

Tecnológico de Costa Rica  
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica



**Automatización y rediseño de un gasificador de biomasa forestal  
en la Escuela de Ingeniería Forestal para la producción de gas.**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica  
con el grado académico de Licenciatura

Manuel Andrés Castro Delgado

Cartago, 25 de enero, 2021



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional](#).

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Manuel Castro Delgado.

Manuel Andrés Castro Delgado  
Cartago, 18 de diciembre de 2020

Céd: 4-0229-0738

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
ACTA DE APROBACIÓN DEL INFORME FINAL**

El Profesor Asesor del presente trabajo final de graduación, indica que el documento presentado por el estudiante cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica, como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica, con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Manuel Andrés Castro Delgado

Proyecto: Automatización y rediseño de un gasificador de biomasa forestal en la Escuela de Ingeniería Forestal para la producción de gas.

**PAULA ELENA  
MONGE  
CHANTO  
(FIRMA)** Firmado digitalmente por  
PAULA ELENA  
MONGE CHANTO  
(FIRMA)  
Fecha: 2021.01.19  
16:12:04 -06'00'

---

Ing. Paula Elena Monge Chanto

Asesor

Cartago, 25 de enero 2021

**INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO DE GRADUACIÓN  
ACTA DE APROBACIÓN**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Jurado Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Estudiante: Manuel Andrés Castro Delgado

Proyecto: Automatización y rediseño de un gasificador de biomasa forestal en la Escuela de Ingeniería Forestal para la producción de gas.

**Miembros del Jurado**

CARLOS ADRIAN SALAZAR GARCIA  
Firmado digitalmente por CARLOS ADRIAN SALAZAR GARCIA  
Fecha: 2021.01.25 08:47:22 -06'00'

JAIME ALONSO MORA MELENDEZ (FIRMA)  
Digitally signed by JAIME ALONSO MORA MELENDEZ (FIRMA)  
Date: 2021.01.26 16:10:15 -06'00'

---

MSc. -Ing. Carlos Adrián Salazar García

---

MSc. -Ing. Jaime Mora Meléndez

Jurado 1

Jurado 2

ANA MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)  
Firmado digitalmente por ANA MARIA MURILLO MORGAN (FIRMA)  
Fecha: 2021.01.25 09:00:14 -06'00'

---

Ing. Ana María Murillo Morgan

Jurado 3

Los miembros de este Jurado dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Carrera de Ingeniería Mecatrónica.

Cartago, 25 de enero 2021

# Resumen

Se presenta la propuesta para el rediseño de un gasificador de biomasa de corriente descendente o *downdraft* con el objetivo de lograr una operación continua. La propuesta de solución se compone de un sistema de automatización que permite la visualización de variables de operación del gasificador (temperatura y presión) y control básico de actuadores; y de las adaptaciones mecánicas necesarias para aumentar la capacidad de almacenar combustible y para la colocación de los elementos del sistema de automatización.

**Palabras clave:** automatización, tiempo de operación, gasificador downdraft, visualización de variables

# Abstract

An approach for redesigning a downdraft biomass gasifier is presented in order to achieve continuous running. The approach consists of an automation system that allows the display of operation variables of the gasifier (temperature and pressure) and basic actuators control; and of the necessary mechanical modifications in order to increase the fuel storage capacity and for the placement of the elements of the automation system.

**Keywords:** automation, displaying variables, downdraft gasifier, running time

*A Dios, a papi y a mami*

# Agradecimientos

Extiendo un profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado y me han brindado su apoyo de una u otra forma a lo largo de la carrera. Agradezco de forma muy especial a mis padres por su soporte incondicional en todo momento, sin ellos esto no habría sido posible.

Agradezco también a mis amigos más cercanos Daniel Castro Sánchez, María Fenanda Hidalgo Alpizar y Carlos Matarrita Soto por su apoyo y compañía a lo largo de la mayor parte de mi proceso académico en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, institución a la cual le debo mi formación profesional y el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, doy las gracias al laboratorio ECOPLANT por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este proyecto de graduación.

Manuel Andrés Castro Delgado

Cartago, 29 de enero de 2021



# Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Lista de símbolos y abreviaciones	vii
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Entorno del proyecto . . . . .	1
1.2 Definición del problema . . . . .	2
1.2.1 Generalidades . . . . .	2
1.2.2 Síntesis del problema . . . . .	3
1.3 Objetivos . . . . .	4
1.3.1 General . . . . .	4
1.3.2 Específicos . . . . .	4
1.4 Estructura del documento . . . . .	4
<b>2 Marco teórico</b>	<b>5</b>
2.1 Estado del arte . . . . .	5
2.2 Gasificación de biomasa . . . . .	6
2.2.1 Etapas del proceso de gasificación . . . . .	7
2.2.2 Productos y aplicaciones . . . . .	11
2.3 Características de los reactores de gasificación . . . . .	13
2.3.1 Clasificación . . . . .	14
2.3.2 Instrumentación y control . . . . .	18
2.4 Diseño de tanques de almacenamiento . . . . .	20
2.4.1 Dimensiones . . . . .	20
2.4.2 Soldaduras . . . . .	21
2.4.3 Boquillas . . . . .	22
2.5 Diseño actual del gasificador a intervenir . . . . .	22
2.5.1 Reactor . . . . .	24
2.5.2 Intercambiador de calor . . . . .	26
2.5.3 Acondicionamiento del gas . . . . .	26
<b>3 Marco metodológico</b>	<b>30</b>
3.1 Identificación de necesidades y requerimientos . . . . .	30

3.2	Descomposición funcional . . . . .	31
3.3	Generación de conceptos . . . . .	32
3.3.1	Aumento de capacidad . . . . .	33
3.3.2	Sistema de mediciones . . . . .	37
3.3.3	Sistema de control . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Mejoras incrementales a un gasificador de biomasa</b>	<b>39</b>
4.1	Identificación de necesidades y requerimientos . . . . .	40
4.2	Aumento de capacidad . . . . .	40
4.3	Sistema de medición . . . . .	45
4.3.1	Sensores de temperatura . . . . .	45
4.3.2	Medición de gases y flujo . . . . .	47
4.4	Sistema de control . . . . .	47
4.4.1	Controlador . . . . .	48
4.4.2	Producción de gas . . . . .	49
4.5	Adaptaciones mecánicas . . . . .	51
4.5.1	Adaptaciones para el sistema de automatización . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Resultados y análisis</b>	<b>56</b>
5.1	Aumento de capacidad . . . . .	56
5.2	Automatización . . . . .	58
5.2.1	Programa de automatización . . . . .	58
5.2.2	Panel de control . . . . .	60
5.3	Análisis económico . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>67</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	67
6.2	Recomendaciones . . . . .	67
	<b>Bibliografía</b>	<b>69</b>
<b>A</b>	<b>Diagnóstico</b>	<b>73</b>
A.1	Suministro de combustible . . . . .	73
A.2	Gasificación . . . . .	74
<b>B</b>	<b>Dimensiones de las boquillas</b>	<b>76</b>
<b>C</b>	<b>Simulaciones del depósito adicional de combustible</b>	<b>77</b>
<b>D</b>	<b>Hoja de datos del acero A36</b>	<b>80</b>
<b>E</b>	<b>Programa de automatización</b>	<b>82</b>
<b>F</b>	<b>Planos mecánicos</b>	<b>85</b>

# Índice de figuras

2.1	Etapas de la gasificación . . . . .	8
2.2	Productos de la gasificación . . . . .	11
2.3	Aplicaciones del gas de síntesis . . . . .	13
2.4	Clasificación de gasificadores . . . . .	14
2.5	Gasificador <i>crossdraft</i> . . . . .	16
2.6	Gasificador <i>updraft</i> . . . . .	16
2.7	Gasificador <i>downdraft</i> . . . . .	17
2.8	Soldadura por retroceso . . . . .	22
2.9	Boquillas roscadas . . . . .	23
2.10	Acople de boquillas . . . . .	23
2.11	Reactor de gasificación . . . . .	25
2.12	Intercambiador de calor . . . . .	27
2.13	Sistema de enfriamiento . . . . .	28
2.14	Filtro . . . . .	28
2.15	Ensamblaje del diseño original . . . . .	29
3.1	Metodología de trabajo . . . . .	30
3.2	Descomposición funcional del producto. . . . .	31
3.3	Conceptos para aumento de capacidad . . . . .	34
3.4	Tolva con tornillo sin fin . . . . .	35
3.5	Tolva con transportador neumático . . . . .	36
3.6	Tolva con transportador de cadena . . . . .	36
4.1	Ilustración del aumento de capacidad . . . . .	44
4.2	Ilustración del LOGO! . . . . .	50
4.3	Producción de gas . . . . .	51
4.4	Boquilla del termopozo . . . . .	53
4.5	Panel de control . . . . .	54
4.6	Representación del diseño final . . . . .	54
4.7	Representación del diseño original . . . . .	55
5.1	Esfuerzos en el panel de control . . . . .	62
5.2	Gasificador comercial RonSun . . . . .	65
5.3	Gasificador comercial Rotex Master . . . . .	65
5.4	Análisis económico . . . . .	66

B.1 Dimensiones para cuellos de boquillas. . . . .	76
C.1 Simulación del depósito . . . . .	77
C.2 Simulación del depósito . . . . .	78
C.3 Simulación del depósito . . . . .	78
C.4 Simulación del depósito . . . . .	79

# Índice de tablas

2.1	Comparación de gasificadores de lecho fijo . . . . .	18
2.2	Temperaturas en un gasificador <i>downdraft</i> . . . . .	19
4.1	Requerimientos iniciales . . . . .	40
4.2	Requerimientos del subsistema de aumento de capacidad . . . . .	40
4.3	Evaluación de conceptos para aumento de capacidad . . . . .	42
4.4	Evaluación de materiales para depósito adicional . . . . .	44
4.5	Especificaciones modificadas . . . . .	45
4.6	Evaluación de conceptos para medición de temperatura. . . . .	45
4.7	Selección de termopozo . . . . .	46
4.8	Selección de estándar de salida para termopares . . . . .	47
4.9	Selección de la unidad de control . . . . .	49
4.10	Selección de alternativa comercial de controlador . . . . .	49
4.11	Especificaciones del termopozo . . . . .	52
4.12	Dimensiones base para el diseño del panel de control. [Elaboración propia].	53
5.1	Niveles para factores de influencia para simulación de esfuerzos . . . . .	56
5.2	Esfuerzos en tanque de almacenamiento . . . . .	57
5.3	Experimentos para validación de automatización . . . . .	59
5.4	Resultados de validación de automatización . . . . .	61
5.5	Desglose de costos del proyecto. [Elaboración propia]. . . . .	63
A.1	Condiciones para aproximación de la autonomía . . . . .	73



# Lista de símbolos y abreviaciones

## Abreviaciones

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales
BPVC	Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME
CIF	Centro de Investigación en Innovación Forestal
CIP	Clasificación Internacional de Patentes
ECOPLANT	Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas
ER	Radio de equivalencia
HMI	Interfaz máquina-humano
NPT	National Pipe Thread
PLC	Controlador lógico programable
RTD	Resistencia dependiente de temperatura
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos)
SEAS	Escuela para el Ambiente y la Sostenibilidad
TDL	Diodo láser sintonizable
TEC	Instituto Tecnológico de Costa Rica
UTN	Universidad Técnica Nacional
VAN	Valor actual neto



# Capítulo 1

## Introducción

En este capítulo se pretende introducir al lector los principales aspectos de interés que debe conocer para tener una comprensión más profunda del contexto del proyecto. Se aborda el entorno en el que se desarrolla el proyecto, así como el detalle del problema que se pretende resolver y sus implicaciones dentro de la organización.

### 1.1 Entorno del proyecto

La Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica cuenta con un laboratorio de investigación llamado Laboratorio de Ecofisiología Forestal y Aplicaciones Ecosistémicas, conocido como ECOPLANT. Este forma parte del Centro de Investigación en Innovación Forestal (CIF). ECOPLANT se desempeña principalmente en cuatro líneas de acción [1]:

1. Fisiología e hidráulica forestal.
2. Cambio climático en regiones boscosas y ecosistemas.
3. Energía de bajas emisiones de carbono.
4. Tecnologías de vanguardia.

A través de las diferentes áreas en que se dirige la investigación de ECOPLANT se busca el entendimiento, optimización y análisis del desarrollo de especies forestales, con el objetivo de entender su aplicabilidad en procesos de reforestación y conservación mediante la integración de modelos de manejo y aprovechamiento de los recursos forestales. El actual proyecto se enmarca dentro de la línea de acción correspondiente a las energías con bajas emisiones de carbono.

Algunos de los proyectos de investigación que se realizan en ECOPLANT surgen como resultado de alianzas de cooperación con diferentes universidades e instituciones nacionales

e internacionales, tales como la Universidad Técnica Munich (Alemania), Universidad de Gotingen (Alemania), Universidad de MontPiere (Francia), la Agencia Espacial Alemana, la Universidad de Stanford (EE. UU.) y la Universidad de Michigan (EE. UU.), como es el caso de este proyecto.

El problema que se pretende resolver surge a partir de un proyecto que se realiza en colaboración internacional entre la Escuela de Ingeniería Forestal del TEC, la Escuela para el Ambiente y la Sostenibilidad (SEAS, por sus siglas en inglés) de la Universidad de Michigan y la Universidad Técnica Nacional (UTN), el cual tiene como objetivo principal la generación de conocimiento en lo que se refiere al área de generación de energía a partir de biomasa agroforestal. Para dicho proyecto requieren de un gasificador de biomasa de tipo *downdraft*. Cuentan con un diseño previo, sin embargo, este tiene un tiempo de operación corto según lo que requiere el laboratorio. Por esta razón, se solicita incrementar el tiempo de operación del diseño del gasificador.

En cuanto a los beneficios que trae la implementación de la mejora mencionada, se encuentra principalmente la autonomía del equipo. Es decir, se obtiene un funcionamiento con un requerimiento menor de intervención por parte del usuario. Esto permite un mayor aprovechamiento del tiempo, para desarrollar actividades paralelas a la operación del gasificador. Además, esto reduce la frecuencia del riesgo en el que incurre el operario cada vez que se requiere el rellenado de combustible.

## 1.2 Definición del problema

### 1.2.1 Generalidades

La demanda energética en el país es alta y está en aumento. Según [2], las proyecciones del Instituto Costarricense de Electricidad indican que el consumo eléctrico en Costa Rica pasará de 750 kWh por habitante a cerca de 900 kWh en 2030, lo que supone un aumento importante en la demanda. A pesar de que en Costa Rica la forma de abastecimiento energético se basa mayoritariamente en el desarrollo de proyectos de energía limpia como los hidroeléctricos y los geotérmicos, [3] afirma que continuar desarrollando este tipo de proyectos traería una serie de impactos ambientales y la oposición de las comunidades, como ya ha ocurrido en el caso del Proyecto Hidroeléctrico El Diquís. Para la solución de esta situación se requiere del desarrollo de alternativas de energías limpias que no conlleven un elevado impacto ambiental durante su implementación, como sí lo hacen los proyectos hidroeléctricos.

Por otra parte, según [4] la política energética en Costa Rica debe ir orientada a la producción sostenible de energía con un bajo nivel de emisiones de gases de efecto invernadero. Para el cumplimiento de este objetivo se requiere, entre otras acciones, el uso de fuentes de energía limpias y renovables y que permitan abastecer los aumentos en la demanda energética. Dentro de este conjunto de fuentes de energía se encuentra la conversión por

diferentes medios de la energía contenida en la materia agroforestal, dentro de los que se encuentra la gasificación.

El proceso de producción de energía por medio de la gasificación de biomasa requiere de un equipo especializado, ya que la calidad y las características del producto obtenido dependen, entre otras variables, de la temperatura dentro del reactor, así como del diseño de este. Según [5] la composición del gas puede variar en función de las pérdidas de calor a través de convección y radiación, la temperatura de salida del gas y del contenido de humedad de la materia prima. Además, variables como la diferencia de temperatura entre el gas a la entrada del reactor y el combustible o materia prima entrando al gasificador afectan la eficiencia térmica del proceso de gasificación. Esto hace que sea necesario medir y controlar las variables que influyen mayoritariamente en la calidad de gas producido.

Uno de los principales residuos sólidos del proceso de gasificación es la ceniza. En comparación con la gasificación de otros combustibles como el carbón, la ceniza resultante de la gasificación de biomasa agroforestal tiene en general una temperatura de fusión menor [6], por lo que usualmente se presentan problemas por la formación de escoria y el taponamiento del gasificador. Las características de los residuos como el alquitrán y la ceniza producto de la gasificación son influenciadas por la temperatura en el reactor, el tiempo de residencia y el radio de equivalencia [7, 8]. De esta forma, la temperatura tiene un efecto positivo en el proceso de producción del gas ya que con el aumento de la temperatura se reduce la producción de residuos.

ECOPLANT, en conjunto con SEAS, ha seleccionado un diseño existente previamente para la construcción de un gasificador de corriente descendente. Sin embargo, este diseño carece de características que le permitan una producción continua de biogás. El diseño existente no tiene sistemas de monitoreo de las variables como las diferentes temperaturas, caídas de presión y flujo del agente oxidante. Sumado al desconocimiento de variables y parámetros de operación, se sabe por una implementación previa de este diseño que se produce una saturación constante de residuos sólidos, siendo necesario realizar operaciones de limpieza frecuentemente.

### 1.2.2 Síntesis del problema

Se requiere adaptar el diseño propuesto por ECOPLANT para que el dispositivo sea capaz de operar de forma continua durante un tiempo determinado, mayor al que podría alcanzar actualmente.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 General

Adaptar el diseño de un gasificador de biomasa forestal propuesto por ECOPLANT para extender su tiempo de operación continua.

### 1.3.2 Específicos

1. Determinar el tiempo de operación continua que se podría lograr con base en el diagnóstico del diseño original propuesto, así como el tiempo que podría extenderse la operación sin salirse de los requerimientos del usuario.
2. Diseñar un sistema de automatización para la monitorización de las variables de operación del gasificador y control de actuadores según lo especificado por ECOPLANT.
3. Realizar el diseño mecánico de las adaptaciones y mejoras necesarias al diseño original para que el equipo sea capaz de producir gas de forma continua durante el tiempo establecido en el diagnóstico inicial.
4. Determinar, por medio del VAN, la viabilidad económica de la implementación del dispositivo diseñado con las modificaciones propuestas.

## 1.4 Estructura del documento

En el capítulo 2 se presenta el conjunto de los conceptos teóricos necesarios para comprender, al menos de forma general, las diferentes etapas del mecanismo de gasificación y el funcionamiento de los diferentes tipos de reactores de gasificación. Además, se presenta una serie de consideraciones de diseño.

En el capítulo 3 se detalla el paso a paso el proceso seguido para llegar a la solución propuesta, con base en el método de diseño en ingeniería.

Ligado a lo que se expuso en el capítulo 3, en el capítulo 4 se explica la forma en que se siguió la metodología propuesta para el diseño de la solución.

Más adelante, en el capítulo 5 se analiza con base en criterios científicos y tecnológicos los diferentes resultados a los que se llegó y el alcance de los mismos dentro de todos los posibles aspectos que engloba el contexto del proyecto.

Por último, se exponen las conclusiones a las que se llegó como resultado del análisis de capítulo 5 así como las recomendaciones para el seguimiento del proyecto

# Capítulo 2

## Marco teórico

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos sobre los cuales se lleva a cabo el desarrollo del presente proyecto. Para desarrollar una solución adecuada es importante conocer con detalle la teoría que describe el funcionamiento del proceso que se desea intervenir. La adquisición de este conocimiento constituye una herramienta para el reconocimiento e interpretación de la realidad del proyecto y sirve como base para la toma de decisiones [9] con un criterio basado en conocimiento tecnocientífico.

### 2.1 Estado del arte

La investigación en gasificación de biomasa se remonta al año 1659, cuando Thomas Shirley experimentó con lo que hoy conocemos como metano. Desde entonces, el producto de la gasificación de biomasa se ha utilizado para iluminación, calefacción, locomoción y producción de materias primas (químicos) [10]. Durante la Segunda Guerra Mundial se manufacturaron una gran cantidad de vehículos impulsados por gasificadores. Esto generó una gran cantidad de conocimiento en ese momento. Sin embargo, de acuerdo con [10, 11], es en el siglo XXI que la gasificación de biomasa ha obtenido mayor relevancia y un gran impulso. Esto se debe a intereses ambientales, de disponibilidad energética y un factor económico, por ejemplo, en los países cuya generación energética depende de las importaciones de petróleo. Gracias a esto, durante las últimas dos décadas se han construido en el mundo grandes plantas de gasificación buscando un uso más sustentable de los recursos naturales [12]. Esto ha provocado que se genere una gran cantidad de conocimiento en lo relativo a la gasificación, permitiendo una mayor eficiencia en los procesos de conversión de biomasa por medio de la gasificación y un producto con mayor calidad.

Esta tecnología tiene un gran potencial en países en desarrollo, en donde se ha encontrado que la implementación de la gasificación en diferentes escalas representa ventajas desde una variedad de perspectivas como la económica, ambiental y social [13]. Por ejemplo, [14] menciona que en India el uso de gasificación de pellets de madera para aplicaciones

energéticas es competitivo económicamente con respecto al uso de gas licuado de petróleo. Por otra parte, en Costa Rica desde hace algunos años se ha impulsado el aprovechamiento de los residuos de la producción de café y otros cultivos para buscar la autosuficiencia energética en esta industria [15, 16]. La implementación de la gasificación de residuos agrícolas en fincas podría permitir una producción de energía que llegue a suplir las necesidades energéticas de estas.

A nivel mundial, una de las tecnologías emergentes de gasificación más prometedoras es la gasificación con plasma. Entre los principales avances al respecto, [17] indica que la gasificación con plasma podría ser una tecnología apropiada para favorecer una economía circular, produciendo energía con los residuos sólidos municipales como principal materia prima; se ha estudiado el rendimiento del gas producido por gasificación con plasma usando diferentes combustibles y agentes gasificantes e incluso se ha experimentado con el tratamiento y aprovechamiento de desperdicios biomédicos para la producción de electricidad con gasificación con plasma [18]. A pesar de su potencial, actualmente esta tecnología se encuentra limitada a experimentación en laboratorio debido a que aún existen amplios vacíos de conocimiento. Sin embargo, es una rama de la gasificación que promete ser respetuosa con el medio ambiente, además de que el gas que se produce tiene un mayor poder calorífico que otros tipos de gasificación.

## 2.2 Gasificación de biomasa

Antes de definir formalmente en qué consiste la gasificación, es importante precisar la definición de lo que es biomasa. La biomasa es el conjunto de organismos, como plantas, animales y microorganismos, que se encuentran vivos o que estuvieron vivos en un periodo reciente. Es en este hecho en el que la biomasa se diferencia de los combustibles fósiles, pues esta no requiere de millones de años para su formación, sino que se regenera constantemente por medio de los diferentes procesos ecológicos. La energía producida a partir de biomasa se define como renovable, ya que esta procede de una u otra forma de la energía solar fijada en las plantas por medio de la fotosíntesis y, además, puede reproducirse. Para extraer esta energía de la biomasa se puede recurrir a una variedad de métodos químicos, térmicos y biológicos, entre ellos la gasificación [10].

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en el cual se trata la materia prima o combustible con altas temperaturas (alrededor de 1000 °C), en presencia de un flujo reducido de un agente gasificante dentro de un reactor para convertir la biomasa en diferentes productos, los cuales se obtienen con un interés energético y químico [10, 19]. El objetivo de la gasificación es transferir la mayor cantidad posible de energía química del combustible sólido al producto gaseoso mediante una combustión parcial [18]. Por esta razón es relevante que se lleven a cabo procesos de investigación con el fin de incrementar el rendimiento de los procesos de gasificación.

Para evitar confusión, es importante recalcar que existen diferencias fundamentales entre

la combustión completa y la gasificación. Por ejemplo, a diferencia del que se obtiene de la gasificación, el gas producto de la combustión no tiene valor energético ni como producto químico, sino que por el contrario, son compuestos indeseados en los procesos de gasificación. Además, las reacciones químicas y el entorno en el que se llevan a cabo estos procesos son fundamentalmente diferentes: mientras que la combustión requiere un entorno oxidante, la gasificación se efectúa en un ambiente con una deficiencia controlada de oxígeno [10]. Sin embargo, la gasificación sí guarda una estrecha relación con otros procesos de transformación termoquímica como la pirólisis, la oxidación parcial y la hidrogenación.

Como se mencionó anteriormente, los productos obtenidos por medio de la gasificación son de interés tanto en la industria química como en la de la energía. Los métodos actuales de gasificación no permiten generar un solo producto, sino que se obtienen mezclas de diferentes combustibles en estado sólido, líquido y gaseoso [16]. Estos productos pueden procesarse según el uso que se les pretenda dar. El gas producto de la gasificación debe pasar por una etapa de purificación, ya que generalmente tiene una gran cantidad de componentes indeseados que dependen del tipo de biomasa utilizado y de los parámetros del proceso de gasificación. Uno de los principales productos aprovechables de la gasificación se denomina gas de síntesis o *syngas*, el cual es un gas formado principalmente por CO, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> en diferentes proporciones. Este sirve como materia prima para la síntesis química de diversos productos como el etanol y el metanol y para la producción de energía con distintos usos, como producción de electricidad y combustible para locomoción.

### 2.2.1 Etapas del proceso de gasificación

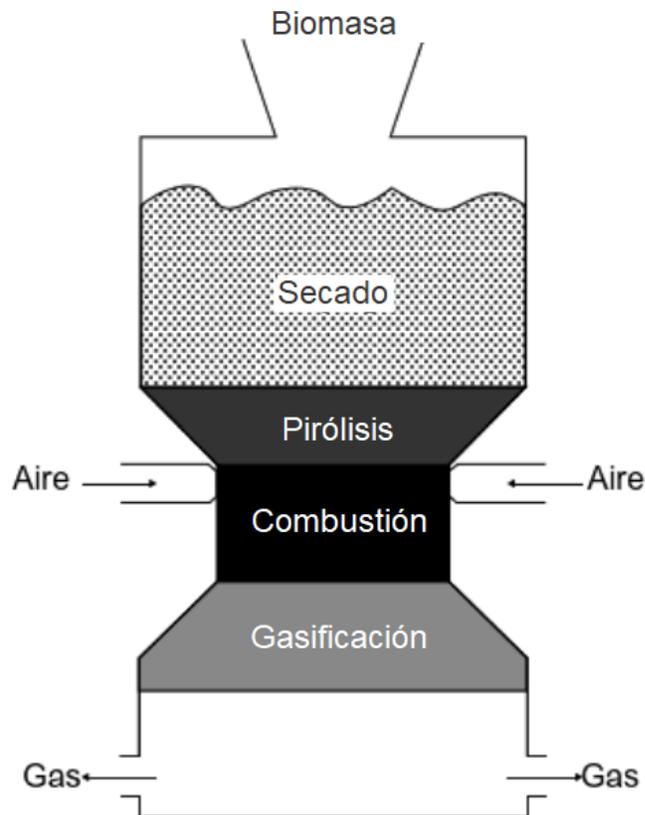
Según diversos autores [16], [10], [20], el proceso de gasificación suele dividirse en cuatro etapas para facilitar el estudio del comportamiento del proceso y su descripción. Típicamente, el proceso inicia con el precalentamiento de la materia prima, la cual pasa a la etapa de pirólisis para finalmente reaccionar con el agente oxidante en las etapas de combustión y reducción para formar el producto final. Por último, el gas debe ser acondicionado para su uso. Es importante conocer las características de cada una de las etapas del proceso y que es necesario tenerlas en cuenta para el diseño y construcción de los gasificadores.

En la figura 2.1 se ilustran las diferentes etapas termoquímicas del proceso de gasificación en un reactor de flujo descendente, así como el perfil de temperaturas aproximado en cada una de ellas.

A continuación, se describe de forma detallada cada una de estas etapas.

#### Secado y precalentado

El contenido de humedad en la biomasa fresca típicamente se encuentra en el rango de 30% a 60% pudiendo llegar hasta al 90%, dependiendo del origen de esta materia [10].



**Figura 2.1:** Etapas del proceso de gasificación en un reactor de flujo descendente. [10]

El proceso de secado es importante previo a la gasificación ya que un bajo porcentaje de humedad en el combustible incrementa la cantidad de energía transferida al gas, aumenta la calidad del producto y reduce las emisiones durante el proceso de conversión. Se dice que por cada kilogramo de humedad en la biomasa se pierden como mínimo 2242 kJ para evaporar el excedente de agua, reduciendo considerablemente la eficiencia del proceso [10], [21]. Además, altos contenidos de humedad pueden provocar problemas operativos en los reactores por el exceso de la producción de ceniza y alquitrán, mayores emisiones de CO y compuestos orgánicos volátiles. Estos productos indeseados afectan la calidad del gas producido ya que reducen diluyen la concentración de los compuestos combustibles, reduciendo el valor calorífico del gas.

Cuando el combustible se coloca en el depósito de entrada del gasificador, este recibe calor de la zona más caliente en el interior del reactor. Como consecuencia, se produce un secado y precalentamiento de la biomasa. En esta etapa la temperatura ronda entre 70 °C y 200 °C [10], [16].

## Pirólisis

La segunda etapa consiste en el proceso de pirólisis. La pirólisis en ocasiones se utiliza como un procedimiento independiente de transformación termoquímica de biomasa. Se suele utilizar para la producción de carbón y gases combustibles.

Sin embargo, en el contexto se considera como un paso intermedio en el proceso de gasificación [22] ya que los procesos de reducción y oxidación requieren de los productos de la pirólisis. El proceso de oxidación hace uso del carbón producido por la pirólisis de la biomasa, a partir del cual. Este carbón es el que produce el calor necesario para la reducción y para la misma pirólisis.

La pirólisis se lleva a cabo a temperaturas mayores a 250 °C y hasta los 650 °C con una presencia limitada de oxígeno o en ausencia de este elemento. Durante este proceso se llevan a cabo múltiples reacciones, en las cuales se da la descomposición de grandes moléculas orgánicas en moléculas de gas más pequeñas [10]. De acuerdo con [20], la mayor parte de la composición del gas producto de la pirólisis consiste en CO, H<sub>2</sub>O y CO<sub>2</sub>. Además, se produce carbón en estado sólido con una alta porosidad y alquitrán en estado líquido con un contenido de hasta 20% de agua [10]. Las reacciones químicas que tienen lugar durante la pirólisis pueden resumirse de la siguiente forma [22]:



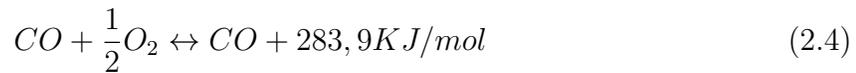
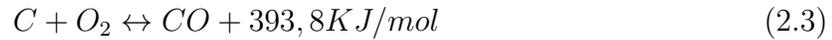
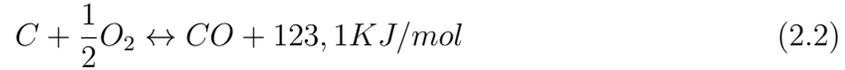
En la ecuación (2.1), el reactivo CH<sub>x</sub>O<sub>y</sub> corresponde a una expresión empírica que representa las diferentes partículas sólidas que componen la biomasa [20]. La cantidad relativa de los diferentes productos de las reacciones de pirólisis depende en gran medida de diferentes factores como la temperatura de la biomasa, la velocidad del calentamiento, el tiempo de residencia y características de la biomasa como lo son el tamaño, el porcentaje de humedad y la composición.

## Oxidación o combustión

En general, el proceso de gasificación es endotérmico. Para producir el calor que se requiere para el secado, el precalentado, la pirólisis y para la zona de reducción, se permite una reacción exotérmica de combustión incompleta del carbón producido en la fase de pirólisis [10, 20]. Para asegurar que se lleve a cabo una oxidación parcial y no completa del carbón, se suministra una cantidad limitada de oxígeno, la cual es menor que la cantidad estequiométrica necesaria para que se produzca una combustión completa. A la relación entre la cantidad de oxígeno suministrada y la cantidad necesaria para una combustión completa se le llama radio de equivalencia. El radio de equivalencia reportado en la literatura se encuentra típicamente en el rango de 0,2 a 0,4 para permitir la reacción de combustión justa para la gasificación. Una mayor reacción de combustión provocaría una disminución de la calidad del gas, por motivo de la fusión de ceniza por la mayor temperatura. Además, si se produce una combustión completa por un ER alto, el gas se

mezclaría con los productos sin valor de la combustión completa.

Durante la etapa de oxidación se pueden producir diferentes reacciones dependiendo del agente oxidante que se usa. La cantidad de energía liberada en estas reacciones está en función de la cantidad de  $O_2$  disponible para la reacción. De acuerdo con [22], estas reacciones son:



Las ecuaciones 2.2 y 2.3 son las que toman más tiempo para completarse y por lo tanto, son las que determinan en mayor medida la velocidad del proceso de gasificación [22].

Debido a que en la etapa de oxidación se produce el calor necesario para las otras etapas de la gasificación, es aquí donde se alcanzan las mayores temperaturas de todo el proceso, pudiendo alcanzar hasta 1400 °C en algunos tipos de gasificadores [10].

## Reducción

La mayoría de las reacciones de la gasificación consumen energía. El calor generado durante la fase de oxidación es utilizado por las reacciones endotérmicas de la zona de reducción, por lo tanto en esta etapa se espera una disminución en la temperatura debido al consumo de energía por parte de estas reacciones. En la reducción se dan una serie de reacciones entre hidrocarburos, vapor, dióxido de carbono, oxígeno e hidrógeno dentro del reactor. La velocidad de las diferentes reacciones depende en gran medida de las características del medio gasificante. De entre los agentes oxidantes, el más activo es el oxígeno, seguido por el vapor de agua y el dióxido de carbono.

En esta etapa es en la que se da propiamente el proceso de gasificación. Los gases salen de la zona de reducción con una temperatura que oscila entre 400 °C y 700 °C [10].

## Refrigeración y purificación del gas

Una vez que se finaliza el proceso de gasificación, el producto debe ser enfriado y purificado para su utilización. Los sistemas de refrigeración se pueden clasificar en tres grandes categorías: refrigeradores de convección natural, de convección forzada y de agua. Los de convección natural consisten simplemente en una extensión de tubería, lo que permite que sean fáciles de instalar y limpiar aunque suelen ser voluminosos. Por otra parte, los de convección forzada requieren de un ventilador que hace circular aire refrigerado alrededor

de las tuberías del gas. Por último, los sistemas de refrigeración de agua se dividen en los que utilizan un intercambiador de calor de agua y en los que se rocía agua en la corriente de gas con el objetivo de enfriar y limpiar en una sola operación.

El propósito de enfriar el gas consiste en condensar una parte del vapor de agua presente en el gas y precipitar partículas de polvo. Se sabe que el incremento de solamente 10 °C puede producir una pérdida de potencia de hasta un 3% [5]. Además, al enfriar el gas se obtiene un producto con una mayor densidad, lo que implica una mayor densidad energética.

Debido a estas razones, es importante diseñar un sistema de refrigeración apropiado.

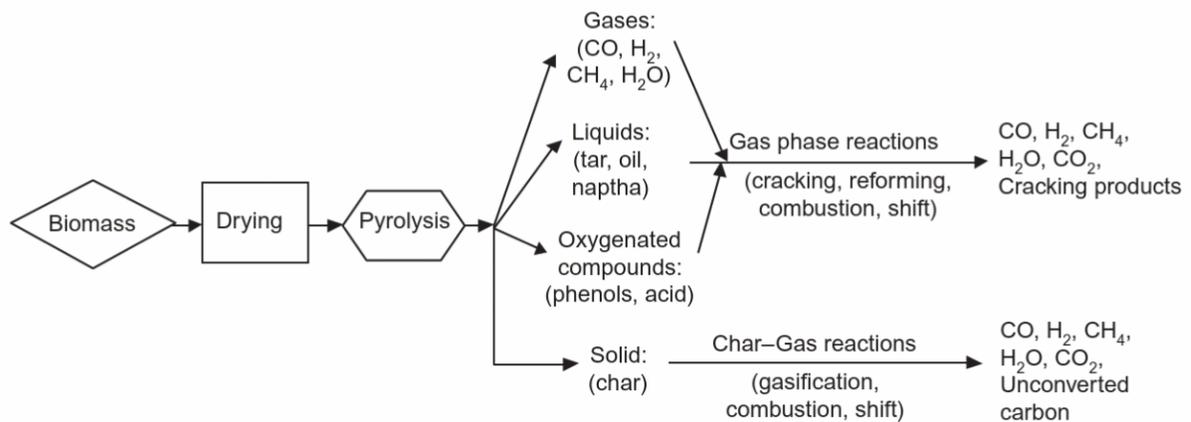
Por otra parte, el gas puede tener diferentes impurezas tanto en estado sólido como gaseoso. Si no se remueven, pueden afectar el funcionamiento del motor o incluso dañarlo. El contenido de impurezas en el gas depende del tipo y diseño del gasificador, de la carga y del combustible utilizado.

## 2.2.2 Productos y aplicaciones

A continuación, se brinda un breve resumen de las aplicaciones típicas de los diferentes tipos de productos de la gasificación de biomasa. De acuerdo con [10], los productos que se obtienen de la gasificación de biomasa pueden clasificarse en 3 grandes grupos:

- Combustibles líquidos
- Combustibles gaseosos
- Combustibles sólidos

En la figura 2.2 se ilustra esta clasificación de los productos de la gasificación.



**Figura 2.2:** Posibles productos de la gasificación según la secuencia de reacciones. [10]

Estos, a su vez, son utilizados principalmente en 4 grandes industrias: química, energética, transporte y ambiental.

## Industria química

En teoría, es posible producir a partir de biomasa la mayoría de los productos obtenidos del petróleo y del gas natural, principalmente a partir del CO y el H<sub>2</sub> presentes en el *syn-gas*. A partir de estos componentes se pueden sintetizar bloques constituyentes químicos, usados para producir diferentes productos como amoníaco, metanol e hidrógeno, los cuales son utilizados en una gran variedad de industrias como la textil, transporte, alimentos, comunicaciones, entre otras [10, 23].

La síntesis de químicos a partir de la gasificación de desechos agro forestales es de importancia ambiental ya que permite la sustitución del petróleo y, por el contrario, utiliza desechos que de otra forma serían desperdiciados.

## Industria energética

Las principales formas de energía que usualmente se obtienen del gas de síntesis son la eléctrica y la térmica [10]. La gasificación de biomasa en contraste con la combustión de combustibles fósiles resulta beneficiosa en cuanto a la eficiencia energética y emisiones de carbono, lo que la convierte en una tecnología amigable con el ambiente, con menores emisiones netas de carbono que otras alternativas energéticas. Además, la producción energética por medio de la gasificación no implica la construcción de grandes estructuras en medio de diferentes ecosistemas, como es el caso de las centrales de generación hidroeléctrica. Esto reduce aún más el impacto ambiental de la gasificación en comparación con otras tecnologías.

## Industria de transporte

Después de la industria energética, la industria del transporte es la segunda con mayor aporte de emisiones de dióxido de carbono [23]. La biomasa puede ayudar a sustituir el uso de derivados de petróleo en la industria del transporte. Algunos motores de combustión interna son capaces de funcionar con etanol o metano producidos a partir de biomasa [10].

Una alternativa que se ha considerado es el uso de un gasificador directamente en el vehículo. Durante la Segunda Guerra Mundial se generó una gran cantidad de conocimiento relacionado con la locomoción con gasificadores como la fuente de energía. Sin embargo, esto dejó de practicarse después de la guerra.

## Industria ambiental

Los productos de la gasificación pueden ser usados también en la industria del control de contaminantes, principalmente los productos sólidos. Por ejemplo, el carbón activo es utilizado para la purificación de agua, ya que por sus características mecánicas es capaz de eliminar metales pesados. Además, estos residuos sólidos proveen una forma de capturar

dióxido de carbono de una forma natural en el suelo en lugar de liberarlo a la atmósfera, sirviendo incluso como fertilizante para los suelos y contribuyendo al crecimiento de los cultivos [10].

En la figura 2.3 se presenta una serie de ejemplos de los diferentes usos que se le suele dar al gas de síntesis y sus derivados.

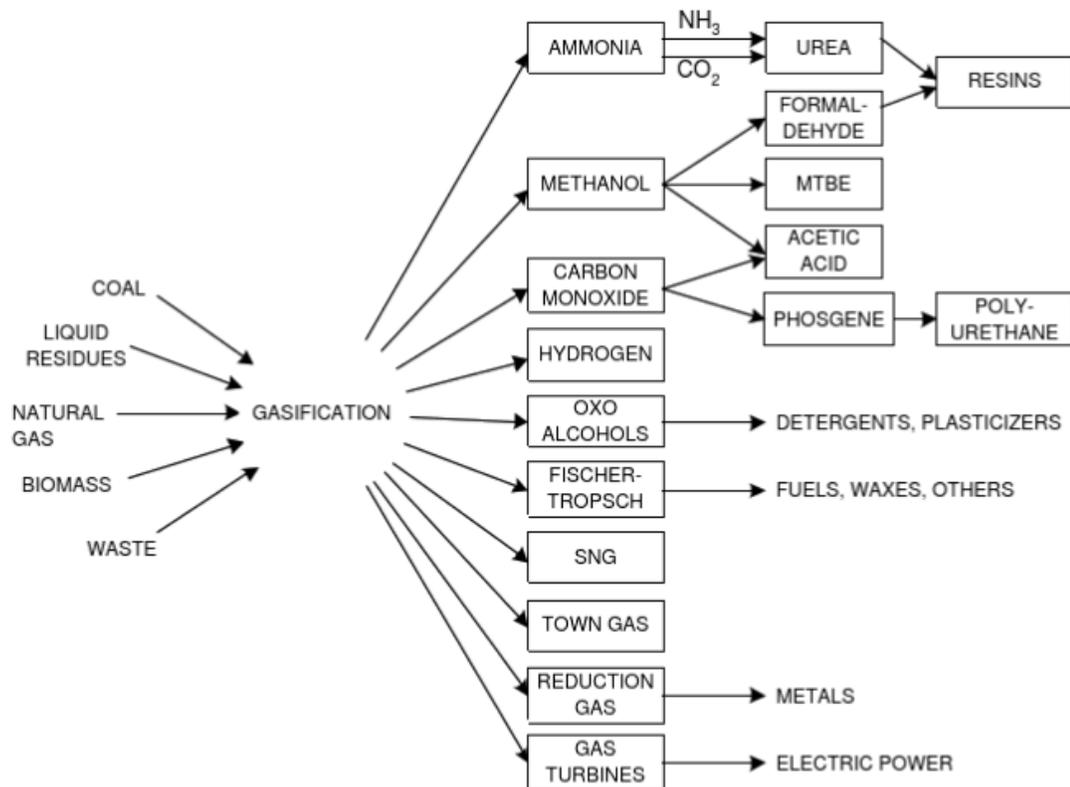


Figura 2.3: Aplicaciones del gas de síntesis. [23]

## 2.3 Características de los reactores de gasificación

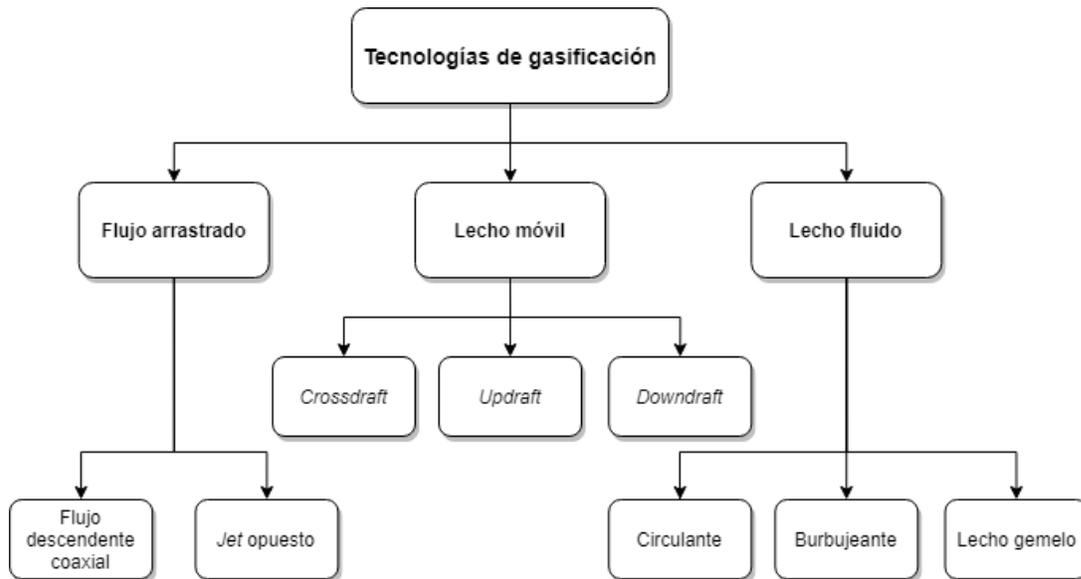
Un equipo para gasificación de biomasa está compuesto por un reactor de gasificación así como por los diferentes sistemas y equipos auxiliares como lo son el filtro y el sistema de enfriamiento [10]. Sin embargo, el componente principal es el reactor, pues es el que tienen lugar las reacciones que producen el gas. En esta sección se brinda una breve descripción de las principales características de los diferentes tipos de reactores de gasificación, las diferencias entre ellos y algunas consideraciones de tener en cuenta a la hora del diseño.

### 2.3.1 Clasificación

De acuerdo con [16], los equipos usados para la gasificación pueden ser clasificados según diferentes criterios:

- Fuente de energía
- Presión de operación del gasificador
- Clase de lecho
- Movimiento relativo entre los gases y el combustible
- Forma de cargar combustible y descargar cenizas

Sin embargo, la clasificación que se utiliza con mayor frecuencia es según la clase de lecho. Las demás clasificaciones no presentan un interés para el estudio de la gasificación, ya que no se relacionan directamente con las reacciones de pirólisis, oxidación o reducción. De acuerdo con esta clasificación, hay tres principales tipos de gasificadores, los cuales se dividen en diferentes subclasificaciones de acuerdo con la aplicación. Estas clasificaciones son el gasificador de lecho fijo (también conocido como lecho móvil), de lecho fluidizado y de lecho arrastrado, tal y como se muestra en la figura 2.4.



**Figura 2.4:** Clasificación de los gasificadores según la clase de lecho. Adaptado de [10]

Seguidamente se describen los diferentes tipos de gasificador según la clasificación por tipo de lecho.

## Gasificador de lecho fluido

Los gasificadores de lecho fluido obtienen su nombre del lecho formado por un sólido granular llamado material de lecho, el cual se mantiene semisuspendido durante la operación del gasificador gracias a la velocidad del medio gasificante al pasar a través del material de lecho. Debido a esto, los gasificadores de lecho fluido se caracterizan por permitir una excelente mezcla entre el combustible y el agente gasificante, logrando con esto una temperatura uniforme. Existen tres tipos de gasificador de lecho fluido: los de lecho fluido circulante, los de lecho fluido burbujeante y los de lecho gemelo.

## Gasificador de lecho arrastrado

Este tipo de gasificador es el más utilizado para aplicaciones de gran escala, sin embargo no es útil para su uso con biomasa debido al alto contenido de humedad presente en esta. Por esta razón, el combustible utilizado en este tipo de gasificadores es carbón. En este tipo de gasificadores se requiere de altas temperaturas debido al corto tiempo de residencia, por lo que se presenta el problema de fusión de ceniza.

## Gasificador de lecho fijo o móvil

En los gasificadores de lecho fluido y en los de lecho arrastrado, el agente gasificante se encarga de mover el combustible dentro del reactor. A diferencia de estos, en los gasificadores de lecho fijo (también conocido como de lecho móvil) el combustible se encuentra reposando en una rejilla. Una de sus principales características es que son aptos para su construcción en pequeña escala, con potencias a partir de los 10 kW. Existen tres tipos de gasificadores de lecho fijo: *crossdraft*, *updraft* y *downdraft*.

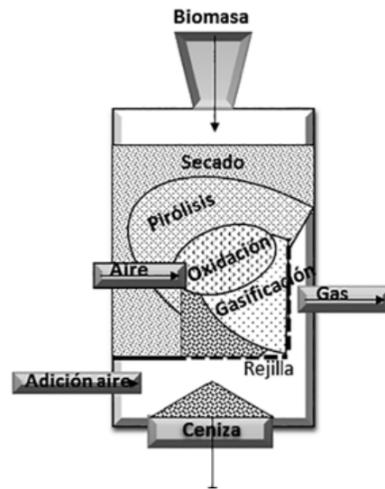
### ***Gasificador de lecho fijo crossdraft***

También son llamados gasificadores de flujo cruzado, ya que el agente gasificante entra en el reactor por un costado del mismo mientras que el producto sale por el costado opuesto haciendo el que el gas atraviese transversalmente el combustible, el cual se ingresa por la parte superior del reactor. Este tipo de gasificador es utilizado generalmente en aplicaciones de pequeña escala para la gasificación de carbón con bajo contenido de ceniza [10]. En la figura 2.5 se ilustran las diferentes etapas del gasificador de tipo *downdraft* y las direcciones del flujo de gas y combustible.

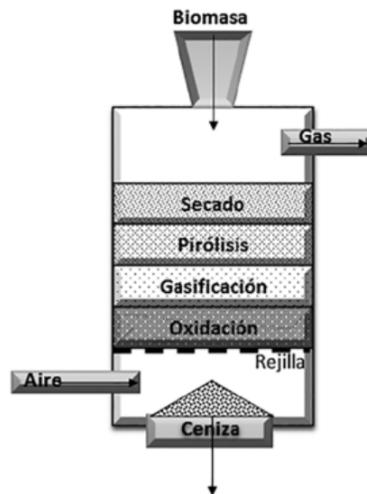
### ***Gasificador de lecho fijo updraft***

En este tipo de gasificador el agente gasificante entra por la parte inferior del reactor, el combustible entra por la parte superior y el producto sale cerca de la parte superior. De esta forma, el agente gasificante y el combustible se mueven en direcciones opuestas [19]. En la figura 2.6 se muestra una representación gráfica de un gasificador de tipo *updraft*.

Los gasificadores de flujo o tiro ascendente, como también se les llama a los de tipo



**Figura 2.5:** Esquema de un gasificador de lecho fijo de tipo *crossdraft*. [24]



**Figura 2.6:** Esquema de un gasificador de lecho fijo de tipo *updraft*. [24]

*updraft*, se caracterizan por tener una respuesta rápida, lo que los hace especialmente aptos para poder responder rápidamente a los cambios en la carga al alimentar un motor de combustión interna. Además, el tiempo de inicio es más corto que en los otros tipos de gasificador de lecho fijo [10].

Una característica particular de los gasificadores *updraft* es que se produce una combustión completa del carbón en el lecho cuando este se encuentra con el agente oxidante. Luego, el aire atraviesa el lecho y produce las reacciones endotérmicas de combustión con el carbón que no ha reaccionado en la oxidación.

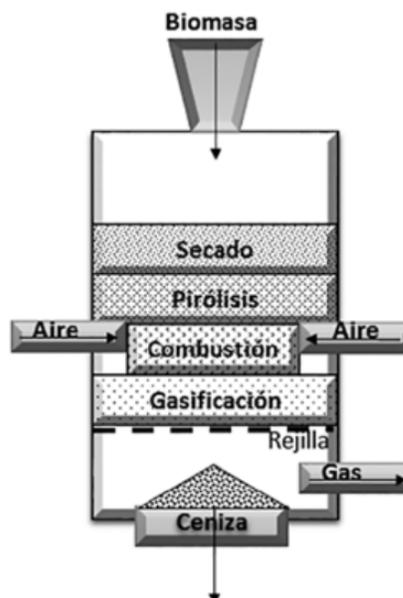
### ***Gasificador de lecho fijo downdraft***

Por último, se tienen los gasificadores *downdraft* o de flujo descendente. En este tipo de gasificadores tanto el flujo de aire como el de combustible tienen una dirección descendente dentro del reactor. De esta forma, el aire entra por uno de los costados del reactor y el combustible se deposita por la parte superior, mientras que el gas producido sale por la

parte inferior del reactor. Debido a que el gas pasa por una zona de ceniza caliente en la rejilla, se produce una región con condiciones favorables para la descomposición de alquitranes. Por esta razón, los gasificadores de tiro descendente son los que tienen una menor producción de alquitranes. Esto los hace apropiados para su uso con motores de combustión interna gracias al bajo contenido de impurezas.

En este tipo de gasificadores el aire entra por una serie de toberas localizadas en el perímetro del reactor, produciendo una zona de alta temperatura al encontrarse con las partículas pirolizadas que descienden de la etapa de pirólisis. Seguidamente, el gas desciende para encontrarse con las partículas que se encuentran en el lecho, produciendo la gasificación.

En la figura 2.7 se muestra una representación esquemática de las diferentes etapas del proceso de gasificación en un gasificador *downdraft*.



**Figura 2.7:** Esquema de un gasificador de lecho fijo de tipo *downdraft*. [24]

En la tabla 2.1 se resumen las principales características de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo.

**Tabla 2.1:** Comparación de los diferentes tipos de gasificadores de lecho fijo. Adaptado de [10].

<b>Características del combustible</b>	<b>Updraft</b>	<b>Downdraft</b>	<b>Crossdraft</b>
Contenido de humedad (%)	60 max.	25 max.	10-20
Temperatura de fusión de la ceniza (°C)	1000	1250	
Tamaño (mm)	5-100	20-100	5-20
Rango de potencia de la aplicación (MW)	2-30	1-2	
Temperatura de salida del gas (°C)	200-400	700	1250
Alquitranes (g/N m <sup>3</sup> )	30-150	0,015-3,0	0,01-0,1
Eficiencia del gas caliente (%)	90-95	85-90	75-90

### 2.3.2 Instrumentación y control

Conocer las diferentes variables de operación es indispensable para la optimización del proceso de gasificación, tanto en un ambiente de investigación como para la producción. Los gasificadores comerciales generalmente usan PLC's y sistemas SCADA para realizar el control [25], sin embargo existen otras opciones comercialmente disponibles basadas en microcontroladores y algunas de *open source*, lo que permite un costo de adquisición menor. La principal función del sistema de control de un gasificador es ejecutar acciones o ajustar parámetros con base en los valores obtenidos de los sensores y la etapa de operación (encendido, generación de gas o apagado) para optimizar la eficiencia del proceso y la calidad del producto. A continuación, se brinda el detalle de las variables que usualmente se miden en un gasificador.

#### Temperatura

La temperatura en las diferentes etapas de la gasificación es uno de los principales parámetros que es necesario conocer, ya que esta afecta de forma directa la formación de impurezas y la calidad y composición de los productos [10, 23]. Otro de los objetivos de la medición de temperaturas es determinar la fase de operación en la que se encuentra el gasificador. Por ejemplo, para establecer cuándo se ha alcanzado el calor suficiente durante el proceso de gasificación para poder pasar a la fase de producción de gas.

Generalmente, para la medición de la temperatura en distintos puntos de los gasificadores se utilizan termopares tipo K y los de aleación de Platino-Rodio. Sin embargo, existen otras opciones como por ejemplo sensores de diodo láser sintonizable (TDL), que además permiten medir concentraciones de diferentes compuestos en el gas [26].

Es recomendable medir la temperatura en diferentes puntos del gasificador para asegurar una operación apropiada. Debería medirse la temperatura en los siguientes puntos:

- Antes de la zona de reducción
- Después de la zona de reducción
- Entrada del filtro
- Aire entrante
- Salida del gas

Es importante mencionar que existen problemas prácticos que impiden una medición precisa. Por ejemplo, pequeñas variaciones en la ubicación de los sensores pueden dar lecturas diferentes, ya que si no se diseña el reactor de forma apropiada pueden producirse zonas de concentración de calor. Además, las condiciones extremas dentro del reactor dificultan mediciones precisas. Sin embargo, para la correcta operación generalmente es más importante obtener una temperatura alta y estable a pesar de que se conoce que esta podría no tener una precisión alta.

La temperatura máxima en un gasificador de corriente descendente se da en la zona de combustión y puede alcanzar hasta 1200 °C, mientras que a la salida el gas tiene una temperatura de aproximadamente 700 °C [10]. Es necesario un sistema de enfriamiento y purificación del gas; en algunos casos se utiliza un intercambiador de calor para aprovechar el calor residual presente en el gas a la salida del reactor. La temperatura después del proceso de enfriamiento ronda los 40 °C [27]. En la tabla 2.2 se resumen los rangos de temperaturas típicos de un gasificador *downdraft*.

**Tabla 2.2:** Rangos de temperatura típicos en diferentes puntos de un gasificador de tipo *downdraft* [10, 28, 23].

Etapa de la gasificación	Rango de temperatura (°C)
Secado y precalentado	< 250
Pirólisis	300 - 650
Oxidación	800 - 1000
Reducción	600 - 800
Salida del reactor	400 - 700
Salida del enfriador	< 50

## Presión

Las presiones dentro de un gasificador *downdraft* generalmente se encuentran en valores cercanos a la presión atmosférica. La razón por la que se suele medir la presión en diferentes puntos del gasificador es para determinar las caídas de presión que existen a lo largo del sistema. Por ejemplo, la caída de presión a través del reactor de reducción es un parámetro que se utiliza para detectar si la parrilla está saturada con carbón y ceniza, evitando que el gas fluya hacia la salida del reactor [27].

Los gasificadores suelen diseñarse con sistemas de alivio de presión, para evitar explosiones a causa de la acumulación de presión dentro del reactor. Entre los principales sistemas de sobrepresión que se utilizan en los gasificadores se encuentran las válvulas de alivio de presión y los discos de ruptura.

### Concentración de gases

El contenido de los diferentes componentes del gas determina la calidad de este y sus propiedades, por lo que es importante conocer estas concentraciones para poder controlar los diferentes parámetros que determinan la composición del gas. Además, cuando se utiliza el gas para hacer funcionar un motor de combustión interna, es necesario conocer la proporción de combustible y oxígeno para lograr una combustión eficiente [29]. Los principales componentes del gas son metano ( $\text{CH}_4$ ), hidrógeno ( $\text{H}_2$ ) y monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), por lo que se requieren sensores a la salida del gasificador para determinar la concentración de estos compuestos. Sin embargo, las limitaciones tecnológicas no permiten medir con facilidad la composición del gas de forma precisa de una forma económica.

### Flujo volumétrico

Para lograr una producción óptima de gas, se suele usar un control de lazo cerrado para controlar las variables de importancia en el proceso de gasificación. Principalmente se debe controlar el ratio de equivalencia para mantenerlo alrededor de 0,3 [30], ya que en esta proporción se lleva a cabo la oxidación parcial del combustible necesaria para que se generen los productos necesarios para la gasificación, como el calor y los gases para la reducción. Un mayor ratio de equivalencia incrementaría la temperatura del gasificador innecesariamente y reduciría la calidad del gas. Para lograr esto, la variable que se suele medir es el flujo volumétrico del agente oxidante para lograr la realimentación de lazo cerrado.

## 2.4 Diseño de tanques de almacenamiento

### 2.4.1 Dimensiones

De acuerdo con [31], existen diferentes formas para calcular las dimensiones de un tanque de almacenamiento. Para tanques con grandes dimensiones, usualmente se utiliza el llamado criterio de 1 pie, en el que se considera una sección transversal del tanque ubicada 1 ft sobre un anillo de refuerzo. Sin embargo, para tanques pequeños, con un diámetro menor a 3200 mm, se utiliza la fórmula que se presenta en la ecuación 2.5.

$$t = \frac{0,005D(h - 30.48)G}{E1476} + CA \quad (2.5)$$

donde:

$t$ : espesor mínimo (cm)

$D$ : diámetro del tanque (cm)

$h$ : altura del tanque (cm)

$G$ : densidad relativa del contenido (no menor que 1)

$E$ : eficiencia de la junta (0,75 o 0,80)

$CA$ : corrosión máxima permisible (cm)

## 2.4.2 Soldaduras

El Código de Calderas y Recipientes a Presión de ASME (BPVC) establece los requerimientos para la soldadura de tanques y recipientes a presión. A continuación, se brindan una serie de consideraciones incluidas en el código BPVC [31].

### Juntas verticales del cuerpo del tanque

Las juntas verticales en el cuerpo del tanque deben ser de penetración y fusión completa, de tal forma que se tenga la misma cantidad de metal depositado tanto en el interior como en el exterior de las partes soldadas. Esto es con el objetivo de tener soldaduras sólidas, de manera que no se permita el escape de gases o el ingreso indeseado de aire en el reactor.

### Placas anulares

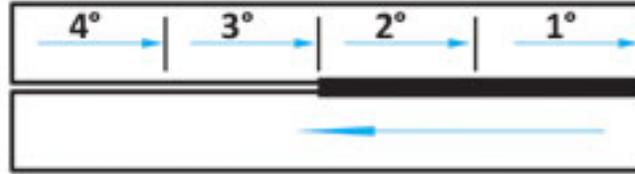
Se deben hacer soldaduras a tope ya sea escuadrando las placas o con biseles en  $45^\circ$ . De la misma forma que en las soldaduras verticales del cuerpo del tanque, en las soldaduras para placas anulares deberán haber penetración y fusión completa con el fin de evitar fugas de gas en donde se requiera.

Se debe tener las mismas consideraciones para elementos internos del reactor.

### Recomendaciones para el proceso de soldadura

El código BPVC brinda una serie de recomendaciones a seguir durante el proceso de soldadura. Es necesario tener una especial consideración de la dilatación térmica durante el proceso de soldadura para evitar deformaciones permanentes en el tanque. Se recomienda realizar la soldadura vertical del cuerpo del tanque utilizando el procedimiento de soldadura por retroceso, como se indica en la figura 2.8.

En la figura el sentido de avance es hacia la izquierda, mientras que cada cordón parcial se realiza en el sentido contrario. Esto ayuda a reducir las deformaciones por dilatación



**Figura 2.8:** Representación del procedimiento de soldadura por retroceso. [32]

y contracción térmica.

### 2.4.3 Boquillas

Las boquillas son orificios que se realizan en el tanque para la entrada o salida de material o para la instalación de instrumentos de medición. También existen boquillas para el servicio del tanque. Usualmente se utilizan boquillas bridadas o roscadas.

De acuerdo con [31], las boquillas con un diámetro mayor a 76 mm (3 in.) deberán tener una placa de refuerzo para absorber la generación de esfuerzos provocada por la perforación. También será necesaria una placa de refuerzo cuando el eje axial de las boquillas no se encuentre a un ángulo de  $90^\circ$  respecto al plano horizontal. Sin embargo, para boquillas con diámetro menor a 76 mm o que tengan un servicio exclusivo de instrumentación, no es necesario utilizar una placa de refuerzo. Estas boquillas se ilustran en la figura 2.9

En la tabla que se puede encontrar en el anexo B se especifican las dimensiones estándar para el diseño de la boquilla. El diseño de boquillas implica principalmente tres partes:

- Decidir la apertura de la boquilla
- Diseñar y seleccionar el espesor de la boquilla
- Calcular el refuerzo

Para esto, es necesario considerar diferentes factores como la función de la boquilla, cargas externas, magnitud del flujo, características del fluido, presión, entre otros.

Las boquillas se clasifican según su el tipo de acople y de soldadura en boquillas *set-in* y boquillas *set-on* [33]. En las boquillas *set-in*, el diámetro de la abertura en el tanque coincide con el diámetro externo de la boquilla y esta presenta una penetración completa en el tanque, mientras que en las de tipo *set-on*, el cuello de la boquilla se sienta en la superficie del tanque, tal y como se ilustra en la figura 2.10.

## 2.5 Diseño actual del gasificador a intervenir

En esta sección se presentan las principales partes que componen el diseño original del gasificador seleccionado por ECOPLANT, así como la función de estas. Las principales



A continuación se describe cada una de estas partes para que el lector conozca el equipo.

### 2.5.1 Reactor

Es en el reactor de gasificación en donde se llevan a cabo las diferentes reacciones que tienen como producto final el gas. Por este motivo es el principal componente del gasificador, así que se le debe prestar una especial atención al diseño del mismo. A su vez, aloja una serie de diferentes componentes:

- Casco de condensación
- Acelerador de pirólisis
- Camisa de aire
- Toberas
- Plato de ahogamiento
- Tubo de reducción
- Rejilla

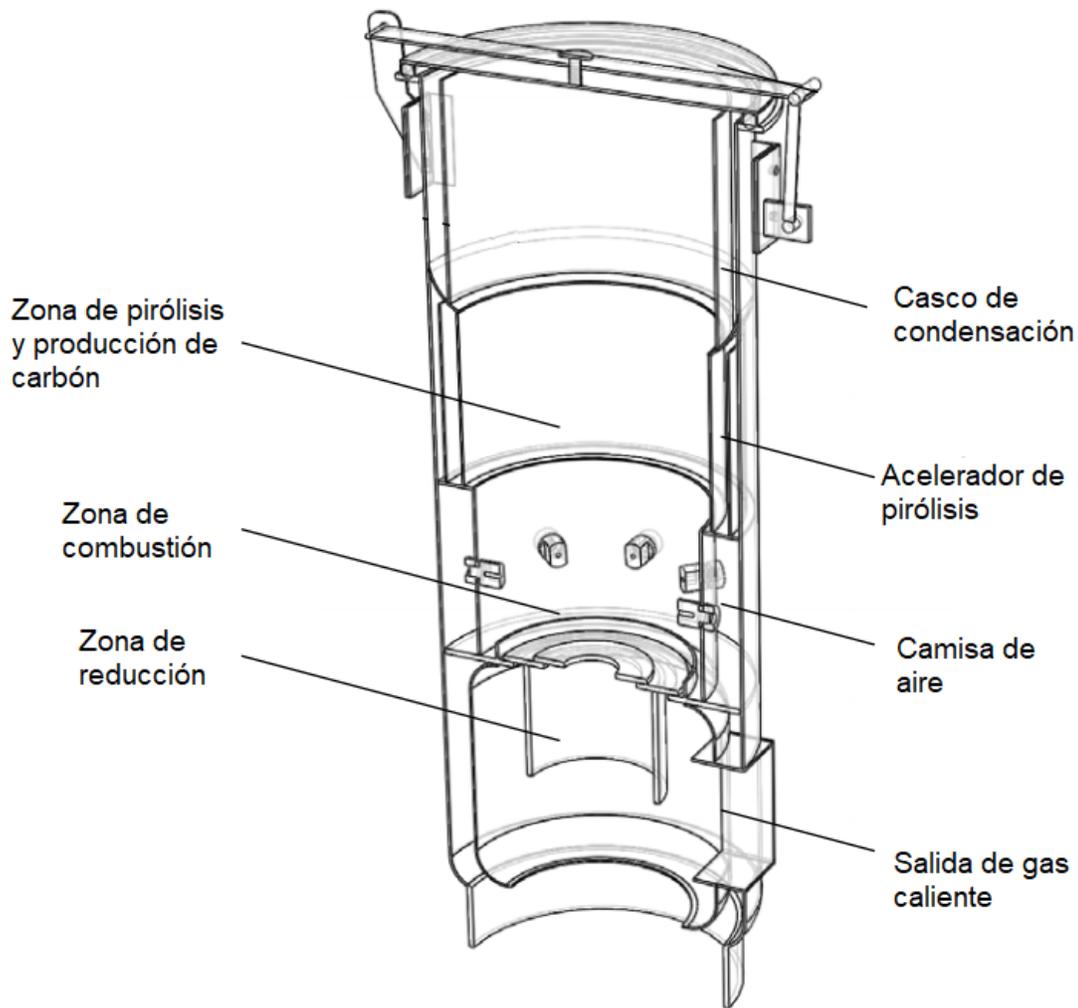
Las diferentes partes del reactor se alojan dentro de un tanque de propano de 100 *lb*, cuyas dimensiones máximas son un diámetro de  $D = 14,7 \text{ in}$  (373 *mm*) y una altura de  $h = 49 \text{ in}$  (1245 *mm*). A este tanque se deben realizar una serie de cortes y perforaciones para poder soldar las diferentes partes que se deben colocar dentro del mismo. En la figura 2.11 se ilustran los principales componentes del reactor del diseño original. Seguidamente se describe cada uno de ellos.

#### Casco de condensación

Este componente tiene la función de retener el contenido de agua que se ha condensado luego de haber sido evaporada en el proceso de secado. Por otra parte, si se usa carbón como combustible, sirve para añadir el agua necesaria para la reacción. Sin embargo, la función de reserva de agua generalmente no será utilizada, ya que el principal combustible que se pretende utilizar es biomasa agroforestal y no carbón.

#### Acelerador de pirólisis

Consiste en una capa adicional entre el exterior del reactor y la capa más interna a la altura de la zona de pirólisis con el objetivo de hacer pasar el gas caliente a través de esta para poder utilizar el calor presente en el gas para acelerar el proceso de pirólisis y producir carbón para su oxidación de una forma más rápida.



**Figura 2.11:** Componentes del reactor de gasificación del diseño original. [28]

### Camisa de aire

Justo después de entrar en el sistema, el aire pasa por un intercambiador de calor, el cual le transfiere energía térmica residual presente en el gas una vez que este sale del acelerador de pirólisis. El aire precalentado pasa a la camisa de aire, cuya función es distribuir el agente oxidante de forma equitativa entre las toberas.

### Toberas

El aire entra al reactor por medio de toberas maquinadas con un tamaño de agujero específico. Cuando el aire entra en el reactor, este cubre la superficie del carbón producido por la pirólisis. De esta forma, se crea una superficie incandescente que produce el calor necesario para descomponer los aceites producidos por la pirólisis.

## Plato de ahogamiento

La función del plato de ahogamiento es restringir o controlar el flujo de gas. Por esta razón, en el diseño original se planteó que este pudiese ser sustituido fácilmente con el objetivo de adaptar el gasificador a diferentes configuraciones de motores de combustión.

## Tubo de reducción

Es en el tubo de reducción donde se producen las reacciones que dan lugar al gas que sale del reactor como el producto final que debe ser acondicionado para su uso en un motor de combustión. El tubo de reducción contiene carbón con una alta temperatura y una presencia casi inexistente de oxígeno, produciendo las últimas reacciones químicas del proceso de producción del gas.

## Rejilla

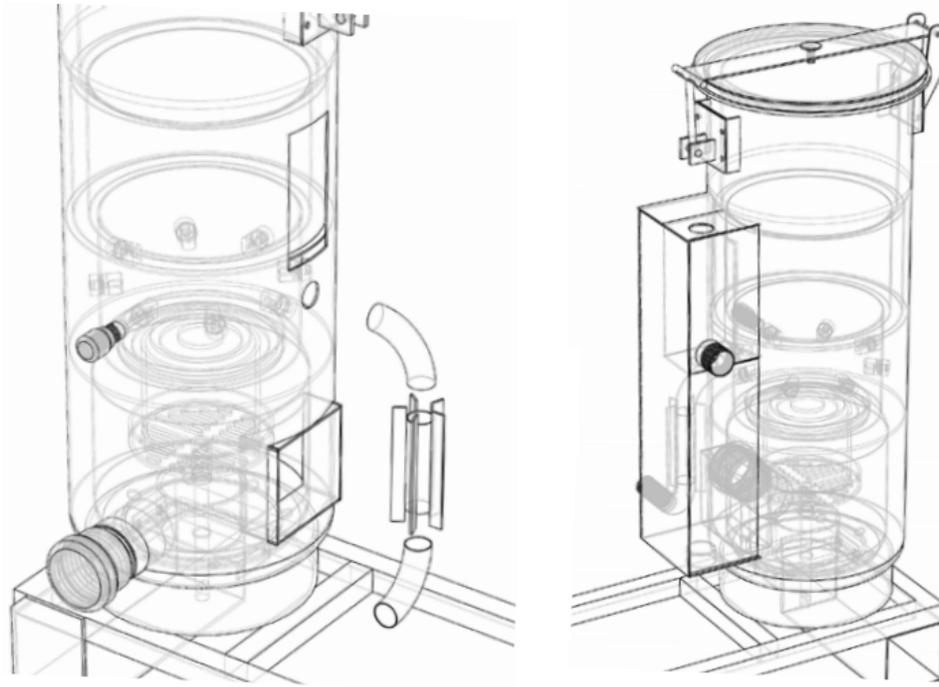
Sostiene el carbón dentro del tubo de reducción durante el tiempo necesario para que se efectúen las reacciones de reducción. Permite el paso del gas hacia el siguiente paso del proceso. Debido a que es el componente que soporta las temperaturas más altas, se sugiere que se fabrique con acero inoxidable.

### 2.5.2 Intercambiador de calor

El intercambiador de calor consiste en una pieza de tubería por la cual entra el aire para ser precalentado antes de entrar en el reactor. Esta pieza de tubería está contenida dentro de una caja en la que se concentra el calor del gas justo después de que este sale del reactor y antes de entrar en el acelerador de pirólisis. Este componente no es estrictamente necesario para el proceso de gasificación, sin embargo, este paso adicional puede ayudar a aumentar la eficiencia térmica del sistema ya que se aprovecha el calor residual en el gas para precalentar el aire que, de otra forma, debería ser calentado hasta que entre en el reactor, utilizando el calor de las reacciones de oxidación. En la figura 2.12 se ilustran tanto el intercambiador de calor como la caja de calor concentrado en la que este está alojado.

### 2.5.3 Acondicionamiento del gas

Como se ha mencionado previamente, el gas debe ser acondicionado una vez que sale del reactor de gasificación para poder ser utilizado en un motor de combustión interna. El proceso de acondicionamiento consiste de dos fases: enfriamiento y filtración.



**Figura 2.12:** Ilustración del intercambiador de calor del diseño original. [28]

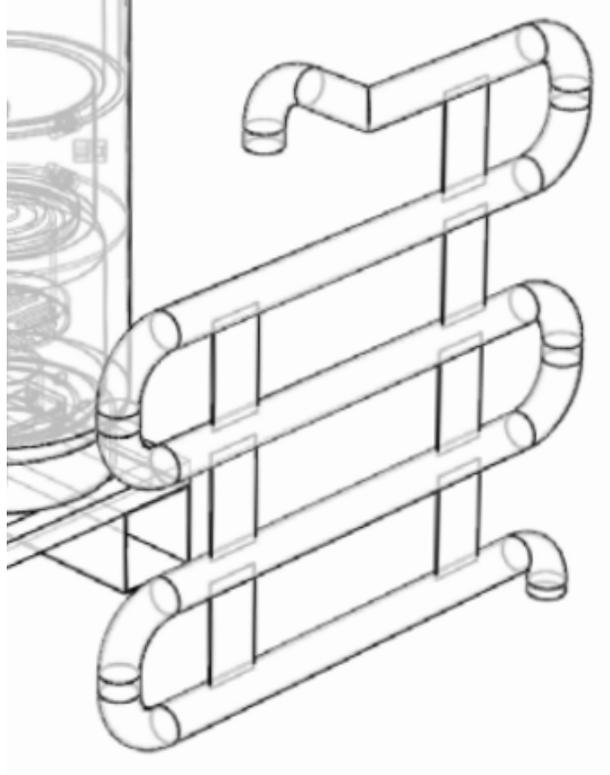
### Enfriamiento

Baja la temperatura del gas antes de alcanzar el filtro. Esto se hace primero transfiriendo calor del gas a la superficie de una longitud de tuberías y de la superficie de metal al ambiente. El objetivo de enfriar el gas es obtener un gas más denso y, además, proteger el motor de succión del sobrecalentamiento. El diseño original presenta un sistema de enfriamiento básico, tal y como se muestra en la figura 2.13.

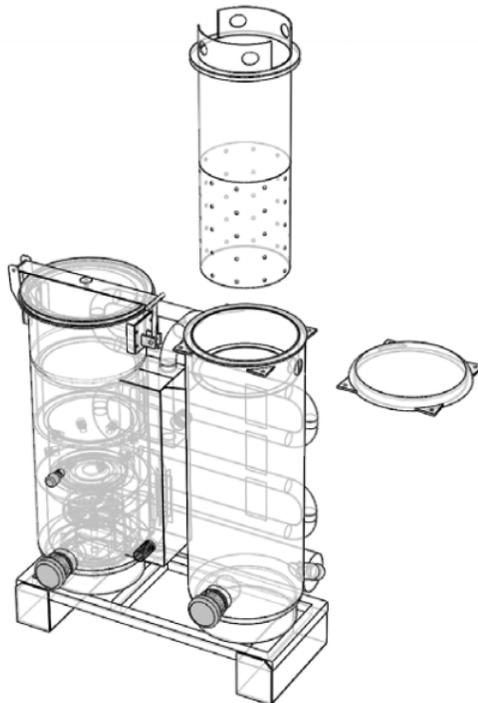
### Filtrado

El objetivo del sistema de filtrado es remover partículas de ceniza del gas. El filtro contiene material orgánico, así como esponjas para cumplir con este propósito. El ensamble del filtro se muestra en la figura 2.14. De la misma forma que el reactor de gasificación, el filtro se fabrica a partir de un tanque de propano de 100 lb.

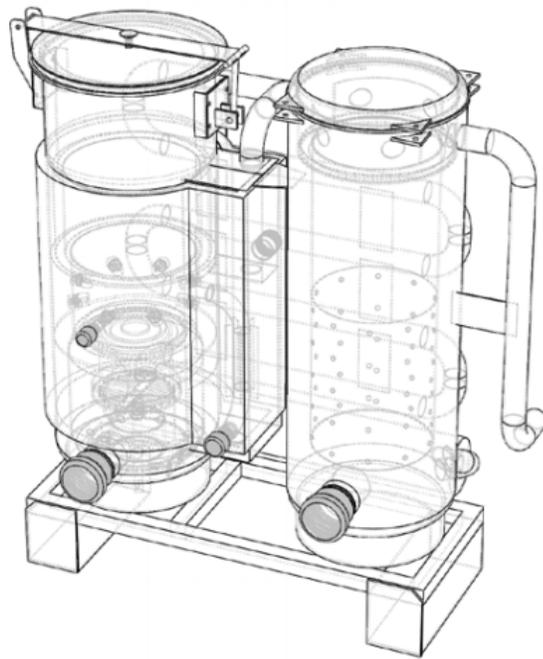
Finalmente, en la figura 2.15 se presenta una ilustración del resultado del ensamblaje de todos los componentes del gasificador, según como se planteó en el diseño propuesto por ECOPLANT.



**Figura 2.13:** Ilustración del sistema de enfriamiento del diseño original. [28]



**Figura 2.14:** Ilustración del ensamblaje del filtro del diseño original. [28]



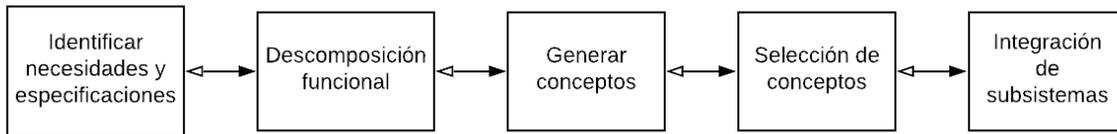
**Figura 2.15:** Ilustración del ensamblaje de los componentes del diseño original. [28]

# Capítulo 3

## Marco metodológico

En este capítulo se explica de manera exhaustiva el proceso mediante el cual se seleccionaron las mejores alternativas de solución para cada uno de los subproblemas identificados. La metodología aquí presentada se fundamenta en la que se expone en [34]. El presente proyecto se encuentra dentro de la clasificación «Mejoras incrementales a productos existentes» planteada por [34].

En la figura 3.1 se presenta el flujo de trabajo establecido por la metodología planteada en [34].



**Figura 3.1:** Metodología de trabajo propuesta. Adaptado de [34].

Como se puede ver en la figura 3.1, el proceso no tiene un flujo unidireccional, sino que es posible e incluso recomendable realizar correcciones sobre la marcha con base en la reflexión de los resultados de cada paso de la metodología.

A continuación, se explican los diferentes pasos de la metodología propuesta.

### 3.1 Identificación de necesidades y requerimientos

Al ser un proyecto de mejoras incrementales a un producto existente, fue necesario identificar con detalle las carencias existentes en el producto que debían ser abordadas con una mayor urgencia para cumplir con los objetivos del proyecto. Para esto se estableció una serie de consultas dirigidas al cliente con el objetivo de identificar esas carencias en el diseño original del producto. Además, se realizó el análisis del manual de diseño y construcción elaborado por el diseñador del equipo [28].

Con base en esto, se llevó a cabo el establecimiento de los requerimientos que inicialmente se propuso alcanzar al desarrollar la solución. Es importante recalcar que, al tratarse de un proyecto de ingeniería, este se lleva a cabo de forma recursiva por lo que los requerimientos que se propusieron inicialmente fueron modificados a lo largo del proyecto con base en la información recolectada durante el respectivo proceso de investigación. En la tabla 4.1 se presentan las necesidades y los requerimientos planteados inicialmente como parte del primer objetivo específico.

## 3.2 Descomposición funcional

Con el fin de entender con mayor claridad el problema, se realizó una descomposición funcional del mismo para poder llevar a cabo la solución como la composición de diferentes subproblemas más sencillos. Esta descomposición se realizó con base en el análisis de los resultados del primer paso de la metodología. Además, con esto se buscó enfocar la solución en los subproblemas más críticos y que permitirían satisfacer las necesidades del cliente en mayor medida. Para representar y poder entender mejor el problema y su relación con otras partes del sistema, se elaboró una descomposición funcional del equipo diseñado originalmente, añadiendo los bloques que se refieren al problema que se ha propuesto solucionar. En la figura 3.2 se presenta el resultado de la descomposición que se realizó.

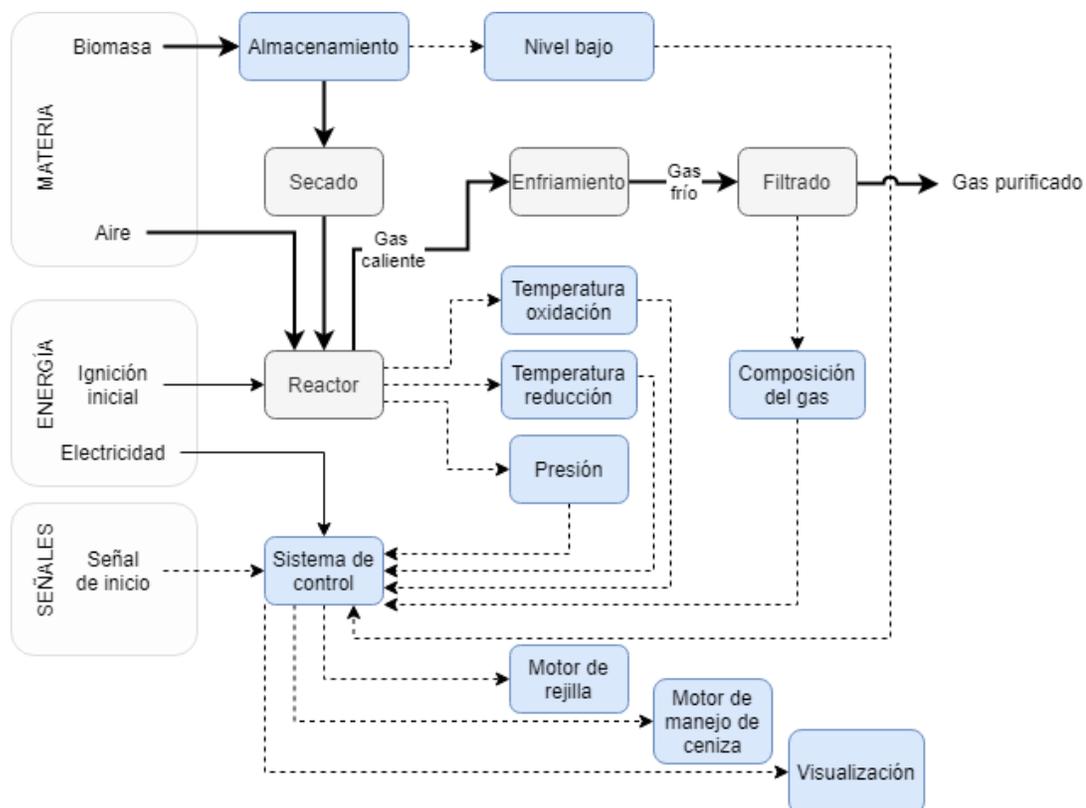


Figura 3.2: Descomposición funcional del producto. [Elaboración propia].

En dicha figura se presentan en tonalidad gris los bloques funcionales que son parte del diseño original y que no requieren de ningún tipo de intervención, mientras que en azul se muestran aquellos que se ha determinado que es importante diseñar o modificar para conseguir los objetivos planteados.

Para aumentar la autonomía del equipo, es crítico intervenir el bloque de almacenamiento de combustible para buscar incrementar el tiempo antes de requerir una nueva carga. Este bloque se ha identificado como la principal limitante del tiempo de operación sin requerir intervención por parte del operario.

Por otra parte, se ha identificado como necesario medir diferentes variables en el equipo para poder visualizarlas y tener mayor control sobre el funcionamiento del gasificador, logrando una menor producción de residuos sólidos, además de generar alertas y avisos útiles para el usuario durante la operación del equipo. Las variables que se consideró medir inicialmente son:

- Temperatura de oxidación
- Temperatura de reducción
- Presión
- Nivel bajo de combustible
- Composición del gas

Sin embargo, como se verá en el capítulo 4, como resultado de las iteraciones de diseño se determinó que no es indispensable medir todas estas variables para cumplir con los objetivos.

Además, se propuso integrar el control ya existente del motor de la rejilla con las mediciones de los sensores para de esta manera prevenir de mejor forma la acumulación de ceniza en la rejilla y mejorar el flujo de gas a través de esta. En cuanto al manejo de la ceniza, también se considera necesario diseñar un sistema que se encargue de esta función.

Por último, se clasificaron los diferentes bloques en tres subproblemas generales:

- Aumento de capacidad
- Sistema de mediciones
- Sistema de control

### 3.3 Generación de conceptos

Con base en la descomposición funcional, se generaron diferentes posibles conceptos de solución para los subproblemas identificados. En esta sección se presenta el proceso seguido

para determinar las diferentes opciones de solución a estos subproblemas. De acuerdo con [34], es de suma importancia generar una gran cantidad de posibles conceptos para poder considerar la mayoría de las opciones. Esto se logró realizando investigación en distintas fuentes relacionadas con el diseño, construcción y uso de gasificadores de biomasa. Estas fuentes fueron principalmente:

- Libros
- Artículos científicos
- Foros *web* sobre el tema
- Videos en internet
- Fabricantes (*benchmarking*)
- Expertos

Además, fue útil lo que [34] llama «búsqueda interna», refiriéndose a la generación de conceptos con base en el conocimiento personal. Seguidamente se presentan los principales conceptos que se generaron como posibles soluciones a los diferentes subproblemas.

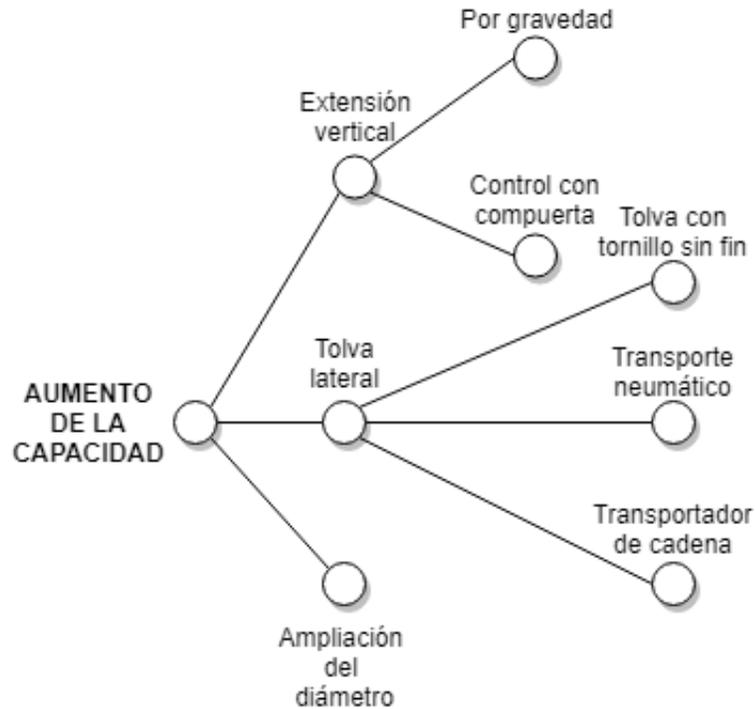
### 3.3.1 Aumento de capacidad

La solución de este subproblema está orientada a incrementar el tiempo de operación mediante el aumento de la cantidad de combustible que el reactor puede almacenar en una carga completa. Este es el subproblema que se ha identificado como crítico para la solución del problema planteado. Se consideraron diferentes opciones, organizadas en el árbol de clasificación que se presenta en la figura 3.3.

Seguidamente, se brinda una breve descripción de cada uno de los conceptos generados para la solución de este subproblema.

#### Extensión vertical con alimentación por gravedad

Se planteó aumentar la capacidad del depósito de almacenamiento de combustible extendiéndolo de forma vertical, es decir, incrementando su altura de forma proporcional al aumento del tiempo de operación continua requerido. El combustible se deposita de la misma forma que en el diseño original, con la salvedad de que la tapa del reactor se encontraría a una mayor altura. Aplicando este concepto, la forma en que el combustible pasa de la zona de almacenamiento a la zona donde se completan las diferentes reacciones de la gasificación es por su propio peso, de forma que no se requiere un control de componentes adicionales adicional.



**Figura 3.3:** Árbol de clasificación de conceptos generados para el subproblema de aumento de capacidad [Elaboración propia].

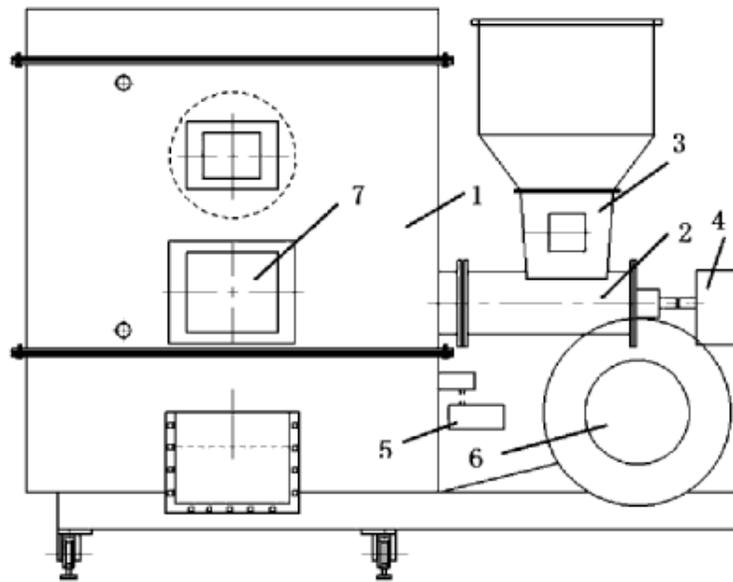
### Extensión vertical con control por compuerta

Esta alternativa es similar al anterior, con la diferencia de que el combustible no cae libremente sino que se dosifica por medio de una compuerta que se abre y se cierra según el nivel de combustible en el reactor de combustión para permitir que caiga una cantidad de biomasa dentro del reactor para que continúe el proceso de gasificación. La implementación de este concepto requeriría el diseño de un mecanismo adicional que controle la caída del combustible.

### Tolva con tornillo sin fin

Con base en la indagación de códigos CIP y patentes relacionadas, se encontró que una de las formas más utilizadas para el almacenamiento y transporte del combustible para diferentes tipos de dispositivos de combustión (entre los que se encuentran los gasificadores), son las tolvas con tornillos sin fin. Este concepto consiste en un contenedor paralelo al reactor de gasificación en donde se almacena el combustible, el cual es transportado hacia el reactor por medio de un tornillo sin fin a un ritmo determinado por el tiempo de residencia de la biomasa. En la figura 3.4 se ilustra el principio básico de este concepto.

En la figura 3.4, el elemento 1 representa el reactor de combustión, el cual recibe el combustible proveniente de la tolva 3 al ser transportado por el canal del tornillo sin fin 2, el cual a su vez es impulsado por el motor 4.



**Figura 3.4:** Ilustración del uso de una tolva con un tornillo sin fin para el almacenamiento y alimentación de biomasa a un reactor de combustión. [35]

### Tolva con transporte neumático

Por otra parte, también se encontró que se suele utilizar el método de transporte neumático para mover el combustible desde el depósito hasta el reactor. Este método suele ser utilizado en reactores de lecho fluido, ya que se aprovecha la velocidad del fluido de transporte para mantener el combustible en suspensión dentro del reactor. Este concepto se ilustra a grandes rasgos en la figura 3.5.

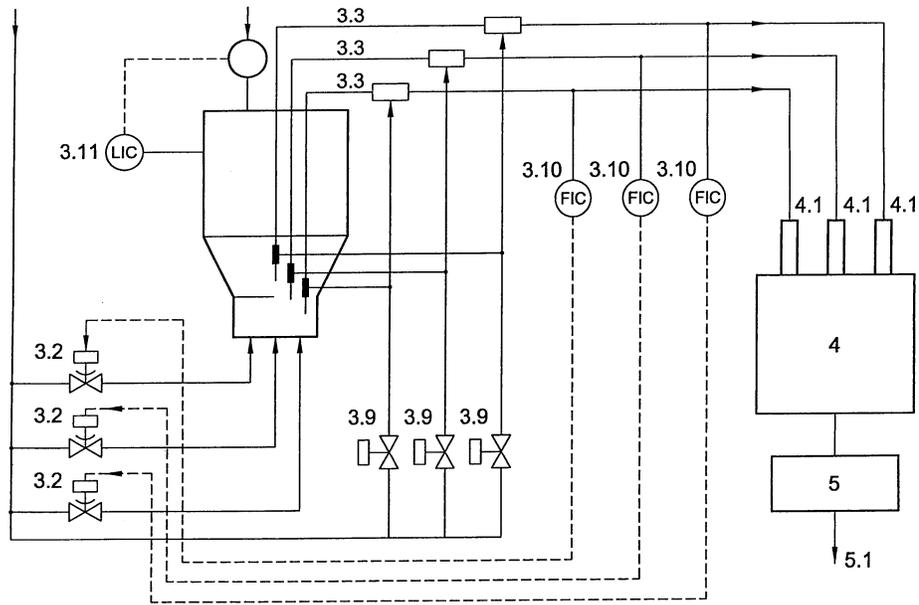
En este diagrama se identifica una serie de tuberías con el número 3.3, por las cuales se transporta el combustible impulsado por un flujo de aire desde la tolva hasta el reactor 4, en donde se lleva a cabo la combustión o gasificación.

### Tolva con transportador de cadenas

La última opción con una tolva adicional consiste en transportar la biomasa hacia el reactor por medio de un transportador de cadenas. Este tipo de mecanismo es ampliamente utilizado en diferentes industrias como la alimenticia, química, ambiental, energética, entre otras. Este método consiste en una cadena como la que se muestra en la figura 3.6 con paletas rígidas que mueven el producto a través de un conducto tubular.

### Ampliación del diámetro

Por último, se propuso aumentar la capacidad de almacenamiento de combustible simplemente diseñando un reactor similar al original con un mayor diámetro en la zona de secado y precalentado. De esta forma se podría almacenar un mayor volumen de



**Figura 3.5:** Ilustración del uso de una tolva con un transportador neumático para el almacenamiento y alimentación de biomasa a un reactor de combustión. [36]



**Figura 3.6:** Ilustración del uso de una tolva con un transportador de cadenas de tubo para el almacenamiento y alimentación de biomasa a un reactor de combustión. [37]

combustible. En caso de seleccionar este concepto, sería necesario redimensionar la zona de pirólisis y de combustión para que se mantenga la relación recomendada entre las diferentes dimensiones del reactor.

### 3.3.2 Sistema de mediciones

El sistema de mediciones consta del conjunto de sensores necesarios para la visualización de las variables de operación más importantes del proceso. Con base en la información recolectada durante el proceso de investigación se realizaron cambios a lo planteado inicialmente, específicamente en la lista de las variables que se propuso medir inicialmente. Se decidió medir solamente la temperatura y la presión en diferentes puntos de interés en el proceso. En el capítulo 4 se brinda una justificación de la razón por la que se descartó la medición de variables como el flujo del agente oxidante y la concentración de gases.

A continuación, se explican las diferentes opciones que se consideraron para la medición de la temperatura y la presión.

#### Temperatura

Se decidió medir la temperatura en dos puntos críticos del proceso: en la zona de oxidación y en la zona de reducción. A pesar de que en la industria generalmente se usan termopares para la medición de temperaturas, se consideraron otras opciones con el fin de determinar la más apropiada para la aplicación. Las alternativas que se barajaron con el fin de medir la temperatura son las que se presentan a continuación.

- **Termistor**

Los termistores son un tipo de sensor basado en semiconductores que utilizan la temperatura para cambiar el número de portadores que alcanzan la banda de conducción, alterando de esta forma la resistencia del elemento. El rango de temperaturas que se pueden medir con un termistor varía entre  $-100^{\circ}$  y  $300^{\circ}$ . [38]

- **RTD**

Por otra parte, se consideró utilizar RTD's (termorresistencias). A diferencia de los termistores, estos se basan en el cambio de resistencia de un conductor en función de la temperatura. El conductor más utilizado para la construcción de RTD's es el platino. Con este metal se pueden medir temperaturas entre  $-200^{\circ}$  y  $850^{\circ}$ .

- **Termopar**

Los termopares tienen un amplio rango de medición, con temperaturas desde  $-270^{\circ}$  hasta  $1500^{\circ}$ , según los materiales utilizados. Los termopares se basan en la diferencia de potencial que se genera al generar una diferencia de temperatura entre los extremos de dos hilos de diferentes metales unidos por uno de sus extremos. Son más económicos que los termistores y las termorresistencias, y a diferencia de estos, no experimentan autocalentamiento. Sin embargo, son más inestables y tienen una menor precisión. [38]

- **TDL**

Esta tecnología usualmente se utiliza para hacer análisis de gases *in situ*. Sin embargo, [26] presenta un método para medir, además, la temperatura del gas utilizando

la misma tecnología. Este método tiene la desventaja de que actualmente solo se ha probado en laboratorio, por lo que no está disponible comercialmente.

### 3.3.3 Sistema de control

Para el sistema de control se consideraron tres opciones, las cuales se comentan a continuación.

#### PLC

Los PLC son ampliamente utilizados en la industria para la automatización de procesos industriales. Con base en el estado de las diferentes entradas, modifica las salidas de acuerdo con el programa que tiene en la memoria. Al usar PLC es fácil implementar comunicación con otros sistemas, como un SCADA o un HMI por medio de distintos protocolos. Entre sus ventajas se encuentra la flexibilidad, robustez y confiabilidad, mientras que su precio es más elevado que el de otras opciones.

#### Microcontrolador

Los microcontroladores se caracterizan por ser aptos para realizar tareas puntuales como cálculos sencillos, control de actuadores y lectura de sensores. Su principal ventaja es el precio bajo en comparación con relación a otras alternativas como microprocesadores o PLC's. Tienen la desventaja de que para su programación se requiere de un nivel de conocimiento relativamente alto.

#### Lógica de relés

Se propone implementar el programa de automatización por medio de lógica combinatoria utilizando relés para el control de los diferentes actuadores. Representa una opción económica, sin embargo, no tiene la flexibilidad de alternativas como los PLC o los relés programables.

#### Relé programable

Son autómatas programables conocidos por su utilidad en pequeñas aplicaciones industriales y de domótica. Se programan de forma similar a los PLC's. Entre sus ventajas se encuentra el tamaño compacto, bajo costo en comparación con los PLC, aunque tienen características similares a estos en cuanto a robustez.

# Capítulo 4

## Mejoras incrementales a un gasificador de biomasa

Para la solución del problema planteado, se propone el diseño que se presenta en este capítulo. Se ha realizado una propuesta de rediseño y automatización de forma que se incremente la capacidad de operación a ocho horas. Esto se ha llevado a cabo en primera instancia con base en las necesidades expuestas por el profesor MSc. Juan Carlos Valverde Otárola (investigador de la Escuela de Ingeniería Forestal).

Además, para el desarrollo de la propuesta se ha considerado información bibliográfica de diferentes fuentes referentes a aspectos de diseño y construcción de gasificadores. A partir del análisis de esta información y siguiendo la metodología planteada, se elaboró una descomposición funcional del gasificador para poder llevar a cabo el diseño de la solución de una forma estructurada. Se tomó como base la descomposición utilizada para el diagnóstico y a partir de este punto, se realizó una descomposición menos abstracta, que se mostró en la figura 3.2.

Inicialmente, se consideraron los siguientes subproblemas:

- Sistema de medición: abarca el conjunto de los sensores que obtienen los datos que son insumo para el subsistema de visualización y el sistema de seguridad.
- Sistema de control: se incluye el control de actuadores como válvulas, succión de aire e ignición inicial.
- Aumento de capacidad: extensión del tiempo de operación mediante el aumento del volumen de almacenamiento.
- Manejo de la ceniza: sistema de disposición de los residuos sólidos del reactor.

## 4.1 Identificación de necesidades y requerimientos

A partir de conversaciones con los investigadores de ECOPLANT, se ha determinado una serie de requerimientos que el gasificador debe satisfacer. Además, estos requerimientos son una base para la determinación de los parámetros de diseño del equipo y determinar cuáles de ellos es necesario mejorar. En la tabla 4.1 se muestran las especificaciones establecidas para las mejoras necesarias.

**Tabla 4.1:** Requerimientos iniciales para las mejoras necesarias al diseño original. [Elaboración propia].

No.	Requerimiento	Valor	Unidades
1	Autonomía	7	h
2	Potencia	10	kW <sub>e</sub> /h
3	Volumen de almacenamiento de combustible	0,102	L
4	Altura máxima	2	m
5	Medición de temperatura		°C
6	Medición de presión		inH <sub>2</sub> O
7	Medición de flujo de agente oxidante		m <sup>3</sup> /min
8	Medición de concentración de oxígeno del agente oxidante		ppm
9	Medición de concentración de CO en el gas		ppm
10	Medición de concentración de CH <sub>4</sub> en el gas		ppm

## 4.2 Aumento de capacidad

Como se mencionó en el capítulo 3, este es el principal subproblema a abordar para conseguir la extensión de la capacidad de operación del gasificador sin requerir intervención del operario.

Para este punto se han establecido una serie de requerimientos referentes al sistema de aumento de capacidad del gasificador, los cuales se exponen en la tabla 4.2.

**Tabla 4.2:** Requerimientos para el subsistema de aumento de la capacidad del gasificador. [Elaboración propia].

No.	Métrica	Valor	Unidades
1	Volumen adicional	0,055	m <sup>3</sup>
2	Volumen total	0,102	m <sup>3</sup>
3	Masa adicional de biomasa (aprox.)	30,3	kg
4	Masa total de biomasa	56,1	kg
5	Altura máxima	2	m

Teniendo en cuenta estos requerimientos se realizó un proceso de selección estructurado

para la selección de la mejor opción de entre las que se presentaron en la sección 3.3.1 del capítulo anterior. Con base en un análisis previo, se ha descartado inicialmente el concepto Tolva con transportador neumático.

Este concepto no se consideró para la evaluación de conceptos principalmente por dos razones. La primera de ellas es que conlleva una complejidad técnica adicional que no se justifica para la solución del problema planteado. Por ejemplo, el requerimiento adicional de una bomba de aire y el diseño de la tubería correspondiente. Por otra parte, es contraproducente para el funcionamiento de un gasificador de tipo *downdraft*, ya que esto proporcionaría una cantidad adicional de oxígeno, lo cual podría aumentar el ER hasta valores inaceptables, reduciendo la calidad del gas producido y la eficiencia del proceso.

Los criterios establecidos para la selección del mejor concepto se detallan a continuación.

- Compactibilidad: es la característica del depósito de mantener el tamaño compacto del gasificador. Es importante ya que una de las principales características ventajosas del diseño original es precisamente su tamaño compacto.
- Escalabilidad: se refiere a la aptitud de un determinado concepto para aumentar la capacidad de almacenamiento.
- Mantenimiento: se considera la necesidad de mantenimiento que requiere el sistema seleccionado.
- Complejidad técnica: este criterio se refiere a la complejidad de diseño e implementación del concepto seleccionado. En este caso, una complejidad alta tiene una nota menor que una complejidad baja.
- Facilidad de llenado del depósito: se refiere al nivel de complejidad con que se lleva a cabo la operación de recarga de combustible.
- Consumo de energía: este criterio tiene una importancia alta debido a que es contraproducente que un dispositivo diseñado para generar energía tenga un alto consumo energético.

Inicialmente se consideró utilizar la altura como un criterio de selección más, sin embargo, este criterio no sería relevante en la evaluación ya que todos los conceptos propuestos representan un incremento similar en la altura total del sistema.

El proceso de selección de conceptos se documenta en la tabla 4.3. Cada criterio se evalúa con una escala de 1 a 5, donde 1 representa Malo y 5 Excelente.

Al realizar la evaluación, puede notar que el criterio de facilidad de llenado no aporta en gran medida a la evaluación, ya que una escala que originalmente estaba en un rango de 1 a 5, se vio reducida a un rango con una diferencia de 1 entre los extremos. Por otra parte, podría llamar la atención del lector el hecho de que la ampliación del diámetro obtenga una nota baja en el criterio de simplicidad técnica. Esto se debe a que una modificación

**Tabla 4.3:** Matriz de evaluación para la selección de conceptos para el aumento de capacidad. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Conceptos							
		Vertical por gravedad		Vertical con compuerta		Tolva con tornillo sin fin		Ampliación del diámetro	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Compactibilidad	18	5	0,9	5	0,9	2	0,36	3	0,54
Escalabilidad	14	2	0,28	2	0,28	3	0,42	1	0,14
Mantenimiento	17	5	0,85	3	0,51	1	0,17	5	0,85
Simplicidad técnica	17	5	0,85	3	0,51	1	0,17	2	0,34
Facilidad de llenado	18	2	0,36	2	0,36	3	0,54	3	0,54
Consumo de energía	16	5	0,8	3	0,48	1	0,16	5	0,8
Total			4,04		3,04		1,82		3,21

en el diámetro del reactor con el objetivo de una mayor capacidad de almacenamiento implica el rediseño de las dimensiones de los componentes internos del gasificador del diseño original. El concepto seleccionado es el de Extensión vertical con alimentación por gravedad. Este presenta una ventaja sobre los otros conceptos en la mayoría de los criterios. Uno de sus principales puntos débiles es el de Escalabilidad, debido a que incrementar la altura conlleva el riesgo de subir el centro de masa del reactor, reduciendo la estabilidad del sistema. Sin embargo, los otros conceptos no presentan una mayor ventaja en este criterio, por lo que es un riesgo que es necesario abordar independientemente de la alternativa que se seleccione.

Para el diseño, inicialmente se consideraron las dimensiones con base en los requerimientos de la tabla 4.2. Se consideró el volumen adicional necesario a partir del volumen de un cilindro, teniendo como restricción la altura máxima permitida de 2 m, como se muestra en la ecuación 4.1:

$$V_{extra} = \pi r^2 h \implies r = \sqrt{\frac{0,055 \text{ m}^3}{\pi \cdot (2 - 1,3) \text{ m}}} = 0,158 \text{ m} \quad (4.1)$$

La altura del gasificador en el diseño original es de 1,3 m, por lo que se obtiene una altura adicional de  $2 - 1,3 = 0,7 \text{ m}$ . Con esta altura adicional se calcula un radio de  $0,158 \text{ m}$ . Como se mencionó en la sección 2.5, el radio externo del reactor corresponde al de un tanque de propano de 100 lb con un radio de  $7,35 \text{ in.}$  ( $0,187 \text{ m}$ ), por lo que se ha decidido diseñar el tanque de almacenamiento con un radio tal que coincida con el del reactor. Esto proporciona un volumen total que se calcula en la ecuación 4.2:

$$V_{adicional} = \pi \cdot (0,187 \text{ m})^2 \cdot 0,7 \text{ m} = 0,077 \text{ m}^3 \quad (4.2)$$

Esto resulta en un volumen total de  $0,047 \text{ m}^3 + 0,077 \text{ m}^3 = 0,124 \text{ m}^3$ . Teniendo en cuenta que se buscaba un volumen total de  $0,102 \text{ m}^3$ , hacer que el diámetro del depósito adicional

coincida con el del reactor hace que se obtenga un 21,6 % de espacio más que el se había planteado inicialmente en la tabla 4.2, tal y como se muestra en la ecuación 4.3:

$$\%V_{extra} = \frac{|0,102 m^3 - 0,124 m^3|}{0,102 m^3} \cdot 100 = 21,6\% \quad (4.3)$$

Por lo tanto, se tienen las siguientes dimensiones finales para el depósito adicional:

- $D = 0,373 m$
- $h = 0,7 m$
- $V = 0,077 m^3$

Con estas dimensiones, se tiene un valor para el tiempo de operación continua tal y como se muestra en la ecuación 4.4, de acuerdo con las condiciones de la tabla A.1.

$$T = t_{original} + t_{adicional} = 3,24h + 0,077 m^3 \cdot \frac{690 kg}{m^3} \cdot \frac{kW \cdot h}{1 kg} \cdot \frac{1}{10 kW} = 8,6 h \quad (4.4)$$

Para determinar el espesor del tanque es necesario considerar el peso específico del combustible y las características del material de fabricación. De acuerdo con [31], para tanques con un diámetro menor a 3200 mm se debe usar la ecuación 2.5. En la ecuación 4.5 se presenta el cálculo correspondiente.

$$t = \frac{0,005 \cdot 37,34 cm \cdot (70 cm - 30,48) \cdot 1}{0,75 \cdot 1476 kg/cm^2} + 0,2 cm = 0,21 cm = 2,1 mm \quad (4.5)$$

De acuerdo con lo anterior, el espesor mínimo es de 2,07 mm, por lo que se seleccionó el espesor de *stock* cercano, pero superior al valor obtenido mediante la fórmula. Se seleccionó un espesor de 2,38 mm (3/32 in.).

Para la construcción se eligió el acero A-36 debido a su buena soldabilidad, la disponibilidad y bajo costo. Además, no se requiere una resistencia particular a la temperatura debido a que solamente estará expuesto a temperaturas menores a 200 °C. En la tabla 4.4 se presentan las diferentes opciones de material que se consideraron para la construcción del depósito adicional, así como sus principales características.

**Tabla 4.4:** Matriz de evaluación para la selección del material para el depósito adicional de combustible. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Materiales					
		A36		A1011		A992	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Esfuerzo a la fluencia	25	2	0,5	3	0,75	5	1,25
Esfuerzo a la tensión	20	5	1	2	0,4	5	1
Costo	27	5	1,35	3	0,81	2	0,54
Resistencia a la corrosión	28	5	1,4	3	0,84	4	1,12
Total			4,25		2,8		3,91

Por otra parte, se decidió unir el tanque adicional al reactor por medio de una conexión bridada y no soldada con el fin de tener acceso al interior en caso de requerirse algún tipo de mantenimiento o sustitución de partes, como el plato de ahogamiento para el funcionamiento del gasificador con motores con diferentes requerimientos.

En la figura 4.1 se presenta un modelo del diseño realizado.



**Figura 4.1:** Ilustración de subsistema de aumento de capacidad. [Elaboración propia].

A continuación se presentan las especificaciones del gasificador que se han cambiado a

raíz del diseño de la ampliación del depósito de combustible.

**Tabla 4.5:** Resumen de las principales especificaciones modificadas. [Elaboración propia].

No.	Métrica	Valor original	Valor nuevo	Incremento	Unidades
1	Volumen total de almacenamiento	0,047	0,124	0,077	m <sup>3</sup>
2	Masa total de combustible	32	86	54	kg
3	Tiempo de operación	3,24	8,6	5,36	h

### 4.3 Sistema de medición

Fue necesario seleccionar sensores para medir las variables de interés en el proceso de gasificación. En esta sección se describe el proceso de selección de cada uno de ellos.

#### 4.3.1 Sensores de temperatura

Como se mencionó en la sección 2.3.2, para la medición de temperaturas dentro de un gasificador generalmente se utilizan termopares de tipo K, aunque se consideraron otras opciones. A continuación, se detalla el proceso de selección que realizó. En la tabla 4.6 se muestra la matriz de evaluación utilizada para la selección de los sensores, según la metodología propuesta.

**Tabla 4.6:** Matriz de evaluación para la selección de sensores de temperatura. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Conceptos							
		Termistor		RTD		Termopar		TDL	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Sensibilidad	10	4	0,4	3	0,3	1	0,1	5	0,5
Tiempo de respuesta	13	4	0,52	2	0,26	3	0,39	5	0,65
Rango de temperatura	20	1	0,2	3	0,6	5	1	5	1
Resistencia a condiciones extremas	21	2	0,42	3	0,63	4	0,84	5	1,05
Disponibilidad	19	4	0,76	3	0,57	3	0,57	1	0,19
Costo	17	2	0,34	3	0,51	4	0,68	1	0,17
Total			2,64		2,87		3,58		3,56

En general, en los gasificadores comerciales se utilizan termopares para la medición de temperatura, lo cual se reafirma mediante la evaluación hecha para la selección de la tec-

nología de medición. A pesar de que la tecnología TDL ofrece muchas características favorables, esta no se encuentra disponible comercialmente para la medición de temperatura, por lo que se eligió utilizar termopares. A pesar de que es necesario medir la temperatura en una serie de puntos con diferentes temperaturas, las características de los termopares los hacen apropiados para la medición de temperatura en las diversas etapas del proceso.

Se seleccionó un termopar de la marca Reotemp por su disponibilidad en el país. Se decidió utilizar un termopozo cónico, ya que estos ofrecen resistencia mecánica a la abrasión y son aptos para el uso con temperaturas altas y vibración, además de un tiempo de respuesta menor que el de los termopozos rectos [39], aunque esto no es un factor crítico para la aplicación. En la tabla 4.7 se muestra el proceso de selección para el termopozo más apropiado.

**Tabla 4.7:** Matriz de evaluación para la selección del termopozo. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Termopozos					
		Termopozo recto		Termopozo cónico		Termopozo escalonado	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Resistencia a la abrasión	21	5	1,05	4	0,84	2	0,42
Temperatura máxima	22	5	1,1	5	1,1	3	0,66
Tiempo de respuesta	17	1	0,17	3	0,51	5	0,85
Aptitud para flujo de alta velocidad	19	2	0,38	5	0,95	3	0,57
Resistencia mecánica	21	5	1,05	5	1,05	1	0,21
Total			3,75		4,45		2,71

La conexión al proceso consiste en una rosca NPT de 0,5 in. Para determinar la longitud, se consideró una capa aislante de aproximadamente 25,4 mm (1 in.) de espesor, incluida en el diseño original, además del diámetro de 14,7 in. (radio de 7,35 in.) del tanque de propano que se sugiere en el diseño original. Por lo tanto, se decidió usar un termopar de 9 in., de forma que la junta caliente del mismo se encuentre aproximadamente en el centro del reactor.

En cuanto a la calibración, se consultó al distribuidor de la marca en el país si los dispositivos son comercializados con la calibración requerida por el cliente. Se determinó que los transmisores son calibrados por el fabricante según los requerimientos establecidos por el cliente. De esta forma, se requiere que los termopares sean calibrados para la medición de entre 200 y 1200° C.

Por otra parte, Reotemp ofrece diferentes transmisores de temperatura que funcionan con diversos estándares de comunicación. En la tabla 4.8 se muestra la evaluación realizada para la selección del protocolo más apropiado.

**Tabla 4.8:** Selección del estándar de salida para los sensores de temperatura. [Elaboración propia.]

Criterio	Peso	Conceptos			
		0-10 V		4-20 mA	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Compatibilidad	27	5	1,35	4	1,08
Inmunidad al ruido	28	2	0,56	5	1,4
Inmunidad a caídas de tensión	24	2	0,48	5	1,2
Facilidad de troubleshoot	21	3	0,63	3	0,63
Total			3,02		4,31

### 4.3.2 Medición de gases y flujo

Durante el desarrollo del proyecto, y con base en la información recolectada de distintas fuentes durante el proceso de investigación, se decidió que no es indispensable la medición de estas variables para la solución del problema planteado. A continuación se exponen las principales razones por las que se excluyó del diseño la medición de estas variables.

Una de las variables más importantes para el control de un gasificador es el ER. Con un ER apropiado, se puede obtener un gas con mayor calidad que si no se tiene control del mismo, ya que si este es mayor que lo recomendado, se podría producir una reacción de combustión completa en la zona de oxidación, reduciendo la calidad del gas. La cantidad de agente oxidante para realizar una combustión completa depende del diseño de cada gasificador y es una constante. Para calcular el ER se utiliza esta constante y el valor del flujo de agente oxidante. A pesar de la importancia de este parámetro, el problema planteado no consiste en la mejora de la calidad del gas, sino en la extensión del tiempo de operación. El valor del ER no tiene relación directa con el tiempo de operación del gasificador, por lo que controlarlo se sale del alcance del proyecto y se decidió descartar la medición del flujo del agente oxidante.

Siguiendo un razonamiento similar, se decidió excluir la medición de la concentración de diferentes compuestos en el gas. La medición de la calidad del gas usualmente se implementa como parte de un sistema de control de lazo cerrado, en donde se tiene como variables de entrada el valor del ER y la concentración de CO o H<sub>2</sub> en el gas producido. Para esto, es necesario modelar el comportamiento del gasificador, para lo cual es necesario realizar ensayos sobre el dispositivo.

A pesar de que la medición y el control de estas variables no son indispensables para la solución del problema planteado, es recomendable tenerlas en cuenta para mejorar el rendimiento del sistema en una futura intervención.

## 4.4 Sistema de control

Este subsistema es el que se encarga de controlar los diferentes actuadores del gasificador. Está en comunicación con el subsistema de medición para realizar acciones en función de

las lecturas de los diferentes sensores. En este subsistema se incluye la unidad de control y los actuadores controlados por esta como las electroválvulas, el motor de succión y el motor de la rejilla. Se ha decidido que las acciones que son susceptibles a automatización son el proceso de encendido, el movimiento de la rejilla de la reducción y la secuencia de apagado. En esta sección se detalla el proceso de ingeniería llevado a cabo para el diseño del sistema de control.

#### 4.4.1 Controlador

Para la adquisición de los datos medidos por los sensores y el control de los diferentes actuadores, fue necesario seleccionar una unidad de control. Se consideraron varias opciones para seleccionar la que mejor se adapta a los requerimientos del sistema. A continuación se presentan los criterios utilizados para la selección de la unidad de control.

- **Compatibilidad**

Se consideró la capacidad de las diferentes alternativas para su uso con diferentes protocolos frecuentemente utilizados en el entorno de la automatización industrial.

- **Facilidad de programación**

Este criterio se refiere al nivel de conocimientos necesario para la programación o implementación de una u otra alternativa.

- **Flexibilidad** Debido a que el gasificador se encuentra en un proceso de mejora, se tomó en cuenta la facilidad con la que se puede modificar el programa o la configuración de las diferentes opciones de solución en caso de requerirlo.

- **Facilidad de *troubleshooting***

Se tomó en cuenta este criterio debido a que no siempre es posible que haya una persona con un nivel de conocimiento elevado en caso de que sea requerido si se llega a presentar algún problema con la unidad de control. Lo ideal es llevar a cabo un proceso de *troubleshoot* rápido y sencillo.

- **Costo**

Se refiere al costo económico de la implementación de una u otra opción.

- **Robustez**

En este criterio se considera la capacidad del dispositivo para resistir ambientes con altas temperaturas y vibración.

En la tabla 4.9 se presentan las diferentes opciones que se han considerado y el proceso de evaluación para la selección de una de ellas.

De acuerdo con la evaluación realizada, las alternativa más apropiadas para la unidad de control son un PLC y un relé programable. Sin embargo el relé programable cuenta con una ventaja en cuanto al costo. Por otra parte, en esta aplicación particular no se

**Tabla 4.9:** Matriz de evaluación para la selección de la unidad de control. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Conceptos							
		PLC		Relé programable		Microcontrolador		Lógica de relés	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Compatibilidad	15	5	0,75	5	0,75	3	0,45	1	0,15
Facilidad de programación	16	5	0,8	5	0,8	1	0,16	3	0,48
Flexibilidad	18	5	0,9	5	0,9	3	0,54	1	0,18
Facilidad de troubleshoot	15	5	0,75	5	0,75	1	0,15	3	0,45
Costo	18	1	0,18	3	0,54	5	0,9	4	0,72
Robustez	18	5	0,9	5	0,9	2	0,36	4	0,72
Total			4,28		4,64		2,56		2,7

aprovecharía al máximo la capacidad de un PLC, pues solo se requieren algunas entradas y salidas. Por lo tanto, se ha optado por el uso de un relé programable. En la tabla 4.10 se exponen las opciones comerciales que fueron consideradas y las características de cada una de ellas.

**Tabla 4.10:** Matriz de evaluación para la selección de una opción comercial para el controlador. [Elaboración propia].

Criterio	Peso (%)	Controladores			
		LOGO!		Zelio	
		Puntaje	Evaluación ponderada	Puntaje	Evaluación ponderada
Cantidad de entradas	23	1	0,23	5	1,15
Cantidad de salidas	21	5	1,05	5	1,05
Costo	19	5	0,95	1	0,19
Corriente de salida	20	5	1	5	1
Soporte del fabricante	17	5	0,85	1	0,17
Total			4,08		3,56

Se seleccionó el controlador LOGO! 12/24RCE de Siemens con base en la evaluación realizada. En la figura 4.2 se ilustra el controlador seleccionado.

#### 4.4.2 Producción de gas

Luego de provocar la ignición del combustible en el interior del reactor, una vez que se logra generar gas con una calidad que permita una combustión constante, se procede a la etapa de producción de gas. Uno de los principales factores que limitan el rendimiento de un gasificador es la saturación de ceniza en la reducción. Una de las formas utilizadas para determinar cuándo hay saturación de ceniza es midiendo el flujo de gas a la salida del reactor. Sin embargo, el flujo es dependiente de la carga del gasificador, es decir,

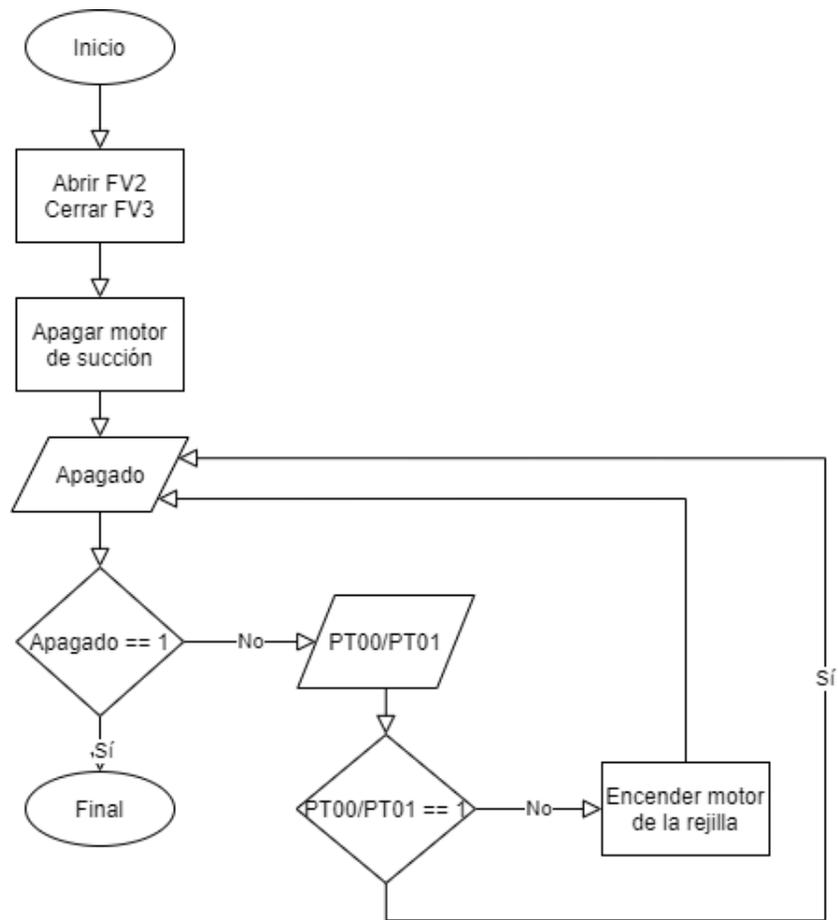


**Figura 4.2:** Ilustración del relé programable seleccionado. [40].

cambia de acuerdo con la presencia o no de un generador que consuma el gas producido, así como de la potencia requerida por el mismo.

De acuerdo con [41], una forma que es independiente del flujo para determinar cuándo la acumulación de ceniza está provocando resistencia al paso de gas es midiendo la relación entre la presiones justo antes y después de la reducción. Se ha decidido utilizar este método debido a su independencia del flujo de aire y gas dentro del sistema. El criterio para determinar cuándo mover la rejilla consiste en determinar cuándo la relación entre la caída de presión por las toberas de inyección de aire y la caída a través de la cama es diferente a 1. Dicho de otra forma, se debe mover la rejilla cuando la caída a través de la cama es mayor que la caída por las toberas.

Como se indica en el anexo A, la rejilla en el diseño original se mueve con una frecuencia fija establecida por un relé temporizador, por lo que no se considera si existe o no saturación de ceniza. Por lo tanto, se decidió utilizar las mediciones de presión correspondientes para controlar el movimiento de la rejilla según el criterio establecido por [41]. En la figura 4.3 se presenta el diagrama de flujo del funcionamiento del sistema de automatización durante el proceso de producción de gas.



**Figura 4.3:** Diagrama de flujo de la automatización de la producción de gas. [Elaboración propia].

## 4.5 Adaptaciones mecánicas

El diseño que se intervino ha sido validado previamente de forma experimental, por lo que el diseño mecánico en este proyecto se limitó a diseñar las adaptaciones necesarias para la implementación del sistema de automatización y el aumento de la capacidad de combustible. En esta sección se presenta el proceso de ingeniería para el diseño de los cambios necesarios en cuanto al componente mecánico del sistema de automatización.

### 4.5.1 Adaptaciones para el sistema de automatización

A continuación, se presenta el proceso de diseño seguido para cada una de las adaptaciones realizadas al diseño original, relacionadas con el sistema de automatización.

## Termopares

En la sección 4.4 se realizó la selección del termopar y del respectivo termopozo. Con base en las especificaciones mecánicas del termopozo, se realizó el diseño de los puertos de medición de temperatura. En la tabla 4.11 se resumen dichas especificaciones.

**Tabla 4.11:** Especificaciones mecánicas del termopozo seleccionado. [39]

No.	Métrica	Valor
1	Tipo de termopozo	Cónico
2	Diámetro mayor	17,272 mm
3	Diámetro menor	15,875 mm
4	Longitud total	235 mm
5	Longitud del elemento	229 mm
6	Conexión al proceso	1/2 - 14 in. NPT
7	Material	SS 316

A partir las especificaciones presentadas en la tabla 4.11, se ha diseñado un puerto roscado para la conexión de los termopozos al reactor de gasificación. Este estará soldado en la capa más externa del reactor, de forma que se mantenga fijo. Además, fue necesario considerar el hecho de que existe la posibilidad de cambiar el reactor de reducción por otro con dimensiones diferentes de acuerdo con la potencia requerida por la carga del gasificador. Por esta razón se decidió utilizar termopozos roscados y no soldados, ya que estos obstruirían el acceso al reactor de reducción e impedirían poder cambiarlo.

El material seleccionado es acero inoxidable 316 (el mismo que el termopozo), ya que este ofrece una alta resistencia a la temperatura y a la corrosión [42].

En la figura 4.4 se muestra una representación gráfica del conjunto de un termopozo y su correspondiente puerto de medición.



**Figura 4.4:** Renderizado de la conexión de un termopozo con su puerto de medición. [Elaboración propia].

### Panel de control

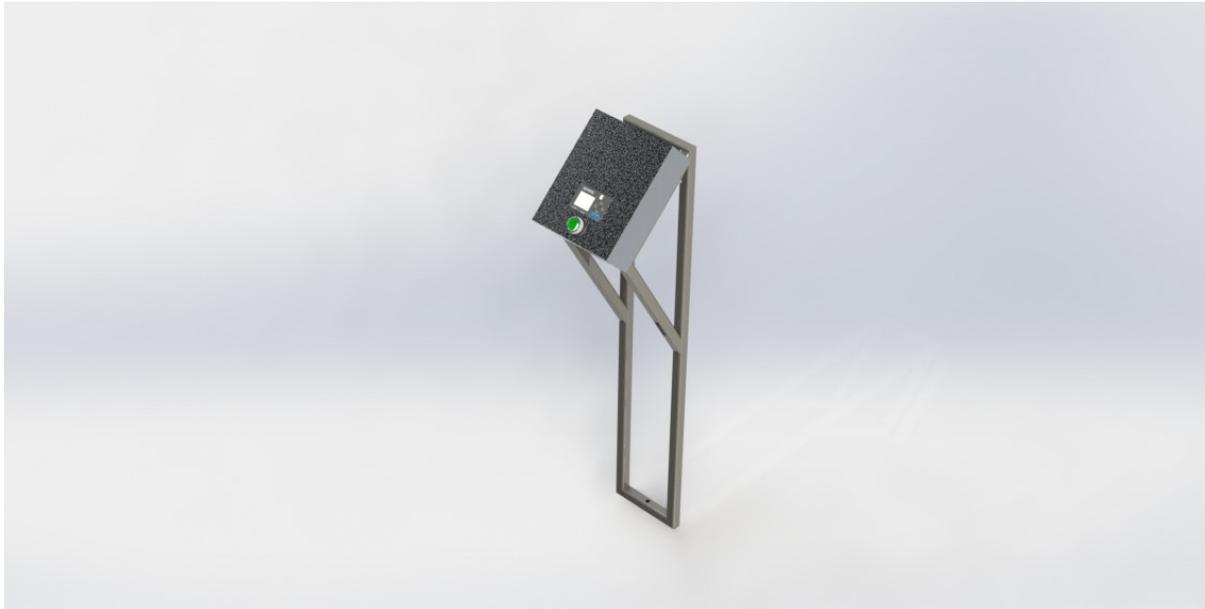
Se diseñó un panel para situar el sistema de control. Este no se verá expuesto a cargas mecánicas de consideración, pues su única función es albergar los componentes del sistema de control, los cuales en conjunto tienen un peso menor a 1 kg. Sin embargo, fue necesario tener en cuenta consideraciones dimensionales relacionadas con la ergonomía y con el espacio predispuesto para nuevos componentes.

Se partió de las dimensiones del componente más grande, el LOGO!. Las dimensiones máximas del LOGO! son 71,5x90x60 mm (WxHxD). Además, este se puede acoplar a un riel estándar DIN de 35 mm. Por lo tanto, se diseñó un panel con un espacio suficiente para albergar dos LOGO! como medida para la inclusión de otros elementos como podría ser un módulo de expansión de salidas. Por otra parte, se diseñó con una altura máxima de 100 cm con el propósito de ser cómodo para el usuario. Sin embargo, esta no es una dimensión de gran importancia debido a que no es necesario que el usuario realice operaciones repetitivas en él. En la tabla 4.12 se especifican las principales dimensiones sobre las cuales se basó el diseño del panel de control.

**Tabla 4.12:** Dimensiones base para el diseño del panel de control. [Elaboración propia].

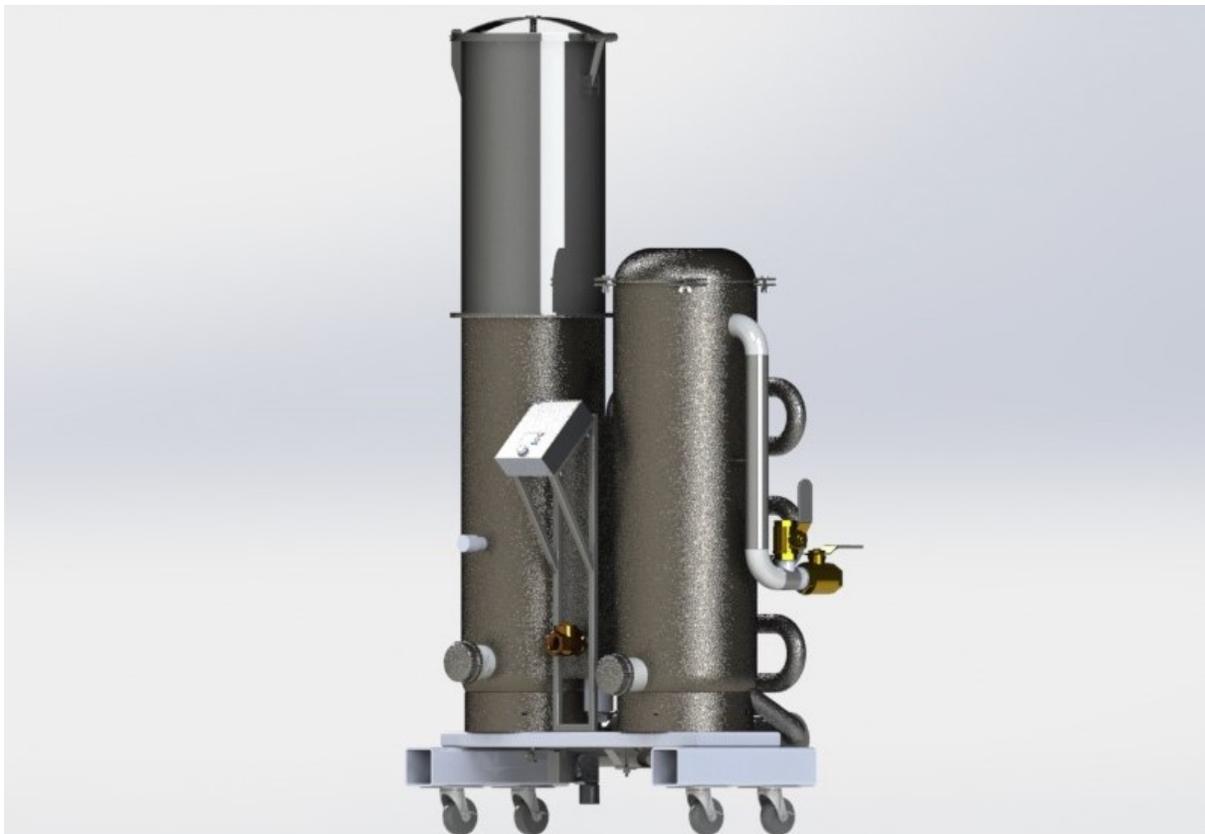
No.	Dimensión	Medida (mm)
1	Ancho	170
2	Altura	210
3	Profundidad	65
4	Altura sobre el nivel del suelo	1 m (máx)

En la figura 4.5 se muestra una imagen ilustrativa del diseño del panel.



**Figura 4.5:** Renderizado del modelo del panel de control. [Elaboración propia].

En la figura 4.6 se presenta un modelo del producto final.



**Figura 4.6:** Representación gráfica del resultado final. [Elaboración propia].

A modo de comparación, en la figura 4.7 se muestra un modelo del diseño original.



**Figura 4.7:** Representación gráfica del diseño original. [Elaboración propia].

# Capítulo 5

## Resultados y análisis

En este capítulo se presentan los resultados de las diferentes pruebas de validación que se han realizado para validar el diseño de los diferentes subproblemas planteados y se lleva a cabo el análisis de las implicaciones de dichos resultados.

### 5.1 Aumento de capacidad

Para la validación se realizó una serie de análisis de elementos finitos con diferentes valores para los factores de influencia establecidos. Esto se hizo con el fin de analizar los esfuerzos a los que estaría sometido el tanque diseñado bajo diferentes condiciones de operación. Se realizó un experimento con el objetivo de determinar cual es el factor crítico y si los esfuerzos en el tanque de almacenamiento se encuentran dentro de valores aceptables cuando el factor crítico se encuentra en un valor extremo. Los factores de influencia establecidos son:

- Altura de llenado del tanque de almacenamiento
- Temperatura de la pared del tanque de almacenamiento

Por otra parte, la variable de respuesta es el esfuerzo máximo de von Mises. En la tabla 5.1 se presenta la selección de los niveles de los factores que influyen en el resultado de los esfuerzos.

**Tabla 5.1:** Selección de los niveles de los factores de influencia del esfuerzo en el tanque de almacenamiento. [Elaboración propia].

Factor	Nivel	Asignación	Valor
Temperatura	1	A	175 °C
	2	B	250 °C
Nivel de combustible	1	C	60 %
	2	D	100 %

Debido a que la validación se realizó por medio de análisis de elementos finitos, se decidió realizar solo un ensayo por cada tratamiento, ya que por tratarse de un algoritmo computacional, se obtendría exactamente el mismo resultado en cada repetición del ensayo. De esta forma se realizó un total de 4 simulaciones mediante análisis de elementos con el complemento de simulación de Solidworks. En la tabla 5.2 se resumen los resultados de la validación. En el anexo C se presentan estos resultados de forma gráfica, obtenidos directamente de la simulación en SolidWorks.

**Tabla 5.2:** Esfuerzos de von Mises máximos en las pruebas de validación del tanque de almacenamiento. [Elaboración propia].

Tratamiento	Máximo esfuerzo (MPa)
AC	160,8
AD	175,4
BC	239,7
BD	241,0

Como se evidencia en la tabla 5.2, el esfuerzo máximo se da cuando la carga es máxima y la temperatura es la mayor temperatura que típicamente se puede encontrar en la zona de secado, según la teoría. Este valor es de aproximadamente 241,0 MPa y se da de una manera uniforme cerca del anillo inferior, pues es donde la temperatura es mayor provocando una mayor deformación debido a la dilatación térmica. Este valor es menor que el valor del esfuerzo a la fluencia mínimo del material ASTM A-36, que es de 250 MPa, como se puede verificar en el anexo D, por lo que los esfuerzos provocados por la temperatura y la presión del combustible no provocan una deformación plástica en el material.

De esta forma, se valida que el reactor tiene una capacidad adicional de  $0,077 m^3$  resultando en 5,36 h adicionales bajo las condiciones especificadas en la tabla A.1, para un total de 8,6 horas, como se calculó en la ecuación 4.4. Debido a los requerimientos establecidos para la extensión de la capacidad, se logró incrementar el volumen aún más de lo que se había planteado inicialmente, ya que se pretendían  $0,54 m^3$  adicionales y se logró aumentar  $0,077 m^3$  extra.

Es necesario recalcar que, a pesar de que este valor de tiempo es variable dependiendo de diversos factores como la geometría del combustible, su composición, humedad, temperatura del reactor, radio de equivalencia y la potencia consumida por la carga del gasificador, el incremento en el tiempo de operación calculado se vería reflejado bajo las condiciones de la tabla A.1. Sin embargo, es posible determinar el incremento de la autonomía en términos del volumen, tal y como se presenta en la ecuación 5.1.

$$\%E = \frac{|V_o - V_f|}{V_o} \cdot 100 = \frac{|0,047 - 0,124|}{0,047} \cdot 100 = 163,83\% \quad (5.1)$$

De esta forma, se tiene un aumento del tiempo de operación continua de 163,83 %, in-

dependientemente de las características del combustible y las condiciones del proceso de gasificación.

## 5.2 Automatización

### 5.2.1 Programa de automatización

La validación del programa del sistema de automatización se realizó realizando una serie de simulaciones en el programa LOGO!Soft Comfort V8.0. Se implementó en dicho *software* el algoritmo que se describe en la figura 4.3 y se verificó mediante una serie de ensayos que el resultado obtenido para las diferentes salidas del LOGO! sea el esperado. En la tabla 5.3 se describen los experimentos que se plantearon, mientras que en la tabla 5.4 se muestran los resultados de dichos experimentos.

Seguidamente, se explican con detalle los experimentos de la tabla 5.3.

- **Experimento 1**

El objetivo de este experimento es verificar que la forma en que se implementó la activación y la desactivación de la marca M1 (ciclo de producción) no se vea afectada por la cantidad de veces que se presione el botón correspondiente. Para esto, se realizó una serie de ensayos. En el primero, se inició con la marca M1 en 0 y seguidamente se presionó el botón de inicio tres veces consecutivas. De forma similar, se realizó el otro ensayo, iniciando con la marca M1 activada y presionando el botón de apagado tres veces consecutivas.

- **Experimento 2**

Este experimento se realizó para determinar si las salidas presentan algún cambio al modificar manualmente los valores en las entradas mientras la marca de arranque se encuentra en 0.

- **Experimento 3**

Para verificar el funcionamiento de la lógica de activación de la salida que controla al motor de la rejilla, se realizó una serie de ensayos en los que se cambió manualmente el valor de los sensores de presión y se verificó que esta salida se activase solamente cuando el valor medido por el sensor ubicado antes de la reducción fuera mayor que el medido por el sensor colocado después de esta.

- **Experimento 4**

Para evitar que el controlador active el motor de la rejilla ante mínimas variaciones en el valor leído, se implementó un bloque reductor de sensibilidad en el programa del LOGO! utilizando un relé con retardo a la conexión. Se verificó el funcionamiento del reductor de sensibilidad cambiando manualmente el valor de las presiones antes de que se cumpla el tiempo especificado en el relé. Primero, se realizaron ensayos

**Tabla 5.3:** Planteamiento de los experimentos para la validación del diseño del sistema de automatización. [Elaboración propia].

No.	Descripción	Factores de influencia	Objetivo
1	Se verifica la activación y desactivación de la marca que determina que el programa se encuentra en la etapa de producción.	Oprimir el botón de inicio o finalización del ciclo de producción múltiples veces.	Verificar el funcionamiento de la lógica de activación de la marca de arranque.
2	Se modifican los valores de las entradas sin haber presionado el botón de inicio de la producción para verificar el comportamiento de las salidas.	Valores de las entradas.	Verificar el funcionamiento de la marca interna de arranque.
3	Se modifican los valores de los sensores de presión, haciéndolos entrar o salir del rango especificado en el comparador analógico.	Valor de las entradas analógicas correspondientes a los sensores de presión.	Determinar el comportamiento de la salida correspondiente al motor de la rejilla frente a diferentes valores de los sensores.
4	Se modifican los valores de los sensores de presión, haciéndolos entrar o salir del rango especificado en el comparador analógico con diferentes frecuencias.	Frecuencia de cambio de la diferencia entre los valores de los sensores de presión.	Comprobar el funcionamiento de los relés de retardo a la conexión para la disminución de la sensibilidad del comparador.
5	Se modifica el valor del termopar de la zona de oxidación, sobre y debajo del valor del umbral establecido.	Valor de la entrada analógica correspondiente al termopar.	Determinar el comportamiento de la marca interna correspondiente a la alerta de alta temperatura frente a distintos valores de temperatura.

aumentando la presión antes de la reducción y devolviéndola rápidamente de forma manual al valor estable (igual a la presión después de la reducción). De forma similar, se hicieron ensayos incrementando la presión después de la reducción y restableciéndola al valor estable.

- **Experimento 5**

Se verifica el funcionamiento de la marca de alerta de temperatura.

El significado de la simbología de la tabla 5.4 es el que sigue:

- **F1:** tecla de flecha hacia arriba del LOGO!. Se utiliza para iniciar el ciclo de producción una vez que se completa el proceso de encendido.
- **F2:** tecla de flecha hacia abajo del LOGO!. Se utiliza para finalizar el ciclo de producción cuando se requiera apagar el gasificador.
- **PT00:** entrada donde se conecta transmisor de presión que registra la caída de presión a través de las toberas de inyección del agente oxidante.
- **PT01:** entrada del transmisor de presión que corresponde a la caída de presión a través de la zona de reducción.
- **M1:** marca interna del LOGO! utilizada como bandera para determinar cuando el equipo se encuentra en el ciclo de producción.
- **M29:** marca interna del LOGO!. Se utiliza como un aviso lumínico, ya que al ser activada, la pantalla del LOGO! cambia a color rojo. Se utiliza como alerta de temperatura.
- **Q1:** corresponde a la salida que controla el motor de la rejilla de la reducción.
- **X:** no importa el valor de la variable.

Como se puede verificar en la tabla 5.4, el valor de las variables de salida fue el esperado en cada uno de los ensayos realizados. A pesar de que este resultado es satisfactorio, es necesario confirmar que los resultados son positivos mediante la implementación en un dispositivo real y no solamente en una simulación por computadora. Además, es necesario resolver posibles inconvenientes que podrían surgir posteriormente, propios del proceso de implementación. Teniendo todo esto en cuenta, los resultados obtenidos validan el funcionamiento del programa diseñado.

Además, es necesario anotar que, en caso de ser necesario, el proceso de modificar el programa implementado en LOGO! Soft Comfort es muy sencillo ya que este ofrece una interfaz gráfica amigable con el usuario, lo que se convierte en una ventaja considerable debido a que el proceso de mejora del diseño seguirá adelante una vez finalizado el presente proyecto.

### 5.2.2 Panel de control

En cuanto a la validación pertinente al panel de control, es necesario verificar lo que se refiere a esfuerzos mecánicos. Tanto el panel como la estructura que lo soportan no

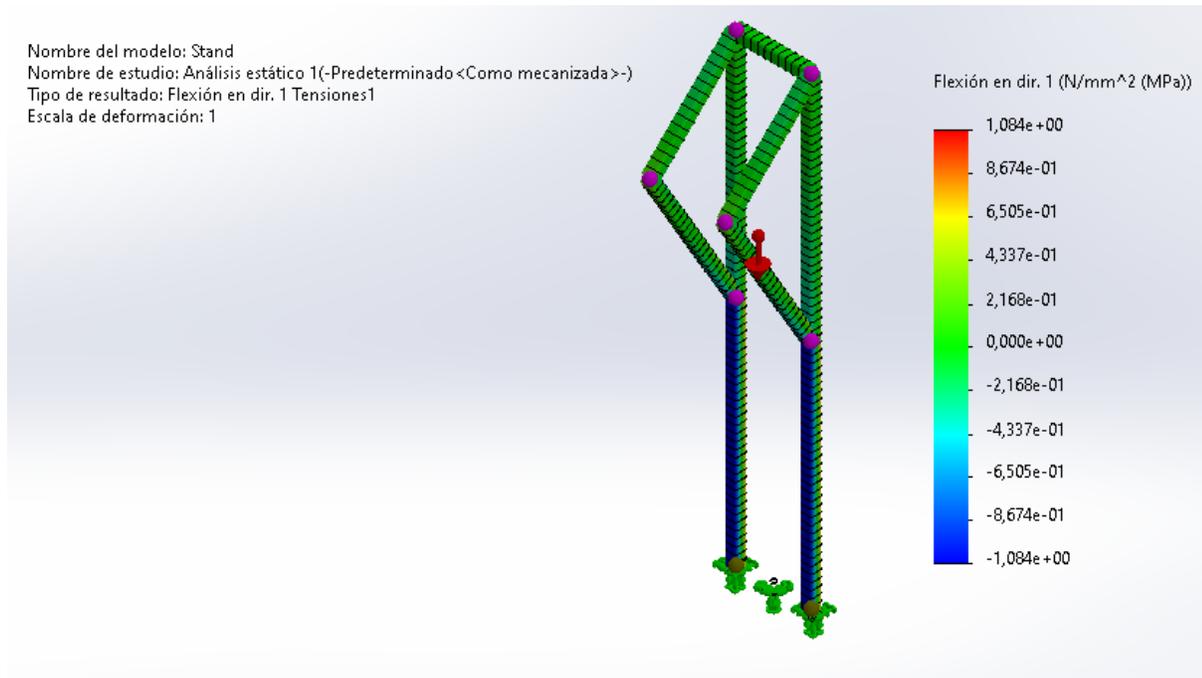
**Tabla 5.4:** Resultados de los experimentos para la validación del diseño de la automatización. [Elaboración propia].

No.	Entradas					Salida obtenida/ Salida esperada		
	F1	F2	PT00	PT01	TT00	M1	M29	Q1
1	1 x3	0	X	X	X	1/1	0/0	0/0
	0	1 x3	X	X	X	0/0	0/0	0/0
2	0	0	60	50	800	0/0	0/0	0/0
	0	0	50	60	800	0/0	0/0	0/0
	0	0	50	50	1050	0/0	0/0	0/0
3	1	0	50	60	800	1/1	0/0	0/0
	1	0	60	50	800	1/1	0/0	1/1
	1	0	50	50	800	1/1	0/0	0/0
4	1	0	60/50	50	800	1/1	0/0	0/0
	1	0	60/50	50	800	1/1	0/0	0/0
	1	0	60/50	50	800	1/1	1/1	0/0
	1	0	50	60/50	800	1/1	1/1	0/0
	1	0	50	60/50	800	1/1	1/1	0/0
	1	0	50	60/50	800	1/1	0/0	0/0
5	1	0	50	50	800	1/1	0/0	0/0
	1	0	50	50	1000	1/1	1/1	0/0
	1	0	50	50	800	1/1	0/0	0/0
	1	0	50	50	700	1/1	0/0	0/0

están sometidos a cargas grandes, sino que solamente soportan el peso de algunos de los componentes del sistema de automatización y control. Para esto, se realizó un análisis de elementos finitos utilizando la herramienta de simulación de SolidWorks. Se llevó a cabo un análisis estático en el que se aplicó una carga de masa distribuida en las superficies de la estructura sobre las que se sienta directamente el panel de control. En la figura 5.1 se presenta el resultado de la simulación de los esfuerzos en la estructura de soporte del sistema de control.

Como se evidencia en la figura 5.1, el esfuerzo máximo en la estructura es de aproximadamente  $1\text{ MPa}$ , tanto en compresión como en tensión debido al peso del sistema de control y el panel, lo cual es 250 veces menor que el límite de fluencia de  $250\text{ MPa}$  del acero A-36 (anexo D) por lo que cumple sin riesgo de fallos mecánicos por esfuerzos provocados por la carga.

En un equipo de la naturaleza de un gasificador es importante tomar en cuenta la seguridad desde el momento del diseño. Dentro del alcance de este proyecto se sugirió una notificación visual en la pantalla del LOGO! cuando el gasificador alcance cierta temperatura umbral. Para determinar este valor, se hicieron varias consideraciones. La primera, basada en la teoría, es que en los gasificadores *downdraft* rara vez se excede una tempe-



**Figura 5.1:** Representación gráfica del resultado de la simulación de esfuerzos en la estructura de soporte del panel de control. [Elaboración propia].

ratura de 1000 °C. Si se excede esta temperatura, la calidad del gas se reduce, debido a que hay una mayor producción de compuestos como CO<sub>2</sub>, los cuales no son aprovechables para la reacción de reducción. Además, una temperatura mayor a 950 °C [41] después del tubo de reducción es un indicador de que la velocidad del flujo del gas es muy alta. Si al pasar por la zona de reducción el tiempo de residencia no es el suficiente para completar las reacciones de reducción, la temperatura del gas a la salida del tubo de reducción se verá incrementada.

Por por estas razones se estableció un valor de 950 °C como el umbral para la activación de la alarma. Sin embargo, es necesario validar este valor de forma empírica con el gasificador en operación. Se deberá registrar una colección de datos de temperatura con el objetivo de compararlos con la composición del gas por medio de cromatografía o técnicas *in situ* como la utilización de analizadores de *syngas*. Debe contrastarse la temperatura después de la reducción con la composición del gas y determinar el valor más apropiado para esta temperatura según la composición del gas requerida.

## 5.3 Análisis económico

Con el objetivo de determinar la viabilidad económica del proyecto se analizó el costo de la implementación, considerando diferentes aspectos desde el costo de los materiales, servicios y manufactura. En la tabla 5.5 se muestra el desglose de los diferentes costos del proyecto.

**Tabla 5.5:** Desglose de costos del proyecto. [Elaboración propia].

Costos directos			
Componente	Cantidad	Precio unitario (\$)	Subtotal (\$)
Tanque propano vacío, 100 lb	2	211	422
Tanque propano vacío, 5 gal	1	50	50
Niple 3x6 in.	1	26	26
Tapa de acero para tubería 3 in.	2	32	64
Cerámica térmica	1	120	120
Acero A36 48x24 in. 3/32 in.	5	337	1685
Acero A36 48x24 in. 1/4 in.	1	423	423
Pletina 3/4x1/8 in.	1	3	3
Pletina 1/2x1/8 in.	1	2,5	2,5
Pletina 1x1/8 in.	1	4	4
Pletina 2x1/8 in.	1	5	5
Tubo acero 6x6 in.	1	10	10
Acoples tubería 1/2 in.	4	2	8
Niple 1 1/4x3 in.	1	1,5	1,5
Tapa de acero para tubería 1 in.	1	3,5	3,5
Tubo, sellador alta temperatura	1	6,5	6,5
Barra acero 1/2x12 in.	1	3,5	3,5
Cuerda de silicón sellador de alta temperatura	1	44	44
Niple 1/4x5 in.	1	6	6
Tubo redondo acero 3/4x12 in.	1	4,5	4,5
20 pernos 5/16x3/4 in.	1	5	5
20 arandelas 5/16	1	3	3
Perno 3/8x3 1/2 in.	1	2	2
Arandela 3/8 in.	2	1	2
Tubo 1 1/2x1 1/2 in., 12 ft largo	1	46	46
Tubo 4x4 in., 3 ft largo	1	23	23
Bushing bronce 3/4 in.	2	5	10
Perno 3/8x1 3/4 in.	2	1	2
Collarín 3/4 in.	2	8	16
Junta de bola 5/16 in.	1	11	11
Perno M6x1 mm, 12 mm	9	0,2	1,8
Perno 3/8x1 1/2 in.	4	0,3	1,2
Metal expandido 60x120 cm	1	50	50
Espuma de filtro 30 ppi 12x24 in.	1	18	18

Componente	Cantidad	Precio unitario (\$)	Subtotal (\$)
Espuma de filtro 60 ppi 12x24 in.	1	18	18
Válvula bola bronce 1 1/2 in.	1	35	35
Motor soplador 12 VDC	1	50	50
Motor 12 VDC 50 rpm	1	64	64
LOGO! Siemens	1	190	190
Termopar	3	300	900
Termopozo	3	110	330
Pushbutton 12 V - 10 A	1	16	16
Total costos directos			4701
Costos indirectos			
Servicio	Cantidad	Precio unitario (\$)	Subtotal (\$)
Manufactura	1	1000	1000
Internet	4	50	200
Electricidad	4	10	40
Total costos indirectos			1240
<b>Costo total</b>			<b>5941</b>

A modo de comparación se consultó en línea el costo de otras máquinas similares para así tener un parámetro adicional para determinar la viabilidad del proyecto. Se encontraron dos equipos con características similares. El primero de ellos es fabricado por la empresa china RonSun Power y tiene una potencia de 10 kW. Este se muestra en la figura 5.2.

Este gasificador tiene un costo de \$10000, sin tener en cuenta el costo de envío e impuestos. Por otra parte, se encontró un equipo fabricado por la empresa Rotex Master, el cual tiene una capacidad de 8,75 kW y un costo de \$8600, más el costo de envío e impuestos. En la figura 5.3 se presenta una fotografía del gasificador de la empresa Rotex Master.

Dado que la implementación del gasificador diseñado tiene un costo de \$5941, desde el punto de vista económico es más conveniente la fabricación del equipo. Para verificar esto se realizó el análisis de indicadores financieros con base en la inversión inicial y los beneficios anuales. El laboratorio pretende la venta de al menos tres equipos por año, con una utilidad de \$500/gasificador. En este escenario se estima un ingreso para el laboratorio de \$1500 anuales por concepto de venta de equipos. Esta información se proyectó a un plazo de seis años para determinar el índice de deseabilidad del proyecto (ID), así como el valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR). Estos son indicadores que permiten determinar la viabilidad económica de un proyecto. En la figura 5.4 se presenta el resumen del análisis económico efectuado.

Si el VAN es mayor que cero, significa que habrá una ganancia después de recuperar la inversión [44], por lo que el proyecto es viable ya que se obtuvo un VAN de \$3348,43. Aunque la TIR es un criterio que tiene menor aceptación [44], se calculó para expresar la



**Figura 5.2:** Gasificador comercial del fabricante RonSun Power. [43]



**Figura 5.3:** Gasificador comercial del fabricante Rotex Master. [43]

rentabilidad de forma porcentual. Dado que la TIR guarda una relación con el VAN, se obtuvo un resultado favorable de 36,15%. Esto representa el tipo de interés en el que el VAN se hace cero. Otro indicador que guarda relación con el TIR y el VAN es el ID, el cual se compara con la unidad para determinar la deseabilidad de un proyecto. El ID es

AÑOS	GASIFICADOR DE BIOMASA EVALUACION DE PROYECTOS FLUJOS NETOS DE EFECTIVO (\$)						
	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6
<b>INVERSION INICIAL</b>							
Costos directos	4 701,00						
Costos indirectos	1 240,00						
Total Inversion Inicial	5 941,00						
<b>BENEFICIOS</b>							
Venta de equipo		1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00
<b>GASTOS VARIABLES INCREM</b>		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>DEPRECIACION INCREM</b>							
Gasificador		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total de gastos		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>UTILIDAD ANTES DE IMP.</b>		1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00	1 500,00
<b>IMPUESTO DE RENTA</b>		450,00	450,00	450,00	450,00	450,00	450,00
<b>UTILIDAD DES/IMPUES.</b>		1 050,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00
<b>DEPRECIACION INCREM</b>							
Gasificador		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>VALORES DE RESCATE</b>							
Activos Fijos							30 000,00
Impacto en Renta							-9 000,00
<b>FLUJO NETO EFECTIVO</b>	-5 941,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00	1 050,00	23 290,00
FNE descontados (24%)	<b>\$9 289,43</b>						
VALOR ACTUAL NETO (VAN)	<b>\$3 348,43</b>						
TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)	<b>36,146%</b>						
INDICE DE DESEABILIDAD (ID)	<b>1,56</b>						

**Figura 5.4:** Análisis económico de la implementación del diseño. [Elaboración propia].

mayor que 1 cuando el VAN es mayor que cero. En este caso se obtuvo un ID de 1,56. Este dato brinda información que permite al laboratorio comparar la deseabilidad de la implementación de este proyecto frente a otros.

# Capítulo 6

## Conclusiones y recomendaciones

### 6.1 Conclusiones

- Se determinó con base en el diagnóstico inicial (anexo A) que la principal limitante del tiempo de operación es el volumen de almacenamiento y que un tiempo de operación aceptable para la operación continua del gasificador es de 7 horas.
- Se diseñó un sistema de automatización básico que permite que la rejilla de la reducción sea agitada cuando la relación entre la presión antes y después de la reducción sea diferente a 1, permitiendo el control de la rejilla en función de la medida de la saturación de ceniza en la rejilla.
- Se diseñó una extensión del reactor de gasificación de forma que el gasificador pueda operar por hasta 8,5 horas continuas sin necesidad de una recarga de combustible bajo las condiciones especificadas en la tabla A.1, lo que significa un incremento del tiempo de operación de 163,83 %.
- La implementación del diseño realizado es viable económicamente, con un costo aproximado de \$5941 y un VAN de \$3348,43.

### 6.2 Recomendaciones

- Como una mejora mayor en el rendimiento del gasificador, se recomienda el control del radio de equivalencia por medio de la implementación de un control de lazo cerrado. Esto permitirá un incremento significativo en la calidad del gas producido.
- Se sugiere verificar el funcionamiento del sistema de control y del sistema de automatización (medición de variables) en conjunto ya que la validación se realizó por software, por lo que podría haber variables del mundo real que no se tuvieron en cuenta durante la simulación, como lo puede ser el ruido provocado por la temperatura (a pesar de que el estándar 4-20 mA es inmune al ruido electromagnético).

- Se recomienda la incorporación en el programa de automatización de una secuencia para el encendido del equipo, así como del apagado. Para esto, se sugiere el uso de electroválvulas y un sistema para el encendido de la llamarada.
- Para incrementar aún más el tiempo de operación sin intervención del operario, sería útil implementar un sistema de manejo de la ceniza, ya que esta es la segunda mayor limitante del tiempo de operación en el diseño original.
- A pesar de que se obtuvo un ID mayor que 1 y un VAN alto, se sugiere realizar un estudio de mercado con el objetivo de determinar si el equipo podría llegar a tener la demanda necesaria para vender tres unidades anualmente.

# Bibliografía

- [1] “Centro de investigación en innovación forestal (cif).” <https://www.tec.ac.cr/node/132>. Accesado: 30/06/2020.
- [2] G. Arias, “Biomasa, un futuro prometedor,” *Pensis*, vol. 10, p. 6, 2018.
- [3] D. Arias, “Impulso tecnológico para la producción, transformación y uso de la biomasa para energía y biomateriales a partir de los cultivos forestales lignocelulósicos en el contexto del mecanismo de desarrollo limpio,” Tech. Rep. VIE 1401035, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Forestal. Centro de Investigación en Innovación Forestal (CIF), Sept. 2014.
- [4] MINAE, “VII plan nacional de energía 2015-2030.” <https://minae.go.cr/recursos/2015/pdf/VII-PNE.pdf>.
- [5] FAO, “Theory of gasification,” in *Wood Gas as Engine Fuel*, Rome, Italy: FAO Forestry Department, 1986.
- [6] A. Gómez, “Diseño de una planta de gasificación de residuos sólidos urbanos para generación de electricidad con una pila de combustible,” 2015.
- [7] M. Cortazar, J. Álvarez, G. López, M. Amutio, L. Santamaría, J. Bilbao, and M. Olazar, “Role of temperature on gasification performance and tar composition in a fountain enhanced conical spouted bed reactor,” *Energy Conversion and Management*, vol. 171, pp. 1589–1597, 2018.
- [8] C. M. Kinoshita, Y. Wang, and J. Zhou, “Tar formation under different biomass gasification conditions,” *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 29, no. 2, pp. 169–181, 1994.
- [9] A. Henderson, “El arte de elaborar el estado del arte en una investigación,” 2014.
- [10] P. Basu, *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Elsevier Science & Technology, 2nd. ed., 2013.
- [11] N. J. W. et al, “Coal gasification,” in *Applied Coal Petrology* (I. Suárez-Ruiz and J. C. Crelling, eds.), ch. 5, 2008.
- [12] F. J. Lozano and R. Lozano, “Assessing the potential sustainability benefits of agricultural residues: Biomass conversion to syngas for energy generation or to chemicals production,” *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 4162–4169, 2018.

- [13] E. Velo, “Biomasa como fuente energética en países en desarrollo,” 2009.
- [14] P. Pradhan, “A conceptual framework and techno-economic analysis of a pelletization-gasification based bioenergy system,” *Appl. Energy*, vol. 249, pp. 1–13, 2019.
- [15] ICAFE, “Icafe muestra avances del proyecto de gasificación.” <http://www.icafe.cr/icafe-muestra-avances-del-proyecto-de-gasificacion/>, 2016. Accessed: 01/09/2020.
- [16] H. Solis and G. López, “Diseño y construcción de un gasificador para la gasificación de la biomasa producida en el beneficio coopedota r.l. con el objetivo de generar electricidad para los requerimientos energéticos de la empresa,” tech. rep., CoopeDota R.L.
- [17] M. T. Munir, I. Mardon, and S. Al-Zuhair, “Plasma gasification of municipal solid waste for waste-to-value processing,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 116, 2019.
- [18] W. W. J.-S. C. Po-Chih Kuo, Biju Illathukandy, “Plasma gasification performances of various raw and torrefied biomass materials using different gasifying agents,” *Bioresource Technology*, vol. 314, no. 123740, 2020.
- [19] V. S. Sikarwar *et al.*, “An overview of advances in biomass gasification,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 10, pp. 2939–2977, 2016.
- [20] C. Forero, C. Guerrero, and F. Sierra, “Producción y uso de pellets de biomasa para la generación de energía térmica: una revisión a los modelos del proceso de gasificación,” *Iteckne*, vol. 9, no. 1, 2012.
- [21] S. Pang and A. S. Mujumdar, “Drying of woody biomass for bioenergy: Drying technologies and optimization for an integrated bioenergy plant,” *Drying Technol.*, vol. 28, no. 5, p. 690, 2010.
- [22] S. M. Atnaw, S. A. Sulaiman, and S. Yusup, “Biomass gasification,” in *Waste Biomass Management – A Holistic Approach* (L. Singh and V. Kalia, eds.), pp. 159–185, Cham, Suiza: Springer, 2015.
- [23] C. Higman and M. van der Burgt, *Gasification*. Oxford, UK: Gulf Professional Publishing, 2018.
- [24] P. McKendry, “Energy production from biomass (part 3): gasification technologies,” *Bioresource Technology*, vol. 83, no. 1, pp. 55 – 63, 2002. Reviews Issue.
- [25] P. K. et al, “Robust instrumentation and control systems for gasification of biomass,” in *26th European Biomass Conference and Exhibition*, EUBCE, (Copenhagen, Dinamarca), pp. 516–520, 2018.

- [26] K. Sun *et al.*, “Tdl absorption sensors for gas temperature and concentrations in a high-pressure entrained-flow coal gasifier,” *Proceedings of the Combustion Institute*, no. 2, pp. 3593–3601, 2013.
- [27] K. Nataraj, N. Banapurmath, G. Manavendra, and V. Yaliwal, “Development of cooling and cleaning systems for enhanced gas quality for 3.7 kw gasifier-engine integrated system,” *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 8, p. 43, 02 2016.
- [28] B. Peterson, *Complete Gasifier Builder’s Bible*. 2da. ed., 2007.
- [29] S. E. R. Institute, “Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems,” 1986.
- [30] P. Kamble, Z. Khan, and I. Watson, “Robust instrumentation and control systems for gasification of biomass,” in *26th European Biomass Conf. and Exhibition*, (Copenhagen, Dinamarca), may. 2018.
- [31] Inglesa, “Diseño y cálculo de tanques de almacenamiento.” [En línea.] Disponible: <https://www.fnmt.es/documents/10179/10666378/Dise%C3%B1o+y+c%C3%A1lculo+de+tanques+de+almacenamiento.pdf/cf73a420-13f2-248f-034a-d413cb8a3924>.
- [32] ESAB, “Dilatación y contracción de los metales en la soldadura.” ESAB. <https://www.esab.com.ar/ar/sp/education/blog/dilatacion-y-contracion-de-los-metales-en-la-soldadura.cfm> (accesado 6 nov., 2020).
- [33] A. K. Dey, “Pressure vessel nozzles: Definition, types, allowable loads and design.” What is piping. [https://whatispiping.com/pressure-vessel-nozzle-typesTypes\\_of\\_Pressure\\_Vessel\\_Nozzles/Pressure\\_Vessel\\_Nozzle\\_Types\(accesado12nov.,2020\)](https://whatispiping.com/pressure-vessel-nozzle-typesTypes_of_Pressure_Vessel_Nozzles/Pressure_Vessel_Nozzle_Types(accesado12nov.,2020)).
- [34] K. Ulrich and S. Eppinger, *Diseño y desarrollo de productos*. McGraw Hill Education, 5th ed., 2012.
- [35] W. Guangwei and L. Zhi, *Quemador de biomasa*. (20 oct., 2020). CN211781027 [En línea]. Disponible: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN310867258tab=NATIONALBIBLIO&.cid=P12-KIB5H6-74506-2>.
- [36] G. Tietze, S. Richter, M. Schingnitz, and B. Holle, *Method and device for the regulated feed of pulverized fuel to an entrained flow gasifier*. (27 oct., 2007). US7607398B2 [En línea]. Disponible: <https://patents.google.com/patent/US7607398B2/en?q=F23K3%2f02oq=+F23K3%2f02>.
- [37] Scharage, “Power industry.” Scharage Conveying Systems. <https://www.scharage.de/en/application/industries/power-industry> (accesado 5 oct., 2020).
- [38] A. Serna, F. Ros, and J. Rico, *Guía Práctica de Sensores*. Creaciones Copyright, 2010.

- [39] REOTEMP, “Thermowell shank style comparison.” (31 jul., 2015). Accesado: 3 nov., 2020. [Video en línea]. Disponible: [https://www.youtube.com/watch?v=3Cb0J\\_WDIRY](https://www.youtube.com/watch?v=3Cb0J_WDIRY).
- [40] Siemens, “Logo! – small but wow.” Siemens. <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/systems/industrial/plc/logo.html> (accesado 15 dic., 2020).
- [41] APL, “The masonic method: How to operate a downdraft gasifier..” All Power Labs. <http://www.allpowerlabs.com/news/the-masonic-method-how-to-operate-a-downdraft-gasifier.html> (accesado 5 nov., 2020).
- [42] AKSteel, *316/316L Stainless Steel*. (2016). Accesado: 13 nov., 2020. [En línea]. Disponible: [https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-01/316316L201706\\_2.pdf](https://www.aksteel.com/sites/default/files/2018-01/316316L201706_2.pdf).
- [43] RonSun, “Gasifier.” [En línea]. Disponible: [http://www.ronsun-power.com/products\\_list/pmcId=36.html](http://www.ronsun-power.com/products_list/pmcId=36.html).
- [44] W. Ketelhöhn, *Inversiones*. Norma, 2004.
- [45] R. Crespo, E. Jiménez, P. Suatunce, G. Law, and C. Sánchez. *Revista Ciencia y Tecnología*, vol. 1, no. 2, pp. 55–63, 2008.
- [46] Sumitec, “Acero estructural astm a36.” [En línea.] Disponible: <http://www.sumiteccr.com/acero/estructural/AE01.pdf>.

# Apéndice A

## Diagnóstico

Con base en lo que los interesados solicitaron e información de distintas fuentes referentes a los gasificadores en cuanto al diseño, construcción, operación y seguridad, se ha realizado un diagnóstico detallado del diseño inicial que se ha propuesto para su mejora y posterior construcción. Para efectos del diagnóstico, se ha dividido el proceso de gasificación en tres etapas: suministro de combustible, gasificación, y purificación del gas.

### A.1 Suministro de combustible

El volumen de materia prima que se puede depositar en el reactor del gasificador es de aproximadamente  $0,047 \text{ m}^3$  (47 L). Esto incluye el volumen de la zona de secado, el reactor de pirólisis y el área de inyección del agente gasificante. El valor de la densidad anhidra de la madera de teca, la cual es comúnmente usada para la producción de gas, es de aproximadamente  $690 \text{ kg/m}^3$  [45]. Por otra parte, según [28], se requiere aproximadamente 1 kg de combustible para producir 1 kW h de energía eléctrica. En la tabla A.1 se resumen las condiciones que se asumieron para calcular la aproximación del tiempo de operación continuo del gasificador.

**Tabla A.1:** Condiciones asumidas para la aproximación del cálculo del tiempo de operación continua con una sola carga de combustible. [Elaboración propia].

Condición/parámetro	Valor	Unidades
Densidad de la madera	690	$\text{kg/m}^3$
Contenido de humedad del combustible	< 20	%
Capacidad del depósito de combustible	0,047	$\text{m}^3$
Potencia eléctrica generada	10	kW
Consumo de combustible	1	$\text{kg/kW}\cdot\text{h}$

Teniendo en cuenta estos datos, se realizó una sencilla conversión para conocer de forma aproximada la autonomía del gasificador. Estos cálculos se presentan en la ecuación A.1.

Es importante considerar que esto puede variar según las características de la madera como la densidad, el tamaño de las piezas y el contenido de humedad, además de la potencia consumida.

$$0,047 \text{ m}^3 \cdot \frac{690 \text{ kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{kW} \cdot \text{h}}{1 \text{ kg}} \cdot \frac{1}{10 \text{ kW}} = 3,24 \text{ h} \quad (\text{A.1})$$

Esto quiere decir que el gasificador podría operar sin requerir una recarga de materia prima aproximadamente por 3 horas y 15 minutos, según la potencia que consuma la carga y las características de la materia prima como la geometría, el tamaño, la densidad y el contenido de humedad.

Una de las principales características del diseño original es que tiene un tamaño relativamente compacto. Considerando esto y el resultado de la aproximación hecha, se ha determinado que es posible duplicar la autonomía del gasificador para alcanzar hasta 7 horas de operación sin la necesidad de una recarga de combustible, ya que de incrementar el volumen más que esto podría hacer que se pierda la característica de compacto del gasificador. Por otra parte, un período de 7 horas corresponde de forma aproximada al tiempo que estaría funcionando el equipo durante una jornada laboral de 8 horas, teniendo en cuenta que se requiere un lapso para el encendido así como para el apagado y las operaciones de mantenimiento diarias (limpieza).

## A.2 Gasificación

La sección en la que se lleva a cabo la pirólisis, la oxidación y la reducción de la biomasa no tiene ningún tipo de sensores o indicaciones de temperatura o presión que permitan implementar un sistema de automatización y de seguridad. El principal riesgo tóxico para la salud lo representa el monóxido de carbono (CO) que se produce como resultado de la pirólisis de la biomasa. A pesar de que este gas es tóxico incluso en concentraciones muy bajas, el equipo no posee ningún sistema de alarma de gases para prevenir al usuario en caso de que haya un escape de CO. Por otra parte, tampoco posee alarmas para niveles peligrosos de presión o temperatura.

Se tiene un sistema básico implementado con un relé temporizador que controla un motor que mueve la parrilla con el objetivo de remover la ceniza de esta para permitir el paso libre del gas y para que el carbón pirolizado descienda hasta el reactor de reducción. Este sistema debe estar integrado en el sistema de automatización para ser accionado de acuerdo con la lectura de los sensores de presión.

Además, una de las principales limitantes del tiempo de operación es el hecho de que no se dispone de un sistema que permita un adecuado manejo y almacenamiento de la ceniza producida, por lo que el equipo se satura con ceniza, forzando la detención del equipo. El espacio destinado para el almacenamiento de la ceniza son los 10 centímetros inferiores del reactor de gasificación, el cual tiene un radio de 0,19 m. A este espacio se le debe

restar el espacio que ocupa el ensamble del mecanismo de la rejilla, el cual tiene un radio de 0,06 m y una altura de 0,08 m. En la ecuación A.2 se muestra el cálculo del espacio disponible para la ceniza en el diseño original.

$$V = \pi(0,19\text{ m})^2 \cdot 0,07\text{ m} - \pi(0,06\text{ m})^2 \cdot 0,07\text{ m} = 0,01\text{ m}^3 \quad (\text{A.2})$$

# Apéndice B

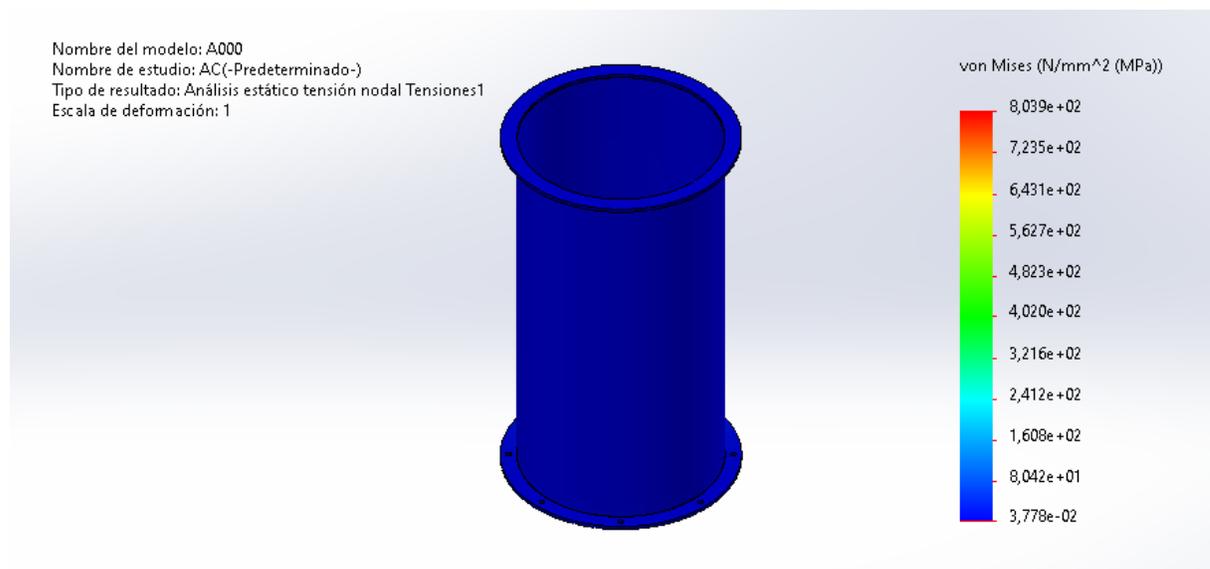
## Dimensiones de las boquillas

Tamaño de Boquilla	Diámetro Exterior del tubo	Espesor Nominal de la Boquilla Pared del Tubo n	Diámetro Interior de la Placa de Refuerzo DR	Longitud, Lado o Diámetro de la Placa de Refuerzo L=Do	Ancho de la Placa de Refuerzo W	Proyección Exterior Mínimo J	Elevación Mínima al Centro de Boquilla	
							Tipo Regular HN	Tipo Baja C
1219	1219	e	1222	2457	2972	406	1321	1229
1168	1168	e	1171	2356	2845	406	1270	1178
1117	1117	e	1121	2254	2724	381	1219	1127
1067	1067	e	1070	2153	2604	381	1168	1076
1016	1016	e	1019	2051	2483	381	1118	1025
965	965	e	968	1949	2356	356	1067	974
914	914	e	917	1848	2235	356	1016	924
864	864	e	867	1746	2114	330	965	873
813	813	e	816	1645	1994	330	914	822
762	762	e	765	1543	1867	305	864	771
711	711	e	714	1441	1746	305	813	720
660	660	e	663	1340	1625	305	762	670
610	610	12.7	613	1257	1524	305	711	629
559	559	12.7	562	1156	1403	279	660	578
508	508	12.7	511	1054	1283	279	610	527
457	457	12.7	460	952	1162	254	559	476
406	406	12.7	409	851	1035	254	508	425
356	356	12.7	359	749	914	254	457	375
305	324	12.7	327	685	838	229	432	343
254	273	12.7	276	584	717	229	381	292
203	219	12.7	222	483	590	203	330	241
152	168	11	171	400	495	203	279	200
102	114	8.5	117	305	387	178	229	152
76	89	7.6	92	267	343	178	203	133
51	60	5.5	63	(---)	(---)	152	178	89
38	48	5.1	51	(---)	(---)	152	152	76
76	102	cople	105	286	362	(---)	229	143
51	73	cople	76	(---)	(---)	(---)	178	76
38	56	cople	59	(---)	(---)	(---)	152	76
25	40	cople	43	(---)	(---)	(---)	127	76
19	33	cople	36	(---)	(---)	(---)	102	76

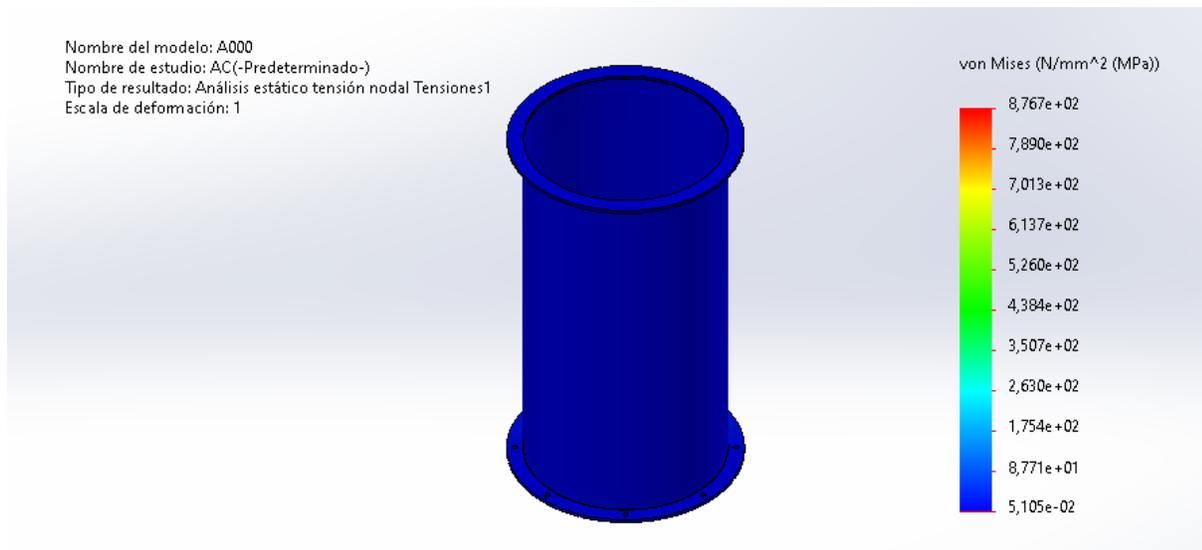
Figura B.1: Dimensiones para cuellos de boquillas. [31]

# Apéndice C

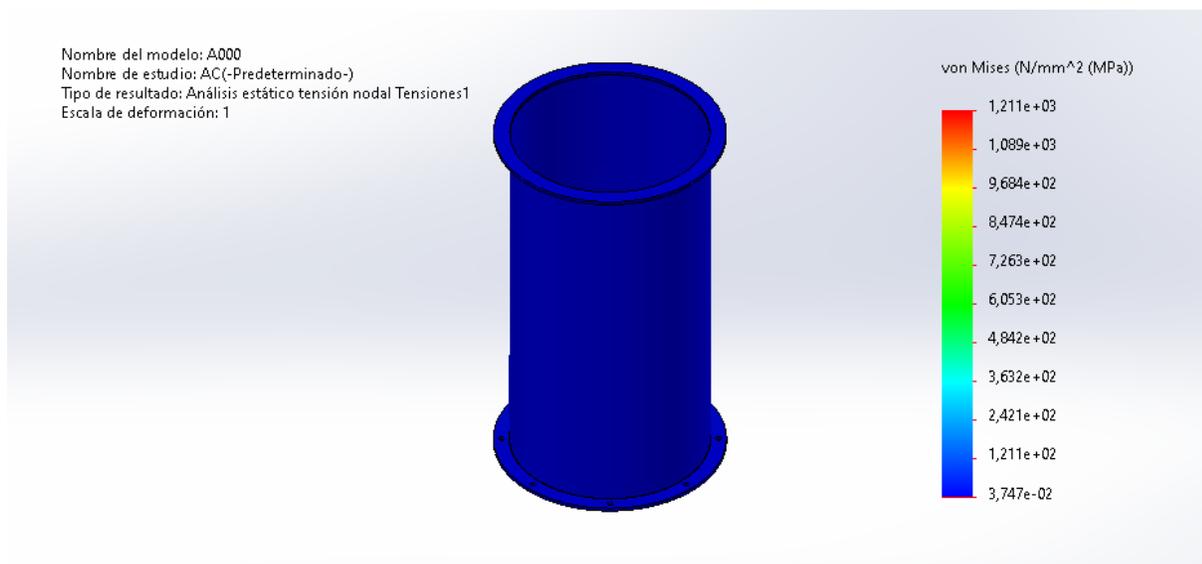
## Simulaciones del depósito adicional de combustible



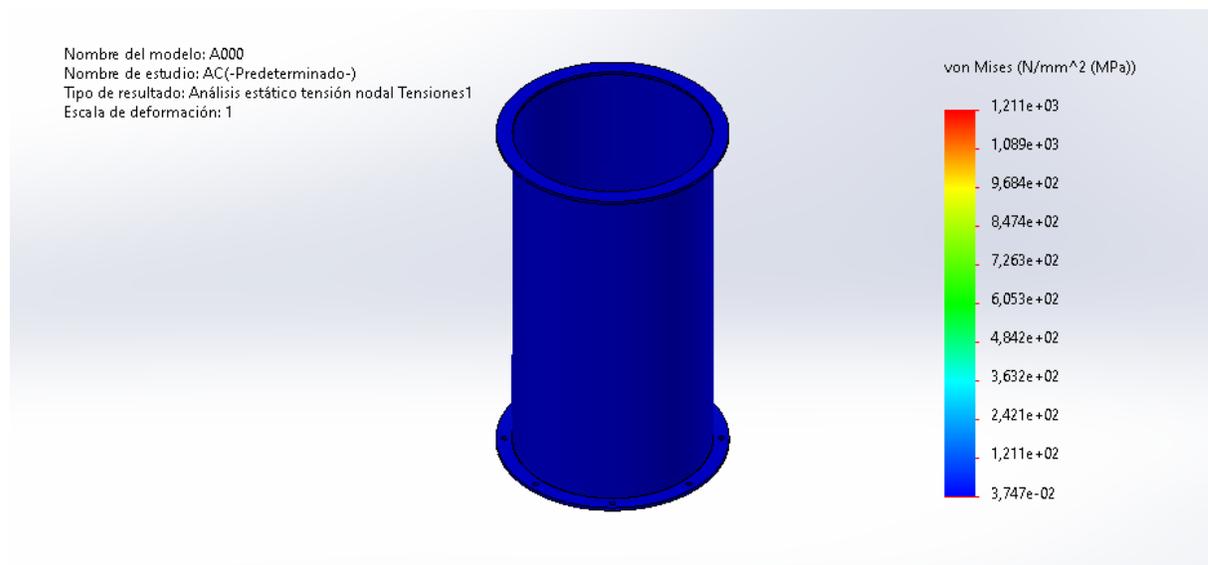
**Figura C.1:** Simulación del depósito adicional a 175 °C y 60% de la capacidad. [Elaboración propia].



**Figura C.2:** Simulación del depósito adicional a 175 °C y 100% de la capacidad. [Elaboración propia].



**Figura C.3:** Simulación del depósito adicional a 250 °C y 60% de la capacidad. [Elaboración propia].

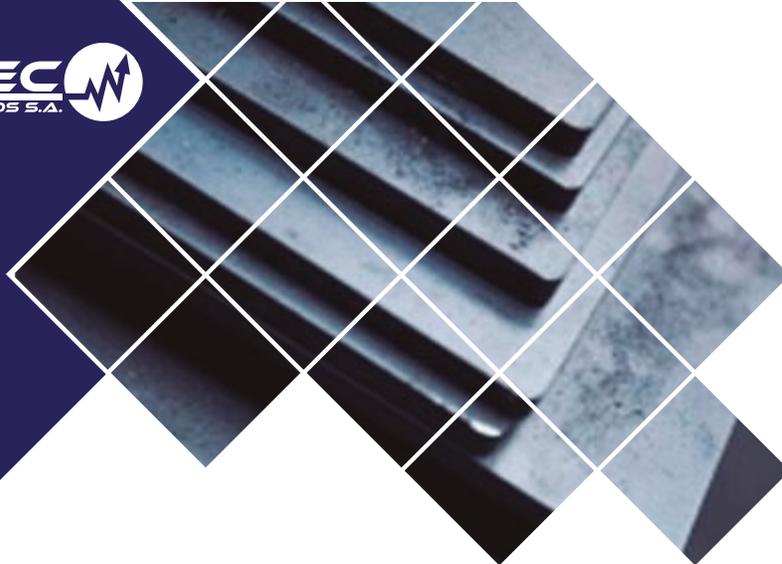


**Figura C.4:** Simulación del depósito adicional a 250 °C y 100% de la capacidad. [Elaboración propia].

# Apéndice D

## Hoja de datos del acero A36

La hoja de datos del acero A36 se ha tomado de [46].



**1. Descripción:** Acero al carbono estructural conocido como hierro negro, de calidad estructural para el uso en puentes y edificaciones remachadas, atornilladas o soldadas.

**2. Normas involucradas:** ASTM A 36/A 36M - 04

**3. Propiedades mecánicas:** Esfuerzo a la fluencia mínimo: 250 MPa (36300 PSI)  
Esfuerzo a la tensión: 400 – 550 MPa (58000 – 79800 PSI)  
Elongación mínima en 50 mm (2"): 23%  
Módulo de elasticidad 200 GPa (29000 KSI)

**4. Propiedades físicas:** Densidad 7.85 g/cm<sup>3</sup> (0.284 lb/in<sup>3</sup>)

**5. Propiedades químicas:** 0.25 – 0.29 % C  
0.60 – 1.20 % Mn  
0.15 – 0.40 % Si  
0.04 % P máx  
0.05 % S máx

**6. Usos:** Para componentes estructurales en general.

**7. Tratamientos térmicos:** Usualmente a este material no se le da tratamiento térmico debido a que son parte estructural. Puede ser cementado para aumentar la dureza superficial mientras mantiene su núcleo tenaz.

**NOTA:**

Los valores expresados en las propiedades mecánicas y físicas corresponden a los valores promedio que se espera cumpla el material. Tales valores son para orientar a aquella persona que debe diseñar o construir algún componente o estructura pero en ningún momento se deben considerar como valores estrictamente exactos para su uso en el diseño.

(506) 2591-7514

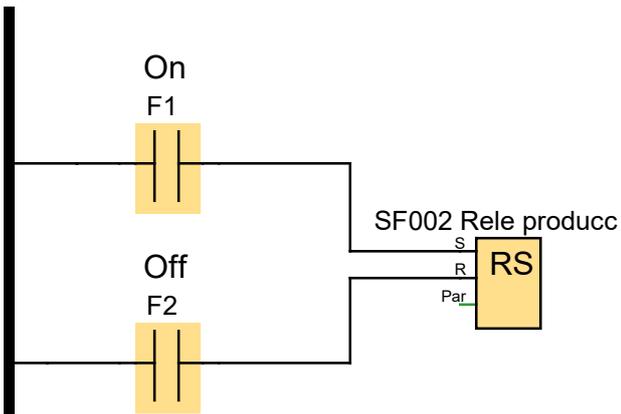
(506) 2551- 4169

info.clientes@sumiteccr.com

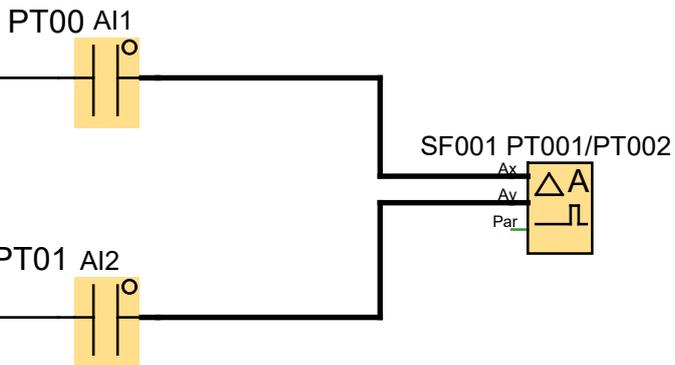
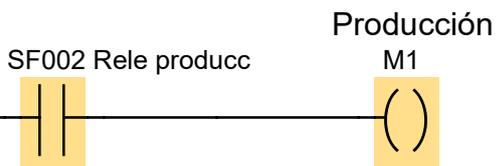


# Apéndice E

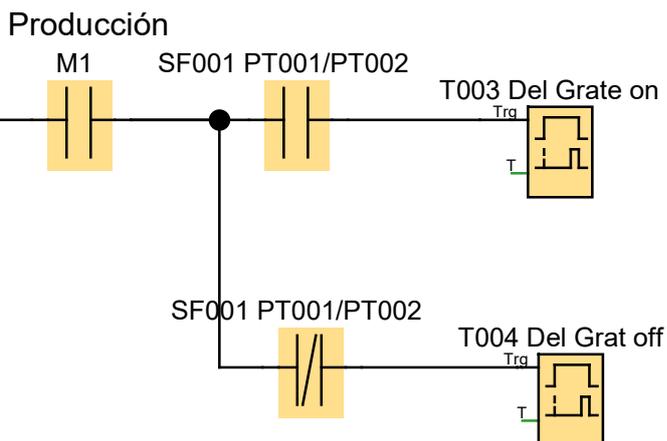
## Programa de automatización



Marca interna. Determina si el programa se encuentra en la etapa de producción de gas.



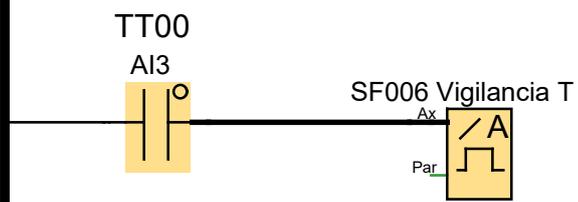
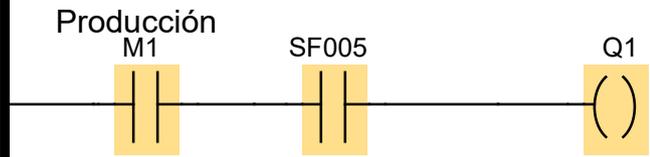
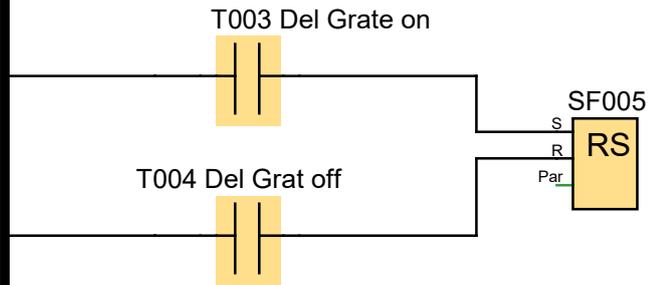
Comparación caídas de presión de las toberas y de la cama.



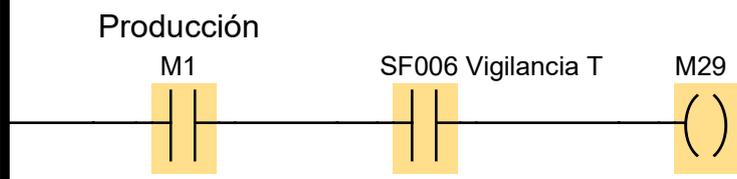
Reducción de la sensibilidad de la comparación.

Debe mantenerse sobre el umbral al menos

5 s para cambiar el estado de la salida del motor de la rejilla.



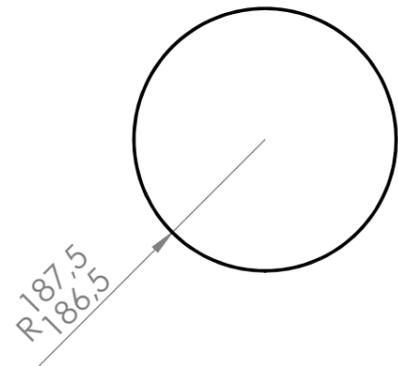
Alerta cuando la temperatura de oxidación excede 1000 °C.



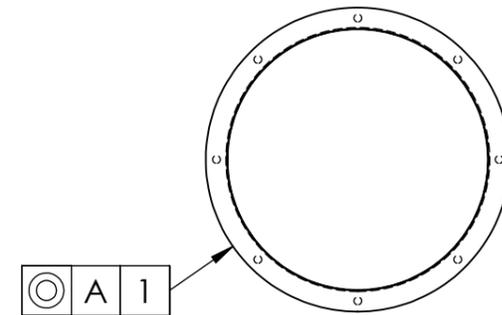
# Apéndice F

## Planos mecánicos

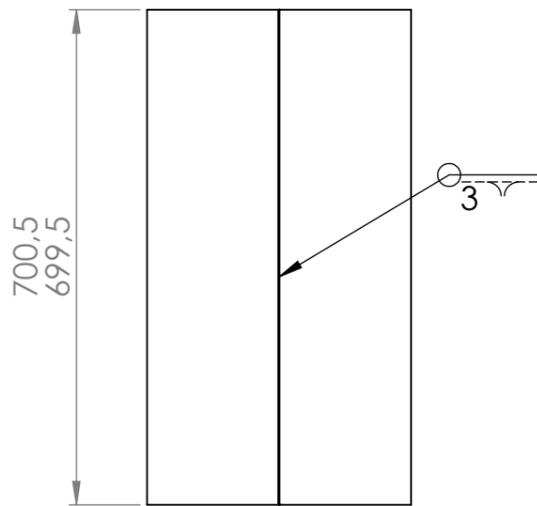
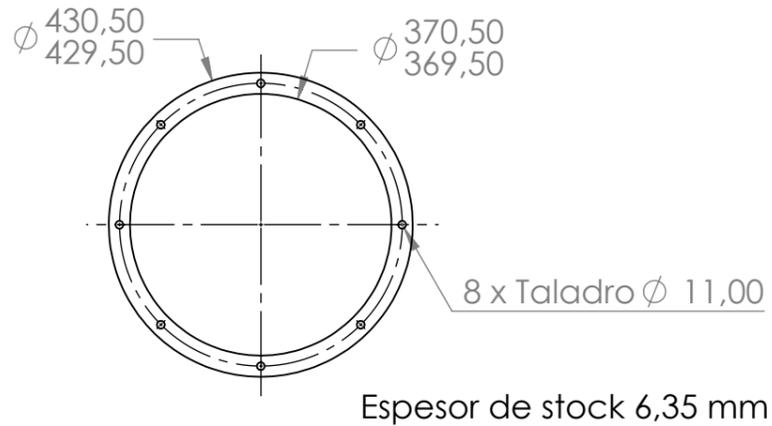
PARED DEL TANQUE



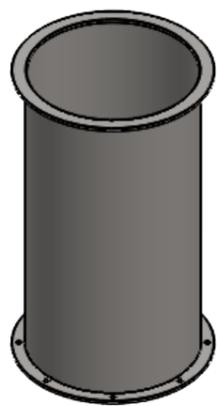
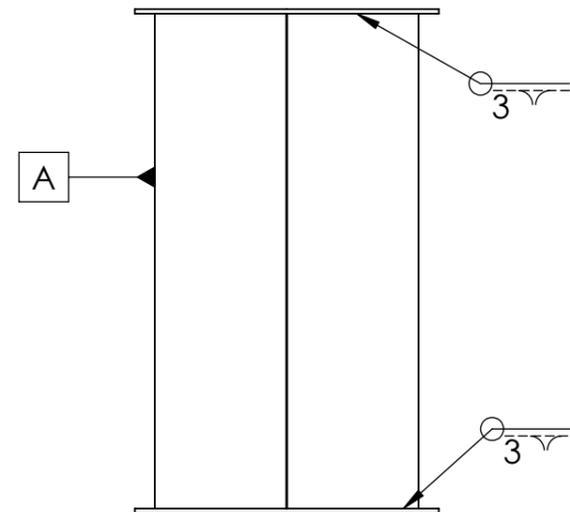
ENSAMBLE DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO



BRIDA DEL TANQUE



Espesor de stock 2,38 mm



Escala 1:15

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de I. Mecatrónica

REVISIÓN:

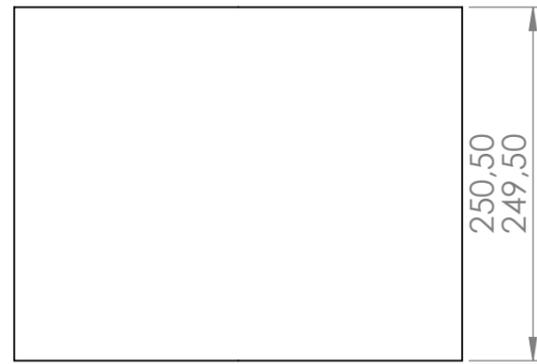
Proyecto Final de Graduación

**A**

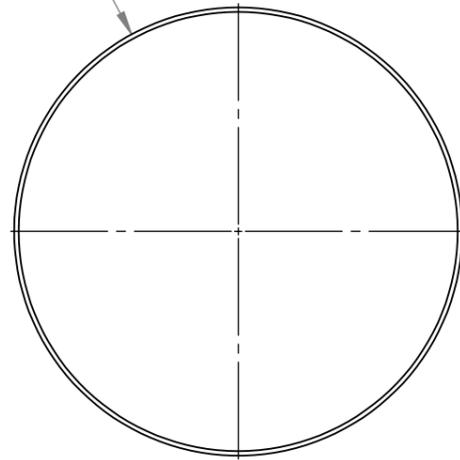
DIBUJ.	NOMBRE M. CASTRO	FIRMA	FECHA 18/12/2020	ACABADO GENERAL: Stock	PARTE: Tanque almacenamiento
VERIF.				MATERIAL: Acero A36	
APROB.				TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: Gasificador Escuela Ing. Forestal
FABR.				PESO: -- gramos	UNIDADES: mm
SISTEMA: 	TOLERANCIAS: LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°		TOLERANCIA EN: mm	PROYECTO: Gasificador Escuela Ing. Forestal	ESCALA: <b>1:10</b>
					FORMATO <b>A3</b>
					HOJA 1 DE 10

# ACELERADOR DE PIRÓLISIS

## CAMISA DE CONDENSACIÓN

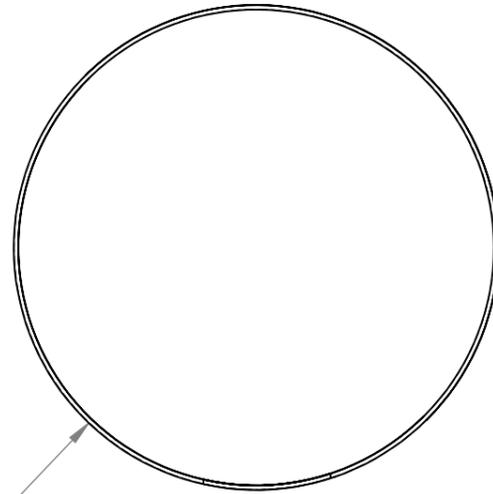


Ø 317,50  
Ø 316,50



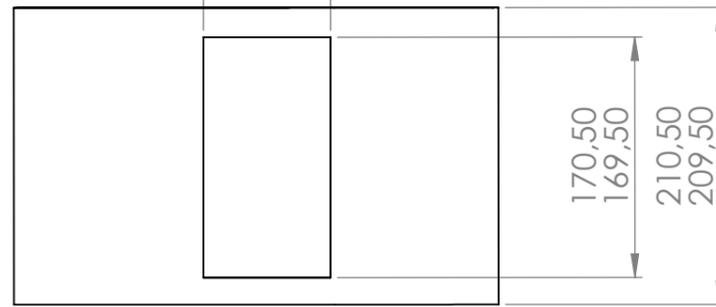
Rolar y soldar lámina de 996+-1 mm de largo.

## Camisa externa R010P\_1



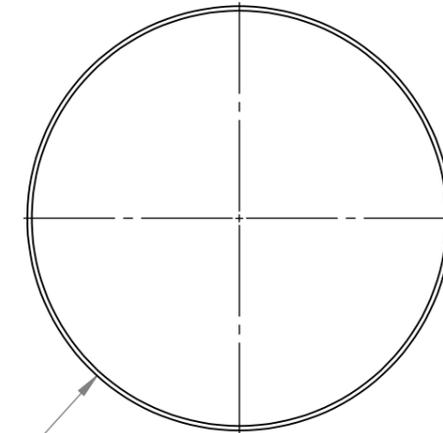
Ø 343

90,50  
89,50



Rolar y soldar lámina de 538 +- 1 mm de largo

## Camisa interna R010P\_2



Ø 300,00



Rolar y soldar lámina de 942 +- 1 mm de largo

Espesor de stock de 1/8 in.

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de I. Mecatrónica

REVISIÓN:

Proyecto Final de Graduación

**A**

	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
DIBUJ.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock
VERIF.				
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acero A36

	PARTE:
	Partes internas reactor

SISTEMA:	TOLERANCIAS:
FIRST ANGLE PROJECTION	LINEAL: X ± .X ±± .XX ±±± .XXX ±±±±
	ANGULAR: ±°

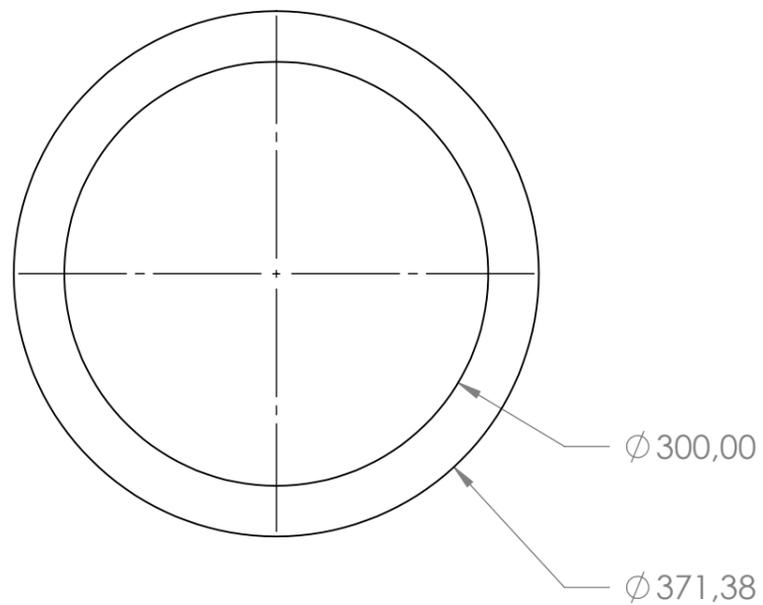
TOLERANCIA EN:	PROYECTO:
mm	Gasificador

TOLERANCIA EN:	ESCALA:
mm	1:5

PROYECTO:	FORMATO:
Gasificador	A3

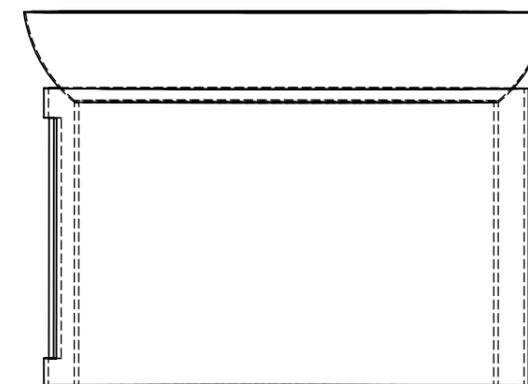
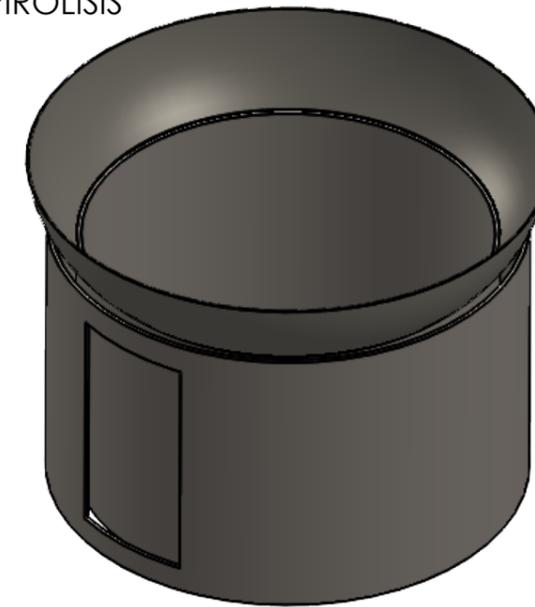
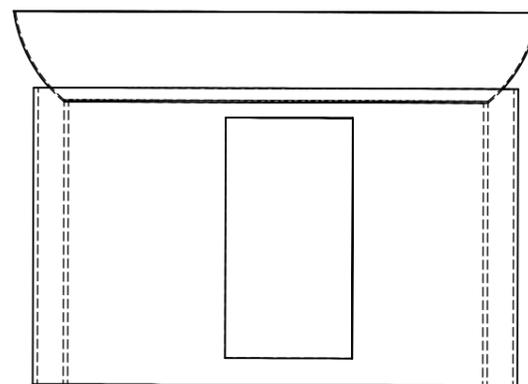
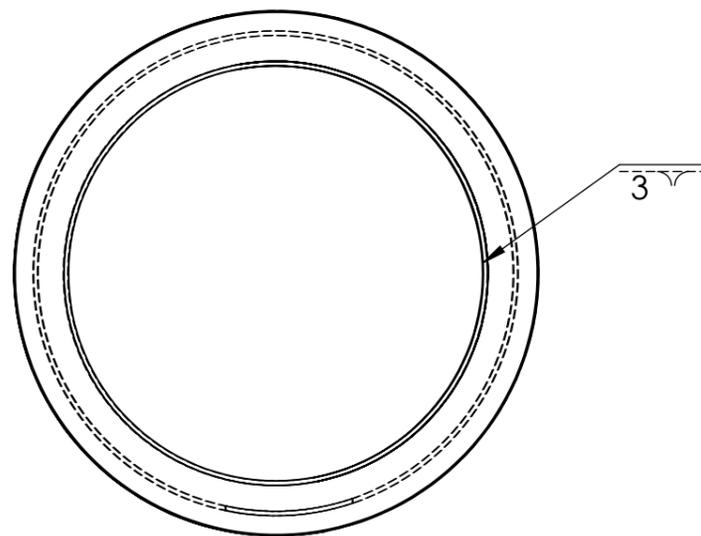
PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 2 DE 10
-----------------	--------------	--------------

ACELERADOR DE PIRÓLISIS R010P\_3



Se corta sección de la parte superior del tanque de propano del reactor.

ENSAMBLE DEL ACELERADOR DE PIRÓLISIS



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de I. Mecatrónica

REVISIÓN:

Proyecto Final de Graduación

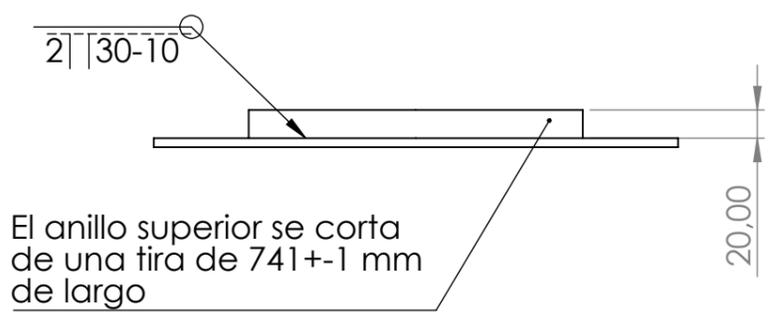
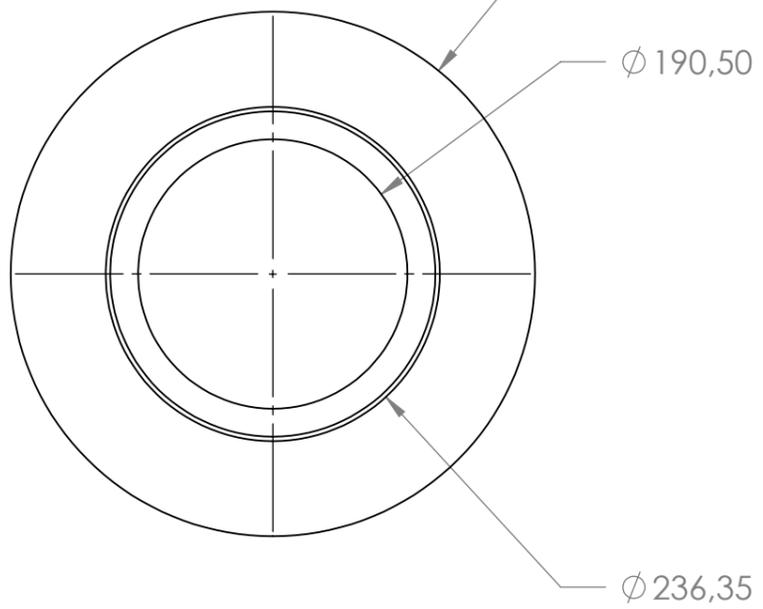
**A**

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock
APROB.				MATERIAL:
FABR.				Acero A36

PARTE:  
**Partes internas del reactor**

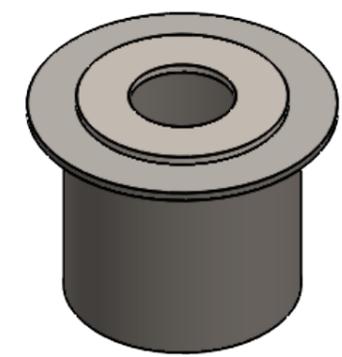
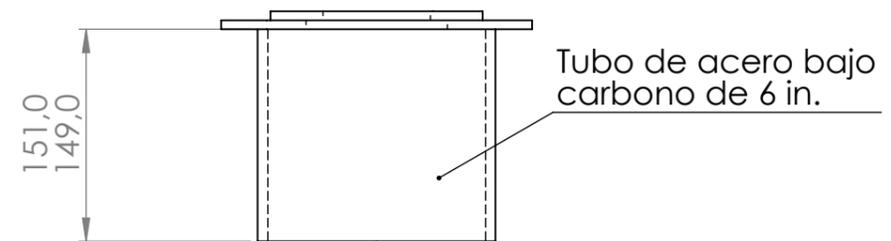
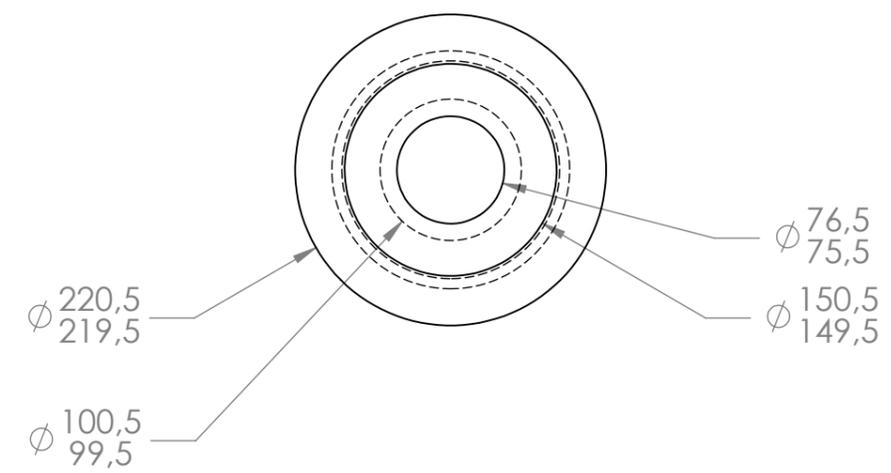
SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
FIRST ANGLE PROJECTION	LINEAL: X .X .XX .XXX	mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	<b>1:5</b>	<b>A3</b>
	ANGULAR: ±°	PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 3 DE 10	

MANTO DE AHOGAMIENTO R006R

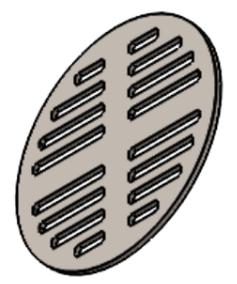
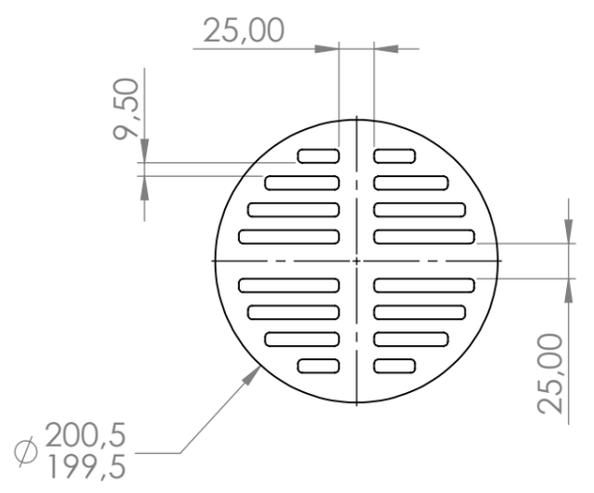


Manufacturar ambas piezas con Acero Inoxidable 314

TUBO DE REDUCCIÓN R007R



REJILLA DE LA REDUCCIÓN

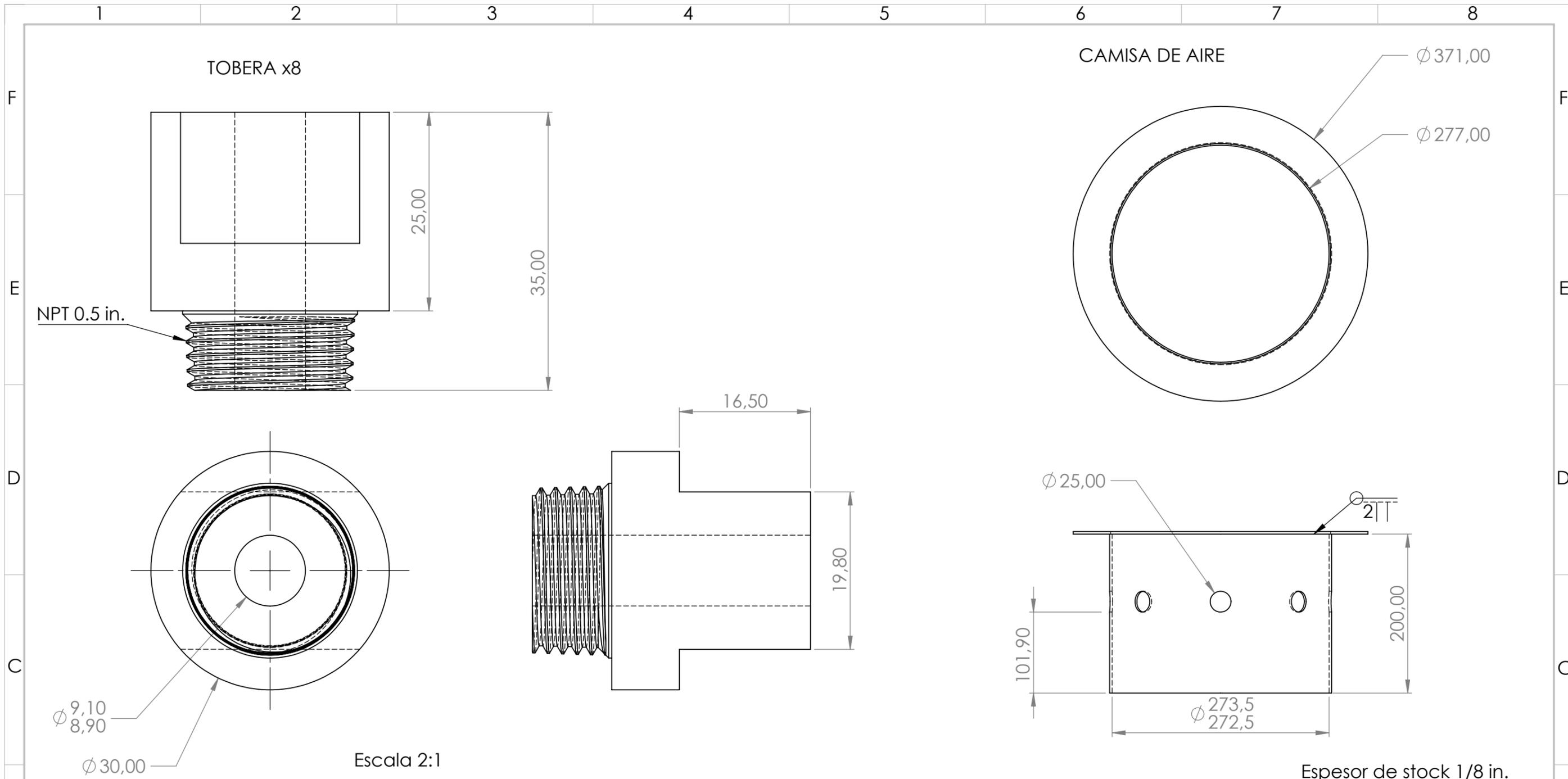


Acero inoxidable 304  
Espesor de stock 1/4 in.

**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de I. Mecatrónica  
Proyecto Final de Graduación  
REVISIÓN: **A**

DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock	
APROB.				MATERIAL:	Partes internas reactor
FABR.				Acero A36	
SISTEMA:	TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:
FIRST ANGLE PROJECTION	LINEAL: X : X : XX : XXX ANGULAR: ±°		mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	1:5
	PESO:	UNIDADES:	gramos	mm	FORMATO
	--	mm			A3
					HOJA 4 DE 10



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				Área Académica de I. Mecatrónica		REVISIÓN:
				Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:	
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock	Partes internas del reactor	
APROB.				MATERIAL:		
FABR.				Acero A36		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:
FIRST ANGLE PROJECTION		LINEAL: X .X .XX .XXX ANGULAR: ±°		mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	1:5
				PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	FORMATO: A3
						HOJA 5 DE 10

4

3

2

1

F

F

E

E

D

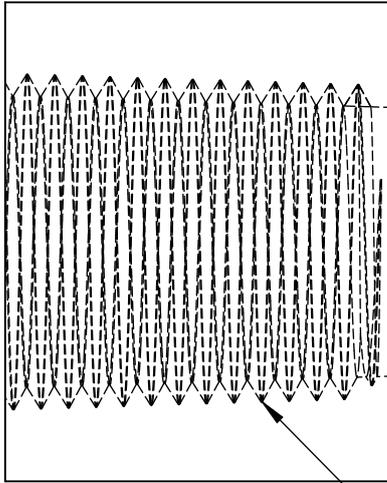
D

C

C

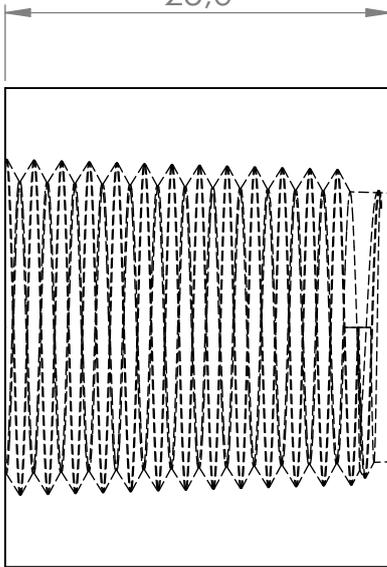
B

B

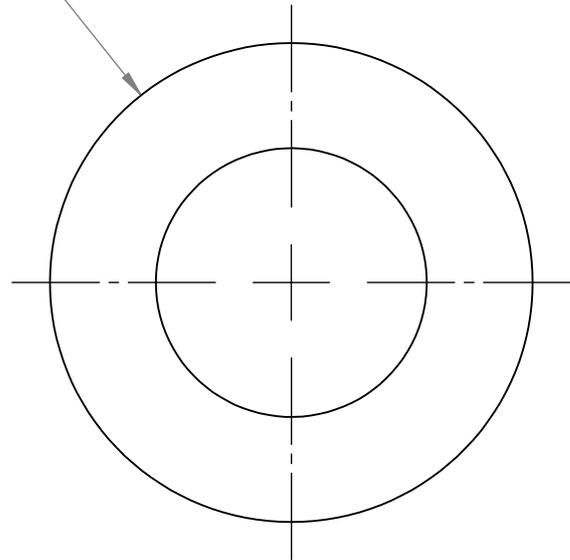


NPT 3/4 in.

26,0  
25,0



∅ 31,85  
31,65



**TEC** | Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de I. Mecatrónica

REVISIÓN:

Proyecto Final de Graduación

**A**

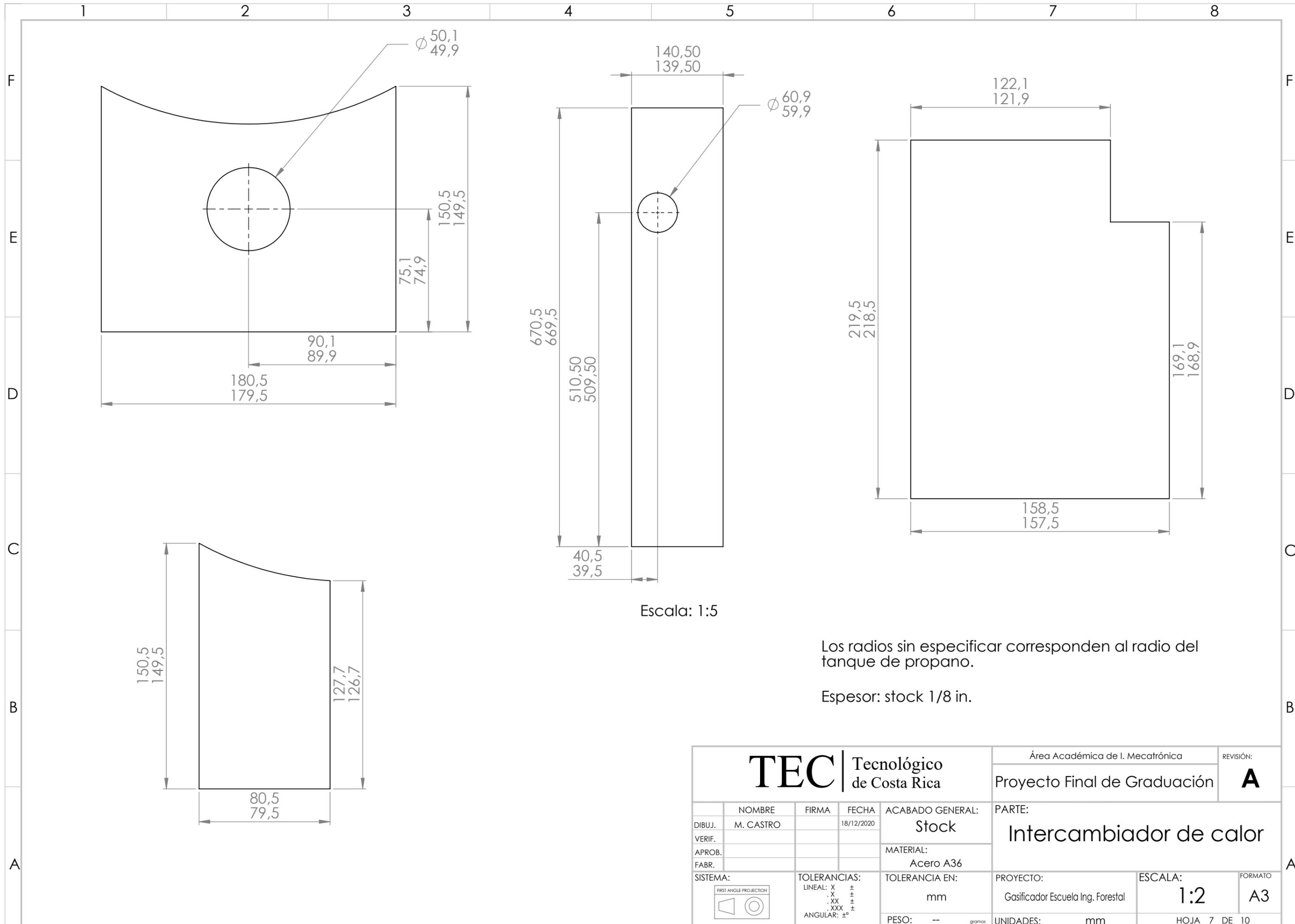
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE:	
	M. CASTRO		18/12/2020	Stock		Toberas
VERIF.				MATERIAL:		
APROB.				Acero Inox 304		
FABR.						
A	SISTEMA:	TOLERANCIAS:	TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO
		LINEAL: X ± .X ± .XX ± .XXX ± ANGULAR: ±°	mm	Gasificador	2:1	A4
		PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 6 DE 10		

4

3

2

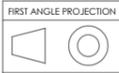
1

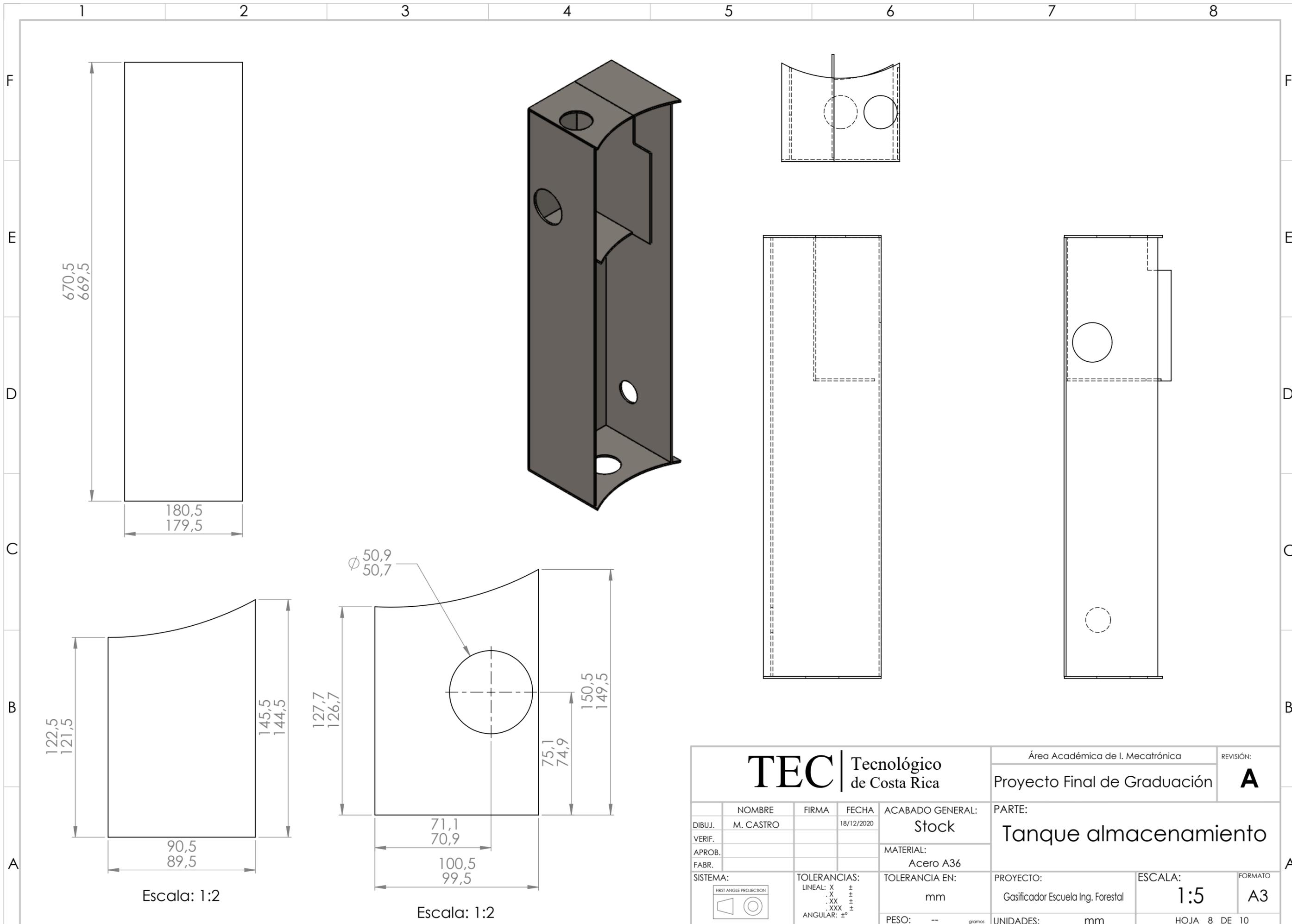


Escala: 1:5

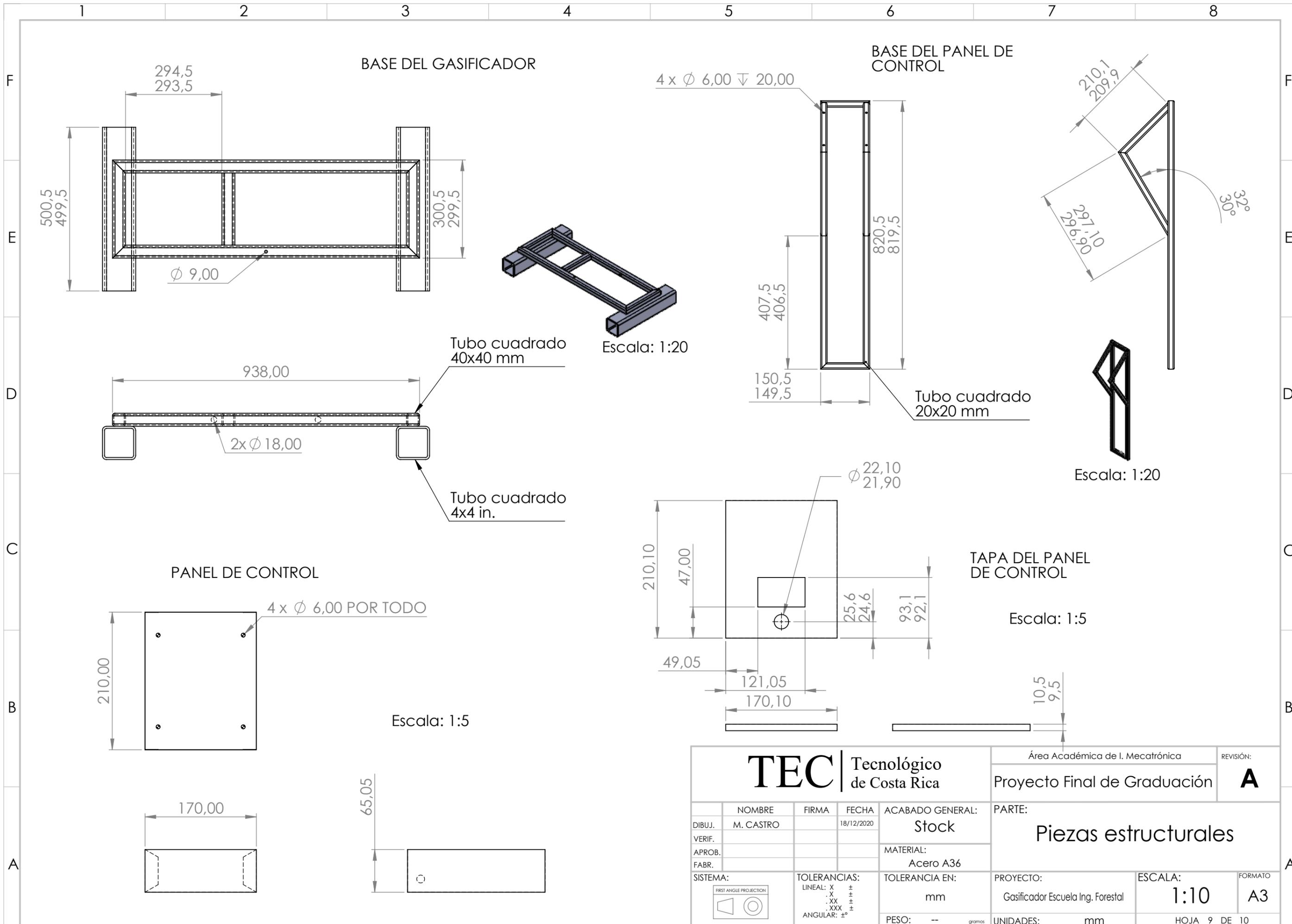
Los radios sin especificar corresponden al radio del tanque de propano.

Espesor: stock 1/8 in.

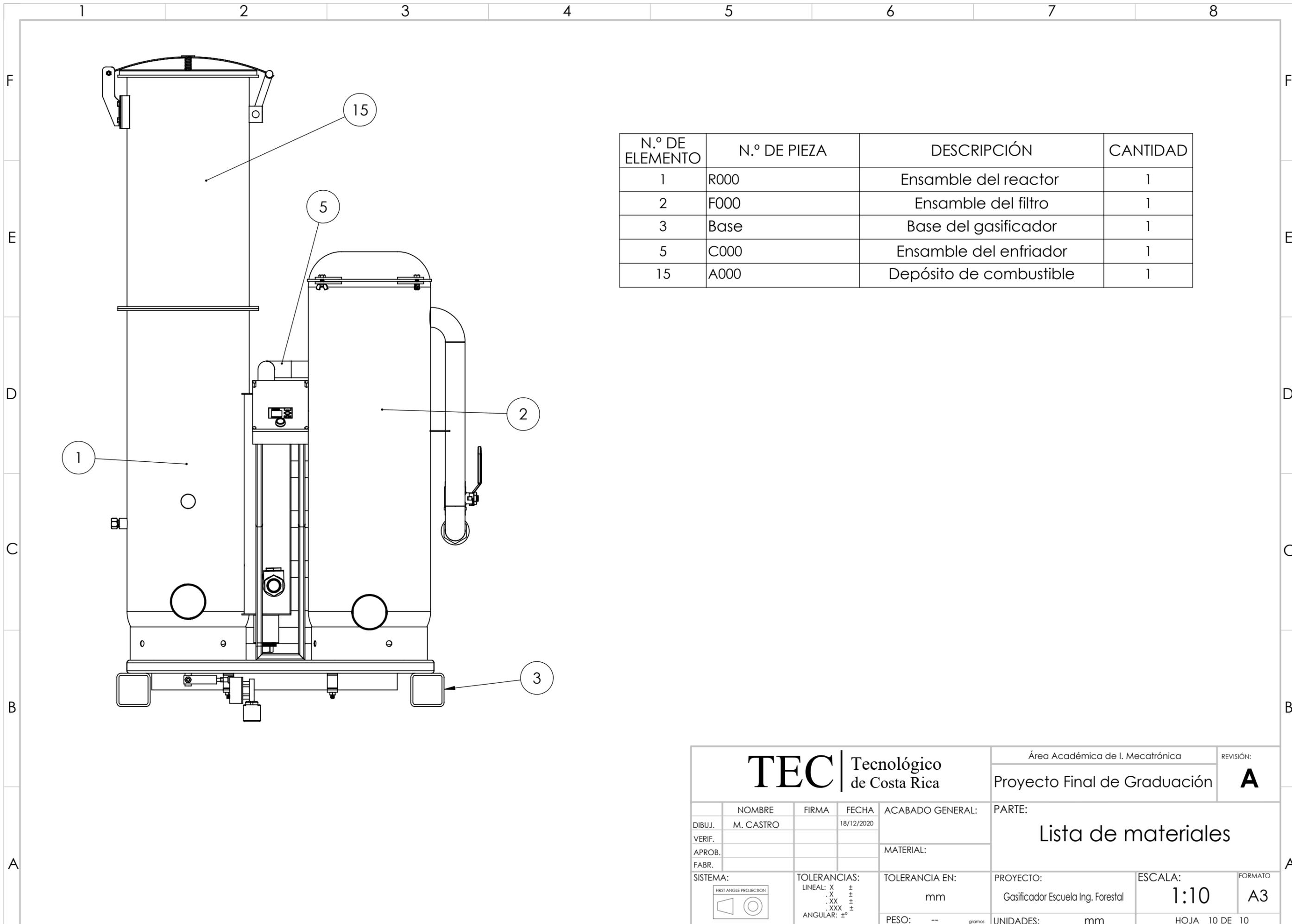
 <b>Tecnológico de Costa Rica</b>				Área Académica de I. Mecatrónica		REVISIÓN:
				Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	<b>PARTE:</b> <b>Intercambiador de calor</b>	
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock		
APROB.				MATERIAL:		
FABR.				Acero A36		
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:
		LINEAL: X .X .XX .XXX ANGULAR: ±°		mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	<b>1:2</b>
				PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	FORMATO: <b>A3</b>
				HOJA 7 DE 10		



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				Área Académica de I. Mecatrónica		REVISIÓN:	
				Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE: <b>Tanque almacenamiento</b>		
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020	Stock			
APROB.				MATERIAL:			
FABR.				Acero A36			
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
FIRST ANGLE PROJECTION		LINEAL: X .X .XX .XXX ANGULAR: $\pm^\circ$		mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	<b>1:5</b>	<b>A3</b>
				PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 8 DE 10	



<b>TEC</b>   Tecnológico de Costa Rica				Área Académica de I. Mecatrónica		REVISIÓN:
				Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>
NOMBRE: M. CASTRO FIRMA: FECHA: 18/12/2020				ACABADO GENERAL: Stock		PARTE: Piezas estructurales
DIBUJ.: VERIF.: APROB.: FABR.:				MATERIAL: Acero A36		PROYECTO: Gasificador Escuela Ing. Forestal ESCALA: 1:10 FORMATO: A3
SISTEMA: FIRST ANGLE PROJECTION				TOLERANCIA EN: mm		
TOLERANCIAS: LINEAL: X .XX .XXX ANGULAR: ±°				PESO: -- gramos		UNIDADES: mm HOJA 9 DE 10



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	R000	Ensamble del reactor	1
2	F000	Ensamble del filtro	1
3	Base	Base del gasificador	1
5	C000	Ensamble del enfriador	1
15	A000	Depósito de combustible	1

<h1>TEC</h1> Tecnológico de Costa Rica				Área Académica de I. Mecatrónica		REVISIÓN:	
				Proyecto Final de Graduación		<b>A</b>	
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ACABADO GENERAL:	PARTE: <h2>Lista de materiales</h2>		
VERIF.	M. CASTRO		18/12/2020				
APROB.				MATERIAL:			
FABR.							
SISTEMA:		TOLERANCIAS:		TOLERANCIA EN:	PROYECTO:	ESCALA:	FORMATO:
		LINEAL: X .X .XX .XXX ANGULAR: ±°		mm	Gasificador Escuela Ing. Forestal	1:10	A3
				PESO: -- gramos	UNIDADES: mm	HOJA 10 DE 10	