

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de un Horno Kon Tiki para producción de Biochar a partir de
residuos agrícolas

INGE-2858

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecatrónico

Presentado por:

Daniel Alexander Gálvez Campoverde

Guayaquil – Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

El presente proyecto lo dedico a mis
padres Jorge Gálvez y Deysi
Campoverde, a mis hermanos Odalys
y Jorge, y a mi abuela Mercedes,
quienes siempre confiaron en mí y
me brindaron su apoyo
incondicional.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi padre, Jorge Gálvez, y a mi madre, Deysi Campoverde, por su apoyo incondicional, por inculcarme valores de esfuerzo y perseverancia, y por ser los pilares fundamentales en cada etapa de mi formación. A mi hermana Odalys Gálvez y a mi hermano Jorge Gálvez, gracias por su cariño, comprensión y aliento constante, que me motivaron a no rendirme y a seguir adelante aun en los momentos más difíciles.

- **Daniel Gálvez**

Declaración Expresa

Yo Daniel Alexander Gálvez Campoverde acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 29 de mayo del 2025.



Daniel Alexander Gálvez Campoverde

Evaluadores

Jonathan Roberto León Torres, Mgtr.

Profesor de Materia

Marcelo Fajardo, Ph.D.

Tutor de proyecto

Resumen

La quema abierta de residuos agrícolas en zonas rurales genera emisiones contaminantes y pérdida de nutrientes en el suelo. Una alternativa sostenible es la producción de biochar mediante hornos tipo Kon-Tiki, sin embargo, su operación manual depende en gran medida de la experiencia del usuario, lo que ocasiona variabilidad en la calidad del producto, inestabilidad térmica y emisiones inconsistentes. Este proyecto tuvo como objetivo diseñar un horno Kon-Tiki que incorpore control embebido para reducir la dependencia del operador y estandarizar el proceso de pirólisis. Los resultados de simulación confirmaron que el diseño cumple con los objetivos planteados: estructura mecánica estable, ventilación adecuada para sostener la cortina de llama y un control térmico con estabilidad alrededor de $700\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se concluye que, en fase de simulación, el horno diseñado constituye una alternativa viable, replicable y ambientalmente sostenible.

Palabras Clave: Biochar, Horno Kon-Tiki, Pirólisis, Control PID.

Abstract

The open burning of agricultural waste in rural areas generates polluting emissions and loss of nutrients in the soil. A sustainable alternative is biochar production using Kon-Tiki kilns. However, their manual operation depends largely on user experience, resulting in variability in product quality, thermal instability, and inconsistent emissions. This project aimed to design a Kon-Tiki kiln that incorporates embedded control to reduce operator dependence and standardize the pyrolysis process. Simulation results confirmed that the design meets the stated objectives: stable mechanical structure, adequate ventilation to sustain the flame curtain, and stable thermal control around $700^{\circ}\text{C} \pm 50^{\circ}\text{C}$. It is concluded that, in the simulation phase, the designed kiln constitutes a viable, replicable, and environmentally sustainable alternative.

Keywords: Biochar, Kon-Tiki kiln, Pyrolysis, PID control.

Índice general

Resumen	I
Abstract.....	II
Índice general	III
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VII
Índice de figuras	VIII
Índice de Tablas.....	X
Índice de Planos.....	XI
Capítulo 1	1
1 Introducción.....	2
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Justificación del problema	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4 Marco teórico	6
1.4.1 Producción de Biochar.....	6
1.4.2 Sistemas industriales de pirólisis.....	7
1.4.3 Reactores de Tambor	8
1.4.4 Hornos cortina de llama.....	9
1.4.5 Estudios de caso y proyectos relacionados.....	12
Capítulo 2	2
2 Metodología.....	15
2.1 Recolección de datos	15
2.2 Requerimientos del diseño	17
2.3 Criterios de selección.....	18

2.4	Proceso de Diseño.....	19
2.4.1	Diseño conceptual.....	20
2.5	Diseño Mecánico	22
2.5.1	Modelado	22
2.5.2	Caracterización de necesidades	23
2.5.3	Diseño estructural	24
2.5.4	Análisis de elementos finitos.....	26
2.5.5	Flow simulation	28
2.6	Diseño electrónico	28
2.6.1	Alternativas de solución para el ventilador	30
2.7	Diseño de control	31
2.7.1	Desarrollo de control de pirolisis.....	31
2.7.2	Prueba estática (sin biomasa):	33
2.7.3	Prueba dinámica (con biomasa):	33
2.7.4	Identificar parámetros:.....	33
2.7.5	Configuración de directorio principal	33
2.7.6	Librerías necesarias	35
Capítulo 3		15
3	Resultados y análisis.....	37
3.1	Alternativa resultante de la matriz de decisión	37
3.2	Diseño del horno	37
3.3	Cálculo de esfuerzos combinados	41
3.3.1	Ingreso de flujo másico.....	47
3.4	Selección del ventilador.....	49
3.5	Simulaciones.....	50
3.5.1	Análisis de elementos finitos.....	50
3.5.2	Flow simulation	51

3.6	Determinar parámetros con ML.....	53
3.6.1	Lectura de datos esp32	53
3.6.2	Carga de datos	55
3.6.3	Configuración preliminar ML	55
3.6.4	Entrenamiento modelo.....	57
3.6.5	Evaluación de resultados	57
3.7	Control PID.....	60
3.7.1	Configurar el controlador:	60
3.7.2	Aumentar la ganancia:	60
3.7.3	Calcular parámetros PID:	61
Capítulo 4		37
4	Conclusiones y recomendaciones	64
4.1	Conclusiones	64
4.2	Recomendaciones	65
Bibliografía		68
Apéndices		73

Abreviaturas

ASTM	American Society for Testing and Materials
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CAD	Computer-Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos: home
ML	Machine Learning
NGI	Norwegian Geotechnical Institute
FS	Factor de seguridad
ESP32	Microcontrolador de Espressif Systems
IoT	Internet of Things
PWM	Pulse Width Modulation
PID	Proportional-Integral-Derivative
VSC	Visual Studio Code
CMD	Command Prompt
SBC	Single Board Computer
RTD	Resistance Temperature Detector
NTC	Negative Temperature Coefficient
PTC	Positive Temperature Coefficient

Simbología

CO ₂	Dioxido de Carbono
CH ₄	Metano
m	Metro
mm	Milímetro
N	Newton – unidad de fuerza
N·m	Newton metro
kg	Kilogramo
kg/m ³	Kilogramo por metro cúbico
L	Litro
s	Segundo
°C	Grado Celsius
h	Hora
W	Watt
HP	Horsepower
Pa	Pascal
MPa	Megapascal
KPa	Kilopascal

Índice de figuras

Figura 1.1 Biochar producido post-pirólisis	7
Figura 1.2 Horno rotatorio eléctrico de pirólisis	8
Figura 1.3 Reactor de doble cámara fabricado	9
Figura 1.4 Producción de biochar en un pozo	9
Figura 1.5 Horno Kon-Tiki manual	10
Figura 1.6 Horno híbrido	11
Figura 1.7 Empresa ecuatoriana que produce Hornos Kon Tiki	13
Figura 2.1 Proceso de Diseño	20
Figura 2.2 Nivel cero	21
Figura 2.3 Nivel uno	21
Figura 2.4 Análisis modular del funcionamiento de Horno Kon-tiki	22
Figura 2.5 Bosquejo del diseño de horno Kon-Tiki a realizar	24
Figura 2.6 Ejes de volcado	24
Figura 2.7 Diseño del eje	25
Figura 2.8 Distancia de acción del momento flector y esfuerzo cortante	26
Figura 2.9 Definición de material de trabajo	27
Figura 2.10 Asignación de sujeciones	27
Figura 2.11 Asignación de cargas	28
Figura 2.12 Ventilador centrífugo	30
Figura 2.13 Ventilador axial	30
Figura 2.14 Microventilador tipo turbina	30
Figura 2.15 Diagrama de control	32
Figura 2.16 Configuración de directorio principal	34
Figura 2.17 Declaración de librerías	34
Figura 2.18 Activación y desactivación del entorno del proyecto	35
Figura 3.1 Carcaza del horno	37
Figura 3.2 Asignación de cargas y apoyos	41
Figura 3.3 Estructura del horno	41
Figura 3.4 Estructura del soporte del horno	44
Figura 3.5 Reacciones y tensiones en la estructura	45
Figura 3.6 Simulación de derivas	46
Figura 3.7 Reacciones en los apoyos	46

Figura 3.8 Simulación de comprobación de tensiones de Von-Misses	50
Figura 3.9 Desplazamiento estático.....	51
Figura 3.10 Calculo e iteraciones del sistema	51
Figura 3.11 Simulación de trayectoria de aire en la cámara de combustión	52
Figura 3.12 Lectura de datos del microcontrolador.....	53
Figura 3.13 Lectura de datos del microcontrolador.....	54
Figura 3.14 Carga de datos del microcontrolador	55
Figura 3.15 Carga de datos del microcontrolador	55
Figura 3.16 Configuración preliminar	56
Figura 3.17 Resultados preliminares	56
Figura 3.18 Entrenamiento del modelo DecisionTreeClassifier	57
Figura 3.19 Ejecución de reportes de evaluación	57
Figura 3.20 Matriz de confusión.....	58
Figura 3.21 Importancia de características	59
Figura 3.22 Configuración del controlador	60
Figura 3.23 Configuración del controlador parámetro Kp	61
Figura 3.24 Programación de parámetros calibrados	61

Índice de Tablas

Tabla 1 Especies vegetales del bosque sintrópico de Cooperativa de producción agrícola Ananda.....	15
Tabla 2 Análisis de ponderación de necesidades de la voz del usuario	16
Tabla 3 Requerimientos de diseño del proyecto.....	17
Tabla 4 Criterios de evaluación.....	18
Tabla 5 Matriz de decisión	19
Tabla 6 Viabilidad de sensores.....	29
Tabla 7 Microprocesadores y Microcontroladores.....	29
Tabla 8 Alternativas de ventiladores para el horno	30
Tabla 9 Resumen para selección de alternativa por prioridad.....	30
Tabla 10 Datos de diseño a esfuerzos combinados.	42
Tabla 11 Pérdidas de presión de aire.	48
Tabla 12 Modelo de reporte.....	58
Tabla 13 Análisis de parámetros de calibración.....	61

Índice de Planos

Plano 1	Plano general
Plano 2	Detalle de ensamble de eje
Plano 3	Cámara de combustión
Plano 4	Estructura de soporte
Plano 5	Soporte eje
Plano 6	Soldaduras de soporte
Plano 7	Soldaduras de carcasa
Plano 8	Sistema electrónico - pirólisis

Capítulo 1

1 Introducción

La biomasa agrícola comprende residuos orgánicos como raíces, tallos, hojas y cáscaras generados en las actividades de cultivo. En muchas regiones rurales de América Latina, estos materiales son descartados mediante quema a cielo abierto, una práctica persistente por razones económicas y técnicas [1]. Como destaca un informe de la Comisión para la Cooperación Ambiental (CCA), esta sigue siendo la forma más común y accesible de eliminar residuos agrícolas [2]. Según el Banco Mundial, entre el 10 % y el 20 % de la quema abierta de biomasa es deliberada y planificada [3], lo que confirma la necesidad urgente de alternativas sostenibles para el manejo de estos residuos.

Una de esas alternativas es el biochar, un carbón vegetal producido por pirólisis de residuos orgánicos en condiciones de bajo oxígeno. Esta tecnología permite secuestrar carbono, mejorar suelos y reducir la presión sobre los ecosistemas. De acuerdo con la European Biochar Industry, una tonelada de biochar puede mitigar hasta 2,2 toneladas de CO₂ equivalente [4], su incorporación al suelo mejora la fertilidad y puede persistir por más de cien años [5].

Entre los métodos de producción destaca el horno Kon-Tiki, un sistema de diseño abierto y cónico que genera una "cortina de llama" superficial, promoviendo una combustión más limpia y eficiente [6]. Su bajo costo, facilidad de construcción con materiales locales y mínima infraestructura requerida lo hacen ideal para contextos rurales [7], especialmente frente a sistemas industriales de pirólisis que superan los USD 10,000 [8]. En Ecuador, esta solución cobra particular relevancia. Zonas como Los Ríos, Bolívar y Cotopaxi presentan altos niveles de quema agrícola [9]. A su vez, residuos como tallos de maíz, cáscaras de cacao o bagazo de caña tienen gran potencial como materia prima para biochar [10]. Además, se enfrentan suelos ácidos ($\text{pH} < 5.5$) que afectan cultivos clave como el arroz y el maíz [11].

No obstante, la operación del horno Kon-Tiki depende aún de la experiencia del usuario. Aspectos como el momento de añadir biomasa o la regulación del flujo de aire afectan directamente la calidad del biochar y las emisiones generadas [6]. Prototipos artesanales han reportado eficiencias térmicas inferiores al 30 %, lo que abre espacio para mejoras tecnológicas. Aquí entran las tecnologías embebidas, que permiten integrar sensores, regular ventiladores y registrar datos térmicos sin equipos costosos [12]. Con herramientas de aprendizaje automático ligero es posible clasificar las fases térmicas del proceso y optimizar decisiones en tiempo real [13].

Una de las aplicaciones más prometedoras de aprendizaje automático en este contexto es el reconocimiento de fases térmicas durante la pirolización. Al entrenar un modelo con ejemplos de temperatura en distintas etapas —encendido, pirólisis activa, extinción—, el sistema puede aprender a clasificar en qué momento se encuentra el proceso y ajustar automáticamente el flujo de aire o lanzar alertas. Así, un horno que antes requería vigilancia constante puede funcionar con mayor autonomía y repetibilidad, lo que no solo mejora su rendimiento, sino que también facilita la capacitación de nuevos usuarios.

El proyecto busca integrar herramientas de simulación CFD para optimizar la estructura del horno, y se buscará un impacto positivo en tres frentes: ambiental (reducción de emisiones), agrícola (mejora de suelos) y socioeconómico (valorización de residuos con bajo costo). En este contexto, el proyecto propone aprovechar una idea sencilla —quemar biomasa sin humo y transformarla en un recurso útil— y dotarla de inteligencia técnica sin perder su carácter accesible. El horno Kon-Tiki no es solo una estructura metálica, sino una propuesta de transformación local; y si a ello se suma un sistema de control que aprende y mejora con cada uso, su impacto puede ser aún mayor.

1.1 Descripción del problema

El proceso de producción de biochar en hornos Kon-Tiki depende de la creación y mantenimiento de una “cortina de llama” en la superficie de la pila de biomasa, lo cual requiere la alimentación adecuada de aire y la recarga manual de material una vez agotada la combustión rápida de gas volátil. Este método artesanal genera las dificultades enumeradas en el siguiente párrafo.

Variabilidad en la calidad del biochar: Diferencias en temperatura y régimen de combustión ocasionan heterogeneidades en la estructura porosa del carbón vegetal [7]. Alta demanda de atención del operador: Se requiere experiencia para ajustar manualmente las compuertas de aire y estimar el momento óptimo para añadir biomasa, aumentando el riesgo de errores humanos [7]. *Emisiones inconsistentes*: Una mala regulación del aire produce picos de humo y partículas finas, contraviniendo uno de los objetivos clave del diseño Kon-Tiki [14]. *Dificultad para replicar el proceso*: La falta de registro automático de datos de temperatura y flujo de aire impide comparar distintos lotes y optimizar protocolos de pirolisis. Por tanto, existe la necesidad de un sistema de control embebido que monitorice la temperatura interna, interprete su comportamiento y regule el suministro de aire, reduciendo la carga operativa y estandarizando la calidad del biochar.

1.2 Justificación del problema

El proceso de producción de biochar en hornos Kon-Tiki enfrenta varias dificultades debido a su método artesanal. Entre estas dificultades se incluyen la variabilidad en la calidad del biochar, la alta demanda de atención del operador [15], las emisiones inconsistentes y la dificultad para replicar el proceso. Estas dificultades surgen porque el proceso depende de una "cortina de llama" que requiere una alimentación

adecuada de aire y una recarga manual de material una vez agotada la combustión rápida de gas volátil.

Resolver estos problemas es crucial por varias razones. Primero, la variabilidad en la calidad del biochar afecta la uniformidad y eficiencia del producto final, lo cual es esencial para su aplicación efectiva. Segundo, la alta demanda de atención del operador no solo aumenta el riesgo de errores humanos, sino que también requiere una experiencia significativa, lo cual puede ser una barrera para la implementación con personas de las zonas rurales. Tercero, las emisiones inconsistentes pueden contravenir los objetivos ambientales del diseño Kon-Tiki, lo cual es especialmente preocupante dado el enfoque en la sostenibilidad [16]. Finalmente, la falta de registro automático de datos dificulta la optimización y replicación del proceso, lo cual es esencial para la mejora continua y la escalabilidad.

Para abordar estos desafíos, se propone la implementación de un sistema de control embebido. Este sistema monitorearía la temperatura interna, interpretaría su comportamiento y regularía el suministro de aire de manera automática. La implementación de tal sistema no solo reduciría la carga operativa, sino que también estandarizaría la calidad del biochar, asegurando un producto más uniforme y eficiente. Además, al automatizar el registro de datos de temperatura y flujo de aire, se facilitaría la optimización y replicación del proceso, lo cual es esencial para la mejora continua y la escalabilidad del método de producción de biochar.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar un horno Kon-Tiki potenciado con protocolos de ML, capaz de regular el flujo de aire según la temperatura de pirólisis, utilizando un modelo basado en protocolos de control para aumentar la producción de biomasa.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Realizar el diseño modular del horno tipo Kon-Tiki mediante herramientas de modelado CAD, con el fin de optimizar su funcionalidad estructural y adaptabilidad a procesos automatizados.
2. Diseñar la estructura del horno incorporando geometría cónica y componentes estratégicos, con el objetivo de maximizar el efecto de cortina de llama durante la pirólisis.
3. Diseñar el sistema electrónico y control utilizando sensores térmicos, microcontroladores, con el propósito de regular las condiciones operativas para una producción de biochar eficiente y de calidad constante.

1.4 Marco teórico

El presente marco teórico profundiza en los fundamentos científicos y tecnológicos que sustentan el desarrollo de un horno Kon-Tiki inteligente, integrando conocimientos sobre la producción de biochar, el diseño de hornos cortina de llama, el control embebido con microcontroladores y la aplicación de técnicas de aprendizaje automático en dispositivos de recursos limitados.

1.4.1 Producción de Biochar

El biochar mostrado en la Figura 1.1 es un tipo de carbón vegetal producido a partir de biomasa mediante procesos de pirólisis controlada, destinado a su uso en suelos agrícolas o forestales. Se caracteriza por su alta estabilidad química y su resistencia a la descomposición, lo que le permite actuar como sumidero de carbono a largo plazo. Además, su estructura porosa y su gran área superficial le otorgan una notable capacidad para retener agua y nutrientes, mejorar la fertilidad del suelo y estimular la actividad microbiana. Aunque su utilización ha sido redescubierta recientemente, existen antecedentes históricos como la Terra Preta en la Amazonía, donde antiguos pobladores

incorporaban carbón vegetal al suelo para mejorarlo. Según la Pacific Biochar Benefit Corporation, el biochar puede definirse como carbón vegetal derivado de biomasa cuando se utiliza o se encuentra en el suelo. [17]

Existen múltiples tecnologías para la producción de biochar, que varían según el contexto, el nivel de inversión requerido y el objetivo del proceso. Entre las tecnologías tradicionales se encuentran sistemas industriales de pirólisis, reactores de tambor y hornos de cortina de llama que son comunes en zonas rurales por su bajo costo y menos emisiones.

Figura 1.1

Biochar producido post-pirólisis



Nota. Imagen obtenida de ARTi (2025) [10].

1.4.2 Sistemas industriales de pirólisis

Los sistemas industriales de pirólisis permiten convertir biomasa en biochar a través de un proceso térmico controlado, generalmente entre 400 °C y 700 °C, en condiciones de baja concentración de oxígeno para garantizar un producto homogéneo. Estos equipos incluyen sistemas para recuperar subproductos como gas de síntesis y bioaceite, incrementando así la eficiencia energética del proceso. Aunque las plantas de

mayor capacidad pueden superar los USD 100,000, existen opciones para sistemas modulares y semicontínuos en pequeña escala como la mostrada en la Figura 1.2, cuyos costos pueden situarse entre USD 20,000 y 50,000, dependiendo de la tecnología, capacidad y componentes auxiliares [8]. A pesar de esta posibilidad de acceso, su adopción en áreas rurales sigue siendo limitada por factores como los costos operativos adicionales, el requerimiento de personal calificado y la necesidad de infraestructura complementaria [18].

Figura 1.2

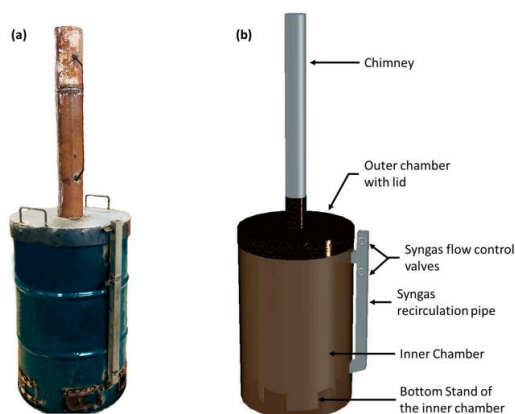
Horno rotatorio eléctrico de pirólisis



Nota. Imagen obtenida de Kintek Solution (2025) [8]

1.4.3 Reactores de Tambor

Los reactores de tambor mostrados en la Figura 1.3, contruidos con barriles metálicos perforados, representan una alternativa de muy bajo costo para producir biochar en contextos rurales. En Sri Lanka, se documentó un diseño de doble cámara con tambores concéntricos que alcanzó un rendimiento del 49 % y una producción de 1.8 kg/h [19]. Este tipo de sistema ha demostrado ser viable en condiciones reales gracias a su construcción sencilla y disponibilidad local de materiales [20]. Sin embargo, presentan desventajas importantes al ofrecer poco control térmico, generan mayores emisiones contaminantes altas y no permiten recuperar energía. Además, el biochar obtenido puede tener propiedades variables, lo cual limita su aplicación en contextos más exigentes.

Figura 1.3*Reactor de doble cámara fabricado**Nota.* Imagen obtenida de Energies (2023) [20]

1.4.4 Hornos cortina de llama

El horno de cortina de llama de fosa es la forma más básica y ancestral de esta tecnología. Consiste en una excavación cónica o cilíndrica en el suelo, donde se va añadiendo biomasa en capas sucesivas. A medida que la biomasa se carboniza, los gases volátiles generados se encienden en la superficie, creando una “cortina de llama” que quema las emisiones visibles y protege las capas inferiores del oxígeno. Este diseño ha sido validado experimentalmente por su simplicidad, bajo costo y facilidad de implementación, sin necesidad de materiales industriales ni soldadura [6]. Además, ha sido promovido como una solución apropiada para pequeños agricultores en regiones tropicales, donde se valora su bajo requerimiento técnico y adaptabilidad a condiciones rurales [21].

Figura 1.4*Producción de biochar en un pozo**Nota.* Imagen obtenida de Biochar journal (2014) [7]

El horno Kon-Tiki representa una evolución significativa dentro de la categoría de hornos de cortina de llama, al transformar el concepto mostrado en la Figura 1.4 de una fosa en una estructura metálica cónica o piramidal invertida como se observa en la Figura 1.5. Su diseño permite una combustión más controlada y eficiente en la producción de biochar, ya que los gases volátiles liberados durante el pirólisis ascienden y se inflaman en la superficie, formando una cortina de llama que reduce las emisiones contaminantes y protege el material inferior del contacto con oxígeno [22]. Estos hornos representan una innovación en la producción de biochar a pequeña escala. Estos hornos operan mediante la combustión de gases volátiles en una capa superficial de llamas, lo que reduce significativamente las emisiones de metano y otros contaminantes. Un estudio realizado por el Instituto Geotécnico Noruego (NGI) demostró que, al utilizar biomasa seca con un contenido de humedad inferior al 15%, las emisiones de metano se reducen a niveles casi nulos, entre 0 y 3.6 gramos por kilogramo de biochar producido [23].

Figura 1.5

Horno Kon-Tiki manual



Nota. Imagen obtenida de The biochar revolution (2015) [24]

En la Figura 1.6 se presenta una tercera variante más avanzada, es el horno híbrido de cortina de llama con recuperación de calor, que mantiene el principio del Kon-Tiki pero incorpora sistemas para aprovechar el calor residual generado durante la carbonización. En estos diseños, el calor puede canalizarse hacia la destilación de aceites esenciales, el calentamiento de agua o la cocción simultánea, lo que permite aprovechar la energía térmica disponible y mejorar la eficiencia global del sistema [7]. Esta tecnología ha sido implementada en más de 67 países, lo que evidencia su aplicación a nivel global en comunidades rurales [25]. Aunque su diseño requiere mayor planificación y cierta complejidad técnica en comparación con modelos tradicionales, se valora por su capacidad de integrar múltiples funciones agroindustriales en un solo sistema.

Figura 1.6

Horno híbrido



Nota. Imagen obtenida de Biochar journal (2019) [22]

1.4.5 Estudios de caso y proyectos relacionados

En Ghana, la gestión de residuos agrícolas provenientes del cultivo de cacao motivó el desarrollo de un proyecto centrado en la aplicación del horno Kon-Tiki para la producción de biochar. Este estudio fue realizado por Ernestina Quansah como parte de su tesis de grado en la Norwegian University of Life Sciences (NMBU), en colaboración con el Cocoa Research Institute of Ghana. El horno fue construido localmente y operado de manera completamente manual, cargando la biomasa por capas y supervisando visualmente el proceso de combustión. El proyecto permitió convertir residuos de cáscara de cacao en un biochar con un rendimiento del 33.4 %, mejorando además propiedades clave del suelo como el pH, la retención hídrica y el contenido de nutrientes. Esta implementación demuestra la viabilidad del horno Kon-Tiki como solución práctica, de bajo costo y adecuada para comunidades rurales agrícolas con recursos limitados [25].

Como parte de una investigación para evaluar tecnologías de producción de biochar en zonas rurales, investigadores del Norwegian Geotechnical Institute (NGI) realizaron un estudio experimental empleando hornos tipo cortina de llama, incluido el diseño Kon-Tiki. La investigación, liderada por Rajendra Pandit, se enfocó en comparar diferentes tipos de hornos en términos de eficiencia y efecto agronómico del biochar producido. El Kon-Tiki fue operado de forma completamente manual, replicando condiciones comunes en comunidades agrícolas de bajos recursos. Los resultados indicaron que los biochars obtenidos mostraban efectos agronómicos positivos equivalentes entre hornos, con rendimientos de producción entre el 20 y 30 %, además de mejoras medibles en la química del suelo y el rendimiento de cultivos como el maíz. Este trabajo posiciona al horno Kon-Tiki como una alternativa viable y reproducible para la agricultura sostenible en países en desarrollo [26] .

Figura 1.7

Empresa ecuatoriana que produce Hornos Kon Tiki



Nota. Imagen obtenida de ARTi (2025) [10]

En la Figura 1.7 se presenta a la empresa estadounidense ARTi, quién desde 2021 colabora con la startup ecuatoriana Pacchar en el desarrollo de sistemas sostenibles de producción de biochar en el país. Esta iniciativa emplea hornos tipo Kon-Tiki para transformar residuos orgánicos como cáscaras de cacao y materiales forestales mediante pirólisis controlada, pudiendo alcanzar rendimientos aproximados del 20 % en peso. Las actividades incluyen capacitación técnica, monitoreo ambiental bajo protocolos MRV (Medición, Reporte y Verificación), y la articulación con mercados de créditos de carbono. Pacchar, liderada por Carlos González, promueve la agricultura regenerativa y la neutralidad de carbono, adaptando esta tecnología a las condiciones agroecológicas únicas de Ecuador [10].

Capítulo 2

2 Metodología

Este capítulo presenta las alternativas técnicas evaluadas para resolver la problemática, priorizando la opción más alineada con los objetivos y criterios del proyecto. Se describe la solución seleccionada en sus aspectos mecánicos, electrónicos y de control, junto con los componentes y procedimientos planteados para integrar el diseño, asegurando coherencia y viabilidad en la propuesta

2.1 Recolección de datos

El cliente de este proyecto es la Cooperativa de Producción Agrícola Ananda, esta cooperativa se dedica a la producción de especies vegetales de alto valor agregado. En el proceso de recolección de datos se evaluaron los residuos que la cooperativa tiene a disposición. Actualmente la cooperativa maneja un bosque sintrópico donde se encuentran los cultivos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1

Especies vegetales del bosque sintrópico de Cooperativa de producción agrícola Ananda

Nº	Especie vegetal	Desecho de carga por ciclo (kg)	Capacidad de producir Biochar
1	Cannabis	70.5	40 %
2	Guarango	10	50 %
3	Limonero	2.5	15 %
4	Aguacate	2.5	10 %
5	Higuerilla	15	4 %
6	Cebolla blanca	5	2 %

La recolección de datos se realizó mediante entrevistas y encuestas a los miembros de la cooperativa Ananda, con el objetivo de identificar y cuantificar sus necesidades respecto al horno. Las entrevistas y cuestionarios, aplicados en línea a través de Google

Forms y disponibles en el Apéndice A, permitieron conocer las expectativas de los operarios y aportar una base técnica y medible para los requerimientos.

Las necesidades de los usuarios traducidas a la voz del ingeniero se muestran en la Tabla 2 en el siguiente orden de importancia: Fácil operación = Bajo costo $\geq$ Control de temperatura $\geq$ Bajo peso = control de flujo de aire $\geq$ monitoreo a distancia

Tabla 2

Análisis de ponderación de necesidades de la voz del usuario

	Fácil operación	Bajo costo	Control de temperatura	Bajo peso	Control de flujo de aire	Monitoreo a distancia	Σ^+	% de ponderación
Fácil operación		0.5	1	1	1	1	5.5	26.19
Bajo Costo	0.5		1	1	1	1	5.5	26.19
Control de temperatura	0	0		1	1	1	4	19.05
Bajo peso	0	0	0		0.5	1	2.5	11.9
Control de flujo de aire	0	0	0	0.5		1	2.5	11.9
Monitoreo a distancia	0	0	0	0	0		1	4.8
Total							21	100

El análisis de ponderación de características para el diseño conceptual de un horno Kon-Tiki para la cooperativa de producción agrícola Ananda nos permite basarnos en las necesidades del usuario para desarrollar un diseño adaptado a lo que el cliente requiere.

2.2 Requerimientos del diseño

Al inicio del proceso se definieron los requerimientos fundamentales del sistema, los cuales se presentan en la Tabla 3. Estos deben cumplirse para asegurar el funcionamiento adecuado y la satisfacción de los beneficiarios.

Tabla 3

Requerimientos de diseño del proyecto

Tipo de requerimiento	Detalles de requerimiento
Geometría	Diámetro mayor 1.50 m, diámetro menor 0.5 m
	Forma cónica invertida que favorezca el flujo de aire y la eficiencia de combustión.
	Estructura de soporte resistente a la intemperie que garantice estabilidad mecánica durante la operación.
	Debe contar con entrada y salida de agua para el sistema de enfriamiento.
Material	El cuerpo del horno debe estar construido con un material metálico capaz de resistir temperaturas superiores a 500 °C.
Sistema de aire de combustión	Ventilador para sostener la cortina de llama, regular el oxígeno y estabilizar la temperatura.
Alimentación eléctrica	Sistema de toma de datos con consumo de baja potencia.
	Ventilador accionado de 1 HP.
Sensado de variables	Medición de temperatura, gases emitidos, caudales de aire y registro de tiempo de eventos.
Comunicación y control	Transmisión eficiente de datos en tiempo real desde los sensores hacia la unidad de procesamiento.
	Obtener datos simultáneamente desde múltiples, capacidad de operar en entornos con restricciones físicas de cableado y necesidad de comunicación inalámbrica de corto alcance.
	Contar con una unidad de procesamiento capaz de ejecutar algoritmos, gestionar el almacenamiento temporal de los datos adquiridos, y controlar actuadores en función de condiciones dinámicas del proceso.

2.3 Criterios de selección

Se compararon las alternativas de producción de biochar presentadas en el marco teórico, utilizando criterios de evaluación de la Tabla 4 que permitieron seleccionar los criterios para la solución más adecuada para el proyecto, así mismo la Tabla 5 ayudó a evaluar la importancia de estos criterios.

- **Criterio de fácil operación** busca que el horno pueda usarse sin requerir conocimientos técnicos avanzados, con mantenimiento sencillo y adaptable a contextos rurales.
- **Bajo costo** se prioriza mediante el uso de materiales locales y componentes accesibles, favoreciendo la escalabilidad y replicabilidad del sistema en comunidades con recursos limitados.
- **Control de temperatura** es fundamental para garantizar la calidad del biochar, evaluando la estabilidad térmica, la retroalimentación de sensores y la eficacia del algoritmo de control.
- **Bajo peso** de la estructura facilita su transporte e instalación en zonas rurales de difícil acceso, además de optimizar el diseño mecánico y el uso de materiales.
- **Control de flujo** de aire asegura una combustión eficiente en el horno Kon-Tiki, regulando automáticamente el ingreso de oxígeno para reducir emisiones y mejorar el rendimiento.
- **Monitoreo a distancia** permite acceder a los parámetros clave del proceso en tiempo real, aportando ventajas en la supervisión y control del sistema.

Tabla 4

Criterios de evaluación.

Criterio	Relevancia	Peso
Fácil operación	1	26

Criterio	Relevancia	Peso
Bajo costo	2	26
Control de temperatura	3	19
Bajo Peso	4	12
Control de flujo de aire	5	12
Monitoreo a distancia	6	5

Tabla 5*Matriz de decisión*

Peso	Opciones	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
		Horno con control activo	Horno Subterráneo	Horno híbrido para recuperar calor
Criterios				
26	Fácil operación	4	1	3
26	Bajo Costo	4	1	2
19	Control de temperatura	4	3	4
12	Bajo Peso	5	3	4
12	Control de flujo de aire	4	1	4
5	Monitoreo a distancia	5	2	5
Resultados				
	Puntaje sin peso	26	11	22
	Puntaje con peso	417	167	327
	Prioridad	1	3	2

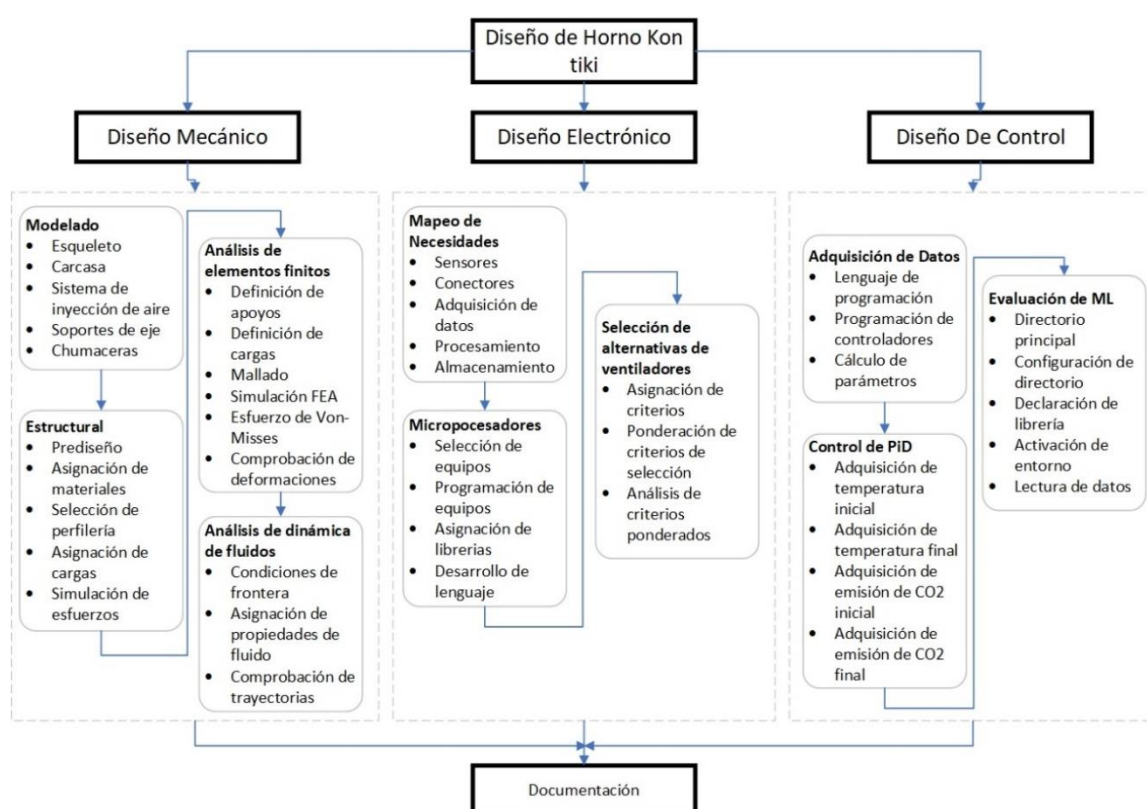
2.4 Proceso de Diseño

El diseño final se alcanzó mediante un proceso estructurado en etapas mostrado en la Figura 2.1. Primero se definieron las condiciones operativas y variables clave, lo que permitió establecer los requerimientos funcionales y seleccionar la alternativa más adecuada con una matriz de decisión. Luego se desarrolló el diseño mecánico (geometría

del horno, cámara de combustión, soporte y acople de ventilación), el diseño electrónico (sensores y arquitectura con ESP32 y Raspberry Pi 4) y el diseño de control, basado en protocolos de ML para clasificación térmica y un PID para accionar el ventilador en función del estado del sistema. Finalmente, el esquema de control se validó en simulaciones offline empleando datos históricos y el modelo térmico del horno, mientras que el desempeño global del sistema se evaluó mediante análisis CFD.

Figura 2.1

Proceso de Diseño



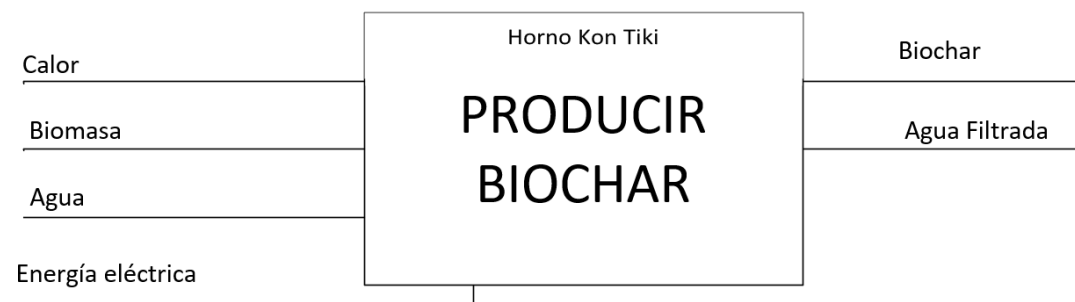
2.4.1 Diseño conceptual

Una vez determinado el proceso de diseño en base a los requerimientos, se procede con el análisis modular del horno a diseñar, lo cual permite desglosar las funciones del horno con diferentes niveles de detalle.

En el nivel cero mostrado en la Figura 2.2 se encuentra el funcionamiento más básico del horno con su función primordial y los elementos de entrada y salida para la producción de biochar.

Figura 2.2

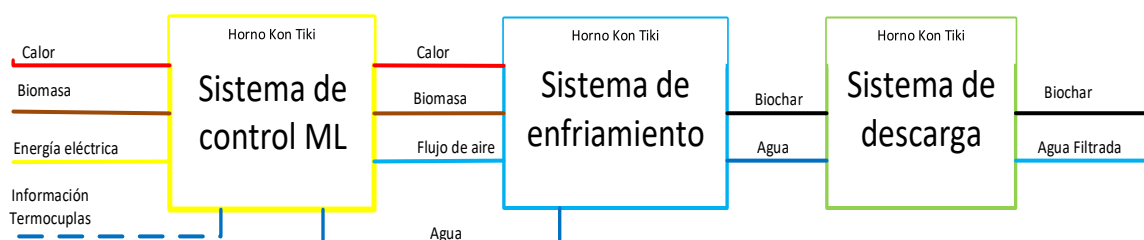
Nivel cero



En este nivel mostrado en la Figura 2.3 se desglosa el funcionamiento del horno en los sistemas necesarios para cumplir con el objetivo principal, cada sistema está conectado e interactúa entre sí para que el biochar se produzca de manera eficiente.

Figura 2.3

Nivel uno



Nivel dos

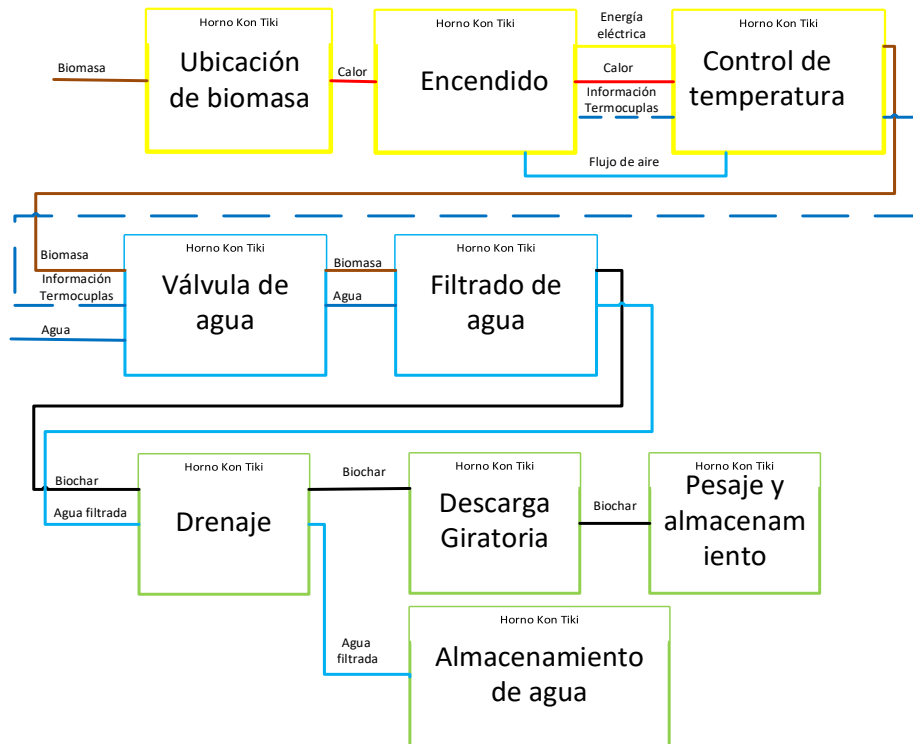
En este nivel mostrado en la Figura 2.4 se detallan los módulos desglosando cada paso en cada uno de los módulos mostrados en el anterior nivel, se determinaron tres módulos:

1. Módulo de control
2. Módulo de enfriamiento

3. Módulo de descarga

Figura 2.4

Análisis modular del funcionamiento de Horno Kon-tiki



El análisis de ponderación de características para el diseño conceptual de un horno Kon-Tiki para la cooperativa de producción agrícola Ananda nos permite basarnos en las necesidades del usuario para desarrollar un diseño adaptado a lo que el cliente requiere.

2.5 Diseño Mecánico

El modelado del diseño mecánico se divide en dos partes principales que son la cámara de carbonización y la estructura trapezoidal. Mismas que están interconectadas entre sí por un eje móvil que permitirá la comunión entre las demás partes del horno.

2.5.1 Modelado

En la Figura 2.5 se presenta un bosquejo del modelado, se plantea dividirlo en dos partes principales que son la cámara de carbonización y la estructura trapezoidal. Mismas que estarán interconectadas entre sí por un eje móvil que permitirá la comunión entre las demás partes del horno.

2.5.2 Caracterización de necesidades

La carcasa corresponde a un tronco de cono invertido que favorece el flujo ascendente de aire y la formación de la cortina de llama, con una abertura inferior para evacuar el agua durante el enfriamiento. La justificación del ángulo de inclinación entre 60° y 70° , considerado crítico para la eficiencia de combustión y la estabilidad estructural, se presenta en el Anexo B.

Esqueleto de Soporte

El horno se sostiene sobre dos marcos trapezoidales de acero al carbono, unidos por travesaños que garantizan estabilidad estructural y permiten integrar el eje de vaciado.

Cuerpo del Horno (Carcasa)

La carcasa corresponde a un tronco de cono invertido que favorece el flujo ascendente de aire y la formación de la cortina de llama, con una abertura inferior para evacuar el agua durante el enfriamiento.

Sistema de Inyección de Aire

Se incorpora un ventilador conectado al horno mediante una unión a medida, que canaliza el aire hacia la base del proceso para estabilizar la combustión.

Soportes de Eje

Son estructuras metálicas unidas al esqueleto principal, diseñadas para sostener el eje transversal que atraviesa el horno. Su objetivo es permitir la rotación controlada de la carcasa cónica durante las etapas de vaciado, evitando movimientos bruscos y asegurando un eje bien alineado con las chumaceras.

Chumaceras

Se utilizan chumaceras de soporte plano, instaladas sobre los soportes de eje, que permiten el giro libre del horno alrededor de su eje y facilitan el mantenimiento. Además,

proporcionan resistencia mecánica adecuada para soportar las cargas generadas durante la operación y el vaciado.

Figura 2.5

Bosquejo del diseño de horno Kon-Tiki a realizar

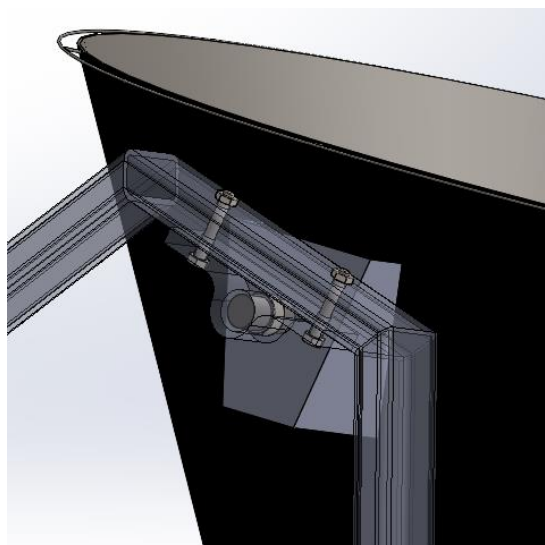


2.5.3 Diseño estructural

Dentro del diseño estructural es necesario calcular dos partes importantes en el diseño mecánico del horno, el primero es el diámetro del eje que sostiene la cámara de combustión y el segundo la resistencia de la estructura trapezoidal.

Figura 2.6

Ejes de volcado



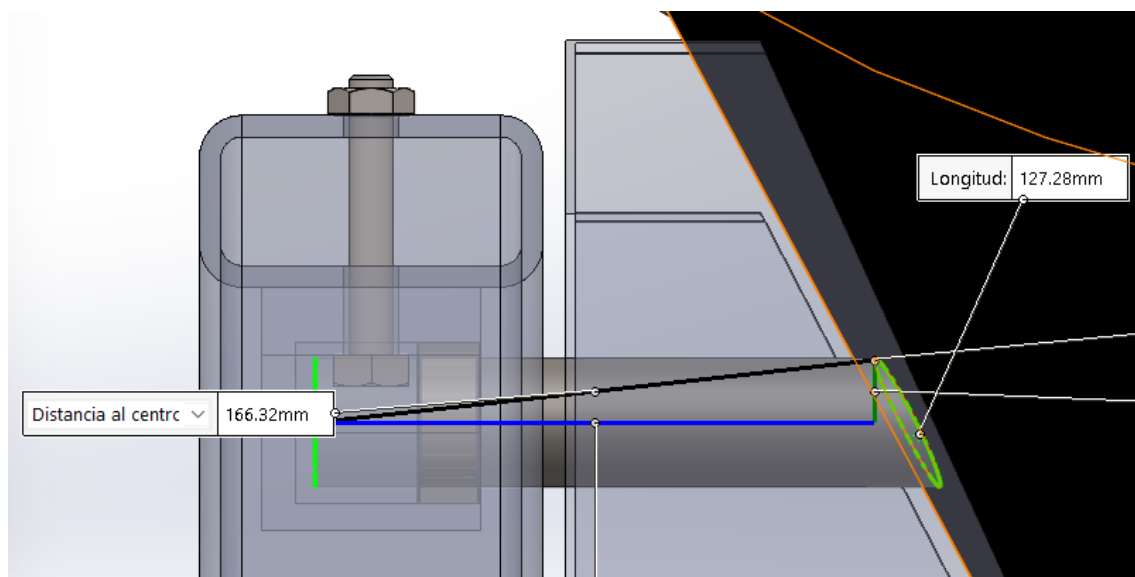
Como se puede observar en la Figura 2.6 existe un eje que permite que la cámara de combustión gire en relación a la estructura, permitiendo mejorar la operatividad del mismo. Esta modificación de diseño permite a los operarios volcar la carga de biochar después de evacuar el agua y continuar con la siguiente carga.

Sin embargo, este eje se encuentra sometido a varios esfuerzos cortantes durante el estado crítico de carga. Esto se refleja en un esfuerzo máximo cortante en el eje en la parte del rodamiento.

2.5.3.1 Diseño a carga estática

Figura 2.7

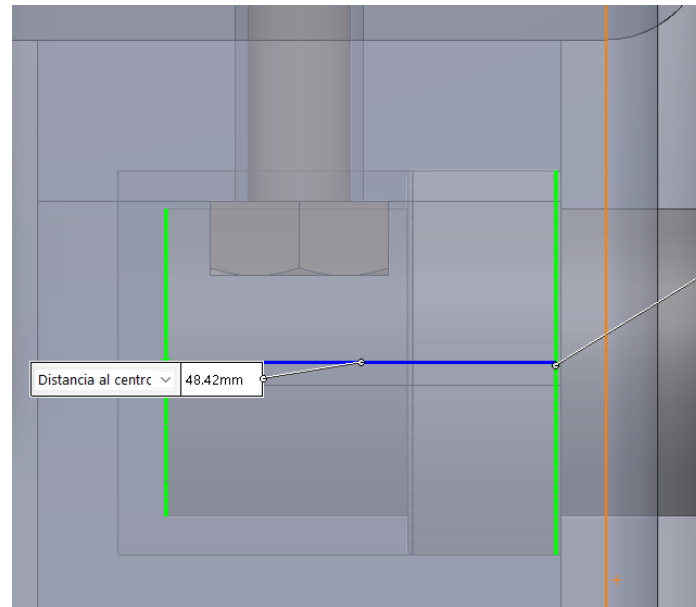
Diseño del eje



En la Figura 2.7 la longitud del total del eje es de 166.32 mm, sin embargo, la reacción que provocan los rodamientos se encuentra produciendo un momento a la distancia en la que se encuentran los mismos.

Figura 2.8

Distancia de acción del momento flector y esfuerzo cortante



En la Figura 2.8 se define la distancia efectiva utilizada para el cálculo del momento flector y del esfuerzo cortante en el eje de volcado. Dicha cota, obtenida del modelo CAD, corresponde al brazo de palanca entre el plano de apoyo del rodamiento y la sección crítica del eje.

2.5.4 Análisis de elementos finitos

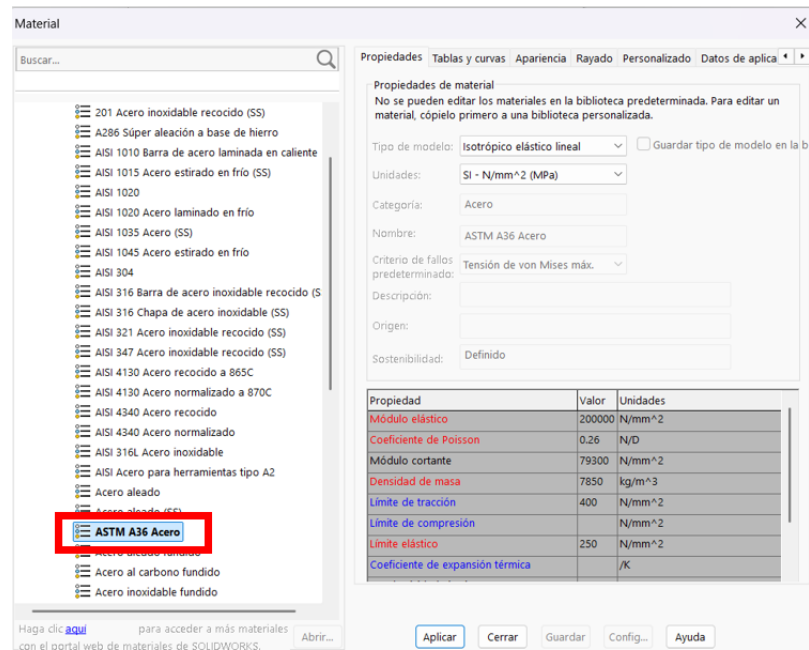
El mismo software de modelado permite simular el comportamiento de varios fenómenos físicos y validar que los elementos diseñados cumplan con las necesidades del cliente. Los objetivos planteados para esta simulación son: Verificar resistencia mecánica a 700°C (esfuerzo térmico < Límite de fluencia del material), Evaluar deformaciones máximas (< 2% de la geometría), Calcular factores de seguridad > 2.5 (Norma ASME B31.3). Estos objetivos se han planteado basándonos en otras investigaciones que validan productos de diferentes aplicaciones [27].

El complemento de simulación del software requiere de un algoritmo de preparación para simular dependiendo del estudio que se requiera, en este caso el análisis

es estático y de cargas distribuidas. Se parte de la definición del material a trabajar. Como se muestra en Figura 2.9, el presente caso se construyó con ASTM A36.

Figura 2.9

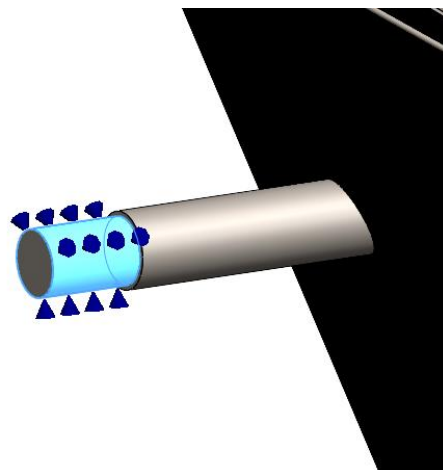
Definición de material de trabajo



En la siguiente Figura 2.10 se muestra la asignación de sujeciones que tiene la cámara de combustión, se usaron sujeciones de tipo rodamiento, aplicadas a las caras del eje en contacto con los rodamientos.

Figura 2.10

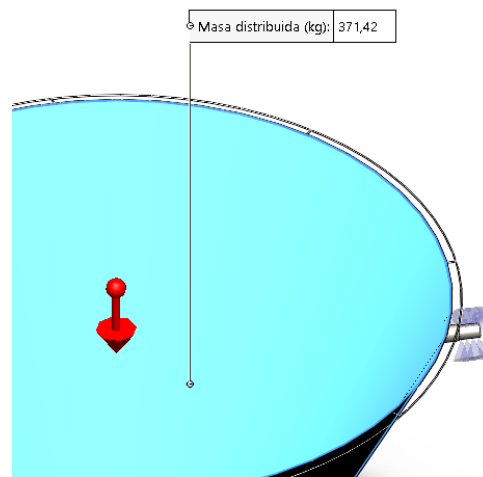
Asignación de sujeciones



Seguido a eso se asignan las cargas a las que estará sometida la cámara de combustión en este caso son dos, la gravedad representada con la flecha roja en la Figura 2.11, para después continuar con la carga distribuida por la superficie cónica asignando el valor de la carga crítica calculada anteriormente.

Figura 2.11

Asignación de cargas



2.5.5 Flow simulation

La simulación de flujo que nos ofrece el software de modelado nos permite observar el comportamiento del aire dentro de la cámara de combustión, pero para ello debemos definir los límites termodinámicos del sistema, en este caso el software lo llama Lids, para luego definir el sistema de medida.

2.6 Diseño electrónico

Para complementar el control térmico embebido modular, es esencial considerar los diagramas electrónicos como herramienta de organización del sistema. Estos permiten visualizar la interconexión entre sensores, microcontroladores y ventiladores, facilitando la implementación técnica y la replicabilidad.

En cuanto a la medición de temperatura, existen distintos tipos de sensores viables Tabla 6, como los sensores de resistencia (RTD), los termistores NTC/PTC, los sensores

infrarrojos y las termocuplas. En proyectos análogos de monitoreo térmico para hornos o estufas de biomasa, se han utilizado los siguientes sensores:

Tabla 6

Viabilidad de sensores

SENSOR	TIPO	APLICACIÓN
Termocupla	tipo K	(Alta temperatura, uso amplio)
Sensor infrarrojo	MLX90614	(Alta temperatura, uso amplio)
Sensor digital	DS18B20	(precisión media, buena integración)

Respecto al procesamiento y control, los microcontroladores son el corazón del sistema. Existen diversas opciones viables como las mostradas en la Tabla 7, cada una con fortalezas y limitaciones. La selección final de los microprocesadores y microcontroladores y su función se presenta en el Apéndice D.

Tabla 7

Microprocesadores y Microcontroladores.

Modelo	Tipo	Procesador	Ventajas principales	Limitaciones
Raspberry Pi Pico	Microcontrolador	RP2040 (Cortex-M0+)	Bajo consumo, ideal para PWM y control térmico local	No tiene sistema operativo
Raspberry Pi Pico W	Microcontrolador	RP2040 + Wi-Fi	Comunicación remota, perfecto para telemetría simple	Potencia limitada para IA compleja
Raspberry Pi 4B	Microprocesador SBC	Cortex-A72 (64-bit)	Capacidad de IA, Linux completo, múltiples interfaces	Mayor consumo, requiere disipación
Raspberry Pi Zero 2 W	Microprocesador SBC	Cortex-A53	Bajo consumo y tamaño, apto para control ligero	Menor RAM, no ideal para multitarea

Por último, los ventiladores utilizados pueden variar según caudal y tipo de aplicación. Los más comunes son: El tipo de ventilador seleccionado influye directamente en el control de oxígeno, un factor clave en la formación eficiente de biochar. Está documentado que el ajuste activo de ventilación mejora la calidad del producto y reduce las emisiones [7].

2.6.1 Alternativas de solución para el ventilador

Tabla 8

Alternativas de ventiladores para el horno

Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Figura 2.12	Figura 2.13	Figura 2.14
<i>Ventilador centrífugo</i>	<i>Ventilador axial</i>	<i>Microventilador tipo turbina</i>
		

Tabla 9

Resumen para selección de alternativa por prioridad

	Fácil operación	Bajo costo	Control de temperatur a	Bajo peso	Control de flujo de aire	Monitoreo a distancia	Σ	Prioridad
Alter. 1	0.262*0.42	0.262*0.42	0.19*0.50	0.12*0.25	0.12*0.33	0.05*0.25	0.39718	1
Alter. 2	0.262*0.42	0.262*0.42	0.19*0.16	0.12*0.25	0.12*0.33	0.05*0.25	0.33258	2
Alter. 3	0.262*0.16	0.262*0.16	0.19*0.34	0.12*0.50	0.12*0.33	0.05*0.50	0.27304	3

2.7 Diseño de control

2.7.1 Desarrollo de control de pirolisis

El control del proceso de pirólisis se estructuró en dos niveles jerárquicos.

- Nivel Estratégico (Machine Learning): El modelo de ML procesa los datos del sistema para identificar los parámetros operativos óptimos y definir el setpoint de temperatura más adecuado en función de las condiciones dinámicas de la combustión.
- Nivel de Ejecución (Control PID): Un controlador PID implementa esta referencia regulando, a través de una señal PWM, la velocidad del ventilador. De esta manera se ajusta el flujo de aire de combustión, asegurando la estabilidad de la cortina de llama y el mantenimiento preciso del setpoint definido.

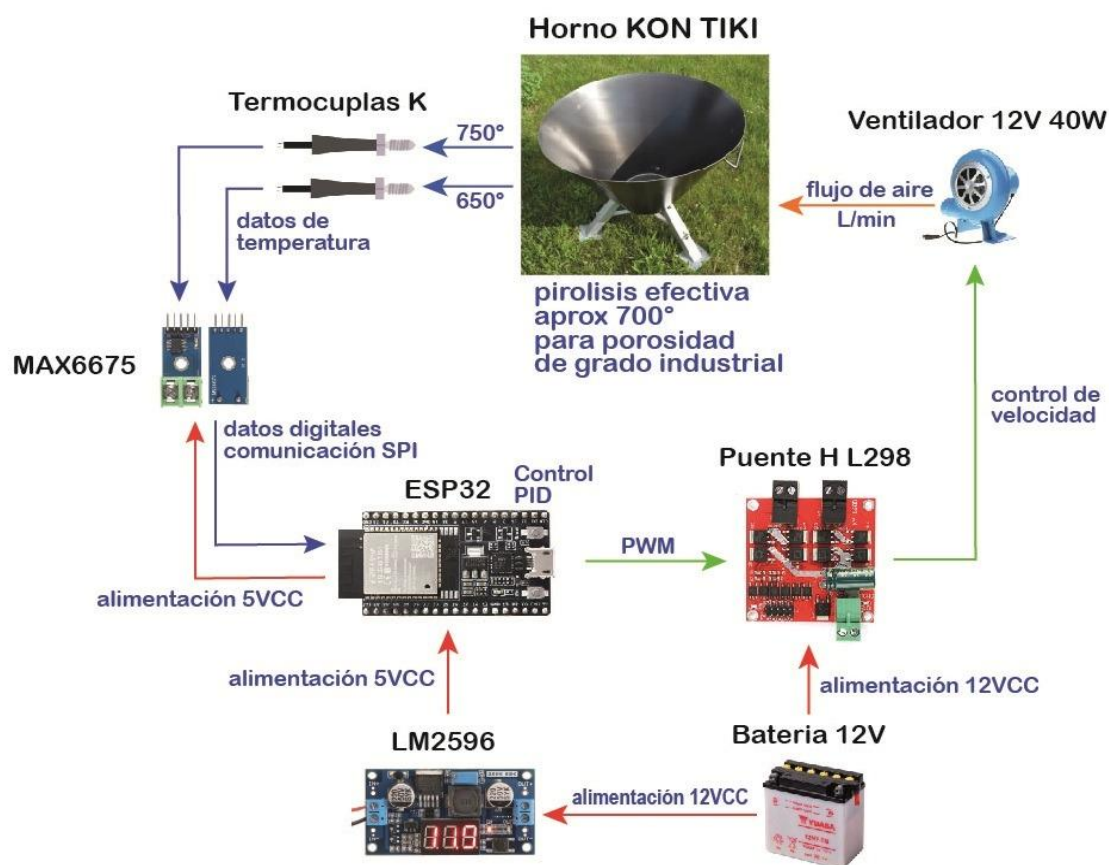
La arquitectura física se basa en una Raspberry Pi 4 como unidad central de procesamiento, responsable de ambos niveles de control, y un ESP32 dedicado a la adquisición de datos provenientes de sensores de temperatura y gases, lo que garantiza una retroalimentación en tiempo real. La pirolisis controlada es esencial para convertir biomasa vegetal (maderas duras, residuos agrícolas) en carbón activado de alta calidad ($\text{porosidad} > 500\text{m}^2/\text{g}$). Los hornos Kon-Tiki tradicionales operan manualmente, lo que genera inestabilidad térmica ($< 600^\circ\text{C}$ o $> 800^\circ\text{C}$), reduciendo el rendimiento y calidad del producto. Este proyecto automatiza el proceso mediante:

- Sensores: 2 termocuplas tipo K para monitoreo térmico en tiempo real.
- Actuadores: Ventilador de flujo de aire controlado por PWM.
- Controlador: ESP32 con algoritmo PID para mantener $700^\circ\text{C} \pm 50^\circ\text{C}$.
- Conectividad: Opcional IoT para monitoreo remoto.

- Impacto: Aumenta la eficiencia energética en 25%, reduce fallos en 90%, y asegura calidad homogénea del carbón activado.

Figura 2.15

Diagrama de control



Como muestra la Figura 2.15 se ejecuta un sistema de control embebido de sensores de temperatura para controlar el funcionamiento de un ventilador de mínimo 40 W mismo que cumple con los requerimientos mínimos calculados en el apartado anterior. Todo está interconectado con la ayuda de un microprocesador como se muestra en el siguiente diagrama. El siguiente paso en el diseño electrónico es la calibración del sistema el cual se lo realiza mediante pruebas, una vez este implementado el diseño bajo el siguiente algoritmo.

2.7.2 Prueba estática (sin biomasa):

Mapear PWM vs. caudal (anemómetro) y PWM vs. $\Delta T/s$

2.7.3 Prueba dinámica (con biomasa):

- Registrar curvas de calentamiento con:
 - a) 100% PWM (máxima tasa de calentamiento [T]).
 - b) ~40% PWM (temperatura estable requerida [$\sim 700^{\circ}\text{C}$]).
- Ajustar PID usando Método de Ziegler-Nichols en Lazo Cerrado (Oscilaciones de temperatura Sostenidas):

2.7.4 Identificar parámetros:

Se registra la ganancia que produce las oscilaciones sostenidas (K_{cr}) y el período de la oscilación (T_{cr}). Ejemplo: La temperatura que alcanza el horno cuando las oscilaciones de la llama de la pirolisis parecen ser estables o constantes, pero para efectos prácticos consideramos la estabilidad a 700°C , y la ganancia podría ser $K_{cr} \cong 800^{\circ}\text{C}$, el periodo de oscilación que se produce en las llamas del horno se registra de forma manual con un cronometro $T_{cr} \cong 200\text{ms}$.

2.7.5 Configuración de directorio principal

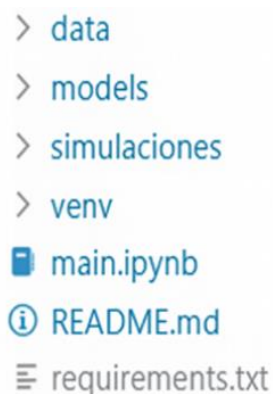
Toda la configuración se hará desde Visual Studio Code - VSC, se instala primero los paquetes de Python, Jupiter, C/C++, y PlatformIO IDE (para microprocesadores, alternativa Arduino IDE), en la carpeta de trabajo principal se deben crear estos directorios:

- data/: Carpeta para guardar tus datos .csv o de sensores
- models/: Modelos entrenados (.pkl o .joblib)
- notebooks/: Notebooks exploratorios
- simulaciones/: Simulaciones sobre las diferentes variables
- venv/: Entorno virtual

- main.ipynb: Código principal, primero activar entorno virtual
- requirements.txt: Lista de librerías
- README.md: Descripción del proyecto

Figura 2.16

Configuración de directorio principal



A screenshot of a file explorer window showing the contents of a project directory. The items listed are: a folder named 'data', a folder named 'models', a folder named 'simulaciones', a folder named 'venv', a file named 'main.ipynb' with a notebook icon, a file named 'README.md' with an information icon, and a file named 'requirements.txt' with a text file icon.

El directorio “venv/” se crea al momento de crear el entorno virtual de python, útil para mantener aislado las librerías de trabajo necesarias del resto de proyectos como se muestra la Figura 2.16, Desde el CMD y desde el directorio principal del proyecto se ejecuta como se observa en la Figura 2.17.

Figura 2.17

Declaración de librerías



A screenshot of a terminal window with a light gray background and three colored window control buttons (red, yellow, green) in the top left corner. The command `python -m venv venv` is entered in red text, followed by a comment `# crea entorno virtual` in gray text.

Recordar siempre activar el entorno del proyecto antes de ejecutarlo desde la interfaz de VSC como se muestra en la Figura 2.18.

Figura 2.18

Activación y desactivación del entorno del proyecto



```
.\venv\Scripts\activate # activa entorno
bash

deactivate # desactiva el entorno
```

2.7.6 Librerías necesarias

Instalar desde el CMD de Windows o la terminal de VSC las librerías:

- Numpy: Manejo de operaciones matemáticas y estructuras de datos numéricas, procesamiento rápido de datos numéricos, requerido por Scikit-learn, TensorFlow y PyTorch.
- Pandas: Manipulación y análisis de datos estructurados (tablas, series temporales, carga de datos (CSV, Excel, SQL: `pd.read_csv()`)).
- matplotlib.pyplot: Creación de visualizaciones, gráficos 2D, visualizar distribuciones de datos (histogramas, scatter plots)
- seaborn: Visualización estadística de alta calidad (basada en matplotlib). Visualización multivariable, Gráficos elegantes con menos código.
- Pickle: Guardar y cargar objetos de Python (serialización), guardar modelos entrenados en disco, cargar modelos pre-entrenados para inferencia
- Pyserial: comunicación de datos desde puerto serial-USB hacia el microcontrolador

Capítulo 3

3 Resultados y análisis

Para los resultados de la siguiente investigación cabe recalcar que la misma se basa en la etapa de diseño por lo cual se busca validar el prototipo de un horno Kon Tiki para producir biochar a partir de residuos agrícolas. Con base en la utilización de software disponible y conocimientos adquiridos durante el transcurso de la carrera.

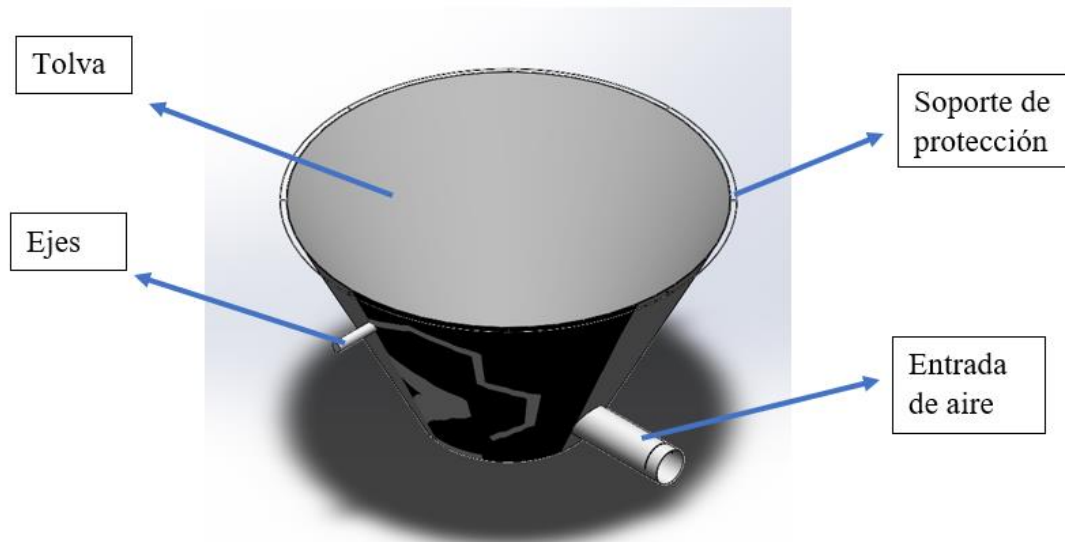
3.1 Alternativa resultante de la matriz de decisión

Según los resultados de la Tabla 5, se seleccionó como solución óptima la alternativa un horno Kon-Tiki de geometría cónica invertida con sistema de monitoreo embebido. Esta opción obtuvo el mayor puntaje ponderado y cumple con los requerimientos funcionales, térmicos y estructurales, destacando por su eficiencia en la conservación del calor, la quema limpia de gases y su adaptabilidad a contextos rurales. El diseño permite una combustión progresiva por capas que optimiza la pirólisis y mejora la producción de biochar, además de facilitar el manejo de la biomasa y la recolección del producto gracias a su forma cónica. En cuanto a la automatización, integra un sistema distribuido de adquisición y monitoreo para medir temperatura, flujo de aire y emisiones en tiempo real, posibilitando el control del proceso. Finalmente, la solución incorpora una unidad de procesamiento local para ejecutar algoritmos de clasificación térmica y ajustar automáticamente el flujo de aire. Su arquitectura robusta y escalable asegura estabilidad térmica y estructural durante el ciclo de operación, garantizando una producción de biochar más limpia, controlada y reproducible, en línea con los objetivos técnicos y ambientales del proyecto.

3.2 Diseño del horno

Figura 3.1

Carcaza del horno



Como se observa en la Figura 3.1, la cámara de carbonización se diseñó con una capacidad de 0.827 m^3 aproximadamente, dato que servirá para el análisis de cargas tanto en los ejes como en la estructura. Para lo cual se procede al cálculo y caracterización de cargas en el horno.

Carga muerta (Propio peso). - El peso total de la cámara de acero ASTM A36 construido con lámina de 3 a 5 milímetros, en la toma de decisiones se destaca la importancia de la operatividad mediante el peso más bajo posible por lo que se toma lamina de 3 mm para lo que el software de modelado nos arroja un peso de 88.92 Kg

Carga por Biomasa. – la biomasa cargada debe contener un porcentaje de humedad entre 10% a 20% según [28] estos valores de humedad en la biomasa ayudan a que el proceso de pirolisis sea eficiente, además, se procede con el balance de masas y densidades como se observa en la ecuación (3.1).

$$m_{bio} = p_{cañamo} \cdot V_{horno} \quad (3.1)$$

Donde:

m_{bio} : masa de biomasa en el horno por ciclo

$p_{cañamo}$: densidad de cáñamo a 15% de humedad 170 Kg/m^3

V_{horno} : volumen del horno

$$m_{bio} = 170 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.827 m^3 = 140.59 Kg$$

Al estimar un 15% de humedad en la biomasa se debe considerar que ese porcentaje de agua se evaporará en cada ciclo, lo que nos permitirá estimar la masa de material seco en el ciclo de producción de biochar utilizando la ecuación (3.2).

$$m_{seca} = m_{bio} - m_{agua} \quad (3.2)$$

Donde:

m_{seca} : masa de material seco en el horno por ciclo.

m_{agua} : masa de agua perteneciente a la humedad de la biomasa (15% de la masa total cargada)

$$m_{seca} = m_{bio} - 0.15 * m_{bio}$$

$$m_{seca} = 0.85 * 140.59 Kg$$

$$m_{seca} = 119.5 Kg$$

Carga de agua. – una vez completada la pirolisis la materia vegetal debe ser enfriada por lo cual se inserta agua fría a la cámara del horno para capturar la mayor cantidad de carbono. Este volumen de agua es estimado con un balance de volúmenes mostrado en la ecuación (3.3), ya que el proceso de pirolisis es un proceso a presión y volumen constante.

$$V_{horno} = V_{seca} + V_{agua\ fría} \quad (3.3)$$

Donde:

V_{seca} : Volumen de la masa seca.

$V_{agua\ fría}$: Volumen de agua de enfriamiento.

$$V_{seca} = \frac{m_{seca}}{\rho_{aparente}} \quad (3.4)$$

Donde:

$\rho_{aparente}$: densidad aparente del Cáñamo

Esta densidad aparente se toma del resultado de ensayos de compresión de las fibras en un volumen controlado ensayos hechos previamente en el laboratorio de la cooperativa arrojan valor entre 160 y 200 Kg/m^3 para este caso se utilizó un promedio de 180 como dato significativo y con ello se calculó el volumen de masa seca usando la ecuación (3.4).

$$V_{seca} = \frac{119.5 \text{ Kg}}{180 \text{ Kg}/m^3}$$

$$V_{seca} = 0.664 \text{ m}^3$$

Por consiguiente, se calculó el volumen de agua necesario de para enfriar el biochar haciendo diferencia de volúmenes en la ecuación (3.5).

$$V_{agua \text{ fría}} = V_{horno} - V_{seca} \quad (3.5)$$

$$V_{agua \text{ fría}} = V_{horno} - V_{seca}$$

$$V_{agua \text{ fría}} = 0.827 \text{ m}^3 - 0.664 \text{ m}^3$$

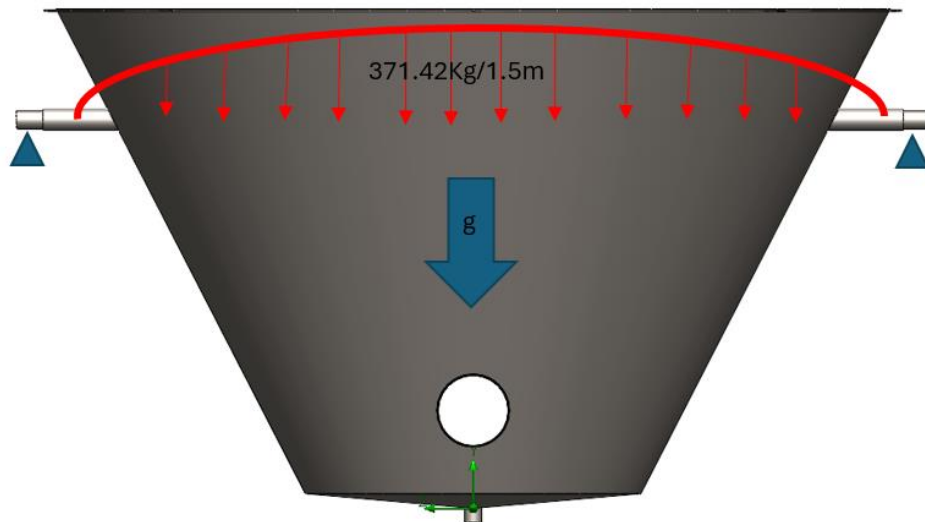
$$V_{agua \text{ fría}} = 0.163 \text{ m}^3$$

El resultado de este volumen de agua es una carga estática para la cámara de pirolisis que al multiplicar por la densidad del agua a 20 °C de 1000 Kg/m^3 nos arroja una carga estática de 163 Kg. La carga total en el estado crítico corresponde a la sumatoria de todas estas cargas dando como resultado 371.42 Kg de carga estática. Esta debe ser la

carga que soporte las chumaceras, los ejes y la estructura trapezoidal como se muestra en la Figura 3.2.

Figura 3.2

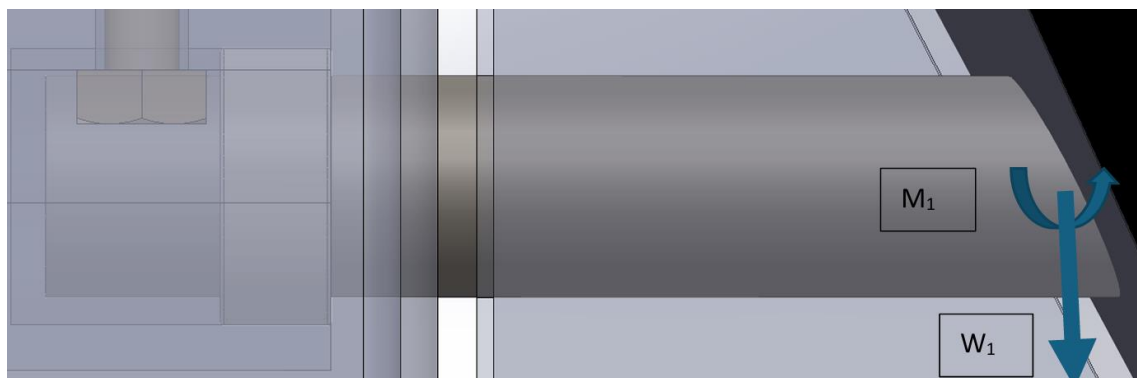
Asignación de cargas y apoyos



3.3 Cálculo de esfuerzos combinados

Figura 3.3

Estructura del horno



Como se muestra en la Figura 3.3 la reacción de los rodamientos responde a la igualación de fuerzas como en este caso se cuenta con dos apoyos las reacciones se dividirán en dos, igualando la carga máxima calculada anteriormente, se obtiene un valor de $W_1 = 185.71 \text{ kg}$ Equivalente a 1821.82 N . Esta misma reacción es la que provoca un

momento flector en el eje a una distancia de 117.9 mm obteniendo un momento $M_1 = 214.79 \text{ N.m}$

El eje se encuentra sometido a esfuerzos combinados y para poder verificar el cálculo con la simulación en un software, cabe mencionar que el software que se su usará en la simulación trabaja con el esfuerzo equivalente de Von Misses [29] por ende, se procede al cálculo del mismo usando los datos de la Tabla 10.

Tabla 10

Datos de diseño a esfuerzos combinados.

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Cortante	V	1821.82	N
Momento Flector	M	214.79	N.m
Esfuerzo permisible	σ_{perm}	640	MPa
Longitud del eje	L	166.32	Mm
Factor de seguridad	FS	2.5	-

Donde la ecuación (3.6) permite calcular el esfuerzo provocado por el momento flector en función del diámetro inicial supuesto d.

$$\sigma_{\text{normal}} = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot d^3} \quad (3.6)$$

Donde:

σ_{normal} : es el esfuerzo provocado por el momento flector.

d: diámetro inicial supuesto.

$$\sigma_{\text{normal}} = \frac{32 \cdot 214792}{\pi \cdot 38.1^3}$$

$$\sigma_{\text{normal}} = 39.56 \text{ MPa}$$

El esfuerzo cortante se obtiene a partir de la relación entre la fuerza cortante aplicada y el diámetro inicial supuesto, como se observa en la ecuación (3.7).

$$\tau_{\text{cortante}} = \frac{16 \cdot V}{3 \cdot \pi \cdot d^2} \quad (3.7)$$

Donde:

τ_{cortante} : es el esfuerzo provocado por el cortante.

$$\tau_{\text{cortante}} = \frac{16 \cdot 1821.82}{3 \cdot \pi \cdot 38.1^2}$$

$$\tau_{\text{cortante}} = 2.13 \text{ MPa}$$

Continuamos calculando el esfuerzo admisible usando la ecuación (3.8), ajustado con los valores del factor de seguridad y datos de acero de transmisión menos costoso que se pueda encontrar en el mercado. En este caso el acero 1045.

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{\sigma_{\text{perm}}}{\text{FS}} \quad (3.8)$$

Donde

σ_{adm} : Es el esfuerzo admitido corregido

σ_{perm} : Es el esfuerzo máximo del acero ASTM 1045.

$$\sigma_{\text{adm}} = \frac{640 \text{ MPa}}{2.5}$$

$$\sigma_{\text{adm}} = 256 \text{ MPa}$$

Se continua con el cálculo del esfuerzo de Von Misses con ecuación (3.9).

$$\sigma_{\text{Vm}} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (3.9)$$

Donde:

σ_{Vm} : Es el esfuerzo de Von Misses

σ : Es el esfuerzo normal

τ : Es el esfuerzo cortante.

$$\sigma_{\text{Vm}} = \sqrt{39.56^2 + 3 \cdot 2.13^2}$$

$$\sigma_{vm} = 39.73 \text{ MPa}$$

Culminados los cálculos se procede a comparar el valor del esfuerzo admisible con el valor del esfuerzo de Von-Misses.

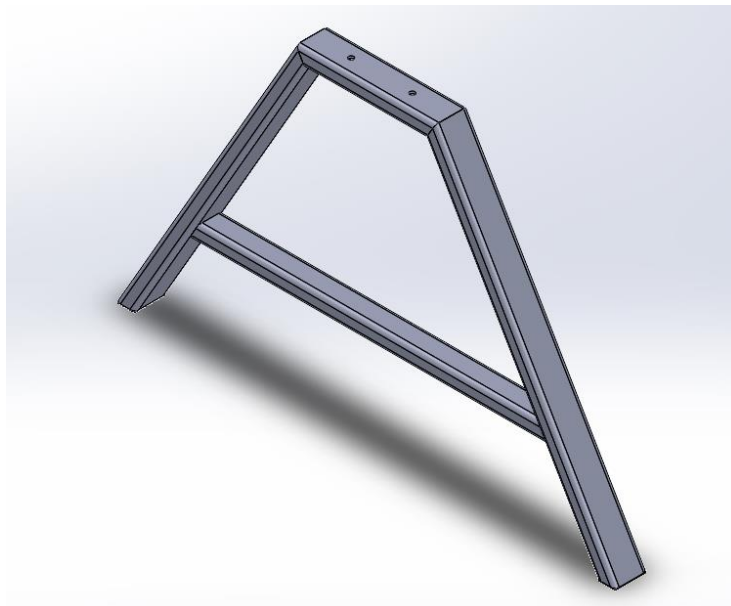
$$\sigma_{vm} \leq \sigma_{adm}$$

$$39.73 \text{ MPa} \leq 256 \text{ MPa}$$

Para la aplicación del horno el eje soporta las cargas críticas y existe una gran diferencia entre el esfuerzo de Von-Misses con el esfuerzo admisible lo que permite continuar con la validación mediante simulación de elementos finitos. Cabe recalcar que según lo recomendado por [29] y [30] el diámetro calculado podría estar sobredimensionado, sin embargo, se debe tomar en cuenta que este eje se calentará al igual que toda la cámara de combustión y estas temperaturas podrían reducir el esfuerzo máximo permisible tabulado. Por lo que se procederá a simulaciones para validar el diseño.

Figura 3.4

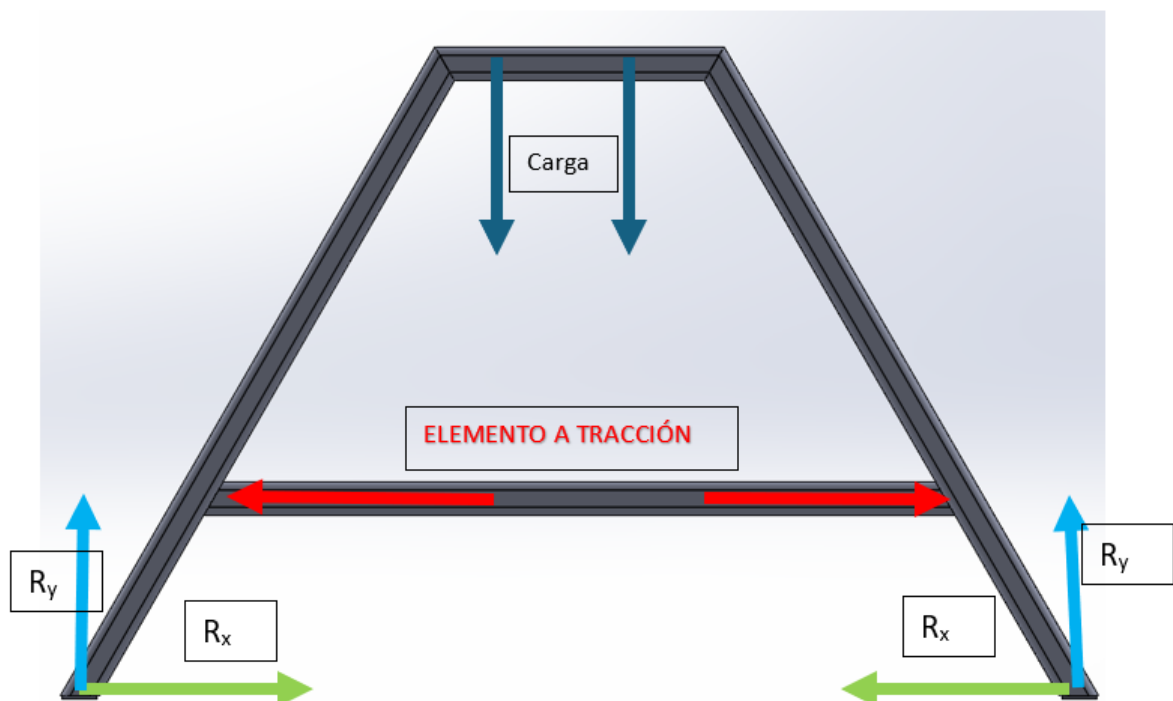
Estructura del soporte del horno



En la Figura 3.4 se muestra el diseño estructural de la parte fija del horno, donde se encuentran dos caballetes con forma trapezoidal que sujetan la cámara de combustión el sistema de control inteligente y la carga de biomasa. Todo bajo condiciones estáticas por lo cual el peso se distribuirá equitativamente en sus perfiles causando reacciones como se muestra en la Figura 3.5.

Figura 3.5

Reacciones y tensiones en la estructura

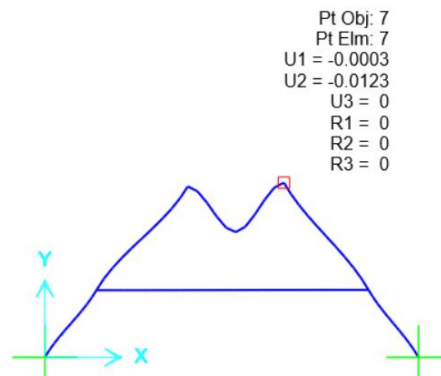


Para el diseño de este elemento estructural se usó la simulación con un software especializado en diseño estructural el cual permite colocar las diferentes cargas a las que está sometido una estructura y según el resultado de deformaciones tomar decisiones de espesores, o geometrías.

La siguiente Figura 3.6 nos muestra que con los perfiles seleccionados de 50X25X2 existe una deformación máxima en las esquinas superiores de la estructura con un valor 0.0003mm hacia un costado y de 0.0123 mm hacia la parte inferior.

Figura 3.6

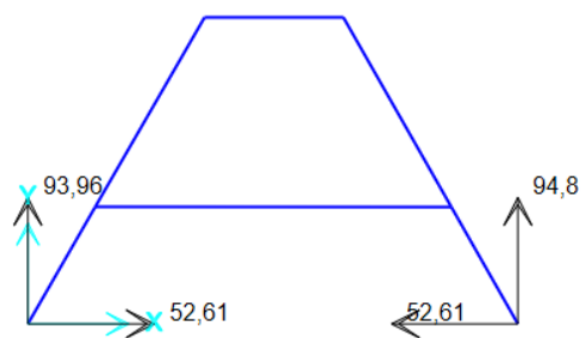
Simulación de derivas



En la Figura 3.7 se observa que los apoyos generan reacciones de 94.8 Kg en el eje vertical y de 52.61 Kg en el eje horizontal en el momento de las cargas críticas, es decir cuando el horno se encuentra totalmente cargado de agua y Biochar.

Figura 3.7

Reacciones en los apoyos



La estructura no sufre mayor deformación en sus elementos estructurales, los valores simulados en muestran que la misma puede soportar el peso de sus componentes estructurales y de la carga aplicada.

3.3.1 Ingreso de flujo másico

Para este apartado es de suma importancia que se considere el caudal necesario para mantener la cortina de llama y usaremos los datos mencionados en la publicación [31] usando la ecuación (3.10).

$$Q_{req} = V * s * 3600 \quad (3.10)$$

Donde:

Q_{req} : Es el caudal de aire necesario

V : es la velocidad de aire.

s : es el área de entrada del aire.

$$Q_{min} = 1 \text{ m/s} * 0.0127 \text{ m}^2 * 3600 \text{ s/h}$$

$$Q_{min} = 45.6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{max} = 2 \text{ m/s} * 0.0127 \text{ m}^2 * 3600 \text{ s/h}$$

$$Q_{max} = 91.21 \text{ m}^3/\text{h}$$

Los valores de velocidad de aire se tomaron en cuenta los datos históricos mostrados en hornos de pirolisis de [32] donde se menciona que estas velocidades de aire permiten mantener la cortina de llama en este tipo de hornos. Tomando un valor de caudal de diseño de $70 \text{ m}^3/\text{h}$

Perdidas de presión. – las pérdidas de presión en un sistema de ventilación ocurren por vario factores, en este caso en particular son: la geometría de la cámara de combustión, el ducto de entrada de aire y la interferencia del lecho de biomasa. Por lo cual se resumen estas pérdidas basadas en los datos de [32] y [33] y son mostradas en la Tabla 11.

Tabla 11*Pérdidas de presión de aire.*

Fuente de resistencia	Valor (Pa)
Lecho de Biomasa	150
Geometría cónica	100
Ducto y accesorios	50
TOTAL	300

Continúa el cálculo con la corrección de densidad del aire con la ecuación (3.11).

$$\rho_{\text{corregida}} = \rho_0 \frac{T_0}{T} \quad (3.11)$$

Donde:

$\rho_{\text{corregida}}$: Es la densidad del aire de operación

T_0 : Es la temperatura del aire inicial en grados Kelvin

T : Es la temperatura del aire de operación en grados Kelvin

$$\rho_{\text{corregida}} = 1.2 \text{ Kg/m}^3 * \frac{293}{773}$$

$$\rho_{\text{corregida}} = 0.455 \text{ Kg/m}^3$$

Con esta densidad se ajustó el gradiente de pérdidas de presión de aire con la ecuación (3.12).

$$\Delta P_{\text{Corregido}} = \Delta P_{\text{Total}} \cdot \frac{\rho_{\text{corregido}}}{\rho_0} \quad (3.12)$$

Donde:

$\Delta P_{\text{Corregido}}$: Es la pérdida de presión teórica esperada.

ΔP_{Total} : Es la pérdida de presión total en condiciones ideales

$$\Delta P_{\text{Corregido}} = 300 \text{ Pa} \cdot \frac{0.455 \text{ Kg/m}^3}{1.2 \text{ Kg/m}^3}$$

$$\Delta P_{\text{Corregido}} = 113.75 \text{ Pa}$$

Se procede a dimensionar la potencia del ventilador con la ecuación (3.13).

$$P = \frac{Q * \Delta P_{\text{Corregido}}}{3600 * \eta} \quad (3.13)$$

Donde:

P: es la potencia del ventilador medido en Watts

η : Es la eficiencia del rodete que se estima entre 0.55 y 0.6

$$P = \frac{70 \text{ m}^3/\text{h} * 113.75 \text{ Pa}}{3600 * 0.55}$$

$$P = 4.02 \text{ W} \approx 5 \text{ W}$$

3.4 Selección del ventilador

Todas las alternativas presentadas en la metodología en la Tabla 8 y Tabla 9 son buenas dando una diferencia de 10% entre la alternativa primordial y la segunda alternativa, aunque todas nos pueden entregar resultados satisfactorios hay tomar en cuenta que, de todos los criterios, control de temperatura es el que más varia y por lo cual nos arroja como mejor alternativa el uso de un ventilador centrífugo, ya que este cumple de manera satisfactoria con todos los criterios de funcionamiento tanto del punto de vista ingenieril como del usuario.

3.5 Simulaciones

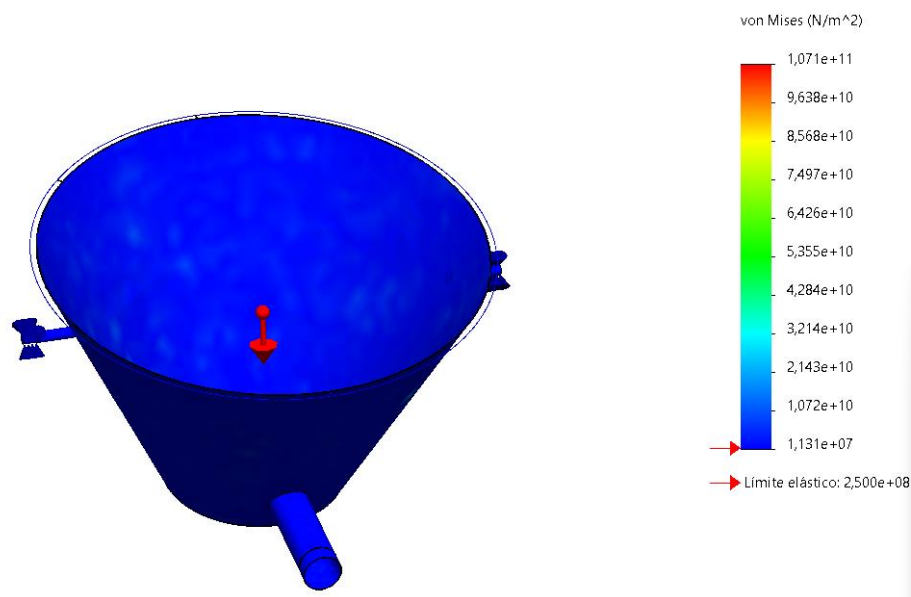
3.5.1 Análisis de elementos finitos

El diseño funciona estructuralmente tanto teóricamente como computacionalmente como se muestra en la Figura 3.8 no existe una concentración de esfuerzos que sobrepase los índices del estudio. Donde se puede evidenciar que el límite elástico esta con respecto a las tensiones máximas en el modelo está muy lejos.

Figura 3.8

Simulación de comprobación de tensiones de Von-Misses

Nombre del modelo: Carcasa
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 6,6981e-06



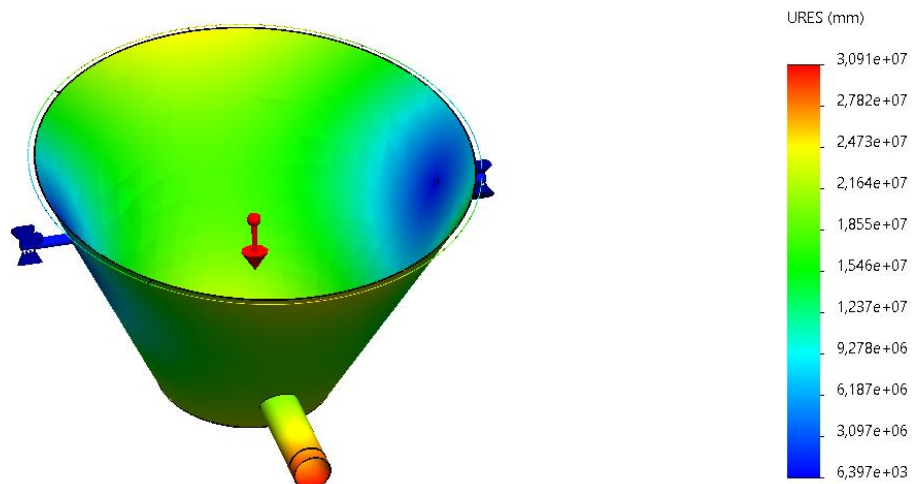
La Figura 3.9 muestra las deformaciones máximas del modelo dándonos como máximo 3.091 mm en la conexión con el ventilador y de 2.047 mm en las inmediaciones de la carcasa cónica por lo que se recomendaría reforzar el anillo con varilla corrugada. Conclusión a la que se llega teniendo en cuenta la escala del software de 6.698×10^{-6} mm con los valores de la zona amarilla del resultado de la simulación de 2.473×10^7 mm este resultado en la simulación muestra un vínculo entre el diseño mecánico de elementos basado en la resistencia de los materiales y el factor de utilización normal de la máquina,

dichas deformaciones permiten unitarias serían de 0.0001 con respecto a la longitud total de la viga.

Figura 3.9

Desplazamiento estático

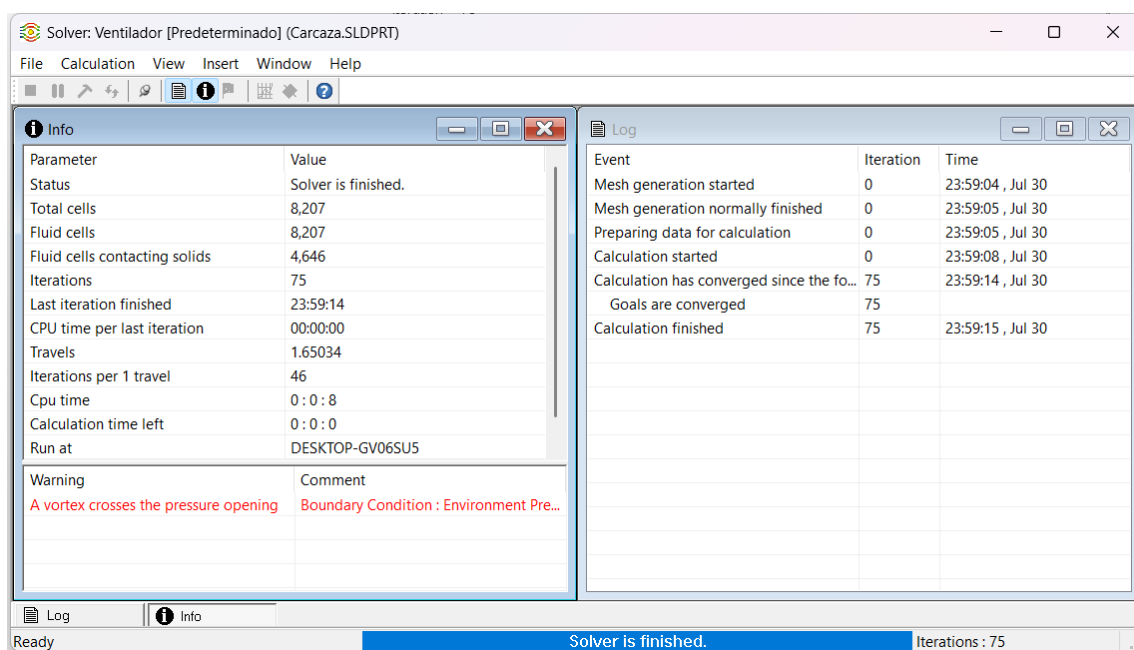
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 6,6981e-06



3.5.2 Flow simulation

Figura 3.10

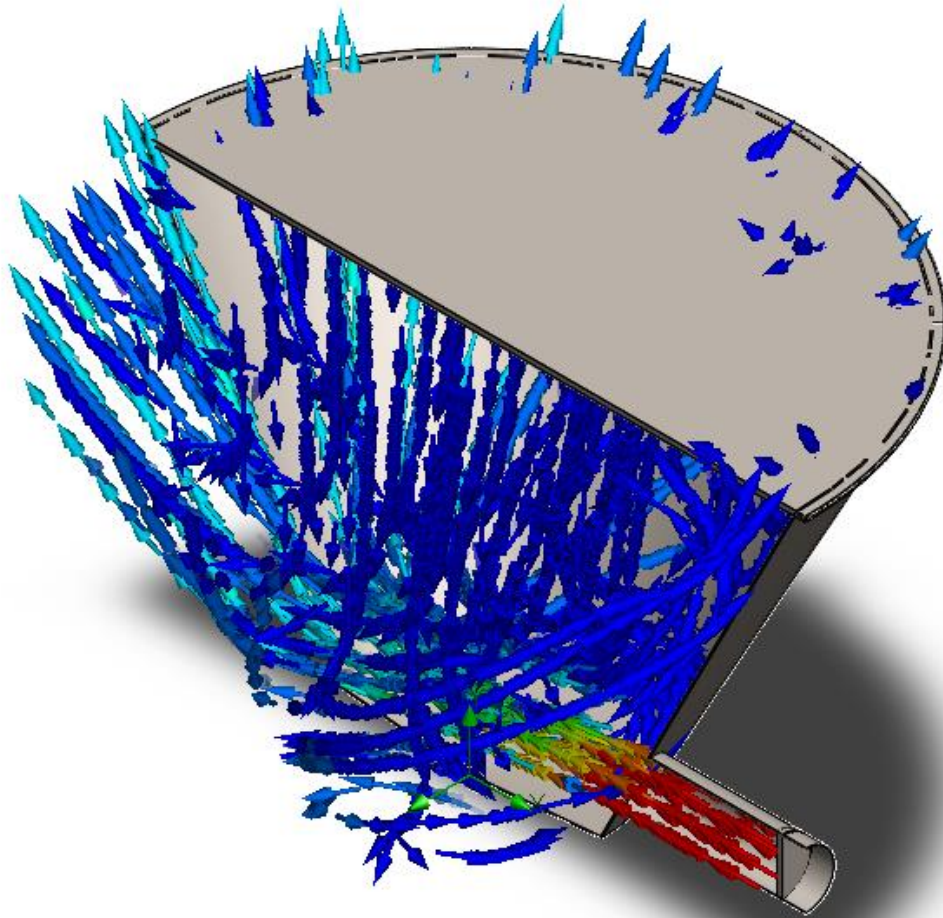
Calculo e iteraciones del sistema



En la Figura 3.10 se muestra que el software realizó 75 iteraciones para el cálculo del comportamiento del aire dentro de la cámara de combustión para después arrojarlos los resultados que se mostrarán a continuación.

Figura 3.11

Simulación de trayectoria de aire en la cámara de combustión



En la Figura 3.11 la simulación muestra que el aire se distribuye correctamente desde la parte inferior del cono hacia la parte abierta de la cámara de combustión, lo que permitirá tener un control preciso de la temperatura dentro del mismo. Una distribución homogénea en la cámara de pirolisis permite a su vez controlar la calidad del total del biochar producido. La trayectoria del aire permite controlar una de las variables del

proceso productivo para así caracterizar mejor los resultados para diferentes tipos de materia prima. Esto se ajusta a las necesidades del cliente que afirma en entrevistas que usará el horno para producir biochar tanto de residuos de cáñamo como de guarango. Además, aporta a la trazabilidad del prototipado como parte del diseño mecatrónico ya que conjugar los parámetros de temperatura, tiempo y emisión de gases con las trayectorias mostradas en la simulación permitirán al modelo de ML afianzar sus resultados y mejorar su aprendizaje.

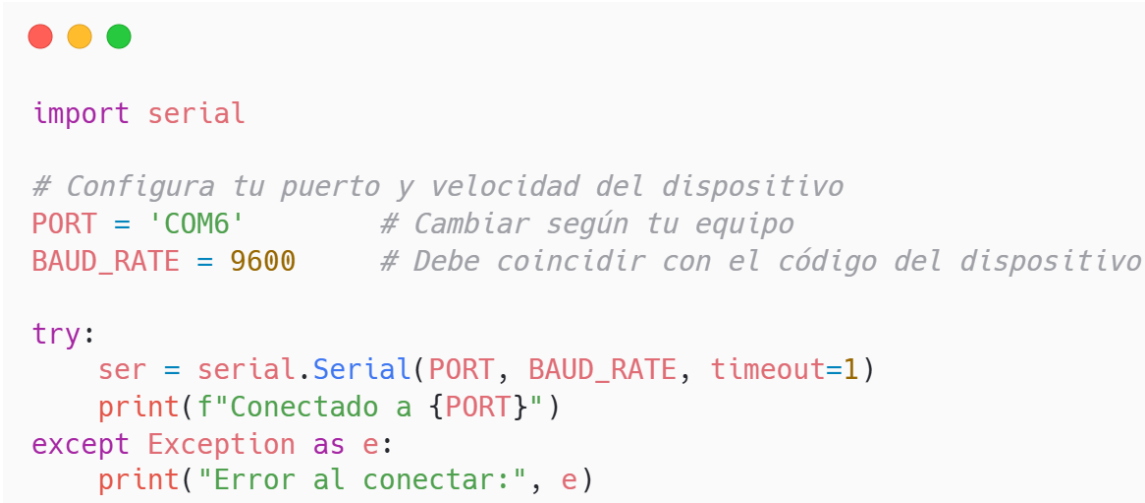
3.6 Determinar parámetros con ML

3.6.1 Lectura de datos esp32

Desde el archivo principal “/main.ipynb” o creando otro archivo con la extensión “.ipynb” y ubicado en el directorio “notebooks”, se ejecutó el script de la Figura 3.12 que permitió la lectura de datos del microcontrolador desde el puerto serial.

Figura 3.12

Lectura de datos del microcontrolador



```
import serial

# Configura tu puerto y velocidad del dispositivo
PORT = 'COM6'          # Cambiar según tu equipo
BAUD_RATE = 9600       # Debe coincidir con el código del dispositivo

try:
    ser = serial.Serial(PORT, BAUD_RATE, timeout=1)
    print(f"Conectado a {PORT}")
except Exception as e:
    print("Error al conectar:", e)
```

Este código abrió y activó el puerto serial COMx al que el microcontrolador ESP32 estaba conectado, tras lo cual se abrió otra celda de código y se ejecutó el script de la Figura 3.13.

Figura 3.13*Lectura de datos del microcontrolador*

```

def parse_data(line):
    try:
        parts = line.decode().strip().split(',')
        data = {}
        for part in parts:
            key, value = part.split(':')
            data[key.strip()] = float(value)
        data['timestamp'] = datetime.now()
        return data
    except:
        return None

data_list = []
print("Leyendo datos... presiona Ctrl+C para detener")

try:
    while True:
        line = ser.readline()
        if line:
            data = parse_data(line)
            if data:
                data_list.append(data)
                print(data)
            time.sleep(1)
except KeyboardInterrupt:
    print("Lectura detenida.")

# Guardar los datos en un DataFrame
df = pd.DataFrame(data_list)

# Guardar en CSV
if not os.path.exists("data"):
    os.makedirs("data")

filename = f"data/pirolisis_{datetime.now().strftime('%Y%m%d_%H%M%S')}.csv"
df.to_csv(filename, index=False)
print(f"Datos guardados en {filename}")

```

El microcontrolador ESP32 devuelve una cadena de datos que se guarda en un archivo .csv y tiene este orden:

$[timestamp_{actual}, temperatura_{prom}, flujo_{aire}, sensor_{CO_2}, sensor_{CO}]$

$[2025 - 05 - 29 23:57:00, 465.01, 5.66, 488.02, 75.7]$

3.6.2 Carga de datos

Desde el archivo principal “/main.ipynb” se abrió la celda de código y se ejecutó el script de la Figura 3.14 para cargar los datos respecto a los ciclos de pirolisis. El orden de los datos debe ser el siguiente:

[timestamp, tipo_madera, humedad_madera, peso_inicial, peso_final, t_quema, Temp_prom, flujo_aire, sensor_CO2, sensor_CO, resultado]

[2025-05-30 00:27:00, 2, 26.35, 3.86, 1.93, 94.82, 486.62, 3.81, 534.04, 148.33, 1]

Figura 3.14

Carga de datos del microcontrolador

```
# Cargar archivo CSV
file_path = "./datos_pirolisis_1000_t3.csv" # Cambia por tu archivo

try:
    # df = pd.read_csv(file_path, parse_dates=['timestamp'])
    df = pd.read_csv("./datos_pirolisis_1000_t3.csv", parse_dates=['timestamp'])
    print("Datos cargados:")
    display(df.head())
except Exception as e:
    print("Error al cargar archivo:", e)
```

Figura 3.15

Carga de datos del microcontrolador

Datos cargados:

	timestamp	tipo_madera	humedad_madera	peso_inicial	peso_final	tiempo	temperatura	flujo_aire	sensor_CO2	sensor_CO	resultado
0	2025-05-29 23:57:00	2	25.24	5.09	2.54	76.49	465.01	5.66	488.02	75.70	1
1	2025-05-30 00:12:00	0	20.85	6.48	3.24	76.78	433.99	4.93	456.66	88.97	1
2	2025-05-30 00:27:00	2	26.35	3.86	1.93	94.82	486.62	3.81	534.04	148.33	1
3	2025-05-30 00:42:00	2	24.75	4.81	2.40	95.47	423.70	6.06	496.19	98.53	1
4	2025-05-30 00:57:00	0	23.81	4.28	2.14	95.49	501.36	4.41	509.64	86.09	0

3.6.3 Configuración preliminar ML

Visualización de datos temperatura, CO2, CO respecto al tiempo mostrados en la Figura 3.15, se programaron mediante el código mostrado en Figura 3.16 siguiendo el orden establecido anteriormente.

Figura 3.16*Configuración preliminar*

```

● ● ●

# Visualización simple
import matplotlib.pyplot as plt

plt.figure(figsize=(14, 6))

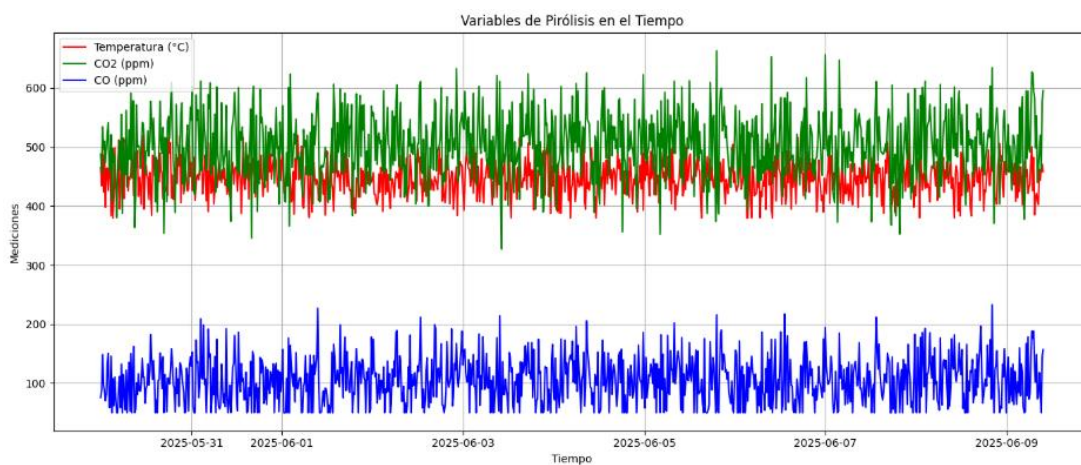
# Graficar temperatura
plt.plot(df['timestamp'], df['temperatura'], label='Temperatura (°C)',
color='red')
# Graficar sensor CO2
plt.plot(df['timestamp'], df['sensor_CO2'], label='CO2 (ppm)', color='green')

# Graficar sensor CO
plt.plot(df['timestamp'], df['sensor_CO'], label='CO (ppm)', color='blue')

# Configuración del gráfico
plt.xlabel('Tiempo')
plt.ylabel('Mediciones')
plt.title('Variables de Pirólisis en el Tiempo')
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```

Los resultados preliminares de la programación realizada se muestran a continuación en la Figura 3.17 en forma de picos, lo cual deberán validarse en una futura implementación y la quema continua que alimentará el sistema embebido.

Figura 3.17*Resultados preliminares*

3.6.4 Entrenamiento modelo

A continuación, se clasificaron las variables de entrada y de salida en la programación de la Figura 3.18 para que el modelo pueda desarrollar habilidades de lectura de la información captada por los sensores.

Figura 3.18

Entrenamiento del modelo DecisionTreeClassifier

```
X = df[['tipo_madera', 'humedad_madera', 'peso_inicial', 'peso_final',
        'tiempo', 'temperatura', 'flujo_aire', 'sensor_CO2', 'sensor_CO']]

y = df['resultado']

from sklearn.model_selection import train_test_split

X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, y, test_size=0.2, random_state=42)

from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier

modelo = DecisionTreeClassifier(max_depth=5, random_state=42)
modelo.fit(X_train, y_train)
```

3.6.5 Evaluación de resultados

La programación mostrada en la Figura 3.19 permitió obtener un reporte de la clasificación de los diferentes tipos de Biomasa y Biochar obtenidos.

Figura 3.19

Ejecución de reportes de evaluación

```
from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report, confusion_matrix

# Predicciones del modelo sobre el conjunto de prueba
y_pred = modelo.predict(X_test)

# Métricas
print("Accuracy:", accuracy_score(y_test, y_pred))
print("\nReporte de clasificación:\n", classification_report(y_test, y_pred))
print("\nMatriz de confusión:\n", confusion_matrix(y_test, y_pred))
```

3.6.5.1 Ejecución de reportes de evaluación.

El modelo de reporte lanzado por la programación se muestra continuación en la Tabla 12, este reporte ayudará a que el microprocesador después de varias quemas en el horno pueda tomar decisiones basadas en información preliminar.

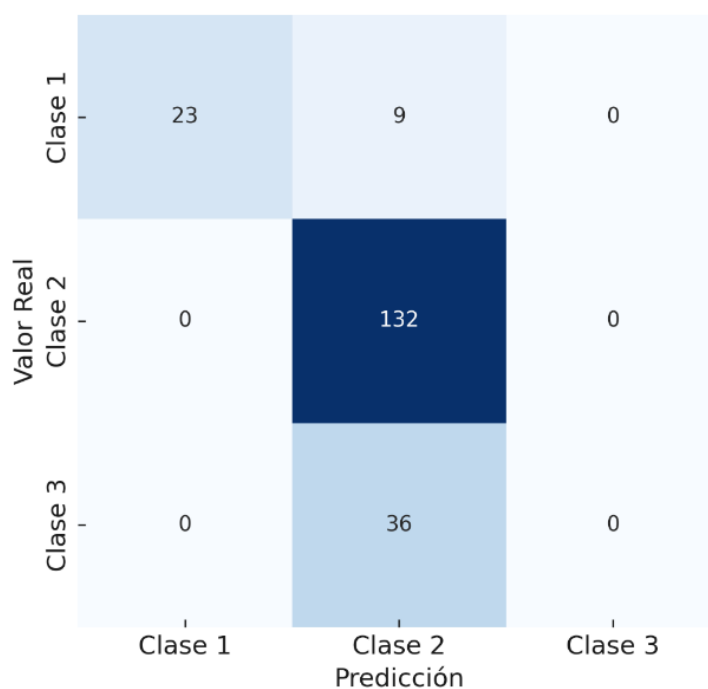
Tabla 12

Modelo de reporte

	Precisión	recall	F1-score	support
0	1.00	0.72	0.84	32
1	0.75	1.00	0.85	132
2	0.00	0.00	0.00	36
accuracy			0.78	200
macro vg	0.58	0.57	0.56	200
weighted avg	0.65	0.78	0.70	200

Figura 3.20

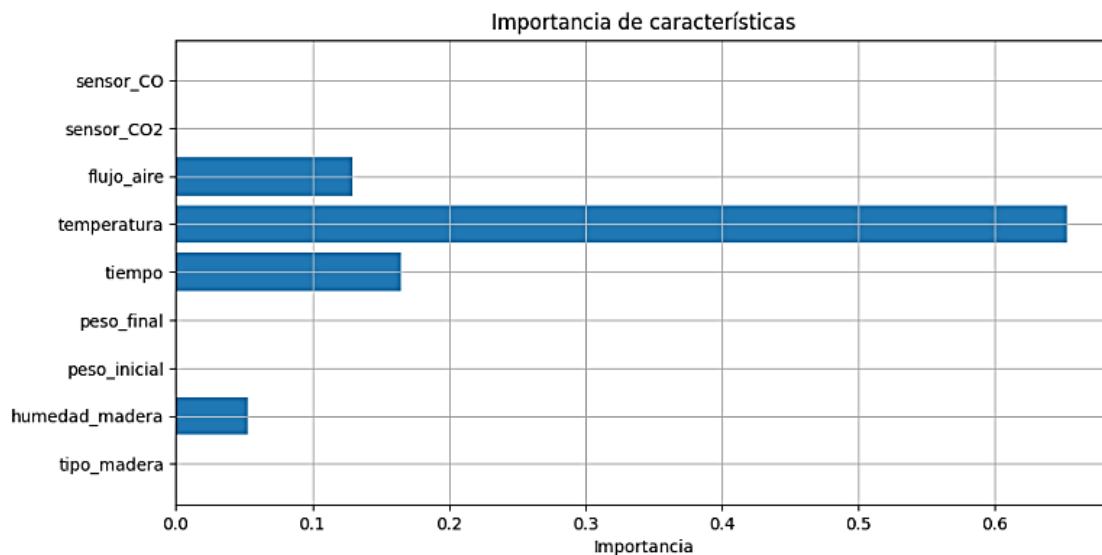
Matriz de confusión



La Figura 3.20 muestra el reporte de clasificación binario que para la clase de quema mala (0) se alcanzó una precisión del 100% y un recall del 72%, lo que indica que de 32 casos reales fueron identificados correctamente 23, mientras que 9 se confundieron con la clase no mala. En el caso de la clase no mala (1, que agrupa la quema no mala), el modelo obtuvo un recall del 91% y una precisión del 79%, con 168 aciertos y 15 clasificaciones erróneas como quema mala. La matriz de confusión respalda estos resultados al evidenciar la tendencia del modelo a reconocer con mayor solidez los casos de quema no mala, aunque con cierta pérdida de sensibilidad en la detección de quema mala. En conjunto, ambas métricas reflejan un desempeño global del 87% de exactitud, lo que valida la utilidad del modelo para diferenciar entre procesos de combustión inadecuados y aquellos que se desarrollan de manera aceptable en el contexto del proyecto integrador.

Figura 3.21

Importancia de características



En la Figura 3.21 la gráfica de importancia de características muestra, a partir de los datos simulados, qué variables tuvieron mayor peso en las decisiones del modelo de clasificación. En este caso, la temperatura aparece como la variable más influyente, con

más del 60% de importancia relativa, seguida por el tiempo, el peso final y el flujo de aire, mientras que variables como sensor_CO, sensor_CO2, peso inicial, humedad de la madera y tipo de madera presentan una contribución mucho menor. Es importante señalar que esta distribución corresponde únicamente al conjunto de datos empleado en la simulación, por lo que no necesariamente se mantendrá igual con nuevos datos experimentales. En consecuencia, se espera que al ampliar la base de datos y obtener información de pruebas reales, las importancias relativas de las variables puedan variar, lo cual permitirá entrenar un modelo más robusto y con mayor capacidad de generalización para su implementación en un dispositivo embebido como la Raspberry Pi 4.

3.7 Control PID

3.7.1 Configurar el controlador:

En el código de la Figura 3.22 se establece el controlador PID con valores solo en el proporcional (K_p), con K_i y K_d en cero.

Figura 3.22

Configuración del controlador

```
// Parámetros PID
double Setpoint = 700; // Temperatura objetivo (700°C)
double Input, Output; // Input = temp promedio, Output = PWM

// Tuning PID (ajustar constantes Kp, Ki, Kd empíricamente)
double Kp = 1, Ki = 0, Kd = 0;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

3.7.2 Aumentar la ganancia:

Se debe incrementar gradualmente la ganancia K_p hasta que el sistema alcance una oscilación sostenida como se observa en la Figura 3.23.

Figura 3.23*Configuración del controlador parámetro Kp*


```
// Tuning PID (ajustar constantes Kp, Ki, Kd empíricamente)
double Kp = -100, Ki = 0, Kd = 0;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

3.7.3 Calcular parámetros PID:

En la Tabla 13 se utilizan las siguientes ecuaciones para calcular los valores de Kp, Ki y Kd, que se obtienen mediante el cuadro de ajuste por el método Z-N

Tabla 13*Análisis de parámetros de calibración.*

Tipo	K_p	T_i	T_d	K_p	T_i	T_d
P	1/a	∞	0	$0.5K_{CR}$	∞	0
PI	0.9/a	3L	0	$0.45K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{1.2}$	0
PID	1.2/a	2L	0.5L	$0.6K_{CR}$	$\frac{T_{CR}}{2}$	$\frac{T_{CR}}{8}$

$$K_p = 0.5 * K_{cr} = 0.5 * 800^{\circ}\text{C} = 400$$

$$T_i = 0.45 * T_{cr} = 0.45 * 0.2\text{s} = 0.09$$

$$T_d = 0.6 * T_{cr} = 0.6 * 0.2\text{s} = 0.12$$

Figura 3.24*Programación de parámetros calibrados*


```
// Tuning PID (ajustar constantes Kp, Ki, Kd empíricamente)
double Kp = -400, Ki = -0.9, Kd = -0.12;

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint, Kp, Ki, Kd, DIRECT);
```

En la Figura 3.24 se presenta el código final del controlador PID con los parámetros calibrados obtenidos a partir del método de Ziegler–Nichols. Los valores programados fueron $K_p = -400$, $K_i = -0.9$, $K_d = -0.12$ calculados con base en los ensayos de oscilación sostenida y en el cuadro de ajuste descrito previamente. Esta configuración representó el ajuste definitivo dentro del entorno de programación, lo que permitió validar el comportamiento teórico del sistema de control en torno al punto de consigna de 700 °C.

Capítulo 4

4 Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

- Los análisis estáticos y por elementos finitos verifican que el horno Kon Tiki diseñado es capaz de soportar una carga crítica total de 371.42 kg, sin comprometer la integridad estructural. El esfuerzo de Von Mises simulado (39.73 MPa) permanece ampliamente por debajo del límite admisible del acero AISI 1045 (256 MPa), con un factor de seguridad superior a 2.5, cumpliendo con los requisitos de normas mecánicas como ASME B31.3.
- Se demostró que el sistema de ventilación, con solo 4.02 W de potencia requerida, logra un caudal de aire de 70 m³/h. Con relación a la geometría cónica del horno, la simulación térmica y de flujo validó que esta configuración permite una distribución uniforme del aire en la cámara cónica, favoreciendo un pirólisis homogéneo y una llama tipo cortina bien estabilizada.
- Respecto al sistema electrónico y de control, la implementación de un sistema basado en ESP32 demuestra la viabilidad técnica de utilizar plataformas de bajo costo y alta eficiencia en entornos de alta exigencia térmica, manteniendo la estabilidad del sistema en condiciones críticas. El uso de control PID junto a termopares tipo K permite mantener la temperatura en un rango de ± 50 °C respecto al punto ideal, lo que es suficiente para la producción de biochar de calidad industrial.
- El diseño de hardware modular favorece la incorporación futura de nuevos sensores o algoritmos (como ML), permitiendo adaptarse a nuevas condiciones operativas sin rediseñar todo el sistema. El sistema incluye capacidades IoT básicas que permiten la visualización remota de datos, abriendo posibilidades para sistemas de alerta temprana, mantenimiento predictivo o control distribución.

Además, la recopilación ordenada de datos y la clasificación por variables habilita el entrenamiento inicial de modelos supervisados, facilitando la futura implementación de controladores adaptativos más precisos y autónomos.

- El horno incorpora un eje móvil que permite el vaciado sencillo del biochar, lo cual representa una mejora ergonómica significativa respecto a diseños tradicionales. El uso de lámina de acero de 3 mm reduce el peso total (88.92 kg), manteniendo la robustez operativa.
- Las simulaciones a 700 °C confirman que las tensiones térmicas no exceden el límite de fluencia del acero ASTM A36. Las deformaciones estructurales obtenidas (máximo de 3.091 mm) se encuentran dentro de los márgenes aceptables (<2 % de deformación respecto a la geometría total).
- La integración de técnicas de control embebido, combinadas con simulaciones de flujo térmico y estructural, evidencia la viabilidad de desarrollar sistemas inteligentes de pirólisis adaptados a comunidades rurales. Esta propuesta puede ser replicada en otras regiones con condiciones similares.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda reforzar el anillo superior de la cámara de combustión con varilla corrugada o material adicional, especialmente en la zona de acoplamiento con el ventilador, donde se observan las máximas deformaciones.
- Debido a las altas temperaturas (>700 °C) alcanzadas durante la operación, es aconsejable evaluar el recubrimiento térmico del eje para conservar su resistencia mecánica y prevenir deformaciones a largo plazo.
- Se sugiere el uso de sensores inalámbricos de alta temperatura (>800 °C) para obtener lecturas en tiempo real durante el proceso de pirólisis. Además, se recomienda desarrollar un módulo de control desmontable, como se propone en

la Casa de la Calidad, para evitar el deterioro de componentes electrónicos durante el enfriamiento.

- Aunque la potencia calculada es de 4.02 W, es prudente considerar un ventilador con potencia nominal de al menos 5 W para compensar pérdidas no consideradas en la simulación, garantizando la estabilidad del flujo de aire.
- Se recomienda investigar la posibilidad de utilizar el calor residual para precalentar el aire de entrada, lo cual podría disminuir el consumo total de biomasa y mejorar la eficiencia térmica del sistema.
- Es crucial realizar pruebas reales con biomasa de cáñamo y madera de cacao para verificar la exactitud del volumen de agua necesario para el enfriamiento (0.163 m^3) y el comportamiento del flujo de aire ante carga heterogénea. Además, se sugiere medir emisiones (CO , CH_4) para calibrar los parámetros de combustión y reducir el impacto ambiental.
- Se sugiere implementar blindajes o filtros para proteger los sensores y controladores de interferencias electromagnéticas propias del entorno industrial. Además, de estudiar e implementar versiones autoajustables del PID o algoritmos como PID difuso, para reducir sobre impulsos y mejorar la estabilidad frente a biomasa heterogénea.
- Incluir validación automática del funcionamiento de sensores (por ejemplo, desconexión, saturación o lecturas anómalas), para garantizar seguridad operativa. Realizar ciclos de pirolisis con distintas biomásas (diferente humedad, densidad y tipo) para mejorar la precisión del modelo de aprendizaje automático.
- Desarrollar una interfaz gráfica sencilla (con herramientas como Grafana, Node-RED o Blynk) para visualización local en tiempo real desde dispositivos móviles o pantallas en el campo.

- Para mitigar riesgos operativos, se recomienda la instalación de válvulas de alivio de presión en la cámara de pirolisis. Asimismo, la incorporación de un sistema de captura de gases pirolíticos contribuiría a reducir emisiones contaminantes durante el vaciado del horno.

Bibliografía

- [1] A. a. F. S. (. & C. G. o. I. A. R. (. Climate Change, «AgLEDx RESOURCECE PLATFORM,» [En línea]. Available: <https://agledx.ccafs.cgiar.org/emissions-led-options/sources-sinks/open-burning/>.
- [2] C. f. E. C. (CEC), «Comisión para la Cooperación Ambiental,» Enero 2014. [En línea]. Available: <https://www.cec.org/files/documents/publications/11405-la-quema-de-residuos-agr-colas-es-una-fuente-de-dioxinas-es.pdf>.
- [3] E. C. Cassou, «Agricultural Pollution Field Burning».
- [4] E. Muñoz, G. Curaqueo, M. Cea y L. F. Vera, «Environmental hotspots in the life cycle of a biochar-soil system,» *Journal of Cleaner Production*, vol. Volume 158, pp. Pages 1-7, 1 August 2017.
- [5] J. Lehmann, J. Gaunt y M. Rondon, «BIO-CHAR SEQUESTRATION IN TERRESTRIAL ECOSYSTEMS,» *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2006.
- [6] G. Cornelissen, N. R. Pandit, P. Taylor, B. H. Pandit, M. Sparrevik y H. P. Schmidt, «Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production,» *Plos One*, 18 Mayo 2016.
- [7] H.-P. Schmidt y P. Taylor, «Kon-Tiki flame curtain pyrolysis for the democratization of biochar production,» *The Biochar Journal*, 2014.
- [8] K. Solution, «kintek solution for researching,» May 2025. [En línea]. Available: <https://kindle-tech.com/faqs/how-much-does-biochar-pyrolysis-cost>.

- [9] P. Pearson, S. Bodin, A. Gittelsohn, S. Kinney, J. McCarty, G. Stevenson y J. Albertengo, «Impacts and Reduction of Open Burning in the Andes, Himalayas – and Globally,» 2015.
- [10] ARTi y Pacchar, «ARTi,» [En línea]. Available: <https://www.arti.com/kon-tiki-biochar-production-sustainable-solution-in-ecuador-collaboration-between-arti-pacchar-for-climate-friendly-agriculture/>.
- [11] R. A. Mihai, E. J. Melo-Heras, V. Terán Maza, I. A. Espinoza Caiza, E. Pinto Valdiviezo y R. D. Catana, «(Deficit/Toxicity) from Different Climatic Regions and Their Possible Influence on the Metabolism of Important Crops,» *Toxics*, 23 January 2023.
- [12] ShawnHymel, «DigiKey,» 6 July 2020. [En línea]. Available: <https://www.digikey.com/en/maker/projects/tinymml-getting-started-with-tensorflow-lite-for-microcontrollers/c0cdd850f5004b098d263400aa294023>.
- [13] G. F. Brescia, «Embedded,» 4 June 2025. [En línea]. Available: <https://www.embedded.com/deploying-neural-networks-on-microcontrollers-with-tinymml/>.
- [14] J. Lehmann y S. Joseph, «Biochar for Environmental Management Science, Technology and Implementation,» Second Edition ed., Routledge, 2015.
- [15] D. Chango, Interviewee, *Dificultades encontradas en el método artesanal para la pirólisis en hornos cortina de llama*. [Entrevista]. Julio 2025.
- [16] I. Quiche, Interviewee, *Factores que se consideran necesarios para resolver el problema en Cooperativa Ananda*. [Entrevista]. Julio 2025.

- [17] J. Hunt, «Pacific Biochar,» 1 February 2016. [En línea]. Available: <https://pacificbiochar.com/definition-of-biochar/>.
- [18] D. Pierson, N. Anderson, J. Brewen, N. Clark, M. C. Hardy, D. McCollum , F. H. McCormick, J. Mori, D. Page-Dumroese, C. Rodriguez y J. Tirocke, «Beyond the basics: a perspective on barriers and opportunities for scaling up biochar production from forest slash,» *BIOCHAR*, vol. 6, 2 January 2024.
- [19] D. Jayasanka, G. Jayasinghe y S. Maheep, «Cinnamon Wood Biochar Characteristics and Application Rates Influence on Crop Growth and Properties of Problematic Soil in Southern Sri Lanka,» *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, vol. 9, January 2020.
- [20] W. A. M. A. N. Illankoon, C. Milanese, A. Karunarathna Karunarathna ,, . A. M. Y. W. Alahakoon, P. G. Rathnasiri, M. Medina-Llamas, M. C. Collivignarelli y S. Sorlini, «Development of a Dual-Chamber Pyrolizer for Biochar Production from Agricultural Waste in Sri Lanka,» *Energies*, 11 February 2023.
- [21] G. Cornelissen, C. Makate, J. Mulder, J. Janssen, J. Trimarco, A. Obia, V. Martinsen y E. Sørmo, «Emission Factors for Biochar Production from Various Biomass Types in Flame Curtain Kilns,» *Applied Sciences*, 22 October 2024.
- [22] A. Pokhrel y H.-P. Schmidt, «Kon-Tiki Heat Recovery: Essential Oil Distillation,» *The Biochar Journal*, 2019. [En línea]. Available: <https://www.biochar-journal.org/en/ct/100-Kon-Tiki-Heat-Recovery-Essential-Oil-Distillation>.
- [23] Cornelissen, Gerard; Sørmo, Erlend; Anaya de la Rosa, Ruy Korscha; Ladd, Brenton;, «Flame curtain kilns produce biochar from dry biomass with minimal

- methane emissions,» *Science of The Total Environment*, vol. 903, 10 December 2023.
- [24] «THE BIOCHAR REVOLUTION,» 14 July 2015. [En línea]. Available: <https://www.thebiocharrevolution.com/biochar-production-in-kon-tiki-australia/>.
- [25] A. Botnen Smebye, M. Sparrevik, H. P. Schmidt y G. Cornelissen, «Life-cycle assessment of biochar production systems in tropical rural areas: Comparing flame curtain kilns to other production methods,» *Biomass and Bioenergy*, vol. 101, pp. 35-43, June 2017.
- [26] E. Q. Quansah, «The quality of Cocoa Pod Husk Biochar produced with the “Kon-tiki” kiln technology, and its effect as a soil enhancer on the growth rate of cocoa seedlings.,» 2021.
- [27] V. G. Vargas, PROGRAMAS COMPUTACIONALES CON ANALISIS DE ELEMENTOS FINITOS, San Jose, Costa Rica: Pearson, 2020.
- [28] Kintek, «Solutionn for Researching,» 07 2025. [En línea]. Available: <https://es.kindle-tech.com/faqs/what-is-the-effect-of-moisture-content-on-biomass-pyrolysis#>.
- [29] R. Norton, Diseño mecánico, Pearson, 2024.
- [30] R. G. Budynas, Shigley’s Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, 2015.
- [31] v. e. S y P, «S y P,» 2025. [En línea]. Available: <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/formula-caudal/>.

- [32] H. D. Sinchire Pogo, «Diseño y simulación de un horno pirolítico de 200 litros para la generación de Biochar,» 2020. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19211>.
- [33] J. McAvoy Darren, «Funcionamiento y mejores prácticas del horno de biocarbón Big Box,» Utah, 2023.

Apéndices

Apéndice A.

Recolección de Información

Tabla A.1

Resumen de entrevista a miembros de “Cooperativa de producción agrícola Ananda”

N	Detalles de requerimiento	Respuesta
1	¿Cuál considera que es el principal beneficio que aportaría un horno Kon-Tiki en su entorno de trabajo?	El principal beneficio de un horno Kon Tiki en la Cooperativa es la rapidez con la que podríamos comenzar a procesar nuestros residuos, al ser productores de Cáñamo, Cannabis medicinal, Guarango, Higuierilla y Tuna nos enfrentamos a varios desechos que no pueden ser devueltos al ecosistema sin procesar.
2	¿Qué limitaciones materiales o económicas existen en la cooperativa para construir un horno?	Conseguir los materiales puede ser un desafío, sin embargo, lo más difícil de conseguir es un taller que pueda procesar la geometría necesaria para el horno.
3	¿Qué tan importante considera que es contar con un sistema de control electrónico o automatizado para este horno?	Muy importante, me permitiría reducir el tiempo de quema. Por lo tanto, podría procesar más residuos incluyendo los de la comunidad Chingazo Alto.
4	¿Cuál cree que debe ser la capacidad adecuada del horno (en litros o kilos por lote) para que sea útil en su contexto?	La producción de residuos está en 5 m ³ por ciclo, eso depende de la época del año hay ciclos que producen 8 m ³ mientras más rápido podamos procesar todo eso es mejor.
5	¿Qué elementos considera esenciales en el diseño para garantizar seguridad y facilidad de uso?	Reducir los tiempos de pirolisis sería lo más esencial y en temas de seguridad lo primordial para esta etapa del desarrollo sería el poder cargar y descargar el horno con el menor esfuerzo posible en el operador.
6	¿Estaría dispuesto a colaborar en la validación o prueba del prototipo una vez construido?	Muy dispuesto, el equipo se probará con los residuos de los cultivos que ya tenemos en marcha. Podríamos empezar hoy mismo con los residuos existentes. Y evaluar la calidad del Biochar en laboratorios químicos y de materiales.

Tabla A.2*Escala para la encuesta en Google Forms*

Escala	Detalles de requerimiento
1	Nada importante
2	Poco importante
3	Neutral
4	Importante
5	Muy importante

Tabla A.3*Encuesta aplicada al personal operativo de “Cooperativa de producción agrícola Ananda”*

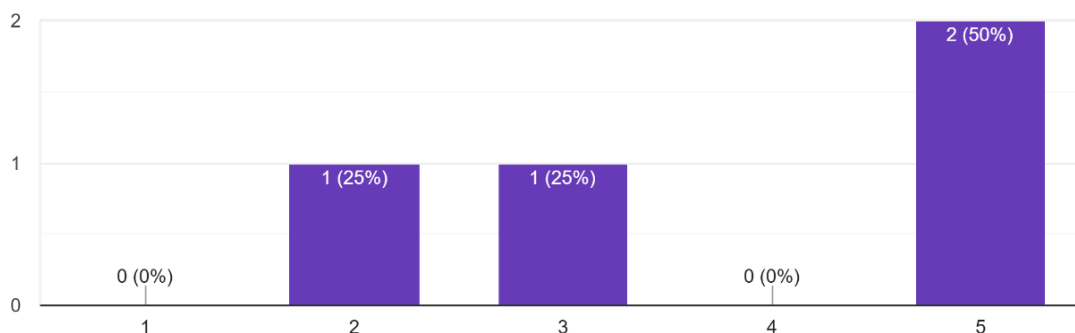
N	Detalles de requerimiento	Escala (1 al 5)
1	¿Qué tan importante es que el horno sea portátil?	
2	¿Qué tan relevante es que esté hecho con materiales locales?	
3	¿Qué tan prioritario es incluir sensores de temperatura?	
4	¿Qué tan crítico considera automatizar el flujo de aire?	
5	¿Qué importancia tiene que la operación del horno sea intuitiva?	
6	¿Cuán útil cree que sería poder monitorear datos desde un teléfono?	
7	¿Qué tan dispuesto estaría a capacitar a otros en el uso del horno?	

La recolección de las necesidades permite conocer las expectativas que tiene el usuario sobre un producto en específico, en este caso los operarios del horno quienes respondieron a la encuesta realizada. Lo que nos dirige a solidificar una base técnica y medible para el diseño conceptual. A continuación, se detallan las respuestas de los operarios mencionados en las gráficas consecuentes.

Figura A.1

¿Qué tan importante es que el horno sea portátil?

4 respuestas

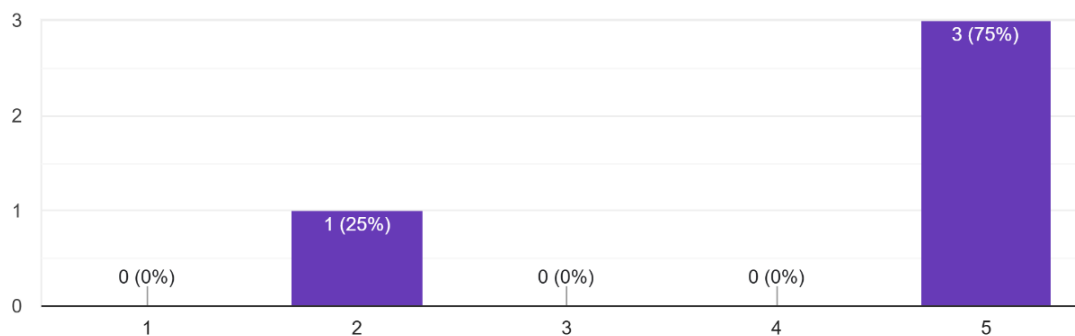


La imagen muestra que la mitad de sus operarios considera que el horno debe ser portátil mientras que la otra mitad considera que no es un factor importante por lo cual el peso del horno es un factor a considerar con un rango de importancia medio.

Figura A.2

¿Qué tan relevante es que esté hecho con materiales locales?

4 respuestas

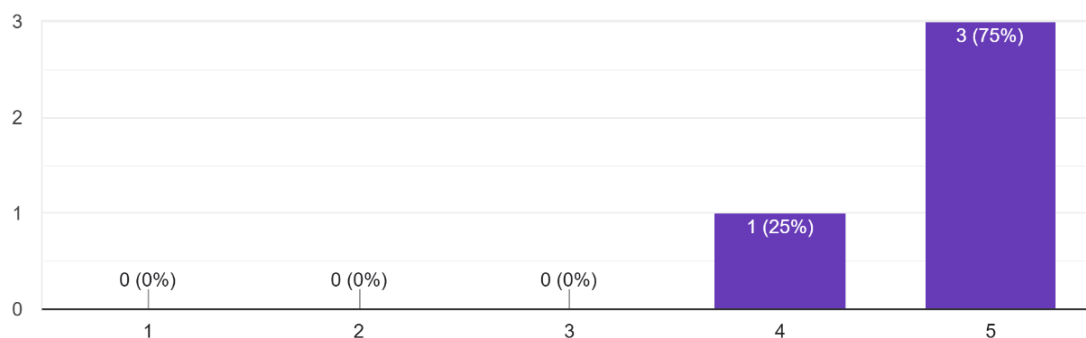


La relevancia en la construcción con materiales locales se ubica como factor importante ya que la mayoría de los operarios considera que este debe ser construido con estos; lo que recaba en un factor económico.

Figura A.3

¿Qué tan prioritario es incluir sensores de temperatura?

4 respuestas

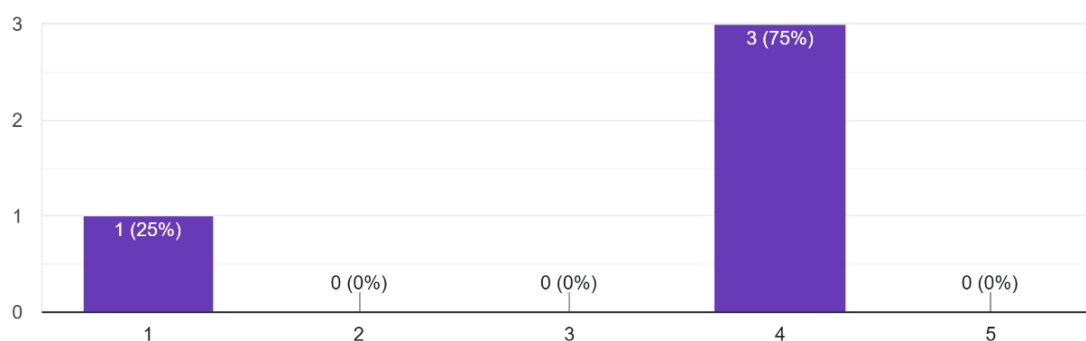


El sistema de control de temperatura se ubica como parte importante en el desarrollo del diseño conceptual al observar los resultados podemos concluir que todos los operarios del horno consideran prioritario conocer la temperatura a la que está operando el horno, ya que en base a lo antes expuesto sobre el método pirolítico de obtención de biochar un control de temperatura les permitirá obtener biochar de diferentes residuos agrícolas.

Figura A.4

¿Qué tan crítico considera automatizar el flujo de aire?

4 respuestas



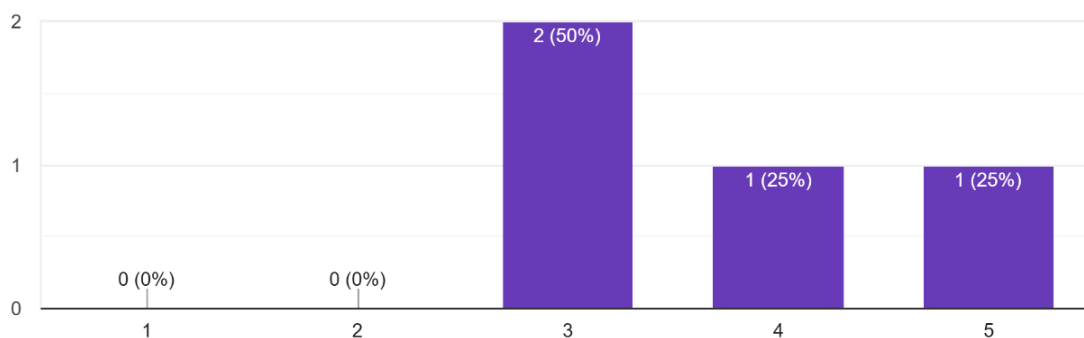
La mayoría de los operadores considera que el flujo de aire es un factor importante ya que les permitirá mejorar la eficiencia en el proceso de obtención de biochar, al

inyectar aire mientras se desarrolla el proceso de quema permite reducir el tiempo de quema de los residuos, por ende, menos energía gastada por los operarios.

Figura A.5

¿Qué importancia tiene que la operación del horno sea intuitiva?

4 respuestas

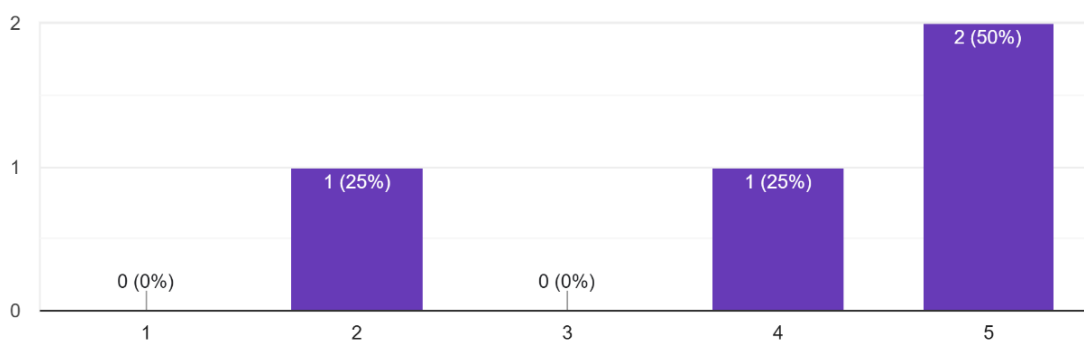


La operación intuitiva tiene una ponderación relevante, pero se encuentra mas distribuida en las respuestas de los operarios por lo cual el rango de ponderación para el diseño la ubica como la de menor importancia con las demás características mencionadas anteriormente.

Figura A.6

¿Cuán útil cree que sería poder monitorear datos desde un teléfono?

4 respuestas

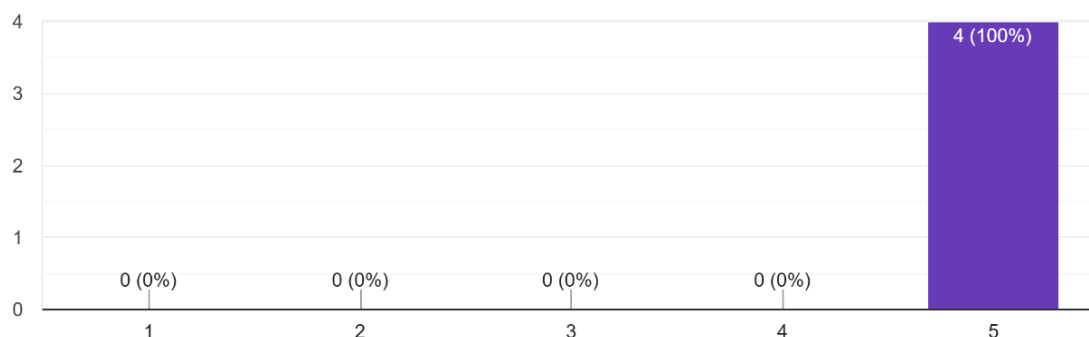


El uso de la tecnología es cada vez más importante en el desarrollo de las actividades agrícolas por lo cual poder monitorear el horno desde un teléfono inteligente tiene una ponderación importante y a tomar en cuenta en el diseño conceptual.

Figura A.7

¿Qué tan dispuesto estaría a capacitar a otros en el uso del horno?

4 respuestas



Esta pregunta va junto con la intuición de operación, todos los operarios están dispuestos a capacitar al resto de la comunidad en el uso del horno por lo cual que sea de fácil operación es un factor preponderante a tomar en cuenta en el diseño conceptual.

Evaluación de alternativas para el horno

Para la siguiente evaluación se procedió a realizar según cada criterio como cumplen las alternativas el criterio designado ya que todas deben cumplir con los criterios de diseño de alguna manera.

Tabla A.4

Evaluación de alternativas para el criterio fácil operación

Fácil operación	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		0.5	1	2.5	41.7%
Alter. 2	0.5		1	2.5	41.7%
Alter. 3	0	0		1	16.6%
Total				6	100%

Tabla A.5*Evaluación de alternativas para el criterio costo*

Costo	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		0.5	1	2.5	41.7%
Alter. 2	0.5		1	2.5	41.7%
Alter. 3	0	0		1	16.6%
Total				6	100%

Tabla A.6*Evaluación de alternativas para el criterio Control de temperatura*

Control de temperatura	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		1	1	3	50%
Alter. 2	0		0	1	16.7%
Alter. 3	0	1		2	33.3%
Total				6	100%

Tabla A.6*Evaluación de alternativas para el criterio peso*

Peso	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		0.5	0	1.5	25%
Alter. 2	0.5		0	1.5	25%
Alter. 3	1	1		3	50%
Total				6	100%

Tabla A.7*Evaluación de alternativas para el criterio control de flujo de aire*

Control de flujo de aire	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		0.5	0.5	2	33.33%
Alter. 2	0.5		0.5	2	33.33%
Alter. 3	0.5	0.5		2	33.33%
Total				6	100%

Tabla A.8*Evaluación de alternativas para el criterio monitoreo a distancia*

Monitoreo a distancia	Alter. 1	Alter. 2	Alter. 3	$\Sigma+1$	Ponderación
Alter. 1		0.5	0	1.5	25%
Alter. 2	0.5		0	1.5	25%
Alter. 3	1	1		3	50%
Total				6	100%

Apéndice B. Pasos metodológicos de la simulación de flujo

Optimización de la Combustión y el Flujo de Gases

Un ángulo de 60° a 70° es fundamental para generar dos fenómenos físicos que aseguran una pirólisis limpia y eficiente:

- **Cortina de Llama:** Esta inclinación induce un flujo de aire natural que forma una cortina de llamas sobre la biomasa. El aire entrante es forzado a deslizarse por las paredes calientes del cono, lo que lo precalienta antes de llegar a la zona de combustión. Este precalentamiento es clave para lograr una combustión completa de los gases de pirólisis, minimizando la emisión de humo.
- **Creación de un Vórtice Estable:** La geometría cónica con este ángulo genera un vórtice horizontal autoestabilizado. Este vórtice atrapa los gases y partículas volátiles, aumentando su tiempo de residencia en la zona caliente y asegurando que se quemen por completo antes de escapar.

Estabilidad Mecánica y Funcionalidad Operativa

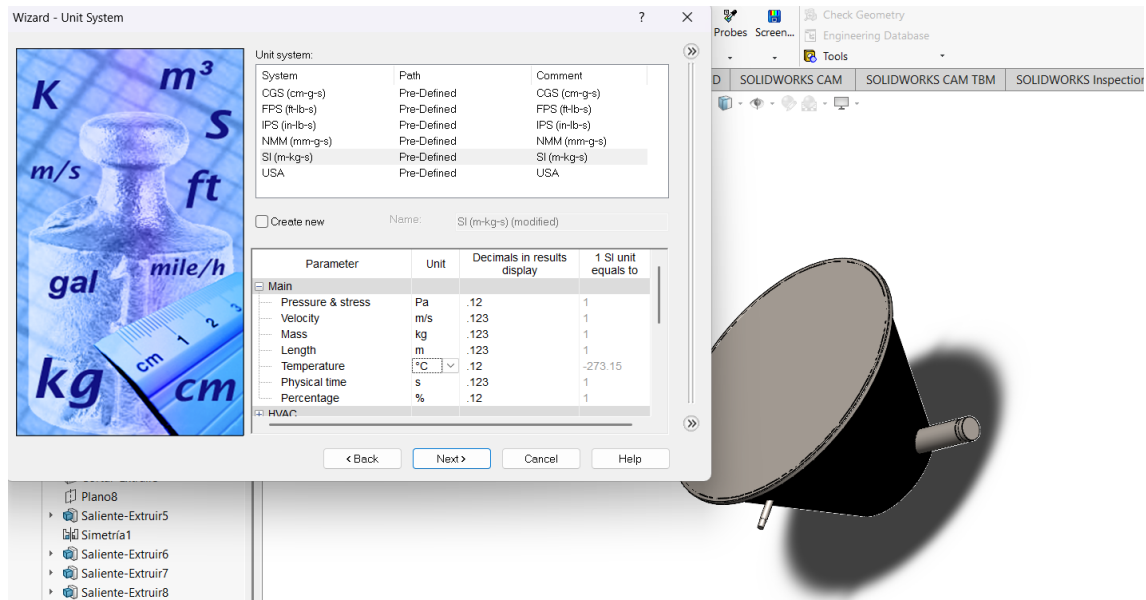
Desde una perspectiva de ingeniería, la inclinación de 63° ofrece ventajas estructurales y de uso:

- **Distribución de Cargas:** El ángulo distribuye eficientemente las cargas y el estrés térmico sobre la estructura, lo que permite construir el horno con un acero relativamente delgado (ej. 3 mm) sin comprometer su durabilidad.
- **Facilidad de Vaciado:** La pendiente pronunciada promueve la autocompactación del biocarbón a medida que se produce. Esto facilita enormemente su descarga al final del proceso, ya sea por volteo o inclinación del horno.

Apéndice C. Pasos metodológicos de la simulación de flujo

Figura C.1

Definición de límites y magnitudes en Flow Simulation



El siguiente paso es definir el tipo de análisis a desarrollar, en el presente estudio se realiza un estudio interno de sólidos en combustión para lo cual se despliega la siguiente ventana.

Figura C.2

Definición de análisis

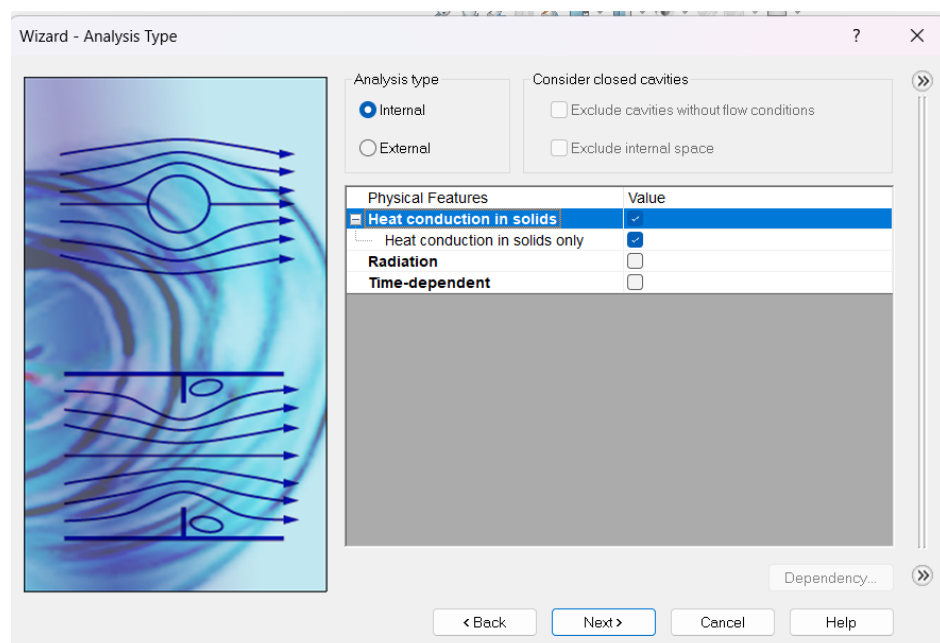
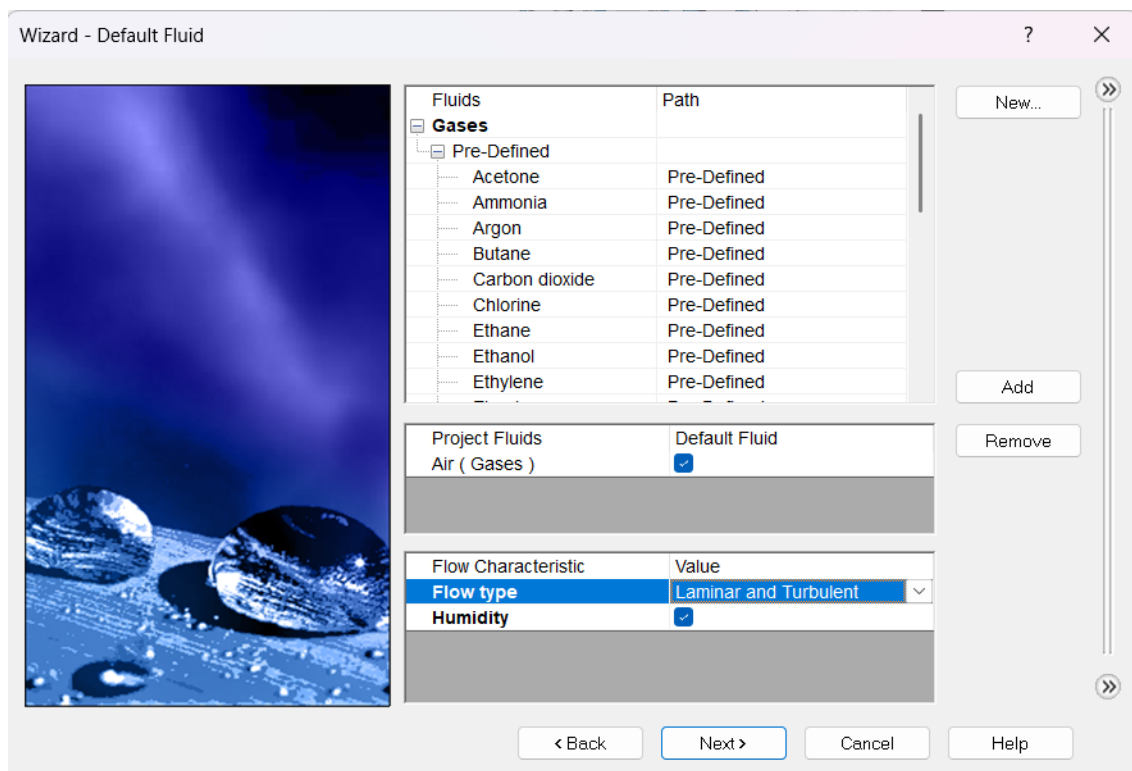
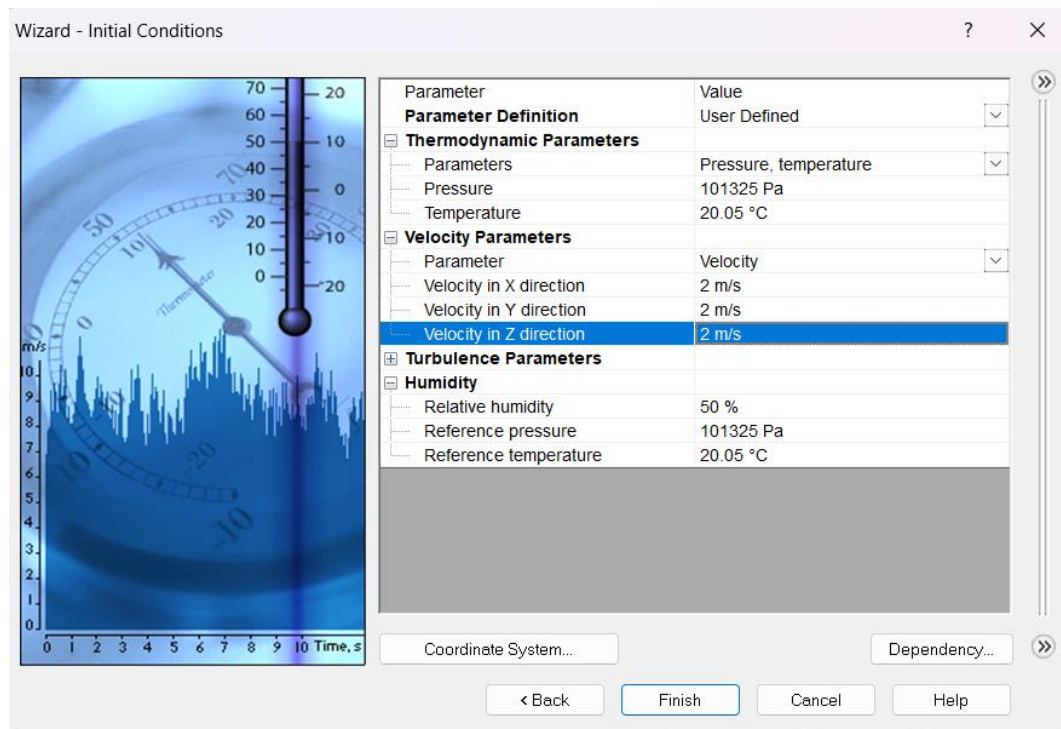
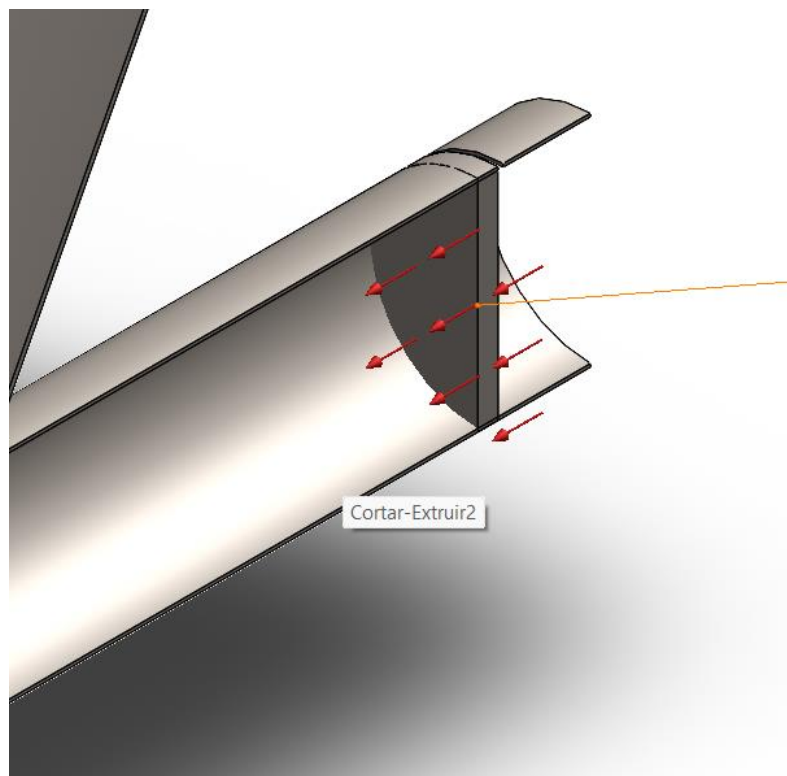


Figura C.3*Definición de flujo másico*

Se continúa definiendo el tipo de fluido que va a correr por la cámara de combustión, en este caso es aire con un tipo de flujo turbulento, ya que el ventilador empujara aire desde el exterior acelerando el mismo. Para seguir definiendo el estado termodinámico del aire que va a ingresar en el sistema.

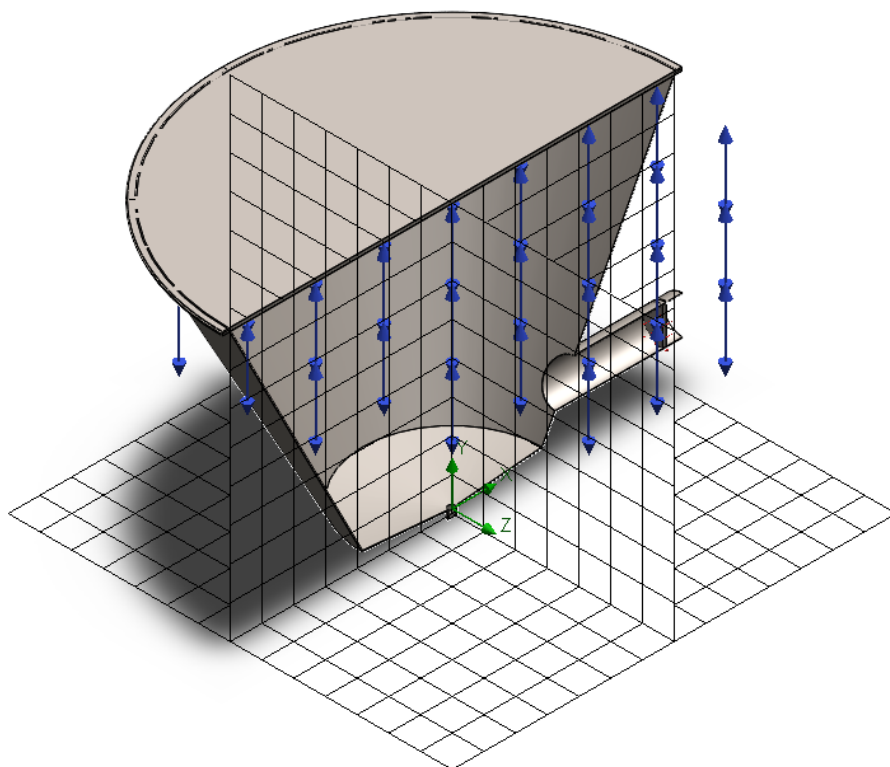
Los parámetros considerados para el aire son las de presión atmosférica y temperatura ambiente, considerando que el aire va a estar a una temperatura de 20°C y se va a mover a una velocidad de 2 m/s con una humedad relativa de 30% considerando que el horno funcionará en la comunidad de Chingazo Alto, cantón Guano provincia de Chimborazo.

Figura C.4*Definición de flujo másico***Figura C.5***Definición de borde de entrada de aire*

El siguiente paso es añadir las entradas y salidas del flujo de aire, en el presente estudio tenemos una sola entrada de aire, ya que el resto estará bloqueado por la biomasa en la parte superior y por una válvula en la salida del agua.

Figura C.6

Definición de la malla de estudio



La malla de estudio definirá como mostrarnos el comportamiento del fluido, en la cámara de combustión, mientras más fina sea esta malla el procesador del computador trabajará más por lo que en este caso se definió malla de 12 mm.

Apéndice D. Selección de la unidad de procesamiento y módulo de adquisición

Para el procesamiento y control del sistema, se evaluaron diversas plataformas, pero los requerimientos del proyecto exigían una arquitectura de dos niveles que separara la adquisición de datos del procesamiento de alto nivel. Por esta razón, la Raspberry Pi 4B fue seleccionada como la unidad central de procesamiento (SBC - Single Board Computer), una decisión justificada por su capacidad para ejecutar las tareas más demandantes del sistema.

La presencia de la Raspberry Pi 4 en el diseño responde a tres necesidades críticas que microcontroladores más simples, como el Raspberry Pi Pico, no pueden satisfacer:

- **Ejecución de un Sistema Operativo Completo:** La Raspberry Pi 4 opera sobre Linux, un requisito indispensable para gestionar simultáneamente el algoritmo de control PID y los protocolos de Machine Learning (ML) que optimizan el proceso.
- **Potencia de Cómputo para IA:** Su procesador (Cortex-A72 de 64 bits) proporciona la capacidad de cómputo necesaria para procesar los datos de los sensores en tiempo real y ejecutar los protocolos de ML, los cuales permiten determinar los parámetros óptimos de operación. Opciones con menor capacidad, como la Raspberry Pi Zero 2 W, no resultan adecuadas para esta carga de trabajo multitarea.
- **Flexibilidad de Interfaces:** Ofrece múltiples interfaces (USB, Ethernet, GPIO) que facilitan la comunicación tanto con el microcontrolador de adquisición de datos (el ESP32) como con posibles periféricos futuros.

En contraste, las tareas de bajo nivel y tiempo real, como la generación de señales PWM para el ventilador y la lectura directa de sensores, son delegadas a un microcontrolador dedicado. Esta división de tareas permite que la Raspberry Pi 4 se enfoque exclusivamente en el procesamiento y la toma de decisiones estratégicas,

validando su rol como el "cerebro" del sistema de control. La siguiente tabla resume las características de las plataformas consideradas y subraya las ventajas que hicieron de la Pi 4 la elección adecuada.

Apéndice E. Análisis de Costos

Se describe de forma detallada cada uno de los costos que se asumirían una vez que el gerente del cliente valore el siguiente análisis, valores entre diseño y construcción del horno del proyecto en cuestión, para producción de Biochar a partir de residuos agrícolas resultantes del proceso de cultivo de Cannabis, Guarango, eucalipto, pino o especies invasoras en la comunidad de Chingazo alto, cantón Guano, por cual se presentarían costos directos e indirectos.

Costos directos

Son los valores que intervienen de forma directa en la implementación del primer prototipo de una comunidad sostenible tanto en recursos materiales, económicos e intelectuales de un horno estilo Kon Tiki para producir Biochar, entre estos costos consideraremos el material en bruto, materiales de fácil acceso para la comunidad y tratamiento térmico, con esto englobamos mano de obra, uso de equipos, máquinas y herramientas y transporte.

Costo de materiales mecánicos y electrónicos

En esta sección del proyecto se presenta el material en bruto, basado en las condiciones del mercado de la zona, esto para aportar en su sistema de economía popular y solidaria mediante el cual está constituido el cliente.

Tabla E.1*Costo de materiales mecánicos*

Unidad	Descripción	Unidad	Magnitud	Valor Unitario	Valor Total
1	Eje de acero AISI 1045 Ø=1.5in	m	0,420	\$111,9	\$46,99
1	Lamina de acero ASTM A36 3mm	Kg	214,96	\$0,98	\$210,66
1	Perfil rectangular 150x100x1.5	m	6	\$12,62	\$12,62
4	Perfil redondo acero inox Ø=5 in	m	0,4	\$12,18	\$30,47
1	Varilla corrugada Ø=1/2 in	m	6	\$5,20	\$5,20
1	Válvula de globo de acero galvanizado Ø=3/4 in	-	ítem	\$4,20	\$4,20
1	Neplo 4 in Ø=3/4 in	-	ítem	\$2,14	\$2,14
Subtotal 1				\$281.37	

Tabla E.2*Costo de materiales electrónicos*

Unidad	Componentes Electrónicos	Precio Unitario	Precio Total
2	Termocupla Tipo K Tipo	\$10,00	\$20,00
2	Modulo Max6675	\$5,3739	\$10,75
1	Raspberry Pi 4 4gb Basic Kit	\$127,14	\$127,14
1	Sensor Mpx5500	\$38,50	\$38,50
2	Modulo Mq-9	\$4,529	\$9,06
1	Modulo Mq-135	\$3,50	\$3,50
2	Baterías Lipo 2s 7.6v 850mah	\$20,00	\$40,00

1	Cargador De Batería Lipo 2s	\$12,00	\$12,00
1	10 M Cable Utp		\$3,13
1	Metro Termoencogible 10mm	\$0,39	\$0,39
1	Metro Termoencogible 30mm	\$1,04	\$1,04
1	Metro Termoencogible 5mm	\$0,22	\$0,22
1	Tubo Estaño	\$1,30	\$1,30
1	Caja Plástica	\$3,04	\$3,04
		Subtotal 2	\$269,32

Tabla E.3*Costo manufactura de máquinas herramientas*

Horas	Máquina	\$/Hora	Valor Total
3	Torno	\$2.25	\$6,75
1	Torno CNC	\$6	\$6
8	Horno de tratamiento térmico	\$1.25	\$10
		Subtotal 3	\$22,75

Tabla E.4*Costo por tratamiento térmico*

Cantidad	Descripción	Unidad	Precio Unitario	Valor Total
1	Carbonitrurado	Kg	\$7	\$7
1	Temple	Kg	\$6,25	\$6,25
		Subtotal 4		\$13,25

Tabla E.5*Costo mano de obra*

Cantidad	Descripción	Días - Hombre	\$/Día	Valor Total
1	Maestro Mecánico	8	\$25	\$200
1	Técnico Electrónico	8	\$30	\$240
Subtotal 5				\$440

El costo total directo, es la suma de cada uno de los ítems ya mencionados y se los puede resumir en la siguiente tabla.

Tabla E.6*Costos directos*

Descripción	Costo \$
Subtotal 1	\$281,37
Subtotal 2	\$269,32
Subtotal 3	\$22,75
Subtotal 4	\$13,25
Subtotal 5	\$440,00
Total, Costos Directos	\$1026,69

El valor total de nuestro trabajo de titulación asciende a \$1026.69 el cual, es el valor de toda la construcción mecánica del proyecto y sus componentes electrónicos, cabe indicar que el valor de manufactura del horno se podría recalcular al contar con otros proveedores y ubicaciones. El cual es un valor que justifica nuestra propuesta tecnológica, dado que si deseamos adquirir un equipo de similares características un proveedor ecuatoriano muestra un valor de asesoramiento en construcción por \$2500 y la implementación del equipo debería adaptarse al tipo de cultivo por lo que el valor podría multiplicarse.

Apéndice F.

Convenciones gráficas para la lectura del análisis modular

El análisis modular del horno Kon-Tiki, presentado en la Figura 2.2, Figura 2.3, Figura 2.4, se realizó siguiendo criterios de representación de la metodología VDI 2221 de diseño sistemático. Para su correcta interpretación se definen las siguientes convenciones gráficas:

Colores de los módulos

- Amarillo: Subsistema de control (ej. ubicación de biomasa, encendido, control de temperatura).
- Azul: Subsistema de enfriamiento y manejo de agua (ej. válvula de agua, filtrado de agua, almacenamiento).
- Verde: Subsistema de descarga y post-proceso (ej. drenaje, descarga giratoria, pesaje y almacenamiento).

Líneas de conexión

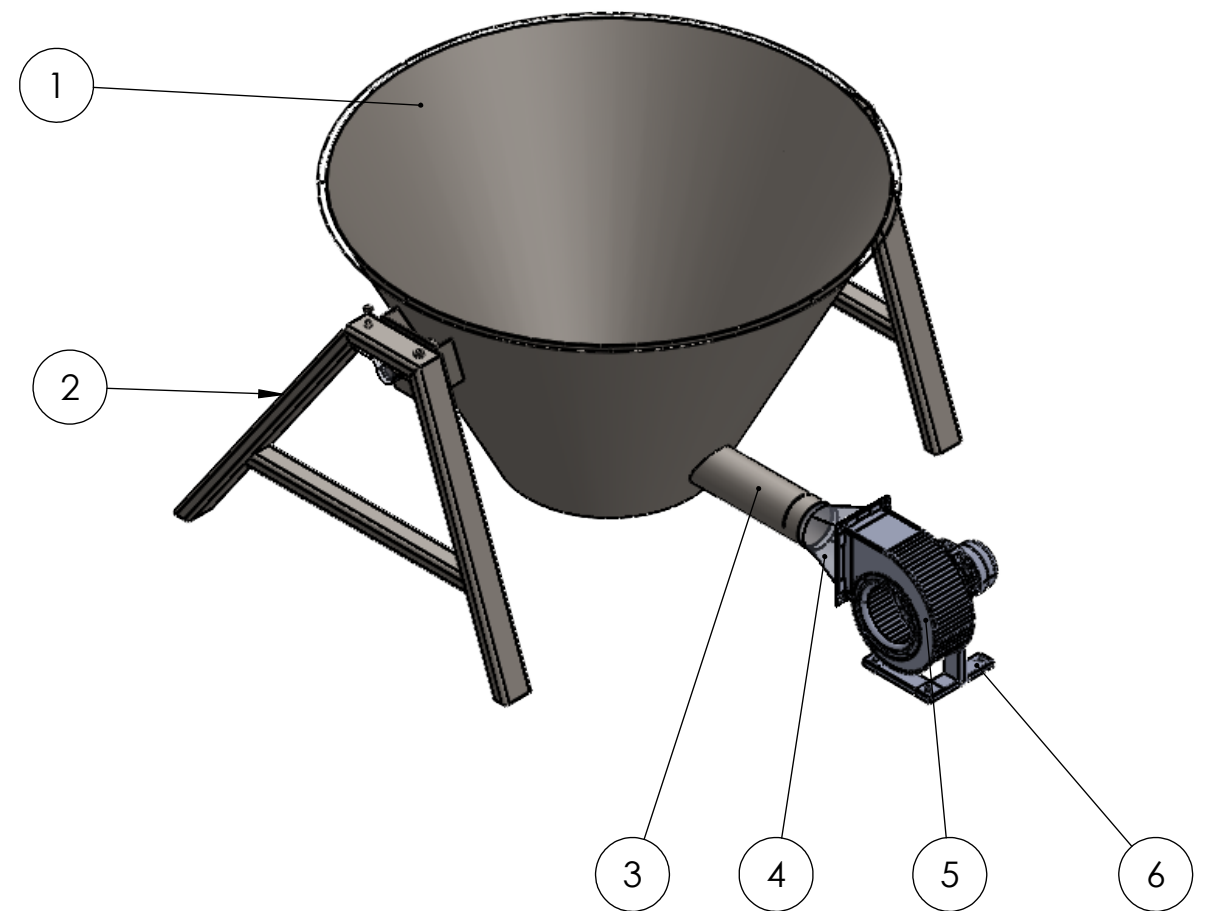
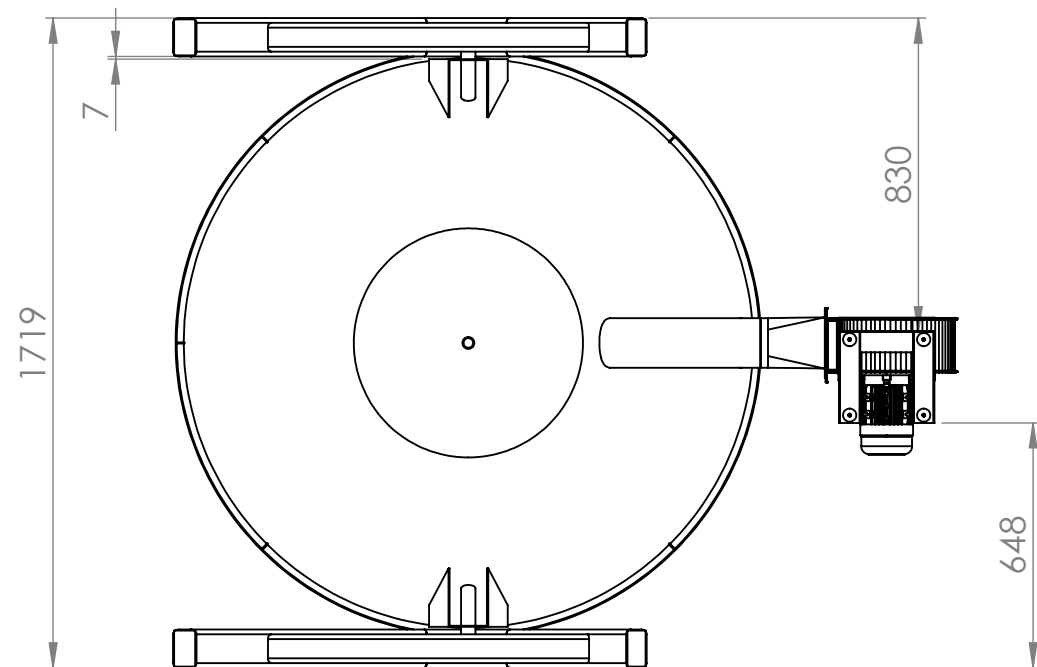
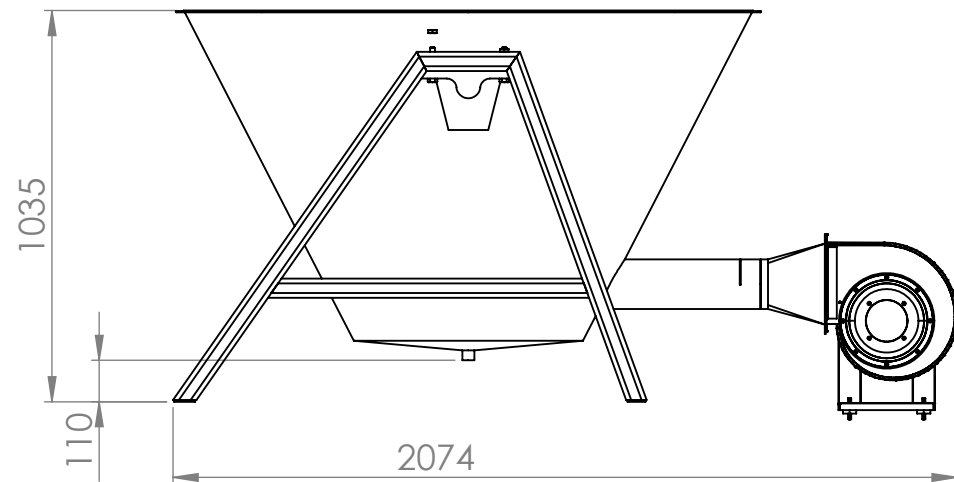
- Líneas continuas negras: Representan flujos de materia principal (biomasa, biochar).
- Líneas continuas azules: Representan flujos de agua y líquidos en el sistema.
- Líneas discontinuas rojas: Representan flujos de energía/calor hacia los módulos.
- Líneas discontinuas azules: Representan información/sensado (datos de sensores como termopares, caudalímetros).

Estructura jerárquica

- Nivel cero: Función global del sistema (Producir biochar).
- Nivel uno: División en módulos principales (control, enfriamiento, descarga).
- Nivel dos: Desglose de cada módulo en funciones específicas (ej. filtrado de agua, encendido, drenaje).

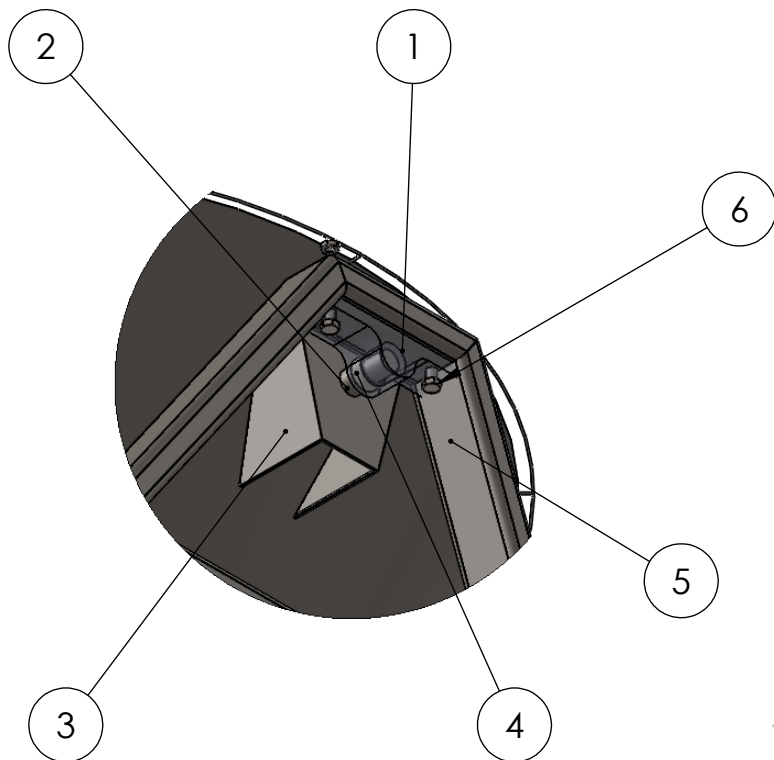
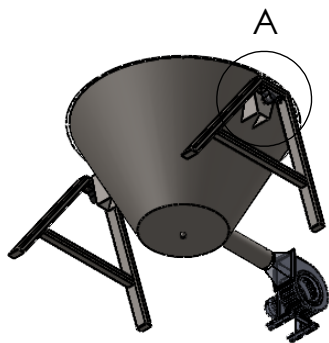
Apéndice G.

Planos



Número	Cantidad	Descripción	Material
1	1	Cámara de combustión	ASTM A36
2	1	Estructura	ASTM A36
3	1	Entrada de aire	Acero galvanizado
4	1	Adaptador de entrada	Acero galvanizado
5	1	Ventilador	Datasheet
6	1	Soporte de ventilador	Acero galvanizado

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		espol			
		NOMBRE		FIRMA		FECHA				TÍTULO:	
DIBUJ.		Daniel Gálvez								Plano general	
VERIF.											
APROB.		Ing. Marcelo Fajardo									
FABR.		Ing. Diego Chango									
CALID.						MATERIAL:		N.º DE DIBUJO			
						Varios		Ensamble general			
								A3			



DETALLE A
ESCALA 1 : 10

Número	Cantidad	Descripción	Material
1	2	Chumacera 3/4 in	Hierro fundido
2	2	Eje de giro	AISI 1045
3	2	Soporte de movilidad	ASTM A36
4	2	Rodamineto 3/4 in x 50	Datasheet
5	2	Estructura	ASTM A36
6	4	Tornillo M16	Acero aleado

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

espol

NOMBRE	FIRMA	FECHA
DIBUJ. Daniel Gálvez		
VERIF.		
APROB. Ing. Marcelo Fajardo		
FABR. Ing. Diego Chango		
CALID.		

TÍTULO:

Detalle de
ensamble de eje

N.º DE DIBUJO

Ensamble general

A4

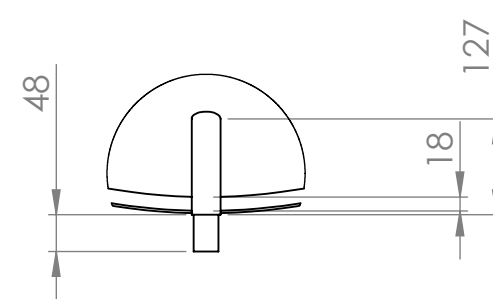
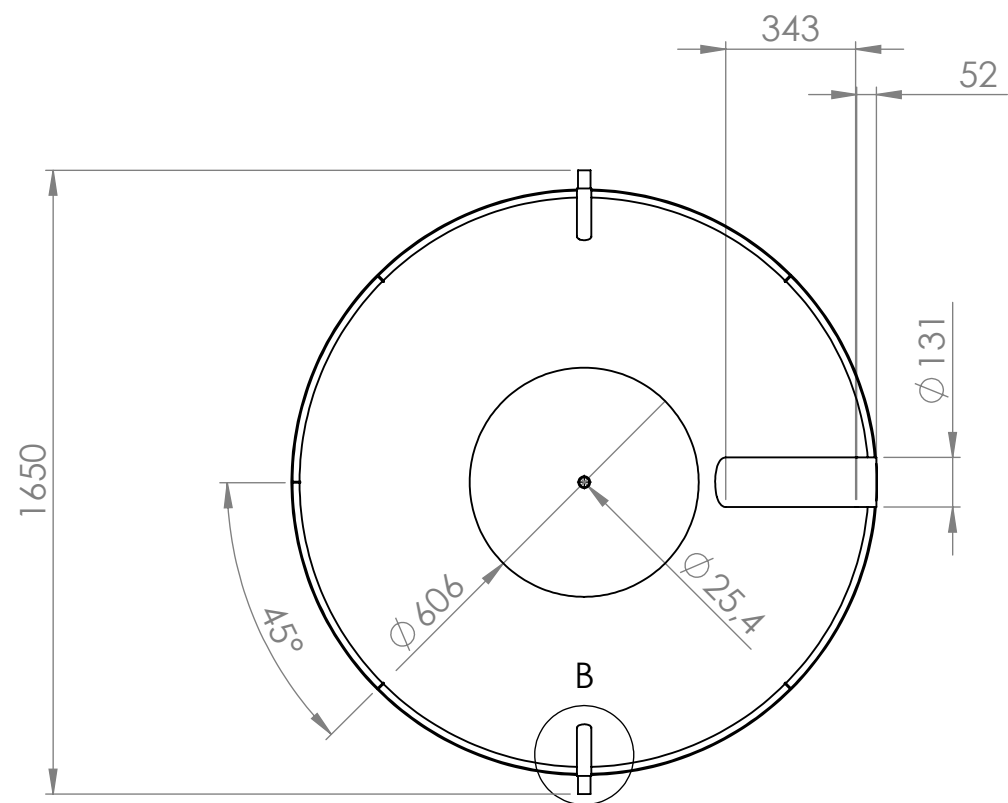
MATERIAL:

Acero

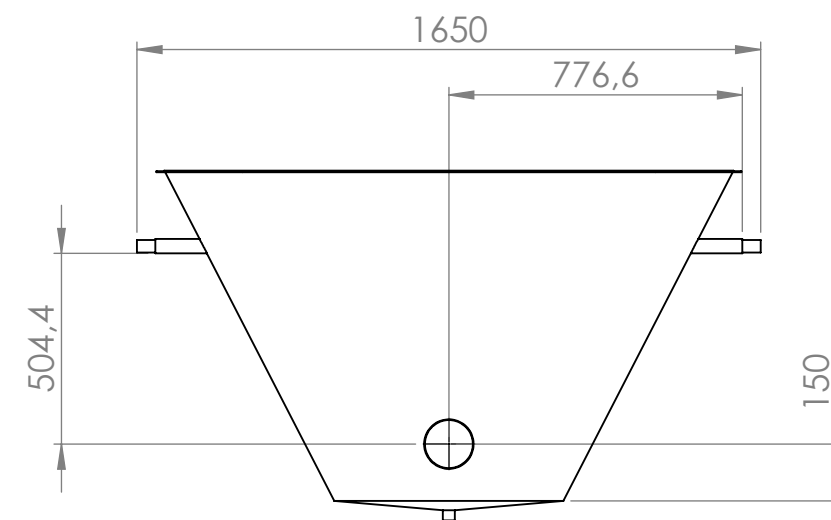
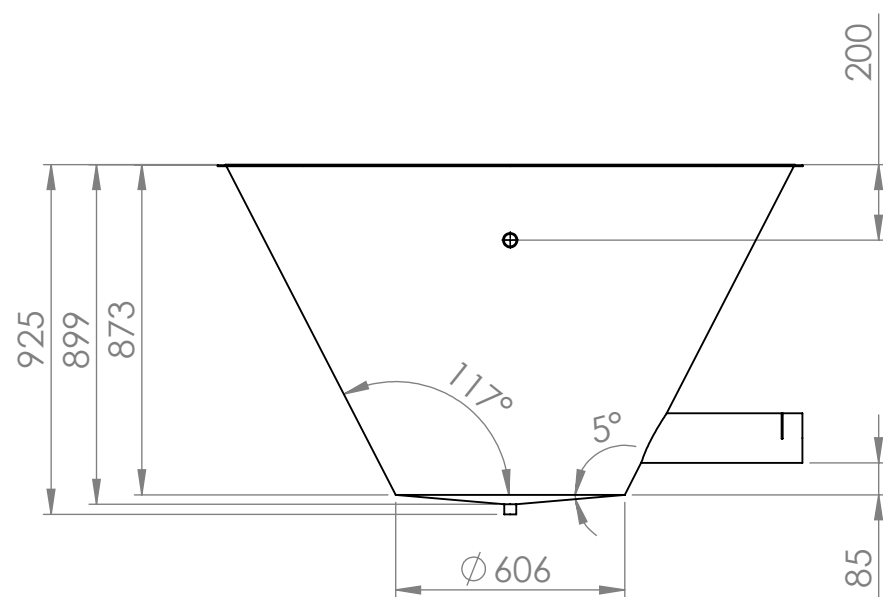
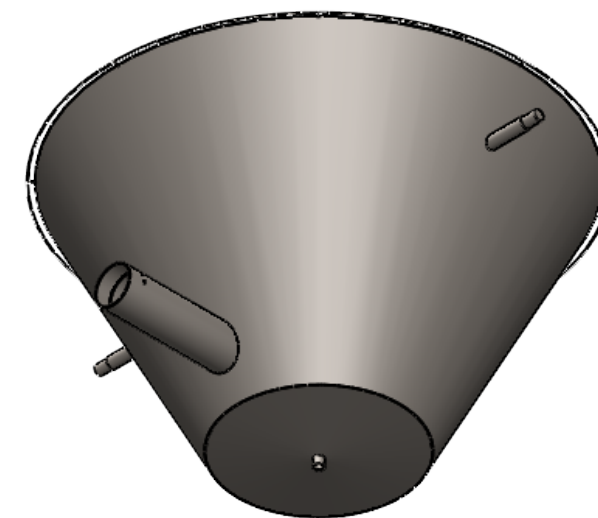
PESO:

ESCALA:1:50

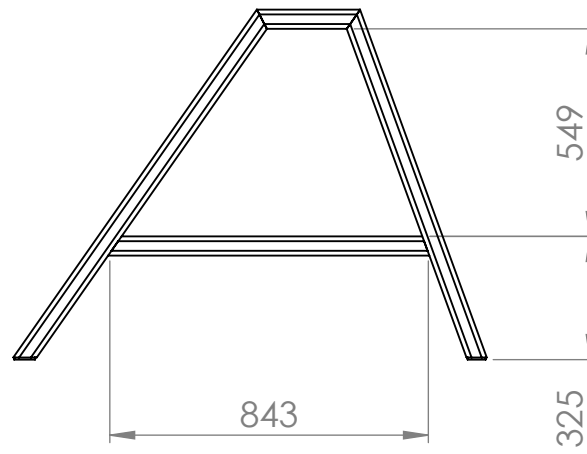
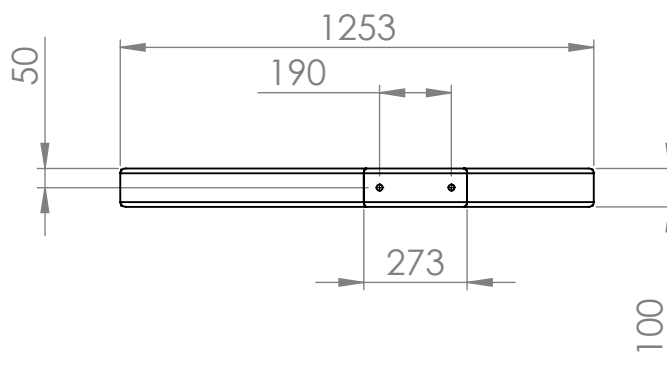
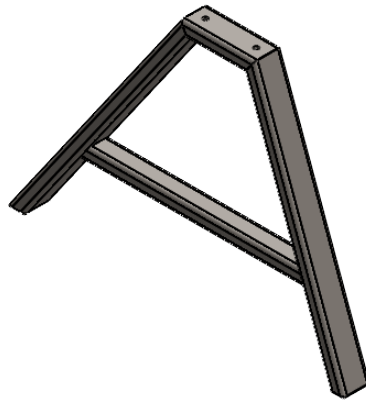
HOJA 2 DE 7



DETALLE B
ESCALA 1 : 10



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:				ACABADO:		REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		espol	
	NOMBRE	FIRMA	FECHA					TÍTULO:	Cámara de combustión
DIBUJ.	Daniel Gálvez								
VERIF.									
APROB.	Ing. Marcelo Fajardo								
FABR.	Ing. Diego Chango								
CALID.				MATERIAL:				N.º DE DIBUJO	A3
				Acero					
				PESO: 268.7 Kg				ESCALA:1:20	HOJA 3 DE 7



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

espol

TÍTULO:

Estructura

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.	Daniel Gálvez				
VERIF.					
APROB.	Ing. Marcelo Fajardo				
FABR.	Ing. Diego Chango				
CALID.					

MATERIAL:

ASTM A36

N.º DE DIBUJO

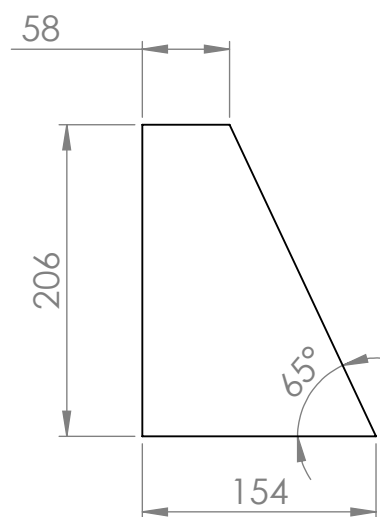
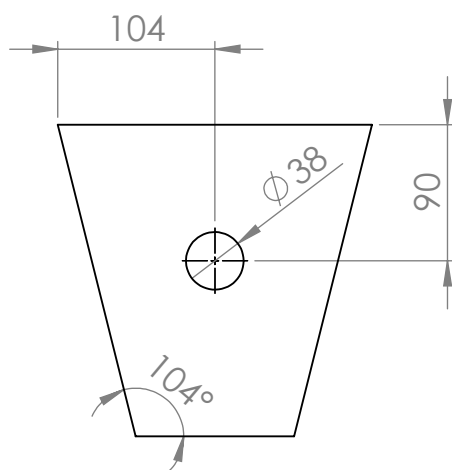
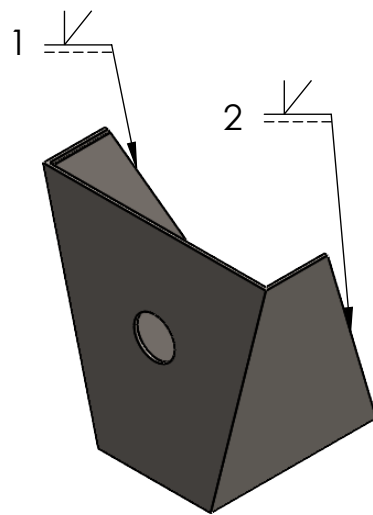
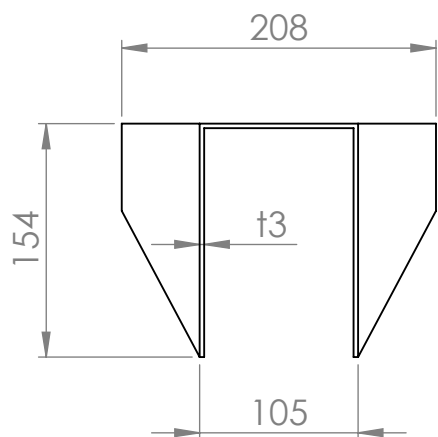
Soporte.

A4

PESO: 45.84 Kg

ESCALA:1:20

HOJA 4 DE 7



Soldaduras

Número	Tipo	Electrodo
1	Esquina	6011
2	Esquina	6011

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
ACABADO SUPERFICIAL:
TOLERANCIAS:
LINEAL:
ANGULAR:

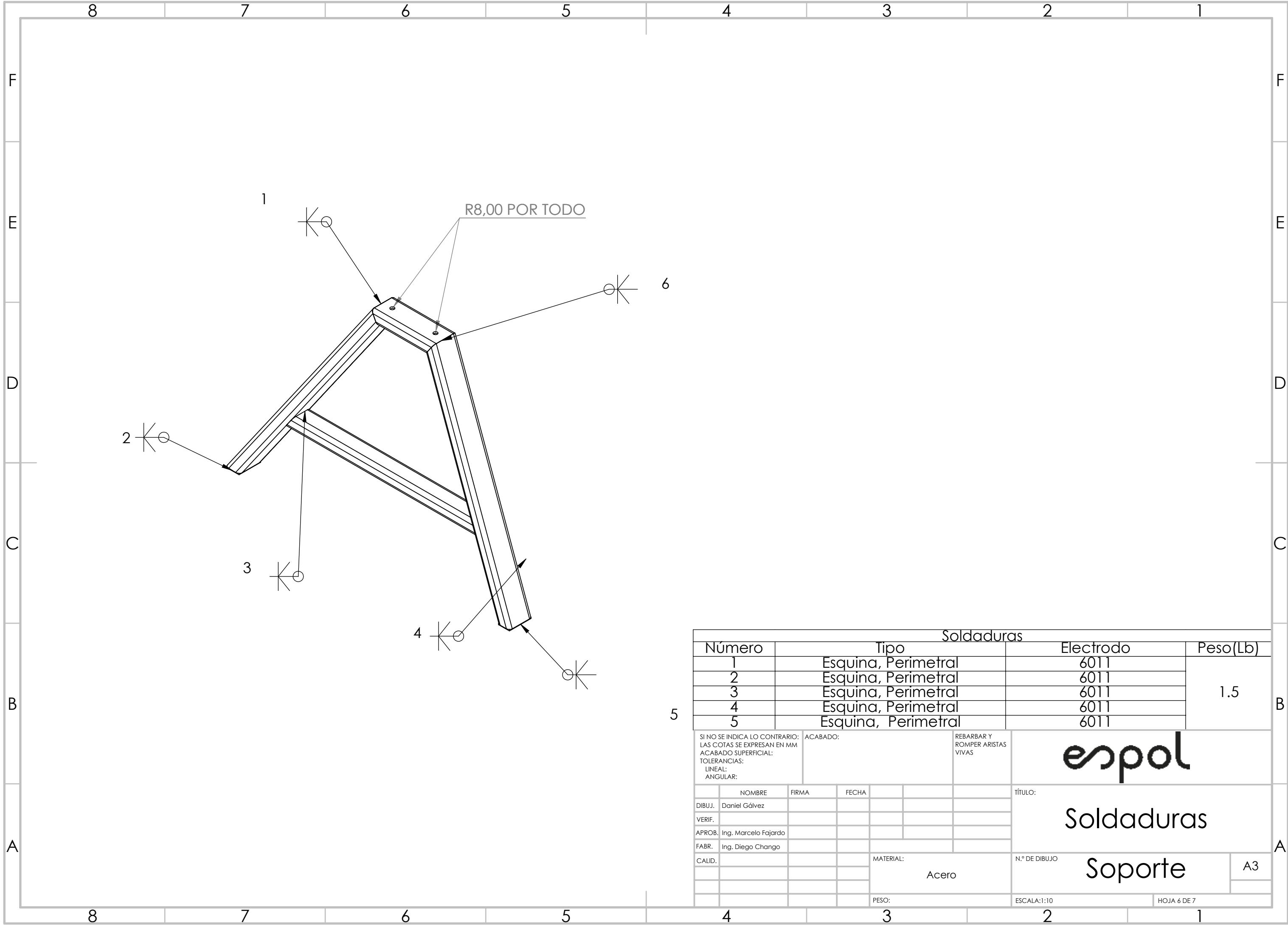
ACABADO:

REBARBAR Y
ROMPER ARISTAS
VIVAS

espol

NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ. Daniel Gálvez				
VERIF.				
APROB. Ing. Marcelo Fajardo				
FABR. Ing. Diego Chango				
CALID.				

TÍTULO:	Soporte eje
N.º DE DIBUJO	Soporte eje
	A4
PESO: 1.76 Kg	ESCALA: 1:5
	HOJA 5 DE 7



Soldaduras									
Número		Tipo				Electrodo		Peso(Lb)	
1		Esquina, Perimetral				6011		1.5	
2		Esquina, Perimetral				6011			
3		Esquina, Perimetral				6011			
4		Esquina, Perimetral				6011			
5		Esquina, Perimetral				6011			
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:			REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS		espol Soldaduras Soporte	
NOMBRE		FIRMA		FECHA		TÍTULO:			
DIBUJ. Daniel Gálvez						N.º DE DIBUJO			
VERIF.									
APROB. Ing. Marcelo Fajardo									
FABR. Ing. Diego Chango									
CALID.				MATERIAL: Acero		ESCALA:1:10		A3	
				PESO:		HOJA 6 DE 7			



