

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COCINA DE GAS BASADA EN LA  
GASIFICACION DE BIOMASA PARA LA COCCION DE ALIMENTOS**

**ANYELA YULIET MEZA HERNANDEZ  
HENRY ALBERTO SUAREZ VELASQUEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2013**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COCINA DE GAS BASADA EN LA  
GASIFICACION DE BIOMASA PARA LA COCCION DE ALIMENTOS**

**ANYELA YULIET MEZA HERNANDEZ  
HENRY ALBERTO SUAREZ VELASQUEZ**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Mecánico.**

**Director  
OMAR ARMANDO GELVEZ AROCHA  
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA  
BUCARAMANGA  
2013**

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	18
1. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	19
1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA.....	19
1.2. JUSTIFICACION A LA SOLUCION DEL PROBLEMA.....	20
1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO.....	21
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	21
1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
2. BIOMASA.....	22
2.1. CASCARILLA DE ARROZ.....	23
2.1.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ.....	24
2.2. CASCARILLA DE CAFÉ.....	26
2.2.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CASCARILLA DE CAFÉ.....	27
2.3. RESIDUOS FORESTALES.....	28
2.3.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LOS RESIDUOS FORESTALES.....	28
2.4. USO DE LA BIOMASA.....	29
3. LA GASIFICACIÓN.....	31
3.1. HISTORIA DE LA GASIFICACION.....	31
3.2. QUIMICA DE LA GASIFICACION.....	32
3.2.1. GASIFICACION CON AIRE.....	32
3.2.2. GASIFICACION CON OXIGENO O VAPOR DE AGUA.....	32
3.2.3. GASIFICACION CON H <sub>2</sub> .....	33
3.3. PROCESOS DE LA GASIFICACION.....	34
3.3.1. SECADO.....	34
3.3.2. PIROLISIS.....	35
3.3.2.1 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS.....	35
3.3.3. REDUCCIÓN O GASIFICACION.....	36
3.3.3.1 REACCIONES HETEROGENEAS DE GASIFICACION.....	36
3.3.3.2 REACCIONES HOMOGENEAS DE GASIFICACION.....	38

3.3.4.	OXIDACIÓN .....	39
4.	TECNOLOGIAS DE GASIFICACION .....	41
4.1.	GASIFICACION DE TIPO DOWNDRAFT .....	41
4.2.	GASIFICACION DE TIPO UPDRAFT .....	43
4.3.	GASIFICACION DE TIPO CROSSDRAFT .....	44
4.4.	GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.....	44
4.5.	APLICACIONES DEL GAS OBTENIDO.....	46
4.6.	REQUERIMIENTOS EN LA ELECCION DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA	46
4.7.	COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES TIPOS DE GASIFICADORES.....	47
5.	GASIFICADOR UPDRAFT .....	48
5.1.	MICROGASIFICACION.....	49
6.	MODELAMIENTO DEL PROCESO DE GASIFICACION.....	52
6.1.	MODELO 0-D: DE DIMENSION CERO.....	52
6.2.	MODELO 1-D.....	52
6.3.	MODELO 2-D.....	52
6.4.	MODELO 3-D.....	52
6.5.	SELECCIÓN DEL MODELO PARA LA GASIFICACION.....	53
6.6.	ECUACIONES QUE RIGEN EL PROCESO DE GASIFICACION .....	53
6.6.1.	BALANCE DE MASA.....	54
6.6.2.	EQUILIBRIO QUIMICO .....	54
6.6.3.	LA RELACION DE EQUIVALENCIA (ER).....	56
6.6.4.	BALANCE DE ENERGIA .....	57
6.7.	RESULTADOS DE LA SIMULACION.....	59
6.7.1.	TEMPERATURA DEL GAS .....	60
6.7.2.	PODER CALORIFICO DEL GAS.....	60
6.7.3.	COMPOSICION DEL GAS .....	61
7.	DISEÑO DE LA COCINA DE GAS.....	64
7.1.	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	64
7.2.	ALTERNATIVA DE SOLUCION PROPUESTA.....	65
7.3.	DISEÑO DEL REACTOR.....	66
7.3.1.	FLUJOS DE BIOMASA .....	67

7.3.2.	EFICIENCIA DEL GASIFICADOR.....	67
7.3.3.	LA CARGA DEL HOGAR.....	69
7.3.4.	DIAMETRO DEL REACTOR.....	69
7.3.5.	ALTURA DEL REACTOR.....	71
7.3.6.	MATERIAL DEL REACTOR.....	72
7.3.7.	AISLAMIENTO TERMICO DEL REACTOR.....	74
7.4.	SISTEMA DE ALIMENTACION DE BIOMASA.....	75
7.4.1.	TOLVA DE ALIMENTACION.....	75
7.4.2.	TORNILLO SIN-FIN.....	76
7.5.	SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE.....	79
7.5.1.	CUBIERTA DE TIRO FORZADO.....	80
7.5.2.	SELECCIÓN DEL VENTILADOR.....	81
7.5.3.	FLUJO DE AIRE REQUERIDO.....	82
7.5.4.	CAIDA DE PRESION EN EL REACTOR.....	84
7.6.	QUEMADOR.....	86
7.6.1.	DISTRIBUIDOR.....	86
7.6.2.	REJILLA.....	87
7.7.	SISTEMA DE ELIMINACION DE RESIDUOS.....	88
7.7.1.	BASE O MESA SOPORTE.....	88
7.7.2.	COMPUERTA DESLIZANTE.....	90
7.7.3.	CAJA DE RECOLECCION DE CENIZA.....	90
7.8.	ENSAMBLE.....	90
8.	PRUEBAS Y ANALISIS DEL PROTOTIPO.....	92
8.1.	PRUEBA PRELIMINAR.....	92
8.2.	EQUIPO UTILIZADO.....	93
8.2.1.	MODULO DE ADQUISICION DE DATOS.....	93
8.2.2.	TERMOANEMOMETRO DIGITAL.....	94
8.2.3.	TACOMETRO LASER.....	94
8.3.	OBTENCION DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA DEL REACTOR.....	95
8.3.1.	DESCRIPCION DE LA PRUEBA.....	95
8.3.2.	PERFILES DE TEMPERATURA RESULTANTES.....	96

8.3.3.	ANALISIS GENERAL .....	100
8.4.	POTENCIA UTIL DEL PROTOTIPO .....	100
8.4.1.	PRUEBA DE CONTROL.....	100
8.4.2.	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO.....	101
8.5.	COMPORTAMIENTO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ CON DIFERENTES FLUJOS DE AIRE .....	107
8.5.1.	VARIACION DEL CAUDAL PARA EL REACTOR DE 40 cm .....	107
8.5.2.	VARIACION DE CAUDAL PARA EL REACTOR DE 60 cm.....	108
8.5.3.	VARIACION DE CAUDAL PARA EL REACTOR DE 80 cm.....	109
8.5.4.	VARIACION DE LA POTENCIA UTIL CON EL ER. ....	110
8.6.	CONSUMOS DE BIOMASA .....	110
8.7.	COMPOSICION Y PODER CALORIFICO DEL GAS PRODUCIDO .....	111
8.8.	REDISEÑO DEL REACTOR .....	115
8.8.1.	PERFILES DE TEMPERATURA DEL NUEVO REACTOR.....	116
8.8.2.	PRUEBA DE CALENTAMIENTO DEL NUEVO REACTOR.....	117
8.8.3.	PRUEBA CON CASCARILLA DE ARROZ.....	117
8.8.4.	PRUEBA CON CASCARILLA DE CAFÉ.....	118
8.8.5.	EFICIENCIA EXPERIMENTAL DEL NUEVO REACTOR .....	119
8.9.	ANALISIS ECONOMICO DEL PROTOTIPO .....	119
8.9.1.	COSTO DE ADQUISICION .....	119
8.9.2.	COSTO DE OPERACIÓN.....	121
9.	CONCLUSIONES.....	123
10.	RECOMENDACIONES .....	126
	ANEXOS.....	129

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Componentes de una semilla de arroz .....	24
<b>Figura 2.</b> Apariencia de la Cascarilla de Arroz .....	25
<b>Figura 3.</b> Partes del Fruto de Café .....	26
<b>Figura 4.</b> Apariencia de la Cascarilla de Café .....	27
<b>Figura 5.</b> Procesos de Conversión de Biomasa .....	30
<b>Figura 6.</b> Bus londinense usando un gasificador en 1941 .....	31
<b>Figura 7.</b> Procesos de la Gasificación.....	33
<b>Figura 8.</b> Esquema del proceso de gasificación de la biomasa.....	40
<b>Figura 9.</b> Gasificador de Tipo Downdraft con Garganta.....	42
<b>Figura 10.</b> Esquema de un Gasificador de Tipo Updraft.....	43
<b>Figura 11.</b> Esquema de un Gasificador de Tipo Crossdraft .....	44
<b>Figura 12.</b> Diagrama Esquemático de un Gasificador de Lecho Fluidizado .....	45
<b>Figura 13.</b> Esquema de un Gasificador Tipo Updraft .....	48
<b>Figura 14.</b> Perfil Típico de Temperatura de un gasificador Updraft .....	49
<b>Figura 15.</b> Esquema de Gasificadores de TLUD y AVUD .....	50
<b>Figura 16.</b> Gasificador TLUD y AVUD.....	51
<b>Figura 17.</b> Prototipo TLUD y AVUD.....	51
<b>Figura 18.</b> Diagrama de flujo para el modelamiento de la gasificación .....	59
<b>Figura 19.</b> Temperatura del gas producido en función del ER.....	60
<b>Figura 20.</b> Poder Calorífico del gas producido en función del ER.....	60
<b>Figura 21.</b> Composición del gas producido por la cascarilla de arroz .....	61
<b>Figura 22.</b> Composición del gas producido por la cascarilla de café .....	62
<b>Figura 23.</b> Composición del gas producido por los residuos forestales .....	63
<b>Figura 24.</b> Esquema de la Cocina de Gas Propuesta .....	65
<b>Figura 25.</b> Proceso de diseño del gasificador.....	66
<b>Figura 26.</b> Flujos de energía en el gasificador.....	68
<b>Figura 27.</b> Dimensiones de Diseño de Reactor.....	71
<b>Figura 28.</b> Reactores Diseñados para el Prototipo .....	71
<b>Figura 29.</b> Reactores del Prototipo.....	72
<b>Figura 30.</b> Reactor de Brida Unión a la Tolva.....	73
<b>Figura 31.</b> Lana Mineral de Roca. ....	74
<b>Figura 32.</b> Transportador de Tornillo Doble Usado en la Industria Química y de Alimentos .....	75
<b>Figura 33.</b> Tolva de Alimentación Semicontinua (Unidades en mm) .....	76
<b>Figura 34.</b> Tornillo Sin-Fin (CAD-SOLIDWORK).....	77
<b>Figura 35.</b> Esquema de la Cocina con Suministro de Aire Forzado .....	79
<b>Figura 36.</b> Esquema del Distribuidor de Aire .....	80
<b>Figura 37.</b> Abrazaderas del Distribuidor-CAD-SOLIDWORK.....	80
<b>Figura 38.</b> Abrazaderas del Distribuidor .....	81

<b>Figura 39.</b> Ventilador de Flujo Axial.....	81
<b>Figura 40.</b> Ventilador Centrifugo con Motor Acoplado Directamente.....	82
<b>Figura 41.</b> Quemador y Brida de Sujeción .....	86
<b>Figura 42.</b> Distribuidor del Quemador.....	87
<b>Figura 43.</b> Rejilla del Quemador .....	87
<b>Figura 44.</b> Camisa del Quemador.....	88
<b>Figura 45.</b> Mesa de Soporte (CAD-SOLIDWORK) .....	89
<b>Figura 46.</b> Mesa de Soporte .....	89
<b>Figura 47.</b> Esquema de Compuerta de Salida de Ceniza.....	90
<b>Figura 48.</b> Mesa de Soporte .....	90
<b>Figura 49.</b> Prototipo de Cocina de Gas.....	91
<b>Figura 50.</b> Llama interrumpida en el Prototipo.....	92
<b>Figura 51.</b> Rediseño de la Salida de Gas del Quemador .....	93
<b>Figura 52.</b> Módulos de Adquisición de Datos serie Fieldpoint .....	93
<b>Figura 53.</b> Termo anemómetro.....	94
<b>Figura 54.</b> Tacómetro Laser .....	94
<b>Figura 55.</b> Montaje de las Termocuplas y conexión al computador para la prueba .....	95
<b>Figura 56.</b> Interfaz Creada en Labview.....	95
<b>Figura 57.</b> Perfil de Temperatura Obtenido en la Interfaz Labview .....	96
<b>Figura 58.</b> Perfiles de temperatura en el reactor de 40 cm .....	97
<b>Figura 59.</b> Perfiles de temperatura para el reactor de 60 cm.....	98
<b>Figura 60.</b> Perfiles de temperatura del reactor de 80 cm.....	99
<b>Figura 61.</b> Prueba de Calentamiento con Estufa .....	101
<b>Figura 62.</b> Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 40 cm.....	102
<b>Figura 63.</b> Potencia promedio con el reactor de 40 cm.....	103
<b>Figura 64.</b> Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 60 cm.....	103
<b>Figura 65.</b> Potencia promedio del reactor de 60 cm.....	104
<b>Figura 66.</b> Evolución de temperatura con el reactor de 80 cm .....	105
<b>Figura 67.</b> Potencia promedio del reactor de 80 cm.....	106
<b>Figura 68.</b> Quema del Gas Producido.....	107
<b>Figura 69.</b> Evolución de la temperatura con el reactor de 40 cm para diferentes caudales .....	107
<b>Figura 70.</b> Evolución de la temperatura con el reactor de 60 cm para diferentes caudales .....	108
<b>Figura 71.</b> Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 80 para diferentes caudales .....	109
<b>Figura 72.</b> Variación de la potencia promedio en función del ER.....	110
<b>Figura 73.</b> Analizador de emisiones TESTO 350.....	112
<b>Figura 74.</b> Puntos de medición de la concentración de CO .....	112
<b>Figura 75.</b> Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de arroz .....	113
<b>Figura 76.</b> Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de café.....	113
<b>Figura 77.</b> Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de café.....	114

<b>Figura 78.</b> Aspecto del reactor rediseñado. ....	115
<b>Figura 79.</b> Perfiles de temperatura del nuevo reactor .....	116
<b>Figura 80.</b> Evolución de la temperatura del agua con el nuevo reactor usando cascarilla de arroz.....	117
<b>Figura 81.</b> Aspecto de la llama generada por el gas de cascarilla de arroz .....	118
<b>Figura 82.</b> Evolución de la temperatura del agua con el reactor nuevo usando cascarilla de café .....	118
<b>Figura 83.</b> Estufa de Un Puesto A Gas.....	120

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los Tipos de Biomasa de Acuerdo a su Fuente.....	22
<b>Tabla 2.</b> Análisis Próximo de la Cascarilla de Arroz.....	25
<b>Tabla 3.</b> Composición Elemental de la Cascarilla de Arroz .....	25
<b>Tabla 4.</b> Poder Calorífico de la cascarilla de arroz en función del Contenido de Humedad .....	26
<b>Tabla 5.</b> Análisis próximo de la Cascarilla de Café .....	27
<b>Tabla 6.</b> Análisis Último de la Cascarilla de Café .....	27
<b>Tabla 7.</b> Variación del Poder Calorífico de la Cascarilla de Café con la Humedad .....	28
<b>Tabla 8.</b> Composición de Residuos Forestales .....	29
<b>Tabla 9.</b> Poder calorífico de los residuos forestales .....	29
<b>Tabla 10.</b> Composiciones Típicas del Gas Producido Según el Tipo de Gasificante.....	33
<b>Tabla 11.</b> Reacciones típicas del proceso de pirolisis .....	34
<b>Tabla 12.</b> Reacciones típicas del proceso de gasificación.....	34
<b>Tabla 13.</b> Composición del Char .....	36
<b>Tabla 14.</b> Reacciones homogéneas presentes en la gasificación .....	38
<b>Tabla 15.</b> Comparación entre los distintos tipos de gasificadores.....	47
<b>Tabla 16.</b> Eficiencia del reactor para diferentes tipos de biomasa .....	68
<b>Tabla 17.</b> Poder Calorífico y Flujos Másicos Para Cada Tipo de Biomasa.....	68
<b>Tabla 18.</b> Diámetro mínimo del reactor para cada tipo de biomasa.....	70
<b>Tabla 19.</b> Propiedades mecánicas del acero Cold Rolled.....	72
<b>Tabla 20.</b> Especificaciones técnicas de la lámina de acero Cold Rolled .....	73
<b>Tabla 21.</b> Especificaciones Técnicas de la Lana Mineral.....	74
<b>Tabla 22.</b> Capacidad Volumétrica y másica para cada tipo de Biomasa.....	76
<b>Tabla 23.</b> Valores de la eficiencia de carga.....	78
<b>Tabla 24.</b> Valores del factor de inclinación C .....	78
<b>Tabla 25.</b> RPM del tornillo en función del diámetro y el tipo de biomasa .....	78
<b>Tabla 26.</b> Flujo de Aire para cada Tipo de Biomasa .....	84
<b>Tabla 27.</b> Numero de Reynolds para el flujo a través del lecho de biomasa .....	85
<b>Tabla 28.</b> Caída de presión para cada tipo de biomasa.....	85
<b>Tabla 29.</b> Características Técnicas de la Estufa Haceb.....	101
<b>Tabla 30.</b> Flujos másicos de biomasa experimentales .....	110
<b>Tabla 31.</b> Cambio en el flujo de biomasa para los diferentes reactores .....	111
<b>Tabla 32.</b> Composición experimental del gas comparada con otros autores .....	111
<b>Tabla 33.</b> Composición teórica del gas proveniente de la simulación.....	114
<b>Tabla 34.</b> Poder calorífico del gas calculado en la simulación .....	115
<b>Tabla 35.</b> Eficiencias experimentales del nuevo reactor .....	119
<b>Tabla 36.</b> Costo de materiales para la construcción del gasificador .....	120
<b>Tabla 37.</b> Costo por Hora de Cocción del prototipo .....	121
<b>Tabla 38.</b> Costos Totales de Operación.....	122

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DEL PROCESO DE GASIFICACION.....	130
ANEXO B. PLANOS DE LA ESTUFA BASADA EN LA GASIFICACION.....	137

## RESUMEN

**TITULO:** DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE COCINA DE GAS BASADA EN LA GASIFICACION DE BIOMASA PARA LA COCCION DE ALIMENTOS\*.

**AUTORES:** ANYELA YULIET MEZA HERNANDEZ\*\*  
HENRY ALBERTO SUAREZ VELASQUEZ\*\*

**Palabras Claves:** Biomasa, Costos, Estufa, Gasificador, Prototipo, Updraft.

Se diseñó y construyó un prototipo de cocina doméstica, que utiliza la gasificación de biomasa usando aire como agente gasificante, para generar gas combustible, enfocándose en la facilidad de construcción, simplicidad de operación y su aplicación en pequeñas comunidades rurales. Para tal fin se seleccionó la gasificación de tipo UPDRAFT debido a las ventajas que se presentan sobre los otros tipos.

Se determinó la composición y el poder calorífico del gas producido por el prototipo para tres tipos de biomasa (cascarilla de café, cascarilla de arroz y residuos forestales) haciendo un análisis de cromatografía de gases, y se estudió mediante la experimentación con una serie de prototipos, el efecto del caudal de aire en el desarrollo del perfil de temperatura de los reactores y la potencia generada. Para este fin se incorporaron termocuplas en una línea ascendente del reactor y se varió el caudal de aire por medio del cambio en la velocidad de rotación del ventilador.

Al mismo tiempo se realizó una simulación del proceso de gasificación usando un modelo cero-dimensional en donde se aplica el criterio de equilibrio químico, para determinar los valores máximos de concentración de los elementos presentes en el gas combustible.

Con el prototipo que presento mejor desempeño se realizó un análisis económico que comprendía costo de adquisición y operación por cada hora de cocción, en el que también se compara con una cocina convencional de gas natural.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A GAS STOVE PROTOTYPE USED IN FOOD COOKING BASED ON BIOMASS GASIFICATION\*

**AUTHORS:** ANYELA YULIET MEZA HERNANDEZ\*\*  
HENRY ALBERTO SUAREZ VELASQUEZ\*\*

**Key words:** Biomass, costs, gasification, prototype, stove, updraft.

A domestic gas stove prototype was designed and manufactured. It uses biomass gasification with air as a gasifying medium to produce combustible gas. The design was focused on ease of construction, simple operation and applications for small rural communities. To achieve this, Updraft gasification was selected because of its advantages over other types of gasification.

The composition and the low heating value (LHV) was determined for the syngas in the gasifier when it operates with three kinds of biomass (Coffee husk, Rice husk and forest residue) by running a gas chromatography test. The effect of the air flow on the temperature profile and the power output was studied with a series of reactors with different geometrical configurations. Thermocouples were installed along the length of each reactor to study this situation, and the air flow was controlled by regulating the rotation speed of the fan.

At the same time, a simulation of the gasification process was developed using a zero-dimensional model where the chemical equilibrium approach was applied.

An economic analysis was made for the best performance prototype, the analysis included acquisition value and operative costs per cooking hour, and it was contrasted with a conventional gas stove that works with natural gas.

---

\* Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Omar Armando Gelvez

## INTRODUCCION

La cocción de alimentos es fundamental para todos los seres humanos, no solo brinda a las comidas el aumento de las propiedades organolépticas sino que extermina parásitos y bacterias contribuyendo al descenso de enfermedades. Las fuentes de energía más usadas en esta tarea son: el gas natural, el gas propano, la biomasa (leña, residuos agrícolas, estiércol, etc) y el sol.

La utilización de leña de una manera eficiente, en donde se aproveche todo el calor y no se generen gases nocivos para la salud humana, puede convertirse en una opción muy favorable para aquellas poblaciones, especialmente las del área rural, en donde no hay cobertura de gas natural o propano. La creación y diseño de una cocina doméstica que utilice los gases de síntesis generados por un gasificador, es el prototipo planteado y propuesto para ayudar a la solución de esta problemática.

La gasificación es una tecnología de conversión termoquímica que ha traído un gran interés, ya que ofrece mayor eficiencia en comparación con la combustión. Además de reducir la dependencia del petróleo, la gasificación es un proceso de valor añadido para el manejo de algunos subproductos. La gasificación posee varias ventajas posibles a la combustión directa; con el 80-90% del calor recuperado, quizás la ventaja más significativa de la gasificación es que además del calor residual recuperable generado por la combustión directa, proporcionan combustible de proceso utilizable.

## **1. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.1. IDENTIFICACION DEL PROBLEMA**

La cocción de alimentos es fundamental para todos los seres humanos, no solo brinda a las comidas el aumento de las propiedades organolépticas sino que extermina parásitos y bacterias contribuyendo al descenso de enfermedades. Las fuentes de energía más usadas en esta tarea son: el gas natural, el gas propano, la biomasa (leña, residuos agrícolas, estiércol, etc) y el sol.

En Colombia, las principales fuentes de energía en la cocción de alimentos son el gas natural, el gas propano y la biomasa. De acuerdo al Ministerio de Minas y Energía, para 2012 la cobertura del gas natural abarca el 80.3% de la población, el gas propano, registra 1.013.501 de usuarios, y la Organización Mundial de la Salud, en 2006 indica que un 15% de la población depende de combustibles sólidos (leña y carbón vegetal).

La agencia Internacional de Energía (2006) estima que cerca de 2500 millones de personas dependen de la leña como su principal combustible para la calefacción y cocción de alimentos.

El inconveniente del uso de biomasa y en particular la leña, es la deforestación causada por el uso exhaustivo de esta, trayendo consigo que ciertas especies de árboles con un mayor poder calorífico estén en vía de extinción. El proceso de combustión al que se somete la biomasa no siempre es el más eficiente. La eficiencia de estos equipos puede ser de apenas el 20 %. Un rendimiento tan bajo implica que la combustión se haga de forma incompleta, generando gases dañinos para la salud humana dentro de los cuales se incluyen el monóxido de carbono (CO) y, dependiendo de la composición también pueden generarse óxidos de azufre y de nitrógeno. Esto combinado con el hecho de que la combustión de material sólido genera cenizas convierte a las cocinas tradicionales en fuentes de problemas respiratorios para las comunidades que necesitan estos dispositivos.

La utilización de leña de una manera eficiente, en donde se aproveche todo el calor y no se generen gases nocivos para la salud humana, puede convertirse en una opción muy favorable para aquellas poblaciones, especialmente las del área rural, en donde no hay cobertura de gas natural o propano.

## 1.2. JUSTIFICACION A LA SOLUCION DEL PROBLEMA

La implementación de un equipo en donde la biomasa se quemada de forma controlada en un proceso de combustión con defecto de aire como es la gasificación puede lograr grandes beneficios en diferentes campos.

Ambientalmente, el uso de biomasa como combustible se considera que tiene un impacto neutro, ya que durante el proceso de gasificación y posterior combustión se libera dióxido de carbono en la atmósfera lo cual hace parte del ciclo natural del carbono. Además se puede lograr un aumento en la eficiencia energética, reducción de contaminantes y cooperar en la conservación de los bosques respecto a una cocina tradicional.

Comercialmente, la biomasa se puede utilizar no solo para cocinar alimentos sino también en otros procesos, como la calefacción residencial, el secado de alimentos y la producción de energía eléctrica.

En el campo de la salud, se evita la contaminación al interior de las viviendas, generando más bien ambientes libres de humos contaminantes, previniendo el contagio de enfermedades pulmonares obstructivas, infecciones respiratorias, etc.

El impacto social, de igual forma sería positivo ya que se concientiza a la comunidad de que lo que sobra en un proceso productivo no necesariamente debe convertirse en desecho y en realidad puede dársele otro uso. Un ejemplo de esto, es el uso que se le da actualmente a los residuos de caña de azúcar para la generación de vapor.

Ante nuevas ideas de desarrollo tecnológico que busquen un beneficio para la comunidad, la Universidad Industrial de Santander a través de la escuela de Ingeniería Mecánica, se busca promover su visibilidad por medio de la propuesta de alternativas ambiental y económicamente viables.

La creación y diseño de una cocina doméstica que utilice los gases de síntesis generados por un gasificador, es el prototipo planteado y propuesto para ayudar a la solución de la problemática descrita. Con este tipo de cocina se puede aprovechar la biomasa generada en forma de residuos forestales o agropecuarios, abundantes en un país mayormente agricultor como Colombia, teniendo en cuenta que la gasificación se caracteriza por la reducción química de la biomasa y un tipo de gas más limpio (a diferencia de un quemador donde se producen gases de combustión).

La gasificación no es una tecnología desarrollada recientemente sino que históricamente ha sido un recurso habitual en periodos de escasez de combustibles tradicionales ya que permite convertir sólidos (carbón o biomasa) en gases que pueden ser empleados en motores de combustión interna, calderas y turbinas.

Existen diferentes tecnologías de gasificación que pueden ser empleadas en el prototipo y dar solución a la problemática anteriormente descrita de manera más o menos favorable, afectando en la practicidad, rendimiento o recursos necesarios. Estas tecnologías deben ser analizadas para determinar las características esenciales que debe tener el equipo.

### **1.3. OBJETIVOS DEL TRABAJO DE GRADO**

#### **1.3.1. OBJETIVO GENERAL.**

Desarrollar tecnológicamente una alternativa al uso del gas natural en poblaciones donde la disponibilidad de este es baja, pretendiendo que pueda convertirse en una opción económica y ambientalmente viable que logre satisfacer las demandas de suministro de calor para la cocción de alimentos, y promoviendo los valores y la filosofía contenidos en la Misión de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

#### **1.3.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Diseñar y construir un gasificador de biomasa tipo UPDRAFT empleando un enfoque experimental, que será utilizado como cocina domestica con una potencia de 1,5 kW, para lo cual se deberá:

Determinar la composición y poder calorífico del gas producido por 3 tipos de biomasa (Residuos forestales, cascarilla de arroz, cascarilla de café) con un prototipo de 8,5 cm de diámetro y 40 cm de alto.

Analizar el efecto sobre la temperatura del gas producido usando varios prototipos en los que se varíe el diámetro del reactor, la altura y el caudal de aire.

Determinar la viabilidad económica y operacional, realizando un análisis del costo por kWh de energía calórica con el prototipo creado y compararlo con el costo operativo en una estufa convencional que use gas natural o leña.

## 2. BIOMASA

La biomasa es un material orgánico proveniente de un proceso biológico y que puede ser utilizado como fuente de energía. La biomasa cubre un amplio espectro que incluye arbustos pequeños, árboles, desechos animales y productos derivados. Las principales clases de biomasa cosechada son las basadas en celulosa, y las basadas en almidón y azúcar.

Las fuentes de biomasa son muy diversas, en la tabla 1 se muestra una clasificación por sectores y el estado en que se puede encontrar [11].

**Tabla 1.** Clasificación de los Tipos de Biomasa de Acuerdo a su Fuente

Fuente Generadora de biomasa	Tipo de Residuo	Características físicas
Residuos Forestales	Restos de aserrío: corteza, aserrín, astillas	Polvo, sólido, HR>50%
	Restos de ebanistería: aserrín, trozos, astillas	Polvo, sólido, HR 30-45%
	Restos de plantaciones: ramas, corteza, raíces	Sólido, HR>55%
Residuos Agropecuarios	Cáscaras y pulpa de frutas y vegetales	Sólido muy húmedo
	Cáscara y polvo de granos secos	Polvo, HR <25%
	Estiércol	Sólido muy húmedo
	Tallos, hojas, cáscaras, maleza, pastura	Sólido HR >55%
Residuos Industriales	Pulpa y cáscara de frutas y vegetales	Sólido moderadamente húmedo
	Residuos de procesamiento de carnes	Sólido muy húmedo
	Aguas de lavado de carnes y vegetales	Líquido
	Grasas y aceites vegetales	Líquido grasoso
Residuos Urbanos	Aguas negras	Líquido
	Desechos domésticos Orgánicos	Sólido muy húmedo
	Basura orgánica	Sólido muy húmedo

**Fuente:** Atlas de biomasa Residual

La mayoría de las fuentes de biomasa son de origen vegetal, una característica de los organismos vegetales es que durante su ciclo de vida obtienen energía a partir del proceso de fotosíntesis absorbiendo  $CO_2$  de la atmósfera. Cuando la biomasa obtenida de estos organismos se quema, la cantidad de  $CO_2$  liberado es la misma que se ha absorbido por lo cual se considera que el uso de biomasa tiene un impacto neutro respecto a la contaminación ambiental.

Para hacer un correcto aprovechamiento de la biomasa, es necesario conocer sus características. Las más representativas son:

- Composición física: conlleva conocer su densidad aparente, densidad real y contenido de humedad.
- Análisis último: Importante para saber el contenido de Carbono, Hidrógeno, Oxígeno y Nitrógeno en la biomasa.
- Análisis próximo: Con esto se evalúa el contenido de carbono fijo, el material volátil y las cenizas.
- Análisis estructural: permite conocer el contenido de lignina, de celulosa y de hemicelulosa.
- Poder calorífico: Permite evaluar la cantidad de energía que puede ser liberada en un proceso de combustión. Es importante cuando se quiere hacer uso de la biomasa como fuente de energía y necesaria para evaluar la eficiencia de un proceso.

Las fuentes de biomasa utilizadas en el desarrollo de la cocina de gas son de dos clases: residuos agrícolas provenientes de las plantaciones de arroz y café; y residuos forestales procedentes de la poda de árboles y arbustos. El arroz y el café fueron elegidos por estar entre los cultivos más distintivos en el sector agrícola colombiano.

## **2.1. CASCARILLA DE ARROZ**

El arroz es un cereal considerado el alimento básico de muchas culturas. En Colombia, es el componente principal de las comidas e ingrediente de un gran número de preparaciones que varían de acuerdo a la región. Son varios los departamentos de Colombia que fundamentan su economía en el cultivo del grano. Huila, Tolima y Meta los más reconocidos por sus exportaciones<sup>1</sup>.

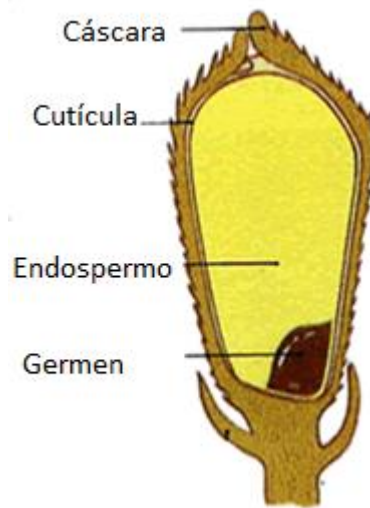
La semilla de arroz es producida por la planta *Oryza sativa* y está formada por 4 componentes principales:

- El germen
- El endospermo
- La cutícula
- La cascara

---

<sup>1</sup> Tomado de: [http://www.arrozcolombia.co/index.php?option=com\\_content&view=article&id=69:arroz-el-grano-universal-&catid=1:latest-news&Itemid=50](http://www.arrozcolombia.co/index.php?option=com_content&view=article&id=69:arroz-el-grano-universal-&catid=1:latest-news&Itemid=50)

**Figura 1.** Componentes de una semilla de arroz



**Fuente:** <http://www.english-online.at/biology/rice/parts-of-a-rice-kernel.gif>

La cáscara o cascarilla de arroz conforma aproximadamente el 20 % del grano y es separada en el proceso de trillado. La industria arrocera colombiana produce 400.000 toneladas de cascarilla de arroz al año, de las cuales cerca de un 15% es aprovechado como combustible y otro tanto como elemento para esparcir en establos<sup>2</sup>.

La cascarilla de arroz es un tejido vegetal constituido por celulosa y sílice, elementos que ayudan a su buen rendimiento como combustible. Este uso representa un aporte significativo a la preservación de los recursos naturales y un avance en el desarrollo de tecnologías limpias y económicas en la producción de arroz.

### **2.1.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA CASCARILLA DE ARROZ**

- Densidad aparente y humedad

La densidad aparente promedio de la cascarilla de arroz es de 340 kg/m<sup>3</sup> y su humedad relativa promedio es de 8%.

---

<sup>2</sup> Además de su uso como combustible la cascarilla de arroz se puede usar en construcción, cultivos y abonos, como se detalla en:

<http://biblioteca.unisucre.edu.co:8080/dspace/bitstream/123456789/285/1/333.794S571.pdf>

**Figura 2.** Apariencia de la Cascarilla de Arroz



**Fuente:** Autores.

- Análisis próximo

El análisis próximo de la cascarilla colombiana está dentro de los rangos encontrados a nivel mundial.

**Tabla 2.** Análisis Próximo de la Cascarilla de Arroz

Elemento	%
Carbono fijo	16.67
Cenizas	17.89
Volátiles	65.47

**Fuente:** Valverde (2007)

- Análisis último

Variaciones en la humedad relativa de la cascarilla afectan su composición elemental. La **Tabla 3** muestra la composición promedio de la cascarilla de arroz colombiana.

**Tabla 3.** Composición Elemental de la Cascarilla de Arroz

Humedad	Porcentaje (%)					Cenizas
	C	H	O	N	S	
9,0	38,3	5,2	37,3	0,3	0,4	18,5

**Fuente:** Valverde (2007)

- Poder calorífico

La humedad de la cascarilla de arroz también afecta significativamente el poder calorífico de la cascarilla de arroz. En la **Tabla 4** se muestra como disminuye el poder calorífico cuando se tiene una cascarilla muy húmeda.

**Tabla 4.** Poder Calorífico de la cascarilla de arroz en función del Contenido de Humedad

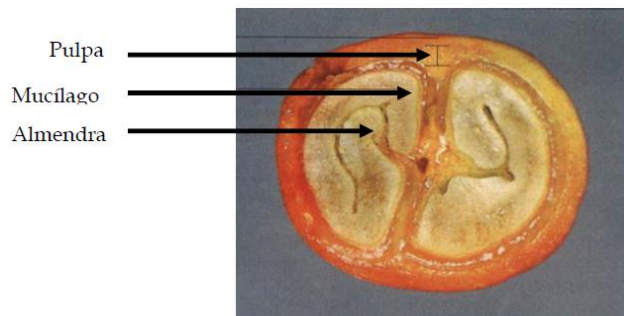
Humedad (%)	PCI (kJ/kg)
0	19880
10	17644
20	15412

**Fuente:** Valverde (2007) [24]

## 2.2. CASCARILLA DE CAFÉ

El café es el fruto producido por los cafetos, pertenecientes a la familia de las rubiáceas. Los granos de café o semillas están contenidos en el fruto del arbusto, los cuales en estado de madurez toman un color rojizo y se les denomina cereza. Cada una de ellas consiste en una piel exterior que envuelve una pulpa dulce. El fruto del cafeto cuyas semillas tostadas y molidas se utilizan para el consumo humano.

**Figura 3.** Partes del Fruto de Café



**Fuente:** Arguello (2005) [3]

La cascara de café es la capa de fruta exterior de la cereza del café que es removida durante el procesamiento del grano y regularmente se considera como desecho. La cascara de café es prácticamente pura lignocelulosa y no tiene ningún valor como fertilizante. A veces se quema en hornos toscos para secar la semilla de café<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> La cascara de café puede tener aún más usos, que incluyen la fabricación de bebidas, ensilaje o estiércol como se explica en: <http://www.ico.org/documents/ed1967c.pdf>

## 2.2.1. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA CASCARILLA DE CAFÉ

- Densidad aparente y humedad

La cascarilla de café tiene una humedad promedio de 5.4% y su densidad aparente promedio es de 349 kg/m<sup>3</sup>.

**Figura 4.** Apariencia de la Cascarilla de Café



**Fuente:** Autores.

- Análisis próximo

La cascarilla de café está compuesta en su mayoría de lignina, y su porcentaje de humedad es cercano al de la cascarilla de arroz.

**Tabla 5.** Análisis próximo de la Cascarilla de Café

Elemento	%
Carbono fijo	47,7
Cenizas	0,95
Volátiles	51,35

Fuente: García (2011)

- Análisis último de la cascarilla de café

**Tabla 6.** Análisis Último de la Cascarilla de Café

Humedad	Porcentaje (%)				
	C	H	O	N	Cenizas
11,4	50,3	5,3	43,8	<1	0,95

Fuente: García (2011)

- Poder calorífico

Al igual que con la cascarilla de arroz, el poder calorífico de la cascarilla de café se ve afectado por la cantidad de agua que posea.

**Tabla 7.** Variación del Poder Calorífico de la Cascarilla de Café con la Humedad

Humedad (%)	Poder calorífico (kJ/kg)
11	17789.87
13	16700

Fuente: García (2011)

### 2.3. RESIDUOS FORESTALES

Los residuos forestales son todos aquellos que se generan a partir de cultivos de leña o de hierba, los producidos en el desarrollo de actividades propias de estos sectores y los resultantes de las labores de poda. Estos residuos constituyen una importante fuente de biomasa residual. Por cada árbol utilizado para la producción maderera, solo se aprovecha comercialmente un porcentaje cercano al 20 %. Se estima que en la cadena agrícola, un 40 % de la biomasa se deja en el campo en forma de hojas y ramas, y el restante 40 % en el proceso de aserrío, en forma de astillas, corteza y aserrín.

#### 2.3.1. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS RESIDUOS FORESTALES

- Densidad aparente y humedad relativa

Los residuos forestales tienen una humedad promedio de 10% y su densidad aparente promedio es de 149 kg/m<sup>3</sup>.

- Análisis último

La composición de los residuos forestales varía en función del tipo de material que se recolecte. En algunas ocasiones habrá más residuos en forma de hojas y arbustos y en otras habrá más residuos en forma de astillas o corteza.

**Tabla 8.** Composición de Residuos Forestales

	Madera del tallo de pino	Residuo forestal marrón	Residuo forestal verde	Agujas de abeto	Corteza de abeto
Ceniza	0,2	3,8	2,1	6,65	2,3
Carbono	50,3	51,1	51,4	48,4	49,9
Hidrógeno	6,0	5,9	6,0	6,1	5,9
Nitrógeno	<0,1	0,5	0,5	0,6	0,4
Oxígeno	43,5	38,7	40,0	38,3	41,4
extractos	5,9	5,4	10,5	20,3	21

Fuente: Lindfors (2009)

- Poder Calorífico

Al igual que su composición, el poder calorífico de los residuos forestales varía en función del material que contenga. En el caso de los residuos provenientes de las labores de poda se tiene un valor de poder calorífico como se ve en la **Tabla 9**.

**Tabla 9.** Poder calorífico de los residuos forestales

Humedad (%)	Poder calorífico (kJ/kg)
20	14000

Fuente: Lindfors (2009) [17].

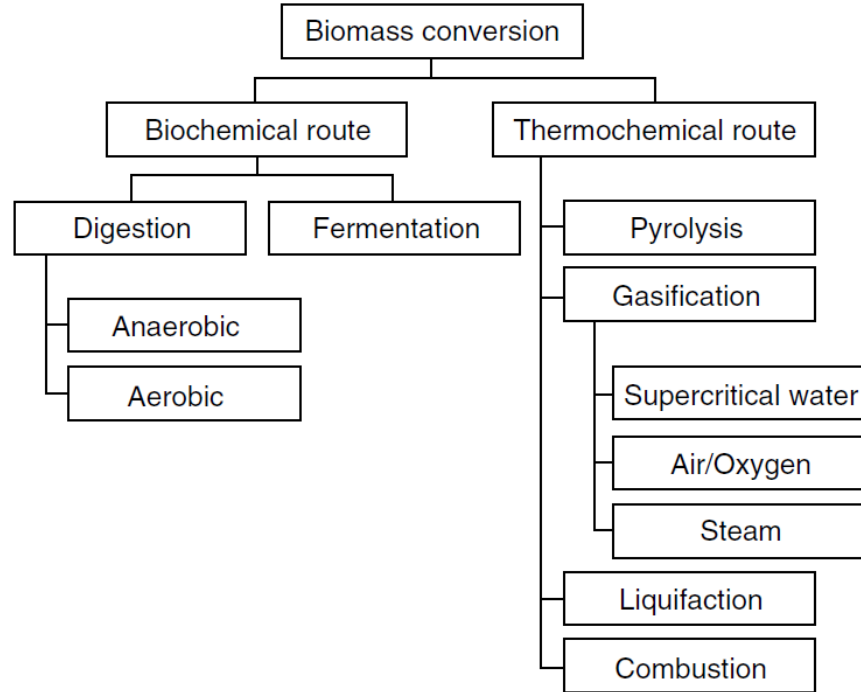
## 2.4. USO DE LA BIOMASA

A partir del aprovechamiento de la biomasa pueden obtenerse 4 tipos de productos:

- Productos líquidos (etanol, biodiesel, metanol, aceites).
- Productos Gaseosos (biogás, gas de síntesis, sustituto del gas natural).
- Productos Sólidos (Carbón, biomasa torrada).
- Energía (Calor, electricidad, movimiento).

Dependiendo del estado del producto que se quiera obtener, habrá un proceso de conversión que debe realizarse sobre la biomasa. Al ser un material sólido voluminoso y no uniforme, esta es difícil de transportar, por eso cada vez se prefiere más un producto en forma líquida o gaseosa. Los procesos de conversión de biomasa pueden agruparse como se muestra en la figura 5.

**Figura 5.** Procesos de Conversión de Biomasa



**Fuente:** Basu (2010)

Hay dos grandes categorías en la conversión de biomasa, la conversión bioquímica que consiste en el uso de microorganismos que con sus procesos metabólicos transforman la biomasa en otros productos, y la conversión termoquímica que usa cambios de temperatura y flujos de energía para realizar la transformación de la biomasa.

### 3. LA GASIFICACIÓN

#### 3.1. HISTORIA DE LA GASIFICACION

La gasificación no es una tecnología desarrollada actualmente, sino que ha sido un recurso frecuente en situaciones de carencia o escasez de combustibles ligeros, ya que permite convertir sólidos (carbón, biomasa) en gases que pueden ser empleados para usos cotidianos y hasta industriales.

La utilización de la gasificación se remonta dos siglos atrás durante la revolución industrial, en donde los gasificadores producían gas, el cual era utilizado para la iluminación (Mayer 1988). Hacia el año de 1839 Bischof<sup>4</sup> patentó un proceso sencillo para gasificar el coque denominado “el sistema de gasificación de lecho fijo”. Posteriormente se implementó la gasificación para los motores de combustión interna en 1881 (Stassen y Knoef). Durante la segunda guerra mundial los alemanes utilizaron gasificadores atornillados en sus vehículos para producir combustible cuando escaseaba el petróleo.

**Figura 6.** Bus londinense usando un gasificador en 1941



**Fuente:** <http://www.build-a-gasifier.com/images/BusGasifiertrailer.jpg>

Cuando se presentó la crisis energética de la década de 1970, la gasificación se estableció como un medio de conversión de biomasa en combustible, para compensar el uso del petróleo. Después de la guerra, la accesibilidad de los combustibles fósiles causó disminución en la industria de gas pobre.

---

<sup>4</sup> Karl Gustav Bischof fue un químico Alemán y es considerado el descubridor de la tecnología de gasificación.

La gasificación es una tecnología de conversión termoquímica que ha traído un gran interés, ya que ofrece mayor eficiencia en comparación con la combustión. Además de reducir la dependencia del petróleo, la gasificación es un proceso de valor añadido para el manejo de algunos subproductos. La gasificación posee varias ventajas posibles a la combustión directa; con el 80-90% del calor recuperado, quizás la ventaja más significativa de la gasificación es que además del calor residual recuperable generado por la combustión directa, proporcionan combustible de proceso utilizable.

### **3.2. QUIMICA DE LA GASIFICACION**

Se denomina gasificación al conjunto de reacciones termoquímicas, que se producen en un ambiente pobre en oxígeno, y que tiene como resultado la transformación de un sólido en una serie de gases combustibles que pueden tener un poder calorífico inferior (PCI) equivalente a la sexta parte del poder calorífico inferior del gas natural cuando se emplea aire como agente gasificante.

Estas reacciones se presentan mediante un agente gasificante que puede ser aire, vapor de agua, oxígeno o hidrógeno. El rendimiento del proceso de gasificación varía dependiendo del combustible (biomasa) y el agente gasificante que se utilice.

#### **3.2.1. GASIFICACION CON AIRE**

En el proceso de gasificación con aire, el oxígeno del aire quema parcialmente el residuo carbonoso procedente de la pirolisis (proceso simultáneo al de gasificación), y se genera el calor necesario para el proceso. Como no necesita fuente de calor externa, este proceso permite con un bajo costo el aprovechamiento local de diversos residuos agrícolas y forestales mediante su conversión termoquímica en gases de bajo contenido energético. El aire se introduce principalmente para aporte de calor mediante la combustión de parte del residuo carbonoso. El producto a obtener es un gas combustible de bajo contenido energético (inferior a 6 MJ/Nm<sup>3</sup>).

#### **3.2.2. GASIFICACION CON OXIGENO O VAPOR DE AGUA**

Se utiliza para obtención de gas de medio contenido energético (10-20 MJ/Nm<sup>3</sup>) o de gas de síntesis. Es un gas de mayor calidad al no estar diluido con nitrógeno.

No se puede utilizar con todos los tipos de residuos agrícolas y forestales ya que el tamaño y la forma de estos puede limitar su uso. El tamaño debe ser inferior a 1 cm, el lecho fluidizado es el más apropiado para la gasificación de biomasa con aire o vapor de agua.

### 3.2.3. GASIFICACION CON H2

Se produce un gas con alto contenido energético (superior a 30 MJ/Nm<sup>3</sup>) que por tener altos porcentajes de metano y olefinas, puede utilizarse como sustituto del gas natural.

A continuación se presentan las composiciones típicas del gas producido en función del agente gasificante suministrado:

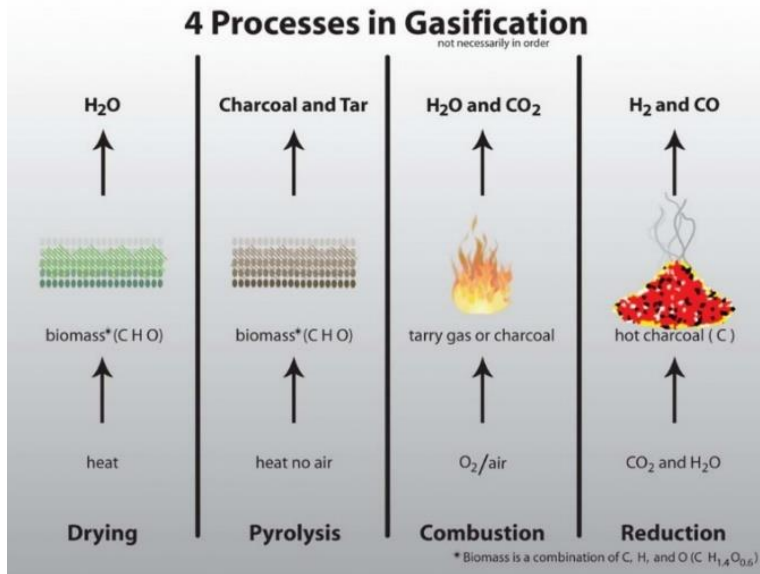
**Tabla 10.** Composiciones Típicas del Gas Producido Según el Tipo de Gasificante

Agente Gasificante	PCS (MJ/m <sup>3</sup> )	Composición del gas obtenido (% en volumen)					
		H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	C <sub>2</sub>
Aire	< 6	16	20	12	2	50	-
Oxigeno	10 – 20	32	48	15	2	3	-
Vapor de agua	10 – 20	50	20	22	6	-	2

Fuente: Gonzales (2008)

La combinación de la biomasa con el calor producirá solo char (carbón), pero la gasificación se caracteriza por que se presenta un cambio termodinámico en la composición de la biomasa. El conjunto de reacciones esperadas durante este proceso son: **el secado** que se produce a temperaturas de menos de 120°C, luego **la pirolisis** que se produce a 200°C - 800°C, **la gasificación** a 800°C - 1100°C y, por último se presenta **la combustión** a 800°C - 1500°C.

**Figura 7.** Procesos de la Gasificación



Fuente: [http://www.gekgasifier.com/wp-content/uploads/2009/07/4\\_proc\\_of\\_gasification-8001-1024x791.jpg](http://www.gekgasifier.com/wp-content/uploads/2009/07/4_proc_of_gasification-8001-1024x791.jpg)

Muchas reacciones químicas diferentes están involucradas en los procesos de pirólisis y gasificación. Estas reacciones dependen de los parámetros del proceso y se utiliza  $C_6H_{10}O_5$  para modelar la biomasa:

**Tabla 11.** Reacciones típicas del proceso de pirólisis

Reacciones de pirólisis	Entalpia de reacción
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow 5 H_2 + 5 CO + C$	209 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow 3 H_2 + 5 CO + CH_4$	120 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow 2 H_2 + 4 CO + CH_4 + H_2O + C$	-16 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow H_2 + 3 CO + 2 CH_4 + CO_2$	-140 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow H_2 + 3 CO + CH_4 + 2 H_2O + 2C$	-152 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 \rightarrow 2CO + 2 CH_4 + CO_2 + H_2O + C$	-276 KJ @ 1000K

Fuente: Basu (2010)

**Tabla 12.** Reacciones típicas del proceso de gasificación

Reacciones de gasificación con aire	Entalpia de Reacción
$C_6H_{10}O_5 + 0.5 O_2 \rightarrow 5 H_2 + 6 CO$	96 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 + O_2 \rightarrow 4 H_2 + 6 CO + H_2O$	-142 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 + O_2 \rightarrow 5 H_2 + 5 CO + CO_2$	-180 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 + 1.5 O_2 \rightarrow 3 H_2 + 6 CO + 2 H_2O$	-389 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 + 1.5 O_2 \rightarrow 5 H_2 + 4 CO + 2 CO_2$	-464 KJ @ 1000K
$C_6H_{10}O_5 + 2 O_2 \rightarrow 5 H_2 + 3 CO + 3 CO_2$	-745 KJ @ 1000K

Fuente: Basu (2010)

### 3.3. PROCESOS DE LA GASIFICACION

#### 3.3.1. SECADO

El secado es la primera etapa en el proceso de gasificación de un combustible sólido, en este paso el agua que está almacenada en los poros del sólido migra hacia la superficie formando una delgada capa de líquido que se evapora cuando se dan las condiciones adecuadas. Esto ocurre en un rango de temperaturas entre la ambiente y 100°C.

En el caso de la biomasa, cada kilogramo de humedad contenido en ella toma 2260 kJ de energía del gasificador para poder vaporizarse, esta energía no es recuperable y afecta el rendimiento del gasificador, por esto debe usarse biomasa

con un contenido bajo de humedad. Los sistemas de gasificación para la generación de energía usan biomasa con un contenido de humedad entre 10% y 20%. El vapor de agua proveniente de la biomasa es usado posteriormente en las reacciones de gasificación.

### 3.3.2. PIROLISIS

Después de que la biomasa se ha secado, la pirolisis toma lugar. Consiste en la degradación térmica de la biomasa en ausencia de aire u oxígeno a una temperatura especificada. Sus resultados dependen de dos factores:

- Temperatura de pirolisis.
- Velocidad de calentamiento.

Los productos iniciales de la pirolisis son gases condensables y carbón sólido. Los gases condensables se descomponen en gases no condensables (CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>), líquido y char (Carbón).

La pirolisis se representa por una reacción genérica como:



#### 3.3.2.1 PRODUCTOS DE LA PIROLISIS.

- **SOLIDOS** (principalmente carbón de leña o solo carbón)

El char es el producto sólido de la pirolisis. Se trata principalmente de carbono (85%) pero también puede contener algo de oxígeno e hidrógeno. El poder calorífico inferior es aproximadamente 32 MJ/Kg.

- **LÍQUIDO** (alquitranes, hidrocarburos más pesados y agua)

El tar es el producto líquido de la pirolisis. También conocido como alquitrán, contiene hasta 20% de agua. Es una mezcla de hidrocarburos complejos con grandes cantidades de oxígeno y agua, posee un poder calorífico inferior de 19.5 a 21 MJ/Kg en base seca. Este es producido rápidamente, ya que la biomasa se somete a un rápido aumento de temperatura seguido por un enfriamiento inmediato. Los productos que se encuentran en el tar o bio-aceite se dividen en las siguientes categorías:

- Hidroxicetonas.
- Azúcares.
- Ácidos carboxílicos.
- Compuestos fenólicos.

- **GAS**

Se producen gases no condensables (gas primario) y gases condensables (vapor). Los gases no condensables contienen moléculas de menor peso como el dióxido de carbono, monóxido de carbono, metano, etano y etileno. Poseen un poder calorífico inferior de 11 MJ/Nm<sup>3</sup>.

### **3.3.3. REDUCCIÓN O GASIFICACION**

Después de que la biomasa se ha transformado en la etapa de pirolisis, los productos resultantes (hidrocarburos en fase sólida, líquida y gaseosa) reaccionan con vapor de agua, dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrogeno en lo que se conoce como reducción o gasificación. Aquí se presentan dos tipos de reacciones químicas: reacciones heterogéneas las cuales se dan entre componentes en diferente fase y reacciones homogéneas que se dan entre compuestos en una misma fase. Las reacciones de gasificación son normalmente endotérmicas, aquellas reacciones con oxígeno e hidrogeno son exotérmicas.

#### **3.3.3.1 REACCIONES HETEROGENEAS DE GASIFICACION**

Dentro de este grupo, se encuentran las reacciones entre el char y los componentes del agente gasificante. El char es el componente sólido que queda de la biomasa después de sufrir el proceso de pirolisis. El char está compuesto en gran parte de carbón aunque su composición depende de las condiciones en las que se da la pirolisis (que es un proceso complejo y difícil de estudiar). Muchos autores modelan el char como carbón puro y otros como Di blasi (2008) [10] lo modelan como un hidrocarburo con la siguiente composición:

**Tabla 13.** Composición del Char

<b>COMPONENTE</b>	<b>COMPOSICION [%]</b>
Carbono (C)	95
Hidrogeno (H)	2
Oxígeno (O)	3

**Fuente:** Di Blasi (2008)

Al haber distintas fases en las reacciones, estas se ven influenciadas por fenómenos de transferencia de masa entre las partículas del sólido y la fase gaseosa. Para que el reactivo gaseoso se encuentre con el reactivo sólido, este debe viajar a través de la mezcla gaseosa que envuelve la partícula sólida y posiblemente a través de una capa de ceniza formada por el material que no reaccionó.

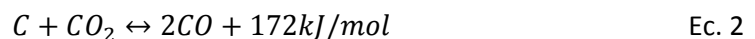
En una reacción gas-sólido, normalmente se presentan los siguientes procesos:

1. Difusión del gas reactivo desde la fase gaseosa hacia la superficie del sólido.
2. Difusión del gas reactivo desde la superficie del sólido hacia las superficies internas a través de los poros.
3. Absorción del gas reactivo en la superficie del sólido.
4. Reacción en la superficie.
5. Desorción del producto desde la superficie del sólido.
6. Difusión del producto desde la superficie interna del sólido hacia la superficie exterior.
7. Difusión del producto desde la superficie del sólido hacia la fase gaseosa.

Las principales reacciones heterogéneas que se presentan en un gasificador son:

- **REACCION DE BOUDOUARD**

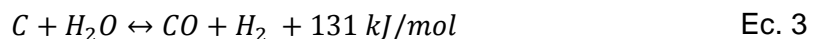
La reacción entre el char y el dióxido de carbono se conoce como la reacción de boudouard. Su ecuación química es la siguiente:



El limitante de esta reacción es la temperatura, para valores menores a 1000 K la velocidad de reacción es muy pequeña.

- **REACCION DE DESPLAZAMIENTO AGUA-GAS (WATER GAS SHIFT)**

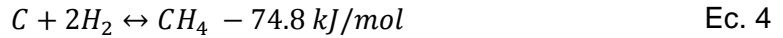
Esta es quizás la reacción más importante en el proceso de gasificación ya que produce los gases que van a ser aprovechados posteriormente. Esta reacción involucra el char y el vapor de agua para producir monóxido de carbono (CO) e hidrogeno ( $H_2$ ). Su ecuación química es la siguiente:



El factor limitante de esta reacción es la presencia de hidrogeno el cual inhibe la velocidad de reacción. Se debe remover continuamente el hidrogeno para poder acelerar la reacción.

- **REACCION DE METANACION**

Esta reacción lleva a la producción de metano y se da entre el char y el hidrogeno.



### 3.3.3.2 REACCIONES HOMOGENEAS DE GASIFICACION

Los compuestos involucrados en estas reacciones son el oxígeno, el hidrogeno, el metano, el dióxido de carbono, el monóxido de carbono y el vapor de agua. Estos gases provienen de las reacciones heterogéneas y de oxidación de la biomasa.

A continuación se presenta una lista de las reacciones que pueden ser consideradas en la gasificación de la biomasa. Nótese que también aparecen reacciones que involucran nitrógeno, sin embargo estas solo se consideran cuando el agente gasificante es aire. Hay que tenerlas en cuenta ya que los compuestos generados son contaminantes para el medio ambiente.

**Tabla 14.** Reacciones homogéneas presentes en la gasificación

Reacciones homogéneas de gasificación
$CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$
$2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$
$2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$
$CH_4 + 2O_2 \leftrightarrow CO_2 + 2H_2O$
$2C_2H_6 + 7O_2 \leftrightarrow 4CO_2 + 6H_2O$
$4NH_3 + 5O_2 \leftrightarrow 4NO + 6H_2O$
$N_2 + O_2 \leftrightarrow 2NO$
<b><i>Tar + O<sub>2</sub> → Gases de combustion</i></b>
<b><i>Tar → Gases</i></b>
$NO + CO \leftrightarrow \frac{1}{2}N_2 + CO_2$
$CO + N_2O \leftrightarrow N_2 + CO_2$
$CO + N_2O \leftrightarrow N_2 + CO_2$
$N_2O \leftrightarrow N_2 + \frac{1}{2}O_2$

Fuente: SOUZA-SANTOS (2004) [23]

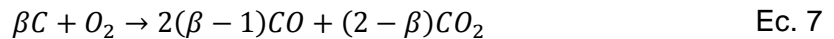
### 3.3.4. OXIDACIÓN

Para proveer a las reacciones de gasificación el calor y los compuestos necesarios para funcionar, parte de la biomasa alimentada al gasificador realiza un proceso de combustión también llamado oxidación.

En este proceso, parte del char generado en la pirolisis reacciona con el Oxígeno en una reacción exotérmica generando dióxido de carbono y monóxido de carbono. Las reacciones involucradas son las siguientes:



Ambas reacciones ocurren al mismo tiempo y son dependientes de la temperatura. El Oxígeno suministrado en el gasificador debe repartirse entre las dos. Para saber qué cantidad de Oxígeno toma cada reacción, estas pueden combinarse de la siguiente forma:



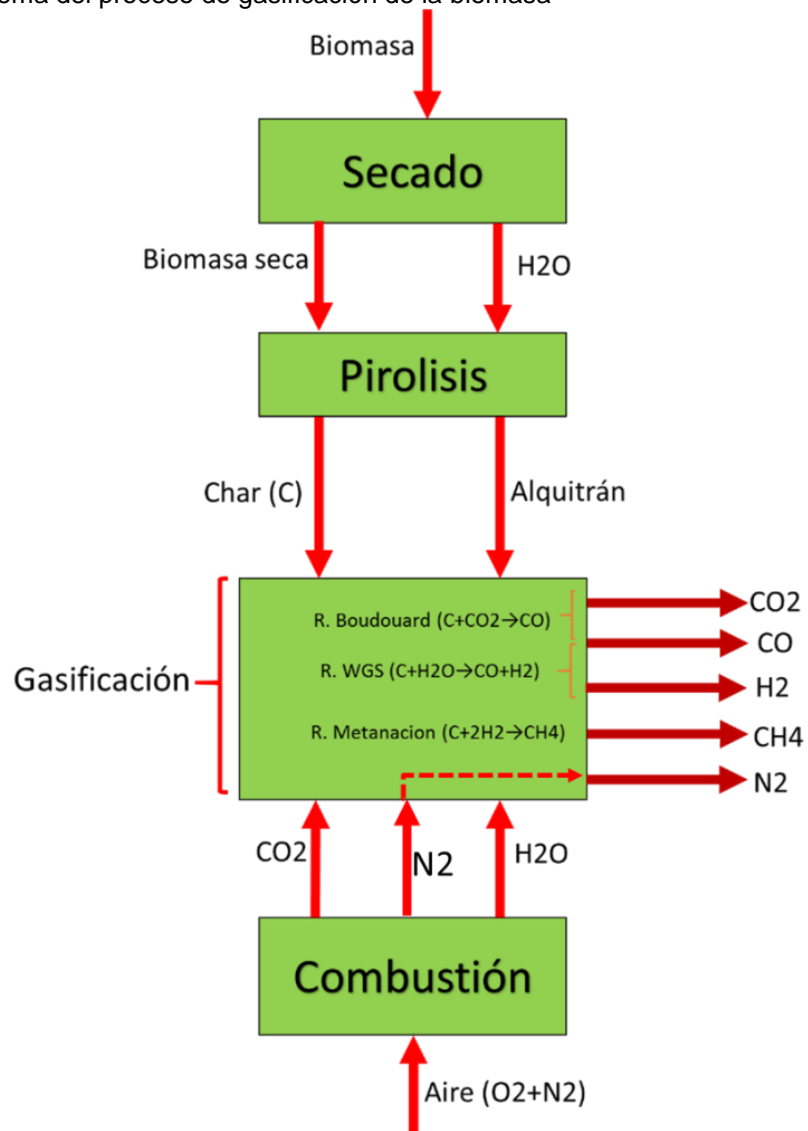
El coeficiente  $\beta$  varía de 1 a 2 y depende de la temperatura. Puede calcularse de la siguiente forma:

$$\beta = 2400e^{-\left(\frac{6234}{T}\right)} \quad \text{Ec. 8}$$

La oxidación de la biomasa no es el único método para obtener la energía necesaria en el gasificador. Esto va relacionado con el agente gasificante que se esté utilizando. Si se usa aire u oxígeno como agente gasificante la oxidación es muy conveniente; cuando se usa vapor de agua, este normalmente viene sobrecalentado para poder suministrar el calor necesario o también puede usarse un intercambiador de calor en el gasificador.

Todos los procesos de conversión que sufre la biomasa pueden resumirse en la **Figura 8**. La biomasa y el agente gasificante entran al reactor y producen principalmente metano, hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono. El nitrógeno aparece cuando el proceso de gasificación se realiza con aire.

**Figura 8.** Esquema del proceso de gasificación de la biomasa



**Fuente:** Autores

## **4. TECNOLOGIAS DE GASIFICACION**

Los sistemas de gasificación de biomasa se clasifican en dos: de lecho fijo y de lecho fluidizado. Cada uno de estos reactores presenta una serie de ventajas e inconvenientes, lo que hace que su elección dependa de varios factores; los principales criterios de elección son el tamaño y la densidad del residuo orgánico a procesar, la capacidad del procesamiento y la calidad deseada para el producto gaseoso a obtener.

Los gasificadores de lecho fluidizado generalmente son solo rentables en aplicaciones a gran escala, las que generan más de 15 MW, a diferencia de los lechos fijos que son más adecuados en pequeña escala y por lo general cuentan con una construcción sencilla (ROWLAND 2010) [21].

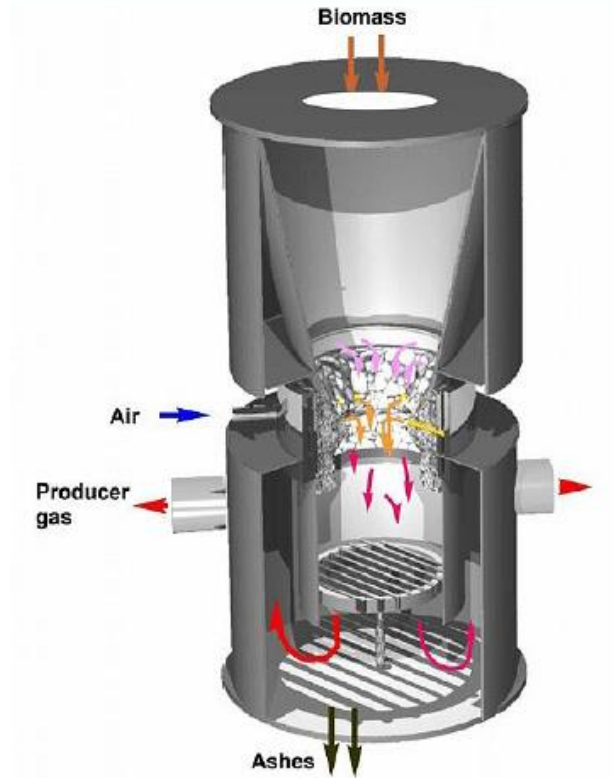
Los gasificadores de lecho fijo incluyen la conversión de alto carbono, la velocidad del gas y el bajo contenido de cenizas de arrastre. La eliminación del Tar es el principal problema y se están realizando mejoras en la conversión térmica y catalítica de alquitrán. Antes de su uso en muchas aplicaciones, el gas productor debe ser limpiado y enfriado, generalmente por medio de un sistema de filtración de tipo ciclón y filtros secos.

Dentro de la categorización de los gasificadores de lecho fijo, hay varios diseños de reactores de acuerdo con el acceso del agente gasificante y la biomasa. Se pueden obtener 3 tipos de sistemas: de aire descendente (Downdraft), de aire ascendente (Updraft) y Crossdraft.

### **4.1. GASIFICACION DE TIPO DOWNDRAFT**

Los gasificadores Downdraft se caracterizan por que los reactores pueden tener una garganta (Tipo Imbert) o no tenerla (Tipo de núcleo abierto). Es un sistema de corrientes paralelas que se caracteriza por que la biomasa y el agente gasificante entran por la parte superior del reactor en la misma dirección. La biomasa entra en la parte superior para luego secarse y pirolizarse antes de ser parcialmente quemado por los medios de gasificación. La mezcla máxima de los gases se produce en altas regiones de temperatura debido a la construcción de la garganta. El gas productor del gasificador de tiro descendente presenta menos alquitrán que los gasificadores de corriente ascendente y se retira en la parte inferior del reactor.

**Figura 9.** Gasificador de Tipo Downdraft con Garganta



**Fuente:** <http://emispec.ca/medias/downdraft-gasifier-source-nrc-g.jpg>

La principal ventaja de los gasificadores Downdraft radica en la posibilidad de producir un gas libre de alquitrán. Sin embargo el inconveniente importante de los equipos de corriente de aire descendente es su incapacidad para operar con ciertos tipos de combustibles, debido al tamaño y densidad que esta puede tener. En particular, materiales de densidad mullidas, dan lugar a problemas de flujo y caída de presión excesiva, y el combustible sólido debe ser peletizado antes de su uso.

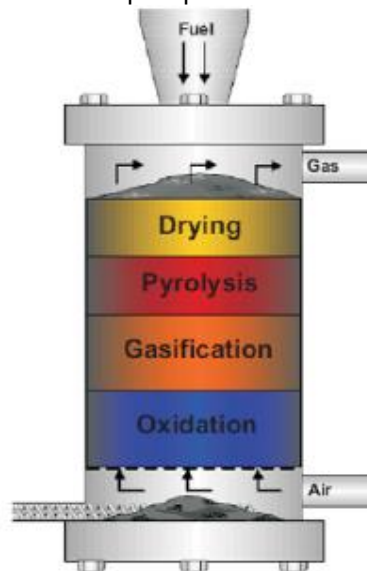
Los gasificadores sin garganta de tiro descendentes se desarrollaron para superar el problema de puenteo y la canalización en los sistemas de garganta. El diseño es adecuado para materiales de alimentación de pequeñas dimensiones con contenido de cenizas de hasta 20%.

El sistema de corriente de aire descendente, en comparación con corriente ascendente, presenta menor eficiencia debido al intercambio de calor interno, así como el poder calorífico del gas. La necesidad de mantener altas temperaturas uniformes a lo largo de un área de sección transversal hace poco práctico el uso de los gasificadores Downdraft en un rango de potencia por encima de aproximadamente 350 KW.

## 4.2. GASIFICACION DE TIPO UPDRAFT

Los gasificadores de corriente ascendente también se conocen como gasificadores en contracorriente, ya que la biomasa o materia prima fluye en dirección opuesta al agente gasificante. La materia prima entra desde la parte superior del reactor y se mueve lentamente hacia abajo a través de las zonas de secado, pirolisis, gasificación y combustión; mientras que el agente gasificante entra a través de la rejilla en la parte inferior de la cámara, este se mueve hacia arriba a través de las zonas y la salida del gas producto se presenta en la parte superior del reactor. Los alquitranes y volátiles producidos durante este proceso se transportan en la corriente de gas. Las cenizas se eliminan de la parte inferior del gasificador.

**Figura 10.** Esquema de un Gasificador de Tipo Updraft



**Fuente:** Mandl [20]

El gas producto sale a una temperatura relativamente baja (80-300°C) y contiene altas cantidades de Tar y alquitrán (10-20%) debido a que los productos de la pirolisis y zonas de secado salen directamente con gas pobre en lugar de ser descompuesto. Debido a diferentes parámetros de funcionamiento y carga de alimentación, los valores de eficiencia para gasificadores de corriente ascendente varían en gran medida. Encontrando que la eficiencia de la gasificación de la madera esta entre 60-75% dependiendo del tipo y diseño del gasificador.

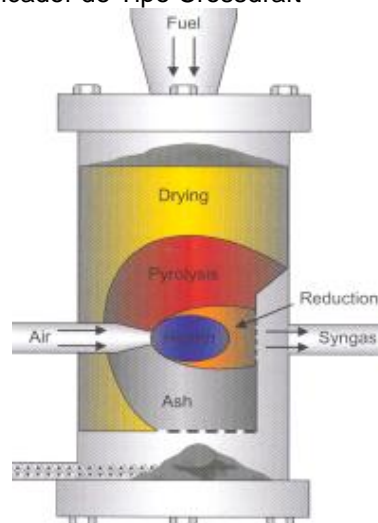
La principal ventaja de este gasificador son su simplicidad y el intercambio de calor interior conduce a bajas temperaturas de salida de los gases y alta eficiencia de los equipos, además de la posibilidad de funcionamiento con muchas materias primas.

Se pueden presentar inconvenientes importantes durante el proceso en este tipo de gasificador por la posibilidad de “canalización” en el equipo, lo cual puede llevar a escape de oxígeno y situaciones explosivas peligrosas con la necesidad de instalar rejillas móviles automáticos, así como de los problemas asociados con la eliminación del alquitrán en sistemas que incluyen condensadores y que resulta de las operaciones de limpieza de gases.

#### 4.3. GASIFICACION DE TIPO CROSSDRAFT

En los gasificadores de flujo cruzado o crossdraft la biomasa entra por la parte superior del reactor y las cenizas se obtienen en la parte inferior, mientras que el agente gasificante ingresa por un lado del reactor y gas que se produce sale por el lado opuesto. Son una adaptación para el uso de carbón.

Figura 11. Esquema de un Gasificador de Tipo Crossdraft



Fuente: <http://www.soi.wide.ad.jp/class/20070041/slides/04/img/40.png>

Las ventajas del sistema radican a la pequeña escala en la que se puede operar (Instalaciones de menos de 10 kW). Una desventaja de los gasificadores de tiro transversal son sus mínimas posibilidades de conversión de alquitrán y la necesidad de una alta calidad de carbón.

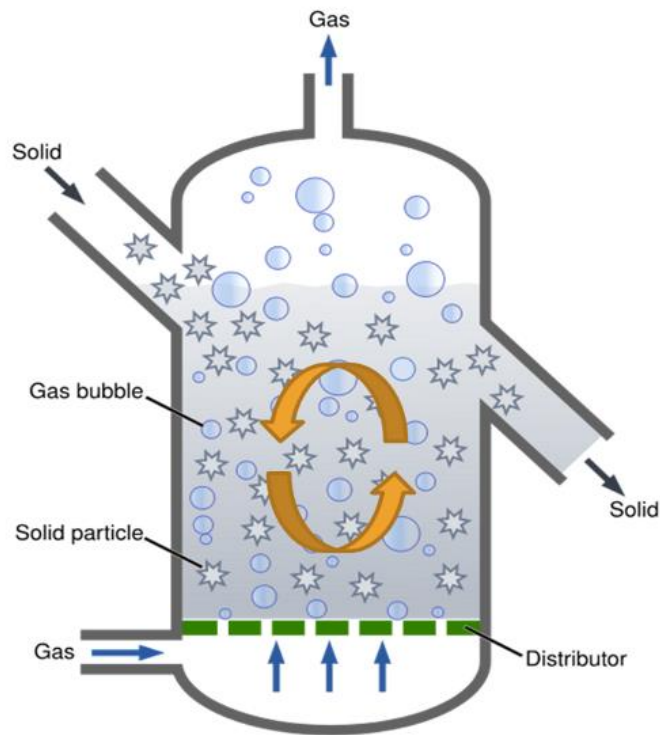
#### 4.4. GASIFICADOR DE LECHO FLUIDIZADO.

El gasificador de lecho fluidizado posee un enfoque de diseño que tiene como objetivo eliminar las dificultades que se presentan en los gasificadores de lecho fijo relacionadas con las propiedades físicas, características morfológicas y químicas del combustible.

Se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a una velocidad suficiente para mantener a estos en un estado de suspensión. El lecho se calienta externamente y el material de alimentación se introduce tan pronto como se

alcanza una temperatura suficientemente alta. Luego las partículas de combustible se introducen en la parte inferior del reactor, mezclándose así con el material del lecho, que se calienta casi instantáneamente hasta la temperatura de este. El resultado de este tratamiento, es que el combustible se piroliza muy rápido con una cantidad relativamente grande de materiales gaseosos.

**Figura 12.** Diagrama Esquemático de un Gasificador de Lecho Fluidizado



**Fuente:** [http://www.dordt.edu/images/academics/programs/engineering/senior\\_design/2010/gasifier/gasifier\\_full.png](http://www.dordt.edu/images/academics/programs/engineering/senior_design/2010/gasifier/gasifier_full.png)

Las principales ventajas que presentan los gasificadores de lecho fluidizado se derivan de su flexibilidad de control de la temperatura de la materia prima que resulta - puede mantenerse por debajo del punto de fusión de la ceniza -, y su capacidad para hacer frente a los materiales de grano fino y esponjoso sin necesidad de procesamiento previo.

Según el tipo de combustible a utilizar pueden presentar inconvenientes con problemas de la alimentación, la inestabilidad del lecho (contenido bastante alto de alquitrán del gas producto hasta  $500 \text{ mg/m}^3$  de gas) y cenizas flotantes de sinterización en los canales de gas.

#### **4.5. APLICACIONES DEL GAS OBTENIDO**

- Producción de calor para usos industriales: El gas puede sustituir a otros combustibles convencionales y sería un combustible limpio y sin problemas de contaminación.
- Producción de electricidad en zonas aisladas.
- Producción de calor para el secado de granos.
- Producción de vapor de agua.
- Producción de electricidad y/o potencia para el bombeo de agua de granjas.

#### **4.6. REQUERIMIENTOS EN LA ELECCION DE UN GASIFICADOR DE BIOMASA**

- Las pérdidas de energía deben ser relativamente bajas.
- El modo de operación será simple y adaptable a diferentes tipos de alimentación.
- Debe ser de simple construcción y que permita la eliminación de las cenizas.
- Debe elegirse adecuadamente la velocidad del medio gasificante y la geometría de esta zona del gasificador.
- Elección de los materiales de construcción para prever el efecto de altas temperaturas, corrosión, abrasión, etc.
- El tiempo de residencia de la biomasa en la zona de pirolisis debe ser suficiente para conseguir la máxima volatilización posible.

El proceso de gasificación se presenta de distintos métodos, su elección depende de varios factores como el tamaño y forma del residuo, el aprovechamiento de la energía del gas producido que se quiera obtener, de la aplicación al campo en el que se va a utilizar, y por supuesto, de los factores económicos que se dispongan.

## 4.7. COMPARACION ENTRE LOS DIFERENTES TIPOS DE GASIFICADORES

Tabla 15. Comparación entre los distintos tipos de gasificadores

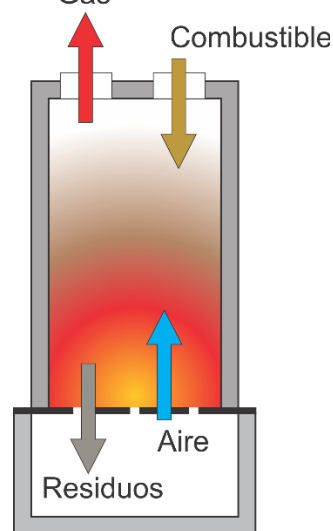
GASIFICADOR	DESVENTAJAS	VENTAJAS
UPDRAFT (contracorriente)	Gran cantidad de brea, alquitrán y productos de pirólisis son producidos	Simplicidad en su construcción y uso. Baja temperatura del gas producido. Alta eficiencia en la gasificación. Uso de combustible con alta humedad.
DOWNDRAFT, CROSSDRAFT (corriente paralela)	Alta cantidad de cenizas en los gases de combustión. Preparación previa del combustible. Alta temperatura del gas producido. Baja eficiencia térmica en la gasificación. Debe utilizarse biomasa muy seca.	Amplios rango de potencias desde 80 KW hasta 500 KW.
LECHO FLUIDIZADO	Debe utilizarse un combustible altamente reactivo. La ceniza generada, generalmente es altamente corrosiva.	Rendimientos mayores a los gasificadores de tipo "cama fija". Puede trabajar con combustibles altamente corrosivos.
FLUJO ARRASTRADO	Mayor consumo de aire primario. La pulverización o atomización del combustible. Mayores necesidades energéticas.	Alcance de altos desempeños y uso a gran escala. Las altas temperaturas garantizan la ausencia de breas y alquitranes. Eliminación de las cenizas en forma de escoria.

Fuente: Autores

## 5. GASIFICADOR UPDRAFT

Es un gasificador de lecho móvil en el que la biomasa y el agente gasificante fluyen en contracorriente. La biomasa en forma de material particulado o peletizado entra en la parte superior del gasificador y se mueve hacia abajo lentamente en donde se retiran los residuos sólidos. El agente gasificante entra por la parte del fondo a través de un distribuidor. Normalmente se usa aire o vapor de agua como agente gasificante.

**Figura 13.** Esquema de un Gasificador Tipo Updraft



**Fuente:** Autores

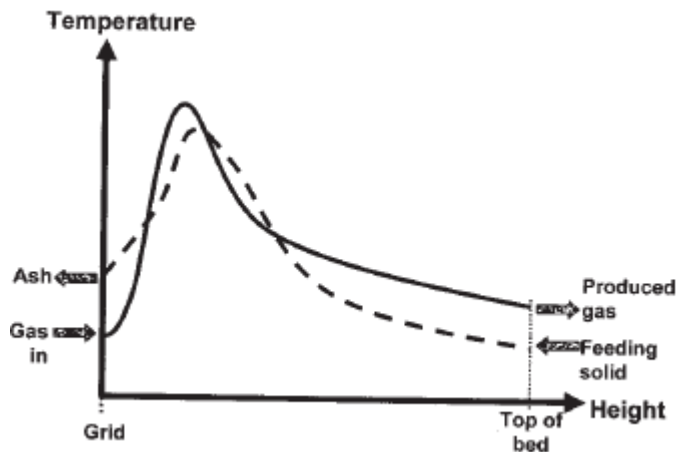
En su desplazamiento hacia abajo, las partículas de combustible pasan por los procesos principales vistos en capítulos anteriores: secado, pirolisis, gasificación y combustión. En la operación del gasificador no es posible delimitar estos procesos claramente, puede que parte del combustible se esté secando y otra parte este pasando por el proceso de pirolisis en la misma zona, mientras que en las zonas inferiores pueden estar ocurriendo reacciones de gasificación y combustión simultáneamente.

A medida que el gas va subiendo por el gasificador su composición y temperatura va cambiando. Por ejemplo, el oxígeno que entra se consume en la zona de combustión provocando que aumente la concentración de dióxido de carbono. Más arriba, el CO<sub>2</sub> y el vapor de agua reaccionan con el carbono de la biomasa para producir CO y H<sub>2</sub>.

En términos energéticos, las reacciones de las ecuaciones 5 y 6 de tipo exotérmica introducen al proceso unos 394 MJ por kmol de carbono, que son utilizados para las reacciones de gasificación que son endotérmicas.

Esto se ve reflejado en el perfil de temperaturas generado en el gasificador. El perfil típico se muestra en la **Figura 14**. La figura muestra la variación de temperatura de la fase sólida y líquida en el gasificador. Debido a los fenómenos de transferencia de masa y de calor entre estas dos fases, sus temperaturas tienden a aproximarse. El pico de temperatura se da en la zona de combustión (donde ocurren las reacciones exotérmicas), cuando la fase gaseosa va subiendo por el gasificador sufre reacciones de tipo endotérmico que disminuyen su temperatura.

**Figura 14.** Perfil Típico de Temperatura de un gasificador Updraft



**Fuente:** Souza-Santos

El gasificador de tipo Updraft es apropiado para una biomasa con un contenido alto de ceniza (hasta 25%) y de humedad (hasta 60%). Por ser de flujo a contracorriente, este gasificador usa el calor de la combustión muy eficientemente.

## 5.1. MICROGASIFICACION

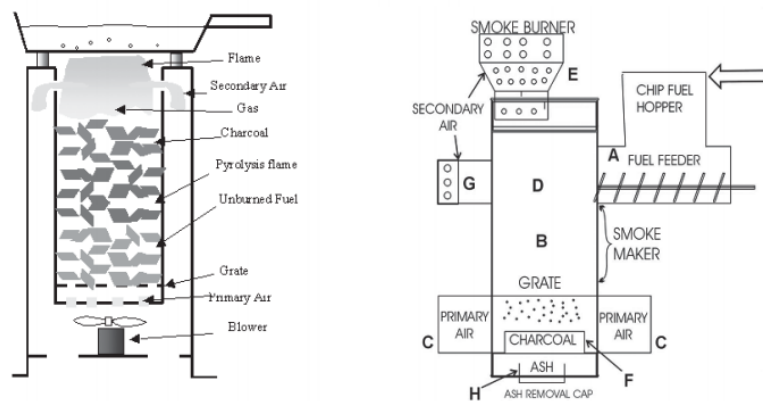
La microgasificación es una técnica utilizada alrededor del mundo, para poder abordar los problemas de escasez que se presentan, o alguna necesidad que se pueda presentar para la cocción de alimentos en un ambiente donde no exista la facilidad de obtener gas natural. Tratando de solucionar esta problemática algunos autores han diseñado prototipos de cocina basadas en el principio de gasificación. Las potencias requeridas para la cocción de alimentos son mucho menores que para la producción de energía, de ahí el término de microgasificación.

Por tanto, muchos proyectos de estufas son excepcionales en los componentes de las aplicaciones y los factores humanos. Ejemplo de ello fue el evidente éxito de las estufas Rocket donde su funcionamiento se basaba en la combustión de palos de madera.

La práctica de la gasificación en dispositivos pequeños no se logró hasta 1985, cuando el Dr. Thomas B. Reed conceptualiza y lleva a cabo lo que hoy se llama “corriente ascendente” (TLUD por sus siglas en inglés). Ya para el 2004 el Dr. Paul S. Anderson [1] crea un prototipo de gasificador de corriente ascendente con funcionamiento continuo siendo llamado AVUD.

Los gasificadores TLUD y AVUD se pueden construir de varias maneras diferentes. La característica distintiva de estos y otros gasificadores es la creación de los gases (“humo”) es independiente desde donde se queman los gases.

**Figura 15.** Esquema de Gasificadores de TLUD y AVUD

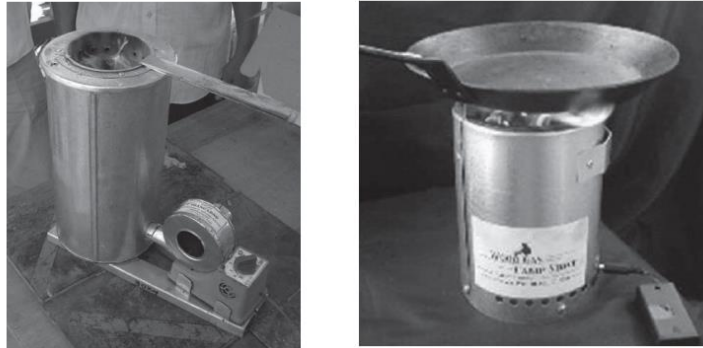


**Fuente:** Anderson [1]

Es de crucial importancia en cualquier estufa que se base en el principio de la gasificación que los flujos de aire primario y secundario estén separados. Pero existen algunos diseños en China como las estufas Vesto y los ventiladores de chorro o las estufas Phillips en donde los flujos de aire están parcialmente mezclados y son llamadas estufas regulares mixtas.

En la **Figura 16** a la izquierda se observa una estufa de gas de madera que se encuentra a través de internet (EE.UU. \$55) que es un gasificador de corriente ascendente TLUD (con cartucho de combustible extraíble). Estas estufas se dividen en dos categorías principales sobre la base de tener aire forzado o tiro natural.

**Figura 16.** Gasificador TLUD y AVUD



**Fuente:** Anderson (2004) [1]

Los gasificadores TLUD funcionan con lotes de combustible que son pirolizados por lo que deben ser alimentados continuamente. Se necesitan 15 pulgadas (38 cm) de chimenea interna para obtener el tiro natural, pero se necesita altura de la chimenea adicional en altitudes superiores a 3000 pies.

Los gasificadores AVUD son más grandes que los TLUD y operan continuamente como un gasificador con la alimentación de combustible adicional. También se presenta versiones de tiro natural y de aire forzado.

**Figura 17.** Prototipo TLUD y AVUD

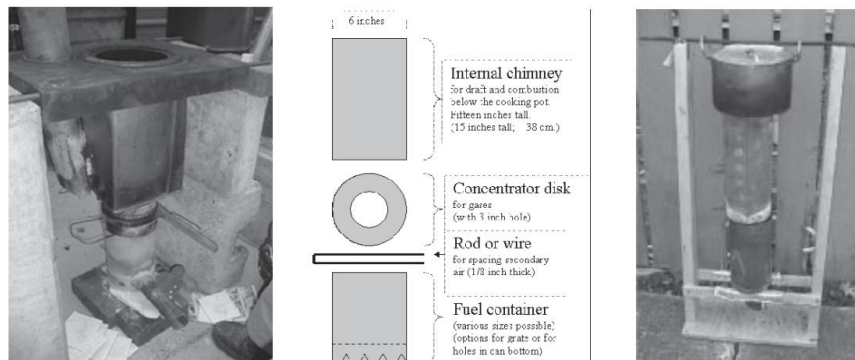


Figure 3 Examples and explanation of natural draft TLUD stoves. Left is the 2005 Champion stove. Right is the Andreatta TLUD testing device of 2007. (photos: Paul Anderson, left and centre, Dale Andreatta, right)

**Fuente:** Anderson (2004) [1]

El defensor internacional líder de los gasificadores TLUD y AVUD (Dr. Anderson [1]) ha trabajado directamente con hojalateros de Mozambique, Brasil, India, Bolivia y Camboya para crear cocinas TLUD disponibles localmente. Cada experiencia es diferente, lo que se tradujo en mejoras adicionales.

Aunque para hoy no existe ningún proyecto con un número significativo de cocinas gasificador instalados, la evidencia anterior muestra que la microgasificación es una tecnología que funciona.

## **6. MODELAMIENTO DEL PROCESO DE GASIFICACION**

Existen diferentes niveles para atacar el problema del modelamiento de un proceso de gasificación. De acuerdo al nivel de exactitud que se requiera el modelo será más o menos complejo. Los niveles de modelamiento pueden clasificarse como siguen:

### **6.1. MODELO 0-D: DE DIMENSION CERO**

Es la aproximación más sencilla que puede hacerse a un equipo o conjunto de equipos. En este tipo de modelamiento no se tienen en cuenta variaciones en el tiempo o en cualquier coordenada.

### **6.2. MODELO 1-D**

El siguiente nivel de modelamiento matemático es el modelo de una dimensión. Aquí se asume que las propiedades o condiciones dentro del equipo varían a lo largo de una sola coordenada espacial. Este modelo proporciona más información que el modelo 0-D ya que se pueden generar perfiles de variables como temperatura, presión o velocidad en función de la coordenada escogida.

### **6.3. MODELO 2-D**

El modelo 2-D se aplica cuando las variaciones de cualquier parámetro en una segunda coordenada espacial dentro del equipo no se pueden despreciar. Un ejemplo de esto es la transferencia de calor dentro de un tubo, en el que además de la variación de temperatura en su longitud, también existen gradientes de temperatura hacia las paredes.

### **6.4. MODELO 3-D**

Como su nombre lo indica, este modelo tiene en cuenta las tres dimensiones espaciales. Son modelos muy complejos y raramente son utilizados, sin embargo a veces son necesarios. Este modelo proporciona mucha información acerca del proceso que se esté simulando.

En casos en donde el equipo que se va a analizar tiene geometrías simétricas, como lo es un cilindro, el modelamiento puede simplificarse a uno de 2 dimensiones y seguir siendo válido. Esto no es posible en condiciones de geometría asimétrica, como la que puede encontrarse en una caldera industrial que quema combustible sólido. Por lo general, sus cámaras de combustión son rectangulares y además contienen tubos y baffles deflectores lo que hace que el modelamiento 3-D sea necesario.

Para este tipo de modelos se hace necesario resolver las ecuaciones de Navier-Stokes junto con las ecuaciones de conservación de masa y energía. Esto es posible actualmente gracias a los programas de CFD.

Los modelos anteriormente mencionados también pueden incluir otra dimensión: el tiempo. El análisis transitorio agrega un nivel de dificultad extra para el modelamiento de un proceso o equipo, sin importar cuantas coordenadas espaciales sean consideradas.

## 6.5. SELECCIÓN DEL MODELO PARA LA GASIFICACION

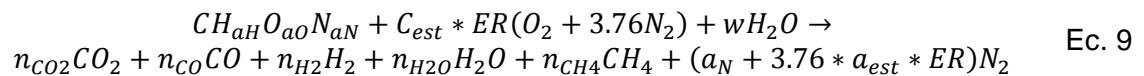
Los modelos 0-D en estado estable usados para la gasificación establecen relaciones entre las variables de entrada y de salida por medio del equilibrio químico.

Para los modelos multidimensionales se hace uso de la cinética química en conjunto con ecuaciones de conservación de masa y energía para determinar los perfiles de temperatura y concentración en el equipo que se esté analizando. Estos modelos incluyen sistemas de ecuaciones diferenciales altamente no lineales cuyo estudio se sale del alcance de este proyecto. Por esta razón se decidió modelar el proceso de gasificación usando un modelo 0-D.

Con el modelo se busca determinar la composición de los gases producidos en el gasificador y que posteriormente sirven para generar calor en el quemador.

## 6.6. ECUACIONES QUE RIGEN EL PROCESO DE GASIFICACION

Como se vio anteriormente, la gasificación es un proceso de oxidación con defecto de oxígeno. La ecuación química que rige este proceso para un mol de biomasa cualquiera es la siguiente:



En donde:

$a_H$  = moles de hidrogeno en la biomasa

$a_O$  = moles de oxigeno en la biomasa

$a_N$  = moles de nitrogeno en la biomasa

$C_{est}$  = coeficiente de aire estequiometrico

$ER$  = relacion de equivalencia

$w$  = humedad en el aire que entra

$n_{CO_2}$  = moles resultantes de  $CO_2$

$n_{CO}$  = moles resultantes de  $CO$

$n_{H_2}$  = moles resultantes de  $H_2$

$n_{H_2O}$  = moles resultantes de  $H_2O$

$n_{CH_4}$  = moles resultantes de  $CH_4$

### 6.6.1. BALANCE DE MASA

Haciendo el balance de masa para cada elemento en la ecuación química queda lo siguiente:

- BALANCE PARA EL CARBONO

$$n_{CO_2} + n + n_{CH_4} = 1 \quad \text{Ec. 10}$$

- BALANCE PARA EL HIDROGENO

$$a_H + 2 * w = 2 * n_{H_2} + 2 * n_{H_2O} + 4 * n_{CH_4} \quad \text{Ec. 11}$$

- BALANCE PARA EL OXIGENO

$$a_O + 2 * C_{est} * ER + w = 2 * n_{CO_2} + n_{CO} + n_{H_2O} \quad \text{Ec. 12}$$

- BALANCE PARA EL NITROGENO

Para el nitrógeno se asume que no reacciona durante el proceso (sustancia inerte) por lo que la cantidad que entra a la reacción es la misma que sale.

### 6.6.2. EQUILIBRIO QUIMICO

De la reacción de gasificación se producen 5 compuestos por lo que se necesitan igual número de ecuaciones para determinar la composición del gas producido. En la reacción se tienen 3 elementos cuyos balances de masa completan 3 ecuaciones. Para terminar el sistema se hace uso del criterio de equilibrio químico.

Con el criterio de equilibrio químico puede establecerse la composición de equilibrio de una mezcla de gases a partir de la constante de equilibrio. La constante de equilibrio  $K$  de una mezcla de gases a una temperatura especificada puede determinarse a partir del conocimiento del cambio de la función de Gibbs en estado estándar a la misma temperatura.

$$K = e^{\left(\frac{\Delta G_0}{RT}\right)} \quad \text{Ec. 13}$$

La constante de equilibrio también es función de la concentración de los compuestos que están interactuando en la reacción química. En términos generales, esta relación puede escribirse como:

$$K_i = \left( \prod_{j=1}^{n_c} X_j^{v_{j,i}} \right) * \left( \frac{P}{P_0} \right)^{\sum_{j=1}^{n_c} v_{j,i}} \quad \text{Ec. 14}$$

En donde:

$K_i$  = constante de equilibrio de la reacción  $i$

$n_c$  = número de especies químicas

$X_j$  = fracción molar del componente  $j$

$P$  = presión total

$P_0$  = presión a condiciones estándar

$\nu_{j,i}$  = coeficiente estequiométrico del componente  $j$  en la reacción  $i$

El coeficiente  $\nu_{j,i}$  tiene un valor negativo si la especie química es un reactivo y tiene un valor positivo si es un producto.

La constante de equilibrio  $K$  depende de la reacción química, en el proceso de gasificación ocurren varias reacciones al mismo tiempo y para completar las ecuaciones para el modelamiento se escogieron las reacciones de desplazamiento agua-gas, y de la gasificación con agua.

- CONSTANTE DE EQUILIBRIO PARA LA REACCIÓN DE DESPLAZAMIENTO DE AGUA-GAS (WGS)

La ecuación correspondiente a la constante  $k$  de la reacción WGS es la siguiente:

$$k_1 = 0.0265 * e^{\frac{3958}{T}} \quad \text{Ec. 15}$$

Si se expresa la constante de equilibrio como función de las fracciones molares de los compuestos en la reacción a partir de la ecuación 14 queda lo siguiente:

$$k_1 = \frac{X_{CO_2} * X_{H_2}}{X_{CO} * X_{H_2O}} \quad \text{Ec. 16}$$

En donde:

$X_{CO_2}$  = fracción molar del  $CO_2$

$X_{CO}$  = fracción molar del  $CO$

$X_{H_2}$  = fracción molar del  $H_2$

$X_{H_2O}$  = fracción molar del vapor de agua

- CONSTANTE DE EQUILIBRIO PARA LA REACCIÓN DE GASIFICACIÓN CON AGUA

La ecuación correspondiente a la constante  $k$  de la reacción de gasificación con agua es la siguiente:

$$k_2 = 3.139 * 10^{12} * e^{\frac{-16344}{T}} \quad \text{Ec. 17}$$

Al igual que la anterior, la constante  $k_2$  también es función de las fracciones molares de los compuestos, que en este caso sería:

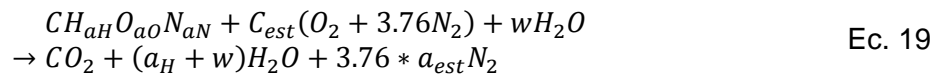
$$k_2 = \frac{X_{CO} * X_{H_2}}{X_{H_2O}} * P_{total} \quad \text{Ec. 18}$$

### 6.6.3. LA RELACION DE EQUIVALENCIA (ER)

Aquí se introduce un parámetro ER llamado la relación de equivalencia. Se define como la relación entre el aire que entra al gasificador y el aire necesario para una combustión completa. El ER generalmente se encuentra en el rango de 0.2 – 0.4. La composición del gas resultante es muy dependiente de este factor ER y como se vio anteriormente, de la temperatura de salida de los gases.

- DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE AIRE ESTEQUIOMETRICO

El coeficiente de aire estequiométrico  $C_{est}$  se calcula haciendo el análisis de combustión completa de la biomasa:



Haciendo el balance de masa para el Oxígeno, el coeficiente  $C_{est}$  se calcula como:

$$C_{est} = 1 + \frac{a_H}{2} - \frac{a_O}{2} \quad \text{Ec. 20}$$

- COMPOSICION DE LA BIOMASA

Las moles de cada elemento en la biomasa se calculan a partir del análisis último de ella por medio de la siguiente ecuación:

$$a_i = \frac{w_i * M_c}{w_c * M_i} \quad \text{Ec. 21}$$

En donde:

$w_i$  = fracción masica del componente  $i$  de la biomasa

$w_c$  = fracción masica del carbono en la biomasa

$M_c$  = peso molecular del carbono

$M_i$  = peso molecular del componente  $i$  de la biomasa

- CANTIDAD DE HUMEDAD EN LA REACCION

La humedad contenida en la biomasa y en el aire también toma parte en el proceso de gasificación. La cantidad total de humedad que entra a la reacción será la suma de ambas partes:

$$w = w_{aire} + w_{biomasa} \quad \text{Ec. 22}$$

En donde:

$w = \text{moles de humedad}$

$w_{aire} = \text{moles de humedad en el aire}$

$w_{biomasa} = \text{moles de humedad en la biomasa}$

- HUMEDAD EN EL AIRE

La cantidad de vapor de agua en el aire puede determinarse a partir del análisis psicrométrico:

$$w_{aire} = 4.76 * C_{est} * ER * \left( \frac{0,622 * \phi * P_{sat}}{P_{total} - \phi * P_{sat}} * \frac{M_{aire}}{M_{H2O}} \right) \quad \text{Ec. 23}$$

- HUMEDAD EN LA BIOMASA

Las moles de humedad en la biomasa se determinan a partir del porcentaje de humedad:

$$w_{biomasa} = \%_{h2o} * \frac{M_{bio}}{M_{H2O}} \quad \text{Ec. 24}$$

En donde:

$\%_{h2o} = \text{porcentaje de humedad}$

$M_{bio} = \text{peso molecular de la biomasa}$

$M_{h2o} = \text{peso molecular del agua}$

El sistema de ecuaciones anterior tiene como variable paramétrica la temperatura del gas a la salida del gasificador. Asumiendo un valor de temperatura se puede determinar la composición del gas. Para corroborar que el valor asumido es correcto se hace el balance de energía en el gasificador.

#### 6.6.4. BALANCE DE ENERGIA

El balance de energía es necesario para completar el sistema de ecuaciones. En este caso, aplicando la primera ley de la termodinámica en estado estable el balance queda como sigue:

$$-\dot{m}_{gas} * h_{gas} + \eta * \dot{m}_{bio} * PCI_{bio} = 0 \quad \text{Ec. 25}$$

En donde:

$\eta$  = eficiencia del gasificador

$h_{gas}$  = entalpia de la mezcla de gases que sale del gasificador

$\dot{m}_{bio}$  = flujo masico de biomasa

$\dot{m}_{gas}$  = flujo masico de gas

$PCI_{bio}$  = poder calorifico inferior de la biomasa

En la cocina se requiere una potencia de salida de 1,5 kW, valor que debe ser suministrado por el gas producido en el gasificador. En base a esto puede determinarse el flujo de gas necesario:

$$\dot{m}_{gas} = \frac{Pot_{sal}}{PCI_{gas}} \quad \text{Ec. 26}$$

Haciendo un balance de masa global para el gasificador puede encontrarse el valor del flujo másico de biomasa.

$$\dot{m}_{bio} = \frac{\dot{m}_{gas}}{4,76 * C_{est} * ER * \frac{M_{air}}{M_{bio}}} \quad \text{Ec. 27}$$

La eficiencia del gasificador se calcula como la relación entre la energía que entra al reactor y la que potencialmente puede salir, como se muestra en la ecuación 28:

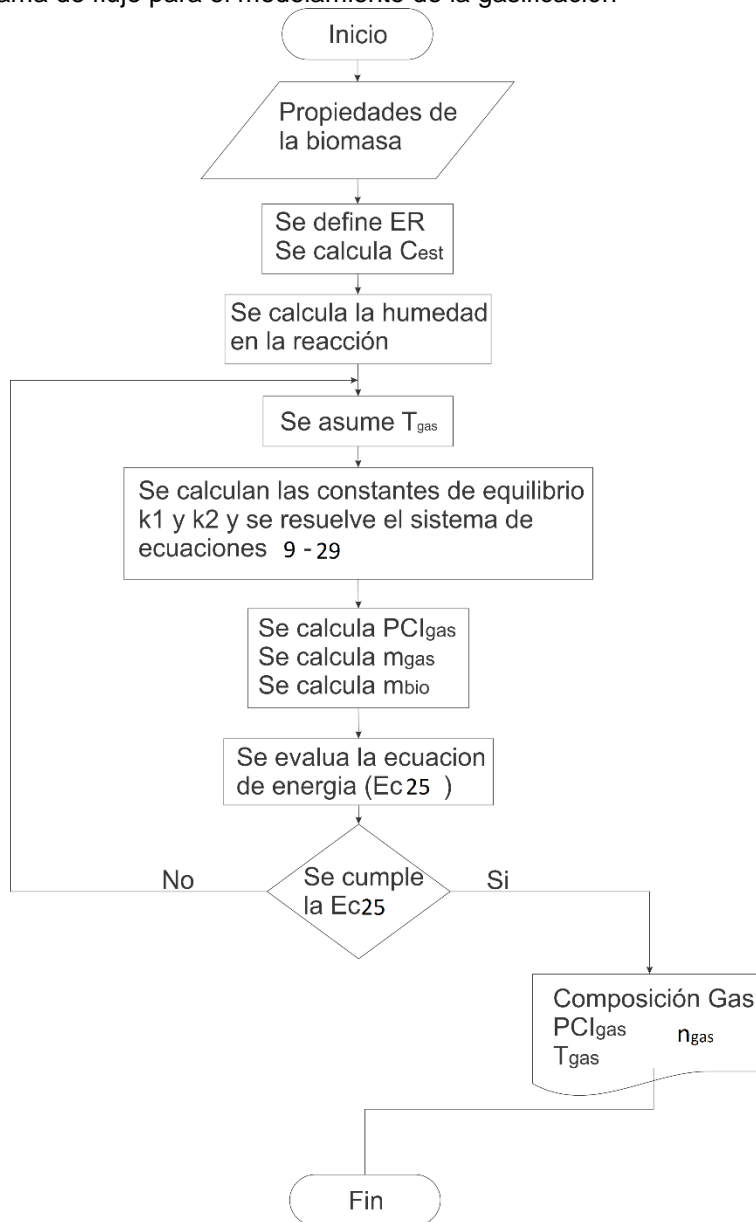
$$\eta = \frac{\dot{m}_{gas} * PCI_{gas}}{\dot{m}_{bio} * PCI_{bio}} \quad \text{Ec. 28}$$

La entalpia del gas de la ecuación 25 incluye la entalpía sensible debido al aumento de temperatura y la entalpía de formación de los componentes de la mezcla.

$$h = h_f^0 + \int_{T_0}^{T_{gas}} C_p * dT \quad \text{Ec. 29}$$

La determinación de la composición del gas a la salida del gasificador es un proceso iterativo. La siguiente figura muestra el método a seguir:

**Figura 18.** Diagrama de flujo para el modelamiento de la gasificación



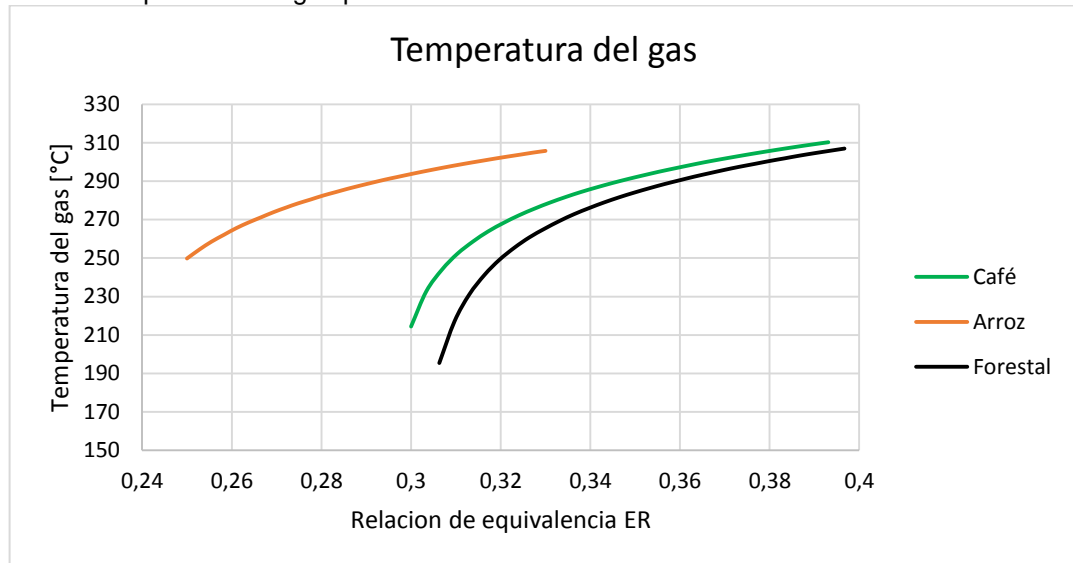
**Fuente:** Autores

## 6.7. RESULTADOS DE LA SIMULACION

Realizando el procedimiento anteriormente descrito para los tres tipos de biomasa en estudio se encontró lo mostrado en las gráficas 1, 2, 3 y 4. Hay que aclarar que aunque en el proceso de gasificación el factor ER puede ir hasta valores de 0,4, en la simulación solo fue posible calcular hasta este valor con la cascarilla de café y los residuos forestales. En el caso de la cascarilla de arroz, se calculó solo hasta un valor de 0,3, después de esto la simulación fallaba y arrojaba valores de concentración y poder calorífico negativos.

### 6.7.1. TEMPERATURA DEL GAS

Figura 19. Temperatura del gas producido en función del ER

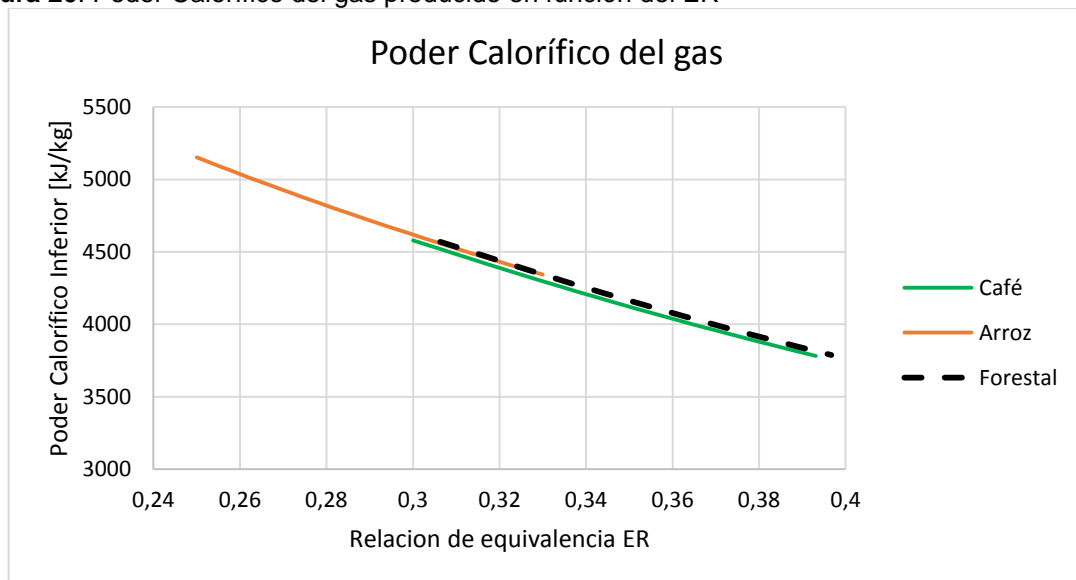


Fuente: Autores

La tendencia de la temperatura del gas es similar para los tres tipos de biomasa, no se presentan variaciones grandes con respecto al ER.

### 6.7.2. PODER CALORIFICO DEL GAS

Figura 20. Poder Calorífico del gas producido en función del ER



Fuente: Autores

El poder calorífico obtenido con la cascarilla de café y los residuos forestales es similar, se podría decir que son casi iguales. Con la cascarilla de arroz se obtiene el gas con el poder calorífico más alto. A medida que aumenta el ER, el poder calorífico disminuye.

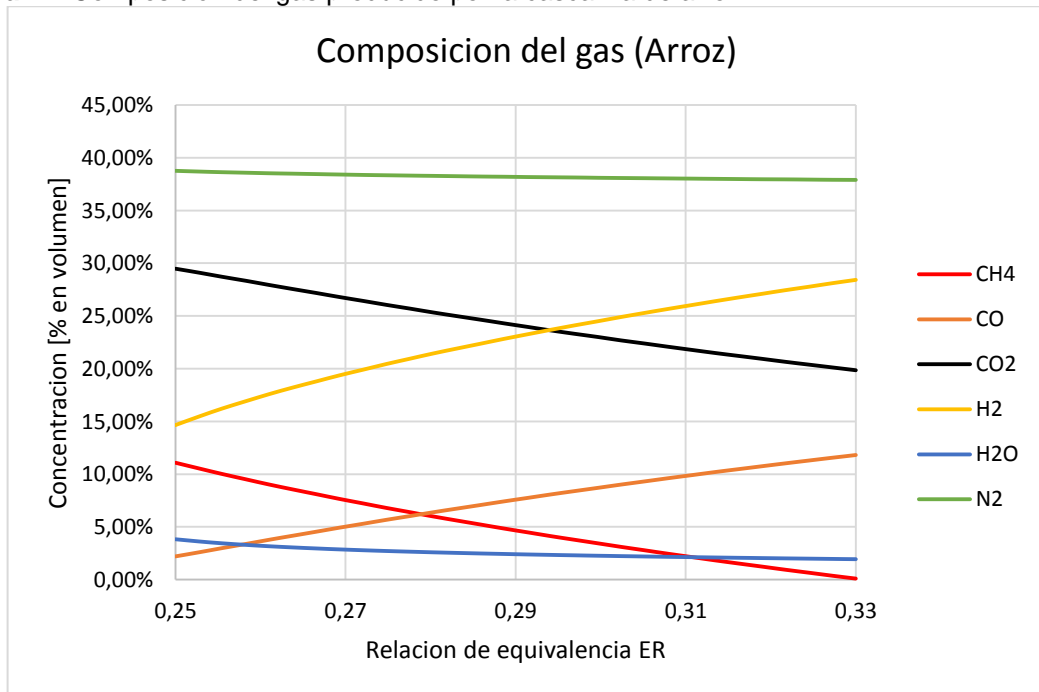
Los valores de poder calorífico son los esperados para el tipo de gasificación modelado (usando aire como agente gasificante). El rango de referencia esta entre 4 a 6 MJ/kg (Gonzales 2008) [14] y en la simulación se obtiene un promedio de 4 MJ/kg. Aunque en la realidad, este valor puede ser un poco más bajo debido a que el análisis por equilibrio químico muestra los valores máximos a los que se puede llegar con el proceso, ya que se consideran condiciones ideales como un tiempo de residencia alto del gas y la máxima conversión del char.

### 6.7.3. COMPOSICION DEL GAS

Las siguientes gráficas muestran los valores de concentración de las especies calculadas en el gas producido por el gasificador en función del ER.

- CASCARILLA DE ARROZ

**Figura 21.** Composición del gas producido por la cascarilla de arroz



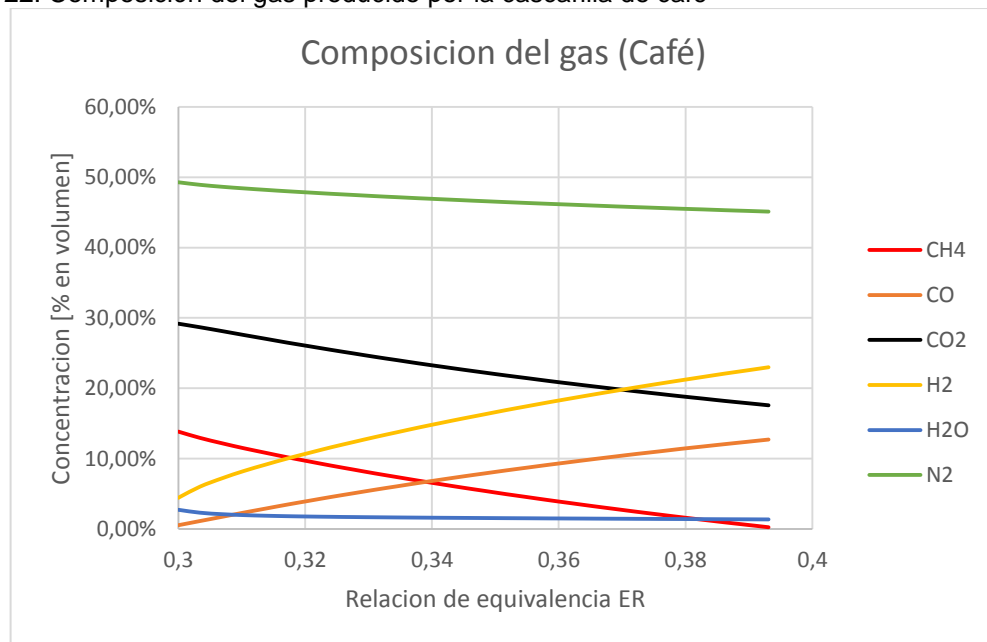
Fuente: Autores

El nitrógeno es el que predomina en el gas producido, algo esperable cuando se usa aire como agente gasificante, y esto es así para los otros tipos de biomasa. Su concentración permanece casi constante respecto a la variación del ER.

Con un ER bajo, el H<sub>2</sub> es el que tiene mayor concentración entre los gases combustibles. A medida que aumenta el ER, el CO<sub>2</sub> y el CH<sub>4</sub> disminuyen su concentración mientras que las del CO y el H<sub>2</sub> aumentan.

- CASCARILLA DE CAFÉ

**Figura 22.** Composición del gas producido por la cascarilla de café



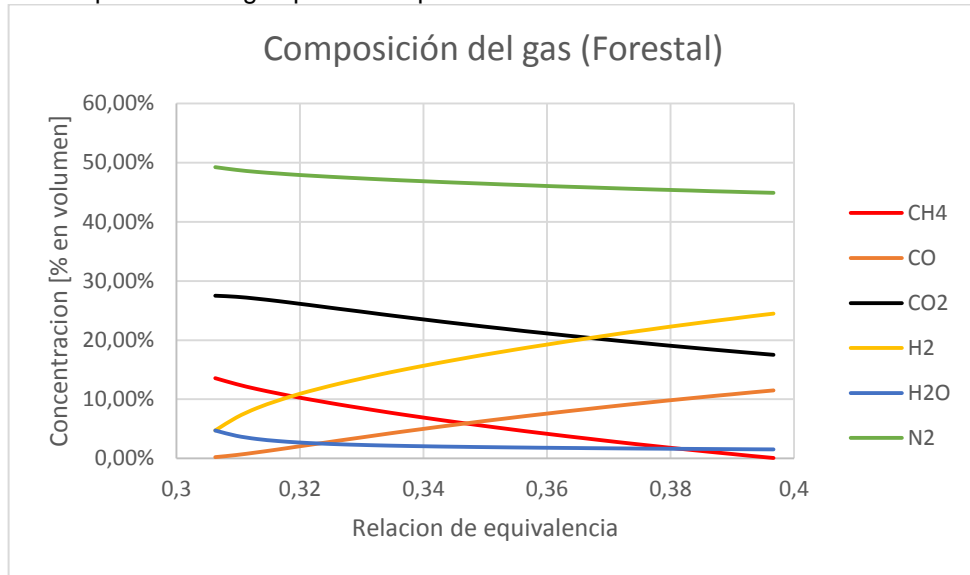
**Fuente:** Autores

El comportamiento con la cascarilla de café es similar al de la cascarilla de arroz, aunque hay menos concentración de hidrogeno, que da paso a un porcentaje más alto de nitrógeno.

- RESIDUOS FORESTALES

La variación de las concentraciones de los compuestos de gas en la cascarilla de café y en los residuos forestales es similar, coherente con el comportamiento visto en la temperatura del gas, debido a que la concentración es muy dependiente de este parámetro.

**Figura 23.** Composición del gas producido por los residuos forestales



**Fuente:** Autores

La concentración de vapor de agua en el gas es casi nula y no muestra variación respecto a la relación de equivalencia. En cambio, las concentraciones de H<sub>2</sub> y CO aumentan y las de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> disminuyen. El CH<sub>4</sub> es el elemento que más aporta al valor del poder calorífico del gas, por lo que si la concentración de este disminuye el poder calorífico tendera a disminuir como se ve en la figura 20;**Error!**  
**No se encuentra el origen de la referencia..**

## **7. DISEÑO DE LA COCINA DE GAS**

### **7.1. REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA**

El diseño de la estufa se enfatiza en contribuir a la solución de una necesidad primordial, generar una potencia necesaria para la cocción de alimentos sin depender de gas natural, solventando las dificultades o desventajas que otros sistemas tienen (cocinas de leña) en diferentes campos como son ambientales, económicos y operacionales.

La cocina de gas basada en gasificación debe ser equiparable en términos de potencia a una estufa convencional de gas natural o de leña. Los fogones de estas estufas tienen una potencia para uso doméstico de 1.5 kW. Este es el valor tomado como base para el diseño del reactor del gasificador. Además de la producción de energía, el equipo debe producir suficiente combustible para soportar una jornada de cocción completa (1 – 2 horas).

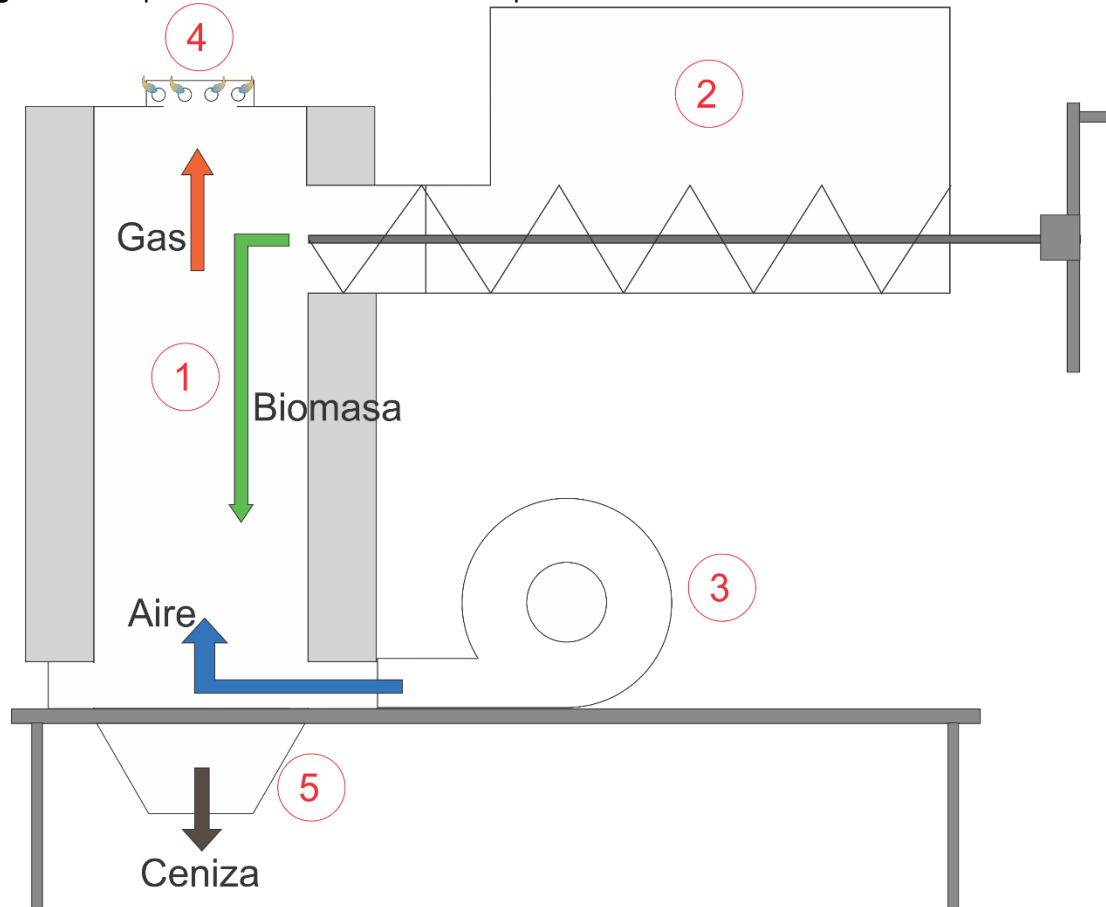
El enfoque de diseño dado al proyecto es generar un equipo de bajo costo cuyo modo de operación sea simple y que supla las necesidades de una fuente de calor de manera efectiva. Con características tales como el empleo de combustible sin costo, ya que utiliza desechos agrícolas (cascarilla de arroz, cascarilla de café y trozos de madera), el uso de materiales de fácil obtención y bajo costo sin limitar la adquisición o fabricación de esta, se busca posicionar la cocina como una alternativa viable debido a su implementación, operación y mantenimiento, en todas las áreas de primera necesidad.

El equipo objeto de estudio es un gasificador de lecho fijo tipo UPDRAFT, debido a las ventajas que presenta frente a los demás. El equipo opera con calentamiento indirecto, con el fin de obtener un gas con mayor poder calorífico, se emplea aire como agente gasificante ya que el oxígeno del aire quema parcialmente el residuo carbonoso procedente de la pirolisis y se genera el calor necesario para el proceso.

## 7.2. ALTERNATIVA DE SOLUCION PROPUESTA

La alternativa propuesta está esquematizada en la **Figura 24**.

**Figura 24.** Esquema de la Cocina de Gas Propuesta



**Fuente:** Autores.

La cocina está compuesta de 5 subsistemas esenciales:

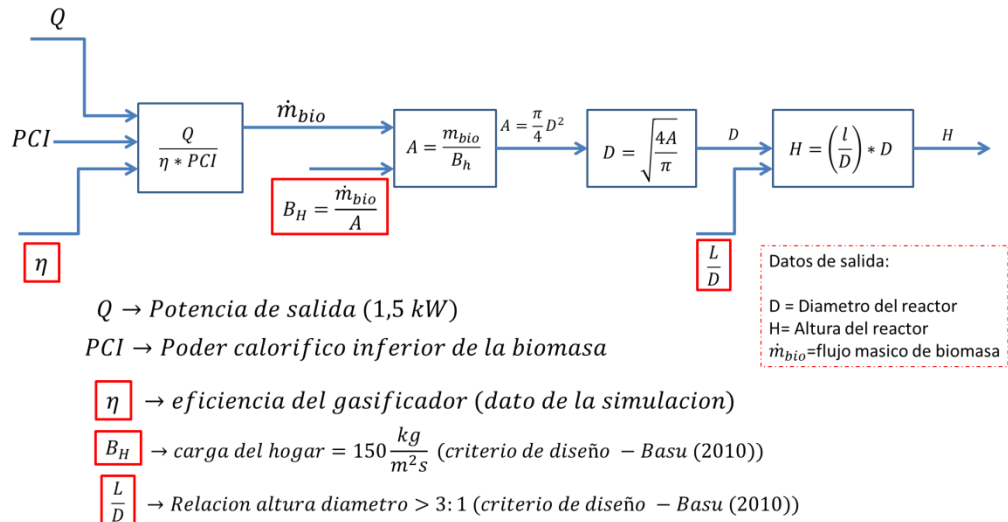
- **REACTOR (1):** Está conformado por dos tubos cilíndricos, uno inmerso dentro de otro y separados por material aislante (lana mineral). En el tubo interior se presenta la combustión de la biomasa mediante el suministro de agente gasificante (aire) de forma controlada.
- **SISTEMA DE ALIMENTACION DE BIOMASA (2):** conectado mediante bridas al reactor para la alimentación continua de biomasa hacia una producción de gas de mayor duración.

- **SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE (Ventilador y Distribuidor de Aire) (3):** Conformado por un ventilador que permite suministrar el aire necesario para que se dé la gasificación de la biomasa, y un anillo que permite mantener la biomasa y distribuir el aire de manera uniforme por todo el reactor.
- **QUEMADOR (4):** Los gases procedentes del reactor son distribuidos por el quemador, además de servir como apoyo donde reposara la olla o recipiente donde se cocinaran los alimentos.
- **SISTEMA DE ELIMINACION DE RESIDUOS (Mesa De Soporte Y Compuerta) (5):** sobre ella recarga todo el peso del reactor y la tolva además de poder adaptar la salida de cenizas a su base inferior.

### 7.3. DISEÑO DEL REACTOR

El reactor es la parte esencial de la cocina, en él se efectúan las reacciones de gasificación. El tipo de gasificador elegido es el de tipo Updraft ya que su construcción es sencilla, no se necesita de un control estricto de la biomasa y la potencia requerida es baja. En su parte superior e inferior está unido a dos bridas que sirve de ensamble para la adaptación del quemador y el distribuidor respectivamente.

Figura 25. Proceso de diseño del gasificador



Fuente: Autores

El proceso de diseño del gasificador es un proceso empírico en el que se tienen como datos de entrada la potencia útil ( $Q$ ) y el poder calorífico de la biomasa

(PCI). Los valores encerrados en rojos son criterios de diseño obtenidos de referencias y de la simulación realizada.

### 7.3.1. FLUJOS DE BIOMASA

Para determinar las dimensiones del reactor, primero debe calcularse el flujo de biomasa a gasificar. Esto puede hacerse a partir de la potencia requerida por la cocina que puede ser definida por la ecuación 30.

$$\dot{Q}_{sal} = \dot{m}_{bio} * PCI_{bio} * \eta_{gasif} \quad \text{Ec. 30}$$

En donde:

$\dot{Q}_{sal}$  = potencia de salida de la cocina

$\dot{m}_{bio}$  = flujo masico de biomasa a gasificar

$PCI_{bio}$  = Poder calorifico inferior de la biomasa

$\eta_{gasif}$  = eficiencia del gasificador

La potencia de salida debe ser de 1,5 kW como se definió en los requerimientos del sistema, el poder calorífico de la biomasa es un dato conocido y la eficiencia se determinó en la simulación del proceso de gasificación.

### 7.3.2. EFICIENCIA DEL GASIFICADOR

En un gasificador la eficiencia se mide como la relación entre la energía que entra al reactor y la energía que potencialmente podría salir. Se puede expresar como:

$$\eta_{gf} = \frac{PCI_g * m_g}{PCI_c * m_c} \quad \text{Ec. 31}$$

En donde:

$\eta_{gf}$  = eficiencia de gas frio

$m_c$  = masa de combustible gasificado

$m_g$  = masa de gas producido

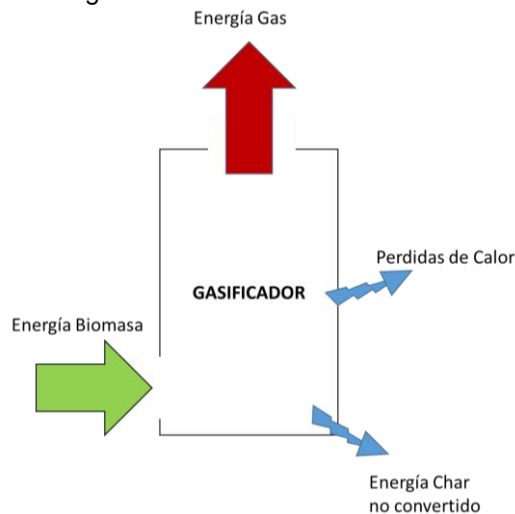
$PCI_c$  = poder calorifico inferior del combustible

$PCI_g$  = poder calorifico inferior del gas producido

Los gasificadores son moderadamente eficientes (normalmente el rango de eficiencias esta entre el 60-75%), las pérdidas de energía en estos equipos se

relacionan con el aprovechamiento de la energía proveniente de las reacciones de combustión, la cantidad de biomasa que finalmente se convierte en gas, y con el aislamiento térmico del reactor.

**Figura 26.** Flujos de energía en el gasificador



**Fuente:** Autores

Con la simulación realizada en el capítulo 6, se pudo obtener la eficiencia del reactor cuando opera con los diferentes tipos de biomasa en estudio, las cuales se muestran en la **Tabla 16**.

**Tabla 16.** Eficiencia del reactor para diferentes tipos de biomasa

Tipo de Biomasa	Eficiencia del reactor
Cascarilla de arroz	36,9 %
Cascarilla de café	44,5 %
Residuos forestales	62 %

**Fuente:** Autores

Además, teniendo en cuenta las características térmicas de la biomasa vistas en el capítulo 2, los flujos máxicos para cada tipo de biomasa se calculan usando la ecuación 30:

**Tabla 17.** Poder Calorífico y Flujos Máxicos Para Cada Tipo de Biomasa

Tipo de Biomasa	PCI [kJ/kg]	Flujo máxico [kg/h]
Cascarilla de arroz	17644	0.82
Cascarilla de café	17800	0.65
Residuos forestales	14000	0.62

**Fuente:** Autores

Como el poder calorífico es dependiente de la humedad, el valor tomado para el cálculo se hizo con una biomasa relativamente seca, que contiene un 10% de humedad.

### 7.3.3. LA CARGA DEL HOGAR

La carga del hogar  $B_h$  es un parámetro que puede ser expresado en términos de flujo de gas por unidad de área del reactor, o de flujo de biomasa por unidad de área del reactor. Este parámetro permite comparar el rendimiento de una gran variedad de gasificadores en una base común.

$$B_h \left[ \frac{Kg}{s m^2} \right] = \frac{\dot{m}_{biomasa}}{A_{transversal}} \quad \text{Ec. 32}$$

La carga del hogar varía entre un límite superior, por encima del cual la calidad del gas es pobre debido a la expulsión del carbón en la zona de combustión, y un límite inferior, el cual debido a una temperatura baja en el hogar, el gas contendría grandes cantidades de tar.

La carga del hogar de un gasificador Updraft generalmente está limitada a 2.8 MW/m<sup>2</sup> o 150 kg/m<sup>2</sup>/h de biomasa (Basu 2010). La generación excesiva de calor en un gasificador muy pequeño puede causar un derretimiento de la ceniza. Este valor es escogido como criterio para el cálculo del diámetro del reactor.

### 7.3.4. DIAMETRO DEL REACTOR

El diámetro del reactor se determina a partir de la carga del hogar y del flujo de biomasa calculado previamente con la ecuación 33.

$$d = \sqrt{\frac{(4 * \dot{m}_{bio})}{\pi * B_h}} \quad \text{Ec. 33}$$

Esta ecuación establece el diámetro mínimo requerido en el reactor para que no se produzca un flujo de calor excesivo y derrita la ceniza producida en las reacciones de gasificación. Este fenómeno se conoce como escurrimiento y representa un problema para los gasificadores. Cuando la ceniza se escurre tapa los conductos por donde pasa y disminuye la capacidad operativa del gasificador.

Se toma como criterio de diseño un valor de carga de hogar de 150 kg/m<sup>2</sup>h (Basu 2010). Realizando los respectivos cálculos, para cada tipo de biomasa a utilizar se obtienen los siguientes resultados.

- **CASCARILLA DE ARROZ**

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,82}{\pi * 150}}$$

$$d = 83,4 \text{ mm}$$

- **CASCARILLA DE CAFÉ**

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,65}{\pi * 150}}$$

$$d = 74 \text{ mm}$$

- **RESIDUOS FORESTALES**

$$d = \sqrt{\frac{4 * 0,62}{\pi * 150}}$$

$$d = 72 \text{ mm}$$

Como los flujos máxicos para los tres tipos de biomasa son diferentes, el diámetro mínimo se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 18.** Diámetro mínimo del reactor para cada tipo de biomasa

Tipo de biomasa	Diámetro [m]
Cascarilla de arroz	0.083
Cascarilla de café	0.074
Residuos forestales	0.072

**Fuente:** Autores

Comparando los valores obtenidos en la tabla se escoge un diametro de 8,5 cm para el reactor interior, cumpliendo con el rango estipulado para cada tipo de combustible a utilizar.

**Figura 27.** Dimensiones de Diseño de Reactor



**Fuente:** Autores

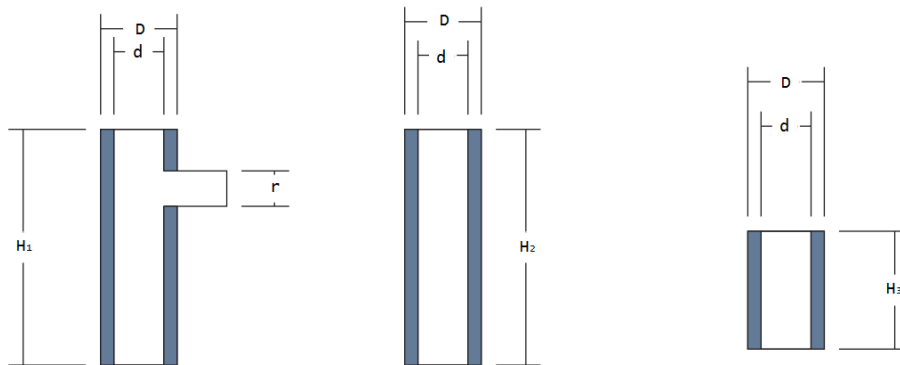
### 7.3.5. ALTURA DEL REACTOR

Cuando el gasificador está diseñado para trabajar por lotes, la altura del reactor especifica el tiempo de operación durante el cual se puede obtener gas de la biomasa. Además, la altura también está relacionada con el desarrollo de las diferentes etapas de la gasificación. Cada una se presenta a diferentes alturas.

Para un gasificador Updraft, la altura del lecho móvil generalmente es más grande que su diámetro. Comúnmente, la relación entre la altura y el diámetro es más de 3:1.

Para estudiar el efecto de este parámetro, el gasificador no tendrá una altura fija sino que podrá variarse. Se diseñaron y construyeron 3 secciones que permitieron analizar el comportamiento del proceso para tres alturas diferentes.

**Figura 28.** Reactores Diseñados para el Prototipo



**Fuente:** Autores

**Figura 29.** Reactores del Prototipo



**Fuente:** Autores

El diámetro  $D$  se determinó según las especificaciones del aislante. Las dimensiones de los reactores son  $d=8,5$  cm y  $D=13$  cm,  $H_1 = 40$  cm,  $H_2 = 40$  cm,  $H_3 = 20$  cm.

### 7.3.6. MATERIAL DEL REACTOR

Para la fabricación del reactor (**Figura 30**) se estableció que el material seleccionado y usado para esta acción sería lámina Cold rolled debido a sus propiedades y características aptas para los procesos termoquímicos a los que será sometido. El Cold rolled, como el nombre lo indica, el acero es procesado mientras está frío. Es fabricado de acero en caliente el cual ha sido limpiado químicamente antes de ser enrollado. El proceso de formado en frío reduce el espesor del acero y al mismo tiempo cambia sus propiedades mecánicas. Este debe seguir un proceso donde es cubierto con una capa delgada de aceite para prevenir que el oxígeno tenga contacto con la superficie y forme óxido. La lámina Cold Rolled está metalúrgicamente diseñada para proveer atributos específicos tales como: alta ductilidad, embutido profundo, alta fuerza y resistencia, buenas propiedades magnéticas.

**Tabla 19.** Propiedades mecánicas del acero Cold Rolled

NORMAS	PROPIEDADES MECANICAS			COMPOSICION QUIMICA			
Calidad	Fluencia	Esfumax	Dureza	Carbono	Manganeso	Fosforo	Azufre
SAE J403/1006	Max:	Max:	Max:	0,08%	0,25%-	0,04%	0,05%
JIS	258 MPA	354 MPA	54 HPB	Max	0,40%	Max	Max
G3141/SPCC							
SD							

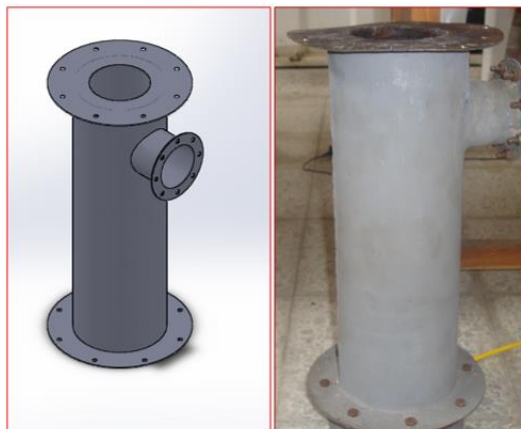
**Fuente:** <http://www.corpacero.com/econtent/library/documents/DocNewsNo107DocumentNo73.PDF>

**Tabla 20.** Especificaciones técnicas de la lámina de acero Cold Rolled

Especificaciones Technical					
Calibre	Espesor Mm	Peso/Kg 1220 X 2440 mm	Unidades Toneladas	Peso/Kg 1000X2000 mm	Unidades Toneladas
28	0,35 mm	n/a	n/a	n/a	n/a
26	0,44 mm	10,68 Kg	93 und	7,49 Kg	133 und
24	0,61 mm	14,30 Kg	70 und	9,55 Kg	104 und
23	0,70 mm	16,62 Kg	60 und	11,01 Kg	90 und
22	0,75 mm	17,65 Kg	56 und	11,82 Kg	84 und
20	0,80 mm	18,69 Kg	53 und	12,56 Kg	79 und
20	0,85 mm	20,07 Kg	49 und	13,50 Kg	74 und
20	0,90 mm	21,03 Kg	47 und	14,13 Kg	70 und
19	1,00 mm	23,36 Kg	42 und	15,70 Kg	63 und
18	1,10 mm	25,82 Kg	38 und	17,27 Kg	57 und
18	1,15 mm	27,09 Kg	36 und	18,05 Kg	55 und
18	1,20 mm	28,04 Kg	35 und	18,67 Kg	53 und
16	1,50 mm	34,90 Kg	28 und	23,35 Kg	42 und
14	1,90 mm	44,38 Kg	22 und	29,30 Kg	34 und

Fuente: <http://www.corpacero.com/econtent/library/documents/DocNewsNo107DocumentNo73.PDF>

**Figura 30.** Reactor de Brida Unión a la Tolva



Fuente: Autores

### 7.3.7. AISLAMIENTO TERMICO DEL REACTOR

En el reactor se esperan alcanzar temperaturas entre 600°C y 800°C, esto como consecuencia de las reacciones de combustión de la biomasa. Se hace necesario instalar aislamiento térmico por dos razones principales:

- Minimizar las pérdidas de calor en el reactor y por lo tanto mantener una alta eficiencia en el proceso de gasificación.
- Proteger al usuario de posibles quemaduras durante la operación.

Se evaluaron distintas clases de aislamientos térmicos para el reactor, pero debido a las temperaturas tan altas que existen, se decidió utilizar lana mineral de roca. La lana mineral estándar consiste en finas fibras minerales muy elásticas y esponjosas, procesadas con o sin aceite lubricante y sin aglutinar, empacadas a granel en sacos de polietileno, es incombustible, no despiden humos ni gases tóxicos, no es corrosiva, no despiden olores, no es hábitat para bacterias y hongos, y es 100% libre de asbestos.

Figura 31. Lana Mineral de Roca.



Fuente: [http://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Lana-mineral-a-granel-Borra-LW-\(Tervol-S\)-63957.html](http://www.interempresas.net/Construccion/FeriaVirtual/Producto-Lana-mineral-a-granel-Borra-LW-(Tervol-S)-63957.html)

Tabla 21. Especificaciones Técnicas de la Lana Mineral.

Especificaciones Técnicas	
Unidad	Lana Mineral Estándar
Conductividad Térmica	0.25 BTU plg/pie <sup>2</sup> *hr°F a Tm 100 °F
Resistencia térmica	R=12 a 3 plg de espesor
T° de utilización	Hasta 750 °C
Norma	ASTM C 764-02 Type II

Fuente: Calorcol S.A.

- **APLICACIONES**

- Material para aislamiento térmico y acústico muy eficiente y económico, indicada para una amplia variedad de aplicaciones industriales, comerciales y residenciales.
- Usado para aislamiento de calor, empackando y rellenando equipos comerciales y domésticos como calentadores de agua, hornos comerciales y del hogar, hornos de pintura, estufas, baños turcos, saunas, silenciadores, entre otros.
- En la agricultura se utiliza combinada con la tierra para mejorar la aireación del terreno y la retención de agua.

#### **7.4. SISTEMA DE ALIMENTACION DE BIOMASA**

Está conformado por una tolva, un tornillo sin fin y un volante, este sistema es el encargado de almacenar y transportar la biomasa hasta el interior del reactor. Se optó por un mecanismo de tornillo sin fin, ya que este sistema, permite transportar material en forma de polvo, granos finos o fibras convenientemente y puede sellarse fácilmente para evitar fugas cuando el material tiene emanaciones. Esto también es necesario en la cocina debido a que se está produciendo gas y no se debe permitir que escape.

**Figura 32.** Transportador de Tornillo Doble Usado en la Industria Química y de Alimentos



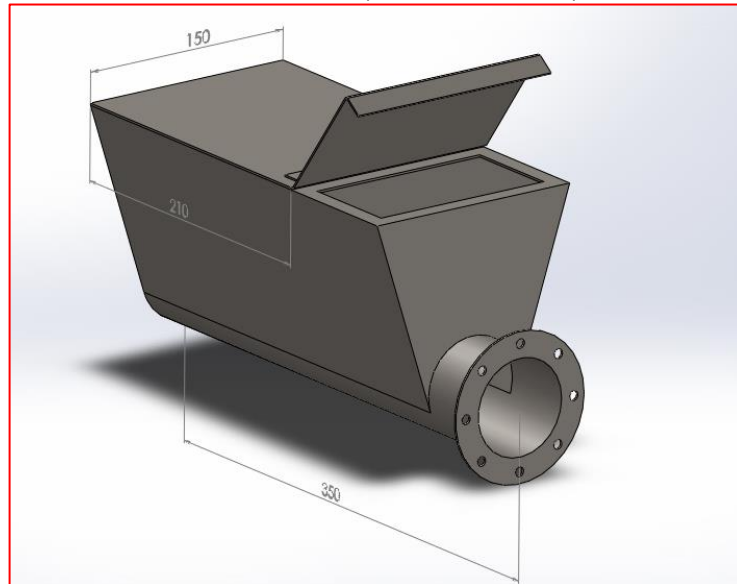
**Fuente:** [http://img.directindustry.com/images\\_di/photo-g/screw-conveyor-34396-2310457.jpg](http://img.directindustry.com/images_di/photo-g/screw-conveyor-34396-2310457.jpg)

##### **7.4.1. TOLVA DE ALIMENTACION**

La tolva es la encargada de almacenar la biomasa, tiene una capacidad volumétrica de  $4270 \text{ cm}^3$  y está construida de cold rolled calibre 18. Está diseñada de forma tal que permita la carga y descarga de biomasa de una manera continua por medio de aberturas que permiten sus respectivas acciones, teniendo en cuenta el tipo de biomasa, sus características, tales como: tamaño y forma el grano, poder calorífico, humedad.

Podemos obtener la cantidad en kg de biomasa a utilizar en cada lazo de tiempo, con la densidad aparente de cada tipo de combustible y la capacidad volumétrica de la tolva.

**Figura 33.** Tolva de Alimentación Semicontinua (Unidades en mm)



**Fuente:** Autores.

**Tabla 22.** Capacidad Volumétrica y másica para cada tipo de Biomasa

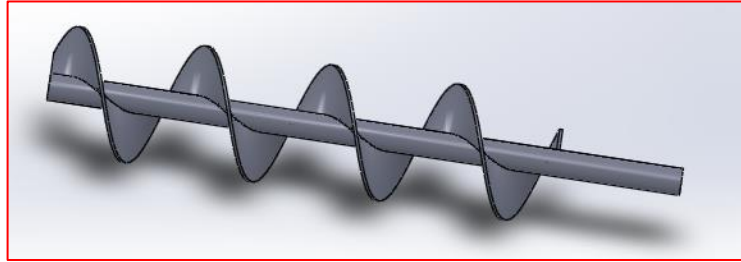
Descripción	Capacidad Volumétrica ( $m^3$ )	Densidad Aparente ( $\frac{kg}{m^3}$ )	Cantidad en $kg$
Cascarilla de arroz	4,27e – 3	345	1,473
Cascarilla de café	4,27e – 3	349	1,490
Residuos forestales	4,27e – 3	149,17	0,6369

**Fuente:** Autores.

#### 7.4.2. TORNILLO SIN-FIN

Es un sistema capaz de mover materiales a granel en cualquier dirección. Constituido por un cilindro dotado de un álabe helicoidal, su función es la de transportar la biomasa desde la tolva hasta el interior del reactor, está construido de Cold Rolled calibre 14 y su operación es de forma manual.

**Figura 34.** Tornillo Sin-Fin (CAD-SOLIDWORK)



**Fuente:** Autores

El tamaño del tornillo depende de dos factores:

- La capacidad del transportador
- El tamaño de partícula del material a transportar

La capacidad del transportador depende del diámetro del tornillo, el paso del tornillo, la velocidad del tornillo y la eficiencia de carga del área transversal del tornillo. La capacidad del tornillo se puede definir como:

$$Q = 60 * \left(\frac{\pi}{4}\right) * D^2 * S * N * \psi * \rho * C \quad \text{Ec. 34}$$

En donde:

$Q$  = Capacidad en kg/hr

$C$  = factor debido a la inclinación del tornillo

$\rho$  = densidad aparente del material a transportar kg/m<sup>3</sup>

$\psi$  = Eficiencia de carga

$D$  = diametro del tornillo en m

$S$  = paso del tornillo en m

$N$  = Velocidad de rotacion del tornillo en RPM

El valor de la capacidad  $Q$  está definida por los requerimientos del reactor. El flujo de biomasa del reactor debe ser suministrado por el tornillo.

La eficiencia de carga es dependiente del material que se transporte. Para materiales con flujo libre y no abrasivos el valor de eficiencia es grande, pero para materiales que son abrasivos o que no fluyen fácilmente la eficiencia toma valores como los que siguen:

**Tabla 23.** Valores de la eficiencia de carga

Tipo de material	Eficiencia de carga $\psi$
Material abrasivo	0.12 – 0.15
Material medianamente abrasivo	0.25 – 0.30
Material no abrasivo	0.4 – 0.45

**Fuente:** Arora (2007) [4]

La cascarilla de arroz y café son altamente abrasivas debido a que contienen silicio. Para estos materiales, se toma un valor de eficiencia de carga de 0.13. Para los residuos forestales puede tomarse un valor de 0.30

El factor debido a la inclinación C es dependiente del ángulo del tornillo respecto a la horizontal y puede ser determinado a partir de la **Tabla 24**.

**Tabla 24.** Valores del factor de inclinación C

Angulo del tornillo		0	5	10	15	20
Factor C		1.0	0.9	0.8	0.7	0.65

**Fuente:** Arora (2007) [4]

El tornillo va a trabajar de forma horizontal, entonces el valor del factor C toma un valor de 1.

Como la cocina va a funcionar con tres tipos de biomasa, el sistema de alimentación debe transportar tres flujos diferentes de material. Entonces, para no fabricar tornillos de diferentes dimensiones, se optó por diseñar un tornillo que opere a diferentes rpm para cada caso.

Tabulando las rpm del tornillo en función de su diámetro a partir de la ecuación 34 para cada tipo de biomasa.

**Tabla 25.** RPM del tornillo en función del diámetro y el tipo de biomasa

Diámetro [m]	RPM del tornillo		
	Cascarilla de café	Cascarilla de arroz	Residuos forestales
0,01	304,02	387,90	365,13
0,015	90,08	114,93	108,19
0,02	38,00	48,49	45,64
0,025	19,46	24,83	23,37
0,03	11,26	14,37	13,52
0,035	7,09	9,05	8,52
0,04	4,75	6,06	5,71
0,045	3,34	4,26	4,01

0,05	2,43	3,10	2,92
0,055	1,83	2,33	2,19
0,06	1,41	1,80	1,69
0,07	0,89	1,13	1,06
0,08	0,59	0,76	0,71
0,09	0,42	0,53	0,50
0,1	0,30	0,39	0,37
0,11	0,23	0,29	0,27
0,12	0,18	0,22	0,21
0,13	0,14	0,18	0,17
0,14	0,11	0,14	0,13
0,15	0,09	0,11	0,11

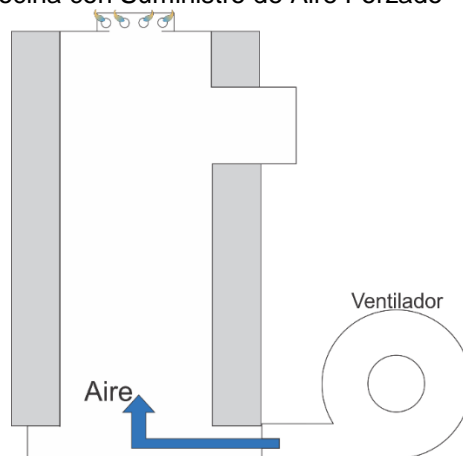
**Fuente:** Autores.

La velocidad mínima recomendada en los tornillos de transporte es de 10 RPM, pero si se usa este criterio el diámetro sería muy pequeño. Teniendo en cuenta también que el tornillo funciona manualmente se busca que no se mueva constantemente. Por esto se decidió por construir un tornillo con un diámetro de 55 mm que tiene una velocidad que permite trabajar de manera semi-continua.

## 7.5. SISTEMA DE SUMINISTRO DE AIRE

Generalmente los gasificadores de tipo Updraft tienen la entrada de aire en la parte inferior, en el mismo lugar por donde se debe descargar la ceniza. Para evitar problemas con la descarga de la ceniza se optó por hacer la entrada de aire en la parte lateral del reactor. En la **Figura 35** se muestran el suministro de aire para la cocina.

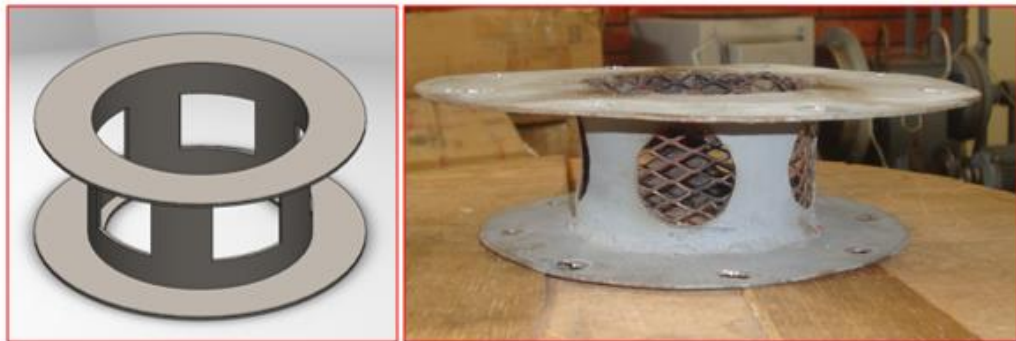
**Figura 35.** Esquema de la Cocina con Suministro de Aire Forzado



**Fuente:** Autores.

Para que el aire entre por la parte lateral, se diseñó un distribuidor que, con ayuda de unas cubiertas se dirige el aire al interior del reactor. Es un anillo que tiene a su alrededor agujeros de diámetro 1¼ pulgada que cumplen con la función de que la entrada de aire se dé de forma uniforme por todo el reactor. Está unido a dos bridas que permiten el ensamble con la mesa de soporte y el reactor. Su fabricación es de acero cold rolled calibre 18 y para su construcción fue necesario una máquina para rolado, taladro y soldadura por electrodo. Dentro del distribuidor se optó por colocar una rejilla en forma de camisa que tiene como función impedir la salida de la biomasa por los agujeros que este posee.

**Figura 36.** Esquema del Distribuidor de Aire

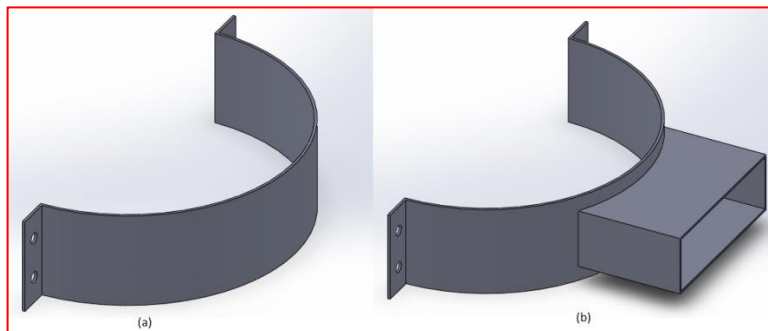


**Fuente:** Autores.

### 7.5.1. CUBIERTA DE TIRO FORZADO

Son dos abrazaderas que cubren al distribuidor, una de las abrazaderas posee una adaptación para el ventilador y la entrada de aire. Las dos abrazaderas se unen por medio de tornillos que permiten un mejor ajuste y sello. Sin embargo fueron recubiertas en el lado de contacto con las bridas del distribuidor por silicona térmica, sirviendo de esta manera de sello hermético, impidiendo posibles fugas de gas.

**Figura 37.** Abrazaderas del Distribuidor-CAD-SOLIDWORK



**Fuente:** Autores.

**Figura 38.** Abrazaderas del Distribuidor



**Fuente:** Autores

### **7.5.2. SELECCIÓN DEL VENTILADOR**

Los ventiladores se pueden clasificar en dos grandes clases: axiales y centrífugos. Su criterio de selección depende de dos factores, el flujo de aire y la resistencia al flujo.

- **VENTILADOR AXIAL**

Es de diseño aerodinámico, consiste esencialmente en una hélice encerrada en un cuerpo cilíndrico. Puede funcionar en un amplio rango de flujos de aire a presiones que van de bajas a medias.

**Figura 39.** Ventilador de Flujo Axial



**Fuente:** <http://www.chi-elena.com/product.aspx?classid=85>

- **VENTILADOR CENTRIFUGO**

Consiste en un rotor encerrado en una envolvente en forma de espiral que succiona el aire por su centro y lo impulsa contra la envolvente para que luego se descargue de forma perpendicular al eje. Estos ventiladores pueden lograr una alta presión estática con un bajo caudal.

**Figura 40.** Ventilador Centrifugo con Motor Acoplado Directamente



**Fuente:** [http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/centrifugadora-73872-\\_8.html#](http://www.directindustry.es/fabricante-industrial/centrifugadora-73872-_8.html#)

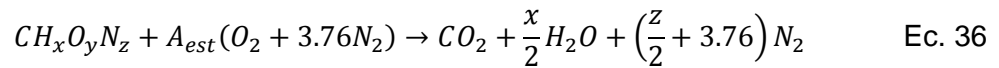
Se seleccionó un ventilador de tipo centrifugo ya que en el reactor se necesita un flujo pequeño de aire que sea capaz de pasar a lo largo de toda la columna de biomasa y también a través de los orificios del distribuidor.

### 7.5.3. FLUJO DE AIRE REQUERIDO

La energía necesaria para mantener las reacciones de gasificación proviene de la combustión de la propia biomasa en el reactor. En los gasificadores, la cantidad de aire que entra al reactor se maneja por medio de un parámetro que se llama la relación de equivalencia (ER por sus siglas en ingles). El ER es la relación entre el aire que entra al gasificador y el aire necesario para una combustión completa.

$$ER = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{aire\ estequiometrico}} \quad \text{Ec. 35}$$

El ER generalmente se encuentra el rango de 0.2 – 0.4. Para saber la cantidad de aire que se va a suministrar al reactor, primero debe conocerse el flujo bajo condiciones de combustión completa. Haciendo el análisis estequiométrico de la combustión de la biomasa se tiene que:



En donde:

$x$  = moles de hidrogeno en la biomasa

$y$  = moles de Oxigeno en la biomasa

$z$  = moles de nitrógeno en la biomasa

$A_{est}$  = moles de aire estequiométrico

A partir de la ecuación 36 el coeficiente de aire estequiométrico puede determinarse como función de las moles de cada elemento en la biomasa.

$$A_{est} = 1 + \frac{x}{4} - \frac{y}{2} \quad \text{Ec. 37}$$

Las moles de cada elemento en la biomasa se calculan a partir del análisis último de ella por medio de la siguiente ecuación:

$$a_i = \frac{w_i * M_c}{w_c * M_i} \quad \text{Ec. 38}$$

En donde:

$w_i$  = fraccion masica del componente  $i$  de la biomasa

$w_c$  = fraccion masica del carbono en la biomasa

$M_c$  = peso molecular del carbono

$M_i$  = peso molecular del componente  $i$  de la biomasa

Con el coeficiente de aire estequiométrico puede calcularse la relación aire – combustible.

$$AC = \frac{4.76 * A_{est} * M_{aire}}{M_{bio}} \quad \text{Ec. 39}$$

En donde:

$M_{aire}$  = peso molecular del aire

$M_{bio}$  = peso molecular de la biomasa

Esto sirve para determinar el flujo de aire estequiométrico.

$$\dot{m}_{aire\ estequiometrico} = \dot{m}_{bio} * AC \quad \text{Ec. 40}$$

Usando el flujo de biomasa calculado previamente se genera la siguiente tabla que muestra la formula química y la ecuación resultante que relaciona el flujo de aire con el ER para cada tipo de biomasa.

**Tabla 26.** Flujo de Aire para cada Tipo de Biomasa

Tipo de biomasa	Formula química equivalente	Flujo de aire [kg/h]
Cascarilla de arroz	$CH_{1.59}O_{0.71}N_{0.0059}$	$\dot{m}_{aire} = 4,725 * ER$
Cascarilla de café	$CH_{1.264}O_{0.653}N_{0.01}$	$\dot{m}_{aire} = 3,74 * ER$
Residuos forestales	$CH_{1.511}O_{0.658}N_{0.0083}$	$\dot{m}_{aire} = 4,235 * ER$

**Fuente:** Autores

Teniendo como referencia un valor de ER máximo de 0,8 se tiene que el flujo de aire máximo a suministrar por el ventilador debe ser de 3,78 kg/h, que es equivalente a 3,15 m<sup>3</sup>/h.

#### 7.5.4. CAIDA DE PRESION EN EL REACTOR

El lecho de biomasa causa una pérdida de presión que es función de sus características físicas y de la velocidad superficial del fluido que pasa a través de ella. Para cuantificar esta pérdida se usa la ecuación de Ergun<sup>5</sup> (ecuación 41).

$$\left(\frac{\Delta P}{H}\right) = \underbrace{150 * \mu * U * \frac{(1 - \epsilon)^2}{X_{sv}^2 * \epsilon^3}}_{\text{LAMINAR}} + \underbrace{\frac{1,75 * \rho_f * U^2 * (1 - \epsilon)}{X_{sv} * \epsilon^3}}_{\text{TURBULENTO}} \quad \text{Ec. 41}$$

En donde:

$\epsilon$  = fracción vacía del lecho

$\rho_f$  = densidad del fluido

$\mu$  = viscosidad dinámica del fluido

$U$  = velocidad superficial del lecho

$X_{sv}$  = diámetro de la partícula del lecho

$\Delta P$  = caída de presión

$H$  = altura del lecho

<sup>5</sup> Sabri Ergun (1918-2006) fue un ingeniero químico de origen turco que derivó la ecuación que lleva su nombre en 1952.

La ecuación de Ergun combina de forma aditiva los componentes laminar y turbulento del gradiente de presión. En condiciones de flujo laminar, el primer componente domina en la ecuación, el gradiente de presión se incrementa linealmente con la velocidad superficial del fluido y es independiente de su densidad.

Cuando se dan las condiciones de flujo turbulento, el segundo componente domina en la ecuación y el gradiente de presión aumenta de forma proporcional al cuadrado de la velocidad superficial del fluido y es independiente de su viscosidad.

Las condiciones de flujo laminar o turbulento se definen por el número de Reynolds que es determinado por la ecuación 42, la condición de flujo laminar existe para números de Reynolds menores a 10 y para flujo turbulento con un números de Reynolds mayores a 2000.

$$Re_x = \frac{X_{sv} * U * \rho_f}{\mu * (1 - \epsilon)} \quad \text{Ec. 42}$$

Calculando el número de Reynolds para cada tipo de biomasa se tiene lo siguiente:

**Tabla 27.** Numero de Reynolds para el flujo a través del lecho de biomasa

Propiedad	Cascarilla de Café	Cascarilla de Arroz	Residuos Forestales
$\rho_{aparente}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	349	345	149
$\epsilon$	0,78	0,77	0,45
$X_{sv}$ [m]	0,00067	0,0006	0,0045
$Re_x$	<b>29,26</b>	<b>26,08</b>	<b>78,6</b>

**Fuente:** Autores

Finalmente la caída de presión máxima calculada para cada tipo de biomasa se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 28.** Caída de presión para cada tipo de biomasa

BIOMASA	$\Delta P$ [Pa]
Cascarilla de Arroz	143,4
Cascarilla de Café	101,4
Residuos Forestales	104,6

**Fuente:** Autores

De acuerdo a lo anterior el ventilador debe suministrar 3,15 m<sup>3</sup>/h con una presión estática mínima de 144 Pa. Se emplea un ventilador Matsushita electric modelo

2YCB-12L que cumple con los requerimientos para la alimentación del reactor. El flujo de aire que proporciona es regulado mediante un DIMER que se encarga de controlar las revoluciones de este.

## 7.6. QUEMADOR

Es la parte superior del gasificador donde los gases generados en el reactor se distribuyen de forma uniforme para ser aprovechados y quemados, además de servir de soporte para los utensilios utilizados en la cocción de alimentos. Está diseñado para ser desmontable y facilitar la limpieza o en su defecto la carga de combustible necesaria en un intervalo de tiempo. La constituyen un distribuidor y una rejilla soldados a una brida conformando de esta manera una sola pieza de fácil manipulación y ensamble.

**Figura 41.** Quemador y Brida de Sujeción



**Fuente:** Autores

### 7.6.1. DISTRIBUIDOR

El distribuidor se realiza con lámina calibre 18 con un diámetro de 90 mm y tiene una altura de 20 mm en donde se distribuyen 48 agujeros de diámetro 2 mm.

**Figura 42.** Distribuidor del Quemador



**Fuente:** <http://www.refaccionesfernandosepulveda.com/linea-blanca/estufas/cabeza-quemador-sin-guia-para-bujia-acros.html>.

### 7.6.2. REJILLA

La rejilla del quemador tiene un diámetro de 170 mm y una altura de 50 mm de la brida a la que está unida, y elaborada en fundición.

**Figura 43.** Rejilla del Quemador



**Fuente:** Autores

La forma de sujeción del fogón al reactor es por medio de una camisa soldada a la parte interior del distribuidor que encaja al reactor de forma que se ajuste al momento de su ensamblaje.

**Figura 44.** Camisa del Quemador



**Fuente:** Autores.

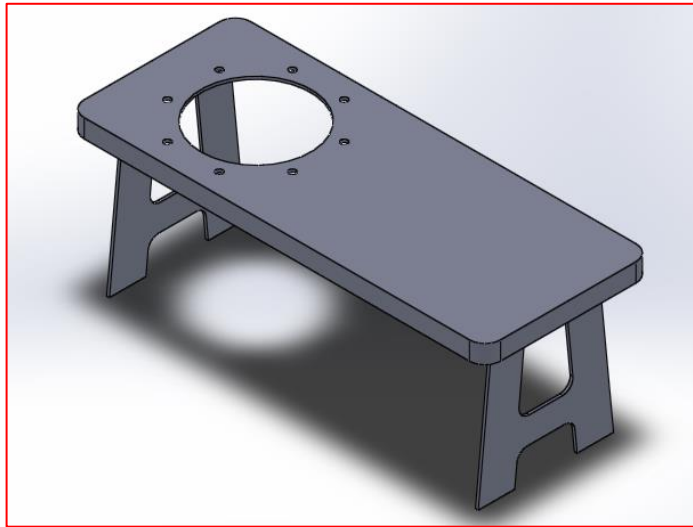
## **7.7. SISTEMA DE ELIMINACION DE RESIDUOS**

El sistema de eliminación de residuos está conformado por la base o mesa de soporte en donde reposa el peso del reactor, quemador y sistema de alimentación de biomasa y de una adaptación de compuerta en la parte posterior de esta para permitir la salida de ceniza.

### **7.7.1. BASE O MESA SOPORTE**

Diseñada de manera tal que permita una adaptación conveniente para el sistema de alimentación de biomasa y reactor. Posee unas dimensiones de 60 cm de largo por 30 cm de ancho, los apoyos de la mesa están fabricados con ángulo  $3/4 \times 1/8$ . En su parte superior hay un agujero de 8,5 cm de diámetro que permite la salida de la ceniza y es donde va ubicado el distribuidor de forma concéntrica con este; además posee unos agujeros donde se une mediante tornillos los soportes que van a la tolva.

**Figura 45.** Mesa de Soporte (CAD-SOLIDWORK)



**Fuente:** Autores

**Figura 46.** Mesa de Soporte



**Fuente:** Autores

Para obtener un proceso duradero de producción de gas la eliminación de ceniza es parte importante. Como se requiere una alimentación semi-continua, el sistema de eliminación de ceniza se diseñó de la misma manera

El mecanismo utilizado para la eliminación de ceniza fue instalado en la parte inferior de la mesa y está conformado por: una compuerta deslizante, una caja donde se almacena la ceniza que se produce y una bandeja para sacar la ceniza contenida en la caja.

### 7.7.2. COMPUERTA DESLIZANTE

Es una compuerta que se elaboró en Cold Rolled, su función es servir como tapa hermética, que permita la salida de ceniza y evite el escape de gases durante el proceso de gasificación. Es de forma rectangular y sus dimensiones son de 16 cm de ancho por 19 cm de largo.

**Figura 47.** Esquema de Compuerta de Salida de Ceniza

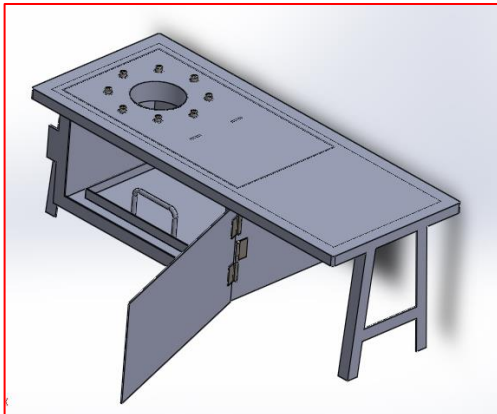


**Fuente:** Autores

### 7.7.3. CAJA DE RECOLECCION DE CENIZA

Este elemento es el encargado de almacenar la ceniza producida, está fabricado en lámina Cold Rolled calibre 18, ubicado en la parte inferior de la mesa. Tiene dimensiones de 35 cm de ancho, 18 cm de alto y 19 cm de profundidad, y posee una puerta articulada que permite retirar la ceniza cuando se necesite.

**Figura 48.** Mesa de Soporte



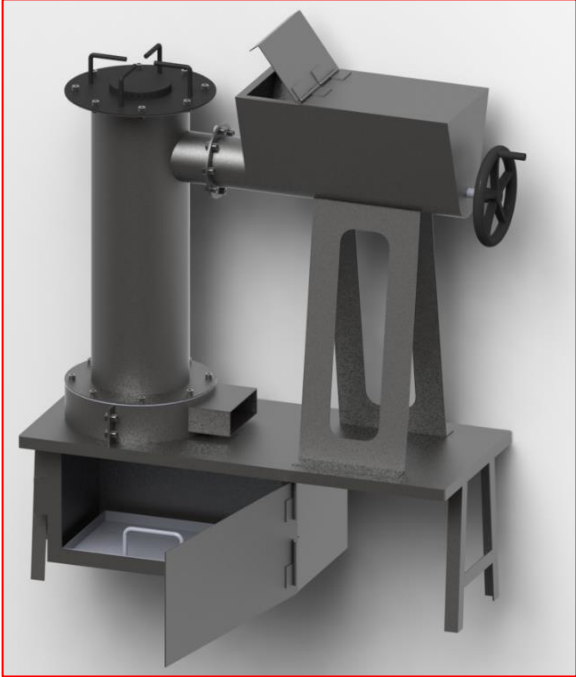
**Fuente:** Autores

## 7.8. ENSAMBLE

Se enfatiza que la manera de unir las diferentes partes que conforman la cocina fue mediante bridas, tornillos y empaques. Estos últimos por su parte son de asbesto, las características más importantes es que tiene excelente resistencia

química y de calor, condiciones afines a la que será sometido durante todo el proceso de gasificación.

**Figura 49.** Prototipo de Cocina de Gas



**Fuente:** Autores

## 8. PRUEBAS Y ANALISIS DEL PROTOTIPO

En este capítulo se detallan las pruebas realizadas al prototipo diseñado, efectuando un estudio de la capacidad de funcionamiento y de los parámetros de operación de acuerdo con los objetivos planteados. Se determinó la composición del gas producido por los tres tipos de biomasa. Se determinaron los perfiles de temperatura y la potencia obtenida para diferentes longitudes del reactor, usando los tres tipos de biomasa planteados anteriormente. Además se estudió el efecto del caudal y se hizo un análisis económico de la operación del prototipo.

### 8.1. PRUEBA PRELIMINAR

Teniendo el prototipo diseñado y construido, se realizaron pruebas de funcionamiento antes de realizar su estudio. Se encontró que el equipo producía efectivamente los gases combustibles pero no los quemaba correctamente. Solo una sección del quemador mantenía los gases en combustión como se ve en la figura 45.

**Figura 50.** Llama interrumpida en el Prototipo



**Fuente:** Autores

El problema radicaba en la concentración del gas y en cómo se hacía la mezcla con el aire atmosférico. Como el poder calorífico de un gas de este tipo es más bajo, necesita estar más concentrado para poder mantener una llama constante y por el tamaño y la disposición de los agujeros en el distribuidor del quemador esto no era posible. Se hicieron pruebas aumentando el diámetro de estos agujeros para encontrar una configuración factible.

Lo que se encontró fue que el prototipo hacia la quema de gases sin ningún tipo de distribución, simplemente dejando que el gas se quemara usando toda el área de flujo del reactor.

**Figura 51.** Rediseño de la Salida de Gas del Quemador



**Fuente:** Autores

## 8.2. EQUIPO UTILIZADO

### 8.2.1. MODULO DE ADQUISICION DE DATOS

Para obtener los perfiles de temperatura se instalaron termocuplas a lo largo de la longitud de cada reactor, separadas cada 10 cm. Se utilizaron los módulos de adquisición de datos Fieldpoint FP-1601 y TC-120, y el software Labview, todos de National Instruments, para realizar el monitoreo de las temperaturas.

**Figura 52.** Módulos de Adquisición de Datos serie Fieldpoint



**Fuente:** Autores

### 8.2.2. TERMOANEMOMETRO DIGITAL

Su uso fue necesario para medir la velocidad de entrada del flujo de aire al reactor.

**Figura 53.** Termo anemómetro



**Fuente:** Autores

### 8.2.3. TACOMETRO LASER

Para variar el caudal de aire del ventilador se modificaron sus rpm a través de un dimer que varía la corriente que le llega, el tacómetro se usó para medir y mantener una velocidad de rotación predeterminada.

**Figura 54.** Tacómetro Laser



**Fuente:** Autores

### 8.3. OBTENCION DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA DEL REACTOR

#### 8.3.1. DESCRIPCION DE LA PRUEBA

Primero se instalaron las termocuplas en los reactores cuidando de que no obstruyeran el paso de biomasa a lo largo de estos, y se conectaron al módulo de adquisición de datos TC-120.

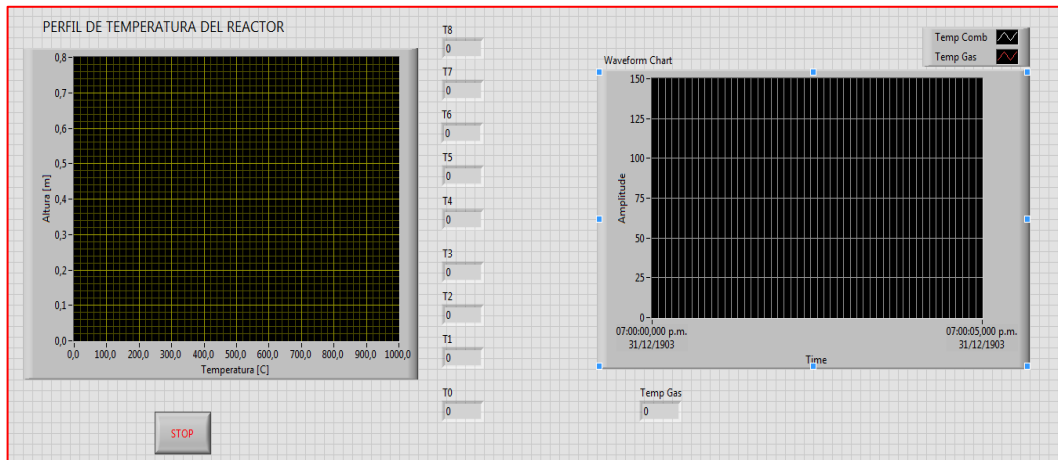
**Figura 55.** Montaje de las Termocuplas y conexión al computador para la prueba



**Fuente:** Autores

Para la captura de los datos se realizó una interfaz sencilla en Labview que permitió observar en tiempo real el perfil generado en cada reactor.

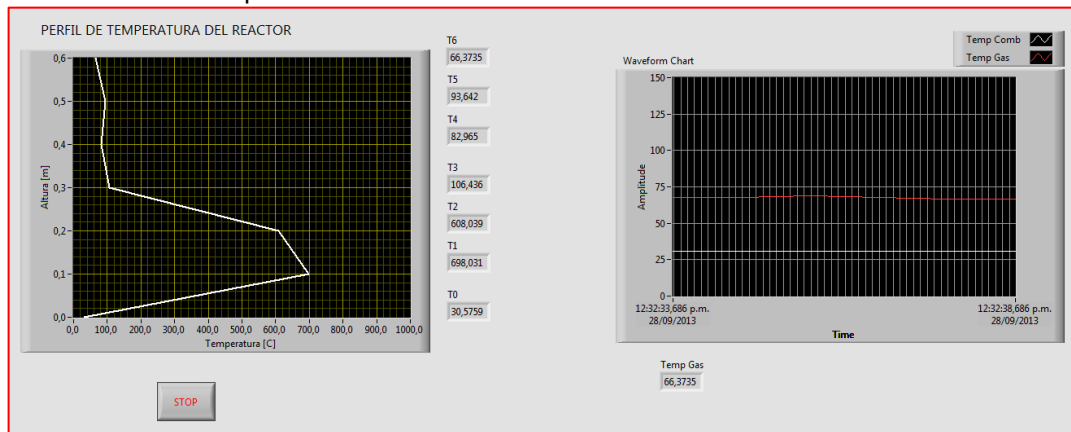
**Figura 56.** Interfaz Creada en Labview



**Fuente:** Autores.

Para poner en marcha el proceso de gasificación fue necesario provocar la combustión de la biomasa, para esto se utilizó un líquido inflamable (Thinner), que tiene como función elevar la temperatura de la biomasa hasta su punto de ignición. El reactor se carga de biomasa hasta su capacidad máxima y se enciende con Thinner para que inicie la producción de gas, al mismo tiempo con ayuda del programa Labview se empezó a monitorear las temperaturas de este. Cuando se ha alcanzado un estado estable se guardan los datos obtenidos y se repite la prueba pasando al siguiente tipo de biomasa.

**Figura 57.** Perfil de Temperatura Obtenido en la Interfaz Labview



**Fuente:** Autores.

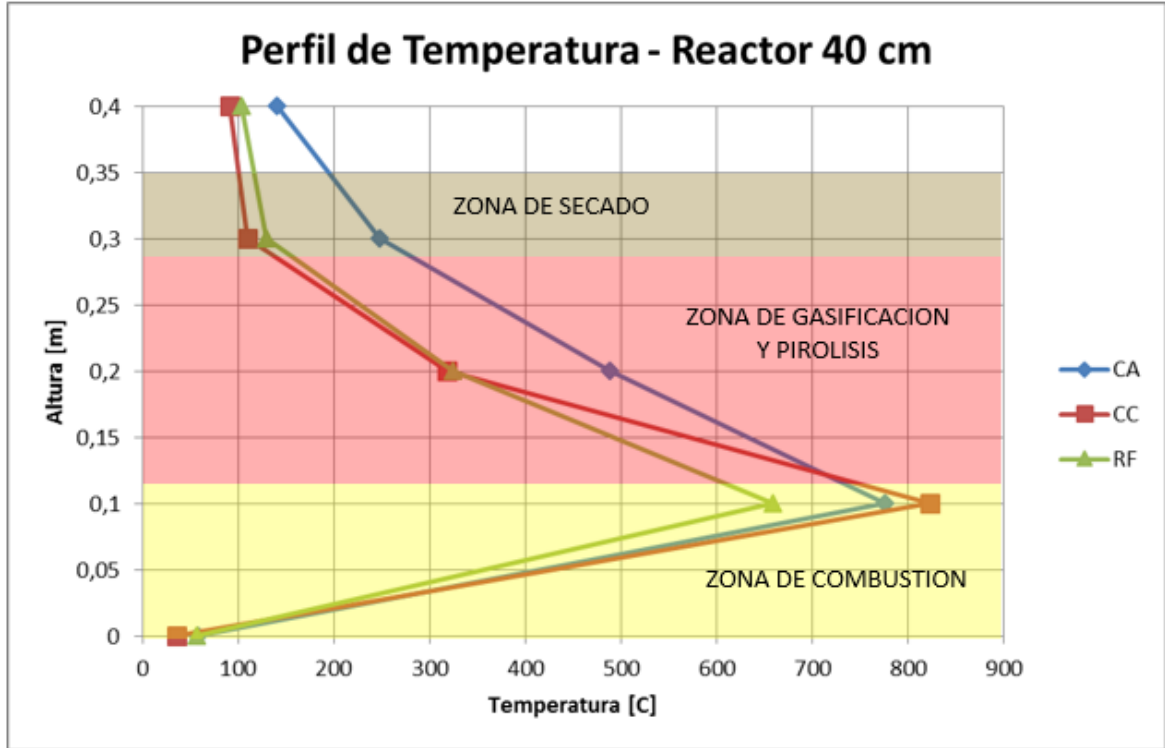
### 8.3.2. PERFILES DE TEMPERATURA RESULTANTES

Las siguientes graficas muestran la temperatura dentro del reactor durante su funcionamiento en estado estable. La convención utilizada es la siguiente:

- CA: Cascarilla de arroz.
- CC: Cascarilla de café.
- RF: Residuos forestales.

Los resultados se muestran agrupados para cada altura del reactor, en el eje vertical se muestra la altura en metros (m) y en el eje horizontal su correspondiente temperatura en grados centígrados (°C). Se tiene en cuenta que la última termocupla mide la temperatura de salida de los gases.

Figura 58. Perfiles de temperatura en el reactor de 40 cm



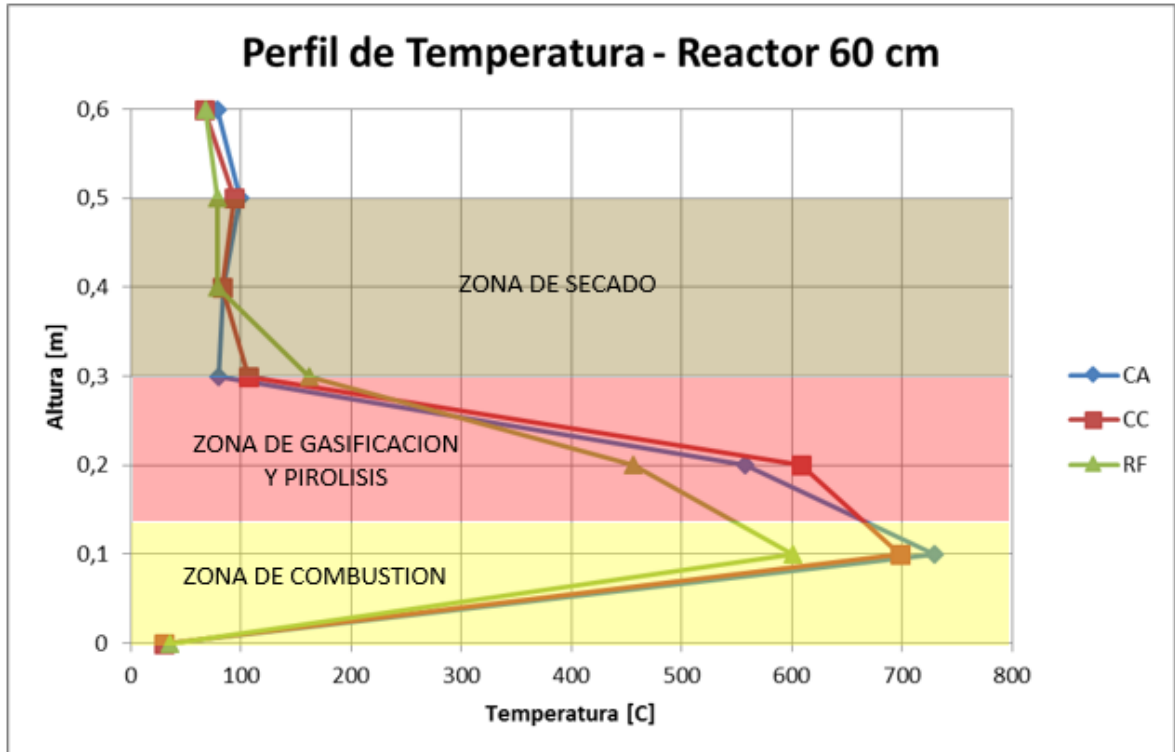
Fuente: Autores

En el reactor de 40 cm la cascarilla de café alcanza la mayor temperatura (más de 800°C) observando que el pico de la curva es más cerrado en comparación con los otros dos. La cascarilla de arroz produce unos gases con mayor temperatura, así mismo se observa que el gradiente de temperatura no es tan fuerte como en los otros dos casos, este comportamiento puede ser originado por una mejor transferencia de calor a lo largo del lecho.

El perfil de temperatura de los residuos forestales es semejante al de cascarilla de café, su diferencia radica en la temperatura pico, la de los residuos forestales es más baja que la de la cascarilla de café.

De acuerdo a la temperatura se pueden identificar las zonas en donde ocurren las reacciones termoquímicas de la gasificación. En la Figura 58 se observa que la zona de combustión y la de gasificación ocupan la mayoría de espacio en el reactor, a diferencia de la zona de secado en donde esta posee una pequeña franja de acción.

Figura 59. Perfiles de temperatura para el reactor de 60 cm



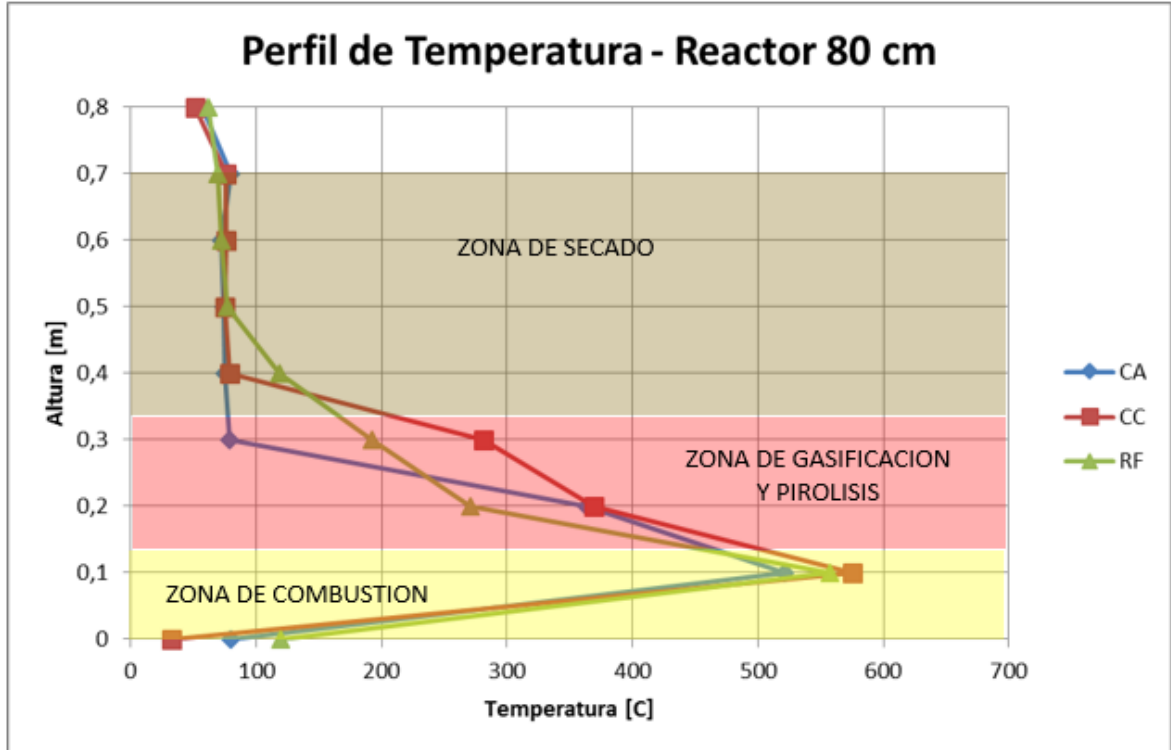
Fuente: Autores

En la gráfica se observa que la temperatura de salida de los gases es similar para los 3 tipos de biomasa. Los mayores cambios de temperatura se presentan en los primeros 30 cm, lo que da indicios de que en esta zona ocurren las reacciones químicas más significativas.

En esta prueba la cascarilla de arroz alcanzó la temperatura más alta, donde el pico de temperatura excede los 700°C. Después de 30 cm, no se presenta ninguna variación significativa de temperatura para los tres tipos de biomasa.

Las zonas de combustión y gasificación se dan en el mismo rango que las del reactor de 40 cm y la zona de secado incrementa su franja debido al aumento de la altura del lecho de biomasa. Por esta razón los gases de salida del reactor disminuyen su temperatura.

Figura 60. Perfiles de temperatura del reactor de 80 cm



Fuente: Autores

En los primeros 40 cm el perfil de temperatura es similar al que proporciona el reactor de 40 cm, aunque en este caso los cambios más abruptos de temperatura se presentan con la cascarilla de arroz. Después de 40 cm la temperatura para los 3 tipos de biomasa es casi la misma y al final la temperatura del gas es la más baja de los 3 reactores.

En general la temperatura en todo el reactor es más baja en comparación con los reactores más pequeños. El pico más alto de temperatura no alcanza los 600°C; La razón de esto se da por la cantidad de biomasa que hay en el reactor, al ser más alto almacena más biomasa que también se necesita calentar. Las reacciones de combustión aparte de proporcionar energía para las reacciones de gasificación, también suministran energía para la biomasa que aún no ha reaccionado a través de la transferencia de calor entre la fase gaseosa y la fase sólida, disminuyendo la temperatura de la zona de combustión.

Hay que indicar que en la base del reactor se presentan temperaturas más altas que en los otros dos reactores. En este punto los residuos forestales alcanzan los 120°C. Con este tipo de biomasa, el gradiente de temperatura en la zona de 20 a 50 cm es más suave y no presenta saltos bruscos como sucede con la cascarilla de arroz y de café.

La zona de secado va aumentando a medida que aumenta la altura del reactor, pero el punto de inicio cambia para cada biomasa. En la cascarilla de arroz inicia a 30 cm, en la de café a 40 cm y en los residuos forestales a 50 cm siendo las densidades de cada biomasa, las responsables de este fenómeno.

### **8.3.3. ANALISIS GENERAL**

Los perfiles obtenidos en todos los casos son consistentes con los de un gasificador de tipo Updraft. El pico de temperatura no se presenta en la base del reactor sino que es un poco más arriba y es un indicador de que ahí se presenta la zona de combustión. Más arriba se evidencia un descenso brusco de temperatura que da cuenta de las zonas de gasificación y pirolisis, las cuales consumen la energía calórica proveniente de la combustión. Enseguida de esta zona tenemos una variación casi nula de la temperatura y es cercana a los 100°C, demostrando que en esta zona se presenta el proceso de secado de la biomasa, debido a que el agua contenida en ella se evapora a dicha temperatura. La **Figura 14** muestra un perfil típico de un gasificador Updraft.

### **8.4. POTENCIA UTIL DEL PROTOTIPO**

Para determinar la potencia útil del prototipo se diseñó una prueba de calentamiento de agua que consistió en poner a calentar un 1 kg del líquido hasta su punto de ebullición, y simultáneamente se registró su temperatura y el tiempo transcurrido durante todo el proceso.

La potencia útil promedio se puede calcular como:

$$Q_{util} = \frac{m_{agua} * Cp_{agua} * (T_{final} - T_{inicial})}{\Delta t}$$

Esta prueba se realizó para las diferentes configuraciones del prototipo variando su altura y el tipo de biomasa utilizada.

#### **8.4.1. PRUEBA DE CONTROL**

La prueba de calentamiento también se realizó en una estufa de gas convencional que usa gas natural como combustible. Esto con el fin de obtener un punto de comparación para analizar el prototipo en estudio.

La estufa utilizada es marca Haceb y las especificaciones de los quemadores que utiliza son similares a las que se plantearon para el diseño del prototipo.

**Figura 61.** Prueba de Calentamiento con Estufa



**Fuente:** Autores

**Tabla 29.** Características Técnicas de la Estufa Haceb

Marca	Haceb
Referencia	ESTUFA R-V GAB GAS GN PL
Combustible	Gas Natural
Presión de suministro	$20^{+5}_{-3} \text{ mbar}$
Potencia Nominal	4 semirapidos – 5.4 MJ/h (1.5 kW)
Potencia Reducida/Quemador	Semirapido – 4.14 MJ/h (1.15 kW)

**Fuente:** Haceb

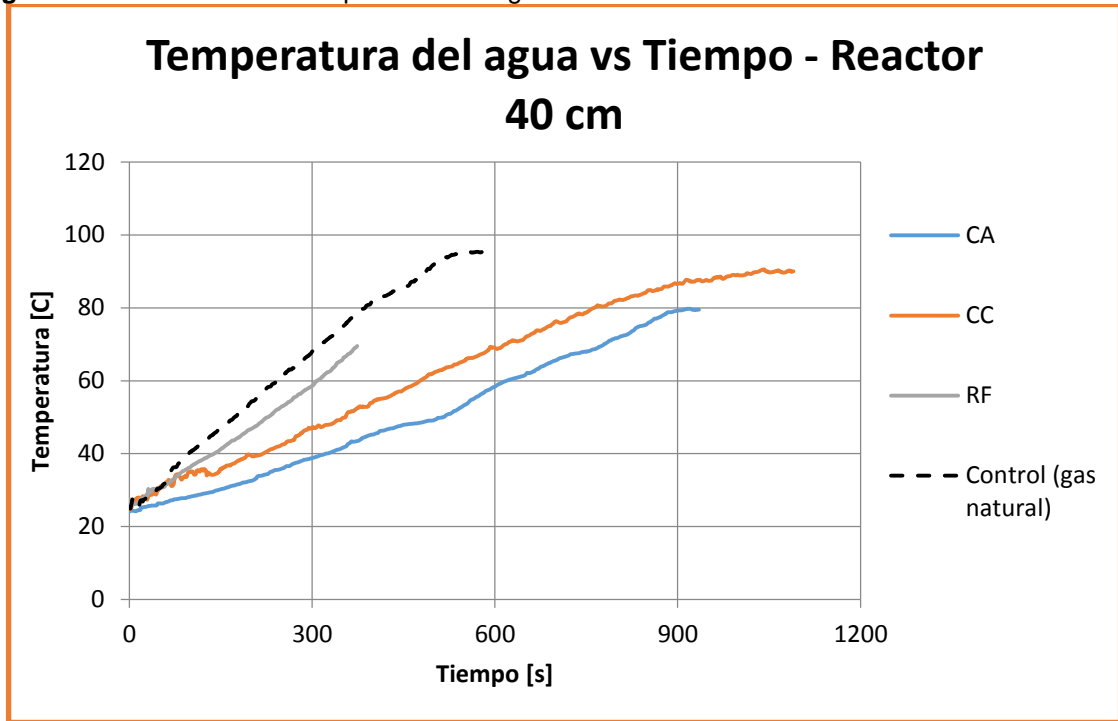
#### 8.4.2. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CALENTAMIENTO

Las siguientes graficas muestran la temperatura del agua durante la prueba de calentamiento. La convención utilizada es la siguiente:

- CA: Cascarilla de arroz.
- CC: Cascarilla de café.
- RF: Residuos forestales.

Los resultados se muestran agrupados para cada tipo de reactor y en cada conjunto también se muestra la prueba de control realizada en la estufa de gas.

**Figura 62.** Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 40 cm



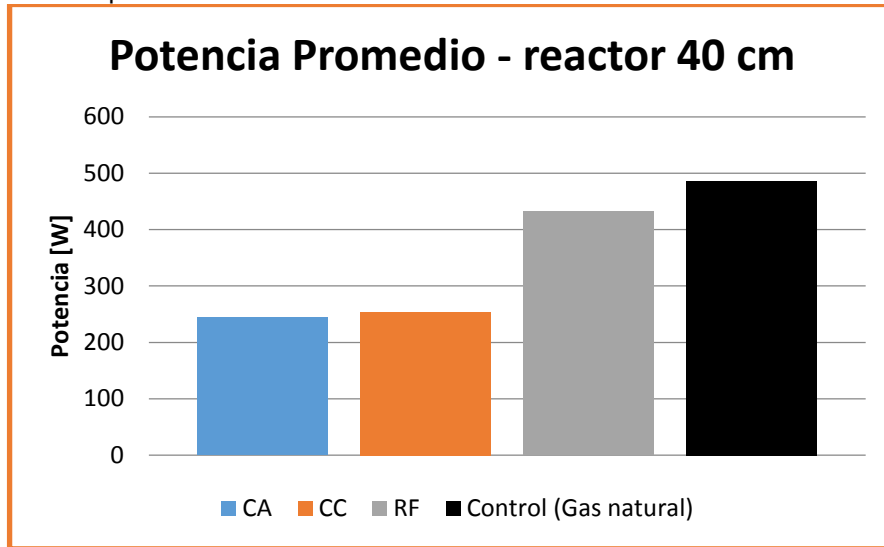
**Fuente:** Autores.

En el reactor de 40 cm se puede observar que la cascarilla de café obtuvo un desempeño mayor, ya que proporcionó la energía necesaria al agua para llegar a la temperatura de 90°C, seguido de la cascarilla de arroz que alcanzó los 80°C y se estabilizó después de los 900 segundos, esto se presentó ya que la cascarilla de arroz adquirió un comportamiento alternado durante el proceso, a diferencia de la cascarilla de café que tiene una generación de gas constante.

Por otro lado, los residuos forestales alcanzan la etapa de gasificación por un pequeño lapso de tiempo de aproximadamente 2 minutos, posteriormente al encendido el prototipo se comporta como un quemador. Es por esto que la gráfica de temperatura posee una pendiente sumamente alta, similar a la prueba de control. La razón por la que sucede es porque existe un desbalance entre la biomasa y el aire para un gasificador. En un principio, el aire entra en defecto al reactor pero, mientras va reaccionando la biomasa (la cual se consume muy rápido) el aire pasa a estar en exceso y el reactor se convierte en quemador.

El desbalance entre los consumos de biomasa y aire ocurre por la forma que tienen los residuos forestales. Estos en su mayoría provienen de hojas y arbustos los cuales tienen un área superficial alta en relación a su volumen, y por lo tanto propician un mayor consumo y mejoran la transferencia de masa entre la fase sólida y la fase gaseosa (Souza-Santos 2006) [23].

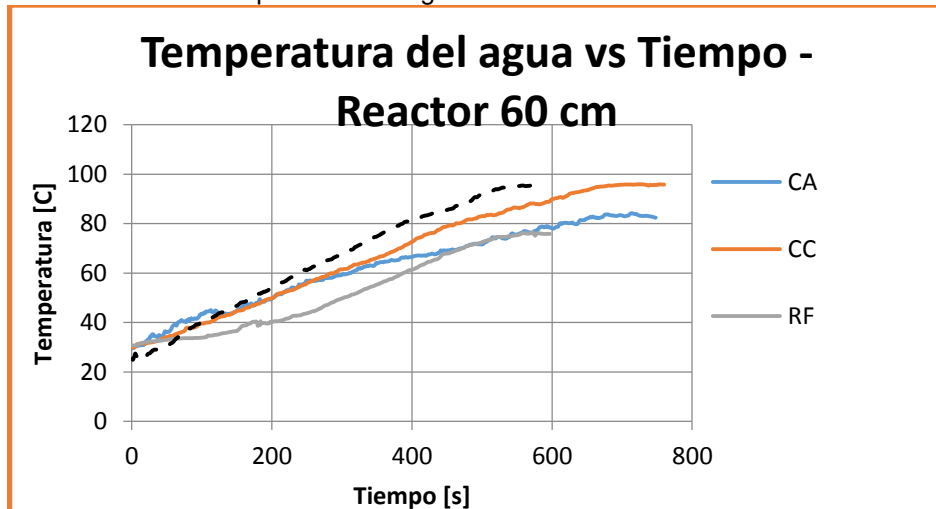
**Figura 63.** Potencia promedio con el reactor de 40 cm



Fuente: Autores.

Las potencias promedio obtenidas con la cascarilla de arroz y de café son similares, y representan un poco más de la mitad de la potencia de la estufa convencional. En cambio, la potencia promedio producida por los residuos forestales se dispara hasta casi los 450 W, cercana a la potencia de la prueba de control, aunque como se mencionó antes, esto es debido al comportamiento del prototipo como quemador. Además cuando el prototipo pasa a modo quemador la ceniza es expulsada del reactor.

**Figura 64.** Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 60 cm

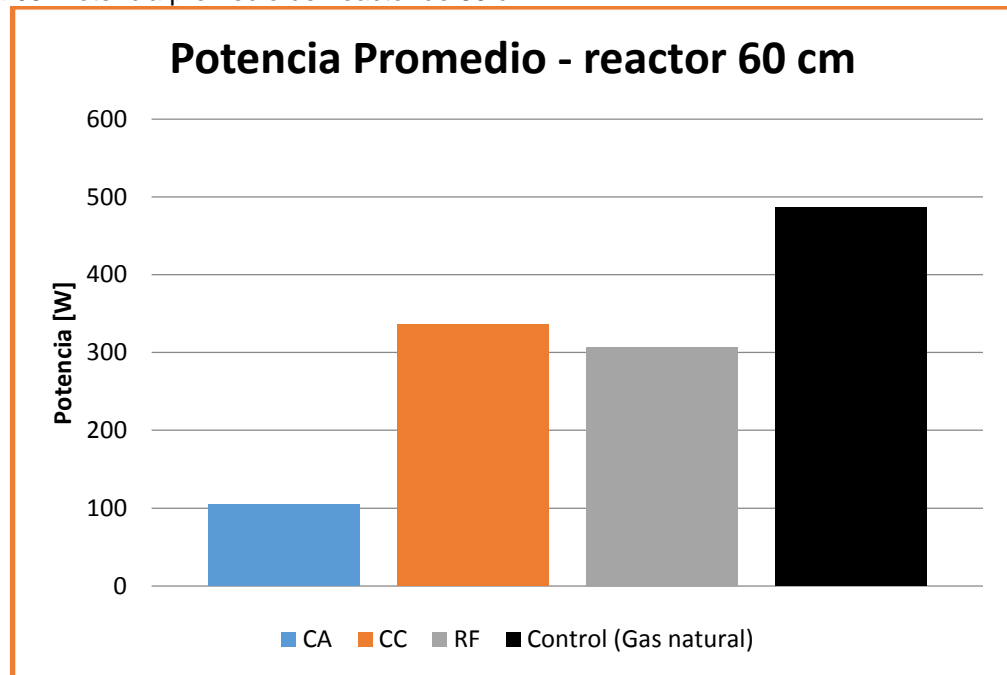


Fuente: Autores

En el reactor de 60 cm, solo la cascarilla de café proporcionó la energía necesaria para llevar el agua hasta el punto de ebullición. Con los residuos forestales, la temperatura del agua se estabilizó en 76°C, mientras que con la cascarilla de

arroz llegó hasta los 83°C. De todas formas, el comportamiento de los tres tipos de biomasa es muy parecido al de la prueba de control, y a diferencia de la prueba con el reactor de 40 cm el tiempo de ebullición es cercano a la prueba con gas natural.

**Figura 65.** Potencia promedio del reactor de 60 cm

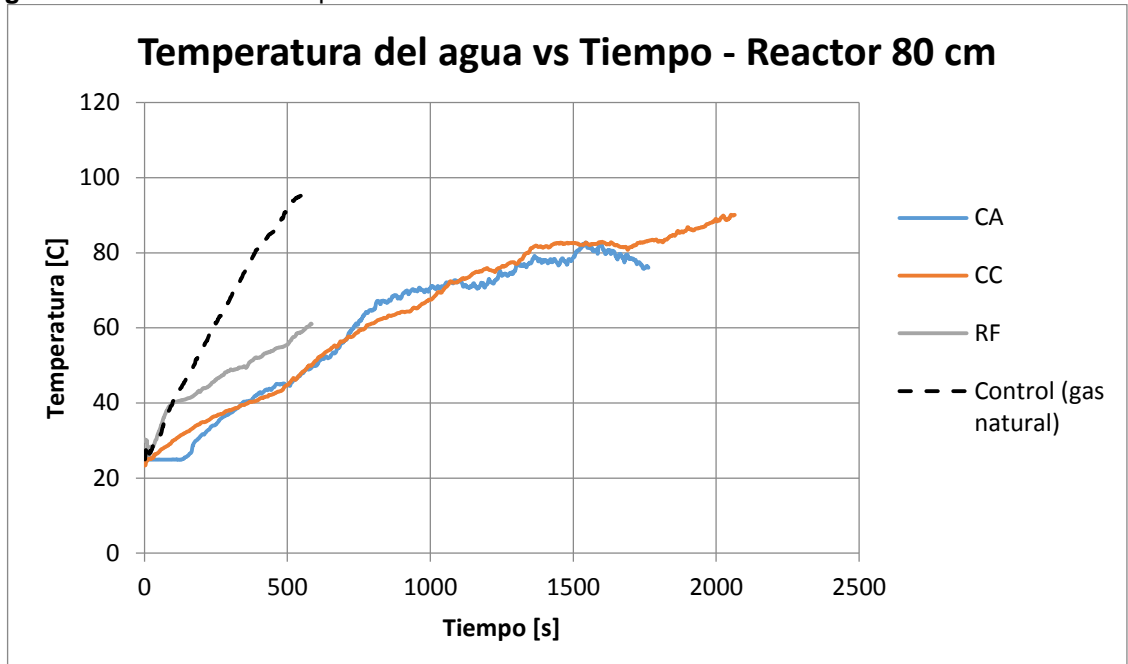


**Fuente:** Autores

El comportamiento de las tres biomásas en el reactor de 60 cm se asemeja al de la estufa convencional, la gráfica de temperatura lo muestra y la de potencia lo confirma. Las potencias promedio son más cercanas a la del gas natural y nuevamente la cascarilla de café es la que tiene mejor rendimiento. En esta ocasión los residuos forestales tuvieron un mejor desempeño, durante toda la prueba el prototipo funciona como gasificador. En cuanto a la cascarilla de arroz, está se comportó de manera intermitente ya que la quema de los gases no se hizo de manera continua.

En el reactor de 60 cm se hizo una mejor regulación del flujo de aire y las gráficas de potencia y temperatura lo muestran. La regulación es importante porque de esta dependerá la concentración del gas combustible y por lo tanto su poder calorífico. Como se vio en el reactor de 40 cm, si se induce demasiado aire el equipo tiende a funcionar como quemador y si se ingresa muy poco aire el resultado será un gas con concentraciones bajas de componentes combustibles (CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>, CO).

**Figura 66.** Evolución de temperatura con el reactor de 80 cm



**Fuente:** Autores

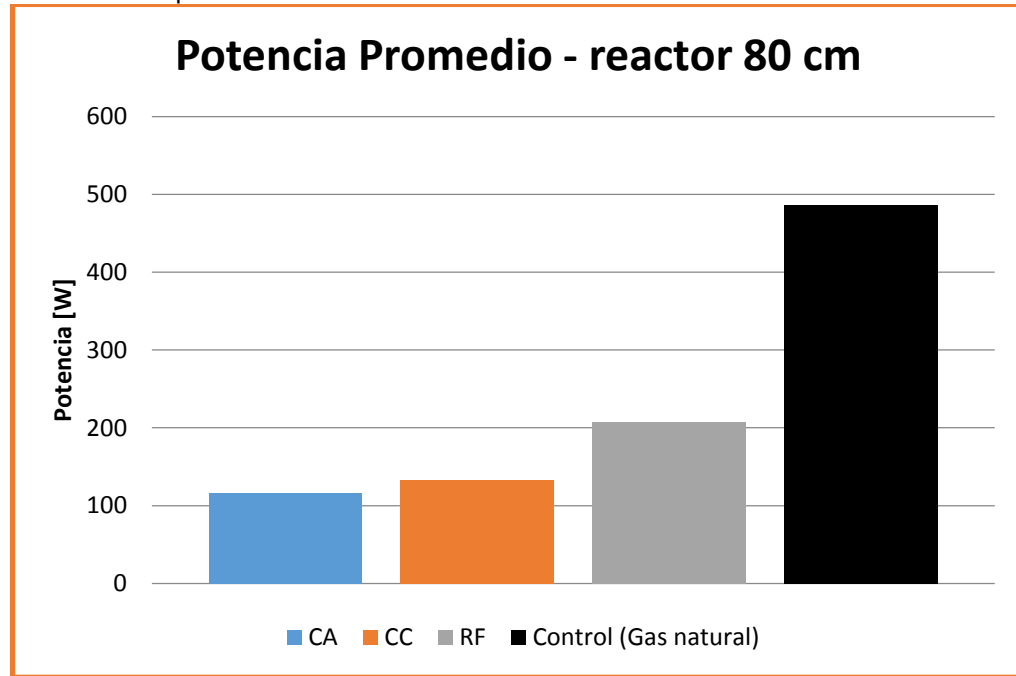
Aquí se observa una variación de la temperatura del agua más errática, esto es debido a que la llama que se generaba con los tres tipos de biomasa era más inestable y tendía a apagarse por momentos, aunque como en los casos anteriores, la cascarilla de café es la que suministra la mayor cantidad de energía y es la única que puede hacer ebullición del agua. La cascarilla de arroz muestra un comportamiento similar pero no es capaz de subir la temperatura del agua por encima de los 85°C.

Los residuos forestales muestran un mejor comportamiento inicial que los otros dos tipos de biomasa, pero al igual que en el reactor de 40 cm, después de 3 minutos el prototipo deja de funcionar como gasificador y se convierte en quemador. Y en todos los casos, los residuos forestales tienen una duración mucho menor a la de los otros tipos de biomasa.

En el reactor de 80 cm aparece un inconveniente, la ceniza generada. A medida que transcurre la generación de gas, el sólido que ya ha reaccionado en el reactor está en una proporción mayor que la biomasa que aún no ha reaccionado. La ceniza es mucho más compacta que la biomasa y cambia las condiciones de operación del ventilador (mayor caída de presión). Esto disminuye el flujo de aire que entra al reactor y genera el comportamiento errático de la llama del quemador. Este suceso es más fuerte con la cascarilla de arroz. La manera de superar este

fenómeno es aumentar las rpm del ventilador para cumplir con los requerimientos de caudal en el nuevo punto de operación.

**Figura 67.** Potencia promedio del reactor de 80 cm



**Fuente:** Autores.

Los valores bajos de potencia concuerdan con los perfiles de temperatura, al prototipo le toma mucho tiempo calentar el agua sin importar el tipo de biomasa, con esta prueba también se observó que la ceniza generada por la cascarilla de arroz y los residuos forestales salía expulsada del reactor. Esto como consecuencia de buscar el caudal de aire necesario para mantener la llama. Los residuos forestales generan una potencia superior a los de la cascarilla de arroz y cascarilla de café debido a su comportamiento como quemador en la mayor parte de la prueba.

En cada prueba la cascarilla de café fue la que tuvo el mejor desempeño de los tres tipos de biomasa, exceptuando los resultados anormales de los residuos forestales. Con ello se comprueba que la cascarilla de café tiene mejores propiedades físicas para ser utilizada como combustible a gasificar. Teniendo en cuenta la información obtenida, se dispuso realizar un análisis detallando la variación del poder calorífico y de la potencia útil con la variación del flujo de aire para cada reactor.

## 8.5. COMPORTAMIENTO DE LA CASCARILLA DE CAFÉ CON DIFERENTES FLUJOS DE AIRE

Se realizaron 3 ensayos con cada reactor a diferentes velocidades del ventilador con el fin de estudiar y analizar el caudal aproximado para el cual la cascarilla de café presenta el mejor comportamiento en cuanto a producción del gas y calidad de operación.

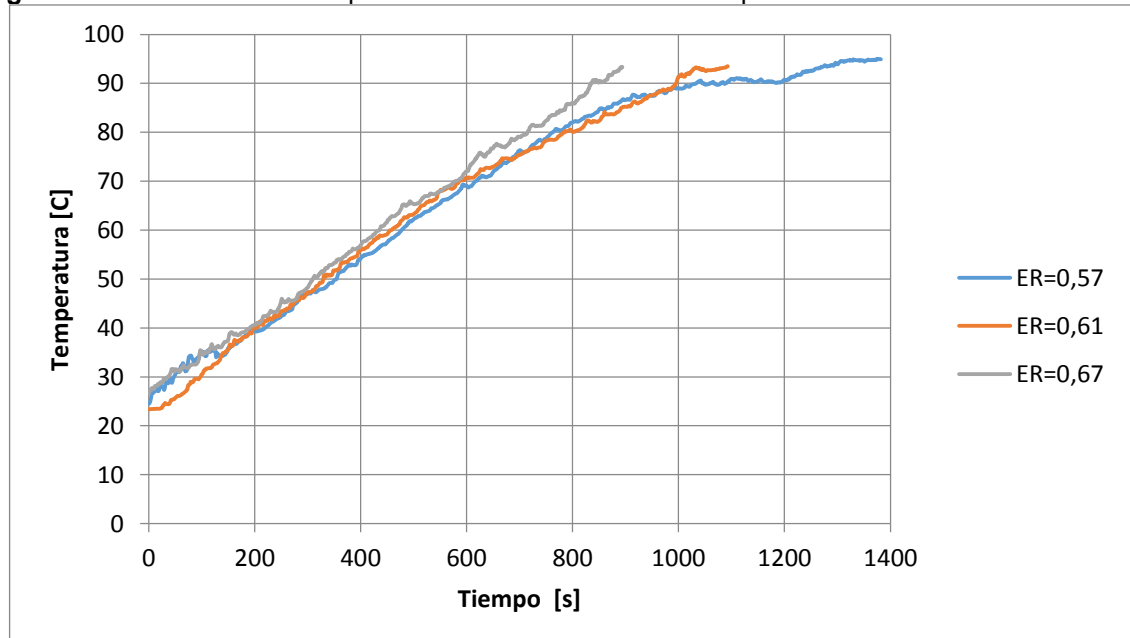
Figura 68. Quema del Gas Producido



Fuente: Autores

### 8.5.1. VARIACION DEL CAUDAL PARA EL REACTOR DE 40 cm

Figura 69. Evolución de la temperatura con el reactor de 40 cm para diferentes caudales



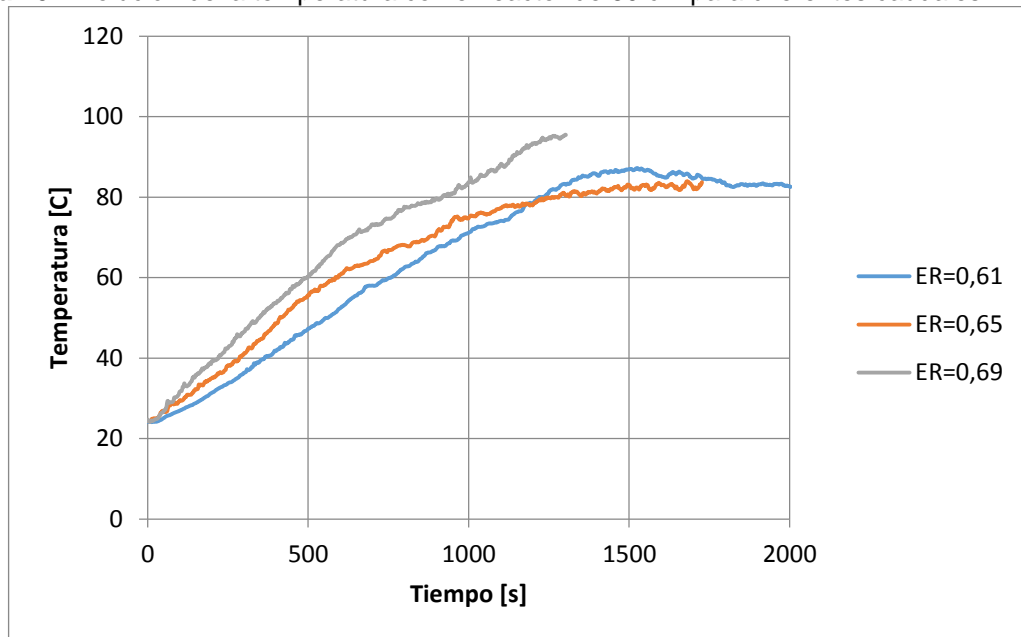
Fuente: Autores

La grafica muestra que con los tres caudales se pudo hervir el agua, y su tendencia es similar en los primeros 500 segundos. Después de este punto se empieza a notar la diferencia en la energía suministrada. Con el caudal 1 la llama

fue constante y no hubo problemas de expulsión de ceniza. El caudal 3 fue el que hizo hervir el agua más rápido pero el prototipo tendía a funcionar como quemador indicando que se encontraba en el límite de flujo para gasificar en estas condiciones. El caudal 2 mostró un comportamiento intermedio entre el caudal 1 y caudal 3, el agua hirvió más rápido que con el caudal 1 pero la operación fue intermitente.

### 8.5.2. VARIACION DE CAUDAL PARA EL REACTOR DE 60 cm

**Figura 70.** Evolución de la temperatura con el reactor de 60 cm para diferentes caudales

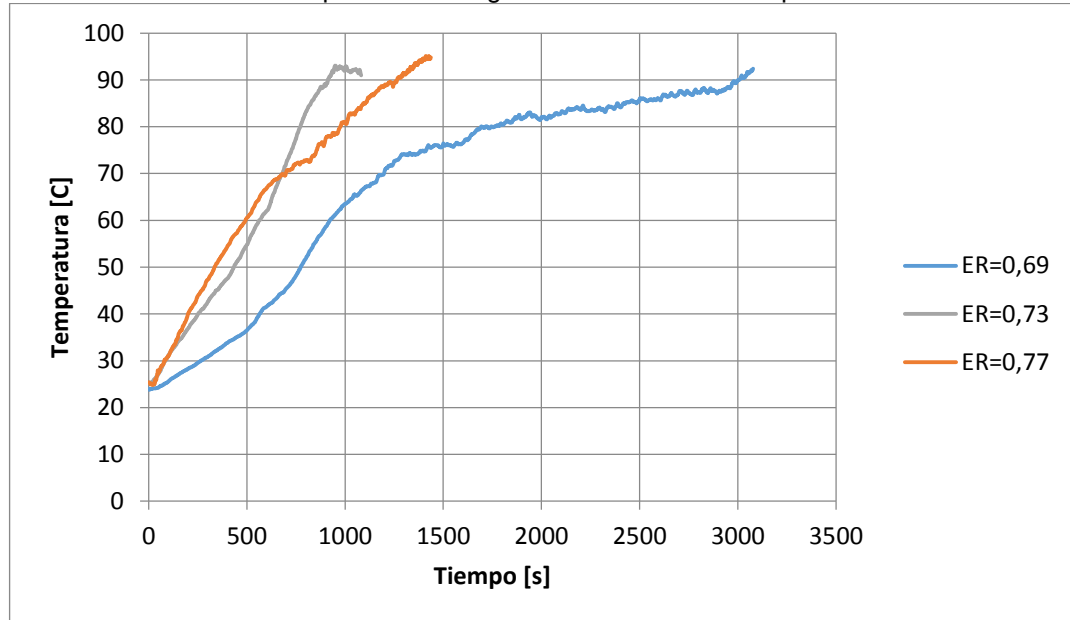


**Fuente:** Autores

En el reactor de 60 cm se observan diferencias más notorias en la evolución de la temperatura del agua. Con el caudal 3 el prototipo fue capaz de hervir el agua al contrario de los otros que solo alcanzaron los 85 grados, mostrando un comportamiento estable y le proporciono energía al agua en un tiempo más corto que los otros caudales.

### 8.5.3. VARIACION DE CAUDAL PARA EL REACTOR DE 80 cm

Figura 71. Evolución de la temperatura del agua con el reactor de 80 para diferentes caudales



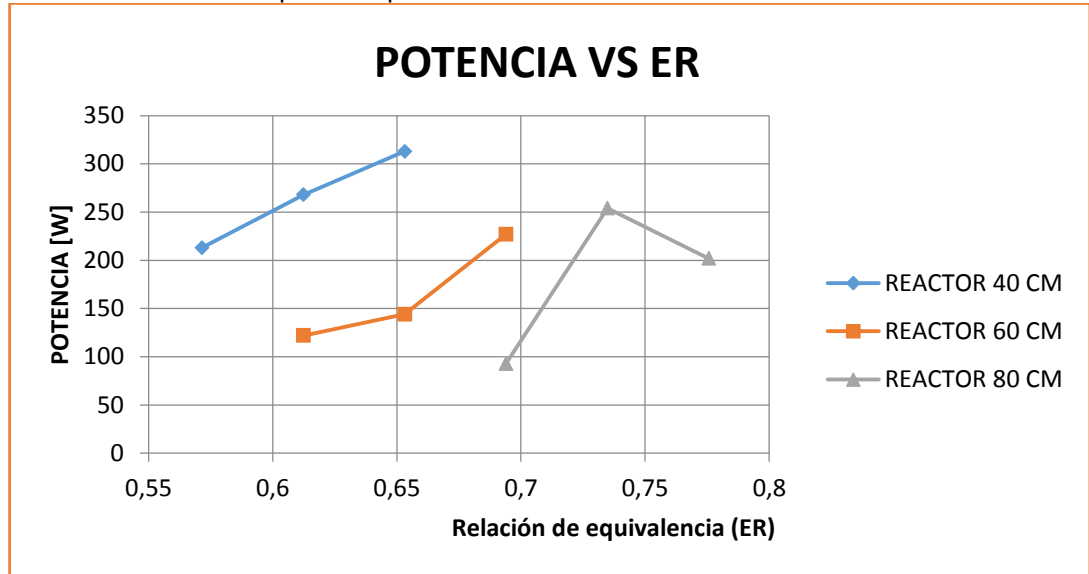
Fuente: Autores

La diferencia en la evolución de la temperatura del agua es aún más notoria en el reactor de 80 cm. Con el caudal más bajo, al prototipo le tomo 3000 segundos hacer hervir el agua, mientras que con los caudales más altos, el prototipo gasta menos de la mitad de ese tiempo. El caudal 2 pudo mantener constante la llama llegando de esta manera a un flujo adecuado para la operación de este reactor. Por otra parte los caudal 1 y 3 también hicieron hervir el agua pero con inconvenientes como tiempo prolongado y funcionamiento intermitente.

Para variar el caudal de aire que entraba al reactor se regulaban las rpm del ventilador, la tendencia era a aumentar las rpm a medida que se aumentaba la altura del reactor, lo cual tiene sentido porque la caída de presión de la biomasa aumenta con la altura y para poder mantener un caudal similar en el nuevo punto de operación hay que subir la velocidad de rotación del ventilador.

#### 8.5.4. VARIACION DE LA POTENCIA UTIL CON EL ER.

Figura 72. Variación de la potencia promedio en función del ER



Fuente: Autores

La tendencia de las gráficas es un aumento de potencia proporcional a la relación de equivalencia, debido en parte a que se suministra más aire y por lo tanto se está produciendo más gas combustible. El reactor que mostró mejor desempeño fue el de 40 cm llegando a potencias promedio de alrededor 300 vatios. Las potencias de los reactores de 60 cm y 80 cm se mueven en el mismo rango (100-250 vatios). Para el reactor de 60 cm, se ve reflejado que en un aumento de ER del 35% la potencia aumenta casi el doble. En el reactor de 80 cm no se ve reflejado el comportamiento lineal que se observa en los reactores más pequeños, ya que esta muestra un pico máximo a los 250 W, terminando en los 200 W.

#### 8.6. CONSUMOS DE BIOMASA

Tabla 30. Flujos máscicos de biomasa experimentales

	CA-40	CC-40	CA-60	CC-60	CA-80	CC-80
Flujo Máscico [kg/h]	0,78	0,91	0,82	0,66	0,83	0,63

Fuente: Autores.

Los flujos de biomasa son consistentes con los valores que se tomaron para el diseño del reactor y se muestra que la altura no afecta demasiado el consumo de biomasa. En la **Tabla 30** solo se muestran los consumos para las cascarillas de arroz y de café. Los consumos de los residuos forestales no se muestran porque no son resultados válidos, esto como consecuencia del comportamiento del prototipo en forma de quemador durante el desarrollo de las pruebas.

**Tabla 31.** Cambio en el flujo de biomasa para los diferentes reactores

	Reactor 40 cm			Reactor 60 cm			Reactor 80 cm		
	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3	Caudal 1	Caudal 2	Caudal 3
<b>Flujo másico [kg/h]</b>	0,892	1,036	1,022	0,541	0,834	1,112	0,606	0,866	0,317

Fuente: Autores

En las pruebas para diferentes flujos con la cascarilla de café se aprecia la variación del consumo de acuerdo al flujo de aire que se está suministrando. El consumo de biomasa tiende a aumentar cuando se aumenta el caudal de aire. Todo esto ocurre porque se está ingresando más oxígeno a la reacción, lo que da a espacio a que reaccione una mayor cantidad de biomasa en un mismo intervalo de tiempo y se produzca una mayor cantidad de gas combustible. Obviamente, esto afectara la autonomía del prototipo y habrá que recargarse con más frecuencia.

## 8.7. COMPOSICION Y PODER CALORIFICO DEL GAS PRODUCIDO

Para poder determinar la composición de los gases combustibles presentes en el gas producido durante el proceso de gasificación, fue necesario recurrir a un análisis de laboratorio Cromatografía de Gases, prueba que fue realizada por el Laboratorio de Cromatografía de Gases de la Universidad Industrial de Santander para las distintas biomásas utilizadas (cascarilla de arroz, cascarilla de café y residuos forestales). Para llevar esto a cabo se tomaron las muestras de gas en un tubo de ensayo de desprendimiento lateral.

Al realizar la conversión a porcentajes, se pudo evidenciar fallas en los resultados obtenidos, ya que estos no son acordes a algunos estudios y pruebas referenciadas de estudios anteriores. A continuación se muestra los rangos de porcentajes reportados por Gonzales (2008) [14]:

**Tabla 32.** Composición experimental del gas comparada con otros autores

Elemento	Experimental			Gonzales
	Café	Arroz	Forestal	
<b>CO<sub>2</sub></b>	1,66%	1,97%	0,65%	12,00%
<b>CH<sub>4</sub></b>	0,41%	0,33%	0,10%	2,00%
<b>CO</b>	3,61%	2,72%	0,55%	20,00%
<b>Hidrogeno</b>	0,72%	0,97%	0,14%	16,00%
<b>Oxigeno</b>	17,85%	16,85%	20,41%	0,00%
<b>Nitrógeno</b>	75,67%	77,11%	78,13%	50,00%

Fuente: Autores

Para poder rebatir el resultado obtenido en las pruebas, se procede a determinar la cantidad de CO por medio de un analizador de gases con el procedimiento que se muestra a continuación.

El monóxido de carbono es el gas combustible que más concentración tiene en el gas generado por el gasificador. Durante el funcionamiento del prototipo se midió la concentración de CO con ayuda de un analizador de gases TESTO 350.

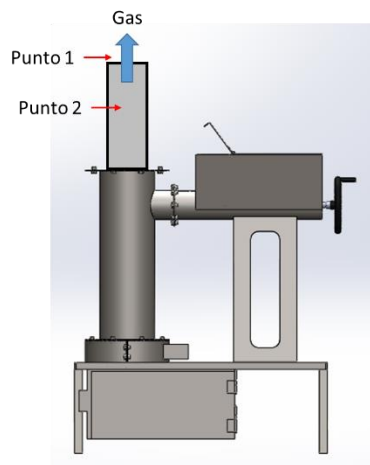
**Figura 73.** Analizador de emisiones TESTO 350



**Fuente:** Testo Inc.

Al prototipo se le hizo la adaptación de un conducto para evitar medir tan cerca de los puntos calientes del reactor y que se dañe el sensor. La medición se hizo en dos puntos, uno a 30 cm de separación de la biomasa (punto 2), y otro a la salida del conducto (punto 1), equivalente a donde se instalaría el quemador.

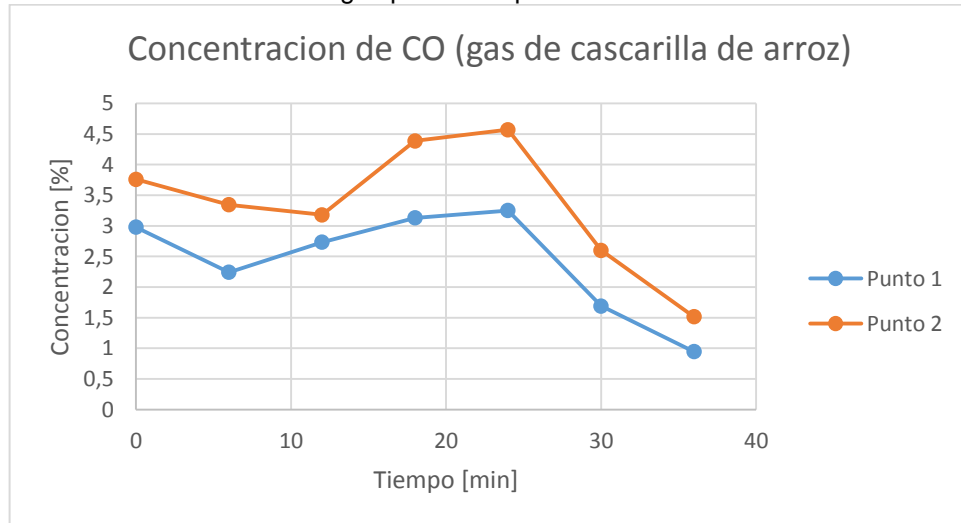
**Figura 74.** Puntos de medición de la concentración de CO



**Fuente:** Autores

A continuación se muestran las gráficas de concentración de CO para el gas generado por cada tipo de biomasa.

**Figura 75.** Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de arroz

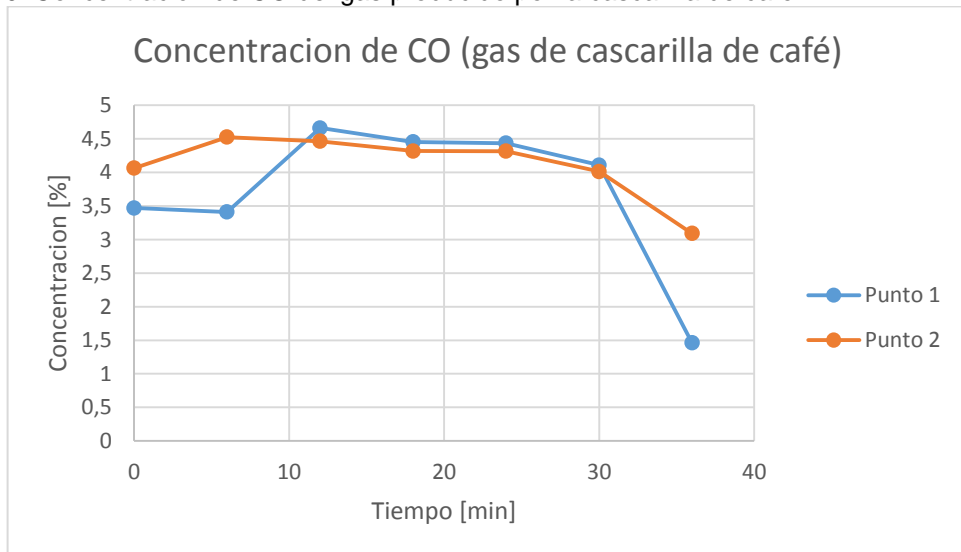


**Fuente:** Autores

En los primeros minutos de la prueba, la concentración de CO es más o menos constante. La diferencia de concentración entre los dos puntos radica en que en el punto 1 hay aire que rodea el gas, lo que baja su concentración.

Después de 25 minutos, la concentración de CO empieza a disminuir indicando que la producción de gas combustible se está deteniendo.

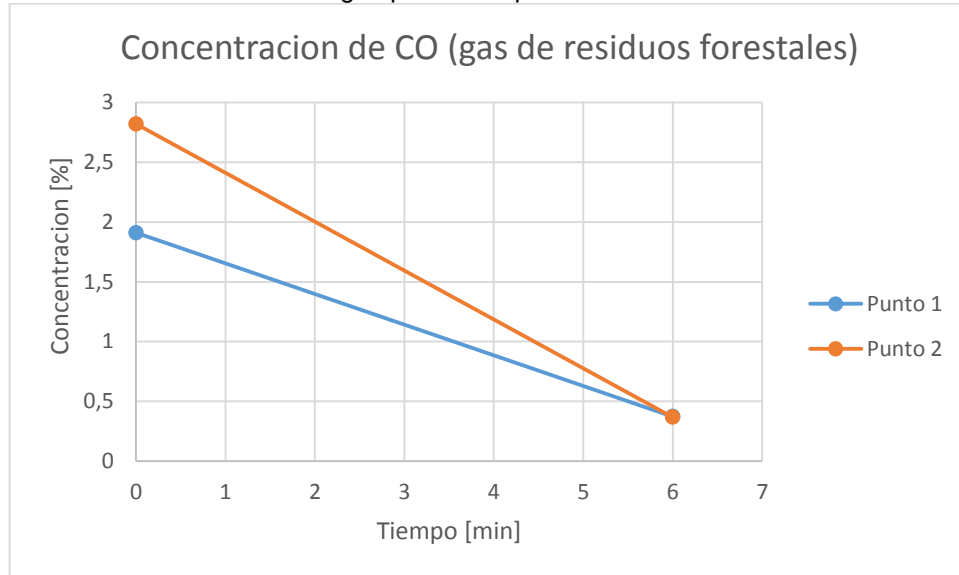
**Figura 76.** Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de café



**Fuente:** Autores

El comportamiento con la cascarilla de café es similar, aunque los valores de concentración son más estables y son más altos en ambos puntos.

**Figura 77.** Concentración de CO del gas producido por la cascarilla de café



Fuente: Autores

Para los residuos forestales sucedió que el reactor solo funciono los primero 6 minutos, después de este punto, funcionaba como quemador. Aun así, las concentraciones son mucho más bajas que las de cascarilla de arroz o de café.

Sin embargo debido a que no se pudieron obtener porcentajes específicos experimentalmente, estos se pudieron evidenciar de manera teórica en la simulación del proceso de gasificación. De esta manera se obtienen resultados así:

**Tabla 33.** Composición teórica del gas proveniente de la simulación

Tipo de biomasa	Composición en base volumétrica						Porcentaje de CO medido
	CH4	CO	CO2	H2	H2O	N2	
<b>Café</b>	4,95%	8,33%	21,82%	16,90%	1,54%	46,47%	>4,5%
<b>Arroz</b>	4,12%	8,07%	23,63%	23,68%	2,34%	38,15%	>4,2%
<b>Forestal</b>	5,05%	6,74%	21,91%	18,11%	1,88%	46,31%	2,7%

Fuente: Autores

De esta misma forma el poder calorífico teórico del gas producido por la biomasa es el que sigue:

**Tabla 34.** Poder calorífico del gas calculado en la simulación

Tipo de Biomasa	Poder Calorífico Inferior [kJ/kg]
Café	4107
Arroz	4676
Forestal	4136

**Fuente:** Autores

## 8.8. REDISEÑO DEL REACTOR

Aunque los flujos de biomasa medidos experimentalmente son consistentes con el diseño del reactor, la potencia generada fue menor de lo que se esperaba. Esto quiere decir que la eficiencia real del prototipo es menor que la que se tomó para el diseño. La eficiencia calculada fue del 14% entonces para cumplir con los requerimientos de potencia, se retroalimentó la información obtenida en los parámetros del diseño construyendo de este modo un nuevo reactor.

**Figura 78.** Aspecto del reactor rediseñado.

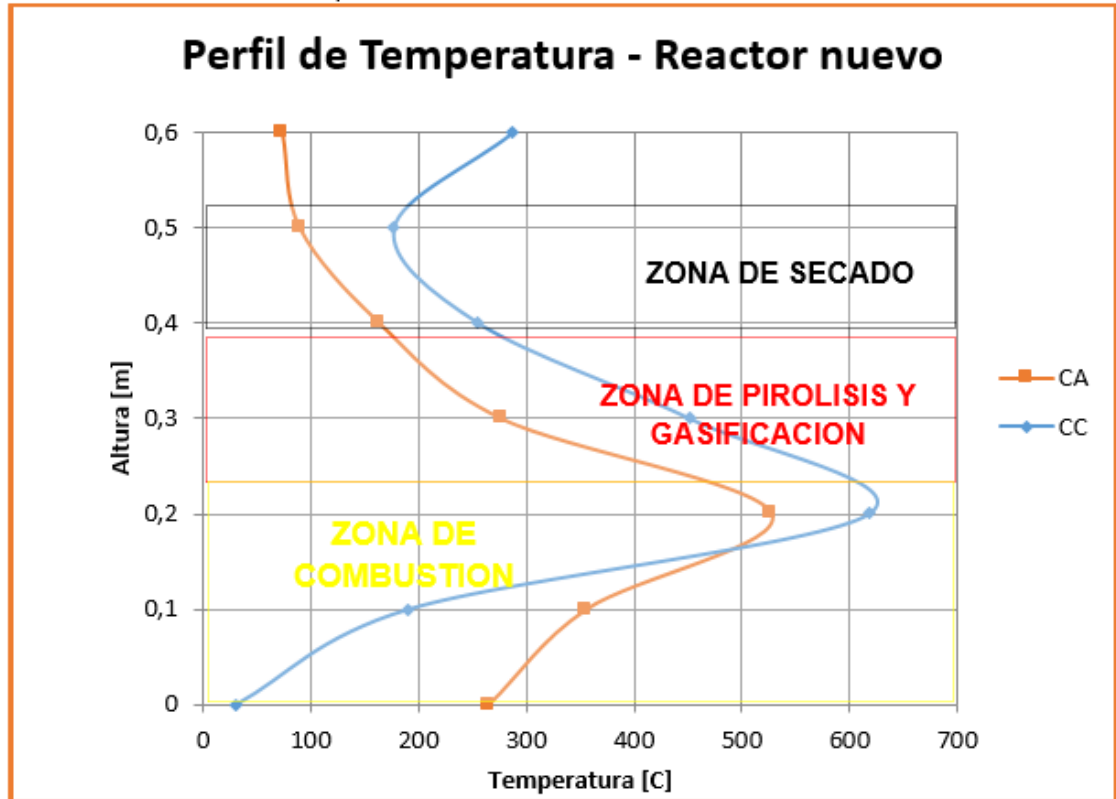


**Fuente:** Autores

El nuevo reactor presenta una altura de 60 cm, esto debido a que en las pruebas anteriores demostró un desempeño mayor en comparación con los otros.

### 8.8.1. PERFILES DE TEMPERATURA DEL NUEVO REACTOR

Figura 79. Perfiles de temperatura del nuevo reactor



Fuente: Autores

En el nuevo reactor se estudió el comportamiento de la cascara de café y cascara de arroz solamente, excluyendo los residuos forestales, debido a los resultados obtenidos con las anteriores pruebas de su tendencia a ser quemador en la mayor parte del tiempo.

Este perfil de temperatura muestra que la zona de combustión aumenta su rango a diferencia de los obtenidos con los anteriores prototipos estudiados, alcanzando temperaturas pico de 600°C para la cascara de café y 520°C para la cascara de arroz.

La zona de gasificación no presenta un cambio relevante pues la franja que ocupa es similar a la del reactor de 60 cm y diámetro 8,5 cm y la zona de secado disminuye por consecuencia la temperatura de salida de los gases es más elevada.

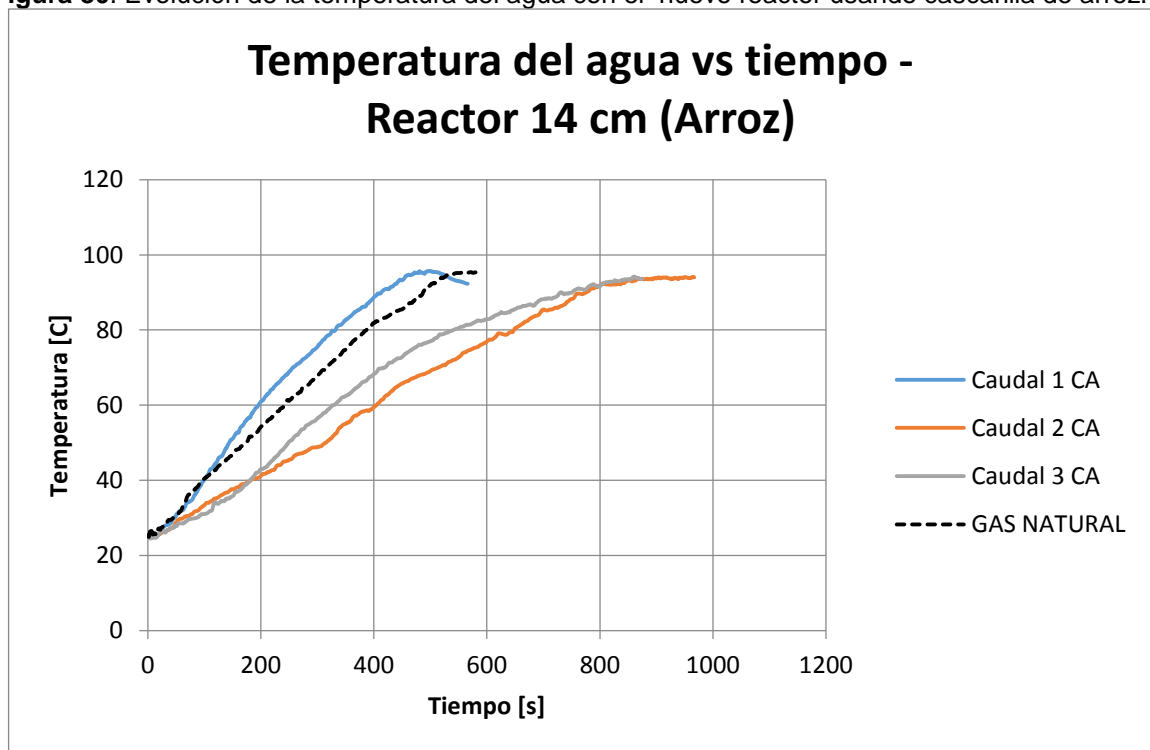
### 8.8.2. PRUEBA DE CALENTAMIENTO DEL NUEVO REACTOR

Con el nuevo reactor también se realizó la prueba de calentamiento para verificar su funcionamiento y como era su desempeño respecto a los otros reactores de diferentes dimensiones. En este caso se muestra la variación de temperatura del agua con diferentes flujos de aire en el reactor.

### 8.8.3. PRUEBA CON CASCARILLA DE ARROZ

El cambio de diámetro mejora significativamente el rendimiento del prototipo. Esta vez, con un flujo adecuado de aire se pudo superar la potencia entregada por la estufa de gas natural.

**Figura 80.** Evolución de la temperatura del agua con el nuevo reactor usando cascarilla de arroz.



**Fuente:** Autores.

Así mismo, la operación del prototipo mejora mucho y se pasó de generar una llama intermitente y amarillenta a una llama continua y más azul.

**Figura 81.** Aspecto de la llama generada por el gas de cascarilla de arroz



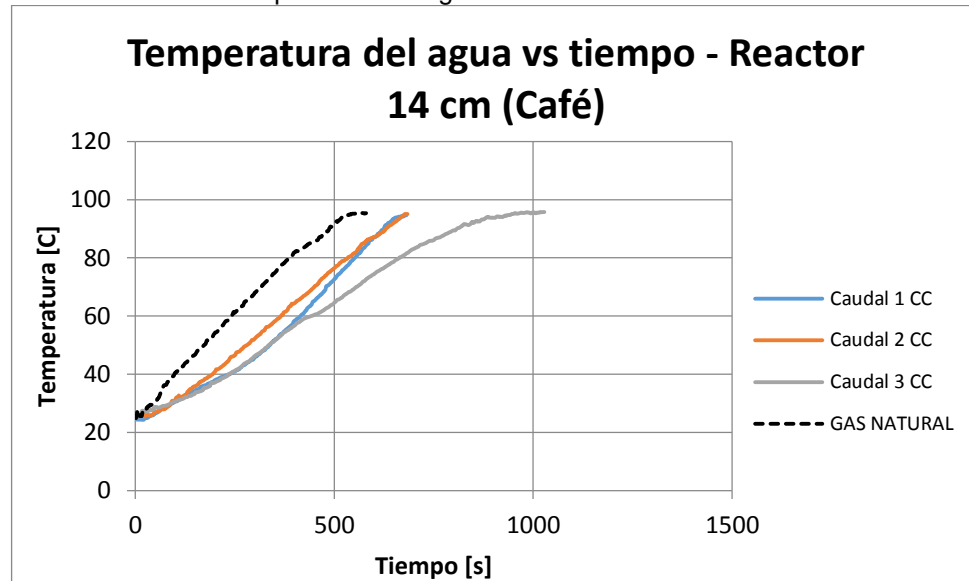
**Fuente:** Autores

Cuando se disminuye el caudal que entra al reactor, la energía suministrada por este al agua disminuye como se ve en la Figura 80, aun así la disminución en el tiempo de ebullición del agua representa una mejoría respecto al reactor de 8,5 cm de diámetro.

#### 8.8.4. PRUEBA CON CASCARILLA DE CAFÉ

Con la cascarilla de café también se presentan mejoras respecto al diámetro más pequeño. La llama es más continua y uniforme en el quemador, y además el tiempo de ebullición del agua se reduce sustancialmente.

**Figura 82.** Evolución de la temperatura del agua con el reactor nuevo usando cascarilla de café



**Fuente:** Autores

Como se ve en la Figura 82, no hay una diferencia apreciable en el comportamiento del suministro de energía al agua en la prueba entre los caudales 1 y 2. Lo que sí se pudo observar era que con el caudal más alto la ceniza tiende a salir expulsada del reactor.

### 8.8.5. EFICIENCIA EXPERIMENTAL DEL NUEVO REACTOR

Aplicando la ecuación 31 con los resultados experimentales de flujos máxicos de biomasa y de gas y apoyándose en los resultados teóricos del poder calorífico del gas se pudo calcular la eficiencia experimental del prototipo cuando operaba con el nuevo reactor.

Los flujos máxicos de biomasa para la cascarilla de arroz y de café fueron 2,6 kg/h y 1,6 kg/h respectivamente. Los flujos de gas calculados a partir de la medición del caudal de aire suministrado al reactor fueron 6,3 kg/h y 3,07 kg/h, para la cascarilla de arroz y la cascarilla de café respectivamente.

**Tabla 35.** Eficiencias experimentales del nuevo reactor

Tipo de biomasa	Eficiencia
Cascarilla de arroz	64,21%
Cascarilla de Café	58,7%

Fuente: Autores

## 8.9. ANALISIS ECONOMICO DEL PROTOTIPO

Para hacer un análisis completo y correcto de la relación entre el costo y la operación del prototipo se tienen en cuenta dos aspectos:

- Costo de Adquisición
- Costo de Operación.

La comparación se realiza con una estufa de gas de similares características que usa gas natural como combustible.

### 8.9.1. COSTO DE ADQUISICION

El costo de adquisición para el prototipo comprende el gasto en los materiales para su fabricación. En la Tabla 36 se detallan estos ítems.

**Tabla 36.** Costo de materiales para la construcción del gasificador

ITEM	CANTIDAD	COSTO [COP\$]
Lámina Cold Rolled Cal. 14	1 m <sup>2</sup>	31500
Lámina Cold Rolled Cal. 18	0.7 m <sup>2</sup>	12700
Lámina Galvanizada Cal. 30	0.42 m <sup>2</sup>	4000
Angulo 1" x 1/8"	3.85 m	7700
Tubo Cuadrado 3/4" Cal. 18	2.4 m	4000
Eje 5/8" Acero 1020	0.62 m	7000
Ventilador Centrifugo 15 W	1	25000
Quemador	1	25000
Volante	1	18000
Empaques de asbesto	3	10000
Tornillos 1/4" x 3/4" y tuercas	36	6700
Broches de presión (tolva)	2	6000
Bisagras para soldar	4	4300
Empaques de silicona	2	5000
Aislante térmico	2 kg	6000
Dimer y conexión eléctrica	-	13000
<b>TOTAL</b>		<b>185900</b>

**Fuente:** Autores

Una estufa de gas en el mercado de un puesto como la que se muestra en la **Figura 83** cuesta alrededor de \$45000. En cambio, el prototipo tiene un costo de fabricación de COP\$ 185900 lo cual refleja una inversión alta para ser una cocina de un solo puesto.

**Figura 83.** Estufa de Un Puesto A Gas



**Fuente:** <http://www.kalley-uk.com/eContent/Library/Images/estufa-gas-1puesto-K-EGN1P.jpg>

## 8.9.2. COSTO DE OPERACIÓN

- **Costo de operación con gas natural**

Cuando se realizó la prueba de calentamiento en la estufa de gas, se midió también su consumo que arrojó un valor de:

$$\dot{V}_{GAS} = 4,833 * 10^{-5} \left[ \frac{m^3}{s} \right]$$

Con este flujo se tiene que por cada hora de cocción se consume:

$$V = \dot{V} * \Delta t [m^3]$$

$$V = 4,833 * 10^{-5} * 3600 [m^3]$$

$$V = 0,174 [m^3]$$

El metro cubico de gas natural tiene un costo de \$885, lo que equivale a un costo por hora de cocción de \$154.

- **Costo de operación con Biomasa**

Al realizar el mismo procedimiento anterior se midió el flujo másico de biomasa utilizado en el prototipo cuando funcionaba con cascarilla de arroz y cascarilla de café.

**Tabla 37.** Costo por Hora de Cocción del prototipo

	Café	Arroz
Flujo másico [kg/h]	1,7	2,6
Costo unitario [\$/Kg]	50	75
Costo por hora de cocción [\$/h]	85	199

**Fuente:** Autores

- **Costo de la energía eléctrica**

Además del consumo de biomasa, el prototipo también requiere energía eléctrica para hacer funcionar el ventilador que posee. El ventilador consume 12 vatios por cada hora y a un costo de la energía eléctrica de \$349,69 por kWh, el costo de operación del ventilador sería de:

$$Costo_{elec} = 12 Wh * \frac{1kWh}{1000 Wh} * 349,69 \frac{pesos}{kWh}$$

$$\text{Costo}_{elec} = 4,19 \text{ pesos por hora de cocción}$$

Haciendo una comparación de los costos totales de operación entre el prototipo y la cocina de gas:

**Tabla 38.** Costos Totales de Operación


	Gas Natural	Cascarilla de Arroz	Cascarilla de Café
<b>Consumo de Combustible</b>	0.174 [m <sup>3</sup> /h]	2.6 [kg/h]	1.7 [kg/h]
<b>Costo Unitario de Combustible</b>	\$ 885	\$ 75	\$ 50
<b>Consumo Eléctrico</b>	<i>No aplica</i>	0.012 [kWh]	0.012 [kWh]
<b>Costo Energía Eléctrica</b>	<i>No aplica</i>	\$ 349	\$ 349
<b>Costo Horario</b>	154 [\$/h]	199.2 [\$/h]	89.2 [\$/h]
<b>Costo Mensual (4 horas diarias de uso)</b>	\$ 18480	\$ 23902	\$ 10704

**Fuente:** Autores.

En la **Tabla 38** se realizó un análisis de costos y se observa que los gastos de consumo presentan pequeñas variaciones, donde según el tipo de biomasa que se utilice representa un ahorro (cascarilla de café) o un incremento (cascarilla de arroz) teniendo como referencia el uso de gas natural.

## 9. CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un prototipo de cocina de gas que utiliza un gasificador para generar gas de síntesis a partir de los diferentes tipos de biomasa (cascarilla de arroz, cascarilla de café y residuos forestales); presentando gran potencial como alternativa de solución para las comunidades localizadas en zonas no interconectadas al sistema de distribución de gas natural.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
	Dimensiones	83 cm x 35 cm x 93 cm
	Potencia en el quemador	1,5 kW
	Tipo de Combustible	Cascarilla de café – Cascarilla de arroz
	Tiempo de producción de gas por carga	30 – 40 min (dependiendo del combustible)
	Consumo eléctrico	0,012 kWh

El comportamiento operativo del gasificador observado a través de las diferentes pruebas mostró:

- Respecto al perfil de temperatura en las diferentes zonas típicas del gasificador (secado, pirolisis, gasificación y combustión) se tiene una concordancia con lo observado en la literatura.

Zonas de reacción	Temperatura reportada por Basu [5]	Temperaturas obtenidas (reactor 8,5 cm diámetro – 60 cm alto)
Secado	100 – 120 °C	95°C
Pirolisis y gasificación	200 – 450 °C	500°C
Combustión	800 – 1200 °C	700°C

- Respecto al tipo de biomasa empleado se encontró que el tipo de residuos forestales usado es inviable en el proceso de gasificación, el tiempo de producción de gas representa en promedio un 40% respecto a la cascarilla de café y 45% respecto a la cascarilla de arroz. Además el reactor tiende a convertirse en una cámara de combustión cuando se usaban los residuos forestales.

	Cascarilla de café	Cascarilla de arroz	Residuos forestales
<b>Tiempo de producción de gas</b>	36 minutos 100 %	31 minutos 86 %	14 minutos 40 %
<b>Porcentaje de CO en el gas</b>	>4,5 %	>4,2 %	2,7 %

- Respecto de la composición del gas de síntesis producido, se hicieron pruebas empíricas que mostraban que el gas tiene componentes combustibles. la prueba de Cromatografía de Gases no arrojó los resultados esperados, esto se pudo presentar debido a diversos factores, ya sea en el momento de la toma de la muestra o a situaciones adversas a los autores; presentándose de esta manera un obstáculo para poder determinar experimentalmente la composición de los gases, sin embargo se realizó una prueba con un analizador de gases Testo 350 midiendo la concentración de monóxido de carbono presente en el gas la cual se comparó con la simulación de las reacciones termoquímicas involucradas en el proceso, y se establecieron porcentajes de concentración de gases combustibles de forma teórica, para una comparación o referencia bibliográfica.

Tipo de biomasa	Composición teórica en base volumétrica						Porcentaje de CO medido
	CH4	CO	CO2	H2	H2O	N2	
<b>Café</b>	4,95%	8,33%	21,82%	16,90%	1,54%	46,47%	>4,5%
<b>Arroz</b>	4,12%	8,07%	23,63%	23,68%	2,34%	38,15%	>4,2%
<b>Forestal</b>	5,05%	6,74%	21,91%	18,11%	1,88%	46,31%	2,7%

- Respecto a la geometría del reactor se pudo observar un rango apropiado de la relación L/D para una buena producción de gas relacionada con un tiempo de operación alto y un flujo continuo. Este rango se encuentra entre 4 y 7, correspondiente al reactor de 8,5 cm de diámetro y 60 cm de alto, y al reactor de 14 cm de diámetro y 60 cm de alto, respectivamente.

- Respecto al análisis de costos se pudo establecer que la utilización de una cocina de gas basada en la gasificación de biomasa representa un costo de adquisición más alto respecto a una cocina de gas convencional (413% de incremento), pero los costos de operación son más competitivos con respecto al uso de gas natural. Usando cascarilla de café se obtiene un ahorro mensual de 42% en el consumo de combustible. El ahorro incluso puede llegar al 100% ya que el costo de la biomasa puede llegar a ser nulo.

## 10. RECOMENDACIONES

Se recomienda experimentar con un mayor número de configuraciones geométricas del reactor que permitan obtener dimensiones óptimas para un requerimiento de potencia específico ya que por problemas de presupuesto se trabajó con un número reducido de prototipos.

Investigar sobre otros tipos de gasificación (downdraft o crossdraft) que permitan una producción de gas continua ya que el tipo de gasificador diseñado opera por lotes, buscando realizar un análisis comparativo entre características tales como operatividad, relación costo-beneficio y tamaño.

Los costos de adquisición del prototipo son 416% más altos que una cocina convencional, esto podría cambiar en futuras versiones del equipo en donde se haga un uso óptimo de los materiales analizando una posible producción en masa.

Se recomienda plantear un modelo teórico más completo para el análisis del gasificador que permita representar de manera verídica los procesos físico-químicos involucrados en todas las zonas de la gasificación, aprovechando las herramientas computacionales actuales como los software de CFD presentes en ANSYS®.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] ANDERSON, Paul S. REED, Thomas B. Biomass Gasification: Clean residential stoves, commercial power generation, and global impacts, Viña del Mar (Chile), Presented to the LAMNET Project International Workshop on “Bioenergy for a Sustainable Development”, 2004, 13 pg.
- [2] ANDERSON, Paul S. REED, Thomas B. Micro-Gasification: What it is and why it works, Goodfield (IL – USA), Biomass Energy Foundation, 2004, 13 pg.
- [3] ARGUELLO, Robiel I. SANCHEZ, Edgar A. Diseño y construcción de un silo secador de granos de café con la utilización de un quemador dual de combustible (Gas ACPM), Proyecto de grado en Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2005, 170 pg.
- [4] ARORA, K. C. SHINDE, Vikas V. Aspects of Materials Handling, New Delhi, LAXMI Publications LTD., 2007, 328 pg.
- [5] BASU, Prabir. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory, Burlington (MA – USA), Elsevier Inc., 2010, 364 pg.
- [6] BELL, David A. TOWLER, Brian F. FAN, Maohong. Coal Gasification and its applications, Burlington (MA – USA), Elsevier Inc., 2011, 410 pg.
- [7] BELONIO, Alexis T. Gas Stove Handbook, Iloilo City (Philippines), Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University, 2005, 155 pg.
- [8] BELONIO, Alexis T. Rice Husk Gas Stove Fabrication Manual, Iloilo City (Philippines), Appropriate Technology Center. Department of Agricultural Engineering and Environmental Management, College of Agriculture, Central Philippine University, 2009, 74 pg.
- [9] CENGEL, Yunus A. BOLES, Michael A. Termodinámica 6 Ed., México, McGraw Hill, 2009, 1048 pg.
- [10] DI BLASI, Colomba. Modeling chemical and physical processes of Wood and biomass pyrolysis, Napoli (Italy), Progress in Energy and Combustion Science 34, 2008, 44 pg.
- [11] ESCALANTE, Humberto. ORDUZ, Janneth y otros. Atlas del Potencial Energético de la Biomasa Residual en Colombia, Bogotá (Colombia), Ideam-UPME, 2009, 180 pg.

- [12] FAO Forestry Department. Wood gas as engine fuel, Rome (Italy), Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1984, 139 pg.
- [13] GARCIA, Luis E. Obtención de gas combustible a partir de la gasificación de biomasa en un reactor de lecho fijo, Bogotá (Colombia), Proyecto de grado Universidad Nacional de Colombia, 2011, 112 pg.
- [14] GONZALEZ, Nolberto. QUINTANILLA, Vladimir. Simulación de un sistema gasificador de bagazo de caña de azúcar conectado a un reactor WGS para la producción de hidrogeno, Bucaramanga (Colombia), proyecto de grado Universidad Industrial de Santander, 2008, 55 pg.
- [15] GUERRERO, Fernando. LLANO, Fernando. Gas Natural en Colombia, Cali (Colombia), Estudios gerenciales, abril-junio, número 087, Universidad ICESI, 2003, pg. 115-146.
- [16] KEMPEGOWDA, Rajesh. ASSABUMRUNGRAT, Suttichai. NAVADOL, Laosiripojana. Thermodynamic Analysis for Gasification of Thailand Rice Husk with Air, Steam and Mixed Air/Steam for Hydrogen-Rich Gas Production, Thailand, International Journal of Chemical Reactor Engineering, volume 8, 2010, 29 pg.
- [18] LINDFORS, Christian. Production of bio-oil from forest residue, Finland, VTT Technical Research Centre of Finland, 2009, 6 pg.
- [19] LIU, Ke. SONG, Chunshan. SUBRAMANI, Velu. Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies, Hoboken (NJ – USA), Jhon Wiley & Sons Inc., 2010, 564 pg.
- [20] MANDL, C. OBERNBERGER, I. BIEDERMANN, F. Modelling of an updraft fixed-bed gasifier operated with softwood pellets, Fuel Journal, volume 89, 2010, 12 pg.
- [21] ROWLAND, Sarah. Design and testing of a small-scale Updraft gasifier for gasification of Eastern redcedar, Master of Science Thesis, Oklahoma State University, 2010, 83 pg.
- [22] SERI, Solar Energy Research Institute. Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems, Golden (CO – USA), Solar Energy Research Institute, 1988, 148 pg.
- [23] SOUZA-SANTOS, Mario L. Solid Fuels Combustion and Gasification, Sao Paulo (Brasil), Marcel Dekker Inc., 2004, 462 pg.
- [24] VALVERDE, Agustín. SARRIA, Bienvenido. MONTEAGUDO, José. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la Cascarilla de arroz. Universidad Tecnológica de Pereira, Scientia et Technica año XIII, No. 37, 2007, 6 pg.

## **ANEXOS**

## ANEXO A – SOLUCION DEL SISTEMA DE ECUACIONES DEL PROCESO DE GASIFICACION.

Para dar solución al sistema de ecuaciones se utilizó el software EES (Engineering Equation Solver) que utiliza un método iterativo para resolver las ecuaciones. A continuación se presentan las ecuaciones utilizadas y que se explicaron en el capítulo 6.

### MODELAMIENTO DEL PROCESO DE GASIFICACION

#### Coefficientes de la biomasa

La biomasa se modela como:  $C-H_{a_h}-O_{a_o}-N_{a_n}$

$$a_h = \frac{w_h \cdot M_C}{w_c \cdot M_h}$$

$$a_o = \frac{w_o \cdot M_C}{w_c \cdot M_o}$$

$$a_n = \frac{w_n \cdot M_C}{w_c \cdot M_n}$$

#### Composicion de la cascarilla de arroz

$$w_c = 0,334 \quad \text{porcentaje de carbono}$$

$$w_h = 0,043 \quad \text{porcentaje de hidrógeno}$$

$$w_o = 0,385 \quad \text{porcentaje de oxígeno}$$

$$w_n = 0,0038 \quad \text{porcentaje de nitrogeno}$$

$$PCI_{bio} = 17644 \quad \text{Poder Calorífico Inferior en kJ/kg}$$

### Composición de la Cascarilla de Café

$$w_c = 0,503$$

$$w_h = 0,053$$

$$w_o = 0,438$$

$$w_n = 0,009$$

$$PCI_{bio} = 18334$$

### Poder Calorífico Inferior en kJ/kg

### Composición de los Residuos Forestales

$$w_c = 0,503$$

$$w_h = 0,06$$

$$w_o = 0,435$$

$$w_n = 0,001$$

$$PCI_{bio} = 14000$$

### Poder Calorífico Inferior en kJ/kg

### Pesos Moleculares de los compuestos

$$M_C = 12$$

$$M_h = 1$$

$$M_O = 16$$

$$M_N = 14$$

$$M_{air} = 28,9$$

$$M_{h_2o} = 18$$

$$M_{bio} = M_C + a_h \cdot M_h + a_O \cdot M_O + a_N \cdot M_N$$

$$M_{ch_4} = 16$$

$$M_{co_2} = 44$$

$$M_{co} = 28$$

$$M_{N_2} = 28$$

$$M_{H_2} = 2$$

### Contenido de humedad en la biomasa

$$w_{bio} = 0,094$$

Cantidad de humedad en los reactivos

Contenido de humedad en el aire

$$w_{\text{air}} = 0,622 \cdot \left[ \frac{\phi \cdot P_{\text{sat}}(\text{'Water'}; T=28)}{P_{\text{total}} - \phi \cdot P_{\text{sat}}(\text{'Water'}; T=28)} \right]$$

$$P_{\text{total}} = 100,14 \quad [\text{kPa}]$$

$$P_{\text{ref}} = 101,325 \quad [\text{kPa}]$$

$$\phi = 0,78$$

$$P_{\text{sat}}(\text{'Water'}; T=28) = P_2$$

humedad del aire en base molar

$$w_{\text{air,molar}} = 4,76 \cdot w_{\text{air}} \cdot \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{h}_2\text{o}}} \cdot C_{\text{est}} \cdot \text{ER}$$

humedad de la biomasa en base molar

$$w_{\text{bio,molar}} = w_{\text{bio}} \cdot \frac{M_{\text{bio}}}{M_{\text{h}_2\text{o}}}$$

humedad total

$$w_t = w_{\text{bio,molar}} + w_{\text{air,molar}}$$

### Calculo del aire estequiometrico

$$C_{est} = 1 + \frac{a_h}{4} - \frac{a_o}{2}$$

### Balance de masa para el carbono

$$1 = b_{ch_4} + b_{co_2} + b_{co}$$

### Balance de masa para el hidrogeno

$$a_h + 2 \cdot w_t = 2 \cdot b_{h_2} + 4 \cdot b_{ch_4} + 2 \cdot b_{h_2o}$$

### Balance de masa para el oxigeno

$$a_o + 2 \cdot C_{est} \cdot ER + w_t = 2 \cdot b_{co_2} + b_{co} + b_{h_2o}$$

### moles producidas

$$b_{total} = b_{ch_4} + b_{h_2} + b_{co_2} + b_{co} + b_{h_2o} + a_N + 3,76 \cdot C_{est} \cdot ER$$

## ECUACIONES DE EQUILIBRIO QUIMICO

### Reaccion WGS

$$k_{41} = \frac{b_{co_2} \cdot b_{h_2}}{b_{co} \cdot b_{h_2o}}$$

$$k_{41} = 0,0265 \cdot \exp \left[ \frac{3958}{T_{gas}} \right]$$

### Reaccion de gasificacion con agua

$$k_2 = \frac{b_{co} \cdot b_{h_2}}{b_{h_2o} \cdot b_{total}} \cdot \frac{P_{total}}{P_{ref}}$$

$$k_2 = 3,139 \times 10^{12} \cdot \exp \left[ \frac{-16344}{T_{gas}} \right]$$

temperatura del gas

$$T_{\text{gas,C}} = T_{\text{gas}} - 273 \quad \text{temperatura en grados Celsius}$$

#### FRACCIONES MOLARES Y MASICAS DEL GAS PRODUCIDO

$$x_{\text{ch4}} = \frac{b_{\text{ch4}}}{b_{\text{total}}}$$

$$x_{\text{h2}} = \frac{b_{\text{h2}}}{b_{\text{total}}}$$

$$x_{\text{co2}} = \frac{b_{\text{co2}}}{b_{\text{total}}}$$

$$x_{\text{co}} = \frac{b_{\text{co}}}{b_{\text{total}}}$$

$$x_{\text{h2o}} = \frac{b_{\text{h2o}}}{b_{\text{total}}}$$

$$x_{\text{n2}} = \frac{a_{\text{N}} + 3,76 \cdot C_{\text{est}} \cdot \text{ER}}{b_{\text{total}}}$$

Peso molecular del gas

$$M_{\text{g}} = x_{\text{ch4}} \cdot M_{\text{ch4}} + x_{\text{co}} \cdot M_{\text{co}} + x_{\text{co2}} \cdot M_{\text{co2}} + x_{\text{h2}} \cdot M_{\text{H2}} + x_{\text{h2o}} \cdot M_{\text{h2o}} + x_{\text{n2}} \cdot M_{\text{N2}}$$

$$y_{\text{ch4}} = x_{\text{ch4}} \cdot \frac{M_{\text{ch4}}}{M_{\text{g}}}$$

$$y_{\text{co}} = x_{\text{co}} \cdot \frac{M_{\text{co}}}{M_{\text{g}}}$$

$$y_{\text{co2}} = x_{\text{co2}} \cdot \frac{M_{\text{co2}}}{M_{\text{g}}}$$

$$y_{\text{h2}} = x_{\text{h2}} \cdot \frac{M_{\text{H2}}}{M_{\text{g}}}$$

$$y_{\text{h2o}} = x_{\text{h2o}} \cdot \frac{M_{\text{h2o}}}{M_{\text{g}}}$$

$$y_{\text{n2}} = x_{\text{n2}} \cdot \frac{M_{\text{N2}}}{M_{\text{g}}}$$

## ECUACIONES DE ENERGIA

Las siguientes ecuaciones se usan para determinar la temperatura de salida de los gases

Calculo del poder calorifico del gas (PCI)

los poderes calorificos estan en kJ/kg

$$PCI_{gas} = y_{ch4} \cdot PCI_{ch4} + y_{h2} \cdot PCI_{h2} + y_{co} \cdot PCI_{co}$$

$$PCI_{ch4} = \frac{890700}{M_{ch4}}$$

$$PCI_{h2} = 119960$$

$$PCI_{co} = 10112$$

potencia requerida en el gasificador [kW]

$$POT_{out} = 1,5$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{POT_{out}}{PCI_{gas}}$$

$$\dot{m}_{bio} = \frac{\dot{m}_{gas}}{1 + AC}$$

$$AC = 4,76 \cdot C_{est} \cdot ER \cdot \frac{M_{air}}{M_{bio}}$$

Balance final de energia

$$\dot{m}_{gas} \cdot \eta_{gas} = \eta_{gasif} \cdot \dot{m}_{bio} \cdot PCI_{bio}$$

$$\eta_{gasif} = 0,42$$

$$h_{gas} = y_{ch4} \cdot h_{ch4} + y_{co} \cdot h_{co} + y_{co2} \cdot h_{co2} + y_{h2} \cdot h_{h2} + y_{h2o} \cdot h_{h2o} + y_{n2} \cdot h_{n2}$$

$$h_{ch4} = hf_{ch4} + h_{sensible;ch4}$$

$$hf_{ch4} = \frac{74850}{M_{ch4}}$$

$$h_{sensible;ch4} = \frac{-3,0 \times 10^{-9} \cdot T_{gas} + 0,000003 \cdot T_{gas} + 0,0289 \cdot T_{gas} + 16,875 \cdot T_{gas} - 7643,9}{M_{ch4}}$$

$$h_{co} = hf_{co} + h_{sensible;co}$$

$$hf_{co} = \frac{110530}{M_{co}}$$

$$h_{sensible;co} = \frac{-1,0 \times 10^{-9} \cdot T_{gas} + 0,000004 \cdot T_{gas} - 0,0008 \cdot T_{gas} + 28,473 \cdot T_{gas} - 8503}{M_{co}}$$

$$h_{co2} = hf_{co2} + h_{sensible;co2}$$

$$hf_{co2} = \frac{393520}{M_{co2}}$$

$$h_{\text{sensible;co2}} = \frac{3,0 \times 10^{-9} \cdot T_{\text{gas}} - 0,00002 \cdot T_{\text{gas}} + 0,0331 \cdot T_{\text{gas}} + 21,232 \cdot T_{\text{gas}} - 8898,4}{M_{\text{co2}}}$$

$$h_{\text{h2}} = h_{f_{\text{h2}}} + h_{\text{sensible;h2}}$$

$$h_{f_{\text{h2}}} = 0$$

$$h_{\text{sensible;h2}} = \frac{1,0 \times 10^{-9} \cdot T_{\text{gas}} - 0,000002 \cdot T_{\text{gas}} + 0,0024 \cdot T_{\text{gas}} + 28,062 \cdot T_{\text{gas}} - 8528}{M_{\text{H2}}}$$

$$h_{\text{h2o}} = h_{f_{\text{h2o}}} + h_{\text{sensible;h2o}}$$

$$h_{f_{\text{h2o}}} = \frac{241820}{M_{\text{h2o}}}$$

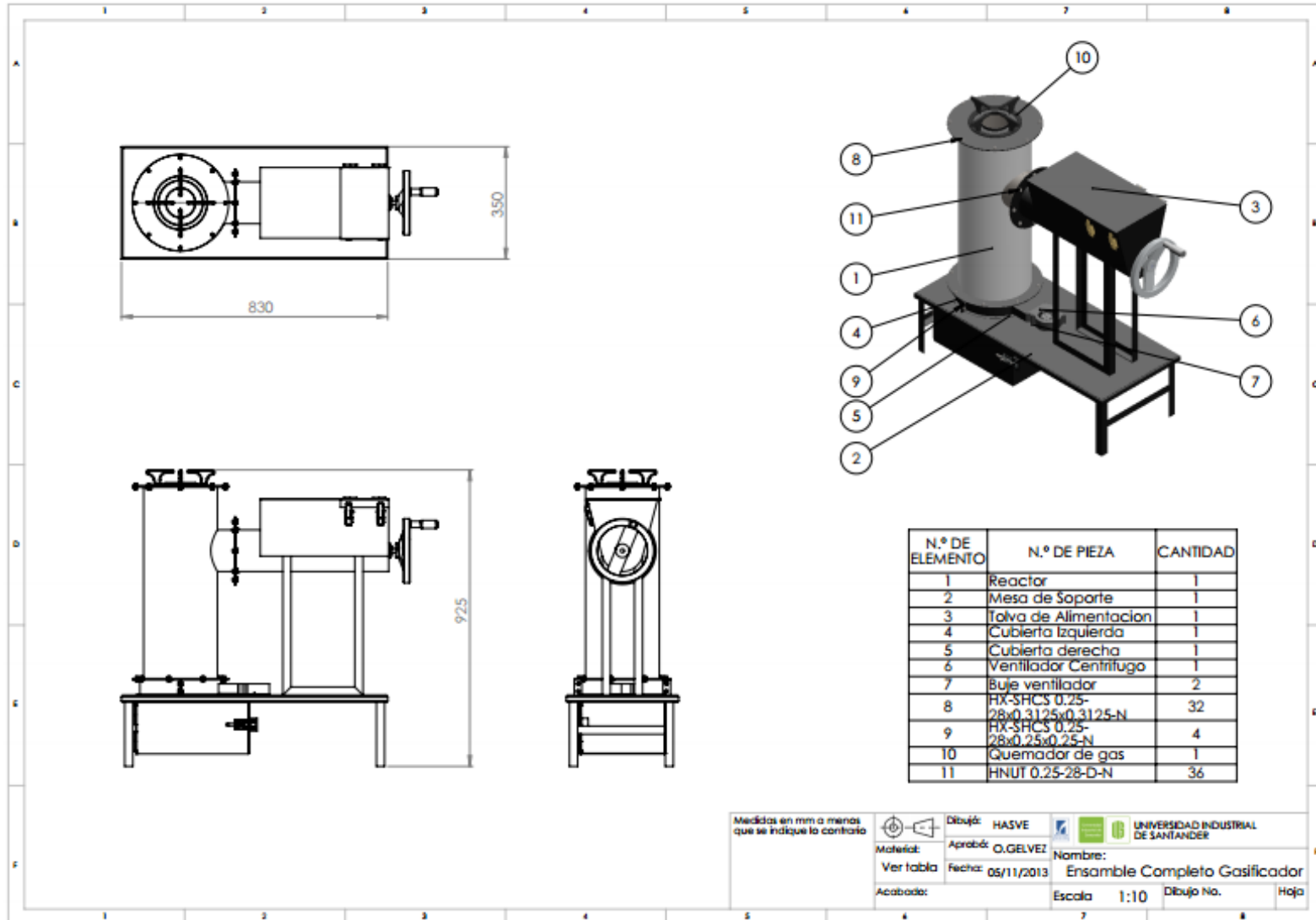
$$h_{\text{sensible;h2o}} = \frac{-7,0 \times 10^{-10} \cdot T_{\text{gas}} + 0,000003 \cdot T_{\text{gas}} + 0,0023 \cdot T_{\text{gas}} + 31,147 \cdot T_{\text{gas}} - 9538,7}{M_{\text{h2o}}}$$

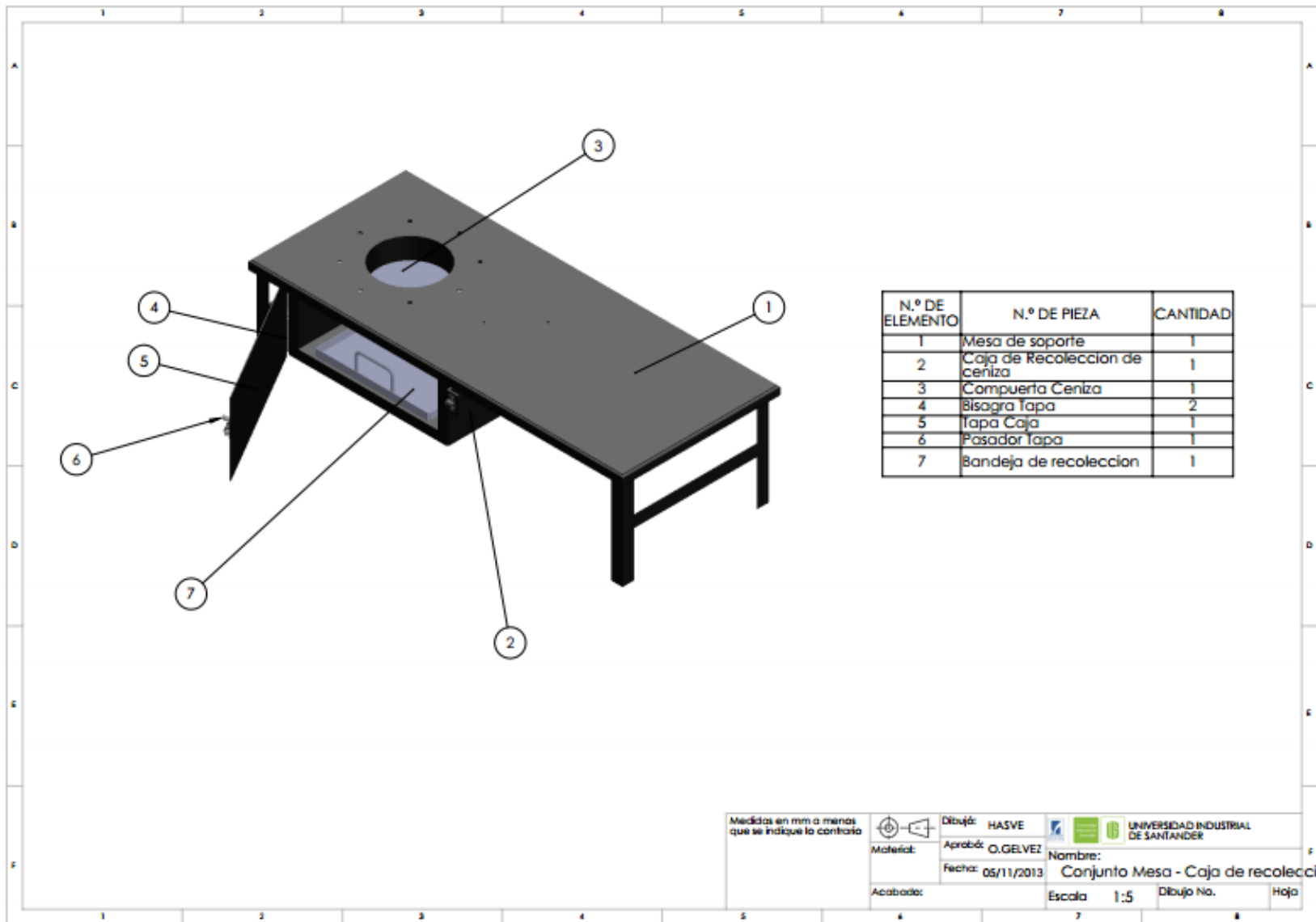
$$h_{\text{n2}} = h_{f_{\text{n2}}} + h_{\text{sensible;n2}}$$

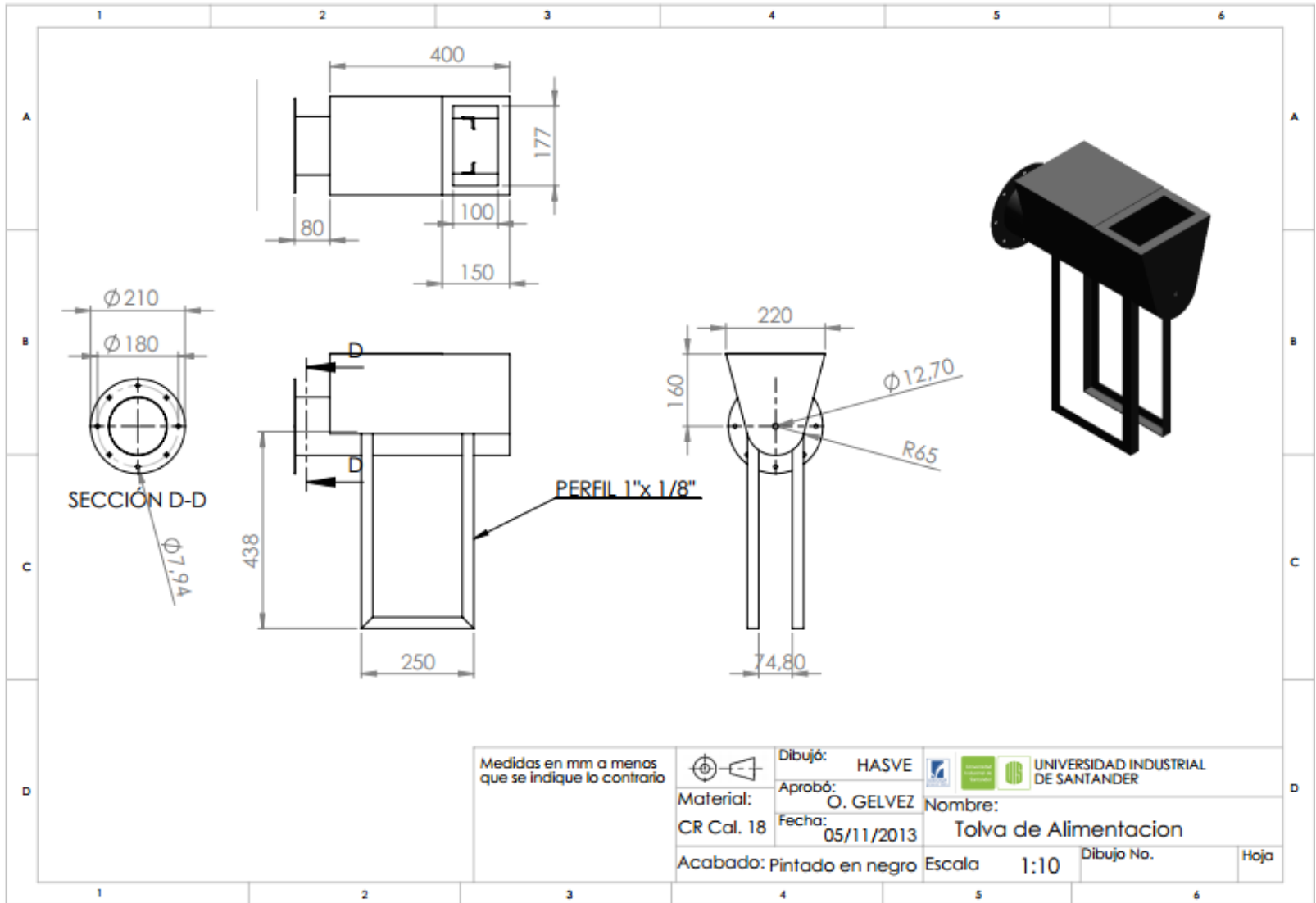
$$h_{f_{\text{n2}}} = 0$$

$$h_{\text{sensible;n2}} = \frac{2,0 \times 10^{-11} \cdot T_{\text{gas}} - 9,0 \times 10^{-7} \cdot T_{\text{gas}} + 0,0052 \cdot T_{\text{gas}} + 24,71 \cdot T_{\text{gas}} - 7644,6}{M_{\text{N2}}}$$

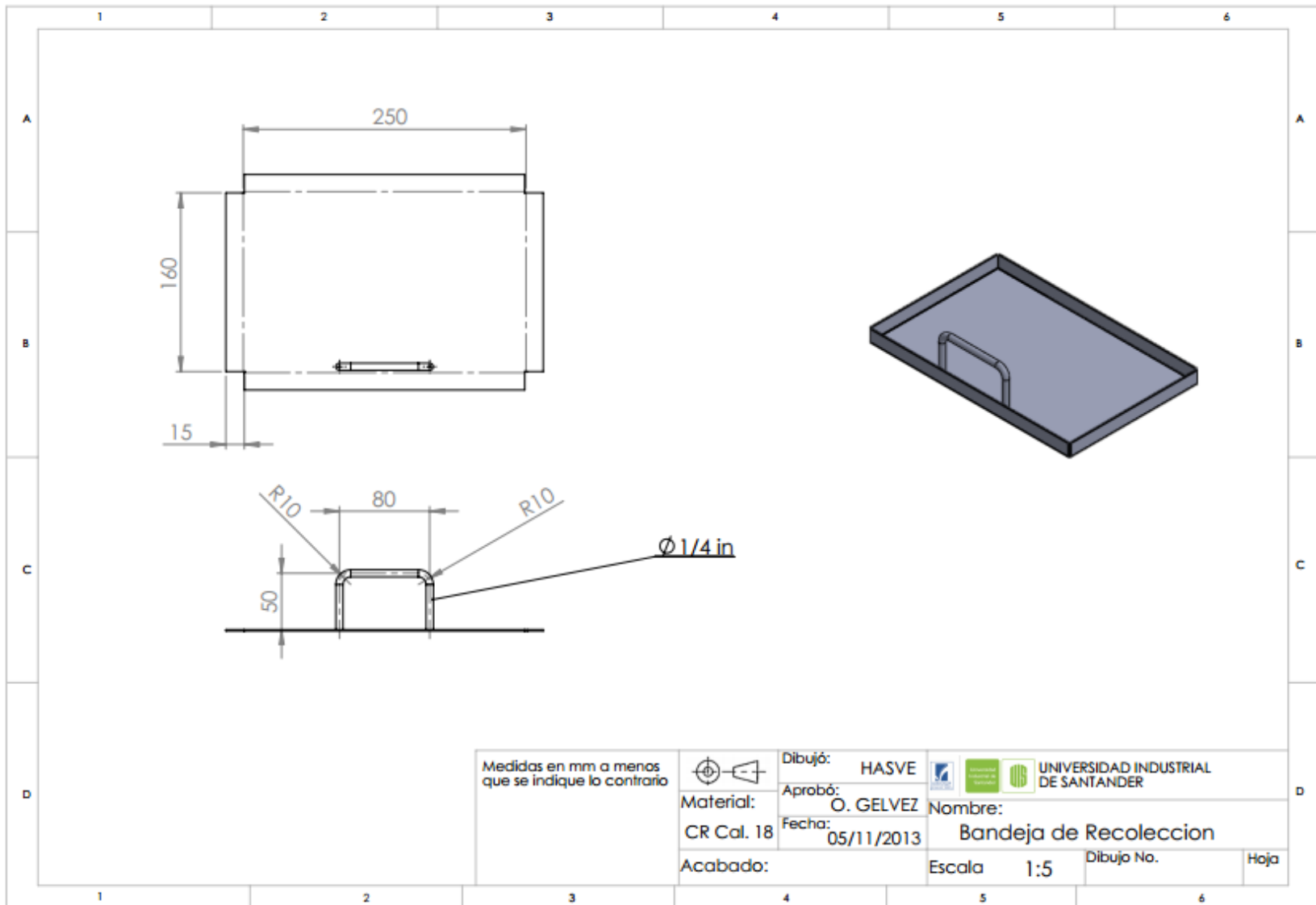
## ANEXO B – PLANOS DE LA ESTUFA BASADA EN LA GASIFICACION

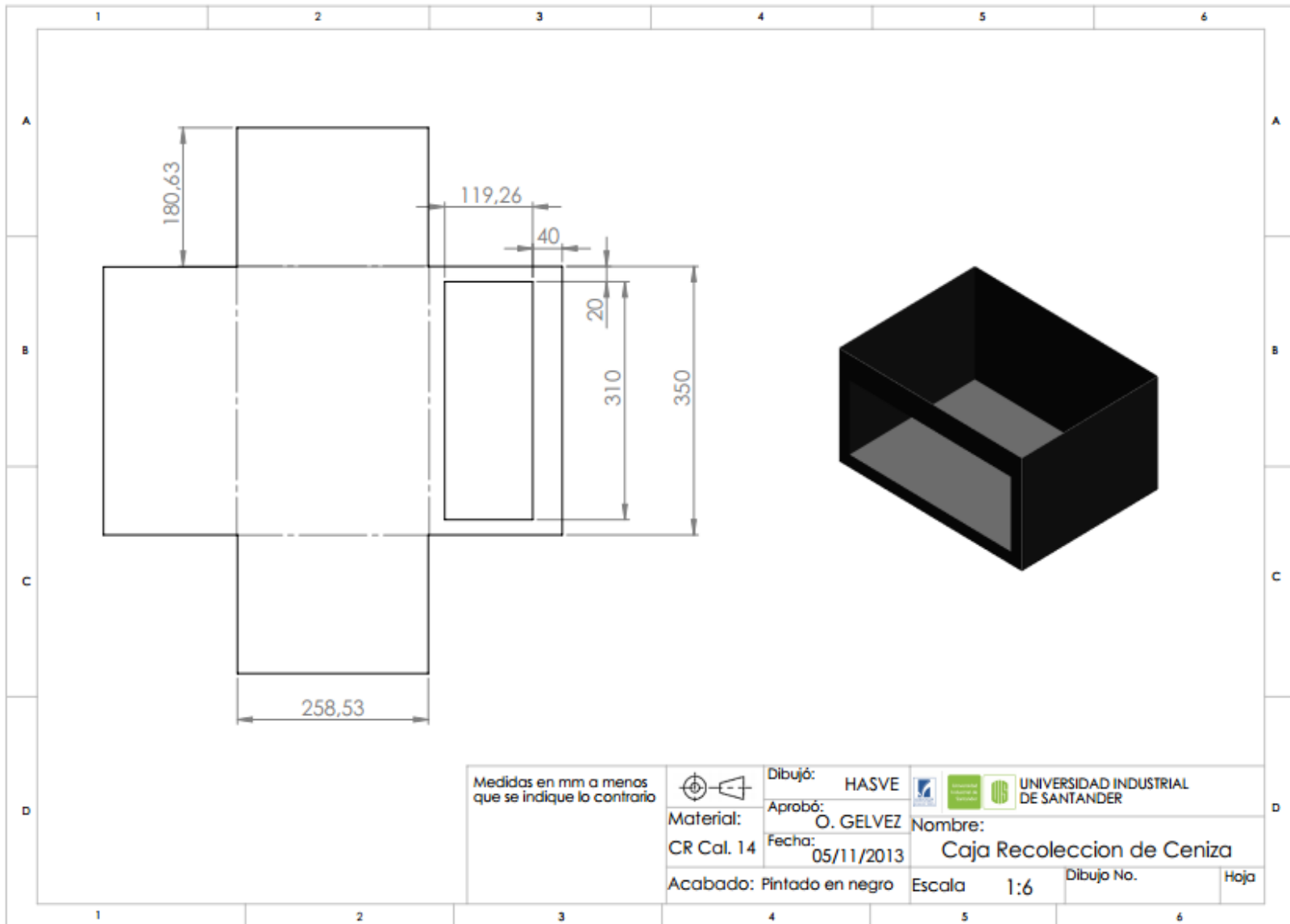


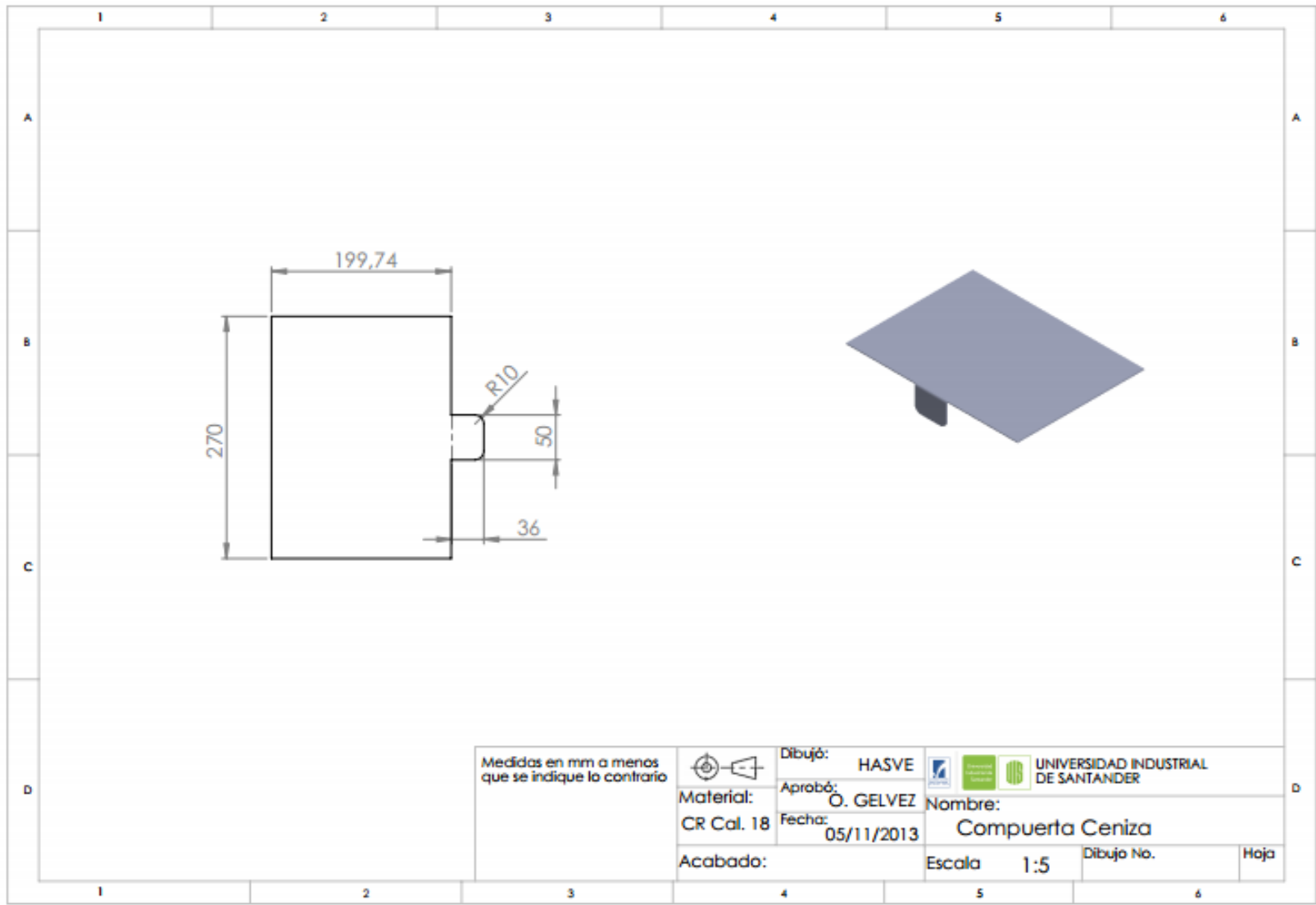




Medidas en mm a menos que se indique lo contrario		Dibujó: HASVE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	Material: CR Cal. 18	Aprobó: O. GELVEZ	Nombre: Tolva de Alimentación	
	Acabado: Pintado en negro	Fecha: 05/11/2013	Escala: 1:10	Dibujo No. Hoja







Medidas en mm a menos que se indique lo contrario



Material:  
CR Cal. 18

Acabado:

Dibujó: HASVE

Aprobó: O. GELVEZ

Fecha: 05/11/2013

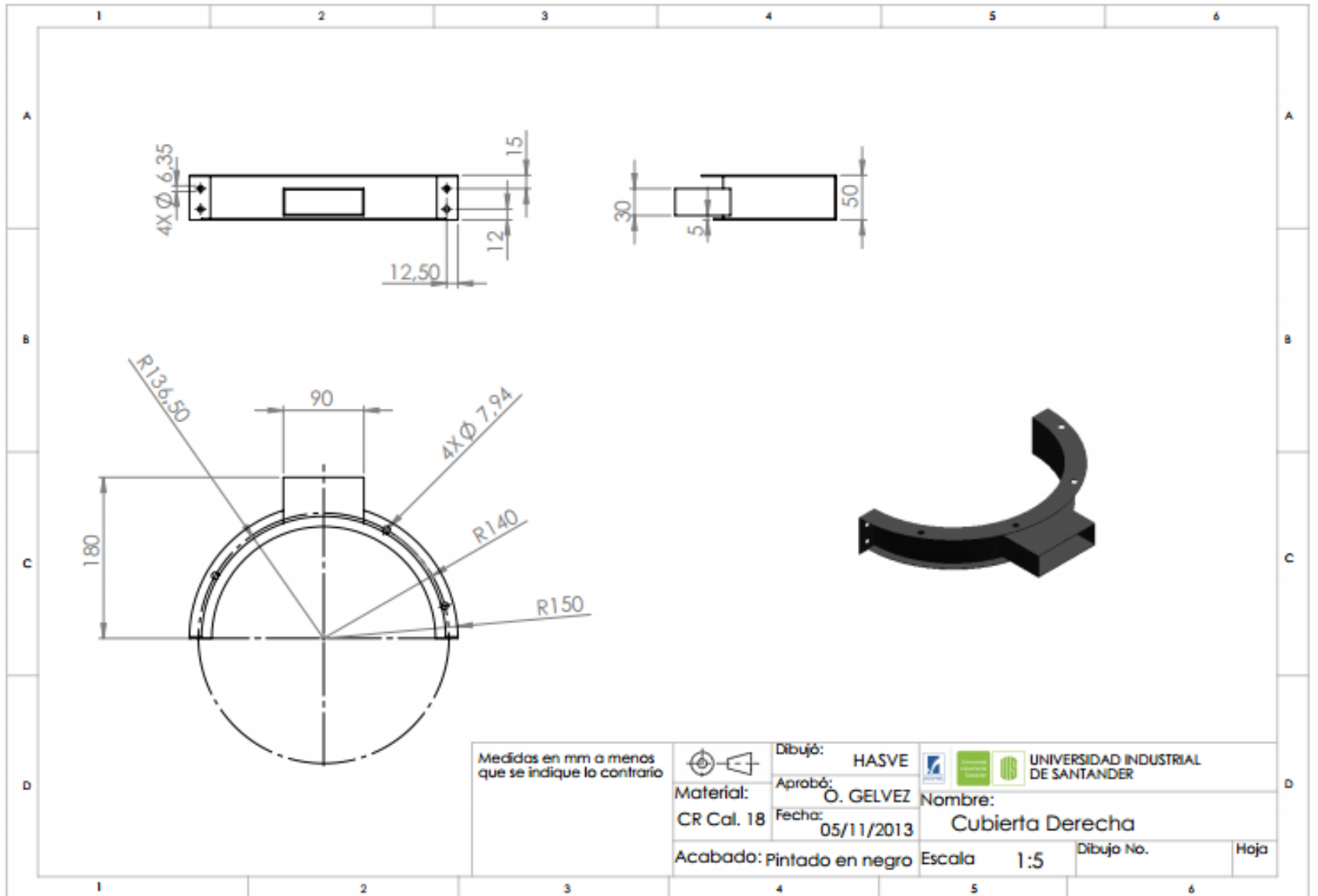
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

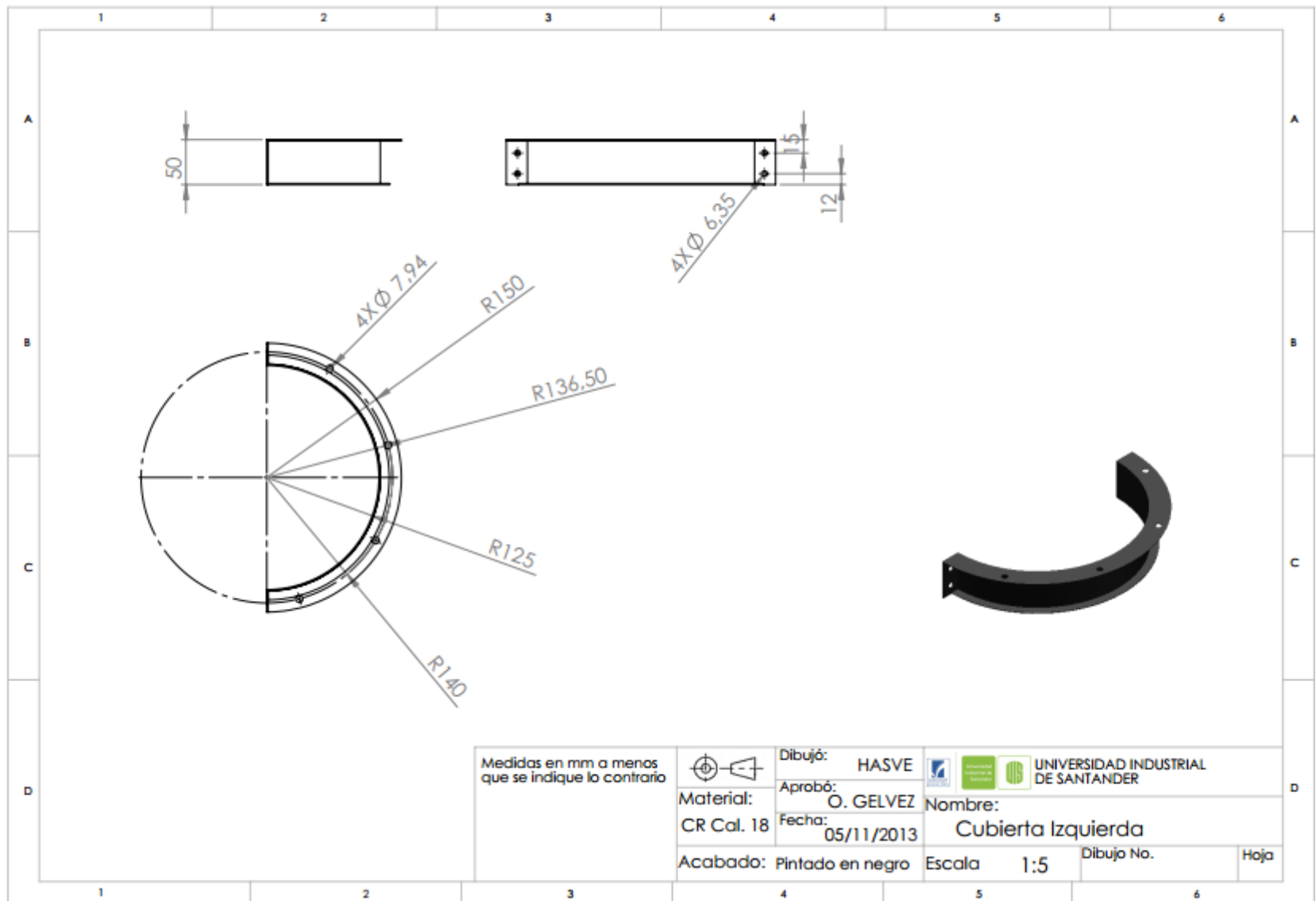
Nombre:  
Compuerta Ceniza

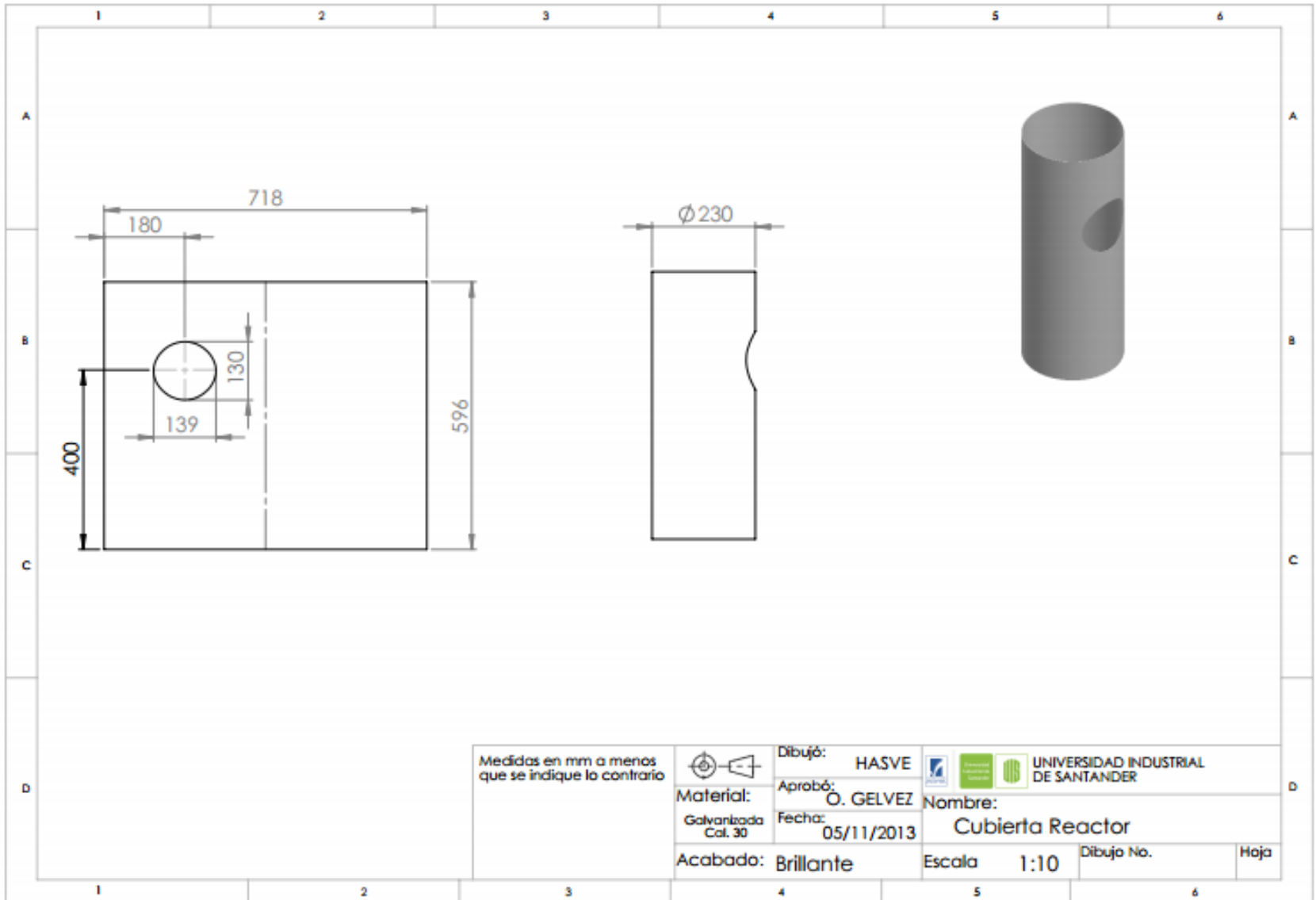
Escala 1:5

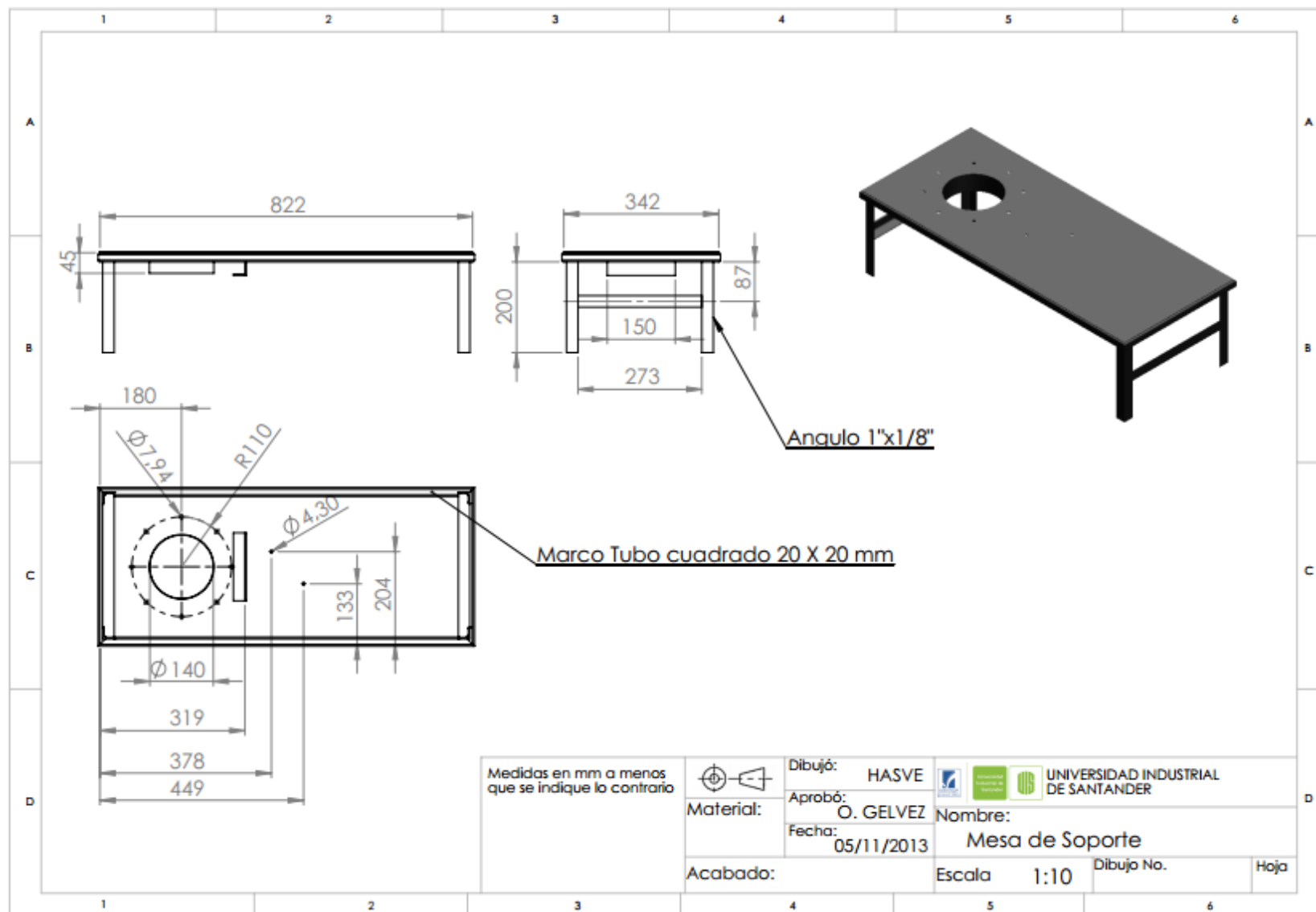
Dibujo No.

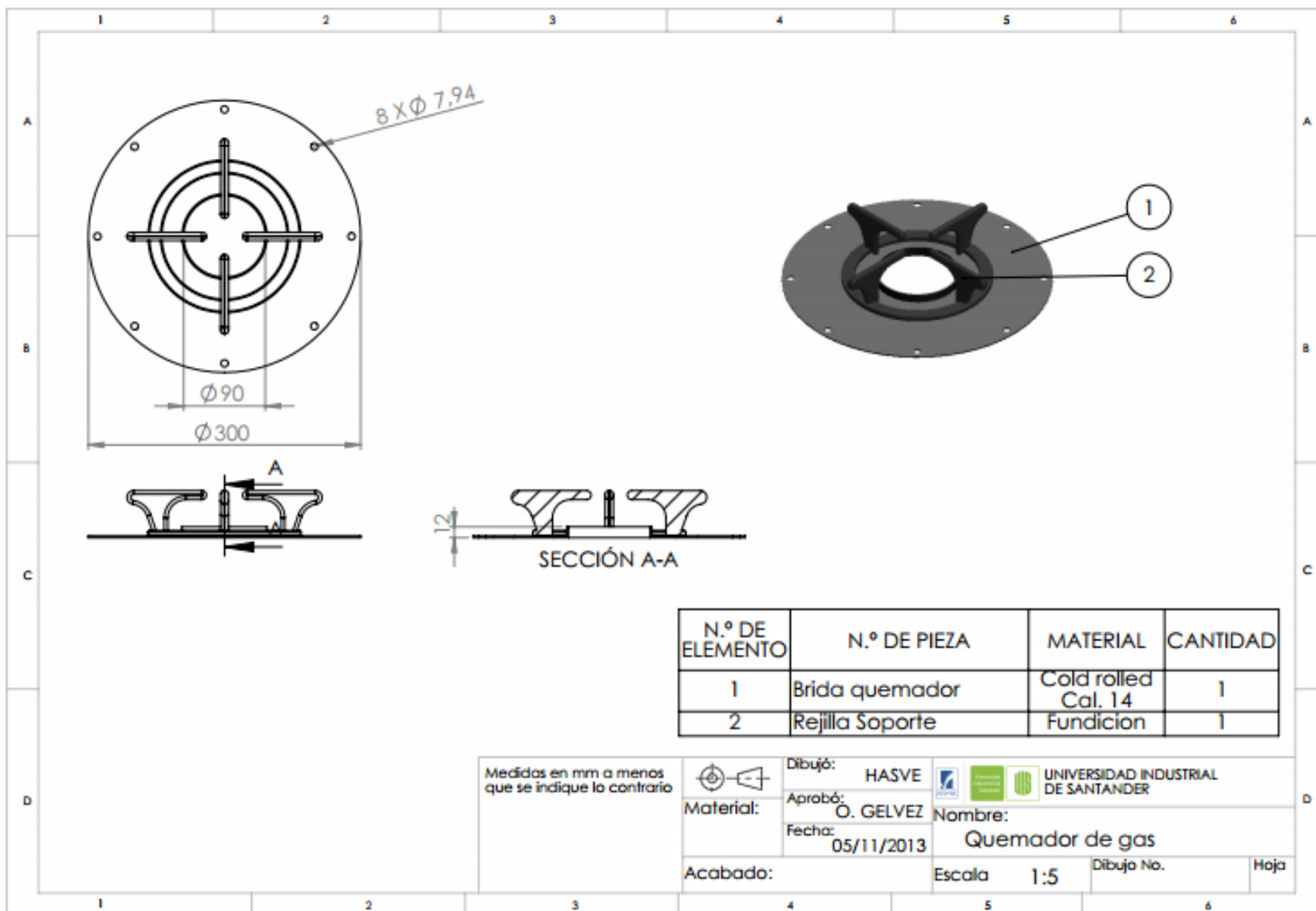
Hoja

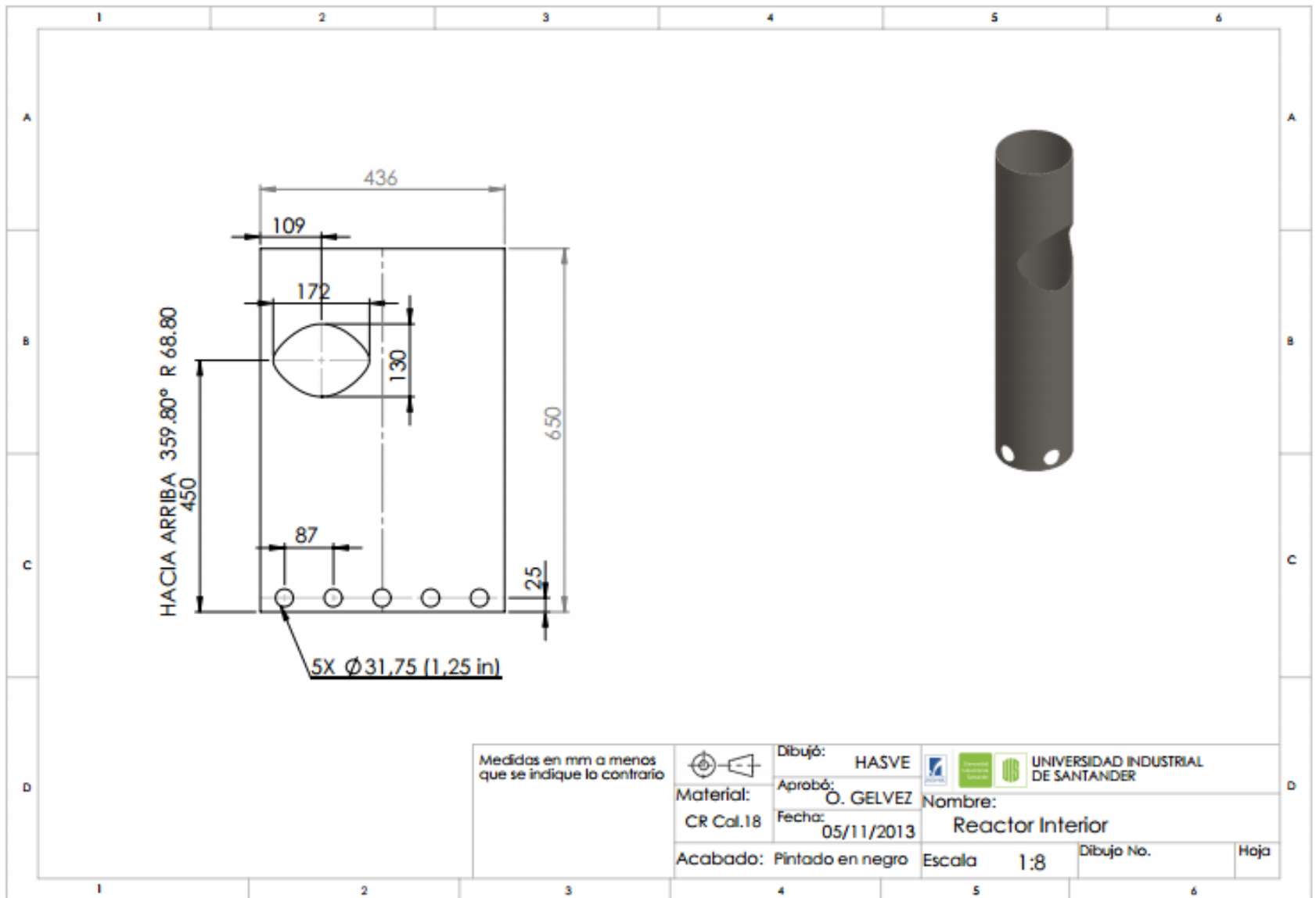


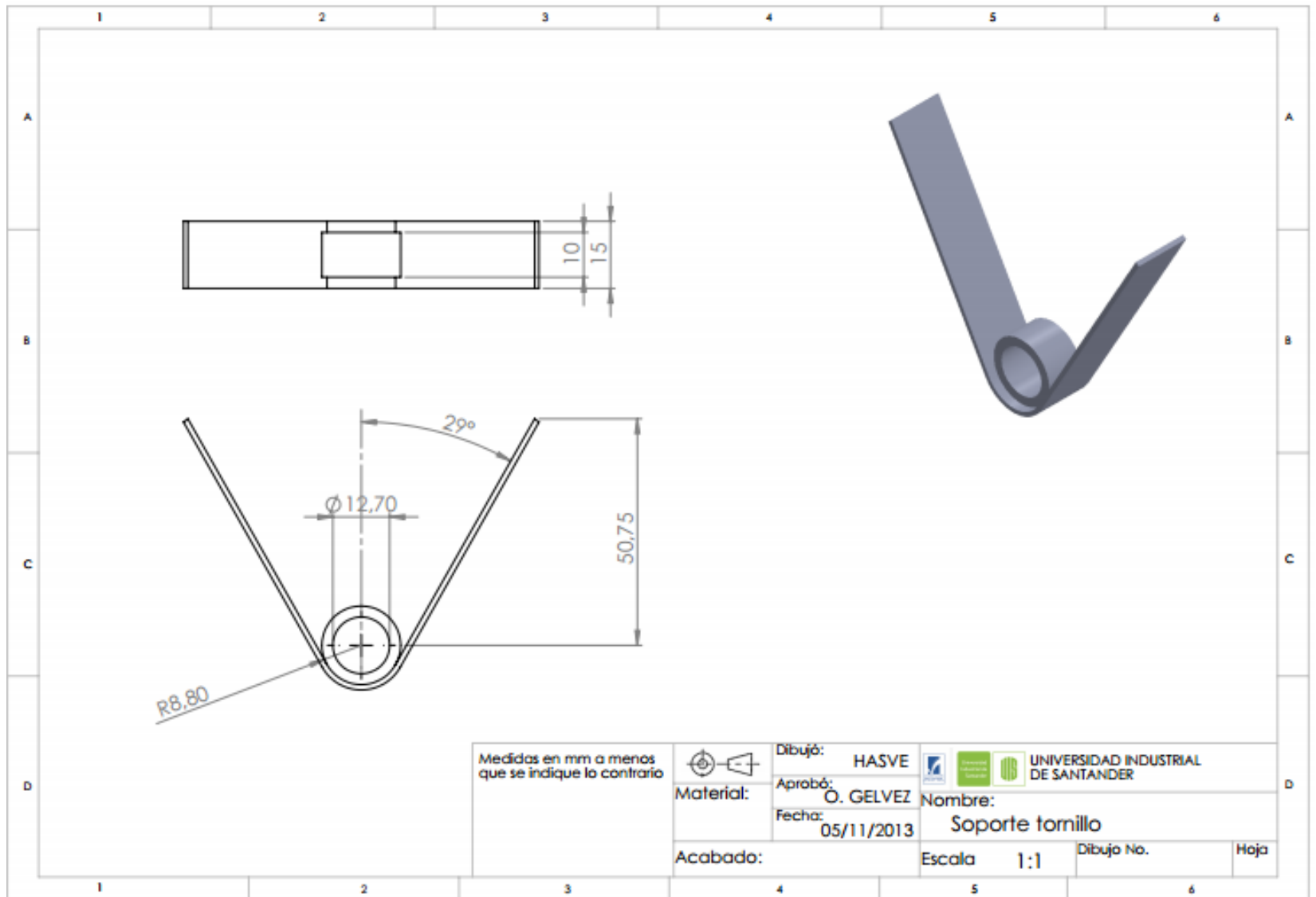


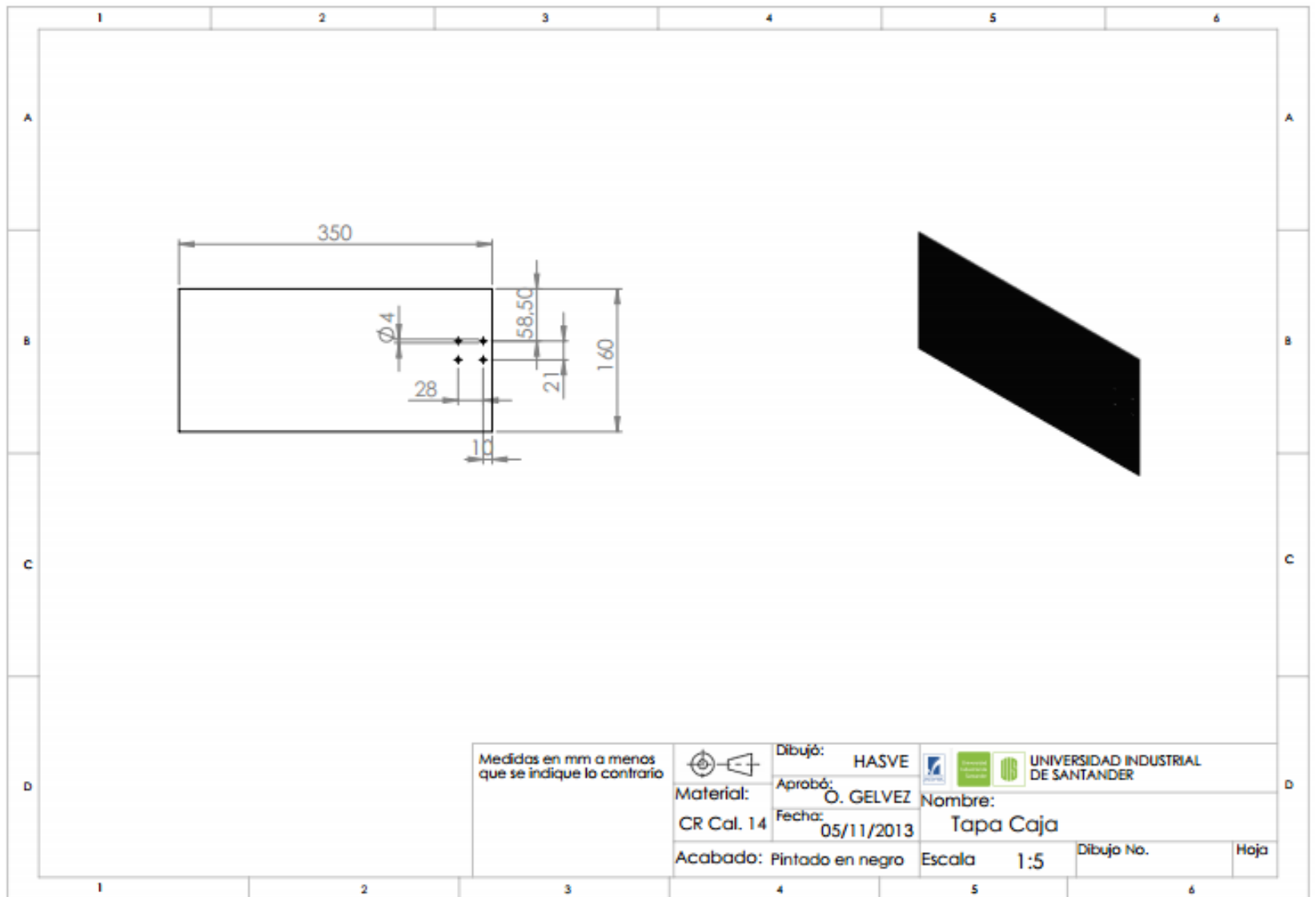


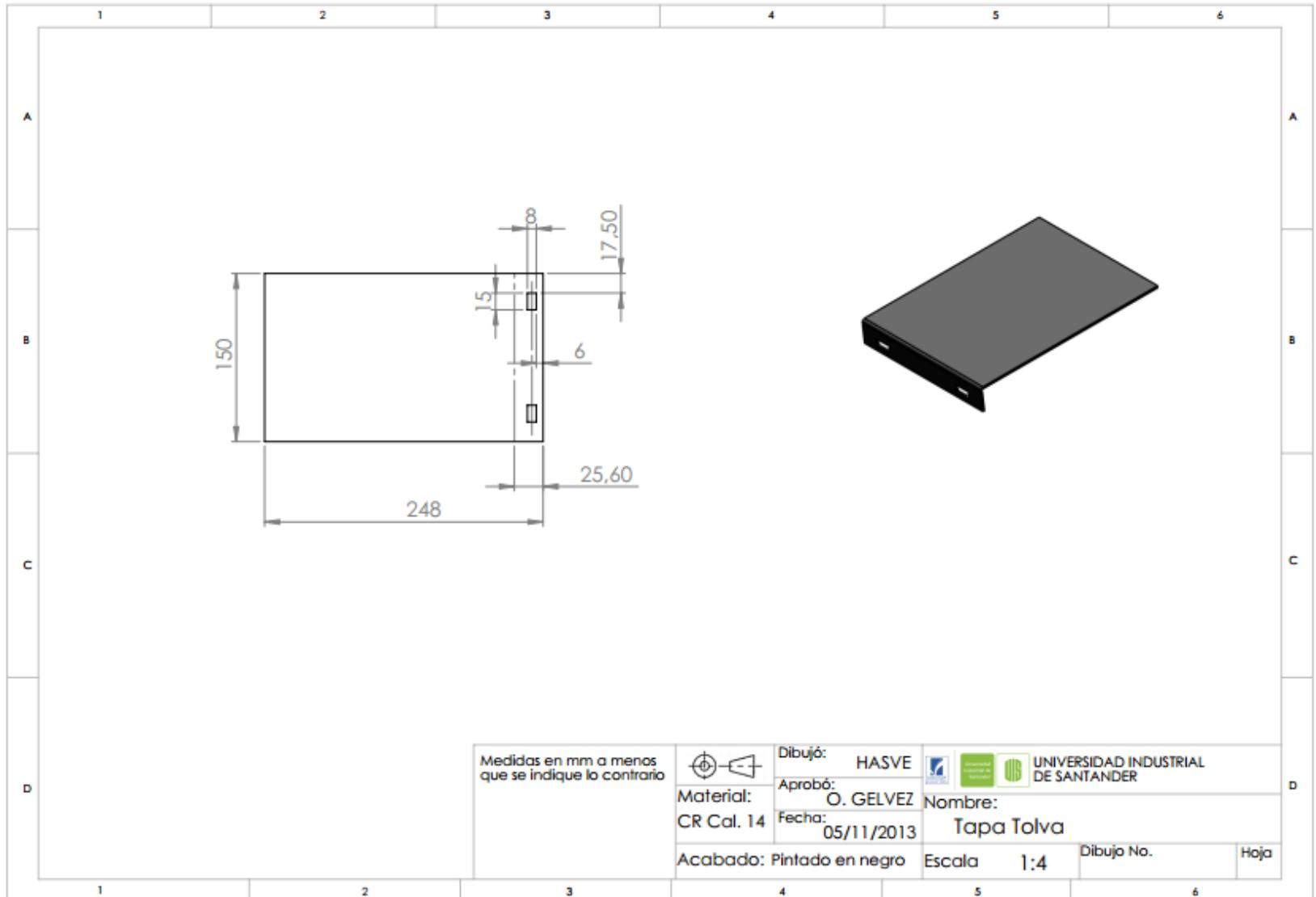












Medidas en mm a menos que se indique lo contrario		Dibujó: HASVE	UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
	Material: CR Cal. 14	Aprobó: O. GELVEZ	Nombre: Tapa Tolva	
		Fecha: 05/11/2013	Escala	1:4
	Acabado: Pintado en negro	Dibujo No.		Hoja

