2017)

### 2.8.2. Gasificador Updraft o en Contracorriente

Este tipo de gasificador tiene bien definidas las zonas de combustión parcial, reducción y pirolisis. El aire es admitido por la parte baja de gasificador y este circula en contracorriente. El gas combustible es entregado por la parte superior a unas temperaturas relativamente bajas; Pues, el calor sensible del gas es utilizado para precalentar y secar el combustible; con ello, se logran altas eficiencias. (ESTRADA, 2004)

Las desventajas que acusa este sistema de gasificación, son el alto contenido de alquitrán del gas producido y la capacidad marginal que tiene en su carga, y por ende la imposibilidad de generación de gas continuo que redundaría en dificultades para la utilización en motores de combustión interna. (ESTRADA, 2004)

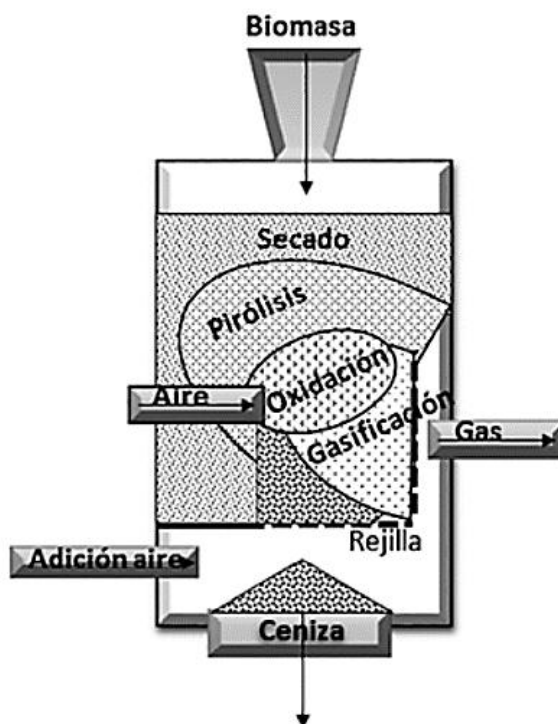


**Figura 6-2:** Etapas de Gasificación de un gasificador de Updraft

**Fuente:** (Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación, 2017)

### 2.8.3. Gasificador Crosdraft o de tiro a transversal

Este tipo de gasificador es una adaptación para el empleo de carbón vegetal, donde las temperaturas alcanzadas en el lecho pueden llegar hasta los 1500°C. El agente gasificante (aire) entra lateralmente quedando la zona de oxidación separada de las paredes del gasificador por el mismo combustible que sirve de aislante. El gas producido sale a una temperatura de aproximadamente 800°C y hasta 900°C, lo cual disminuye el poder calorífico de estos gases y además tiene un contenido alto de alquitranes. (FONSECA, 2003)



**Figura 7-2:** Etapas de gasificación de un Gasificador Crossdraft  
**Fuente:** (Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación, 2017)

## 2.9. Proceso de la gasificación

En esencia la gasificación es el proceso de conversión de la biomasa sólida en un gas combustible que contiene monóxido de carbono e hidrogeno principalmente por medio de un proceso termoquímico. Este proceso se cumple en una cámara cerrada y sellada que opera un poco por debajo de la presión atmosférica. Este proceso se desarrolla en varias etapas. (ESTRADA, 2004)

### 2.9.1. Secado

El secado definitivo de la biomasa toma lugar al entrar al gasificador, donde a medida la materia prima avanza por el reactor, recibe calor. Esta etapa se lleva a cabo sobre los 100 C, donde el agua externa se remueve completamente, para que después la biomasa alcance temperaturas cercanas a los 200 C, en donde los compuestos intracelulares son volatilizados. (Belmar, 2014)

### 2.9.2. Pirólisis

También llamada zona de destilación. En esta etapa aún no se agrega el agente externo y consiste en una ruptura de las cadenas largas de hidrocarburos en otras más pequeñas, normalmente gaseosas (condensables o no condensables), sin la mayor presencia de otros gases. Uno de los productos obtenidos de la pirólisis es el alquitrán formado a partir de la licuefacción de los gases

condensables. Es importante tener en cuenta su presencia durante la gasificación por todos los problemas que involucra al ser un líquido viscoso. (Belmar, 2014)

### 2.9.3. Reacciones de combustión

También llamada zona de oxidación o “corazón” del reactor. Aquí es donde se agrega el agente gasificante para que ocurra la oxidación total (combustión) de algunos gases presentes en el reactor. Son reacciones exotérmicas que permiten mantener el proceso autógeno, dado que aporta el calor para las reacciones de gasificación. Ocurre a temperaturas cercanas a 1.200 C. (Belmar, 2014)

### 2.9.4. Reacciones de gasificación

También llamada zona de reducción. En esta etapa ocurren principalmente las reacciones endotérmicas de oxidación parcial, que producen los gases combustibles del producto. Ocurre entre 600 C y 1.000 C. (Belmar, 2014)

## 2.10. Tipos de combustión

### 2.10.1. Combustión completa

Las sustancias del combustible se queman hasta el máximo grado posible de oxidación. En consecuencia, no habrá sustancias combustibles en los humos (productos). En los productos de la combustión completa se puede encontrar. (PROCESOS DE COMBUSTIÓN, 2006)

**Tabla 2-2:** Biocombustibles líquidos

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

Fuente: (PROCESOS DE COMBUSTIÓN, 2006)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019



### ***2.10.2. Combustión incompleta***

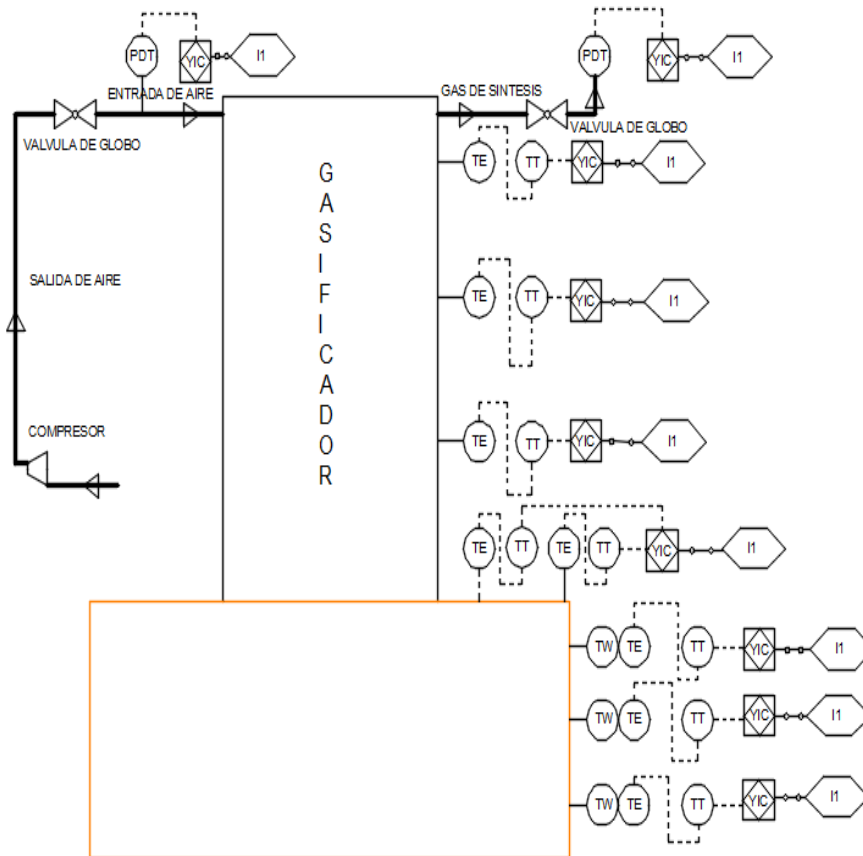
El combustible no se oxida completamente, se forman sustancias que todavía pueden seguir oxidándose; por ejemplo, CO estas sustancias se denominan inquemados. La presencia de inquemados indica que la combustión se está realizando en forma incompleta. Otros inquemados pueden ser  $H_2$ ,  $H_2S$  y C. Estas sustancias son los contaminantes más comunes que escapan a la atmósfera en los gases de combustión. (PROCESOS DE COMBUSTIÓN, 2006)

### ***2.10.3. Combustión teórica o estequiometria***

Es la combustión que se realiza con la cantidad teórica de oxígeno estrictamente necesaria para producir la oxidación total del combustible sin que se produzcan inquemados.

En consecuencia, no se encuentra  $O_2$  en los humos, ya que dicho  $O_2$  se consumió totalmente durante la combustión. Esta combustión se denomina teórica porque en la práctica siempre se producen inquemados, aunque sea en muy pequeña proporción. El aire teórico o estequiométrico es la cantidad mínima de aire que proporciona el oxígeno necesario para que se produzca una combustión completa. (PROCESOS DE COMBUSTIÓN, 2006)

## 2.11. Descripción de los sensores Instalados en el gasificador



**Figura 8-2:** Diagrama P&ID  
Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 2.11.1. Tarjeta adquisición de datos

La tarjeta de adquisición es un dispositivo de bajo costo utilizado en instrumentación industrial debido a su sencillo registro de datos simples y medidas portátiles. Ofrece E/S analógicas, E/S digitales y un contador de 32 bits, además se puede conectar fácilmente sensores y señales al USB 6009 (National, 2014), por medio de los terminales de salida tipo tornillo como se muestra en la figura 3-3. El resto de características se muestran en el **Anexo B**.



**Figura 9-2:** Tarjeta NI 6009

Fuente: (National, 2014)

### ***2.11.2. Sensor RTD tipo Pt100***

Este tipo de sensor es un detector de temperatura por resistencia RTD esta sonda es económica y tiene una precisión inmejorable para aplicaciones industriales, su diseño es compacto utilizado en espacio limitados. Además, la construcción es en acero inoxidable ideal para ambientes oxidantes con altas temperaturas. Las tablas de la relación de temperaturas vs resistencia se muestran en el *Anexo C*

### ***2.11.3. Termocupla tipo J***

Un termopar se compone de dos conductores diferentes, en contacto uno con el otro, los cuales producen un voltaje al calentarse. Los termopares se utilizan como sensores de temperatura para la medición y el control y también se pueden utilizar para convertir un gradiente de temperatura en electricidad. (Unitek, Miyachi, 2016). El datasheet de la termocupla en el *Anexo D*.

### ***2.11.4. Transductor de presión MPX5500***

El transductor pieza resistivo MPX5500 es un sensor de presión de silicio monolítico diseñado para una amplia gama de aplicaciones, pero particularmente aquellos que emplean un micro controlador o microprocesador con entradas A/D. Este transductor patentado combina técnicas avanzadas de micro mecanizado, metalización de película delgada, y procesamiento bipolar para proporcionar una señal analógica de salida precisa, que es proporcional a la presión aplicada. (A.V ELECTRONICS, 2019). Los datos adicionales se muestran en el *Anexo E*,

## CAPÍTULO III

### 3. ANALISIS TERMODINAMICO DEL GASIFICADOR DOWNDRAFT

Se realiza el análisis termodinámico del gasificador teniendo en cuenta los parámetros de funcionamiento, en cada una de las zonas de gasificación, se cuantifican las variables de entrada para obtener las variables de salida, con sus respectivas curvas de temperatura y su eficiencia de acuerdo con el poder calorífico del gas en dependencia directa de la biomasa utilizada, y de que la gasificación se realice con deficiencia de aire.

#### 3.1. Análisis Térmico

El análisis térmico de un gasificador tiene en cuenta todas las variables de temperatura tanto externas e internas que intervienen en cada etapa del proceso de gasificación, con el fin de determinar correctamente los parámetros de funcionamiento del mismo.

##### 3.1.1. Flujo másico

El flujo de masa es la relación directa que tiene, la masa de un fluido que circula en una tubería o ducto, y que es proporcional al área de la sección transversal de la misma, se encuentra en función de la densidad del fluido y a su velocidad.

##### 3.1.2. Balances de energía

La termodinámica trata de la transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro. Es decir, el cambio neto en aumento o disminuciones la energía total de un sistema en el curso del proceso es igual a la diferencia entre ala energía total que entra y la energía total que sale en el desarrollo de este proceso. (Cengel, 2007)

$$E_{entra} - E_{salida} = \Delta E_{sistema} \quad (1)$$

$$E_{entra} - E_{salida} = \Delta Q + \Delta E_{masa} + \Delta W = \Delta E_{sistema}$$

$$E_{entra} - E_{salida} = Q_{entra} - Q_{salida} + E_{masa\ entra} - E_{masa\ salida} + W_{entra} - W_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

### 3.1.2.1. Balance de Energía en el Gasificador

$$\dot{m}_{Biomasa} + \dot{m}_{Aire} = \dot{m}_{Gas} + \dot{m}_{Ceniza} + \dot{m}_{Líquido} \quad (2)$$

Donde:

$\dot{m}_B$  :  $\dot{m}_{Biomasa}$  Cantidad de biomasa forestal utilizada en el gasificador [Kg/h ]

$\dot{m}_A$  :  $\dot{m}_{Aire}$  Flujo másico de aire necesario para la gasificación [Kg/h ]

$\dot{m}_{Gas}$  :  $\dot{m}_{Gas}$  Flujo másico de gas pobre [Kg/h ]

$\dot{m}_{Ceniza}$  :  $\dot{m}_{Ceniza}$  Flujo másico de cenizas resultantes del proceso [Kg/h ]

$\dot{m}_{Liq}$  :  $\dot{m}_{Líquido}$  Flujo másico de alquitrán [Kg/h ]

**Tabla 1-3:** Balance de energía del gasificador

Biomasa	Residuos Forestales
$\dot{m}_{Biomasa}$	2,0 [Kg/h ]
$\dot{m}_{Aire}$	3,66 [Kg/h ]
$\dot{m}_{Gas}$	5,43 [Kg/h ]
$\dot{m}_{Ceniza}$	0,53 [Kg/h ]
$\dot{m}_{Líquido}$	0,12 [Kg/h ]

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

$$\dot{m}_{Aire} = \dot{m}_{Gas} + \dot{m}_{Ceniza} - \dot{m}_{Biomasa} - \dot{m}_{Líquido} \quad [Kg/h ]$$

$$\dot{m}_{Aire} = 3,54 \quad [Kg/h ]$$

Las cantidades de biomasa que se utilizan, se cuantifican de una manera experimental, es decir se pesan antes de ser introducidas al gasificador, seguidamente son transformadas con el pasar del tiempo en productos de gasificación como alquitranes y cenizas que se cuantifica de una misma manera, mediante el peso de la misma.

El flujo de aire se cuantifica mediante el sensor instalado en la placa orificio el cual mide una presión diferencial y mediante la ecuación característica se obtiene el flujo másico.

### 3.1.3. Cuantificación del volumen teórico de gas de síntesis

El volumen de aire teórico o estequiométrico es el volumen de aire necesario para la combustión completa del combustible, determinado a partir de la reacción de combustión en condiciones ideales. Se puede calcular conociendo el análisis elemental del combustible y conociendo que el aire atmosférico contiene 21% en volumen de Oxígeno. Para combustibles sólidos. (RESTREPO, 2004)

**Tabla 2-3:** Composición de algunos tipos de biomazas en base seca

$C^t$	49,01% Carbono, en masa de trabajo en base seca
$S^t$	0,12% Azufre
$H^t$	6,02% Hidrogeno
$O^t$	21,38% Oxigeno
$N^t$	0,2% Nitrógeno
Humedad	8,45%
PCI (MJ/kg)	19,53
Cenizas (B)	2,2 %
$\alpha = 0.6$	Coefficiente de exceso de aire
$d = 9.2g/m^3$	Contenido de humedad de aire
4,67 Kg/ h	Flujo Másico de gas pobre

Fuente: Energy research Centre of the Netherlands, 2012

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.1.4. Volumen del aire teórico ( $V_a^\circ$ )

$$V_a^\circ = 0,0889 (C^t + 0,375S^t) + 0,265H^t - 0,0333O^t \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (3)$$

$$V_a^\circ = 4,54 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 3.1.5. Volumen teórico de nitrógeno ( $V_{N2}^\circ$ )

$$V_{N2}^\circ = 0,79V_a^\circ + \frac{N^t}{100} \quad \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (4)$$

$$V_{N2}^\circ = 3,58 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 3.1.6. Volumen de los gases triatómicos ( $V_{RO2}^\circ$ )

$$V_{RO2}^\circ = V_{CO2} + V_{SO2} = \frac{1,866(C^t + 0,375S^t)}{100} \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (5)$$

$$V_{RO2}^\circ = 0,915 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 3.1.7. Volumen teórico del vapor de agua ( $V_{H2O}^\circ$ )

$$V_{H2O}^\circ = 0,111H^t + 0,0124W_i + 0,0161(d)(V_a^\circ) \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (6)$$

$$V_{H2O}^\circ = 1,44 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 3.1.8. Volumen de los gases producidos en el gasificador ( $V_g$ )

$$V_g = V_{RO2}^\circ + V_{N2}^\circ + V_{H2O}^\circ + (\alpha - 1)V_a^\circ \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (7)$$

$$V_g = 4,11 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

### 3.1.9. Flujo volumétrico del gas pobre ( $V_{gp}$ )

$$V_{gp} = (B)(V_g) \left[ \frac{m^3}{kg} \right] \quad (8)$$

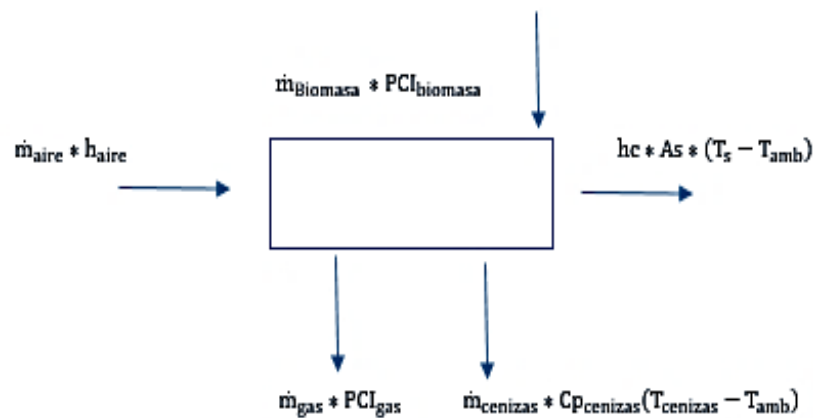
$$V_{gp} = 9,04 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Se determina el comportamiento de los residuos forestales de acuerdo a las curvas de temperatura vs el tiempo, y se disminuye el porcentaje de humedad de la biomasa al ser expuesta al sol, para la reducir la generación de alquitranes, se utiliza en el inicio una carga para el encendido del gasificador y una carga cada hora con un peso aproximado de 40kg de biomasa en el transcurso de dos horas de adquisición de datos en un intervalo de tiempo de 5 minutos mediante el contador de tiempo del programa Labview.

Las temperaturas óptimas sin que exista disminución en el caudal de gas de síntesis con biomasa forestal se encuentra entre (360°C y 450°C) en la zona de reducción de acuerdo al balance de energía, y las termocuplas instaladas en el gasificador durante la gasificación.

### 3.2. Balance de energía del gasificador

Al analizar los parámetros de funcionamiento del gasificador se toma en cuenta todas las variables de ingreso y de salida del mismo.



**Figura 1-3:** Diagrama del balance de energía del gasificador

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{Biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire} & \quad (9) \\
 & = \dot{m}_{cenizas} + \dot{m}_{condensables} + \dot{m}_{gas} * PCI_{gas} + \dot{m}_{gas} * h_{gas} \\
 & = \dot{m}_{cenizas} * Cp_{cenizas} (T_{cenizas} - T_{amb}) + [hc * As * (T_s - T_{amb})]
 \end{aligned}$$

**Donde:**

- $\dot{m}_{Biomasa}$  : Cantidad de biomasa forestal utilizada en el gasificador [Kg/h ]
- $PCI_{biomasa}$  : Poder calorífico inferior de la biomasa forestal madera [KJ/kg ]
- $PCI_{gas}$  : Poder calorífico inferior del gas pobre [KJ/kg ]
- $h_{aire}$  : Entalpia del aire de acuerdo a sus condiciones de temperatura y presión [KJ/kg ]
- $h_{gas}$  : Entalpia del gas pobre en condiciones ideales de funcionamiento [KJ/kg ]
- $Cp_{cenizas}$  : Calor Específico de las cenizas [KJ/kg °K]
- $T_{cenizas}$  : Temperatura de las cenizas [°C]



$T_{amb}$	: Temperatura ambiente	[°C]
$hc$	: Coeficiente convectivo	[W/m°K]
$A_s$	: Área superficial de transferencia de calor	[m <sup>2</sup> ]
$T_s$	: Temperatura superficial del gasificador	[°C]

### 3.2.1. Cálculo de los parámetros del calor perdido

El calor que se pierde de una forma natural hacia el ambiente este fenómeno se conoce como perdida de calor por convección las tablas de números adimensionales se muestran en el **Anexo F**

$$Q_{perdido} = hc * A_s * (T_s - T_{amb}) \quad (10)$$

$$Q_{perdido} = (9,06 \text{ W/m}^2\text{°K}) * (6,09\text{m}^2) * (463\text{°K} - 293\text{°K})$$

$$Q_{perdido} = 9,38 \text{ kW}$$

$$hc = \frac{Nu * k}{L_c} \quad (11)$$

$$hc = \frac{773,72 * 0,03165 \text{ W/m}^2\text{°K}}{2,7\text{m}}$$

$$hc = 9,07\text{W/m}^2\text{°K}$$

Donde:

Nu : Numero de Nusselt es adimensional

K : Conductividad térmica del aire a temperatura fílmica [W/m°K]

Tf: Temperatura fílmica  $\left(T_f = \frac{T_s + T_{amb}}{2}\right)$  [°C]

Lc : Longitud característica del cuerpo [m]

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,378 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (12)$$

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,378 * (3,81 \times 10^{11})^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{0,7092} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 773,72$$

Donde:

$Ra$  : Número adimensional de Rayleigh

$Pr$  : Número de Prandtl tomado a temperatura fílmica del aire

$$Ra = \frac{g * \frac{1}{T_f} (T_s - T_{amb}) * L_c^3}{\nu^2} * Pr \quad (13)$$

$$Ra = \frac{9,81 * \frac{1}{105^\circ C} (190^\circ C - 20^\circ C) * (2,7m)^3}{(2,41 \times 10^{-5})^2} * 0,7092$$

$$Ra = 3,81 \times 10^{11}$$

Donde:

$g$  : Valor de la constante gravitacional [ $m/s^2$ ]

$\nu$  : Viscosidad cinemática del aire [ $m^2/s$ ]

### 3.3. Eficiencia del proceso de gasificación

#### 3.3.1. Eficiencia en frío del proceso de gasificación

Este tipo de eficiencia es conocida como eficiencia mecánica y necesita ser enfriada.

$$n_F = \frac{\dot{m}_{gas} * PCI_{gas}}{\dot{m}_{Biomasa} * PCI_{biomasa} + \dot{m}_{aire} * h_{aire}} \quad (14)$$

### 3.3.2. Eficiencia en caliente del proceso de gasificación

$$n_c = \frac{\dot{m}_{\text{gas}} * PCI_{\text{gas}} + \dot{m}_{\text{gas}} * h_{\text{gas}}}{\dot{m}_{\text{Biomasa}} * PCI_{\text{biomasa}} + \dot{m}_{\text{aire}} * h_{\text{aire}}} \quad (15)$$

El cálculo de las eficiencias del gasificador se presenta en el **Anexo G** debido a que el poder calorífico del gas de síntesis, se cuantifican en las cromatografías.

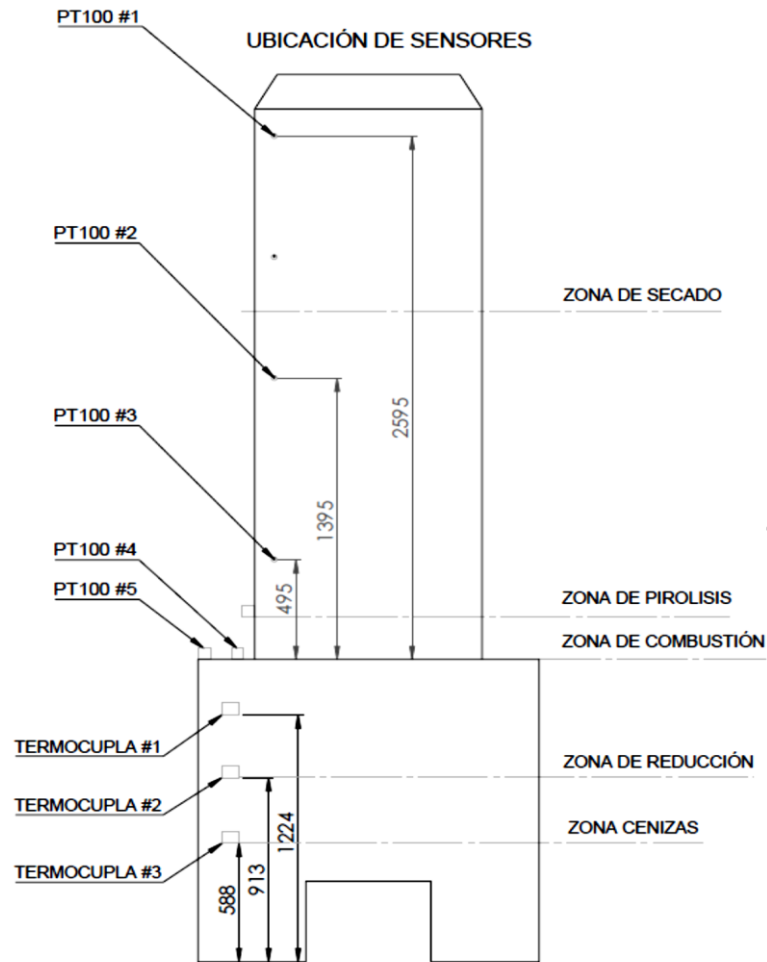
### 3.4. Determinación de la transferencia de calor mediante Instrumentación

Se realiza el análisis de transferencia de calor en el gasificador, para ello se utiliza instrumentación industrial para determinar las temperaturas máximas que se alcanza en cada zona en el proceso de gasificación, distribuida a lo largo del reactor.

**Tabla 3-3:** Instrumentación instalada de acuerdo a la temperatura máxima que alcanzan las zonas de gasificación

Zona de gasificación	Tipo de Termocupla utilizada	Temperatura de la zona de Gasificación °C	Temperatura Máxima de funcionamiento °C
Zona de Secado	PT100	100°C a 200°C	-200°C a 850°C
Zona de Pirolisis	PT100	300°C a 500°C	-200°C a 850°C
Zona de Combustión	PT100	100°C a 300°C	-270°C a 1370°C
Zona de Reducción o Gasificación	Tipo J	600°C a 1000°C	-270°C a 1370°C

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019



**Figura 2-3:** Zona de Gasificación de un reactor Downdraft

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.1. Tarjeta NI 6009

#### 3.4.1.1. Características de la tarjeta de adquisición DAQ Ni 6009

**Tabla 4-3:** Características de la tarjeta de adquisición DAQ Ni 6009

Tipo	Características
Número de entradas y numero de bits	8 entradas analógicas (14 bits, 48 KS/S)
Número de Salidas y tipo de salidas	2 salidas analógicas (12-bit, 150 S/S); 12 digital I/O; Contador de 32 bits
Forma de conexión	Con alimentación por camión (34 pines Conector para fácil integración)
Driver, software de conectividad	Windows, Mac OS X, Linux®, y PDA

Fuente: (National, 2014)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.1.2. Método de Conexión

El método de adquisición es de acuerdo al tipo de entradas y salidas que necesitamos es decir el número de sensores a ser utilizados como en este caso termocupla, Pt100 y sensores de presión diferencial.

Entradas y salidas digitales: Trabaja con tecnología TTL, la entrada digital programable trabaja en un rango de -0.5 a 5.8 V, se las puede programar como entrada o salida. En total son 12.

Entrada programable contador: Es programable para usar como entrada en un contador de eventos.

Salidas analógicas: Posee 2 salidas análogas las cuales no son individuales y se usa con la tierra. El rango de voltaje es de 0 a +5V con impedancia de salida de 50z y una corriente de 5mA. DAQ (Turmero, 2007)

**Tabla 5-3:** Entradas / Salidas analógicas del borne 1 al 16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
GN	+A 0-		GN	+A 1-		GN	+A 2-		GN	+A 3-		GN	AO	AO	GN
D			D			D			D			D	0	1	D
GN	A	A	GN	A	A	GN	A	A	GN	A	A	GN	AO	AO	GN
D	0	4	D	1	5	D	2	6	D	3	7	D	0	1	D

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2015)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 6-3:** Entradas / Salidas digitales, +5V y tierra del borne 17 al 32

32	32	30	29	28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	18	17
GN	+5	+2.5	PF	P1.	P1.	P1.	P1.	P0.	P0.	P0.	P0.	P0.	P0.	P0.	P0.
D	V	V	0	3	2	1	0	7	6	5	4	3	2	1	0

Fuente: (RODRÍGUEZ, 2015)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.2. Sensor PT100

#### 3.4.2.1. Características del sensor Pt100

La característica más importante de los elementos Pt100 es que están fabricados de platino con una resistencia eléctrica de 100 ohmios a una temperatura de 0 °C y es con diferencia el tipo más común de sensor RTD.

**Tabla 7-3:** Características del sensor Pt100

Atributo	Valor
Tipo de Sensor	Pt100
Longitud de la Sonda	200mm
Diámetro de la Sonda	8mm
Mínima temperatura Detectada	-100°C
Máxima temperatura Detectada	1200°C
Tipo de Terminación	Cabezal de conexión
Material de la Sonda	Acero Inoxidable
Numero de Cables	3
Precisión	Clase A

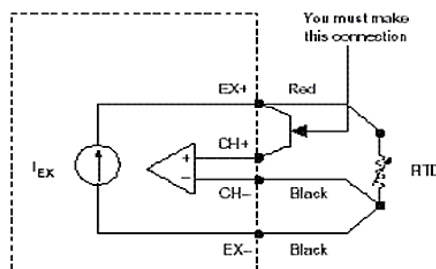
Fuente: (ARIAN, 2008)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.2.2. Método de conexión

Todos los RTD tienen un código de identificación en sus cables como es rojo o negro y blanco el cable rojo es el cable de excitación; mientras que los cables negros o blancos corresponden a los cables de tierra. Si la resistencia medida es cercana a la resistencia nominal de la galga (100 ohm es una resistencia nominal común para una galga RTD) entonces los cables que se están midiendo están en lados opuestos del elemento resistivo.

Conecte el cable rojo del RTD a la excitación positiva. Puentee la excitación positiva al canal positivo en el dispositivo DAQ. Conecte uno de los cables negros (o blancos) del RTD a la excitación negativa y el otro al canal negativo. (National, 2014)



**Figura 3-3:** Método de conexión RTD

Fuente: (National, 2014)

### 3.4.3. Termocupla tipo J

#### 3.4.3.1. Características de las termocuplas tipo J

La principal característica es su función en ambientes con poco contenido de oxígeno. Y sus temperaturas elevadas de trabajo en procesos industriales. El termopar produce una salida de voltaje que se puede correlacionar con la temperatura que el termopar está midiendo.

**Tabla 8-3:** Características de los Termopares

Características de los Termopares				
Termopar	Composición	Intervalo de utilización	f.e.m m V/C	Utilización
Tipo S	Pt puro Pt 90% Rh 10%	800 a 1000°C	0,010	En Atmosferas oxidantes. En atmosferas normales protege con tubo de acero.
Tipo R	Pt puro Pt 87% Rh 13%	800 a 1000°C	0,012	En Atmosferas oxidantes. En atmosferas normales protege con tubo de acero.
Tipo T	Cu Puro Cu 54% Ni 46%	-250 a 600°C	0,052	En Atmosferas oxidantes y reductoras. Elevada resistencia a la corrosión
Tipo K	Ni 90%; Cr 10% Ni 90%; Al 4% Si 2.5%; Mn 3.5%	500 a 1250°C	0,04	En Atmosferas oxidantes.
Tipo J	Fe puro Cu 54% Ni 46%	-250 a 1000°C	0,055	En Atmosferas oxidantes con poco oxígeno.

Fuente: (Janampa, 2012)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 9-3:** Características de la termocuplas tipo J

Atributo	Valor
Mínima temperatura Detectada	-40 °C
Máxima temperatura Detectada	+750 °C
Sensibilidad	55 $\mu$ V/°C
Color del cable positivo	blanco
Color del cable negativo	Rojo

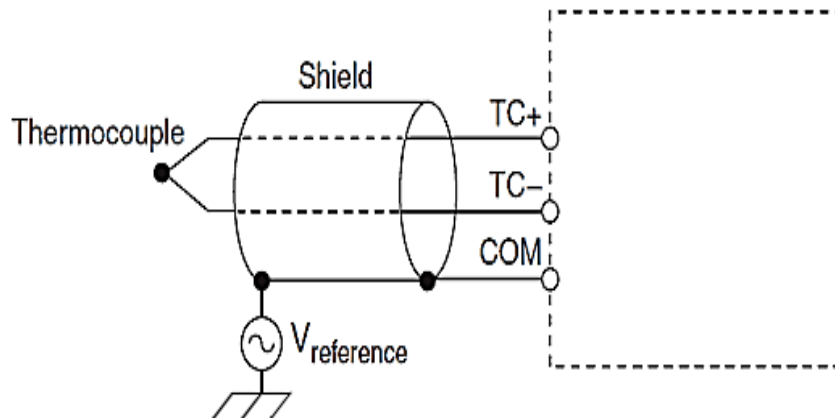
Fuente: (Unitek, Miyachi, 2016)

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.3.2. Método de conexión de la termocupla tipo J

Cada cable termopar tiene una punta positiva y una punta negativa. El diagrama de conexión indica cuales pines en su dispositivo DAQ deben estar cableados de acuerdo al canal físico que seleccionó. Conecte el polo positivo del termopar a la terminal TC+ y el polo negativo del termopar a la terminal TC-. Si no está seguro cuál de los polos es positivo y cual es negativo, consulte la documentación del termopar o el carrete del cable del termopar.

Se conecta el terminal COM de su dispositivo a la protección y la protección a una referencia de voltaje de modo común del termopar. Una referencia de voltaje de modo común es un voltaje que está entre  $\pm 1.2$  V del voltaje de modo común del termopar. Si está usando un termopar flotante o un termopar entre  $\pm 1.2$  V de tierra, conecte COM y la protección a la tierra. La metodología de protección a tierra puede variar dependiendo de la aplicación. (Nacional, 2010)



**Figura 4-3:** Conectar un Termopar Blindado

Fuente: (Nacional, 2010)

### 3.4.4. Transductor de presión diferencial MPX5500

#### 3.4.4.1. Características del sensor MPX5500

La característica principal es la presión diferencial que puede ser aplicada desde 0 a 500 kPa. Con un voltaje de salida que va desde 0.2V a 4.7 V de salida.

**Tabla 10-3:** Características del sensor MPX5500

CARACTERISTICAS TECNICAS				
Parámetro	Mínimo	Típico	Máximo	Unidades
Presión de trabajo	0	–	250	kPa



**Tabla 10-3 (Continúa):** Características del sensor MPX5500

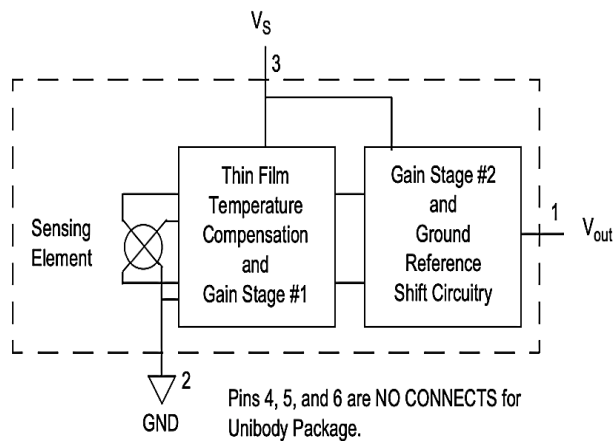
Voltaje de alimentación	4.85	5.1	5.35	V
Corriente de Suministro	-	7	10	mA
Temperatura de trabajo	- 40	25	125	°C
Offset sin presión	0.139	0.204	0.269	V
Voltaje de Salida	4.844	4.909	4.974	V
Sensibilidad	-	18.8	-	mV/kPa
Cubierta	6 pin			
Estilo de montaje	Through hole PCB			
Tipo de presión	Diferencial			
Fabricante	Freescle			

**Fuente:** (Laboratorio de Electrónica Europe, 2008)

**Realizado por:** Herrera, Raúl. 2019

### 3.4.4.2. Método de conexión

Este sensor está diseñado para aplicaciones en las que P1 siempre es mayor o igual que P2. P2 máximo es de 500 kPa La Figura 9-3 muestra un diagrama de bloques de los circuitos internos integrados en un chip sensor de presión. (Freescle Semiconductor Inc., 2009)



**Figura 5-3:** Sensor de Presión Integrado

**Fuente:** (Unbranded/Generic, 2008)

### 3.5. Programación en Labview

La programación se diseñó en el programa Labview 1 (Freescale Semiconductor Inc., 2009), cual nos permite obtener los datos en tiempo real de temperatura y presión, al mismo tiempo el programa respalda la información en un archivo Excel.

Durante la programación se utiliza los dos tipos de sensores más utilizados en la industria los PT100 y Termocuplas tipo j por la elevada temperatura de trabajo, cada una de ella posee una programación independiente en el programa Labview porque se utilizar una tarjeta de adquisición de datos NI 6009 la cual con sus respectivas librerías necesarias para su comunicación y un micro controlador arduino debido a las limitadas entradas que posee la tarjeta de adquisición.

En Labview la mayor parte de la programación se realiza mediante bloques por ejemplo operaciones básicas como suma, resta, multiplicación conversión con vectores, matriz, conversión de unidades como por ejemplo de valores string o caracteres a números.

En esta programación se optó por la forma más simplificada que mediante la utilización de una librería que existe en Labview llamada formula node la cual podemos ingresar entradas y salidas dependiendo de la necesidad, e internamente la programación se realiza código plano, semejante a la programación en Matlab.

La programación tanto la tarjeta de adquisición como para el microcontrolador es necesario instalar librerías previas en Labview el cual nos permitirá la correcta comunicación entre los dispositivos, cabe recalcar que la comunicación del microcontrolador y Labview se realiza mediante comunicación serial es decir se envía desde el microcontrolador datos de temperatura compactos labview se encarga de descomponer los datos en datos independientes.

#### 3.5.1. Programación de Termocuplas

La programación de las termocuplas se utiliza el programa arduino y además de un componente electrónico llamado Max 6675 este es modulo dedicado a lectura de termocuplas y se comunica con casi cualquier micro controlador, la maquina posee 3 termocuplas con su respectivo modulo.



**Figura 6-3:** Módulo Max 6675

**Fuente:** (COMPONENTS SMC, 2013)

Dentro de la programación se utilizó una librería de arduino dedicada a la utilización del Max 6675 la cual facilita la lectura de temperatura de cada sensor.

Después de la obtención de las temperaturas continua el proceso de empaquetación de los datos mediante la transformación de los datos string y concatenación de los mismo y él envió de ellos mediante comunicación serial al Labview.

```
void loop ()
{
int t1=termo1.readCelsius()/1.5;
int t2=termo2.readCelsius()/1.3;
int t3=termo3.readCelsius()/1.2;
String e="";
String te1 = " A "+String(t1) +" B ";
String te2 = String(t2)+" C ";
String te3 = String(t3) +" D ";
e=te1+te2+te3+te4;
Serial.println(e);
delay(2000);
```

```
#include <max6675.h>
-----
// ThermoCouple
int so1 = 5;
int so2 = 6;
int so3 = 8;
int so4 = 7;
int cs = 9;
int sck = 10;
-----
MAX6675 termo1(sck, cs, so1);
MAX6675 termo2(sck, cs, so2);
MAX6675 termo3(sck, cs, so3);
void setup ()
{
Serial.begin(9600);
}
```

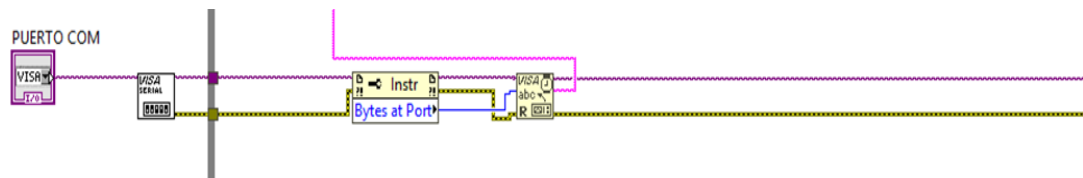
**Figura 7-3:** Código de programación en arduino para las termocuplas

**Fuente:** Herrera, Raúl. 2019

En la figura 7-3 se puede apreciar la programación en código arduino la toma y empaquetamiento y envío.

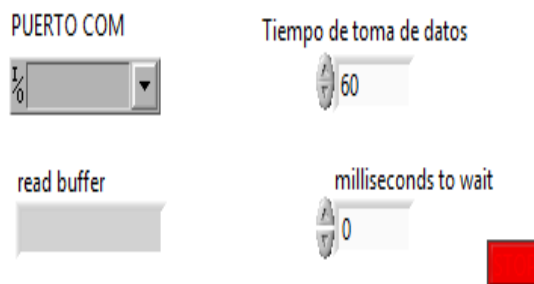
### 3.5.1.1. Programación en Labview

En la programación en labview específicamente para las termocupas se utilizó la librería Visa para envío y recepción de datos serial. Después de la lectura de los datos los datos obtenidos son caracteres de tipo string, por lo cual en Labview se logra una descomposición estos datos mediante bloques de comparación de caracteres y posición en Labview.



**Figura 8-3:** Etapa de configuración de la comunicación de Labview y el micro controlador  
**Realizado por:** Herrera, Raúl. 2019

## Panel de Configuración



**Figura 9-3:** Panel frontal de configuración del programa Labview

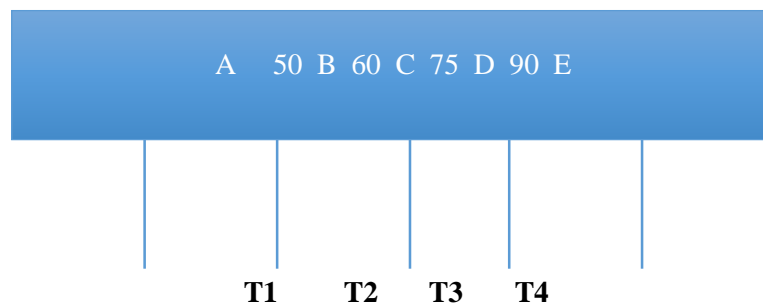
**Realizado por:** Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 11-3:** Lectura de Termocuplas

Termocuplas	Programación
1	
2	
3	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

Como se aprecia en el ejemplo gráfico 11-3 se puede observar que cada sensor está separado por caracteres dependiendo de cada sensor, por ejemplo, si se tiene termocupla 1 50 grados centígrados termocupla 2: 60 grados centígrados termocupla 3: 75 termocupla 4: 90 grados centígrados dentro del programa aparecerá, la programación en Labview se encarga de separar los valores además de realizar el proceso de visualización mediante el indicador gráfico de temperatura.

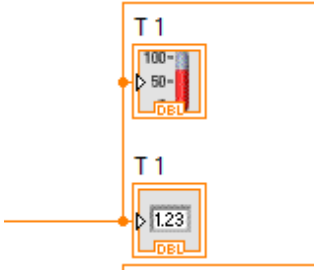
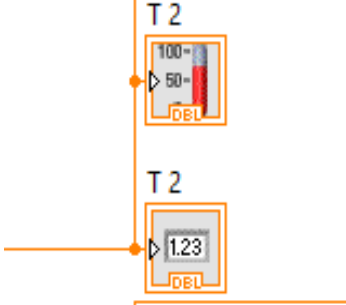
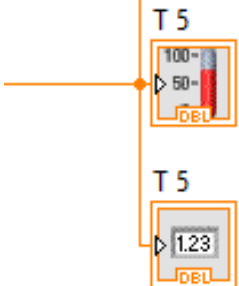


**Figura 10-3:** Método de separación de caracteres de los sensores

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

3.5.1.2. Adquisición y Lectura mediante indicadores gráficos

**Tabla 12-3:** Adquisición y Lectura mediante indicadores gráficos

Termocuplas	Indicadores
1	
2	
3	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

3.5.2. Programación del sensor Pt100

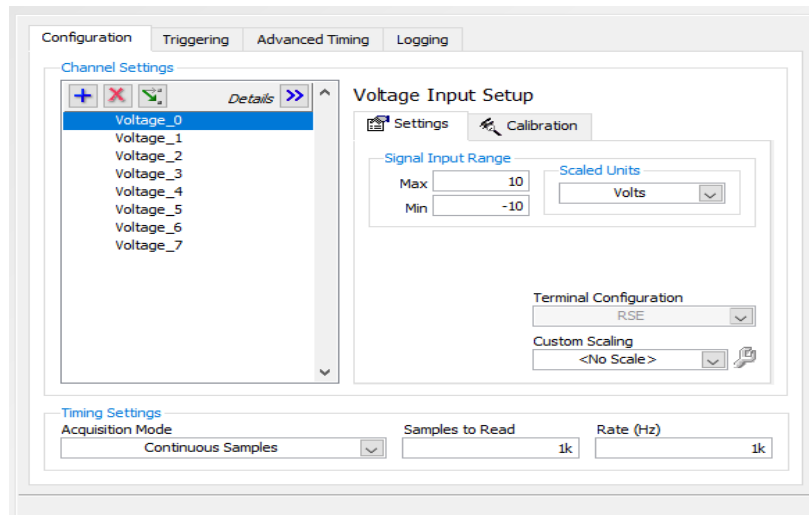
Los sensores Pt100 como bien se conoce son sensores RTD por lo cual el circuito básico es el divisor de voltaje la resistencia que se ocupa para este sensor es de 100 ohmios debido a que en 100 ohm el sensor está en cero grados Celsius.

La lectura de voltaje del divisor se utilizó una NI DAQ que lee entradas de voltaje, gracias a los elementos ya conocidos como voltaje y resistencia podemos despejar la resistencia del sensor y por ende la temperatura del mismo.

Mediante fórmulas ingresadas en el programa Labview se despeja la temperatura en grados centígrados estos datos también son mostrados por elementos gráficos.

### 3.5.2.1. Programación en Labview

Inicialmente se debe configurar la tarjeta de adquisición para ello utilizamos un elemento de la librería NI DAQ, los valores a configurar para este trabajo solo son entradas analógicas como se puede apreciar en la figura.

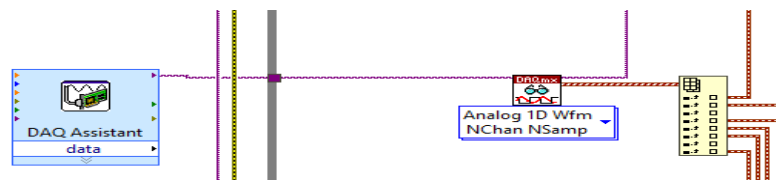


**Figura 11-3:** Programación del sensor Pt100

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.5.2.2. Lectura de los sensores Pt100

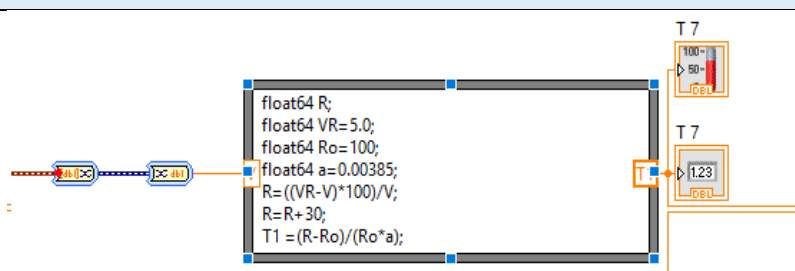
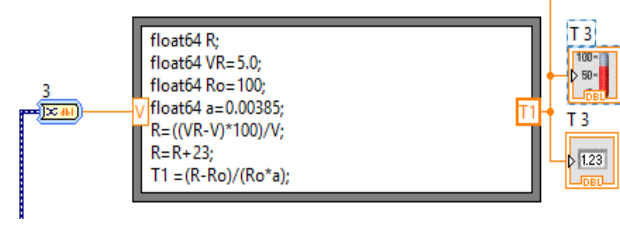
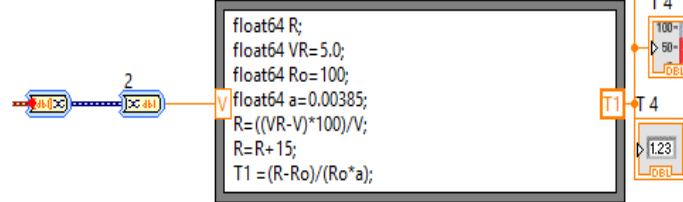
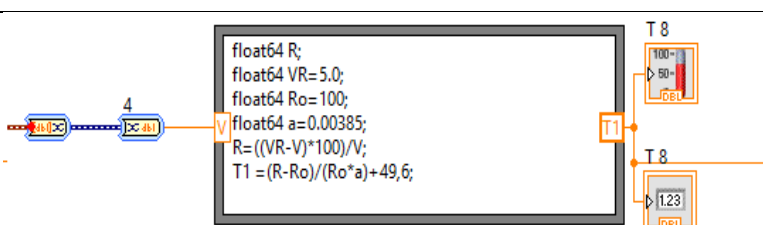
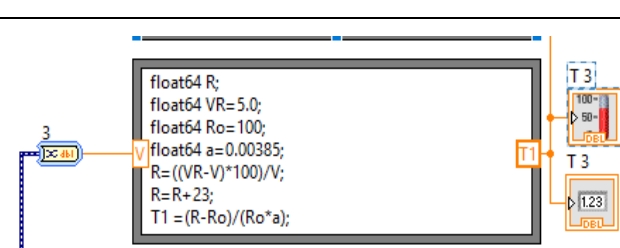
Para la lectura se utiliza dos bloques DAQmx Read y un Index array, el primer bloque realiza la lectura de los datos de voltaje el segundo separa los datos en orden para mostrarlos y almacenarlos.



**Figura 12-3:** Lectura de los sensores Pt100

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 13-3:** Programación de los sensores Pt100

Pt 100	Programación
1	 <pre> float64 R; float64 VR=5.0; float64 Ro=100; float64 a=0.00385; R=((VR-V)*100)/V; R=R+30; T1=(R-Ro)/(Ro*a);                     </pre>
2	 <pre> float64 R; float64 VR=5.0; float64 Ro=100; float64 a=0.00385; R=((VR-V)*100)/V; R=R+23; T1=(R-Ro)/(Ro*a);                     </pre>
3	 <pre> float64 R; float64 VR=5.0; float64 Ro=100; float64 a=0.00385; R=((VR-V)*100)/V; R=R+15; T1=(R-Ro)/(Ro*a);                     </pre>
4	 <pre> float64 R; float64 VR=5.0; float64 Ro=100; float64 a=0.00385; R=((VR-V)*100)/V; T1=(R-Ro)/(Ro*a)+49,6;                     </pre>
5	 <pre> float64 R; float64 VR=5.0; float64 Ro=100; float64 a=0.00385; R=((VR-V)*100)/V; R=R+23; T1=(R-Ro)/(Ro*a);                     </pre>

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.5.3. Programación de los sensores de presión diferencial

Para la obtención de los datos de caudal se utilizó un sensor MPX 5500 el cual mide una presión diferencial medida en kPa y mediante la fórmula de placa orificio se obtiene un flujo másico tanto de gas de síntesis como aire.





**Figura 13-3:** Sensor de presión diferencial MPX5500

**Fuente:** (Unbranded/Generic, 2008)

### 3.5.3.1. Programación en Labview

La programación en Labview se utiliza el mismo bloque de lectura del PT100 luego se utilizan los pines 3 y 7 de la tarjeta de adquisición de datos NI 6009 se introdujo la fórmula para convertir el voltaje de sensor en presión diferencial.

$$P = (V - offset) * 500.0 / (fullScale - offset) \quad (16)$$

Donde:

P: presión [kPa]

V: voltaje medido [V]

Offset: medida de referencia adimensional

fullScale: medida máxima de presión [N/m<sup>2</sup>]

### 3.5.3.2. Lectura de los sensores de presión diferencial

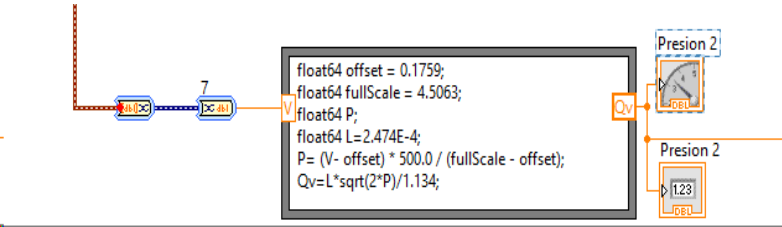
La fórmula de placa orificio mediante al cual la presión diferencial es transformada a una unidad de caudal se expresa tanto para el sensor que mide gas de síntesis como para el que mide entrada aire, tomando en cuenta sus diferentes características físicas especialmente su densidad.

**Tabla 14-3:** Programación del sensor de presión diferencial a la salida del gas de síntesis

Sensor de Presión diferencial gas de síntesis	Programación
1	

Elaborado por: Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 15-3:** Programación del sensor de Presión diferencial de entrada aire

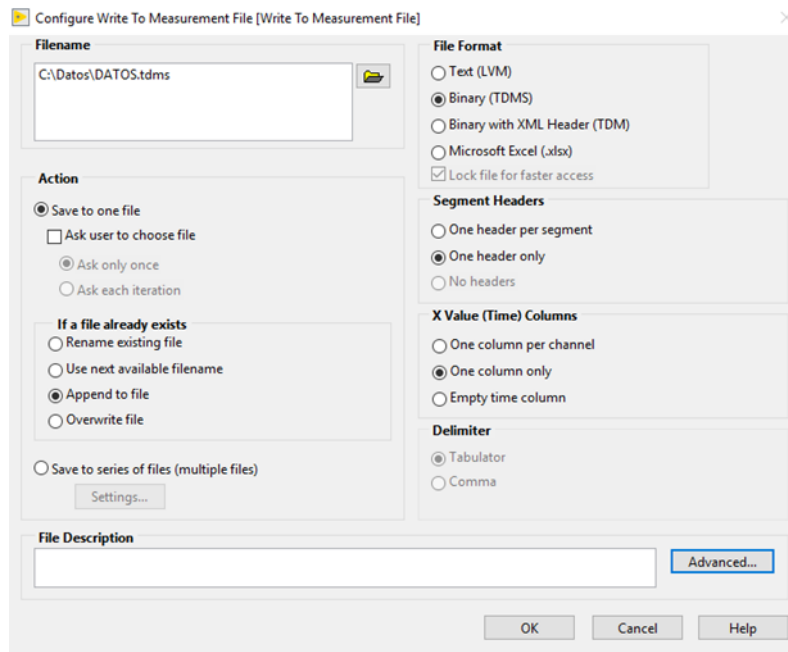
Sensor de Presión diferencial de entrada aire	Programación
2	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.5.4. Programación del Sistema de adquisición de datos

Para el proceso de adquisición de datos gracias a las nuevas herramientas de Labview dicho proceso se puede realizar de una manera más rápida y eficiente.

Mediante la utilización de bloques Write to measurement file el cual internamente puede crear archivos en el software .excel con extensiones de archivo, .tdms o binarios y en tipo texto como .txt. Además, los datos guardados se pueden ir a acoplado a los adquiridos con anterioridad. Con esto facilita la visualización de los mismos.



**Figura 14-3:** Programación del Sistema de adquisición de datos

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.5.4.1. Programación en Labview

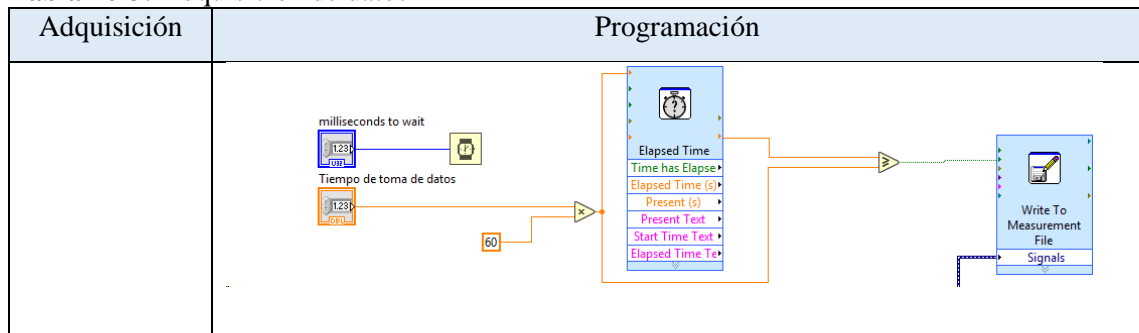
Dentro de la programación se basa en dos bloques el primer bloque es un bloque de activación de la adquisición que depende del comando Elapset Time el cual está programado de la necesidad del usuario funciona únicamente en segundos.

En el segundo bloque Write to File cuyo enable está conectado a la etapa de activación y las señales provienen de Merge Signals es un multiplexor de señales). Donde se concatenan todas las señales de temperatura y presión para su respectivo almacenamiento la dirección y tipo se define previamente en el bloque Write para el presente trabajo se optó por utilizar tipo tdm.

### 3.5.4.2. Adquisición de datos

La adquisición de datos genera un archivo en .exe el cual muestra mediante, una hoja de datos la fecha y el tiempo al cual se midieron los valores de las temperaturas de las termocuplas tipo J, los sensores Pt 100 y los sensores de caudal, la programación completa se muestra en el **Anexo G**

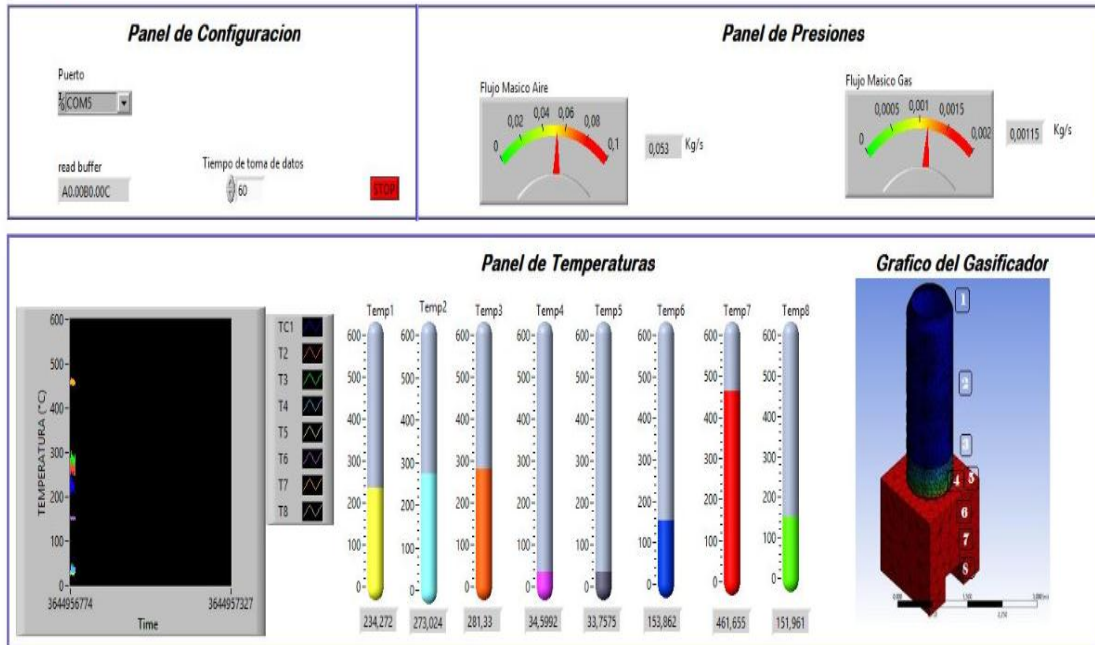
**Tabla 16-3:** Adquisición de datos



Realizado por: Herrera, Raúl. 2019



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE MECÁNICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**GASIFICADOR**



**Figura 15-3:** Panel frontal del sistema de adquisición de datos

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

### 3.6. Determinación de la temperatura en base a la longitud del gasificador

#### 3.6.1. Convección forzada en un flujo interno

Al aplicar un balance de energía al flujo interno en un tubo de un gas ideal o de un líquido incompresible se obtiene que la transferencia de calor por convección al fluido es igual a la rapidez a la que aumenta la energía térmica del fluido. (Ramos, Juan. 2007)

$$q_{conv} = \dot{m}C_p(T_{m,sal} - T_{m,ent}) \quad (17)$$

#### 3.6.2. Variación axial de la temperatura media para el caso de la temperatura superficial constante

Cuando al integrar x cuando tiende a cero

$$T_m(x) = T_{m,ent} + \frac{q_s''}{\dot{m}C_p} x \quad (18)$$

### 3.6.3. Variación axial de la temperatura media para el caso de temperatura superficial constante

$$\frac{T_s - T_m(x)}{T_s - T_{m,ent}} = \exp\left(-\frac{Px}{\dot{m}C_p} \bar{h}\right) \quad (19)$$

En donde  $\bar{h}$  es un valor promedio de  $h$  desde el inicio del tubo hasta  $x$ . Este resultado nos dice que la diferencia de temperaturas ( $T_s - T_m$ ) disminuye exponencialmente con la distancia a lo largo del eje del tubo. Las distribuciones de las temperaturas superficiales axiales y media.

La transferencia total de calor se expresa en función de la diferencia de temperaturas media logarítmica

$$q_{conv} = \bar{h}A_s \Delta T_{ml} \quad (20)$$

El área superficial alrededor del tubo  $A_s$  es igual al perímetro por su longitud y  $\Delta T_{ml}$  es la diferencia media logarítmica de temperaturas *DMLT*

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{sal} - \Delta T_{ent}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}}\right)} = \frac{(T_s - T_{m,sal}) - (T_s - T_{m,ent})}{\ln\left[\frac{(T_s - T_{m,sal})}{(T_s - T_{m,ent})}\right]} \quad (21)$$

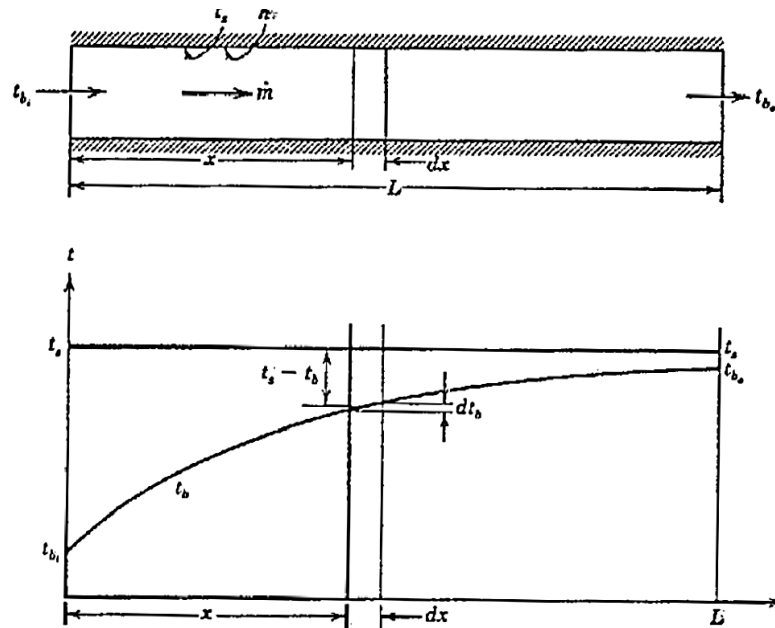
Cuando el tubo rodeado de un fluido externo se tiene unas convecciones internas y externas simultáneas.

$$\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}} = \frac{T_\infty - T_{m,sal}}{T_\infty - T_{m,ent}} = \exp\left(-\frac{\bar{U}A_s}{\dot{m}C_p}\right) \quad (22)$$

Como se muestra en la ecuación 21 la temperatura superficial  $T_s$  se mantiene constante es la temperatura de fluido externo y se reemplaza por  $T_\infty$  denominada temperatura del fluido externo, además  $\bar{h}$  es reemplazado por  $\bar{U}$  denominado coeficiente global promedio de transferencia de calor.

$$q_{conv} = \bar{U}A_s \Delta T_{ml} \quad (23)$$

El coeficiente global de transferencia de calor encierra la convección de las superficies tanto externa como interna del cilindro. El análisis se realiza para un cilindro de pared delgada con una conductividad térmica reducida con un efecto de conducción por medio de la pared del mismo



**Figura 16-3:** Análisis de transferencia de calor por convección  
Fuente: Transferencia de calor Cengel 2004

La sumatoria de las resistencias térmicas  $\bar{U}A_s$  está definida en términos de áreas de la superficie externas  $\bar{U}_{sal}A_{s,ext}$  internas del cilindro o  $\bar{U}_{ent}A_{s,int}$  del cilindro teniendo así  $((\Sigma R_{tot})^{-1} = U_1A_1 = U_2A_2 = U_3A_3 = U_4A_4)$ , es decir  $(\bar{U}A_s^{-1})$  es el coeficiente global promedio de transferencia de calor engloba los dos fluidos que generan convección a lo largo del cilindro como se muestra en la siguiente ecuación.

$$\frac{\Delta T_{sal}}{\Delta T_{ent}} = \frac{T_{\infty} - T_{m,sal}}{T_{\infty} - T_{m,ent}} = \exp\left(-\frac{1}{\dot{m}C_p R_{tot}}\right) \quad (24)$$

$$q_{conv} = \frac{\Delta T_{ml}}{R_{tot}} \quad (25)$$

### 3.6.4. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección

Las consideraciones de transferencia de calor por convección se tiene que la temperatura superficial ( $T_s$ ) permanece constante en la parte externa del cilindro del gasificador.

Siendo  $P$  el perímetro del cilindro, tenemos:

$$dQ = h \cdot P \cdot dx \cdot (T_s - T_m) = m \cdot Cp \cdot dT_m \quad (26)$$

$$\frac{dT_m}{T_m - T_s} = -\frac{h \cdot P}{m \cdot Cp} \cdot dx \quad (27)$$

Integrando:

$$\frac{T_{m,x} - T_s}{T_{m,ent} - T_s} = e^{-\frac{h \cdot P}{m \cdot Cp} \cdot x} \quad (28)$$

Mediante la ecuación 27-3 se puede obtener los valores de  $h$  de acuerdo a las lecturas de las termocuplas y Pt100 instalados en el gasificador.

La temperatura después de un tiempo pasa a un estado estable con muy poca variación en las lecturas se estabilizan para aquello podemos aplicar la ecuación 24-3

$$\ln\left(\frac{T_{m,x} - T_s}{T_{m,ent} - T_s}\right) = \left(-\frac{h \cdot P}{m \cdot Cp} \cdot x\right) \quad (29)$$

Despejando  $h$  de la ecuación 27

$$h = -\ln\left(\frac{T_{m,x,sal} - T_s}{T_{m,ent} - T_s}\right) \cdot \left(\frac{\dot{m} \cdot Cp}{P \cdot x}\right) \quad (30)$$

Donde,

$h$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección.  $[W/m^2 \cdot ^\circ K]$

$T_{m,sal}$  : Temperatura a la salida o final.  $[^\circ K]$

$T_{m,ent}$  : Temperatura a la entrada o inicial.  $[^\circ K]$

$T_s$  : Temperatura superficial del gasificador.  $[^\circ K]$

$\dot{m}$  : Flujo másico de gas.  $[Kg/h]$

$Cp$ : Poder calorífico del gas de síntesis.  $[KJ/Kg \cdot ^\circ K]$

P: Perímetro del gasificador [m]

x: Altura entre T<sub>m(sal)</sub> e T<sub>m(ent)</sub> [m]

### 3.6.5. Cálculo del coeficiente transferencia de calor por convección

El valor de temperatura superficial es tomado de la temperatura ambiente en el momento de gasificar, el poder calorífico del gas de síntesis se tomó de las propiedades de los gases cuyo valor representativo es del nitrógeno mostradas en el **Anexo H** y el flujo másico se adquirió de los sensores instalados, al llegar al punto de estabilidad de igual manera que las temperaturas de inicio y final que corresponden a las termocuplas 1 y 3.

$$h = -\ln\left(\frac{345^{\circ}K - 293^{\circ}K}{703^{\circ}K - 293^{\circ}K}\right) * \left(\frac{(1,18 * 10^{-3} \text{Kg/s}) * (1,04 \text{J/Kg} * ^{\circ}K)}{(3,1416)(0,9\text{m})(0,49\text{m})}\right)$$

$$h = -\ln\left(\frac{52,00}{410,00}\right) * \left(\frac{1,6402}{1,385}\right) \quad [\text{W/m}^2 * ^{\circ}K]$$

$$h = -\ln(0,127) * (1,184) \quad [\text{W/m}^2 * ^{\circ}K]$$

$$h = (2,063) * (1,184) \quad [\text{W/m}^2 * ^{\circ}K]$$

$$h = 2,44 \quad [\text{W/m}^2 * ^{\circ}K]$$

Como se puede notar el coeficiente de transferencia de calor por convección varía de acuerdo a las temperaturas de cada punto donde se ubican los sensores de manera horizontal y de acuerdo a la distancia entre ellos, para lo cual calcularemos los diferentes valores de (*h*).

#### 3.6.5.1. Determinación de coeficiente de transferencia de calor [*h*<sub>1</sub>]

Para una temperatura  $T_{m_x, sal} = 299,81^{\circ}K$  y una altura (*x*)= 1m

$$h_1 = -\ln\left(\frac{299,81^{\circ}K - 293^{\circ}K}{703^{\circ}K - 293^{\circ}K}\right) * \left(\frac{(1,18 * 10^{-3} \text{Kg/s}) * (1,39 \text{J/Kg} * ^{\circ}K)}{(3,1416)(0,9\text{m})(1,0\text{m})}\right)$$



$$h_1 = -\ln\left(\frac{6,81}{410,00}\right) * \left(\frac{1,6402}{2,827}\right) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_1 = -\ln(0,0166) * (0,58) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_1 = (4,098) * (0,58) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_1 = 2,377 \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

### 3.6.5.2. Determinación de coeficiente de transferencia de calor [ $h_2$ ]

Para una temperatura  $T_{mx,sal} = 299,81^\circ\text{K}$  y una altura  $(x) = 1\text{m}$

$$h_2 = -\ln\left(\frac{298,01^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K}}{703^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K}}\right) * \left(\frac{(1,18 * 10^{-3}\text{Kg/s}) * (1032)/\text{Kg} * ^\circ\text{K}}{(3,1416)(0,9\text{m})(1,89\text{m})}\right)$$

$$h_2 = -\ln\left(\frac{5,00}{410,00}\right) * \left(\frac{1,6402}{5,343}\right) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_2 = -\ln(0,0122) * (0,307) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_2 = (4,403) * (0,307) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_2 = 1,351 \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

### 3.6.5.3. Determinación de coeficiente de transferencia de calor [ $h_3$ ]

Para una temperatura  $T_{mx,sal} = 298,0^\circ\text{K}$  y una altura  $(x) = 2,7\text{m}$

$$h_3 = -\ln\left(\frac{298^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K}}{703^\circ\text{K} - 293^\circ\text{K}}\right) * \left(\frac{(1,18 * 10^{-3}\text{Kg/s}) * (1039)/\text{Kg} * ^\circ\text{K}}{(3,1416)(0,9\text{m})(2,7\text{m})}\right)$$

$$h_3 = -\ln\left(\frac{5,00}{410,00}\right) * \left(\frac{1,226}{7,634}\right) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_3 = -\ln(0,0122) * (0,1605) \quad [\text{W/m}^2 * ^\circ\text{K}]$$

$$h_3 = (4,40) * (0,885) \quad [\text{W/m}^2 * \text{°K}]$$

$$h_3 = 3,899 \quad [\text{W/m}^2 * \text{°K}]$$

### 3.6.6. Determinación de las temperaturas a lo largo del gasificador

Al obtener los coeficientes de convección, se puede determinar las temperaturas a cualquier punto a lo largo de la longitud del gasificador, para ello se utilizó la ecuación 25-3 y la dejaremos en función de la temperatura  $T_{m,x}$

$$\frac{T_{m,x} - T_s}{T_{m,ent} - T_s} = e^{-\frac{h \cdot P}{m \cdot C_p} \cdot x}$$

Despejando la ecuación:

$$T_{m,x} = \left[ e^{\left( -\frac{h \cdot P}{m \cdot C_p} \cdot x \right)} \right] * (T_{m,ent} - T_s) + T_s \quad (31)$$

#### 3.6.6.1. Determinación de las temperaturas de en función de la longitud del gasificador

$$T_{m,x} = \left[ e^{\left( -\frac{(2,436 \text{ [W/m}^2 \cdot \text{°K]}) \cdot (2,82\text{m}) \cdot (0,324\text{m})}{(1,18 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/s}) \cdot (1032 \text{ J/Kg} \cdot \text{°K})} \right)} \right] * (703 \text{°K} - 293 \text{°K}) + 293 \text{°K}$$

$$T_{m,x} = \left[ e^{\left( -\frac{(2,220)}{1,21776} \right)} \right] * (410 \text{°K}) + 293 \text{°K}$$

$$T_{m,x} = 0,161 * (410 \text{°K}) + 293 \text{°K}$$

$$T_{m,x} = (66,23 \text{°K}) + 293 \text{°K}$$

$$T_{m,x} = 359,23 \text{°K}$$

**3.6.7. Ejemplo de la tabla de cálculo para la obtención de la gráfica variación de temperatura en función de la longitud del gasificador**

**Tabla 17-3: Cálculo de Temperaturas a lo largo del gasificador**

Longitud (m)	Tm ent (K)	Ts (K)	h (W/m <sup>2</sup> K)	P (m)	Cp gas(l/kg k)	Flujo masico de gas (Kg/s)	Tm (x) C	Tm (x) K
0	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	365,000	638,000
0,054	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	233,916	506,916
0,108	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	153,371	426,371
0,162	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	103,878	376,878
0,216	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	152,152	425,152
0,27	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	54,781	327,781
0,324	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	47,299	320,299
0,378	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	36,244	309,244
0,432	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	31,909	304,909
0,486	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	29,245	302,245
0,54	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	27,609	300,609
0,594	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	26,603	299,603
0,648	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,985	298,985
0,702	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,605	298,605
0,756	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,372	298,372
0,81	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,228	298,228
0,864	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,140	298,140
0,918	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,086	298,086
0,972	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,053	298,053
1,026	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,033	298,033
1,08	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,020	298,020
1,134	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,012	298,012
1,188	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,008	298,008
1,242	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,005	298,005
1,296	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,003	298,003
1,35	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,002	298,002
1,404	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,001	298,001
1,458	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,001	298,001
1,512	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,566	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,62	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,674	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,728	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,782	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,836	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,89	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,944	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
1,998	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,052	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,106	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,16	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,214	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,268	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,322	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,376	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,43	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,484	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,538	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,592	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,646	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000
2,7	638	298	3,88	2,82	1032	0,001172	25,000	298,000

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019






Las tablas para cada una de las gasificaciones se muestran en el *Anexo I*

## CAPÍTULO IV


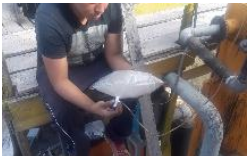
### 4. ANÁLISIS DE CURVAS DE TEMPERATURA, FLUJOS MASICOS DE GAS Y AIRE, Y CARACTERÍSTICAS DE BIOMASA FORESTAL

En el presente capítulo se realizará la adquisición de datos y la valoración de los mismos, las curvas de temperatura en el transcurso del tiempo de las termocuplas y Pt100, la variación del flujo másico de aire y de gas de síntesis. También comprende el análisis de cromatografías y la interpretación de los resultados

**Tabla 1-4:** Proceso de gasificación

PROCESO DE GASIFICACION 1	
Encendido del gasificador	
Verificación de la llama adecuada del gasificador	
Suministro de biomasa en el gasificador 40kg/h	
Cierre de entradas de aire para una correcta gasificación con deficiencia de aire.	
Adquisición de datos de temperatura y flujos másicos en el gasificador.	

**Tabla 1-4 (Continua):** Proceso de gasificación

<p>Verificación en la tobera de existencia de gas para la toma las muestras comprobando el encendido del gas de síntesis.</p>	
<p>Toma de muestras de gas en fundas teslar para su respectivo análisis instrumental en la Escuela Politécnica Nacional.</p>	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

#### 4.1. Datos de la Gasificación Numero 1

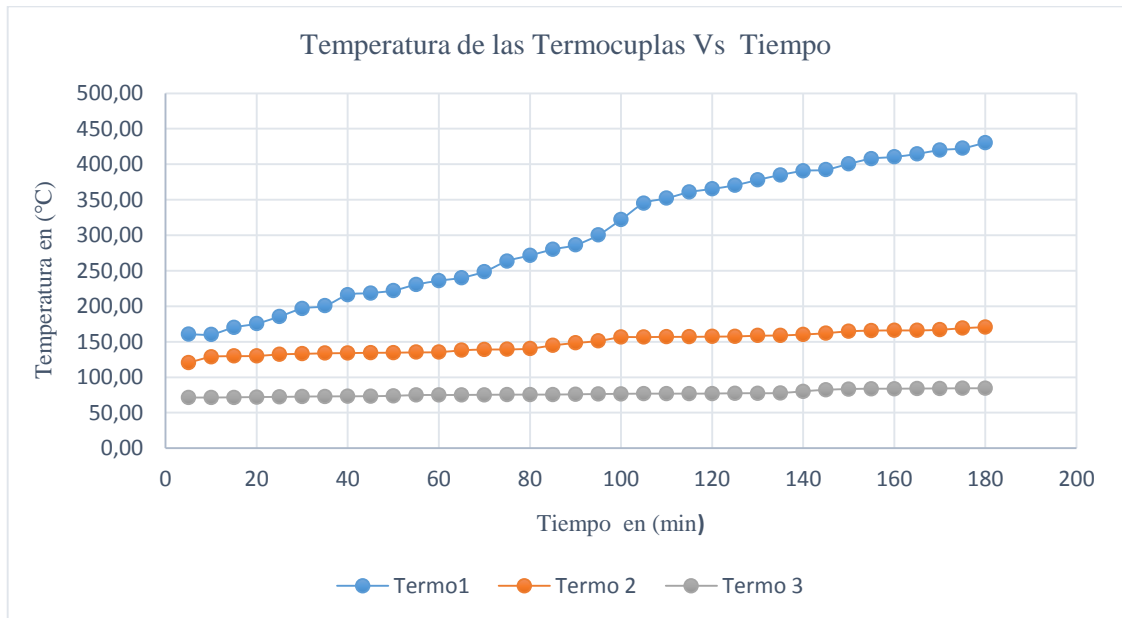
**Tabla 2-4:** Datos de la gasificación número (1)

Tiempo (min)	TERMO1(°C)	TERMO2(°C)	TERMO3(°C)	PT100 (1)(°C)	PT100(2)(°C)	PT100(3)(°C)	PT100(4)(°C)	PT100 (5)(°C)
5	160,48	120,78	71,28	14,00	24,00	27,83	18,00	21,00
10	160,38	128,79	71,33	14,85	24,01	27,83	18,00	21,00
15	170,00	129,99	71,58	15,00	24,72	28,32	18,00	21,00
20	175,56	130,12	72,00	16,00	24,90	28,83	19,01	21,00
25	185,45	132,44	72,17	16,23	25,00	29,45	19,56	21,00
30	196,77	133,12	72,64	17,00	25,92	29,67	19,87	21,00
35	200,70	133,93	72,88	18,50	25,98	29,79	20,00	21,33
40	215,94	134,20	73,03	19,00	26,00	30,62	20,00	21,64
45	218,54	134,66	73,23	20,00	26,78	30,62	21,00	21,85
50	222,08	134,74	73,70	21,00	27,00	30,73	21,00	22,00
55	230,48	135,29	74,78	22,00	27,54	31,73	22,00	22,56
60	235,94	135,50	74,88	22,01	27,68	31,79	22,16	22,71
65	240,15	138,12	74,95	24,11	27,71	31,91	22,18	22,83
70	248,75	139,24	75,19	24,37	27,96	32,01	22,21	22,97
75	263,70	139,35	75,37	24,55	28,00	32,01	22,38	23,19
80	271,52	140,50	75,46	24,62	28,14	32,22	22,44	23,22
85	280,08	145,05	75,49	24,87	28,23	33,08	22,56	23,43
90	286,28	148,45	75,89	25,00	28,46	33,85	22,79	23,77
95	300,34	151,24	76,25	25,23	28,50	34,61	22,83	24,00
100	322,04	156,41	76,54	25,47	28,66	34,75	23,08	24,32
105	345,00	156,68	76,79	25,54	29,12	35,29	23,14	24,41
110	352,16	157,07	76,81	25,79	29,27	35,37	23,21	24,55
115	360,80	157,07	76,82	25,86	29,34	35,76	23,45	24,67
120	365,42	157,42	76,93	26,00	29,76	35,76	23,67	24,81
125	370,48	157,68	77,33	26,01	29,88	36,11	23,76	24,86
130	378,04	158,68	77,45	26,13	29,93	36,31	23,84	24,88
135	385,03	159,07	77,67	26,37	30,06	36,59	23,88	24,90
140	390,76	160,42	80,16	26,43	30,25	36,72	23,92	24,92
145	392,50	162,20	82,23	26,55	30,33	37,20	23,99	24,92
150	400,63	164,90	83,32	26,55	30,35	37,24	24,06	24,96
155	408,03	165,81	83,78	26,62	30,36	37,46	24,18	25,07
160	410,50	166,16	83,79	26,67	30,65	37,58	24,22	25,17
165	414,63	166,16	84,04	26,83	30,77	37,72	24,30	25,38
170	420,16	167,03	84,16	27,00	30,84	37,74	24,32	25,49
175	422,63	169,29	84,39	27,13	30,98	37,85	24,36	25,78
180	430,50	170,81	84,39	27,21	31,00	37,46	24,42	25,87

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

#### 4.1.1. Curvas de temperatura vs el tiempo

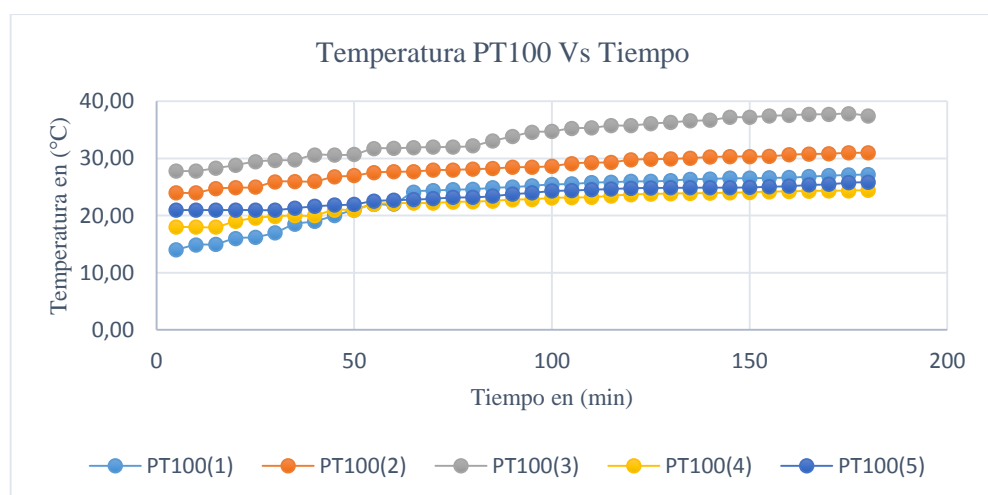
Las curvas muestran la caracterización del proceso de gasificación de acuerdo con el tipo de biomasa utilizada, además el comportamiento de la temperatura al transcurrir el tiempo.



**Gráfico 4-4:** Temperatura de las Termocuplas

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 1-4 se puede notar que son los valores mayores en el gasificador en la zona de reducción, debido a que se encuentran más próximos a la fuente de calor con una temperatura máxima de 430°C y una temperatura mínima 88°C de al transcurrir 180 minutos.



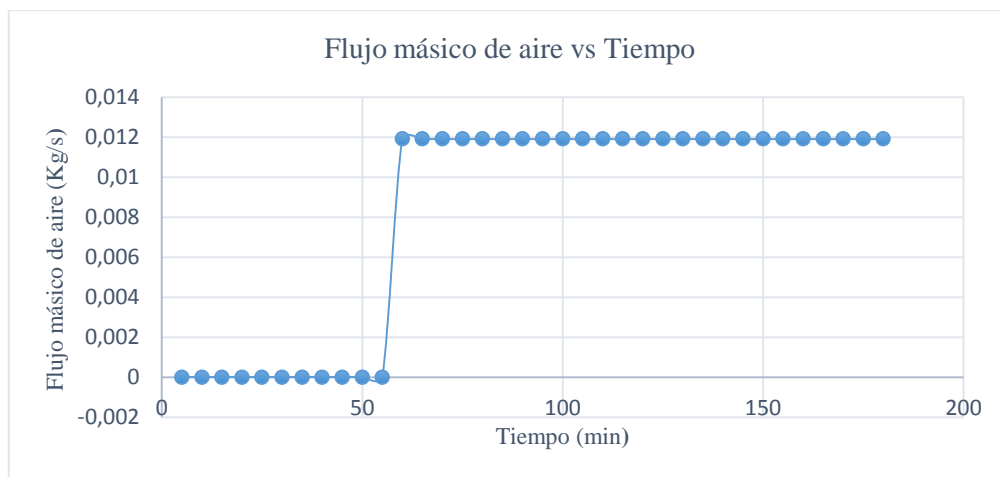
**Gráfico 5-4:** Temperatura de los sensores Pt100

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 2-4 las temperaturas varían de una manera casi constante en el transcurso del tiempo debido al flujo de calor a la parte superior del gasificador. Con una temperatura máxima de 37,85°C en la zona de pirólisis.

#### 4.1.2. Gráfica del flujo másico de aire y de gas de síntesis

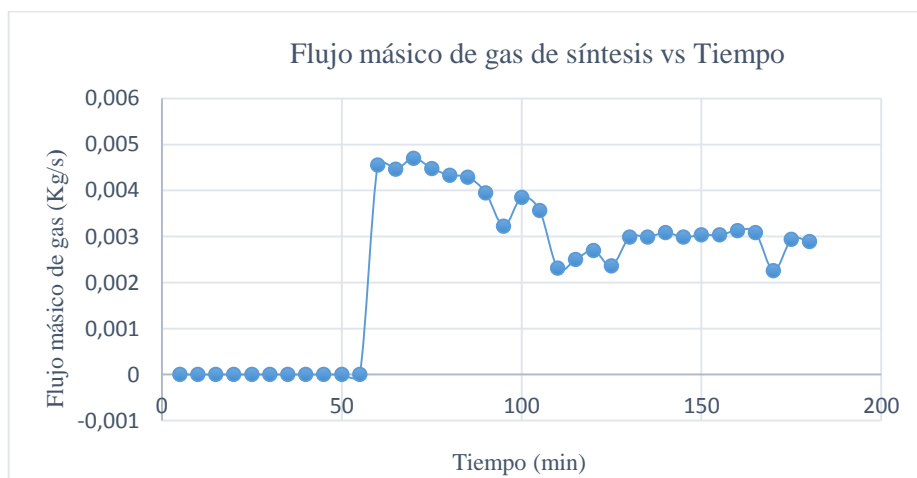
Los flujos de gas y de aire se cuantificaron mediante los sensores instalados a la entrada de aire y a la salida de gas.



**Gráfico 6-4:** Flujo de aire que varía manera constante

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 3-4 se muestra un flujo de aire que varía de una manera constante debido a que en esta gasificación no se realizó ningún tipo de estrangulación con la válvula de bola.



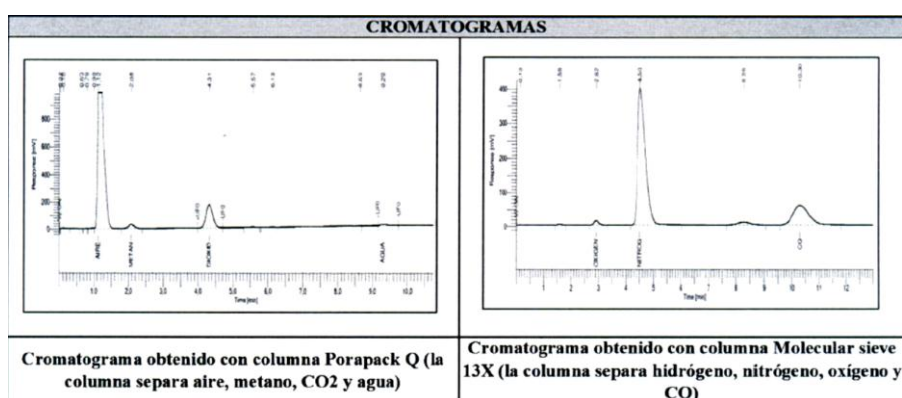
**Gráfico 7-4:** La variación del flujo másico de gas de síntesis

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 4-4 se muestra q la variación del flujo másico posee varios decrementos e incrementos algunos debidos a la estrangulación de flujo de gas y otras debido al consumo de la biomasa forestal.

#### 4.1.3. Análisis de Cromatográfico

La cromatografía indica el porcentaje de cada componente que conforma el gas de síntesis, por lo general las cantidades de concentración de cada componente, el análisis esta realizado bajo la norma ASTN D 1945-03 (2010) realizados en la Escuela Politécnica Nacional, los informes originales están presentados en el *Anexo J*



**Figura 1-4:** Análisis cromatógrafo de la primera gasificación  
Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 1-4 se muestra el análisis cromatógrafo de la primera gasificación, identificando cada uno de los componentes presentes. La finalidad de la cromatografía es medir en que porcentaje está concentrado cada componente de una manera analítica.

**Tabla 3-4:** Análisis cromatográfico (1)

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de Referencia	ASTN D 1945-03 (2010)

RESULTADOS			
	COMPONENTE	% Peso	% Moles
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	6.22	49.69
	Nitrógeno	0.55	0.31
	Oxígeno	32.27	16.11
	CO	26.59	15.16
	Metano	6.12	6.09



**Tabla 3-4 (Continua):** Análisis cromatográfico (1)

	Metano	6.12	6.09
	CO2	32.71	8.60
	Agua	4.55	4.03
	H2S	<0.001	<0.001
	Total	100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad Relativa	0.55	
	Peso Molecular Promedio(g/mol)	15.97	
	Poder calorífico superior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	261.47	
	Poder calorífico inferior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	184.63	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la Tabla 2-4 nos indica valores tales como la densidad relativa y poderes caloríficos superior e inferior muy importantes para nuestro análisis con valores.

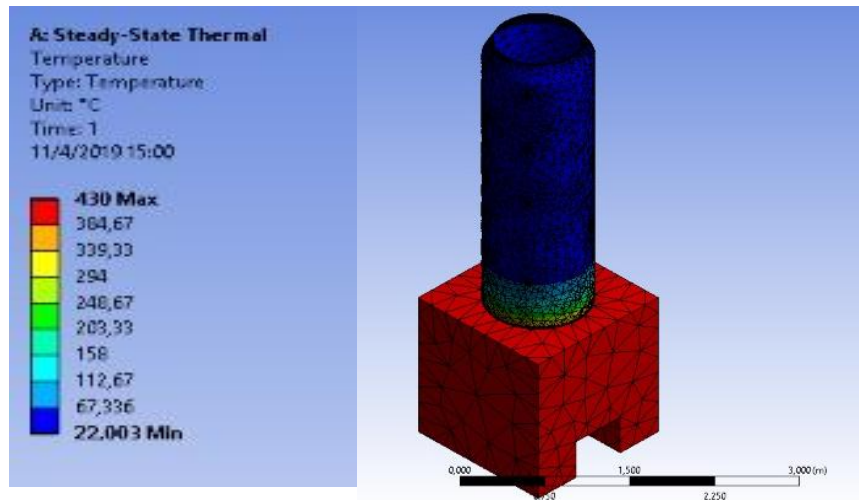
#### **4.1.4. Simulación de Temperaturas en ANSIS**

Se presenta el análisis de temperaturas en el programa ANSIS, el cual muestra el comportamiento del gasificador, mediante el método de simulación de temperaturas. Y con ello, la comprobación de resultados teóricos obtenidos mediante ecuaciones de transferencia de calor presentados anteriormente

Para realizar el análisis se procede a introducir la temperatura mayor obtenida en la parte inferior del gasificador donde se encuentra combustinandose la biomasa medida por la termocupla número 1 esta temperatura se toma cuando el sistema es estable es decir la variación de temperaturas es mínima casi constante.

#### **4.1.5. Simulación de la Gasificación número 1.**

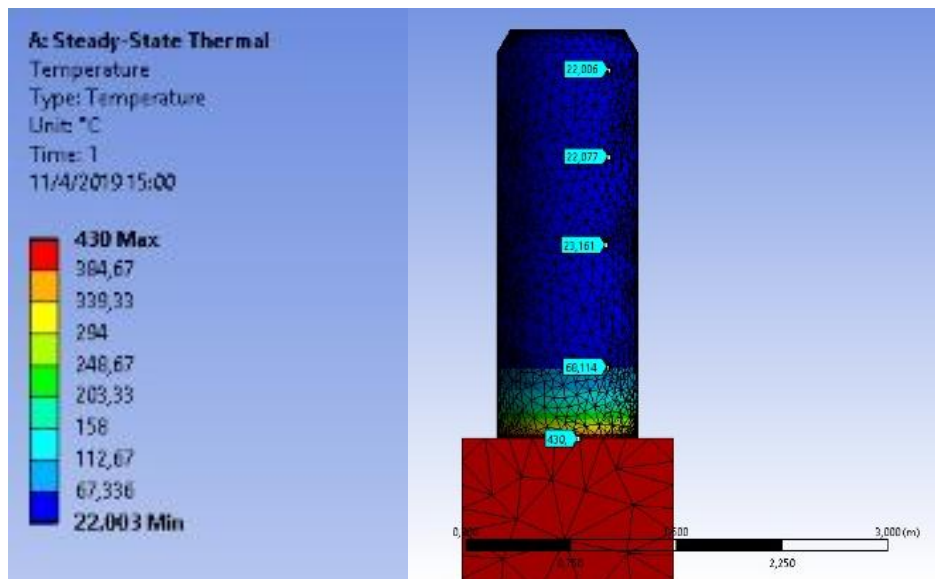
Sin estrangulación de aire flujo con madera de Eucalipto y contenido de humedad menor al 10%



**Figura 2-4:** Simulación 1 de la distribución temperaturas a lo largo del gasificador

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

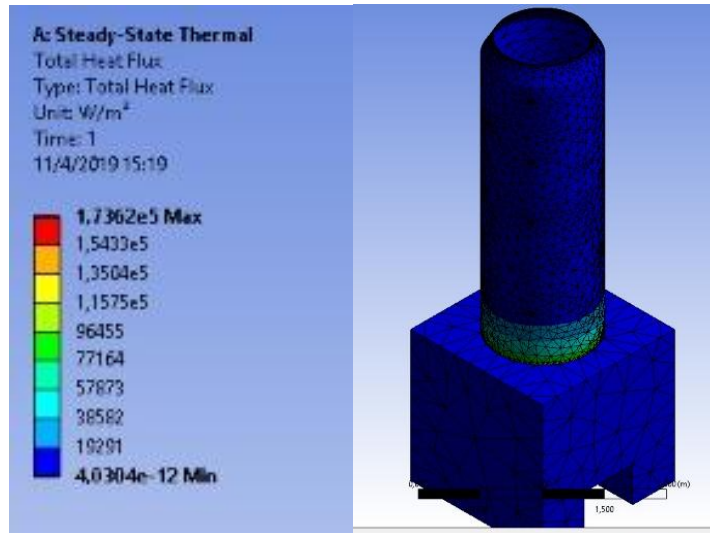
En la figura 11-4 nos muestra la temperatura máxima en la parte interna del gasificador cuyo valor es 430 °C con una temperatura mínima de 22°C. Adicionalmente no se obtiene datos de temperatura en la parte inferior del gasificador denominado hogar ya que este se encuentra hecho de ladrillo refractario el cual evita el flujo de calor hacia el exterior.



**Figura 3-4:** Ubicación de los puntos de temperatura a lo largo del gasificador

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

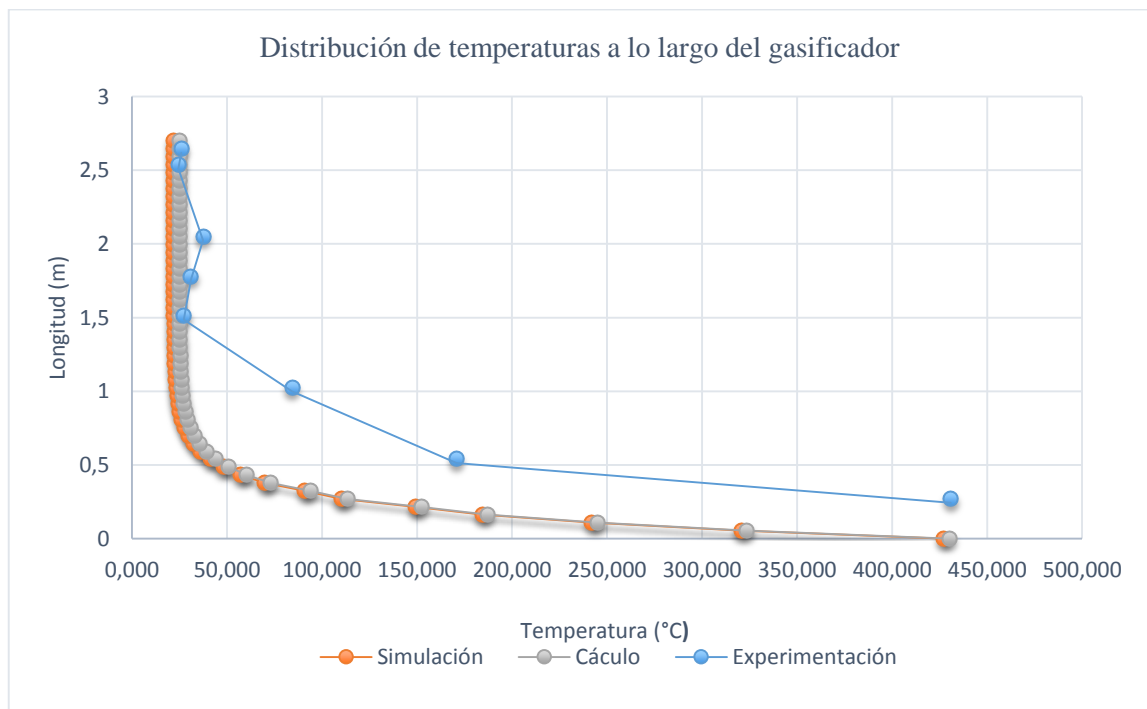
En la figura 12-4 se muestra como decrece la temperatura de acuerdo a su longitud, como se puede notar en los puntos ubicados el gasificador, Es decir mientras más se aleja de la fuente de calor menor será la temperatura mostrada en color azul.



**Figura 4-4:** Flujo de calor por convección (Hflux)  
 Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 13-4 nos muestra el Hflux que es el flujo de calor por convección y se nota que en la parte inferior tiene un cambio de color debido al estar más cerca de la fuente de calor, el resto de tono azulado nos muestra una temperatura baja.

**4.1.6. Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador**



**Gráfico 8-4:** Temperatura máxima ubicada en la parte inferior del gasificador

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la distribución de temperaturas del gráfico 5-4 se observa una gráfica de manera exponencial que decrece hasta llegar a temperatura máxima ubicada en la parte inferior del gasificador y la temperatura mínima en la parte más alejada de la fuente de calor obtenido un valor de estabilización de 24,92 ° C. Con una diferencia de 3 grados centígrados con respecto a la simulación y una variabilidad con respecto a la experimentación debido a la ubicación de los sensores de temperatura.

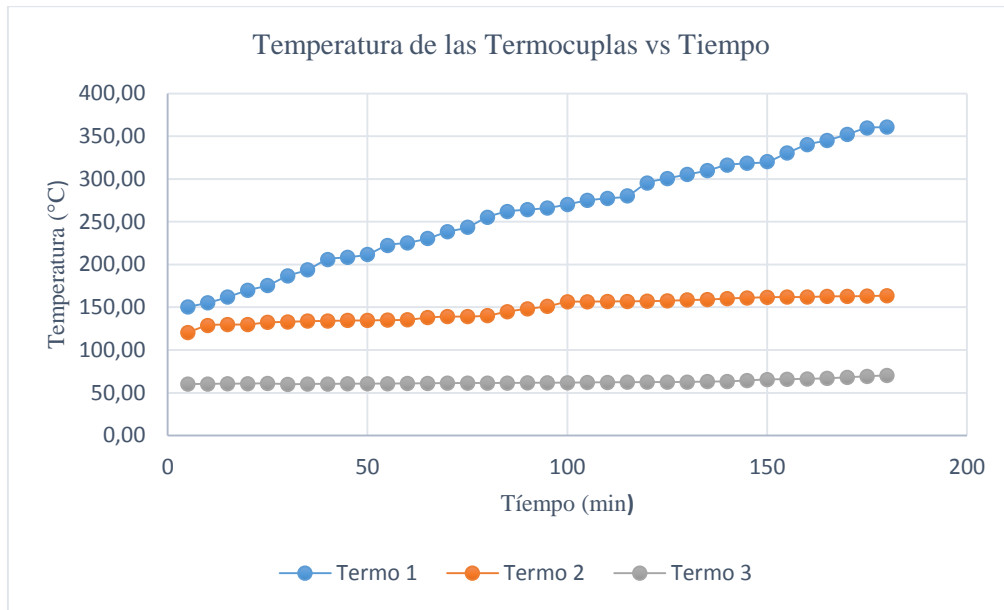
#### 4.2. Datos de la Gasificación Número (2)

**Tabla 4-4:** Datos de la gasificación número 2

Tiempo (min)	TERMO1(°C)	TERMO2(°C)	TERMO(3)(°C)	PT100 (1)(°C)	PT100(2)(°C)	PT100(3)(°C)	PT100(4)(°C)	PT100 (5)(°C)
5	150,58	120,78	60,23	20,00	25,00	26,83	20,00	23,00
10	155,38	128,79	60,52	20,13	25,18	26,93	20,02	23,00
15	162,00	129,99	60,77	20,56	25,33	27,42	20,07	23,00
20	169,97	130,12	60,83	20,72	25,64	27,43	20,19	23,00
25	175,74	132,44	61,08	20,88	25,85	28,55	20,46	23,00
30	186,77	133,12	60,13	21,02	25,92	28,67	20,77	23,00
35	194,00	133,93	60,44	21,34	26,00	29,69	21,00	23,63
40	205,94	134,20	60,52	21,73	26,41	30,24	21,00	23,71
45	208,54	134,66	60,68	21,97	26,83	30,42	21,03	23,86
50	212,08	134,74	60,79	22,00	27,00	30,53	21,15	24,00
55	222,48	135,29	60,90	22,00	27,27	30,84	21,30	24,55
60	225,54	135,50	61,03	22,33	27,42	31,09	21,36	24,73
65	230,49	138,12	61,23	22,45	27,62	31,19	21,48	24,86
70	238,33	139,24	61,44	22,61	27,89	31,20	21,57	24,92
75	243,70	139,35	61,48	22,86	28,09	31,41	21,74	25,36
80	255,52	140,50	61,55	23,17	28,14	31,72	21,80	25,44
85	262,08	145,05	61,59	23,17	28,23	31,95	21,85	25,61
90	264,28	148,45	61,76	23,28	28,38	32,08	21,99	25,83
95	266,24	151,24	61,88	23,45	28,46	32,16	22,15	26,00
100	270,41	156,41	61,93	23,61	28,68	32,25	22,34	26,00
105	275,00	156,68	62,23	23,72	29,00	33,29	22,51	26,08
110	277,55	157,07	62,37	23,90	29,17	33,37	22,51	26,14
115	280,47	157,07	62,46	24,02	29,69	33,76	22,63	26,44
120	295,42	157,42	62,58	24,19	29,77	34,06	22,70	26,58
125	300,75	157,68	62,67	25,01	29,90	34,18	22,81	26,72
130	305,40	158,68	62,76	25,13	29,99	34,93	22,94	26,80
135	310,03	159,07	63,17	25,37	30,06	35,01	22,98	27,00
140	316,45	160,42	63,45	25,43	30,25	35,60	23,02	27,00
145	318,50	161,20	64,45	26,05	30,33	35,87	23,19	28,01
150	320,39	161,90	65,66	26,55	30,35	35,92	23,21	28,12
155	330,40	162,14	65,99	26,62	30,36	36,04	23,33	28,36
160	340,29	162,16	66,38	26,77	30,65	36,23	23,42	28,42
165	345,34	162,90	67,02	26,83	30,77	36,26	23,68	28,61
170	352,27	163,03	68,14	27,00	30,84	36,57	24,62	28,73
175	359,63	163,29	69,33	27,13	30,98	36,72	25,66	28,86
180	360,88	163,81	70,45	27,21	31,00	36,96	26,07	28,92

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

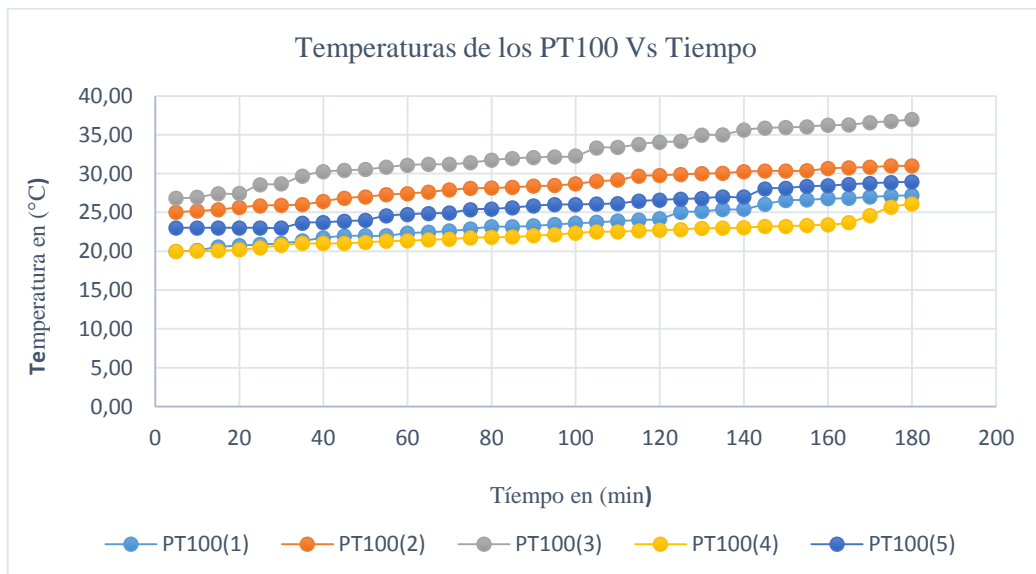
#### 4.2.1. Curvas de temperatura vs el tiempo



**Gráfico 9-4:** Temperatura de la termocuplas

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 6-4 se puede notar que son los valores mayores en el gasificador número 2 debido a que se encuentran más próximos a la fuente de calor en la zona de reducción con una temperatura máxima de 360°C y una temperatura mínima 70,45°C en la zona de combustión de al transcurrir 180 minutos.

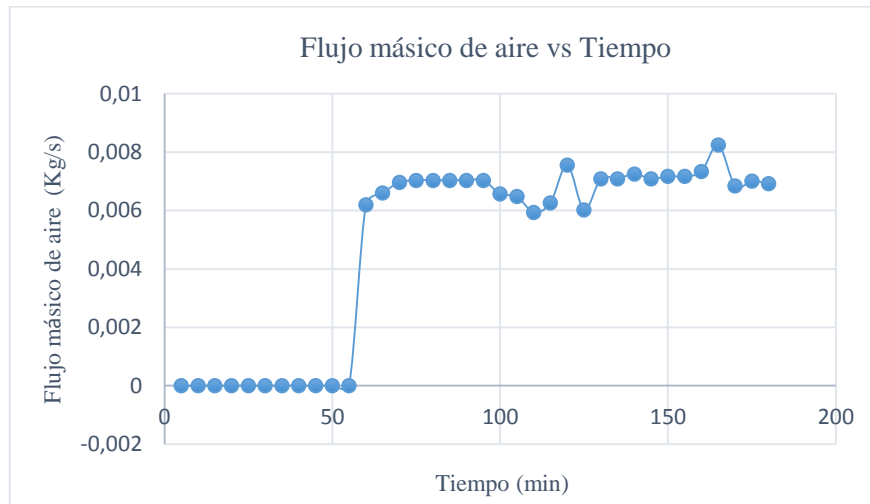


**Gráfico 10-4:** Temperaturas de los sensores Pt100

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 7-4 las temperaturas varían de una manera casi constante en el transcurso del tiempo debido al flujo de calor a la parte superior del gasificador. Con una temperatura máxima de 36,96°C en la zona de pirólisis.

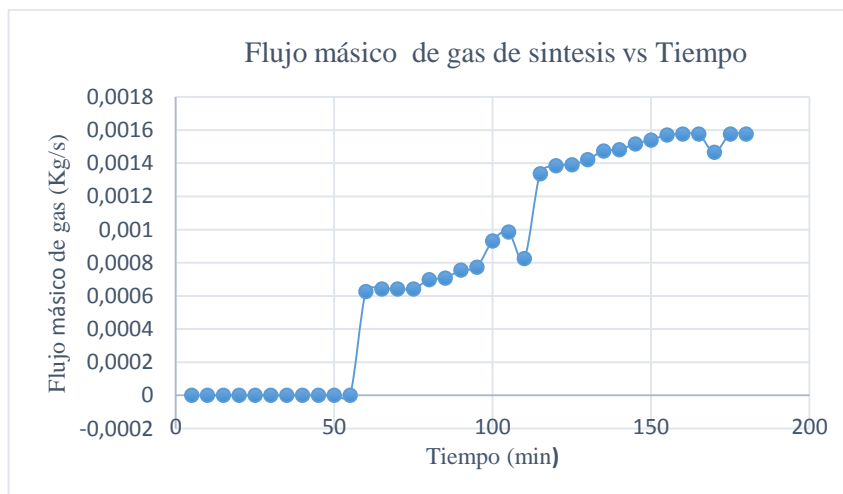
#### 4.2.2. Gráfica del flujo másico de aire y gas de síntesis



**Gráfico 11-4:** Flujo de másico de aire

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico se muestra un flujo de aire que varía de una manera variable debido a que en esta gasificación se realizó una estrangulación con la válvula de bola al 25%.

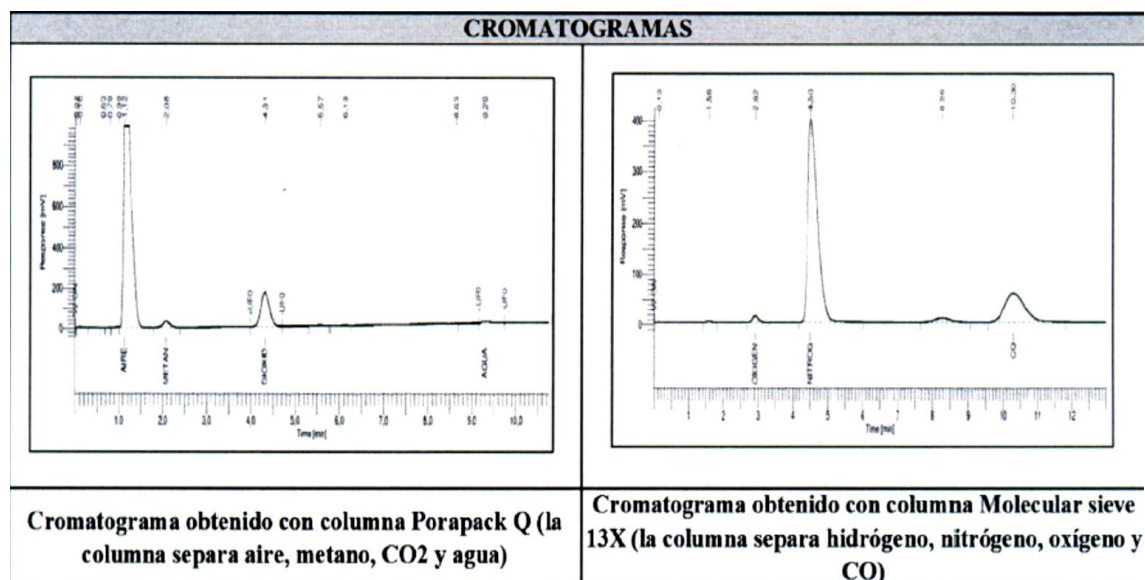


**Gráfico 12-4:** Variación del flujo másico de gas pobre

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 9-4 se muestra q la variación del flujo másico posee una serie de variaciones debido al ingreso de biomasa forestal y a un alto contenido de humedad que genera alquitranes que llegan hasta el sensor y no puede llegar una estabilización.

#### 4.2.3. Análisis de Cromatógrafico



**Figura 5-4:** Análisis cromatógrafico de la segunda gasificación

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 2-4 se muestra el análisis cromatógrafico de la segunda gasificación, identificando cada uno de los componentes presentes. La finalidad de la cromatografía es medir en que porcentaje de concentración cada componente de una manera analítica.

**Tabla 5-4:** Análisis cromatógrafico (2)

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de Referencia	ASTN D 1945-03 (2010)

RESULTADOS			
	COMPONENTE	% Peso	% Moles
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	6.86	53.40
	Nitrógeno	0.97	0.54
	Oxígeno	56.11	27.28
	CO	3.31	1.84
	Metano	6.34	6.15
	CO2	23.54	8.32

**Tabla 5-4 (Continua):** Análisis cromatográfico (2)

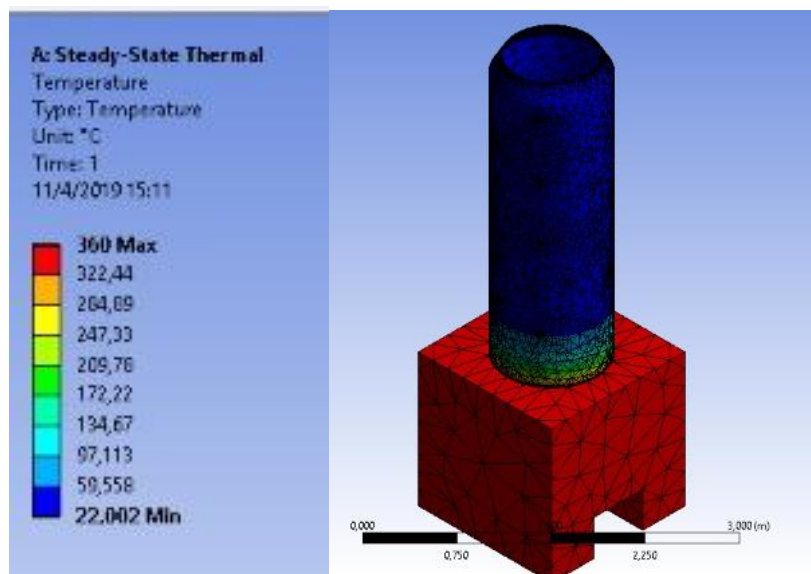
	Agua	2.86	2.47
	H2S	<0.001	<0.001
	Total	100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad Relativa	0.54	
	Peso Molecular Promedio(g/mol)	15.56	
	Poder calorífico superior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	232.17	
	Poder calorífico inferior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	194.89	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 6-4 nos indica valores tales como la densidad relativa y poderes caloríficos superior e inferior muy importantes para nuestro análisis con valores.

#### 4.2.4. Simulación de la Gasificación número 2.

Con estrangulación del aire flujo al 50%, madera de Eucalipto con contenido de humedad mayor al 15%.



**Figura 6-4:** Simulación de la distribución de temperaturas a lo largo del gasificador

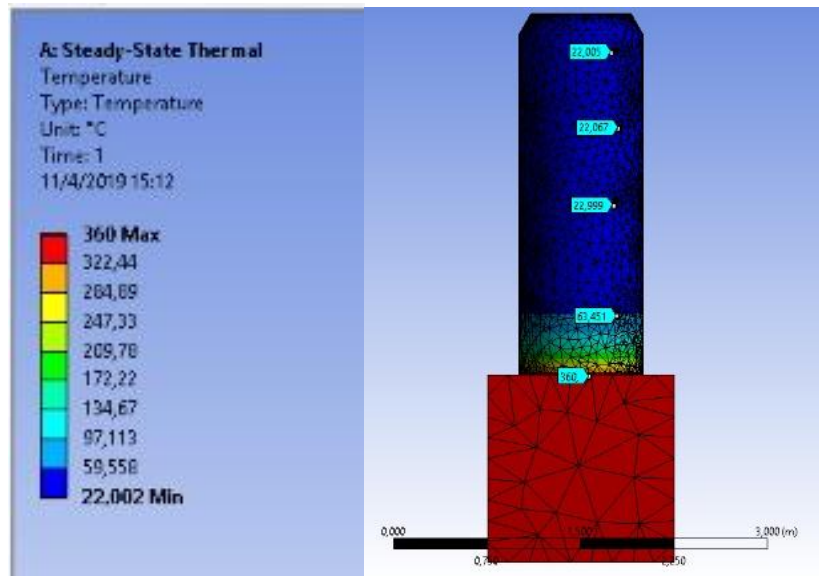
Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 14-4 nos muestra la temperatura máxima en la parte interna del gasificador cuyo valor es 360 °C con una temperatura mínima de 22°C

La variación de la temperatura mínima permanece constante ya que una variación de 65°C resulta insignificante para la longitud del gasificador, ya que para que incremente un grado de

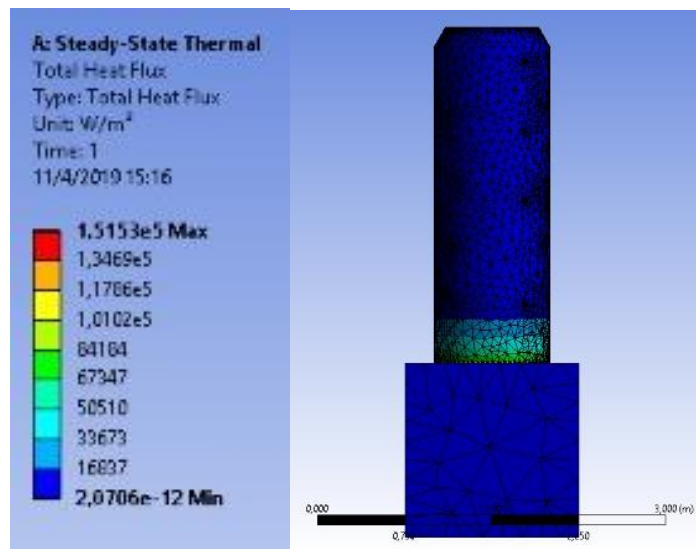


temperatura se tendrá que aumentar 100°C a la temperatura máxima, lo cual se comprobó mediante simulación.



**Figura 7-4:** Decrecimiento de la temperatura de acuerdo a su longitud  
 Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

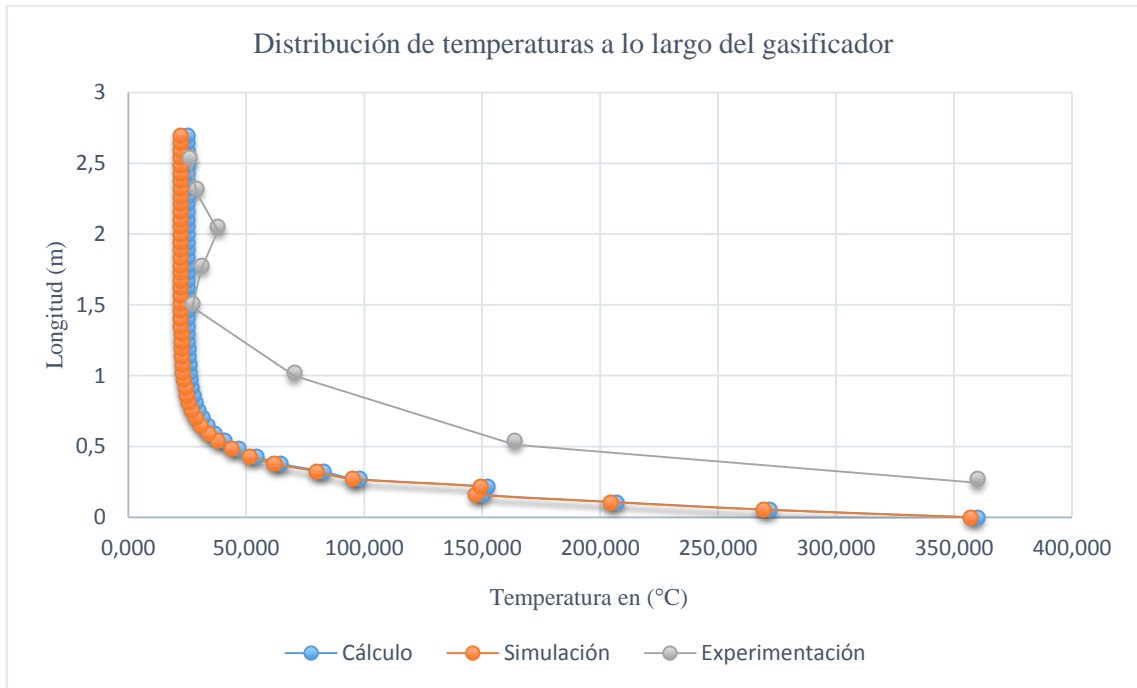
Como se indica en la figura 15-4 la temperatura decrece de acuerdo a su longitud, como nos los puntos ubicados el gasificador, Es decir mientras más se aleja de la fuente de calor menor será la temperatura mostrada en color azul con valor aproximado de 22°C.



**Figura 8-4:** Flujo de calor por convección (Hflux)  
 Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 16-4 nos muestra el flujo de calor por convección y se nota que en la parte inferior tiene un cambio de color debido al estar más cerca de la fuente de calor, en esta figura se puede notar que el flujo de calor es menor debido a la temperatura interna del gasificador.

#### 4.2.5. *Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador*



**Gráfico 13-4:** Distribución de temperaturas

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la distribución de temperaturas de la figura 10-4 se observa una gráfica de manera exponencial que decrece hasta llegar a temperatura máxima ubicada en la parte inferior del gasificador y la temperatura mínima en la parte más alejada de la fuente de calor. Obteniendo un valor de estabilización de 25°C. Con una diferencia de 3 grados centígrados con respecto a la simulación se mantiene en esta gasificación además de una variabilidad con respecto a la experimentación debido a la ubicación de los sensores de temperatura.

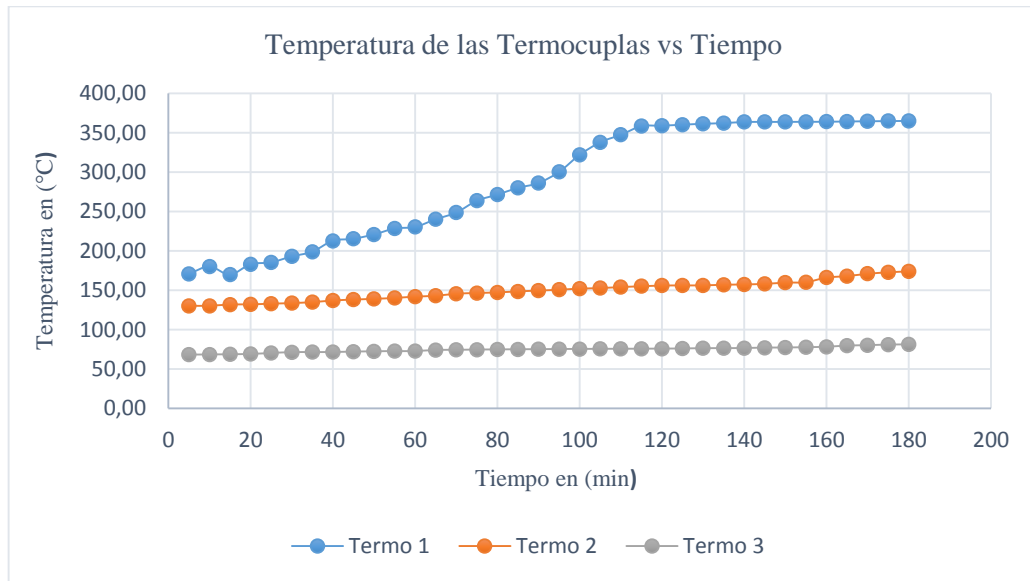
### 4.3. Datos de la Gasificación Numero 3

**Tabla 6-4:** Datos de la gasificación número 3

Tiempo(min)	TERMO1(°C)	TERMO2(°C)	TERMO(3)(°C)	PT100 (1)(°C)	PT100(2)(°C)	PT100(3)(°C)	PT100(4)(°C)	PT100 (5)(°C)
5	170,85	130,27	68,23	20,10	25,22	27,00	19,00	20,18
10	180,06	130,33	68,45	20,33	25,34	27,13	19,00	20,22
15	170,00	131,87	68,69	20,58	25,62	27,32	19,00	20,34
20	182,97	132,11	69,09	20,66	25,91	27,83	19,23	20,46
25	185,45	132,97	70,28	21,12	26,18	28,15	19,45	20,57
30	192,99	133,72	71,36	21,43	26,32	28,47	19,63	20,72
35	199,00	134,93	71,42	21,69	25,48	29,79	19,71	22,03
40	212,82	137,00	71,53	22,02	25,56	30,62	19,79	22,14
45	215,38	138,18	72,07	22,14	26,78	30,62	19,99	22,38
50	220,93	139,13	72,42	22,49	26,92	30,73	20,14	22,44
55	228,38	140,23	72,69	22,71	26,98	31,73	20,32	22,62
60	230,54	141,97	72,72	23,11	27,03	31,79	20,46	22,81
65	240,15	143,01	74,12	23,32	27,12	31,91	20,55	22,92
70	248,75	145,63	74,29	24,37	27,48	32,01	20,61	23,00
75	263,70	146,57	74,63	24,55	27,67	32,01	20,64	23,07
80	271,52	147,31	74,81	24,62	27,92	32,22	20,72	23,13
85	280,08	148,62	75,00	24,87	28,14	32,38	20,88	23,38
90	286,28	149,65	75,12	25,13	28,27	32,45	20,92	23,52
95	300,34	150,72	75,33	25,23	28,49	33,51	21,01	23,67
100	322,04	152,13	75,42	25,41	28,77	33,85	21,13	23,75
105	338,00	152,83	75,55	25,52	29,03	34,17	21,22	23,83
110	347,53	154,15	75,63	25,99	29,56	34,37	21,31	24,17
115	358,40	155,15	75,71	26,16	29,72	34,66	21,45	24,22
120	359,12	156,03	75,84	26,33	30,00	34,96	21,68	24,35
125	360,38	156,21	76,02	26,39	30,08	35,07	21,77	24,41
130	361,54	156,31	76,35	26,45	30,13	35,27	22,13	24,67
135	362,40	157,07	76,43	26,59	30,29	35,38	22,44	24,74
140	363,79	157,49	76,58	26,78	30,37	35,49	22,65	24,86
145	363,88	158,19	77,09	27,07	30,42	35,88	22,82	24,99
150	363,95	159,77	77,22	27,16	30,69	36,38	23,00	25,26
155	364,01	160,37	77,66	27,34	30,77	36,42	23,17	25,37
160	364,13	166,16	78,14	27,47	30,99	36,82	23,20	25,62
165	364,44	168,12	79,69	27,53	31,55	37,02	23,33	25,78
170	364,74	171,03	80,16	27,63	31,63	37,24	23,49	25,92
175	364,93	172,91	80,91	27,81	31,75	37,44	23,62	26,04
180	365,18	174,14	81,19	28,14	31,99	37,98	23,81	26,22

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

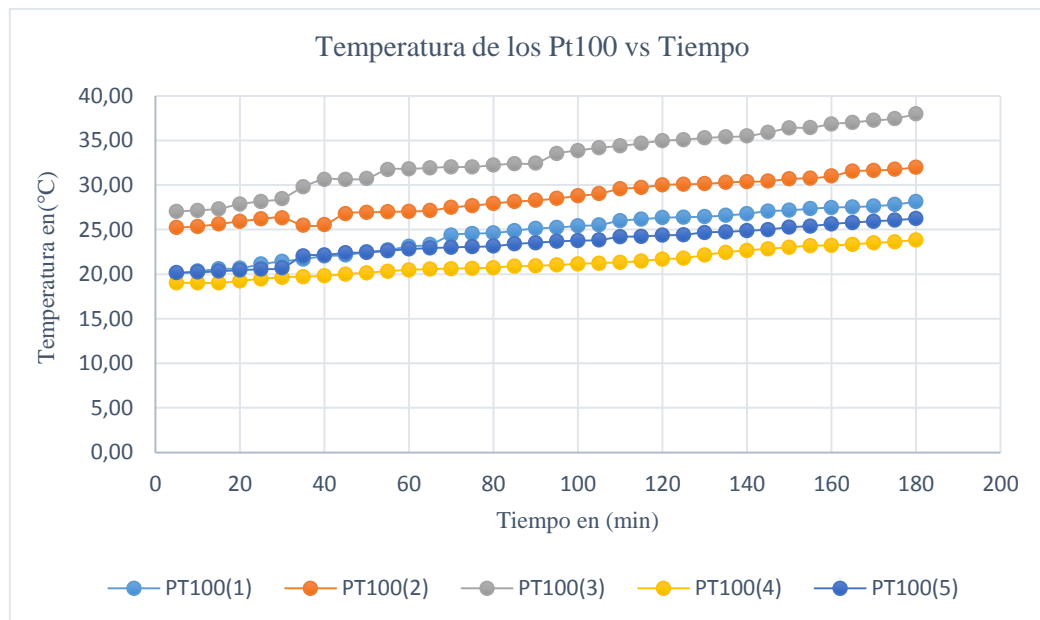
### 4.3.1. Curvas de temperatura vs el tiempo



**Gráfico 14-4:** Temperatura de las Termocuplas

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 11-4 se puede notar que son los valores mayores en el gasificador número 3 debido a que se encuentran más próximos a la fuente de calor con una temperatura máxima de 365°C en la zona de reducción y una temperatura mínima 175,14°C en la zona de pirolisis de al transcurrir 180 minutos.



**Gráfico 15-4:** Temperatura de los sensores Pt100

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 12-4 las temperaturas varían de una manera casi constante en el transcurso del tiempo debido al flujo de calor a la parte superior del gasificador. Con una temperatura máxima de 37,85°C en la zona de secado.

#### 4.3.2. Gráfica del flujo másico del aire y gas de síntesis

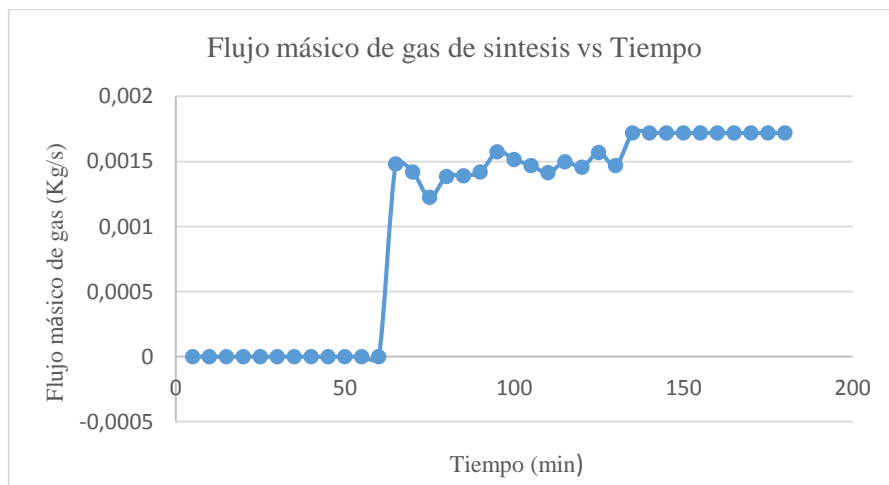


**Gráfico 16-4:** Flujo másico de aire

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 13-4 se muestra estrangulación de aire en un 50% por mediante de una válvula de bola como se puede notar en la figura os valores son menores debido a la estrangulación de flujo.

La primera hora con valores cero se utiliza para el calentamiento sin introducir aire, pasado este lapso de tiempo se introdujo aire con el blower.

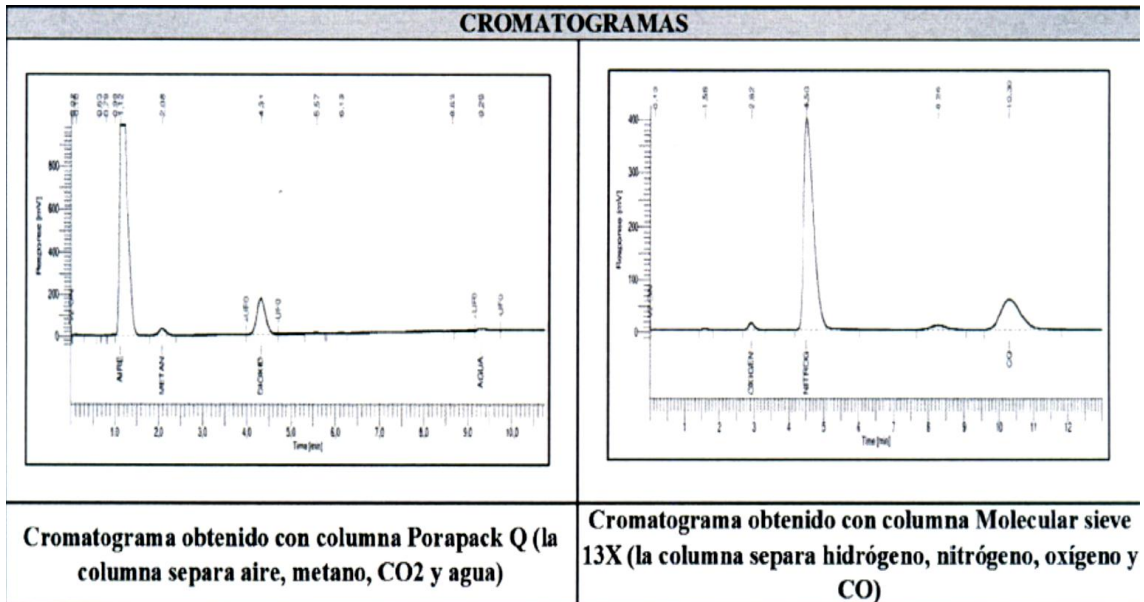


**Gráfico 17-4:** Fluctuaciones de gas

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En el gráfico 14-4 se muestra las fluctuaciones de gas de síntesis debido a los picos menores inician el consumo de biomasa y la necesidad d una nueva carga en este caso se puede estabilizar el flujo debido a la baja presencia de alquitranes y a una combustión completa.

### 4.3.3. Análisis de Cromatográfico



**Figura 9-4:** Análisis de cromatográfico de la tercera gasificación

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 3-4 se muestra el análisis cromatográfico de la tercera gasificación, identificando cada uno de los componentes presentes. La finalidad de la cromatografía es medir en que porcentaje de concentración de cada componente de una manera analítica.

**Tabla 7-4:** Análisis de la cromatográfico (3)

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de Referencia	ASTN D 1945-03 (2010)

RESULTADOS			
	COMPONENTE	% Peso	% Moles
COMPOSICIÓN	Hidrógeno	6.86	53.40
	Nitrógeno	0.03	0.03
	Oxígeno	0.80	0.71
	CO	87.19	88.29
	Metano	1.73	3.06

**Tabla 7-4 (Continua):** Análisis de la cromatográfico (3)

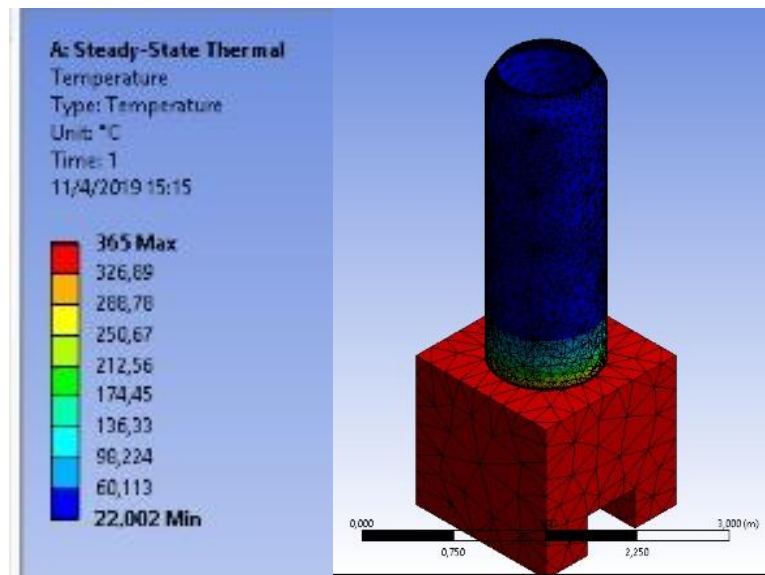
	CO2	8.83	5.69
	Agua	1.42	2.23
	H2S	<0.001	<0.001
	Total	100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad Relativa	0.98	
	Peso Molecular Promedio(g/mol)	28.35	
	Poder calorífico superior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	304.24	
	Poder calorífico inferior (Btu/pe <sup>3</sup> )cn	226.97	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la Tabla 6-4 nos indica valores tales como la densidad relativa y poderes caloríficos superior e inferior muy importantes para nuestro análisis con valores.

#### 4.3.4. Simulación de la Gasificación número 3.

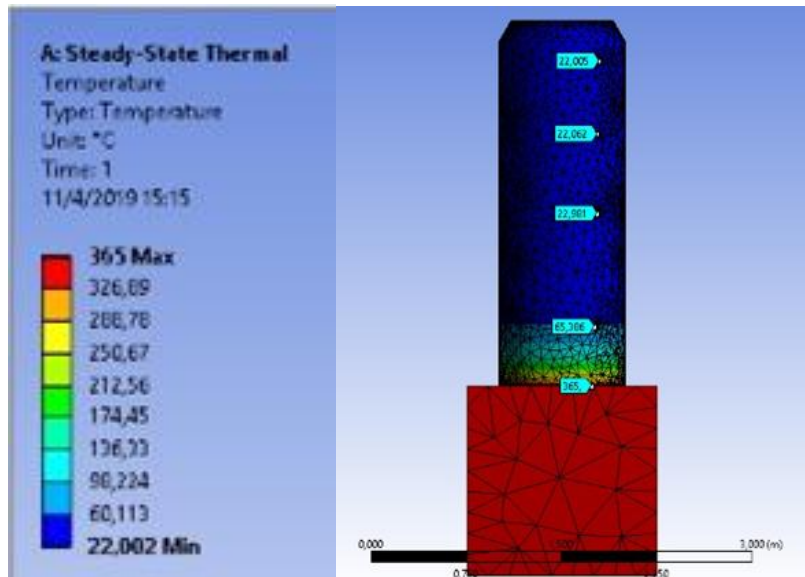
Con de aire flujo al 75% con madera de Eucalipto con contenido de humedad menor al 15%.



**Figura 10-4:** Simulación de la distribución de las temperaturas a lo largo del gasificador

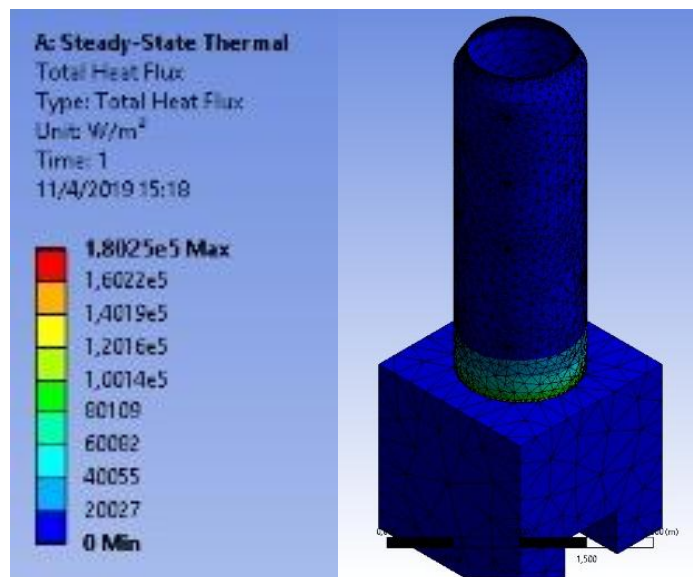
Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 17-4 nos muestra la temperatura máxima en la parte interna del gasificador cuyo valor es 365 °C con una temperatura mínima de 22°C



**Figura 11-4:** Decrecimiento de la temperatura de acuerdo a su longitud  
 Elaborado por: Herrera, Raúl. 2019

Como se indica en la figura 18-4 la temperatura decrece de acuerdo a su longitud, como nos los puntos ubicados el gasificador. Se puede notar que la temperatura máxima es casi similar a la gasificación 2 por lo cual la temperatura mínima se encuentra en el mismo rango de 22°C.

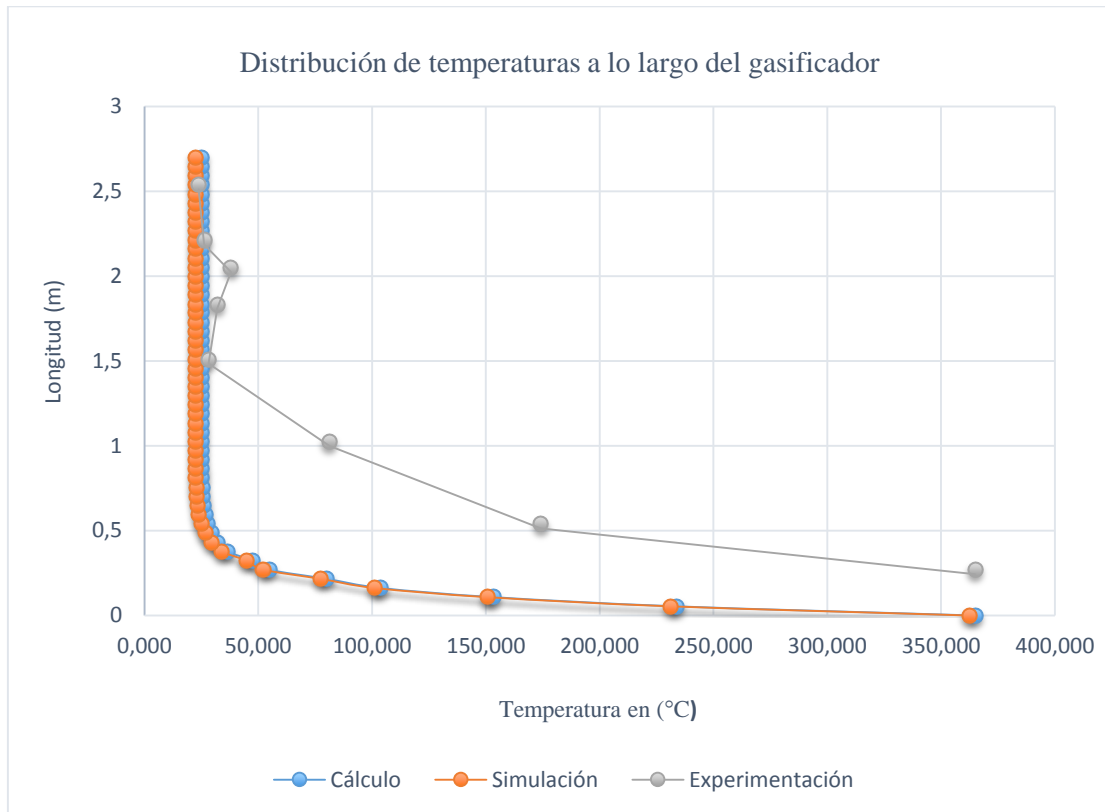


**Figura 12-4:** Flujo de calor por convección (Hflux)  
 Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

En la figura 19-4 nos muestra el flujo de calor por convección y se nota que en la parte inferior tiene un cambio de color debido al estar más cerca de la fuente de calor, en esta figura se puede notar que el flujo de calor es menor debido a la temperatura interna del gasificador mostrada en tonalidad azul.



#### 4.3.5. Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador



**Gráfico 18-4:** Distribución de temperaturas a lo largo del gasificador

**Realizado por:** Herrera, Raúl. 2019

En la distribución de temperaturas de la gráfica 15-3 se observa una gráfica de manera exponencial que decrece hasta llegar a temperatura máxima ubicada en la parte inferior del gasificador y la temperatura mínima en la parte más alejada de la fuente de calor. Obteniendo un valor de estabilización similar al anterior ya que la temperatura interna máxima no varía de una manera considerable se tiene 25°C. Con una diferencia de 3 grados centígrados con respecto a la simulación se presenta variabilidad con respecto a la experimentación, debido a la ubicación de los sensores de temperatura. Por lo que se corroborarían los cálculos con la simulación y experimentación.

**Tabla 8-4:** Comparación de resultados cromatográficos

CONDICIONES DE TRABAJO			
Temperatura (°C)	20	Norma de Referencia	ASTN D 1945-03 (2010)

COMPARACIÓN DE RESULTADOS							
	COMPONENTE	Gasificación 1		Gasificación 2		Gasificación 3	
		% Peso	% Moles	% Peso	% Moles	% Peso	% Moles
COMPOSICIÓN	Hidrogeno	6.22	49.69	6.86	53.40	6.86	53.40
	Nitrógeno	0.55	0.31	0.97	0.54	0.03	0.03
	Oxígeno	32.27	16.11	56.11	27.28	0.80	0.71
	CO	26.59	15.16	3.31	1.84	87.19	88.29
	Metano	6.12	6.09	6.34	6.15	1.73	3.06
	CO2	32.71	8.60	23.54	8.32	8.83	5.69
	Agua	4.55	4.03	2.86	2.47	1.42	2.23
	H2S	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
PROPIEDADES	Densidad Relativa	0.55		0.54		0.98	
	Peso Molecular Promedio(g/mol)	15.97		15.56		28.35	
	Poder calorífico superior (Btu/pie <sup>3</sup> )cn	261.47		232.17		304.24	
	Poder calorífico inferior (Btu/pie <sup>3</sup> )cn	184.63		194.89		226.97	

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

**Tabla 9-4:** Tabla comparativa de resultados de Simulación

Tabla comparativa de las gasificaciones												
	Gasificación 1				Gasificación 2				Gasificación 3			
	Temperatura		H flux		Temperatura		H flux		Temperatura		H flux	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Simulación	430°C	22°C	1,7e5 W/m2	4e-5 W/m2	360°C	22°C	1,5e5 W/m2	2e-12 W/m2	365°C	22°C	1,8e5 W/m2	1,2e-7 W/m2

Realizado por: Herrera, Raúl. 2019

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

Se logró conocer el funcionamiento del gasificador de lecho descendente Downdraft identificando cada una de las zonas en el proceso de gasificación, a través de la investigación teórica y mediante el sistema de adquisición de datos en el programa Labview de una manera práctica.

Se consiguió establecer el estado de arte del consumo de biomasa tanto a nivel global, latinoamericano y local obteniendo resultados de que, a nivel local, la mayor parte de biomasa es consumida como fuente de calor, en el caso de residuos forestales como la leña, y tan solo 1/5 es utilizada en generación de energía eléctrica como lo muestran las cifras de la corporación eléctrica nacional.

Se consiguió instalar de una manera efectiva el sistema de adquisición de datos, en los diferentes puntos a lo largo del gasificador como se indica en la figura 3-3 con lo que se cumplió con el objetivo propuesto en el trabajo de titulación. Se comprobó el sistema mediante pruebas de funcionamiento mediante la obtención de datos de temperatura y flujos máscicos de aire y de gas de síntesis.

Se realizó el análisis térmico del gasificador tipo Downdraft de una forma teórica mediante ecuaciones de transferencia de calor. Y comprobando los resultados a través de la simulación en el software ANSYS. Se comparó los valores obtenidos mediante cálculo, experimentación y simulación y se sobrepuso casa una de las curvas y se obtuvo la variabilidad.

Se obtuvo las curvas de temperatura de la biomasa forestal con temperaturas máximas en la gasificación 1; 430 grados centígrados en la gasificación 2: 360 grados centígrados y en la gasificación 3: 365 grados centígrados se muestra pendientes de una manera creciente con lo cual se puede caracterizar el comportamiento de este tipo de biomasa. Las curvas de flujo máscico de aire el cual nos permitió conocer cuál es el caudal óptimo  $0,0015 \text{ Kg/m}^3$  de funcionamiento para obtener una combustión completa, aprovechando al máximo el tipo de biomasa incinerada.

Los datos de cromatografía se determinan la composición química de cada componente del gas y sus propiedades principales como densidad y poderes caloríficos.

Poder calorífico superior gasificación 1: 261.47 (Btu/pie3) cn, gasificación 2: 232.17 (Btu/pie3) cn gasificación 3: 304.24 (Btu/pie3) cn.

Poder calorífico inferior gasificación 1: 184.63 (Btu/pe3) cn gasificación 2: 194.89 (Btu/pe3) cn gasificación 3: 226.97 (Btu/pe3) cn.

Al obtener las curvas características del gas de síntesis se pudo notar que en algunos casos llega a estabilizarse y en otro no debido en su mayor parte a la presencia de alquitranes por el ducto de salida de gas, esto nos lleva a incinerar biomasa con bajo contenido de humedad para mejorar la eficiencia del mismo

Con la obtención de picos decreciente en el flujo de gas se pudo determinar el consumo de biomasa con ese dato realizar dosificación de biomasa forestal.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

La contaminación es un aspecto muy importante ya que al quemar cualquier tipo de biomasa se obtiene CO<sub>2</sub> el cual es muy contaminante para el ambiente y el personal que trabaja en el gasificador con lo que se recomienda usar mascarillas de uso industrial con filtros de carbono activado para evitar daños en la salud.

Con respecto a la biomasa se debe cuantificar que el porcentaje humedad sea bajo, debido a que la generación de alquitranes que pueden dañar los sensores instalados en equipo. Además de revisar las condiciones climáticas con un día de anticipación debido a que instalan equipos electrónicos en el gasificador y como este se encuentra a la intemperie la lluvia generara daños tanto la placa como circuitos y sensores instalados.

Se recomienda que mediante el software instalado en el gasificador se equipe de un sistema de dosificación autónoma. Para evitar en lo posible el contacto directo con los gases de gasificación.

Se recomienda disminuir el contenido de alquitranes ya que estos generan una combustión incompleta con mayor concentración nitrógeno molecular que al combinarlo con oxígeno del ambiente produce lluvia acida.

Al trabajar con equipos con elevadas temperaturas tomar las medidas de protección necesarias como son guantes industriales, lentes y comprobar las temperaturas en el gasificador con un pirómetro antes de tocar las superficies.

## BIBLIOGRAFÍA

**AGENCIA DE REGULACION Y CONTROL DE LA ELECTRICIDAD.** *Estadística anual y multianual sector eléctrico Ecuatoriano* [en línea] Regulación y Control de la Electricidad, ARCONEL. 2016. [Consulta: 02 de abril del 2019]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2017/08/Estad%C3%ADstica-anual-y-multianual-sector-el%C3%A9ctrico-2016.pdf>

**ARCIA, M. 2013.** *Energías renovables* [en línea] Tipos de biomasa según su origen. 2013 [Consulta: 22 de abril del 2019]. Disponible en: <http://icasasecologicas.com/tipos-de-biomasa/>

**ARIAN CONTROL & INSTRUMENTACIÓN.** *Pt100, su operación, instalación y tablas* [En línea] ¿Que es un Pt100 ?. 2008 [Consulta: 19 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://www.arian.cl/downloads/nt-004.pdf>

**AVANZADAS ESTRUCTURAS BIOCLIMATICAS.** *La biomasa: producir energía con un sistema ecológico* [en línea] Producir energía con la biomasa : utilizar materiales de naturaleza orgánica. 2015 [Consulta: 22 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://ebasl.es/producir-energia-con-la-biomasa/>

**AV ELECTRONICS.** *Sensor de Presión Diferencial MPX5500DP* [en línea] Descripción. 2019 [Consulta: 07 de mayo del 2019]. Disponible en: <https://avelectronics.cc/producto/sensor-de-presion-diferencial-mpx5500dp/>

**BARRIGA, A. & BALSECA, M.** *Situación actual del sector energético* [en línea] Potencial energético. 2017 [Consulta: 07 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://www.fao.org/3/T2363s/t2363s0u.htm>

**CARRILLO, L.** *Energía de Biomasa* [en línea] Fotosíntesis. Biomasa. Conversión por microorganismos. Biogas. Etanol. Biodiesel. 2004. pág. 82. [Consulta: 07 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://www.bio-nica.info/Biblioteca/Carillo2004.pdf>

**CASTELO, A.** *Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa* [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Química y Biotecnología. Chile, Santiago de Chile. 2014 [Consulta: 15 de junio del 2019]. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132303/Diseno-de-un-reactor-continuo-de-gasificacion-de-biomasa.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**CASTELLS, X.** *Tratamiento y valorización energética de residuos* [en línea] Generación de electricidad a partir de la gasificación de madera de eucalipto (*Eucalyptus*). 2005. pág. 448. [Consulta: 09 de junio del 2019]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=KBTPxIi6IRsC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

**CASTELLS, X.** *Tratamiento y Valorización Energetica de Residuos*. [en línea] *Energía y medio ambiente*. 2012 pág. 400. [Consulta: 13 de mayo del 2019] Disponible en: [https://books.google.com.ec/books?id=KBTPxIi6IRsC&printsec=frontcover&hl=es&source=gb\\_s\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=KBTPxIi6IRsC&printsec=frontcover&hl=es&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

**CENGEL, Y.** *Transferencia de Calor y Masa* [en línea] Un enfoque práctico. 2007 pág. 37. [Consulta: 17 de junio del 2019]. Disponible en: [https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi\\_blog/r/Transferencia\\_de\\_Calor\\_y\\_Masa\\_-\\_Yunus\\_Cengel\\_-\\_Tercera\\_Edicion.pdf](https://www.u-cursos.cl/usuario/cfd91cf1d8924f74aa09d82a334726d1/mi_blog/r/Transferencia_de_Calor_y_Masa_-_Yunus_Cengel_-_Tercera_Edicion.pdf)

**COMPONENTS SMC.** *MAX6675 Sensor Module Thermocouple Cable 1024 Celsius High Temperature Available* [En línea] *MAX6675 Sensor Module Thermocouple Cable 1024 Celsius High Temperature Available*. 2013 [Consulta: 16 de abril del 2019]. Disponible en: [https://www.banggood.com/MAX6675-Sensor-Module-Thermocouple-Cable-1024-Celsius-High-Temperature-Available-p-1086406.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/MAX6675-Sensor-Module-Thermocouple-Cable-1024-Celsius-High-Temperature-Available-p-1086406.html?cur_warehouse=CN)

**ENERGÍA DE LA BIOMASA.** *Biocombustibles* [en línea] *Biocombustibles sólidos*. 2019 [Consulta: 23 de mayo del 2019]. Disponible en: <http://biomasa-energiarenovable.blogspot.com/p/los-biocombustibles-solidos-mas.html>

**ESCUELA DE ORGANIZACION INDUSTRIAL.** *Biomasa en el Ecuador* [en línea] 2017 [Consulta: 18 de abril del 2019]. Disponible en: <https://www.eoi.es/blogs/merme/biomasa-en-el-ecuador/>

**ESTRADA, C.** *Gasificación de biomasa para producción de combustibles de bajo poder calorífico y su utilización en generación de potencia y calor* [en línea] Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira : UTP, 2004. pág. 157, Tesis doctoral.

**FERNANDEZ, J.** *Poder calorífico* [en línea] Determinación del poder calorífico. 2011 [Consulta: 25 de abril del 2019]. Disponible en: [http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas\\_termicas/01-poder\\_calorifico.pdf](http://www.edutecne.utn.edu.ar/maquinas_termicas/01-poder_calorifico.pdf)

**FLÓREZ, D.** *Obtención de gas de síntesis a partir de la gasificación de cuesco de palma de aceite pelletizado*. [en línea] (Trabajo de titulación). (Postgrado) Universidad Nacional de

Colombia, Facultad de Ingeniería. Colombia, Bogotá. 2016 [Consulta: 02 de junio del 2019]. Disponible en: <http://bdigital.unal.edu.co/59170/1/1016047776.2017.pdf>

**FONSECA, N.** *Estado del arte del uso del gas de gasificación termoquímica de biomasa (GG) en motores de combustion interna alternativos.* [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad de Los Andes, Ingeniería Mecánica. Facultad de Ingeniería Mecánica Colombia, Bogotá. 2003 [Consulta: 02 de junio del 2019]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/279380649\\_Estado\\_del\\_Arte\\_del\\_Uso\\_del\\_Gas\\_de\\_Gasificacion\\_Termoquimica\\_de\\_BiomasaGG\\_en\\_Motores\\_de\\_Combustion\\_Interna\\_Alternativos/link/565c276008ae1ef92981d59b/download](https://www.researchgate.net/publication/279380649_Estado_del_Arte_del_Uso_del_Gas_de_Gasificacion_Termoquimica_de_BiomasaGG_en_Motores_de_Combustion_Interna_Alternativos/link/565c276008ae1ef92981d59b/download)

**FREESCALE SEMICONDUCTOR INC.** *Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated* [en línea] 2009 [Consulta: 17 de marzo del 2019] Disponible en: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5500.pdf>

**GOMELSKY, R.** *Evaluación rápida y análisis de brechas en Ecuador* [en línea] Recursos energéticos y oferta de energía. 2013 págs. 44-45 [Consulta: 19 de marzo del 2019] Disponible en: [https://www.seforall.org/sites/default/files/Ecuador\\_RAGA\\_ES\\_Released.pdf](https://www.seforall.org/sites/default/files/Ecuador_RAGA_ES_Released.pdf)

**JANAMPA, E.** *Sensores industriales.* [En línea] Sensores de temperatura. 2012 [Consulta: 22 de Abril del 2019] Disponible en: <https://es.slideshare.net/enriquejanampa/10959890-sensoresdetemperatura>

**MIYACHI, A.** *J Type Thermocouple* [en línea] 2016 [Consulta: 04 de mayo del 2019] Disponible en: <http://spanish.amadamiyachi.com/glossary/glossjtypethermocouple>

**NACIONAL INSTRUMENTS.** *Conectar Señales de Termopares a un Dispositivo DAQ.* [en línea] 2010 [Consulta: 01 de Abril del 2019] Disponible en: <http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/esa/thermocouples>

**NACIONAL INSTRUMENTS.** *¿Cómo Conecto RTDs de 2, 3 y 4 Hilos a Mi Tarjeta de Adquisición de Datos?* [en línea] 2014 [Consulta: 01 de Abril del 2019] Disponible en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/8A47C054F777FB208625739B006507B6>

**NACIONAL INSTRUMENTS.** *Conectar Señales de Termopares a un Dispositivo DAQ.* [en línea] [Consulta: 01 de Abril del 2019] Disponible en: <http://www.ni.com/getting-started/set-up-hardware/data-acquisition/esa/thermocouples>

**NINA, J.** *Procesos de combustión.* [en línea] Teoría de la combustión. 2006 págs. 3-4 [Consulta: 23 de abril del 2019] Disponible en: <https://ingjnina.jimdo.com/app/download/6026560918/Act.+de+Apren.+N%C2%B0+5+Teoria+de+la+Combustion.pdf?t=1494849793&mobile=1>

**OLADE.** *Consumo de biomasa en el sector residencial de América Latina y el Caribe* [en línea] 2018 [Consulta: 29 de abril del 2019] Disponible en: <http://www.olade.org/wp-content/uploads/2018/09/Consumo-de-la-biomasa-en-el-sector-residencial-de-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-1.pdf>

**PEÑA, J.** *Uso energético de la biomasa a través del proceso de gasificación.* [en línea] Combustión. 2017 págs. 171-172 [Consulta: 13 de mayo del 2019] Disponible en: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/download/89/85/>

**PÉREZ, J. et al.** *Proceso de gasificación de biomasa: una revisión de estudios teórico-experimentales.* [en línea] Modelado del proceso de gasificación. 2009 págs. 98-101 [Consulta: 26 de abril del 2019] Disponible en: <http://www.redalyc.org/pdf/430/43016342009.pdf>

**RESTREPO, A. et al.** *Diseño, construcción y evaluación de un equipo para el calentamiento de agua mediante la combustión de la cascarilla de arroz.* [en línea] Generalidades del prototipo. 2004 pág. 74 [Consulta: 27 de mayo del 2019] Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/44131173\\_DISENO\\_CONSTRUCCION\\_Y\\_EVALUACION\\_DE\\_UN\\_EQUIPO\\_PARA\\_EL\\_CALENTAMIENTO\\_DE\\_AGUA\\_MEDIANTE\\_LA\\_COMBUSTION\\_DE\\_LA\\_CASCARILLA\\_DE\\_ARROZ/link/56ab789108aed814bdea1c62/download](https://www.researchgate.net/publication/44131173_DISENO_CONSTRUCCION_Y_EVALUACION_DE_UN_EQUIPO_PARA_EL_CALENTAMIENTO_DE_AGUA_MEDIANTE_LA_COMBUSTION_DE_LA_CASCARILLA_DE_ARROZ/link/56ab789108aed814bdea1c62/download)

**RODRÍGUEZ, A. et al.** *Análisis y Diseño de un Sistema de Gasificación de Biomasa.* [en línea] Diseño del gasificador. 2010 [Consulta: 27 de mayo del 2019] Disponible en: [http://somim.org.mx/memorias/memorias2010/A5/A5\\_64.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2010/A5/A5_64.pdf)

**RODRÍGUEZ, S. & RODRÍGUEZ, W.** *Implementación de la toolbox de adquisición de datos de matlab y prácticas de laboratorio con el uso de las tarjetas ni-usb 6008/6009.* [en línea] (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad Pontificia Bolivariana, Ingeniería Electrónica y Administración, Ingeniería Electrónica. Colombia, Bucaramanga. 2015 [Consulta: 17 de mayo del 2019] Disponible en: [https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/913/digital\\_19594.pdf?sequence=1](https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/913/digital_19594.pdf?sequence=1)

**SALVADOR, A.** *Aprovechamiento de la biomasa como fuente de energía alternativa a los combustibles fósiles.* [en línea] La biomasa como fuente de energía. 2010 págs. 334-336 [Consulta: 03 de marzo del 2019] Disponible en: <http://www.rac.es/ficheros/doc/00979.pdf>

**TURMERO, P.** *Control de un ascensor y adquisición de datos con LABVIEW.* [en línea] 2007 [Consulta: 21 de marzo del 2019] Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos106/control-ascensor-y-adquisicion-datos-labview/control-ascensor-y-adquisicion-datos-labview2.shtml>



**UNBRANDED/GENERIC.** *Mpx5500dp (mpx5500) Calibrar Sensor De Presión De Silicio.* [En línea] 2008 [Consulta: 13 de mayo del 2019] Disponible en: [https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-706156390-mpx5500dp-mpx5500-calibrar-sensor-de-presion-de-silicio-\\_JM](https://articulo.mercadolibre.com.ar/MLA-706156390-mpx5500dp-mpx5500-calibrar-sensor-de-presion-de-silicio-_JM)

**VELO, E.** *Biomasa como fuente energética en países en desarrollo.* [en línea] Consumo y fuentes de energía por países y regiones. 2009 págs. 35-36 [Consulta: 13 de mayo del 2019] Disponible en: [https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51466/2008/1/53091/2008\\_biomasa-paises-desarrollo\\_evg-2839.pdf](https://ocw.upc.edu/sites/all/modules/ocw/estadistiques/download.php?file=51466/2008/1/53091/2008_biomasa-paises-desarrollo_evg-2839.pdf)