



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



PROPUESTA DE CALEFACTOR A PELLETS DE NUEVO TIPO

POR

Maximiliano Enrique Rosas Alarcón

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
Dra. Einara Blanco Machin

Marzo 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Maximiliano Enrique Rosas Alarcón

© 2023 Maximiliano Enrique Rosas Alarcón

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Resumen

En Chile el 75,95% de los hogares que son calefaccionados utilizan como combustible la leña, lo cual presenta una problemática ambiental, puesto que, principalmente no se utiliza leña o calefactores certificados lo que conlleva a una elevada tasa de liberación de material particulado y contaminantes al ambiente. Una alternativa a los calefactores de combustión lenta de leña son los calefactores a combustión de pellet de madera, los cuales presentan altas prestaciones que permiten al usuario programar el encendido del calefactor, ajustar la temperatura de la habitación en donde se encuentre instalado el calefactor y además, su eficiencia es mayor comparándola con los calefactores de combustión lenta; sin embargo, los calefactores a pellet que se encuentran disponibles en el mercado presentan un alto valor comercial y es imprescindible el uso de la electricidad para su funcionamiento.

El presente proyecto presenta dos modelos de calefactor a combustión de pellet no eléctricos, dichos modelos son de encendido manual y prescinden de componentes eléctricos, lo que permite obtener un equipo de calefacción con menor costo de fabricación. El modelo seleccionado para la fabricación y posterior prueba utiliza un sistema de carga de combustible por gravedad, en donde el pellet se carga por la tolva y es llevado mediante un ducto hasta el quemador principal de la cámara de combustión; en dicha cámara, se encuentra el quemador principal, secundario y el colector de cenizas. Además, el calefactor presenta un ducto en forma de W, que permite un mayor intercambio de calor hacia la habitación, con respecto a un ducto convencional de forma recta vertical.

Una vez fabricado el calefactor se realizaron las pruebas de funcionamiento siguiendo la Norma Chilena NCh 3282, de esta manera se registró la temperatura interior del calefactor en distintos puntos, temperatura superficial de cada uno de los componentes y el análisis de los gases de combustión del calefactor.

Finalmente, se determinó que la configuración óptima del calefactor se obtiene al instalar un ducto de evacuación de gases 80 milímetros y regulando la entrada de aire a la cámara de combustión; de esta manera se presenta un consumo de combustible de 1,5 kilogramos por hora y una eficiencia de 82,14% con una potencia nominal térmica de 7 kilowatts.

Palabras clave: Calefactor, pellet, potencia térmica, rendimiento.

Abstract

In Chile, 75.95% of the homes that are heated use firewood as fuel, which presents an environmental problem, mainly because, firewood or certified heaters are not used, which leads to a high rate of release of particulate matter and contaminants to the environment. An alternative to wood-burning stoves is wood pellet stoves, which have high features that allow the user to program the ignition of the heater and adjust the temperature of the room where the heater is installed, efficiency is higher compared to wood-burning stoves; however, the pellet heaters that are available on the market have a high commercial value and the use of electricity is essential for their operation.

The present project, two models of non-electric pellet stoves are presented these models are manual ignition and do not use electrical components, which allows for obtaining heating equipment with lower manufacturing costs. The model selected for manufacturing and subsequent testing presents a gravity feed fuel system, where the pellets are loaded through the hopper and taken through a duct to the main burner of the combustion chamber; In the said chamber, there are the primary and secondary burners and the ash collector. In addition, the heater features a W-shaped duct, which allows greater heat exchange to the room, compared to a conventional straight vertical duct.

Once the stove was manufactured, the functional tests were carried out following the Chilean Standard NCh 3282, in this way, the interior temperature of the stove was recorded at different points, the surface temperature of each of the components, and the analysis of the combustion gases of the stove.

Finally, it was determined that the optimal configuration of the heater is obtained by installing an 80-millimeter gas evacuation duct and regulating the air intake to the combustion chamber; In this way, a fuel consumption of 1,5 kilograms per hour and an efficiency of 82,14% are presented with a nominal thermal power of 7 kilowatts.

Keywords: Efficiency, pellet, thermal power, stove.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Consideraciones de diseño.....	2
1.4 Metodología.....	3
2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico	4
2.1 Calefacción de la vivienda en Chile	4
2.2 Pellet de madera.....	5
2.3 Calefactor a combustión de pellet de madera.....	6
2.4 Componentes de una estufa a pellet	8
2.5 Temperatura al interior del calefactor	12
3 CAPÍTULO 3: Diseño.....	14
3.1 Modelo 1	14
3.2 Modelo 2.....	19
3.3 Quemadores	24
3.4 Selección del diseño	27
4 Capítulo 4: Fabricación	28
5 Capítulo 5: Mediciones y cálculos	31
5.1 Combustible.....	31
5.2 Mediciones.....	31
5.3 Cálculo de rendimiento.....	36
5.4 Periodos de ensayo	38
6 Capítulo 6: Resultados	41
6.1 Ensayo de verificación de funcionamiento.....	41
6.2 Ensayo ducto chimenea de 6 pulgadas	43
6.3 Ensayo ducto chimenea de 80 milímetros	51
Referencias	64

Lista de Tablas

Tabla 1.1: Límites de emisión según potencia (Fuente [6])	2
Tabla 2.1: Clasificación del pellet según norma NCh ISO 177225-2 (Fuente: [9])	5
Tabla 2.2: Especificaciones del pellet de madera clasificado para aplicaciones domiciliarias (Fuente: [9])	5
Tabla 2.3: Especificaciones de diferentes estufas a pellet no eléctricas disponibles en el mercado	6
Tabla 2.4: Especificaciones de calefactores no eléctricos de origen estadounidense	7
Tabla 2.5: Especificaciones de diferentes estufas a pellet eléctricas disponibles en el mercado .	8
Tabla 5.1: Especificaciones del pellet Innapel y Ecomas	31
Tabla 5.2: Análisis elemental del pellet de madera de pinus radiata [19]	31
Tabla 6.1: Mediciones obtenidas del ensayo de verificación de funcionamiento	41
Tabla 6.2: Pérdidas térmicas obtenidas del ensayo de verificación de funcionamiento	42
Tabla 6.3: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.9	47
Tabla 6.4: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.10	48
Tabla 6.5: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.11	48
Tabla 6.6: Pérdidas térmicas en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas	49
Tabla 6.7: Porcentaje de rendimiento promedio y perdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas	50
Tabla 6.8: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.18	55
Tabla 6.9: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.19	55
Tabla 6.10: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.20	56
Tabla 6.11: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.21	57
Tabla 6.12: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.22	58
Tabla 6.13: Registro del nivel de combustible al interior de la tolva durante el ensayo del calefactor con ducto de 80 milímetros	58
Tabla 6.14: Pérdidas térmicas en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros	59
Tabla 6.15: Porcentaje de rendimiento promedio y perdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros	¡Error! Marcador no definido.

Lista de Figuras

Figura 2.1: Porcentaje de combustibles utilizados para calefacción a nivel nacional en el 2018 (Fuente: [1])	4
Figura 2.2: Modelos de calefactores no eléctricos disponibles en el mercado nacional	6
Figura 2.3: Modelos de calefactores a pellet no eléctricos disponibles en el mercado internacional	7
Figura 2.4: Modelos de calefactores eléctricos disponibles en el mercado nacional	8
Figura 2.5: Sistema de alimentación de barrena en estufa a combustión de pellet (Fuente: [10])	9
Figura 2.6: Sistema de alimentación por gravedad en estufa a combustión de pellet (Fuente: [11])	10
Figura 2.7: Tipos de quemadores en estufas a pellet (Fuente: [15])	11
Figura 2.8: Quemador tipo placa	11
Figura 2.9: Colector de cenizas de una estufa a pellet (Fuente: [16])	12
Figura 2.10: Componentes de estufa a pellet y posición de las termocuplas (Fuente: [17])	12
Figura 2.11: Temperatura de combustión al interior de calefactor a pellet (Fuente: [17])	13
Figura 3.1: Diseños conceptuales de los calefactores	14
Figura 3.2: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 1	15
Figura 3.3: Cámara de combustión del modelo 1	16
Figura 3.4: Propuesta de templador para la cámara de combustión del modelo 1	16
Figura 3.5: Vista en corte del modelo 1	17
Figura 3.6: Cubiertas de la cámara de combustión del modelo 1	17
Figura 3.7: Dimensiones de los componentes de la cubierta del modelo 1 del calefactor	18
Figura 3.8: Propuesta de la puerta de la cámara de combustión del modelo 1	18
Figura 3.9: Dimensiones de la puerta del modelo 1 del calefactor	19
Figura 3.10: Componentes del sistema de alimentación del modelo 2	20
Figura 3.11: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 2	20
Figura 3.12: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 2	21
Figura 3.13: Entrada de aire primario a la cámara de combustión	21
Figura 3.14: Sistema de bloqueo de entrada de aire para la cámara de combustión	22
Figura 3.15: Ducto de gases de combustión	23
Figura 3.16: Puerta de la cámara de combustión del modelo 2	24
Figura 3.17: Diseño de quemador cilíndrico	25
Figura 3.18: Diseño de quemador rectangular	25
Figura 3.19: Diseño de quemador tipo canasta	26
Figura 3.20: Quemador de placa plana	26
Figura 3.21: Dimensiones principales del quemador de tipo placa plana	27
Figura 4.1: Fabricación de la cámara de combustión y entrada de aire primaria	28
Figura 4.2: Montaje de ducto de alimentación de combustible y evacuación de gases a la cámara de combustión	29

Figura 4.3: Elementos fijados por soldadura del calefactor a pellet no eléctrico.....	29
Figura 4.4: Unión apernada de la tolva de almacenamiento con el ducto de alimentación de combustible	30
Figura 4.5: Modelo 2 de calefactor a pellet no eléctrico terminado	30
Figura 5.1: Equipos utilizados para la medición de temperatura y análisis de gases.....	32
Figura 5.2: Puntos de medición de temperatura y análisis de gases.....	33
Figura 5.3: Cámara térmica Fluke RSE 300	34
Figura 5.4: Cámara termográfica Testo 872	34
Figura 5.5: Graduación interna de la tolva de almacenamiento de combustible para la estimación del consumo	35
Figura 5.6: Constituyentes combustibles en los residuos del calefactor.....	35
Figura 5.7: Encendido del calefactor asistido por llama de gas butano-propano.....	40
Figura 6.1: Calefactor en ensayo de verificación de funcionamiento.....	41
Figura 6.2: Ducto de evacuación de gases de combustión durante ensayo de verificación de funcionamiento	42
Figura 6.3: Calefactor con ducto de evacuación de gases de 6 pulgadas	43
Figura 6.4: Variación de temperatura en los humos según la apertura de la entrada de aire en la cámara de combustión	44
Figura 6.5: Temperatura ambiente a 1 metro de distancia del calefactor.....	44
Figura 6.6: Concentración de monóxido de carbono en salida de gases de combustión de 6 pulgadas.....	45
Figura 6.7: Extracto del gráfico de concentración de monóxido de carbono	45
Figura 6.8: Concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la salida de gases de 6 pulgadas	46
Figura 6.9: Termografía completa del calefactor en funcionamiento	47
Figura 6.10: Termografía de la cámara de combustión y entrada de aire	47
Figura 6.11: Termografía de la tolva de almacenamiento de combustible y cubierta de los ductos de gases de combustión	48
Figura 6.12: Rendimiento y perdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas	49
Figura 6.13: Potencia térmica total del calefactor con un ducto de evacuación de gases de 6 pulgadas.....	50
Figura 6.14: Calefactor con ducto de evacuación de gases de 80 milímetros	51
Figura 6.15: Variación de la temperatura en la salida del quemador y en los humos según el porcentaje de apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.....	52
Figura 6.16: Temperatura ambiente registrada a 1 metro de distancia del calefactor	52
Figura 6.17: Concentración de monóxido de carbono en salida de gases de combustión de 80 milímetros	53
Figura 6.18: Concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la salida de gases de combustión de 80 milímetros	54
Figura 6.19: Termografía completa del calefactor en funcionamiento	54

Figura 6.20: Termografía del tubo evacuador de gases combustibles del calefactor	55
Figura 6.21: Termografía de la tolva de almacenamiento de combustible del calefactor	56
Figura 6.22: Termografía de la cámara de combustión y entrada de aire	57
Figura 6.23: Termografía del interior de los componentes internos de la cámara de combustión	57
Figura 6.24: Consumo de combustible durante el ensayo de calefactor con ducto de evacuación de gases de 80 milímetros.....	59
Figura 6.25: Rendimiento y pérdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros	60
Figura 6.26: Potencia neta del calefactor con salida de gases de combustión de 80 milímetros.	60

Glosario

A	:	Cenizas
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
B	:	
b	:	Porcentaje de masa de los constituyentes combustibles en el material que pasa a través de la parrilla y en el residuo con respecto a la masa de material residual
BD	:	Densidad a granel
b_{en}	:	Masa de constituyentes combustibles en los residuos
B_{fl}	:	Masa de combustible para periodo de ensayo
C	:	Contenido de carbono del combustible
C_{pmd}	:	Capacidad calorífica de los humos secos en las condiciones normalizadas
C_{pmH2O}	:	Calor específico del vapor de agua en condiciones normalizadas
C_r	:	Contenido en carbono de los residuos que pasan a través de la parrilla con respecto a la cantidad de combustible de ensayo quemado
CO	:	Contenido de monóxido de carbono de los humos secos
CO ₂	:	Contenido de dióxido de carbono de los humos secos
D	:	Diámetro
DU	:	Durabilidad mecánica
F	:	Finos
H	:	Contenido de hidrógeno del combustible
H_u	:	Poder calorífico del combustible
L	:	Longitud
MP	:	Material particulado
NCh	:	Norma Chilena
P_n	:	Potencia térmica neta
ppm	:	Partes por millón
R	:	Porcentaje de masa de residuos con respecto a la masa de combustible quemado en el periodo de ensayo
R_{en}	:	Masa de cenizas del periodo de ensayo
Q	:	Poder calorífico neto
Q_a	:	Pérdidas por calor sensible específico en los humos
Q_b	:	Pérdidas por calor latente en los humos
Q_r	:	Pérdidas térmicas a través de los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla
q_a	:	Porcentaje de pérdidas por calor sensible específico en los humos con respecto al poder calorífico del combustible
q_b	:	Porcentaje de pérdidas por calor latente en los humos con respecto al poder calorífico del combustible

q_r	:	Porcentaje de pérdidas térmicas a través de los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla con respecto al poder calorífico del combustible
t_a	:	Temperatura de los humos
t_b	:	Intervalo de duración mínimo de recarga para el calefactor
t_r	:	Temperatura de referencia del ambiente
W	:	Humedad del combustible

Letras griegas

α	:	Ángulo de reposo
β	:	Ángulo de inclinación
η	:	Rendimiento

CAPÍTULO 1: Introducción

En el siguiente documento se presenta el estudio de la propuesta de un calefactor a pellet no eléctrico de nuevo tipo.

1.1 Contexto

En la actualidad en Chile se disponen de diversos sistemas de calefacción, existiendo una extensa gama de tecnologías y combustibles utilizados; en donde se destaca el uso de leña como combustible de calefacción; siendo ocupada a nivel nacional en un 75,95 % de los hogares [1]. Sin embargo, la utilización de este combustible presenta elevadas concentraciones de contaminantes y material particulado, las cuales se liberan al ambiente y empeoran la calidad del aire, esto genera que se creen alertas y emergencias ambientales, las cuales limitan en las comunas el uso de estufas a leña en diferentes rangos horarios [2].

Es por lo que, actualmente se ha impulsado la utilización de nuevas tecnologías como las estufas a combustión de pellet, puesto que presentan un menor índice de emisiones y un mayor poder calorífico que la leña [3]. Sin embargo, las estufas a pellet presentan un mayor valor en su adquisición e instalación que una estufa a leña, además estas estufas presentan componentes electrónicos, los cuales requieren mantenciones periódicas específicas y conexión eléctrica a la red domiciliaria.

Tomando en consideración lo anteriormente señalado, se propone el diseño de un calefactor a pellet de nuevo tipo, el cual no requerirá de componentes eléctricos para su funcionamiento, disminuyendo de esta manera el valor en su fabricación y un menor número de mantenciones en su funcionamiento.

1.2 Objetivo

Construir un prototipo de calefactor a pellet no eléctrico y realizar una evaluación inicial de su funcionamiento.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analizar los diversos modelos de calefactores a pellets eléctricos y no eléctricos disponibles en el mercado.
- Diseñar un sistema de calefacción a pellet no eléctrico.
- Construir el modelo de calefactor a pellet seleccionado.
- Verificar la eficiencia energética del modelo fabricado.

1.3 Consideraciones de diseño

A continuación, se presentan ciertas consideraciones de diseño que se deben tener presentes al momento de la fabricación del calefactor a pellet no eléctrico.

Se debe tener en consideración que el calefactor deberá calefaccionar una vivienda con una superficie edificada de al menos 47 metros cuadrados [4]. Además, el calefactor deberá cumplir con los estándares de emisión de material particulado y rendimiento según lo indicado en la **Tabla 1.1**.

Tabla 1.1: Estándares de emisión de material particulado y rendimiento según potencia (Fuente [5] [6])

Clasificación	Potencia Térmica Nominal (kW)	Emisión de MP (g/h)	Rendimiento (%)
Media Potencia	Menor o igual a 8	2,5	Mayor a 80
Alta Potencia	Mayor a 8 y menor o igual a 14	3,5	Mayor a 85

Además, en cuanto a las emisiones de monóxido de carbono para las estufas a pellets, se deberán ser calculadas al 13% del contenido de oxígeno en los humos, en donde la concentración media de monóxido de carbono debe ser menor o igual que 0,04% (500 mg/m³) a la potencia térmica nominal y del 0,06% (750 mg/m³) a la potencia térmica reducida [7].

1.3.1 Componentes del calefactor

A continuación, se presentan los componentes principales con los que deberá contemplar el calefactor y sus consideraciones de diseño [7]:

- **Cámara de combustión:** Componente del calefactor en donde se lleva a cabo la combustión.
- **Quemador:** Recipiente que forma parte de la cámara de combustión del calefactor, en donde se queman los pellets que son surtidos desde la tolva de combustible
- **Tolva de combustible:** Almacén de combustible desde donde se surte el combustible al quemador.

La tolva de combustible debe tener una capacidad tal que permita el funcionamiento a la potencia térmica reducida durante 6 horas como mínimo y a la potencia térmica nominal durante 3 horas como mínimo.

- **Conducto de humos de combustión:** Componente por los cuales se evacúan los gases de combustión producidos por la cámara de combustión, hacia el exterior del recinto.

El conducto de humos de combustión en su dimensión mínima no debe ser menor a 40 milímetros y debe ser posible limpiar completamente los conductos de humos con cepillos o herramientas disponibles comercialmente.

- Puerta de la cámara de combustión: Componente que proporciona acceso a la cámara de combustión.

La puerta de la cámara de combustión debe estar diseñada de una manera que se evite la apertura accidental y que se facilite el cierre seguro.

- Colector de cenizas: Cámara diseñada para recibir los residuos provenientes del quemador.

El colector de cenizas deberá ser capaz de contener al menos las cenizas procedentes de 12 horas de funcionamiento del calefactor a la potencia térmica nominal.

- Superficies activas: Superficies del artefacto que permiten la transferencia de calor hacia el recinto.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación, en primer lugar, se realizará un estudio bibliográfico acerca de diversos sistemas de calefacción, tales como, calefactores a combustión de leña, combustión de pellet eléctricos y prototipos de calefactores a pellet no eléctricos, para así determinar las condiciones básicas del diseño del calefactor.

Luego, se deberá calcular la potencia necesaria para calefaccionar la vivienda determinada. De esta manera se tendrán las condiciones necesarias para realizar el modelo y simulación del proceso de combustión del calefactor a pellet. Una vez simulado el proceso de combustión se determinará la eficiencia teórica del sistema.

Se realizará un diseño de calefactor tomando en consideración los componentes principales del calefactor, luego se deberán confeccionar los planos necesarios para realizar el proceso de fabricación. Durante el proceso de fabricación se confeccionarán cada uno de los componentes y luego se ensamblarán, para finalmente realizar pruebas de operación controladas del calefactor a pellet no eléctrico.

Finalmente, una vez que el calefactor ya esté fabricado y en funcionamiento se realizarán mediciones con el fin de comparar la eficiencia térmica calculada y la obtenida mediante mediciones.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

En este capítulo se establecen las bases teóricas y definiciones críticas que son esenciales para comprender el proyecto, las siguientes interrogantes y puntos clave serán resueltos en esta sección:

2.1 Calefacción de la vivienda en Chile

La calefacción es un elemento fundamental para el confort y calidad de vida en una vivienda; en donde hoy existen diversos sistemas dependiendo de la potencia necesaria, el presupuesto del grupo familiar y la zona geográfica en la que habiten. Se distinguen 6 tipos de combustibles que son utilizados para la calefacción domiciliaria, los cuales corresponden a gas natural, gas licuado de petróleo, electricidad, leña, parafina y pellet de madera [1]. A continuación, en la **Figura 2.1** se presenta el porcentaje de utilización de los combustibles para la calefacción domiciliaria a nivel nacional.

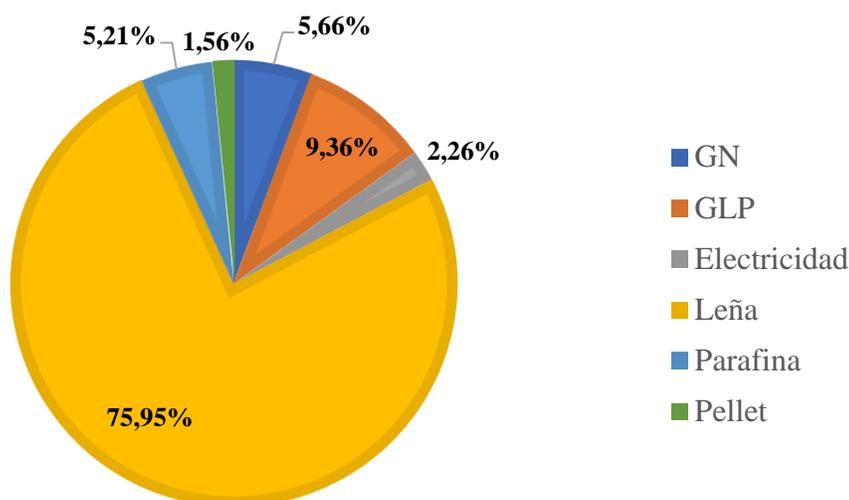


Figura 2.1: Porcentaje de combustibles utilizados para calefacción a nivel nacional en el 2018 (Fuente: [1])

En el gráfico de la **Figura 2.1** se muestra que el combustible más utilizado a nivel nacional es la leña con un 75,95% y el menor uso corresponde al pellet de madera con un 1,56%. Sin embargo, el consumo de pellet de madera ha aumentado exponencialmente, puesto que presenta mayores ventajas y prestaciones que la leña al ser un combustible con distribución certificada y estandarizada, presenta un mayor poder calorífico y menor porcentaje de humedad, facilidad de transporte y almacenamiento en el hogar.

2.2 Pellet de madera

El pellet de madera es un combustible de biomasa con forma cilíndrica que puede variar su grosor y largo según su aplicación. Este biocombustible se obtiene a partir de los subproductos de la industria forestal, tales como aserrín, virutas o polvo de madera sin corteza, las cuales provienen principalmente del Pino Radiata [8]. En Chile el pellet de madera está normado bajo la norma NCh ISO 17225 parte 2 [9], la cual clasifica los pellets en 2 categorías y 6 subcategorías como se indica en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1: Clasificación del pellet según norma NCh ISO 17225-2 (Fuente: [9])

Clasificación del pellet según su uso	Subclasificación
Domiciliario	A1 – A2 – B
Industrial	I1 – I2 – I3

Estos tipos de subclasificaciones se diferencian principalmente en el origen de los productos para la generación del pellet y en los contenidos de cenizas y nitrógeno admitidos en la producción. Esta norma rige los parámetros físicos y químicos con los que debe cumplir el pellet producido, los cuales se indican en **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2: Especificaciones del pellet de madera clasificado para aplicaciones domiciliarias (Fuente: [9])

Clase de propiedad	Unidades	A1	A2	B
Diámetro, D	mm	D=6±1	D=6±1	D=6±1
		D=8±1	D=8±1	D=8±1
Longitud, L	mm	3,5<L ≤40	3,5<L ≤40	3,5<L ≤40
Humedad, M	%(m/m)	M≤10	M≤10	M≤10
Cenizas, A	%(m/m)	C≤0,7	C≤1,2	C≤2,0
Durabilidad mecánica, DU	%(m/m)	D≥97,5	D≥97,5	D≥96,5
Finos, F	%(m/m)	F≤1,0	F≤1,0	F≤1,0
Poder calorífico neto, Q	MJ/kg	Q≥16,5	Q≥16,5	Q≥16,5
	kWh/kg	Q≥4,6	Q≥4,6	Q≥4,6
Densidad a granel, BD	Kg/m ³	BD≥600	BD≥600	BD≥600

2.3 Calefactor a combustión de pellet de madera

En el mercado existen diversas marcas y modelos de calefactores a combustión de pellet de madera eléctricos, donde se destacan por sobre otros calefactores dada su tecnología de encendido automático a distancia, regulación de temperatura en la estancia instalada y eficiencia del combustible utilizado. Sin embargo, existen en el mercado calefactores a pellet no eléctricos los cuales no están certificados y no especifican una potencia de calefacción ni eficiencia energética.

Dentro de la gama de los calefactores no eléctricos nacionales se encuentran los de las empresas Ecopellet, Flameco y Llamica, los cuales presentan distintos modelos de cámara de combustión, ángulo de alimentación del quemador y tipo de quemador. En la **Figura 2.2** se presentan los diferentes modelos de dichos fabricantes y en la **Tabla 2.3** se indican las principales características de los calefactores a combustión de pellet no eléctricos disponibles en el mercado nacional.



a) Ecopellet Wien

b) Flameco Mini-eco

c) Llamica Titi 7

Figura 2.2: Modelos de calefactores no eléctricos disponibles en el mercado nacional

Tabla 2.3: Especificaciones de diferentes estufas a pellet no eléctricas disponibles en el mercado

Modelo	Potencia nominal [kW]	Consumo promedio [kg/h]	Eficiencia [%]	Volumen quemador [cm ³]	Área de ducto de carga [mm ²]	Volumen tolva de almacenamiento [cm ³]
Flameco mini-eco	9,0 ¹	2,1	No indicada	266.25	4200	7750
Ecopellet Wien	5,0	1,5	No indicada	No presenta ²	1965	12000
Llamica Paly	No indicada	1,0	80,0	No presenta ²	3600	12000

¹ La potencia nominal corresponde a una estimación del fabricante.

² Presenta quemador tipo placa de combustión sin volumen de combustible específico.

Además, se presentan 2 modelos de calefactores a pellet no eléctricos de origen estadounidense, los cuales se presentan en la **Figura 2.3**. Se diferencian principalmente por su tipo de estructura y cámara de combustión ya que cuenta con un quemador del tipo placa plana. Las especificaciones de esos calefactores están indicadas en la **Tabla 2.4**.



a) Wiseway pellet stove



b) Portable Clarry pellet stove

Figura 2.3: Modelos de calefactores a pellet no eléctricos disponibles en el mercado internacional

Tabla 2.4: Especificaciones de calefactores no eléctricos de origen estadounidense

Modelo	Potencia nominal [kW]	Consumo promedio [kg/h]	Eficiencia [%]	Capacidad de almacenamiento [kg]
Wiseway	15	1,5	75	27
Clarry	10	1,2	70	25

En cuanto a los calefactores de combustión de pellet eléctricos (**Figura 2.4**), se pueden establecer ciertas similitudes en sus componentes y sus principales diferencias radican en su potencia nominal, consumo de pellet y volumen de almacenamiento de pellet. En la **Tabla 2.5** se presentan las especificaciones de diferentes modelos de calefactores a combustión de pellet eléctricos. En donde, la potencia y consumo de combustible depende del volumen de carga del quemador en el tiempo.



a) Alcazar P1500

b) Amesti Italy 6100

c) Bosca Ecosmart plus

Figura 2.4: Modelos de calefactores eléctricos disponibles en el mercado nacional

Tabla 2.5: Especificaciones de diferentes estufas a pellet eléctricas disponibles en el mercado

Modelo	Potencia nominal [kW]	Consumo promedio [kg/h]	Eficiencia [%]	Volumen quemador [cm ³]	Área de ducto de carga [mm ²]	Volumen tolva de almacenamiento [cm ³]
Alcazar P1500	4,35	1,0	85,9	197,9	1965	12000
Amesti Italy 6100	6,0	1,4	85,5	187,5	2375	18000
Bosca Ecosmart plus	9,7	1,2	87,0	281,5	2375	30800

2.4 Componentes de una estufa a pellet

Dentro de los componentes de un calefactor a pellet se pueden diferenciar ciertos elementos principales para su funcionamiento. A continuación, se presentan cada uno de ellos.

2.4.1 Sistema de alimentación

El sistema de alimentación corresponde al conjunto de elementos que surte pellet hacia el quemador de la cámara de combustión. En los calefactores a combustión de pellet principalmente existen dos

sistemas de alimentación, los cuales corresponden a los sistemas de barrena y alimentación por gravedad.

En la **Figura 2.5** se presenta un sistema de alimentación de barrena automática de una estufa a combustión de pellet, este sistema funciona mediante el accionamiento de la barrena (tornillo sinfín) para surtir el pellet desde una tolva, hacia el quemador de la cámara de combustión. Este sistema surte gradualmente de forma automática al quemador, dependiendo del nivel de calefacción seleccionado en el calefactor.

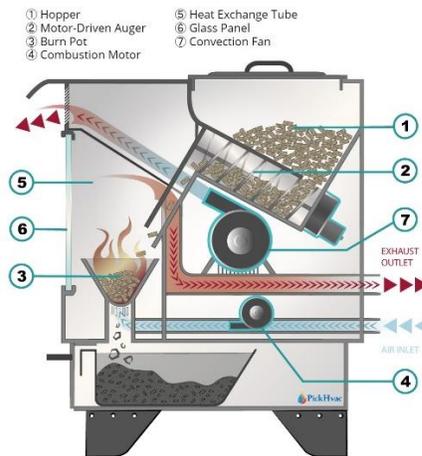


Figura 2.5: Sistema de alimentación de barrena en estufa a combustión de pellet (Fuente: [10])

En la **Figura 2.6** se muestra un sistema de alimentación por gravedad en un calefactor a combustión de pellet no eléctrica. Este sistema funciona mediante el avance de la carga de pellet por gravedad, desde la tolva de alimentación hacia el quemador. Debido a que no existe un elemento mecánico que facilite el movimiento del pellet la tolva de alimentación debe tener la geometría adecuada para facilitar la descarga. Además, cuenta con un sistema que regula el paso del pellet, el cual permite el corte del flujo de pellet hacia el quemador.

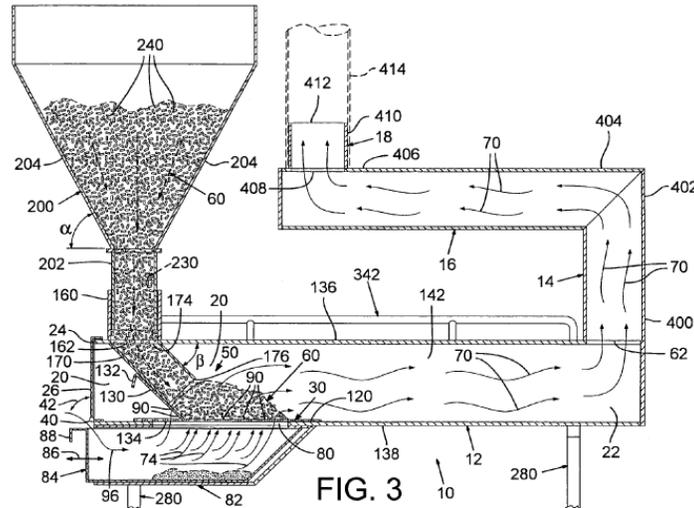


Figura 2.6: Sistema de alimentación por gravedad en estufa a combustión de pellet (Fuente: [11])

Para el desarrollo de la presente investigación se optará por un sistema de alimentación por gravedad, debido a su simplicidad de diseño y debido a que no presenta componentes eléctricos para su funcionamiento.

Para un adecuado flujo de combustible hacia la cámara de combustión se debe tener en consideración el ángulo de reposo α del pellet, el cual corresponde al ángulo que forma una muestra de pellet al dejarla caer sobre una superficie sin ejercer presión sobre la carga [12]. Dicho ángulo de reposo determina la inclinación que debe tener el conducto para que el material fluya, el ángulo de inclinación β se calcula mediante la siguiente expresión.

$$\beta = \alpha + 15^\circ \quad (1)$$

El ángulo de reposo del pellet de madera es de 45° [13], por lo cual el ángulo de inclinación de la descarga de pellet será de,

$$\beta = 60^\circ$$

2.4.2 Quemador

El quemador es el componente donde se deposita el pellet para ser combustionado, usualmente están contruidos de acero inoxidable o hierro fundido. Principalmente se pueden diferenciar tres tipos de quemadores, los de lecho fijo, lecho fluidizado y placa de combustión. En donde, el más utilizado es el de lecho fijo [14]. Comercialmente existen cuatro tipos de quemadores de lecho fijo, tres de ellos corresponden a los de tipo canasta, los cuales pueden ser de forma cilíndrica, rectangulares o bien, del tipo rejilla; los primeros dos tipos presentan agujeros en su estructura para permitir el paso del aire para que ocurra la combustión y, además, para permitir la caída de cenizas del pellet combustionado.



a) Quemador de pellet tubular



b) Quemador de pellet rectangular



c) Quemador de rejilla

Figura 2.7: Tipos de quemadores en estufas a pellet (Fuente: [15])

Por otro lado, se encuentran los quemadores del tipo placa, el cual corresponde a una placa plana de acero o hierro fundido que presenta agujeros que pueden ser de diversas formas y tamaños, los cuales permiten la caída de las cenizas y el pellet no combustionado a una segunda placa o directamente hacia el colector de cenizas. En la *Figura 2.8*, se presenta un quemador del tipo placa plana.



Figura 2.8: Quemador tipo placa

2.4.3 Colector de cenizas

El colector de cenizas es una pieza que se posiciona bajo el quemador y es el encargado de recibir todo material que caiga desde el quemador, ya sean cenizas o pellet combustionado parcialmente. En la *Figura 2.9* se muestra un ejemplo de un colector de cenizas típico de una estufa a pellet.

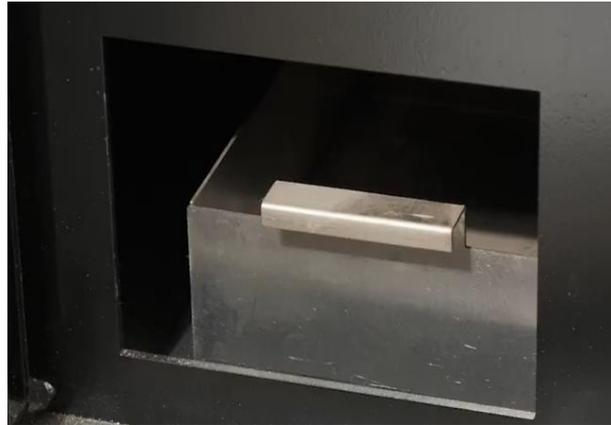


Figura 2.9: Colector de cenizas de una estufa a pellet (Fuente: [16])

2.5 Temperatura al interior del calefactor

En la *Figura 2.10* se muestran las posiciones de diferentes termocuplas posicionadas en un calefactor a pellet con el fin de determinar las diferentes temperaturas que se alcanzan al interior del calefactor al variar la longitud del pellet utilizado. En Chile las normativas indican que la longitud del pellet de madera debe ser mayor a 3,5 mm y menor a 40 mm, por lo cual se estudia la incidencia de la longitud del pellet al combustionarse en un calefactor. A continuación, en la *Figura 2.11* se presentan los datos de temperaturas registradas en distintos puntos al interior de un calefactor (*Figura 2.10*) [17].

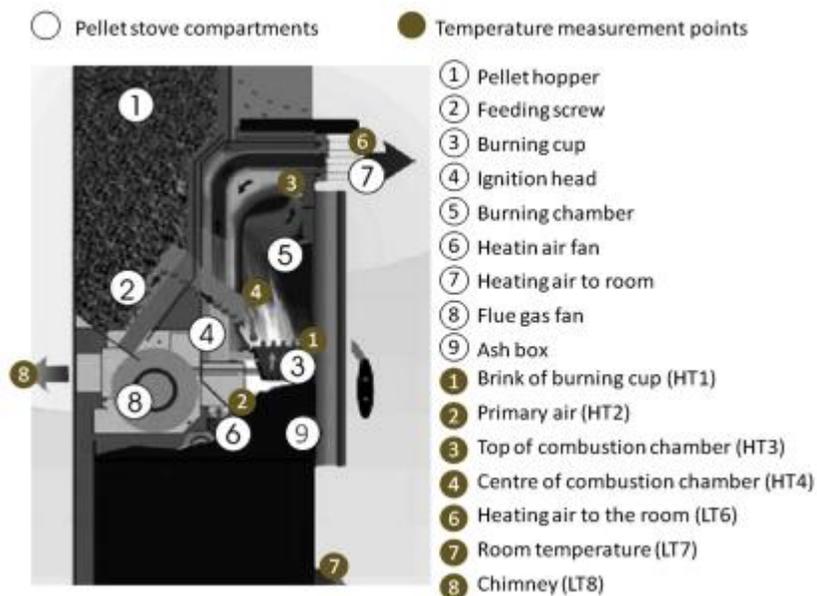


Figura 2.10: Componentes de estufa a pellet y posición de las termocuplas (Fuente: [17])

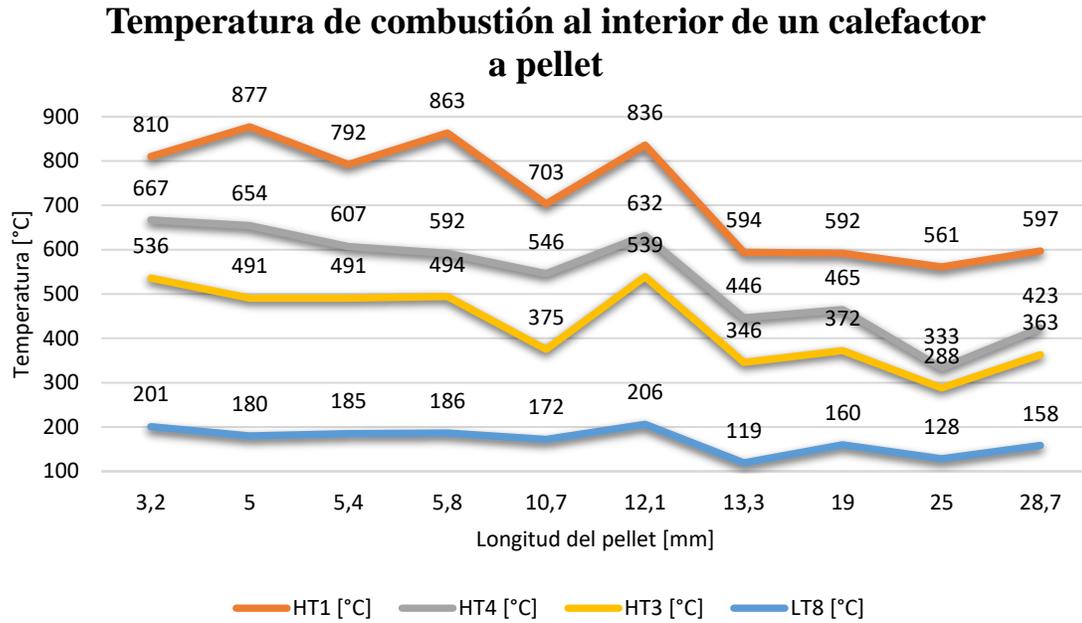


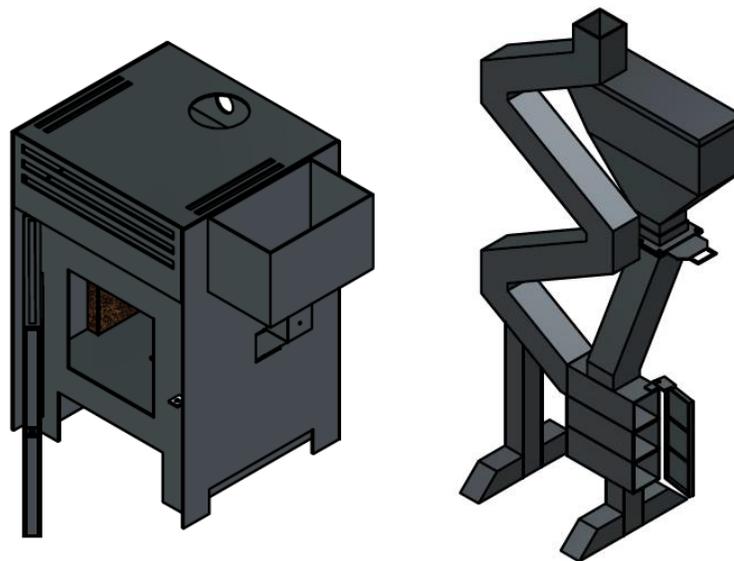
Figura 2.11: Temperatura de combustión al interior de calefactor a pellet (Fuente: [17])

Como se aprecia en la gráfica de la **Figura 2.11** las máximas temperaturas se obtienen con pellets de una longitud de entre 3,2 y 12,1 mm, siendo 877 °C la temperatura promedio más alta registrada en el borde superior del quemador (HT1) con pellet de 5 mm de longitud. En la parte superior de la cámara de combustión (HT3) se obtuvo una temperatura máxima de 539 °C.

CAPÍTULO 3: Diseño

En el siguiente capítulo se abordará el diseño de los principales componentes del calefactor a combustión de pellet no eléctrico.

Se proponen dos modelos de calefactores, con el fin de comparar teóricamente la viabilidad y funcionalidad de cada uno de ellos. En la **Figura 3.1** se presentan los diseños conceptuales de los calefactores, los cuales incorporan una cámara de combustión con distintos tipos de quemadores, un sistema de alimentación de combustible por gravedad similar en ambos modelos y diferentes sistemas de evacuación de gases de combustión.



a) Modelo 1

b) Modelo 2

Figura 3.1: Diseños conceptuales de los calefactores

A continuación, se presentan los detalles constructivos y de diseño de ambos modelos propuestos.

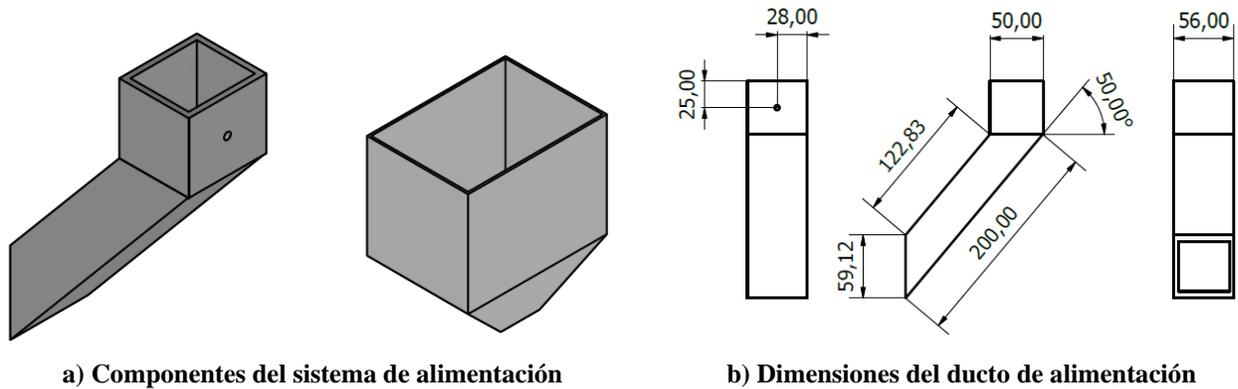
3.1 Modelo 1

El modelo 1 está diseñado en base a un calefactor de combustión lenta de leña, similar a los modelos de Flameco, Llamica y Ecopellet; en este modelo se incorporan diversos componentes de los calefactores señalados y puede ser fabricado tanto desde la modificación de un calefactor a combustión lenta, como desde cero fabricando cada uno de sus componentes. A continuación, se detalla el diseño de cada uno de los componentes.

3.1.1 Sistema de alimentación y almacenamiento de combustible

El sistema de alimentación de combustible incorpora 2 componentes (**Figura 3.2 a**)), la primera corresponde a la tolva de alimentación, la cual recibe y almacena el pellet, para luego surtirlo a través

del segundo componente, el cual es el ducto de alimentación hacia la cámara de combustión. El ducto de alimentación tiene una inclinación de 50° como lo muestra la **Figura 3.2 b)**. Además, en dicha figura se indican las dimensiones del ducto.



a) Componentes del sistema de alimentación

b) Dimensiones del ducto de alimentación

Figura 3.2: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 1

3.1.2 Cámara de combustión

Para el presente modelo, se propone una cámara de combustión (**Figura 3.3**) que contará con dos entradas de aire: la entrada de aire principal será por la parte inferior, incorporando el flujo de aire para la combustión a través del quemador y la entrada de aire secundaria se realiza a través de un sistema de inyección de aire a alta temperatura en la parte superior de la cámara de combustión. Este segundo sistema llamado templador (**Figura 3.4**) permitirá una “segunda combustión” de los gases y disminuirá la cantidad de material particulado no combustionado en la salida de los gases. Se propone la incorporación de ladrillos refractarios en el interior de la cámara de combustión con el fin de reflejar el calor generado por la llama hacia la puerta del calefactor y lograr una mayor transmisión de calor hacia el ambiente.

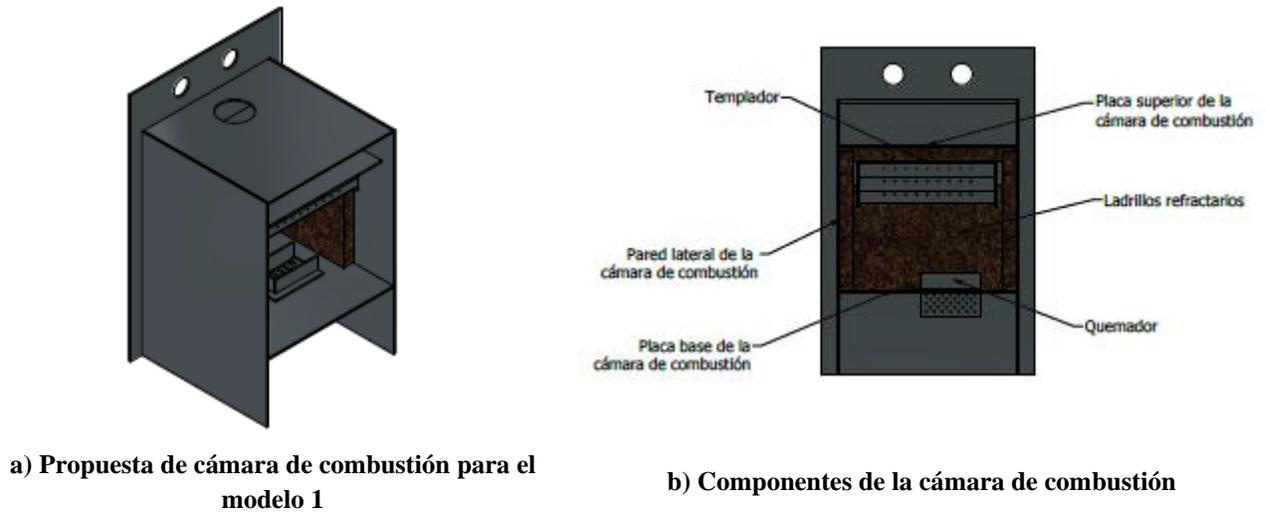


Figura 3.3: Cámara de combustión del modelo 1

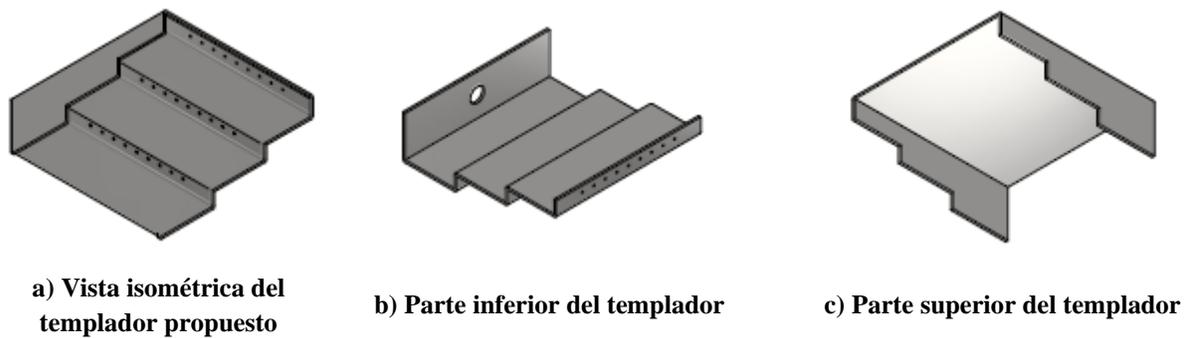


Figura 3.4: Propuesta de templador para la cámara de combustión del modelo 1

En la *Figura 3.5* se presenta una vista en corte del modelo 1, mediante la cual se aprecian los componentes internos del calefactor y el flujo de aire que ingresa a la cámara de combustión; en donde, la principal entrada de aire es por la parte inferior, en donde el aire fluye directamente hacia el quemador. Por otro lado, existe una segunda zona de entrada de aire, la cual es por la parte posterior del calefactor (lado izquierdo de la imagen), en donde se aprecia que el aire exterior ingresa a través de un conducto calentando el aire hasta ingresar al templador.

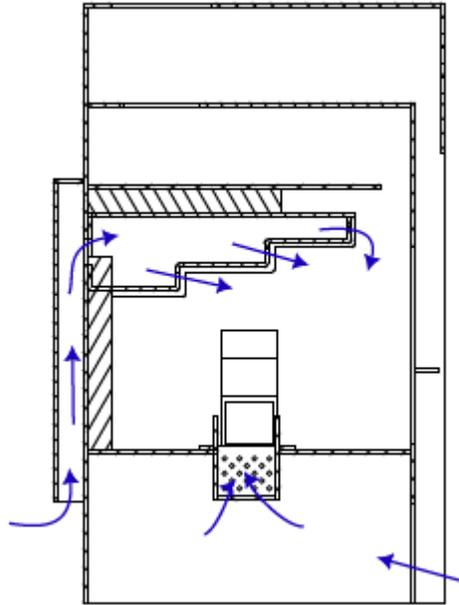


Figura 3.5: Vista en corte del modelo 1

3.1.3 Carcasa exterior del calefactor

Se propone la incorporación de paredes externas al calefactor, las cuales recubrirán por completo la cámara de combustión. Las paredes externas tendrán como función generar la convección de aire entre las paredes y cámara de combustión y, además, brindará una condición de seguridad al usuario ante el contacto directo en la manipulación del calefactor. A continuación, en la **Figura 3.6**, se presenta la propuesta de carcasa exterior del calefactor.

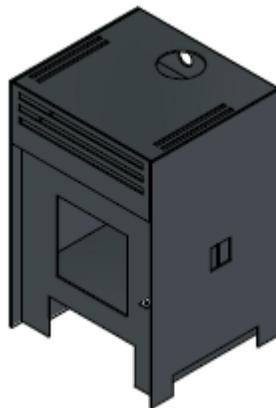


Figura 3.6: Cubiertas de la cámara de combustión del modelo 1

A continuación, en la **Figura 3.7** se detallan los componentes de la cubierta de la cámara de combustión, las cuales corresponden a cubierta superior, lateral izquierda, lateral derecha y frontal. Además, se detallan las dimensiones de cada una.

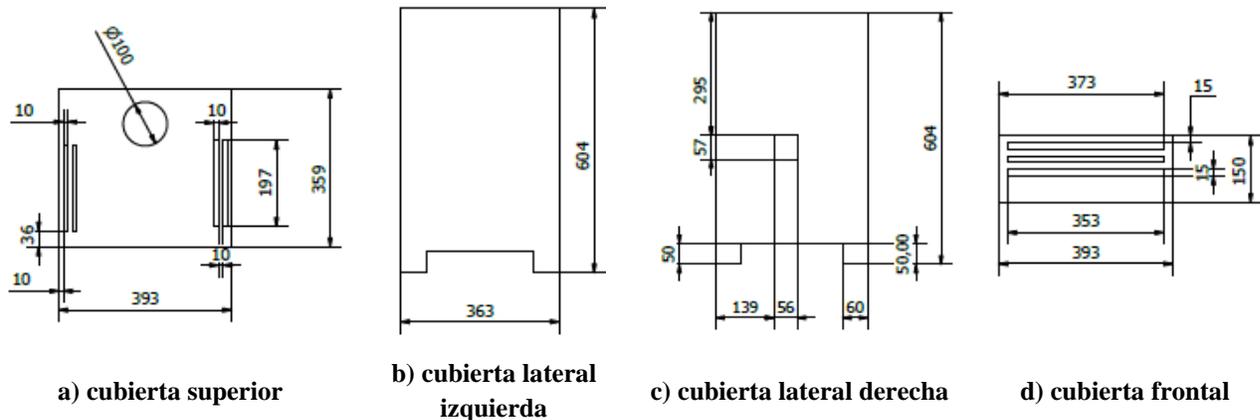
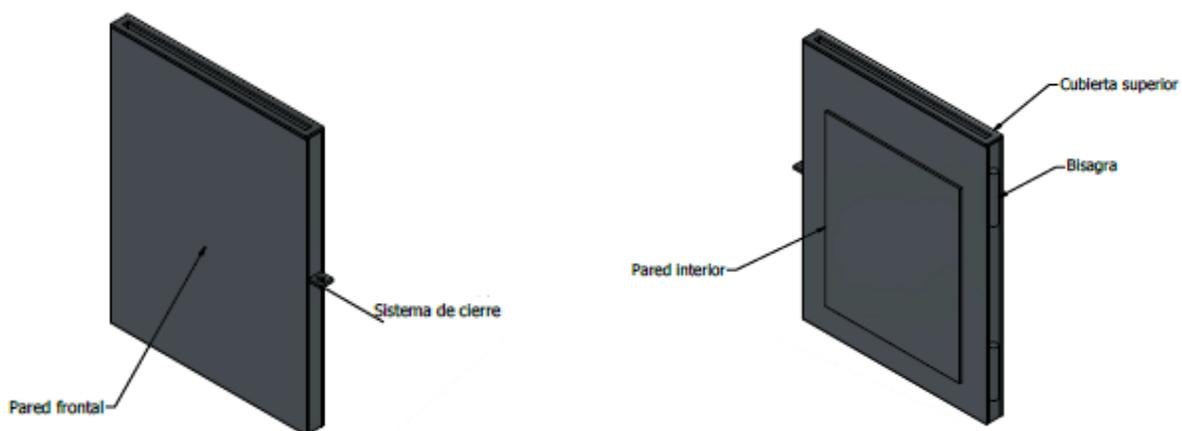


Figura 3.7: Dimensiones de los componentes de la cubierta del modelo 1 del calefactor

3.1.4 Puerta de la cámara de combustión

Para el presente modelo se propone la incorporación de una puerta hueca fabricada con placas de acero de 4 milímetros, la cual permitirá la convección y circulación de aire caliente hacia el recinto en donde se encuentre instalado el calefactor. La puerta diseñada incluye dos bisagras tubulares para permitir la apertura de ella, además, incluye un sistema de cierre con pasador para facilitar el cierre y apertura hacia la cámara de combustión. En la **Figura 3.8** se presenta la propuesta de la puerta de la cámara de combustión del modelo 1, en donde, se detallan sus componentes.



a) Vista frontal de la puerta de la cámara de combustión

b) Vista trasera de la puerta de la cámara de combustión

Figura 3.8: Propuesta de la puerta de la cámara de combustión del modelo 1

A continuación, en la **Figura 3.9**, se presentan las principales dimensiones de la puerta propuesta.

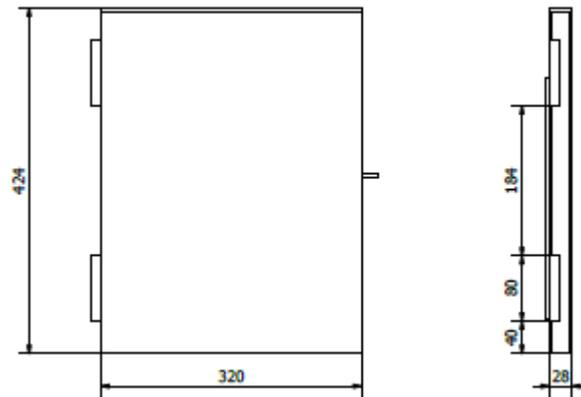


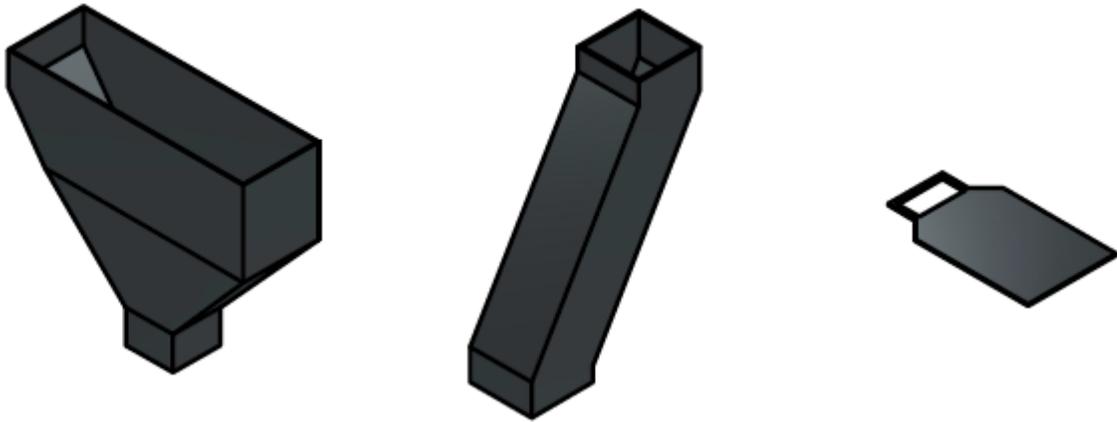
Figura 3.9: Dimensiones de la puerta del modelo 1 del calefactor

3.2 Modelo 2

El modelo 2 ha sido diseñado principalmente en base al modelo Wiseway de fabricación norteamericana, el siguiente modelo incorpora una cámara de combustión con doble quemador, ductos de salida de los gases de combustión inclinados, sistema de regulación de aire hacia la cámara de combustión y un sistema de corte de suministro de combustible hacia el quemador. A continuación, se presenta el diseño propuesto para cada uno de los componentes.

3.2.1 Sistema de alimentación y almacenamiento de combustible

El presente sistema de alimentación es similar al del modelo 1, con la diferencia que el pellet es surtido de forma vertical al quemador, puesto que la geometría de la cámara de combustión lo permite. El sistema está compuesto por 3 componentes, una tolva de carga, ducto de alimentación y sistema de corte de suministro, las cuales se presentan en la **Figura 3.10**.



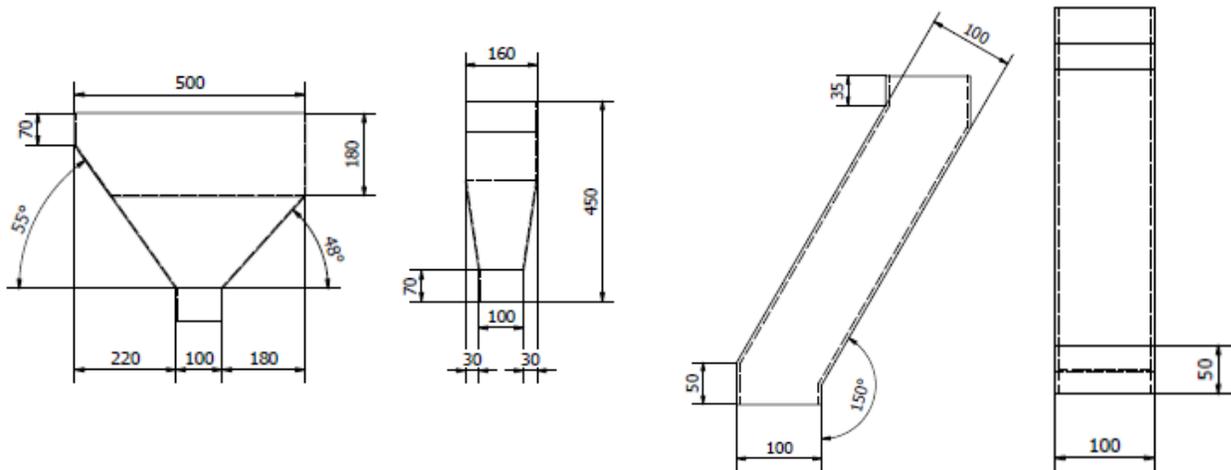
a) Tolva de alimentación

b) Ducto de alimentación

c) Corte de suministro

Figura 3.10: Componentes del sistema de alimentación del modelo 2

A continuación, en la **Figura 3.11** se presentan las dimensiones de los componentes del sistema de alimentación, las cuales se diseñaron de tal manera que el calefactor sea capaz de almacenar 12 kilogramos de combustible y pueda ser surtido directamente en el quemador. Además, en la **Figura 3.12** se indica las piezas que permiten la unión entre estos elementos y la placa que cumplirá la función de cortar el suministro de la tolva hacia el ducto de alimentación.



a) Dimensiones de la tolva de alimentación

b) Dimensiones del ducto de alimentación

Figura 3.11: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 2

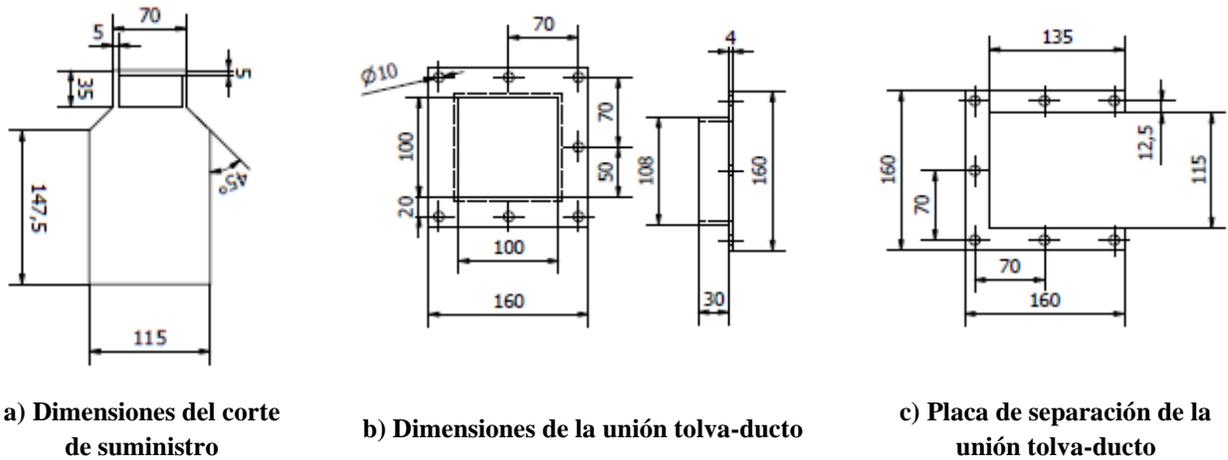


Figura 3.12: Dimensiones de los componentes del sistema de alimentación del modelo 2

3.2.2 Cámara de combustión

La cámara de combustión para el presente modelo presenta 2 quemadores y 1 cenicero, en donde el quemador principal se ubica en la parte superior y será alimentado directamente con el pellet desde el ducto de alimentación y la salida de gases es directa hacia los ductos de gases de combustión. El segundo quemador se encuentra situado bajo el quemador principal y su función será finalizar la combustión del pellet de madera que no haya combustionado por completo en el primer quemador. En la parte inferior de los quemadores se ubicará el cenicero, el cual tendrá la función de contener las cenizas del proceso de combustión del calefactor. La entrada de aire hacia la cámara de combustión se encuentra en la parte lateral de ella (*Figura 3.13*) y alimenta al quemador principal y secundario como se muestra en la *Figura 3.13*.

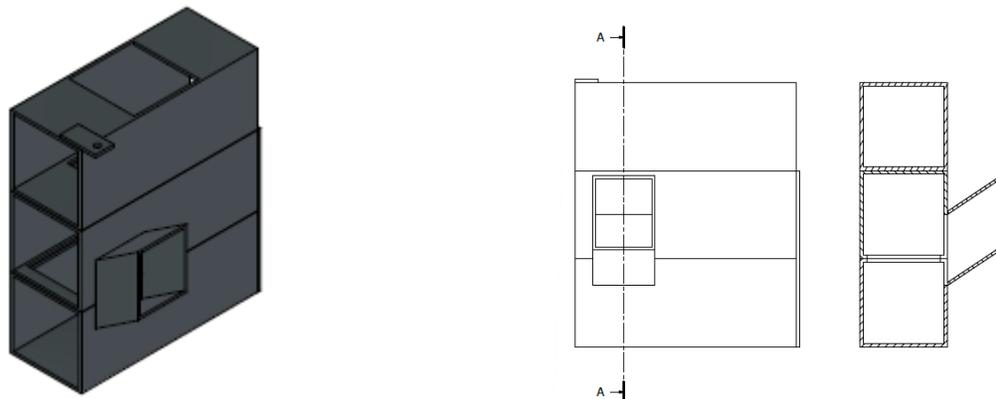


Figura 3.13: Entrada de aire primario a la cámara de combustión

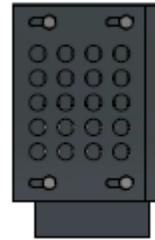
En la **Figura 3.14** se muestra la propuesta del sistema de bloqueo de entrada de aire, el cual tiene la finalidad de regular la entrada de este y controlar la combustión al interior del calefactor, lo cual conllevará a variaciones en el consumo de combustible y en la eficiencia.



a) Vista isométrica



b) Entrada de aire completamente abierta



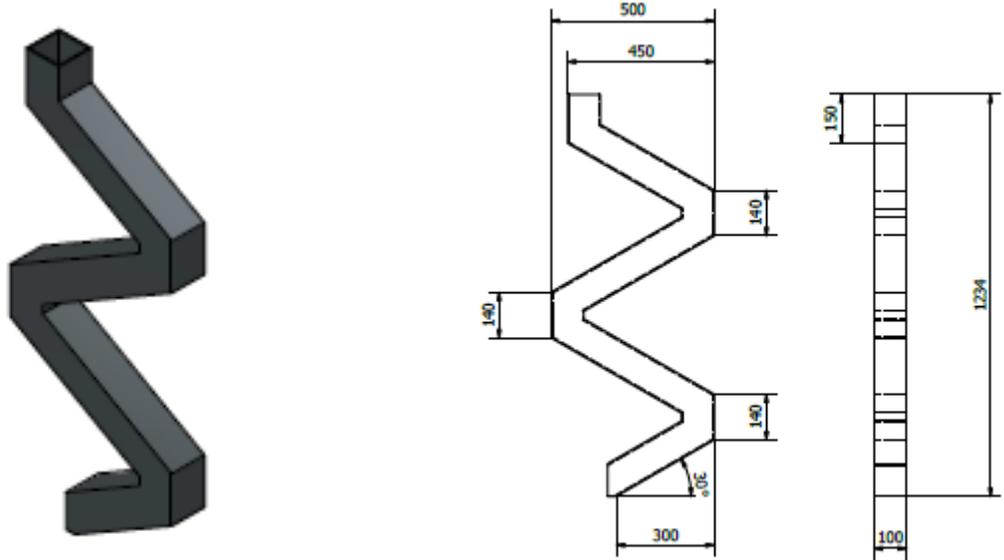
c) Entrada de aire cerrada

Figura 3.14: Sistema de bloqueo de entrada de aire para la cámara de combustión

En cuanto al tipo de quemador para este modelo, se propone la utilización de un quemador tipo canasta para el quemador principal, puesto que permiten un mayor paso de aire entre el pellet contenido y, además, dada su geometría evitan la generación de carbonización del pellet en su base, lo que generaría una capa que impediría la caída de cenizas y la entrada de aire. Para el quemador secundario se propone el quemador de placa plana con un espaciado menor al del primer quemador para así evitar la caída directa del pellet no combustionado hacia el cenicero.

3.2.3 Ducto de gases de combustión

La salida de gases de la cámara de combustión es a través de ductos con un perfil transversal de 100 milímetros de ancho y 4 milímetros de espesor. Describe una forma tipo “W” como lo muestra la **Figura 3.15**. Debido a su forma y la entrada de aire en la parte inferior del quemador, la llama podrá recorrer libremente los primeros tramos y en los tramos de la parte superior se tendrán solo gases de combustión. En la parte superior del ducto de gases de combustión es posible acoplar un ducto de gases de 6” convencional, permitiendo una fácil instalación donde se requiera ubicar el calefactor.



a) Vista isométrica del ducto de gases de combustión

b) Dimensiones del ducto de gases de combustión

Figura 3.15: Ducto de gases de combustión

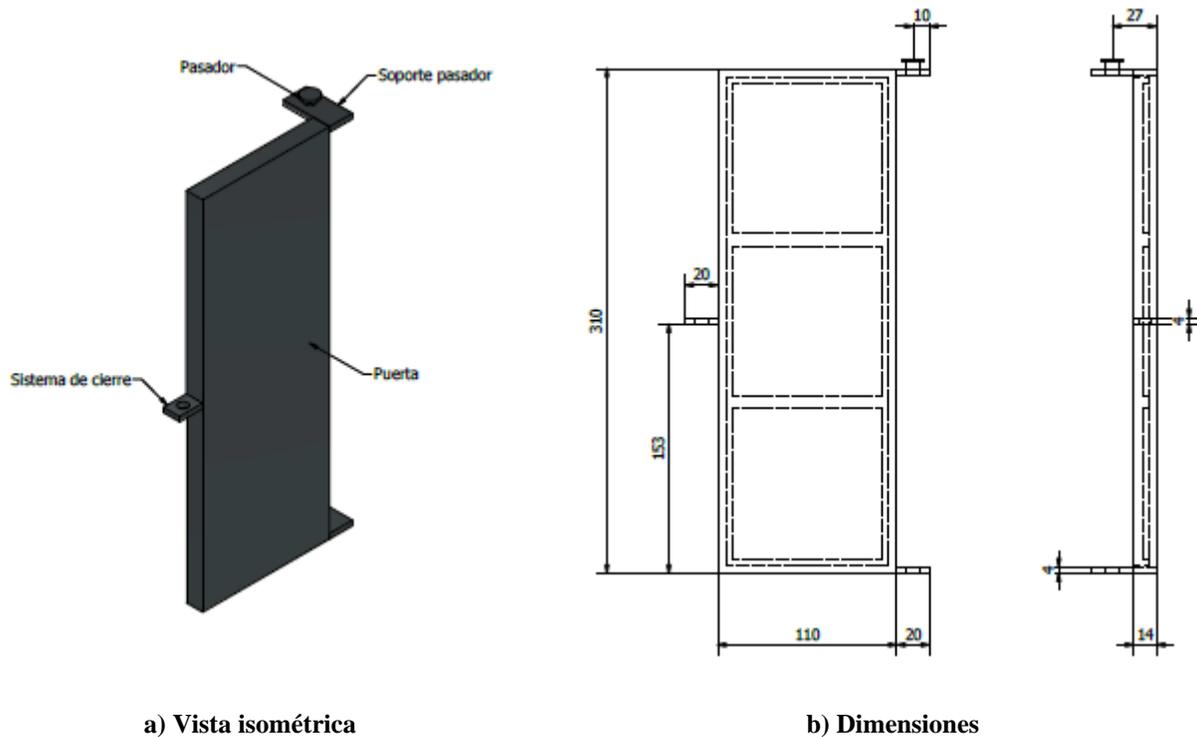
3.2.4 Carcasa exterior del calefactor

Se propone la incorporación de paredes externas al calefactor, las cuales recubrirán la cámara de combustión y el ducto de gases de combustión, se evaluará la incorporación para generar la reflexión del calor y también para generar la convección de aire a través de los ductos. Además, la pared del lado de la tolva de alimentación permitirá la irradiación térmica directa de los ductos de gases de combustión hacia la pared de la habitación donde se instalará el calefactor.

3.2.5 Puerta de la cámara de combustión

Para este modelo se propone incorporar una puerta maciza, la cual brindará el acceso hacia la cámara de combustión para remover los componentes interiores para su limpieza y mantención.

La puerta diseñada tendrá un espesor de 10 milímetros con surcos que permitan el correcto cierre de la cámara de combustión y eviten cualquier entrada de aire adicional hacia este. A continuación, en la **Figura 3.16** se detalla el modelo propuesto junto a sus dimensiones.



a) Vista isométrica

b) Dimensiones

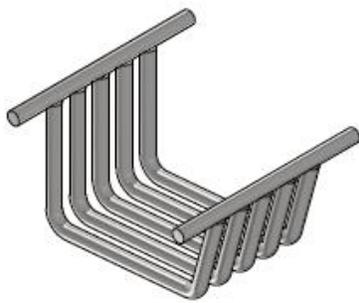
Figura 3.16: Puerta de la cámara de combustión del modelo 2

3.3 Quemadores

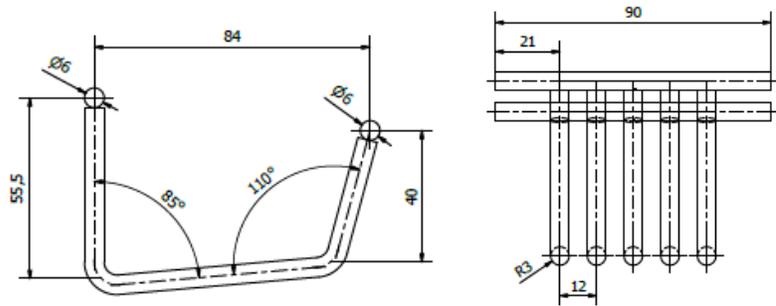
Se propone el diseño de distintos tipos de quemadores de pellet, los cuales se proponen para ambos modelos de calefactor, con el fin de evaluar su uso y el rendimiento de ellos en el calefactor. Los modelos se diseñarán para una capacidad similar a la de los quemadores de los calefactores convencionales.

En primer lugar, se diseñará un quemador cilíndrico con un volumen interior cercano a los 250 cm^3 , incorporará agujeros de $0,5 \text{ mm}$ de diámetro para permitir el paso del aire para la combustión, facilitar la caída de cenizas del pellet combustionado. Los agujeros se realizan considerando una razón de bloqueo de $0,8$, la cual corresponde a la razón de superficie con agujeros con respecto al área de la superficie sin agujeros. Esta razón de bloqueo incide en el paso de aire a la cámara de combustión y mientras menor sea, mayor será el rendimiento de la combustión [18].

En la **Figura 3.17** se muestra la vista isométrica del modelo del quemador cilíndrico, el cual presenta en la parte superior dos anillos, uno con la función de soportar el quemador sobre la placa base de la cámara de combustión y el otro corresponde a una placa tubular que facilita la entrada del pellet desde el ducto de alimentación hacia el quemador.



a) Vista isométrica



b) Dimensiones

Figura 3.19: Diseño de quemador tipo canasta

Finalmente, se propone un quemador de tipo placa plana, el cual está propuesto únicamente para el modelo 2, el cual tendrá como función recibir el pellet no combustionado del quemador principal y de esta manera reducir el porcentaje de los constituyentes combustibles presentes en las cenizas. En la *Figura 3.20* se presentan los diseños propuestos como quemadores de placa plana.

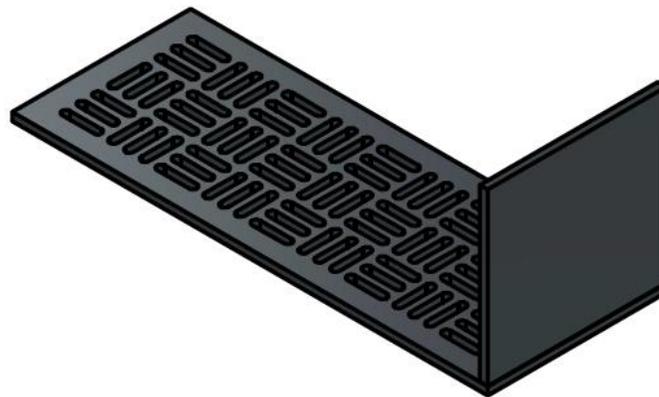


Figura 3.20: Quemador de placa plana

En la *Figura 3.21* se presenta las dimensiones principales que deberá tener el quemador secundario para modelo 2 del calefactor.

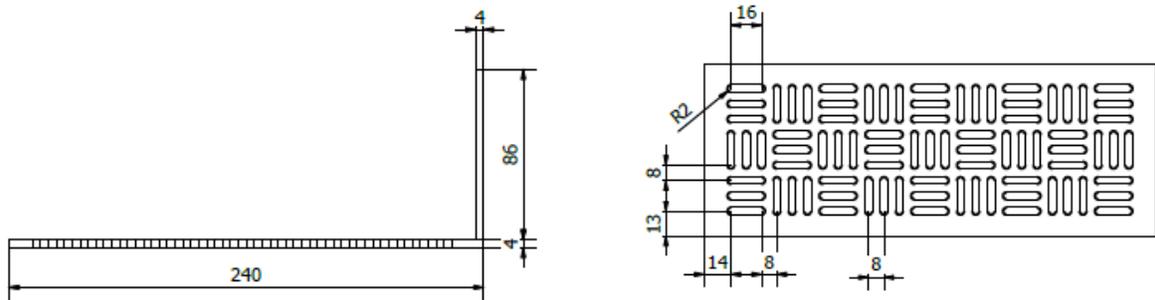


Figura 3.21: Dimensiones principales del quemador de tipo placa plana

3.4 Selección del diseño

Para el presente estudio se seleccionó el modelo 2 de calefactor; puesto que, presenta una mayor simplicidad en el diseño de sus componentes, lo que conlleva a una menor cantidad de horas de fabricación y un menor costo de materiales. Desde el punto de vista de la funcionalidad de la alimentación por gravedad del quemador el modelo 2 presenta menores complicaciones que el modelo 1 al presentar una descarga vertical directa al quemador, en lugar de la descarga lateral del modelo 1, la cual no permite un correcto control de la masa que ingresa al quemador y, además, bajo ciertas condiciones ocurre la caída y esparcimiento de pellet no combustionado al interior de la cámara de combustión.

En cuanto a las entradas de aire, el modelo 2 presenta una única entrada, la cual se ubica bajo el quemador principal y permite una mayor superficie en combustión. Por el contrario, el modelo 1 presenta 2 entradas de aire; la principal entrada de aire proviene de la parte inferior de la cámara de combustión y requiere que el aire pase a través del quemador y del pellet contenido para combustionar el que se encuentra en la superficie; la entrada de aire secundaria proviene del templador e inyecta el aire a la parte superior de la cámara de combustión para facilitar la combustión de los productos combustibles en los gases, sin embargo, para que funcione este sistema el calefactor debe estar en pleno funcionamiento para que el aire que circula por la parte posterior del calefactor se caliente e ingrese al templador.

Considerando la transmisión de calor el modelo 2 presenta una mayor superficie activa a alta temperatura, la cual permite la transmisión de calor por radiación y convección. En cuando al modelo 1, la principal fuente de transmisión de calor corresponde a la radiación, en donde se debe incorporar una puerta frontal con una placa de vidrio cerámico de alta temperatura.

Finalmente, una razón principal para la selección del diseño para desarrollar la fabricación del calefactor fue la disponibilidad de un ducto W presente en el taller mecánico del Departamento de Ingeniería mecánica, lo que permitió disminuir los tiempos de fabricación y rectificar los diseños conforme a la geometría del ducto mencionado.

Capítulo 4: Fabricación

En el siguiente capítulo se aborda la fabricación y detalles constructivos del calefactor, además, se presentan los distintos componentes a evaluar en el funcionamiento del calefactor a pellet de madera.

La fabricación de la cámara de combustión, ductos de gases de combustión y ductos de alimentación de combustible se realizó con perfiles tubulares cuadrados de 100 milímetros, con un espesor de 4 milímetros, por otro lado, la entrada de aire primaria y los soportes del calefactor fueron fabricados con perfiles tubulares cuadrados de 70 milímetros, con un espesor de 3 milímetros.

El resto de los componentes, tales como, tolva, unión de ducto tolva, puerta, quemadores y soporte de quemadores fueron fabricados con placas de acero ASTM A36 de 4 milímetros.

A continuación, se presenta una fotografía correspondiente al proceso de fabricación de la cámara de combustión, en ella se pueden apreciar 3 ductos tubulares, los cuales corresponden a quemador primario, quemador secundario y cenicero en orden descendente respectivamente. A la derecha es posible apreciar la entrada de aire primaria a la cámara de combustión.



Figura 4.1: Fabricación de la cámara de combustión y entrada de aire primaria

La estructura de la cámara de combustión es soldada a la base y en ella es montada el ducto de carga de combustible en conjunto con los ductos de evacuación de gases como se muestra en la **Figura 4.2**.



Figura 4.2: Montaje de ducto de alimentación de combustible y evacuación de gases a la cámara de combustión

En el ducto de alimentación de combustible se realizó el corte para la instalación de una tapa de registro, la cual permitirá la limpieza de ducto tras un periodo de uso establecido.

En la **Figura 4.3** se presenta una vista del calefactor con la totalidad de sus elementos soldados instalados, los cuales corresponden a la cámara de combustión, ducto de alimentación de combustible y ducto de gases combustibles.



Figura 4.3: Elementos fijados por soldadura del calefactor a pellet no eléctrico

El montaje de la tolva de almacenamiento de combustible se realiza por unión apernada para facilitar el desmontaje y limpieza de los componentes. A continuación, en la **Figura 4.4** se presenta la unión apernada de la tolva de almacenamiento de combustible con el ducto de alimentación.



Figura 4.4: Unión apernada de la tolva de almacenamiento con el ducto de alimentación de combustible

Finalmente, se presenta el calefactor terminado y listo para la puesta en marcha de las pruebas de funcionamiento, en él se puede apreciar la instalación la tolva de almacenamiento de pellet y la carcasa exterior que permite la convección de aire caliente a través del ducto de gases de combustión.



Figura 4.5: Modelo 2 de calefactor a pellet no eléctrico terminado

Capítulo 5: Mediciones y cálculos

Una vez completada la fabricación del calefactor a pellet no eléctrico, se procederá a realizar una serie de ensayos con el fin de determinar el correcto funcionamiento y verificar las condiciones de operación según las normas establecidas por el Ministerio de Medio Ambiente.

Para ello, se deben establecer parámetros y mediciones con el fin de obtener los resultados de sus emisiones y temperaturas para realizar los cálculos correspondientes de potencia y rendimiento.

5.1 Combustible

El combustible utilizado para los ensayos corresponde a pellets de madera de la marca Innapel y Ecomas, los cuales se encuentran disponibles en el mercado establecido y cumplen las normativas europeas de certificación de calidad, composición y utilización del pellet de madera.

A continuación, se presentan las especificaciones del pellet utilizado y su análisis elemental.

Tabla 5.1: Especificaciones del pellet Innapel y Ecomas.

Parámetro	Unidad de medida	Innapel	Ecomas
Diámetro, D	mm	6	6
Longitud, L	mm	<40	<40
Humedad, M	%(m/m)	6,7	6,5
Cenizas, A	%(m/m)	0,3	0,5
Durabilidad mecánica, DU	%(m/m)	-	98,6
Finos, F	%(m/m)	0,2	0,2
Poder calorífico neto, Q	kWh/kg	4,52	5,2
Densidad a granel, BD	Kg/m ³	-	710

Tabla 5.2: Análisis elemental del pellet de madera de pinus radiata [19].

Combustible	Carbono [% m/m]	Hidrógeno [% m/m]	Nitrógeno [% m/m]	Oxígeno [% m/m]	Azufre [% m/m]
Pellet	48,28	5,73	0,1	43,89	0,5

5.2 Mediciones

Las mediciones efectuadas en los ensayos se realizaron en base a la Norma Chilena 3282, Artefactos de calefacción doméstica que utilizan pellet de madera – Requisitos y métodos de ensayo [7]. La cual indica que se deben realizar mediciones de temperatura en distintos puntos, además se deberán cuantificar las concentraciones de gases en la salida de humos del calefactor y medir el consumo de combustible que presenta el equipo mientras se encuentra en distintas condiciones de funcionamiento.

A continuación, se detallan los métodos e instrumentos utilizados para las mediciones realizadas al calefactor.

5.2.1 Medición de temperatura

Se realizaron distintas mediciones bajo diferentes regímenes de funcionamiento con el fin de cuantificar la temperatura en cada uno de los puntos de interés. Para ello se emplearon sensores de termocuplas tipo K junto a un termómetro digital marca Fluke 52 serie II, el cual indica las temperaturas instantáneas obtenidas por las termocuplas. Además, para la medición de temperatura en los humos se utilizó el equipo Testo 340 y Testo 350, los cuales incorporan una sonda de medición y registra la temperatura en los intervalos de tiempo deseados. A continuación, en la **Figura 5.1** se presentan los equipos utilizados.



a) Termómetro digital Fluke 52 serie II, junto a termocupla tipo K



b) Analizador de gases de combustión Testo 350

Figura 5.1: Equipos utilizados para la medición de temperatura y análisis de gases

Se realizaron muestras de temperaturas en 3 puntos como lo indica la Norma Chilena 3382 [7], los puntos de medición corresponden a la salida del quemador para registrar la temperatura de combustión en el calefactor; al interior de la tolva de combustible para verificar que la temperatura se encuentre dentro de los rangos establecidos y en la salida de los humos del ducto de gases de combustión para realizar los cálculos de pérdidas de calor por los humos del calefactor. A continuación, en la **Figura 5.2**, se presentan los puntos de medición de temperatura y análisis de gases.

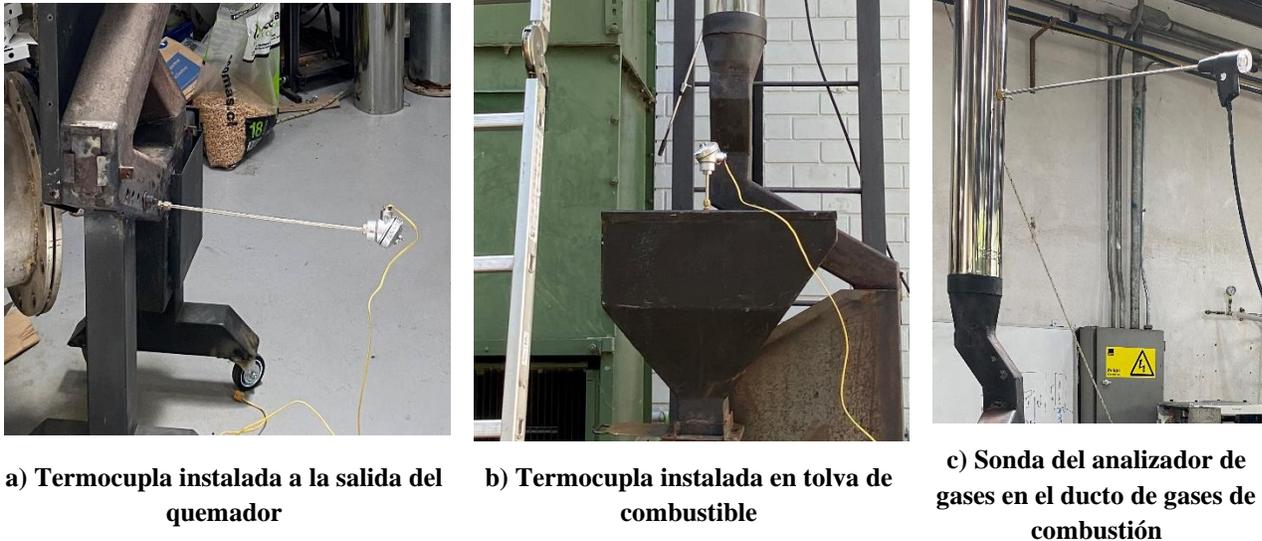


Figura 5.2: Puntos de medición de temperatura y análisis de gases

5.2.2 Análisis de gases

Se realizó un análisis de gases de combustión con el equipo en régimen de funcionamiento, lo anterior debido a que la norma indica que se debe realizar la medición pasado al menos 30 minutos con variaciones menores a los 5°C en la salida de humos; puesto que, durante el encendido del calefactor se presentan mayores emisiones de material particulado y las temperaturas no reflejan los datos óptimos para los cálculos de potencia térmica. El equipo de medición utilizado corresponde al Testo 350, el cual incluye una sonda que se introduce en los ductos de salida de gases y mide las concentraciones de monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, oxígeno y temperatura ambiente y en los humos.

La concentración media de monóxido de carbono en los humos calculada al 13% del contenido de oxígeno debe ser menor o igual que 0,04% (500 mg/m^3) a la potencia nominal térmica del equipo.

5.2.3 Análisis termográfico

Se realizó un perfil termográfico del calefactor con el fin de analizar las temperaturas superficiales de los componentes mientras el calefactor se encuentre en funcionamiento, de esta manera se identifican los puntos de mayor temperatura en cada sección y de esta manera evaluar posibles modificaciones para incrementar el confort y seguridad del calefactor hacia el usuario.

Para los análisis termográficos se utilizarán dos equipos, los cuales corresponden a la cámara termográfica fija de marca Fluke RSE300 (Figura 5.3), la cual permite el almacenamiento en formato de video de las imágenes térmicas del calefactor en funcionamiento, de esta manera es posible analizar los datos de manera continua en el tiempo, identificando variaciones de temperatura en el tiempo.



Figura 5.3: Cámara térmica Fluke RSE 300

El segundo equipo utilizado para las mediciones corresponde a la cámara termográfica de la marca Testo 872 (**Figura 5.4**), la cual permite almacenar termografías de un momento dado, las cuales posteriormente se pueden analizar utilizando en Software Testo IRSoft, en donde se podrán analizar las imágenes térmicas indicando los puntos de medición de interés para obtener los datos de temperatura en dichos puntos.

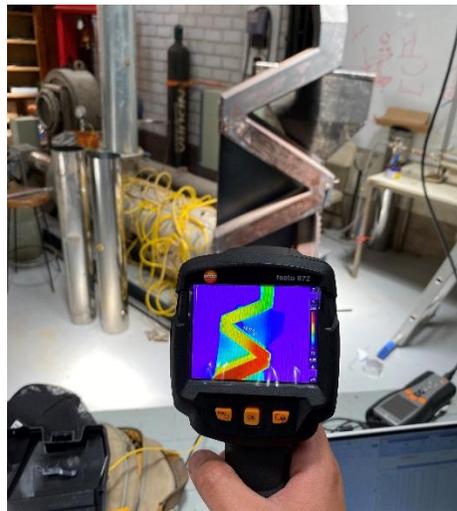


Figura 5.4: Cámara termográfica Testo 872

5.2.4 Consumo de combustible y estimación de constituyentes combustibles en los residuos

Se deberá registrar el consumo de combustible del calefactor para efectuar los cálculos de potencia neta del calefactor. Para ello existen diferentes métodos; uno de ellos es posicionar el calefactor sobre una balanza que registre en intervalos de tiempo la variación de la masa de combustible almacenado al interior del calefactor. Otro método empírico para el cálculo de consumo de combustible es realizar una graduación interna de la tolva de almacenamiento de combustible (**Figura 5.5**) con masas conocidas y de esta manera registrar en intervalos de tiempo el nivel de combustible al interior de la

tolva y finalmente registrar el tiempo que tarde en consumir el combustible del ducto de alimentación de la cámara de combustión bajo condiciones establecidas de entradas de aire.

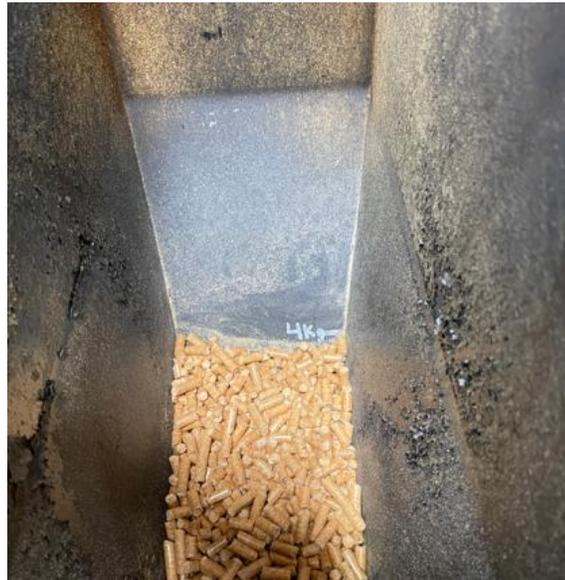


Figura 5.5: Graducción interna de la tolva de almacenamiento de combustible para la estimación del consumo

Para la estimación de los constituyentes combustibles en los residuos se deberá realizar un periodo de ensayo con una masa de combustible B_{fi} conocida, en donde una vez finalizado el ensayo y pasado el tiempo necesario para que los componentes del calefactor se encuentren a temperatura ambiente se deberá registrar la masa de las cenizas R_{en} de la combustión. Luego, se deberán identificar y separar los pellets no combustionados y registrar su masa b_{en} , como se muestra en la **Figura 5.6**.



Figura 5.6: Constituyentes combustibles en los residuos del calefactor

Luego se estimarán los porcentajes en masa de los residuos R que pasan a través de la parrilla, con respecto a la masa de combustible quemada en el ensayo y de los constituyentes combustibles b en el

material que pasa a través de la parrilla y en el residuo con respecto a la masa de material residual; bajo las siguientes expresiones.

$$b = \frac{b_{en} \cdot 100}{R_{en}} \quad (2)$$

$$R = \frac{R_{en} \cdot 100}{B_{fl}} \quad (3)$$

5.3 Cálculo de rendimiento

Para determinar el rendimiento del calefactor se utilizará un método indirecto, el cual plantea que el rendimiento total del calefactor es del 100% menos las pérdidas que se producen en el equipo. Para ello se determinan las pérdidas térmicas, las cuales corresponden a las pérdidas ocurridas en los humos y en los constituyentes combustibles en los residuos.

De esta manera el rendimiento se determinará a partir de dichas pérdidas bajo la siguiente ecuación, en donde η corresponde al porcentaje de rendimiento del calefactor, q_a es el porcentaje de pérdidas por calor sensible específico en los humos, con respecto al poder calorífico del combustible; q_b es el porcentaje de pérdidas por calor latente en los humos, con respecto al poder calorífico del combustible; finalmente, q_r es el porcentaje de pérdidas térmicas a través de los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla, con respecto al poder calorífico del combustible.

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (4)$$

A continuación, se detalla la base de cálculo para la estimación de las pérdidas de calor.

5.3.1 Pérdidas de calor sensibles en los humos

El calor sensible corresponde a la energía calorífica que genera un cambio de temperatura sin que se afecte su estado físico. Dicha pérdida de calor es estimada a partir de la siguiente ecuación, en donde t_a corresponde a la temperatura de los humos; t_r es la temperatura de referencia del ambiente; C_{pmd} es el calor específico de los humos secos en condiciones normalizadas, en función de la temperatura y de la composición de los gases; C es el contenido de carbono del combustible; C_r es el contenido en carbono de los residuos que pasan a través de la parrilla con respecto a la cantidad de combustible de ensayo quemado; CO es el contenido de monóxido de carbono en los humos secos; CO_2 es el contenido de dióxido de carbono de los humos secos; C_{pmH_2O} es el calor específico del vapor de agua en condiciones normalizadas, en función de la temperatura; H es el contenido de hidrógeno del combustible y finalmente W es el contenido de humedad del combustible.

$$Q_a = (t_a - t_r) \cdot \left[\left[\frac{C_{pmd} \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO + CO_2)} \right] + \left[\frac{C_{pmH_2O} \cdot 1,92 \cdot (9H + W)}{100} \right] \right] \quad (5)$$

Las variables C_{pmd} , C_{pmH_2O} dependen directamente de la temperatura de los humos y se calculan bajo las siguientes ecuaciones.

$$C_{pmd} = 3,6 \cdot \left[0,361 + 0,008 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 + \left(0,085 + 0,19 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,14 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right) + \left(0,3 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{100} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$C_{pmH_2O} = 3,6 \cdot \left[0,414 + 0,038 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0,034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right] \quad (7)$$

El contenido en carbono de los residuos que pasan a través de la parrilla, C_r , se estiman a partir del porcentaje en masa de los constituyentes combustibles, b , en el material que pasan a través de la parrilla y en el residuo con respecto a la masa de material residual y del residuo, R , que pasa a través de la parrilla, con respecto a la masa del combustible ensayado, siguiendo la expresión que se detalla a continuación.

$$C_r = R \cdot \frac{b}{100} \quad (8)$$

Finalmente, el porcentaje de pérdidas de calor sensible en los humos se calcula mediante la siguiente expresión.

$$q_a = \frac{100 \cdot Q_a}{H_u} \quad (9)$$

5.3.2 Pérdidas de calor latente en los humos

El calor latente corresponde a la energía requerida por una sustancia para que cambie de estado, en donde no ocurren variaciones de temperatura. Para el cálculo de las pérdidas de calor latente se empleará la siguiente ecuación.

$$Q_b = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{0,536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100} \quad (10)$$

En donde, el porcentaje de pérdidas de calor latente en los humos está dado por la siguiente expresión.

$$q_b = \frac{100 \cdot Q_b}{H_u} \quad (11)$$

5.3.3 Pérdidas térmicas debidas a los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla

Las pérdidas térmicas debidas a los constituyentes combustibles en los residuos ocurren debido a que el pellet durante la combustión se va degradando y disminuyendo su tamaño, por consiguiente, parte del pellet que se está quemando en el quemador principal cae sobre el segundo y finalmente al cenicero, donde se enfría y detiene su combustión. Este porcentaje de pellet no combustionado, en conjunto con las cenizas constituyen una pérdida de calor que se deberá considerar al momento de calcular el rendimiento y potencia del calefactor.

Para ello, se deberán emplear las siguientes ecuaciones, en donde, Q_r son las pérdidas térmicas por los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla, con respecto a la unidad de masa de combustible de ensayo y q_r es el porcentaje de pérdidas térmicas a través de los constituyentes combustibles en los residuos que pasan a través de la parrilla, con respecto al poder calorífico del combustible de ensayo.

$$Q_r = \frac{335 \cdot b \cdot R}{100} \quad (12)$$

$$q_r = \frac{100 \cdot Q_r}{H_u} \quad (13)$$

5.4 Periodos de ensayo

Los ensayos de funcionamiento deben presentar las condiciones necesarias para alcanzar la potencia térmica nominal. Para ello, se establecen dos periodos, uno de encendido y uno o más periodos previos al ensayo y el periodo de ensayo a régimen continuo.

5.4.1 Ensayo de verificación de funcionamiento

Se realizarán ensayos de verificación de funcionamiento previo a los ensayos con mediciones, esto con la finalidad de ratificar el encendido, funcionamiento y las emisiones del calefactor.

Para ello, se ubicará el calefactor en un recinto abierto, se cargará de combustible y se encenderá para poner en funcionamiento. Una vez que el calefactor se encuentre en régimen se realizará una inspección visual a todo el equipo y a los gases de combustión para verificar la visibilidad de los humos.

Se registrarán las temperaturas en la salida del quemador y al interior de la tolva de almacenamiento de combustible y también el tiempo total requerido para el consumo del combustible.

5.4.2 Periodo de encendido

Para realizar el periodo de encendido en primer lugar se deberá limpiar el calefactor de todos los restos combustibles y cenizas de partidas anteriores, luego se debe cargar con el combustible necesario para la ejecución de los ensayos, aplicando la siguiente expresión.

$$B_{fl} = \frac{360000 \cdot P_n \cdot t_b}{H_u \cdot \eta} \quad (14)$$

Donde, B_{fl} es la masa de la carga de combustible en kilogramos; H_u es el poder calorífico inferior del combustible de ensayo; η es el rendimiento mínimo de acuerdo con la Norma Chilena 3282, el cual corresponde a un rendimiento del 75% [7]; P_n es la potencia térmica nominal en kW y t_b es el intervalo de duración mínimo de recarga para el calefactor, expresado en horas.

Una vez cargado el combustible para el ensayo se realiza el encendido inicial, en donde se deberá abrir por completo la entrada de aire hacia la cámara de combustión y luego se asistirá el encendido del calefactor con un soplete de gas butano hasta lograr que el combustible en el quemador comience a arder como se aprecia en la *Figura 5.7*.



Figura 5.7: Encendido del calefactor asistido por llama de gas butano-propano

El periodo de encendido finaliza una vez que la temperatura del calefactor no tenga variaciones mayores a 5°C por 30 minutos como mínimo.

5.4.3 Ensayo de funcionamiento

Una vez finalizado el periodo de encendido del calefactor se comenzará el ensayo de funcionamiento; en donde, se deberá cargar la tolva de almacenamiento de combustible con una masa conocida; posicionar las termocuplas y analizador de gases, luego, se deberán registrar las mediciones de temperatura y concentraciones de gases en intervalos de tiempo no mayores a 1 minuto. En cuanto al registro del consumo de combustible se realizará en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Para el presente modelo de calefactor se evaluarán 2 diámetros de ductos de evacuación de gases combustibles, uno de 80 milímetros y otro de 6 pulgadas; en los cuales se regulará la entrada de aire a la cámara de combustión para estimar su potencia y rendimiento bajo diferentes regímenes.

Capítulo 6: Resultados

En el siguiente capítulo se encuentran los resultados obtenidos de las mediciones realizadas al calefactor de pellet no eléctrico.

6.1 Ensayo de verificación de funcionamiento

El ensayo de verificación de funcionamiento se realizó en las afueras del laboratorio de termo fluidos (*Figura 6.1*), en donde se instalaron las termocuplas y analizador de gases para realizar las respectivas mediciones. Las condiciones iniciales del ensayo se detallan en la *Tabla 6.1* como tiempo 0; luego, se iniciaron las mediciones tras pasar 30 minutos de funcionamiento del calefactor y alcanzar un régimen constante de temperaturas.



Figura 6.1: Calefactor en ensayo de verificación de funcionamiento

Tabla 6.1: Mediciones obtenidas del ensayo de verificación de funcionamiento

Tiempo [min]	0	30	45	60	75
Masa de combustible [kg]	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5
Temperatura ambiente [°C]	19,8	30,8	33,0	34,1	33,7
Temperatura en el quemador [°C]	18,6	766,4	643,4	570,2	637,5
Temperatura en la tolva [°C]	19,2	27,4	36,1	42,5	42,8
Temperatura en los humos [°C]	18,9	317,3	298,8	306,5	318,4
Concentración de monóxido de carbono [ppm]	0	98	46	63	69
Concentración de dióxido de carbono [% m/m]	0	14,08	13,33	12,74	11,04

De la **Tabla 6.1** se puede concluir que se obtuvo un consumo de 2 kilogramos de combustible por cada hora; además, la temperatura máxima alcanzada al interior de la tolva fue de 42,8 °C y difiere tan solo por 10°C con la temperatura ambiental. Finalmente, incorporando los datos de la **Tabla 6.2** en las ecuaciones de pérdidas térmicas se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 6.2: Pérdidas térmicas obtenidas del ensayo de verificación de funcionamiento

Tiempo [min]	30	45	60	75
Pérdidas por calor sensible en los humos [kJ/kg]	2992	2894	3078	3620
Porcentaje de pérdidas de calor sensible en los humos [% m/m]	17,52	16,75	17,81	20,95
Pérdidas por calor latente en los humos [kJ/kg]	7,76	3,85	5,51	6,97
Porcentaje de pérdidas por calor latente en los humos [%m/m]	0,045	0,022	0,032	0,040
Rendimiento [%]	82,44	83,23	82,16	79,01

Del presente ensayo se obtuvo un rendimiento promedio del 81,71%; sin embargo, dichas mediciones no reflejan un resultado real, puesto que el calefactor se encuentra expuesto a variables externas, tales como la radiación solar y el viento. Además, no se consideran las pérdidas por constituyentes combustibles en las cenizas.

En la **Figura 6.2** se muestra la inspección visual a los gases de combustión del calefactor durante el régimen de funcionamiento, en donde se puede apreciar que no hay humos visibles en la salida del ducto.



Figura 6.2: Ducto de evacuación de gases de combustión durante ensayo de verificación de funcionamiento

6.2 Ensayo ducto chimenea de 6 pulgadas

Se realizó un ensayo de funcionamiento con un ducto de evacuación de gases de 6 pulgadas al interior del laboratorio de termo fluidos como se aprecia en la **Figura 6.3**, en dicho ensayo se registraron las temperaturas del ambiente, temperatura de los humos, concentraciones de gases y se realizaron termografías a las superficies del calefactor durante el funcionamiento.



Figura 6.3: Calefactor con ducto de evacuación de gases de 6 pulgadas

A continuación, se detallan las mediciones obtenidas en el ensayo.

6.2.1 Temperaturas registradas al interior y exterior del calefactor

En el gráfico de la **Figura 6.4** se muestra la curva de temperatura en los humos, en donde existen variaciones de temperatura según la condición de apertura de aire hacia la cámara de combustión.

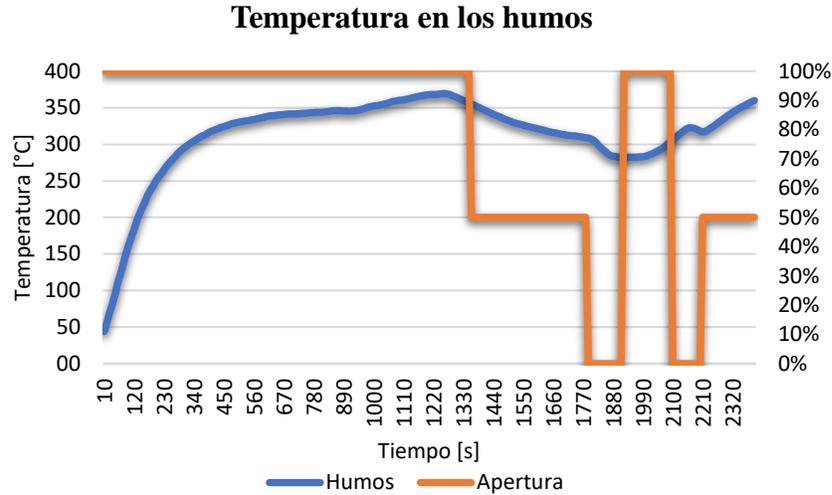


Figura 6.4: Variación de temperatura en los humos según la apertura de la entrada de aire en la cámara de combustión

Es posible observar que en el periodo de tiempo 0-560 segundos el calefactor se encontraba en su periodo de calentamiento, luego de ello la temperatura se estabiliza a los 350°C aproximadamente. Luego, a partir del segundo 1330 se restringe la entrada de aire al 50% y 0%, en donde la temperatura disminuye y finalmente se vuelve a abrir la entrada de aire por lo cual ocurre un nuevo aumento de temperatura en los humos.

La temperatura ambiente se registra en la **Figura 6.5**, la cual fue tomada a 1 metro de distancia del calefactor. Es posible apreciar que la temperatura ambiente presentó un carácter lineal ascendente hasta alcanzar una temperatura máxima de 28 °C.

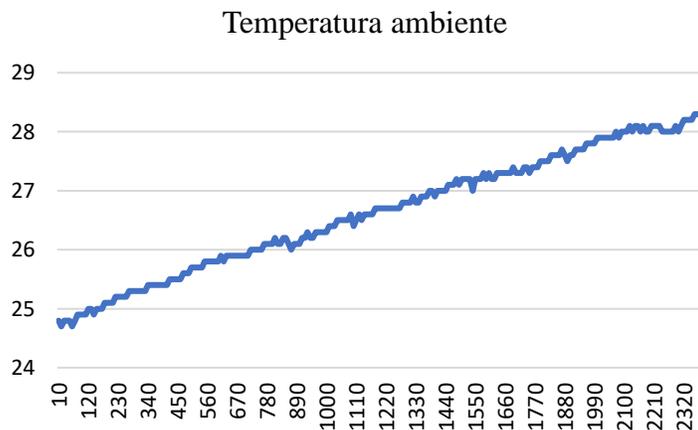


Figura 6.5: Temperatura ambiente a 1 metro de distancia del calefactor

6.2.2 Análisis de gases

En el análisis de gases se registraron las concentraciones de oxígeno, monóxido y dióxido de carbono, las cuales se detallan en las siguientes figuras.

En la **Figura 6.6** se presenta la curva de concentración de monóxido de carbono obtenida durante todo el ensayo. Es posible apreciar que al final del ensayo la concentración de monóxido de carbono sobrepasa las 3500 partes por millón, lo anterior se debe al cierre total y parcial de la entrada de aire, lo cual conlleva a una mala combustión y un aumento en las concentraciones de material particulado.

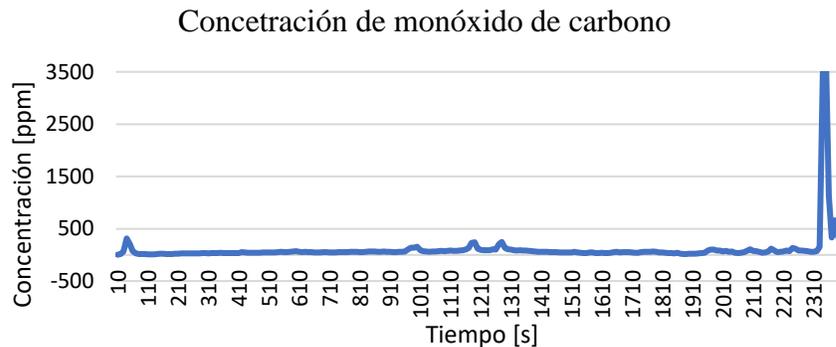


Figura 6.6: Concentración de monóxido de carbono en salida de gases de combustión de 6 pulgadas

Para efectuar un correcto análisis de la concentración de monóxido de carbono se realizó un segundo gráfico, el cual se detalla en la **Figura 6.7**, donde también se incluye el porcentaje de apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.

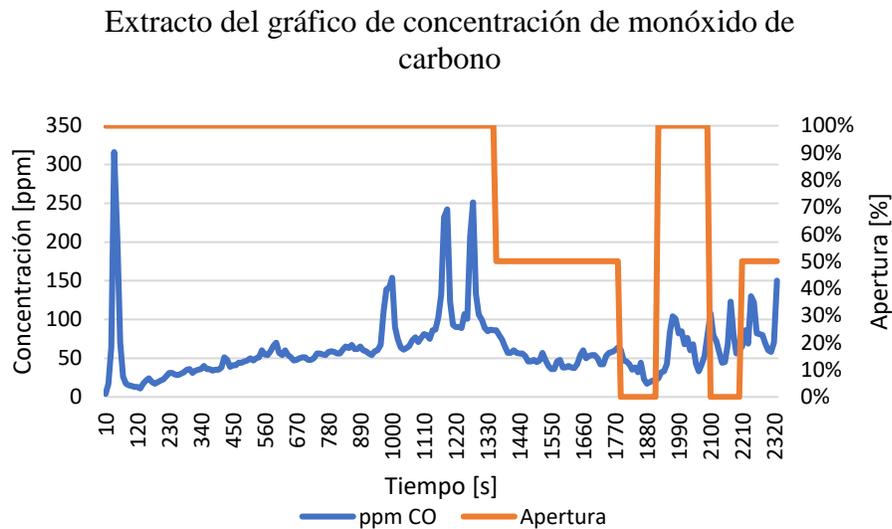


Figura 6.7: Extracto del gráfico de concentración de monóxido de carbono

Durante el ensayo se aprecia que las concentraciones de monóxido de carbono fluctúan en torno a las 50 partes por millón y existen variaciones puntuales que alcanzan las 300 partes por millón; lo que se traduce en una media de 0,00697% cumpliendo los estándares establecidos por la norma [7] indicados en la **Sección 1.3**.

La variación de la concentración de oxígeno y dióxido de carbono con respecto a la apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión se detalla en la **Figura 6.8**.

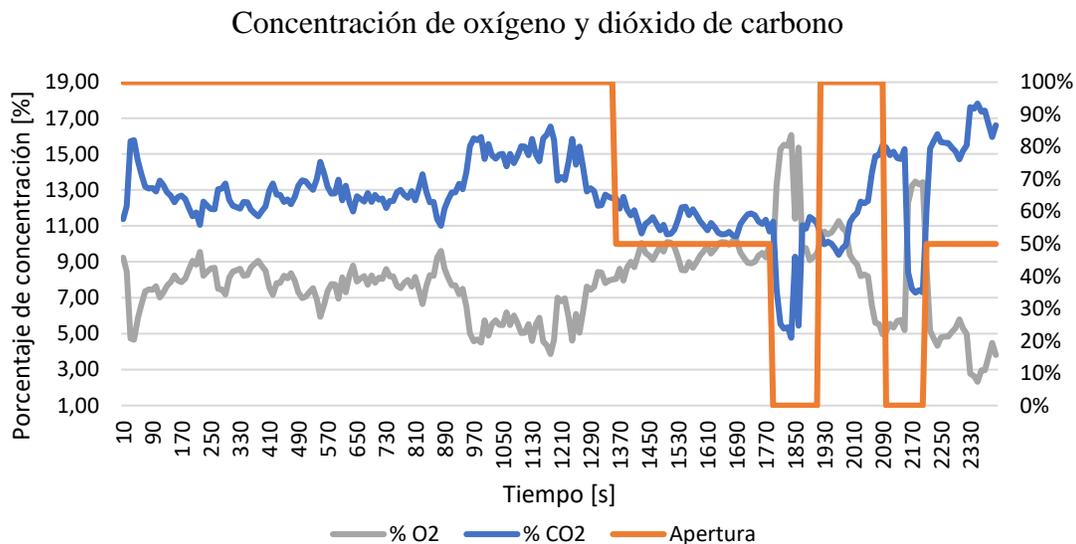


Figura 6.8: Concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la salida de gases de 6 pulgadas

Es posible apreciar que las concentraciones son inversamente proporcionales y, además, se observa que al cerrar la entrada de aire a la cámara disminuye la tasa de combustión por lo que aumenta la concentración de oxígeno y disminuye la concentración de dióxido de carbono.

6.2.3 Termografías

A continuación, se presentan diversas termografías, las cuales nos apreciar las temperaturas superficiales de cada uno de los componentes del calefactor mientras se encuentra en funcionamiento.

En la **Figura 6.9** se presenta una termografía completa del calefactor, donde se observa que la mayor temperatura se presenta en los dos primeros tramos del ducto W, alcanzando una temperatura de 514,7°C, además, se observa que tanto como la cubierta trasera y la tolva presentan temperaturas superficiales inferiores a 150°C.

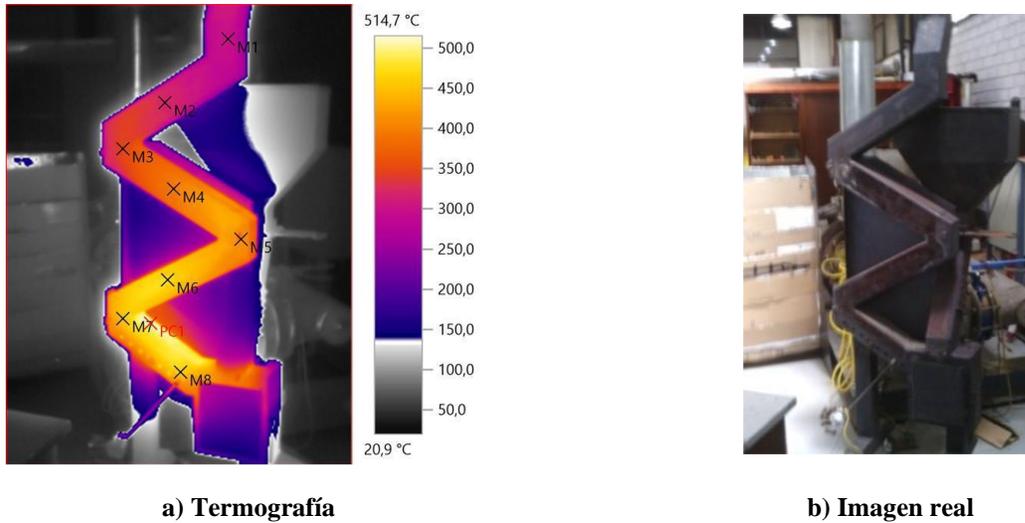


Figura 6.9: Termografía completa del calefactor en funcionamiento

En la **Tabla 6.3** se registran las temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.9**, en donde se aprecia que en el centro de los ductos (Medición M2, M4, M6 y PC) las temperaturas son mayores que en los extremos.

Tabla 6.3: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.9

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	Punto más caliente
Temperatura [°C]	229,1	255,3	286,9	348,2	342,4	452,3	429,4	440,6	514,7

En la **Figura 6.10** se presenta la termografía de la cámara de combustión y entrada de aire, donde se aprecia que la mayor temperatura exterior se desarrolla en la salida del quemador hacia los ductos de gases de combustión.

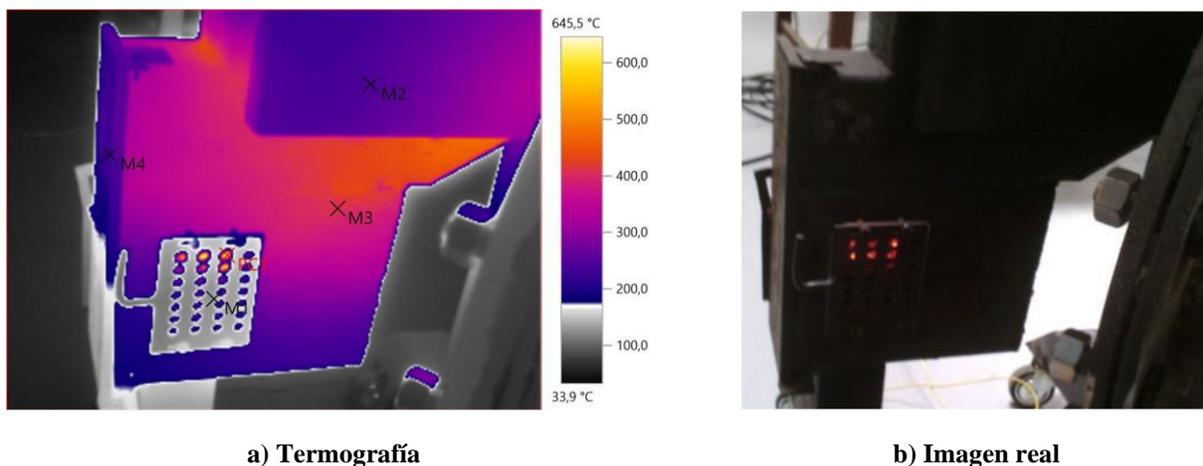


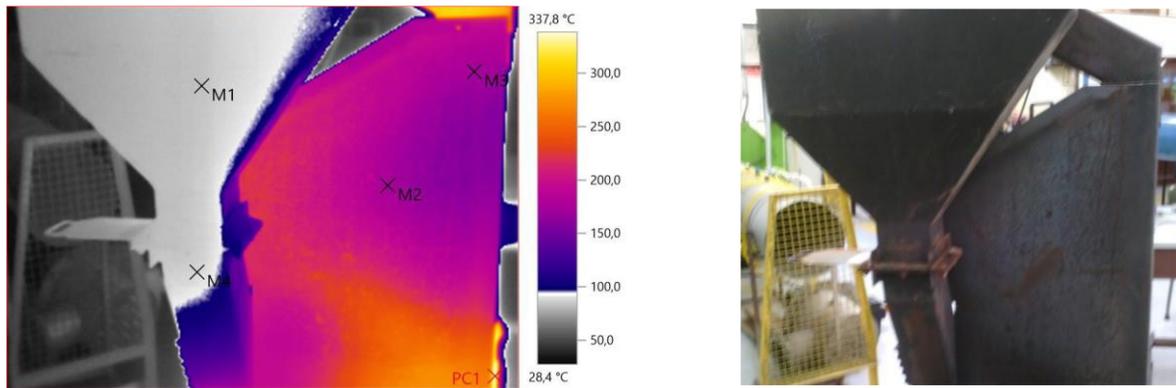
Figura 6.10: Termografía de la cámara de combustión y entrada de aire

En la **Tabla 6.4** se registran las temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.10**, de donde se detalla que la máxima temperatura exterior de la cámara de combustión es de 337,3°C; el sistema de bloqueo de entrada de aire a la cámara de combustión alcanza los 78,3°C, la puerta de la cámara de combustión ronda los 150°C y la carcasa exterior que da hacia la pared de la habitación donde se instalará alcanza los 167,2°C.

Tabla 6.4: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.10**

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	Punto más caliente
Temperatura [°C]	78,3	167,2	337,3	150,8	645,5

En la **Figura 6.11** se muestra la termografía realizada a la parte posterior del calefactor, en donde se encuentra la tolva de almacenamiento de combustible y la carcasa exterior del calefactor.



a) Termografía

b) Imagen real

Figura 6.11: Termografía de la tolva de almacenamiento de combustible y cubierta de los ductos de gases de combustión

En la **Tabla 6.5** se detallan las temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.11**, donde se observa que la tolva de almacenamiento de combustible en conjunto con el sistema de corte de suministro no supera los 100°C y la carcasa exterior presenta una temperatura promedio cercana a los 200°C. El punto más caliente indicado en la termografía corresponde a la curva de los ductos de gases de combustión

Tabla 6.5: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.11**

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	Punto más caliente
Temperatura [°C]	58,1	135,4	130,1	61,3	337,8

6.2.4 Consumo de combustible y constituyentes combustibles en cenizas

En el presente ensayo se cargaron 3 kilogramos de combustible en la tolva y el consumo de combustible ensayo se estimó de manera empírica midiendo el nivel de combustible cada 15 minutos, de donde se obtuvo que el consumo durante el periodo de tiempo fue de 0,5 kilogramos, lo que conlleva a un consumo de 2 kilogramos de combustible por hora.

Para el cálculo de los constituyentes combustibles se registró una masa de 46 gramos de ceniza, luego, se separaron los pellets no combustionados y se obtuvo una masa de 24 gramos de constituyentes combustibles en las cenizas.

6.2.5 Pérdidas de calor, rendimiento y potencia neta

Considerando las mediciones presentadas anteriormente e incorporándolas a las ecuaciones de pérdidas térmicas, se obtienen los siguientes valores.

Tabla 6.6: Pérdidas térmicas en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas

Perdidas por calor sensible en los humos [kJ/kg]	Perdidas por calor latente en los humos	Perdidas por constituyentes combustibles en los residuos
3389,69	8,10	184,00

Con los datos de la **Tabla 6.6** se obtiene el rendimiento promedio del calefactor, el cual se presenta en la **Figura 6.12** en conjunto al porcentaje de cada una de las pérdidas.

Perdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas

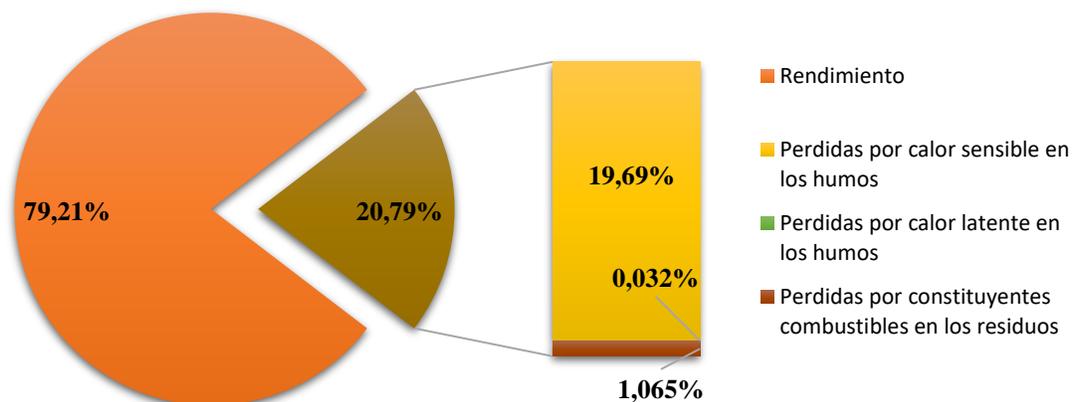


Figura 6.12: Rendimiento y pérdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas

En la **Tabla 6.7** se detallan los porcentajes de las pérdidas térmicas presentadas en la gráfica de la **Figura 6.12**.

Tabla 6.7: Porcentaje de rendimiento promedio y pérdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 6 pulgadas

Rendimiento	Perdidas por calor sensible en los humos	Perdidas por calor latente en los humos	Perdidas por constituyentes combustibles en los residuos
79,21%	19,69%	0,032%	1,065%

En la **Figura 6.13** se grafica la potencia térmica total del calefactor durante el ensayo, la cual se contrasta con la apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.

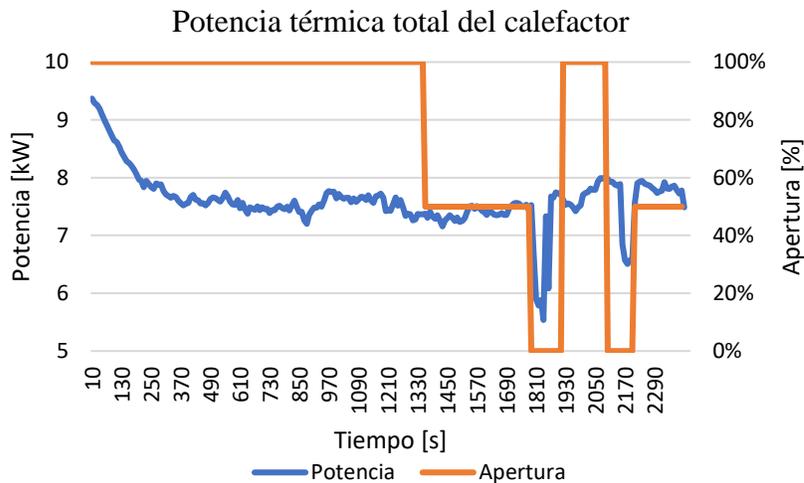


Figura 6.13: Potencia térmica total del calefactor con un ducto de evacuación de gases de 6 pulgadas

Se observa en la gráfica como la potencia disminuye hasta estabilizarse en una potencia cercana a los 7,5 kW, lo anterior se debe a que al inicio del ensayo el calefactor se encontraba en su etapa de calentamiento y luego se estabilizan las temperaturas de los humos. Se aprecia que al cerrar completamente la entrada de aire de calefactor la potencia disminuye considerablemente debido a la disminución de la tasa de combustión.

Finalmente se estimó la media de la potencia térmica total a partir de la estabilización de la temperatura de los humos; obteniendo una potencia térmica media de 7,48 kW con un rendimiento medio de 77,84%.

6.3 Ensayo ducto chimenea de 80 milímetros

Se realizó un ensayo de funcionamiento con un ducto de evacuación de gases de 80 milímetros al interior del laboratorio de termo fluidos como se aprecia en la **Figura 6.14**, en dicho ensayo se registraron las temperaturas del ambiente, temperatura del quemador, temperatura de los humos, concentraciones de gases y se realizaron termografías a las superficies del calefactor durante el funcionamiento.



Figura 6.14: Calefactor con ducto de evacuación de gases de 80 milímetros

A continuación, se presentan las mediciones realizadas en el ensayo de funcionamiento del calefactor con un ducto de evacuación de gases de 80 milímetros, realizando variaciones en el control de la entrada de aire a la cámara de combustión.

6.3.1 Temperaturas registradas al interior y exterior del calefactor

En la gráfica de la **Figura 6.15** se presentan las variaciones de temperatura registradas al interior del calefactor, tanto como en la salida del quemador, como la registrada en los humos. La principal causa de la variación de estas temperaturas se debe al control de la apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.

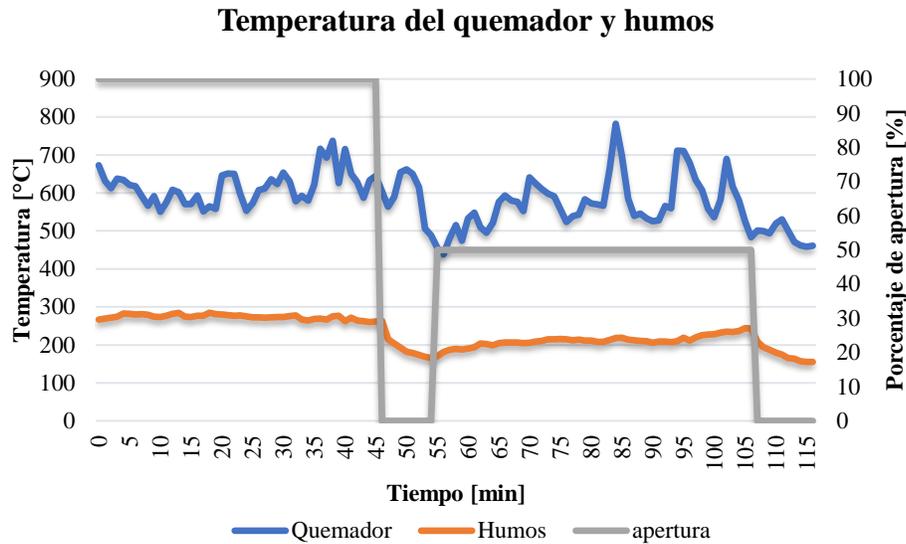


Figura 6.15: Variación de la temperatura en la salida del quemador y en los humos según el porcentaje de apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión

De la curva de la temperatura en los humos se deduce que esta disminuye conforme se cierra el paso de aire a la cámara de combustión.

En la gráfica de la **Figura 6.16** se registra la temperatura obtenida por la termocupla ubicada a 1 metro de distancia del calefactor, la cual mide la temperatura ambiente.

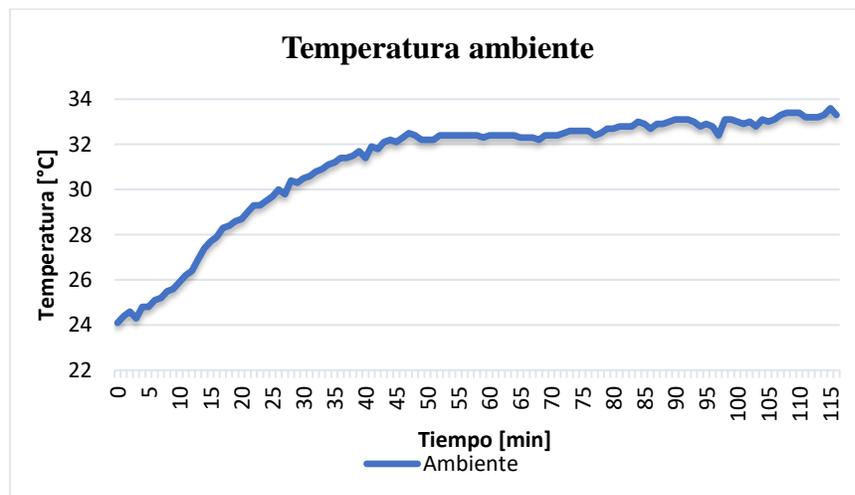


Figura 6.16: Temperatura ambiente registrada a 1 metro de distancia del calefactor

Se observa que la temperatura aumenta de los 24°C hasta una temperatura promedio de 33°C tras transcurrir 45 minutos de funcionamiento con la entrada de aire a la cámara de combustión abierta al 100%.

6.3.2 Análisis de gases

En el análisis de gases se registran las concentraciones de oxígeno, monóxido y dióxido de carbono contenida en los humos, las cuales se grafican en las siguientes figuras.

En la **Figura 6.17** se presenta la concentración de monóxido de carbono en los gases de combustión, en donde se puede observar que al estar abierta completamente la entrada de aire a la cámara de combustión se presentan concentraciones mínimas, cercanas a 50 partes por millón. Una vez cerrada por completo la entrada de aire las concentraciones de monóxido de carbono aumentan drásticamente hasta las 3500 partes por millón, lo anterior se debe a la baja tasa de combustión del pellet; una vez que se abre parcialmente la entrada de aire las concentraciones disminuyen y vuelven a estar dentro de los parámetros permitidos.

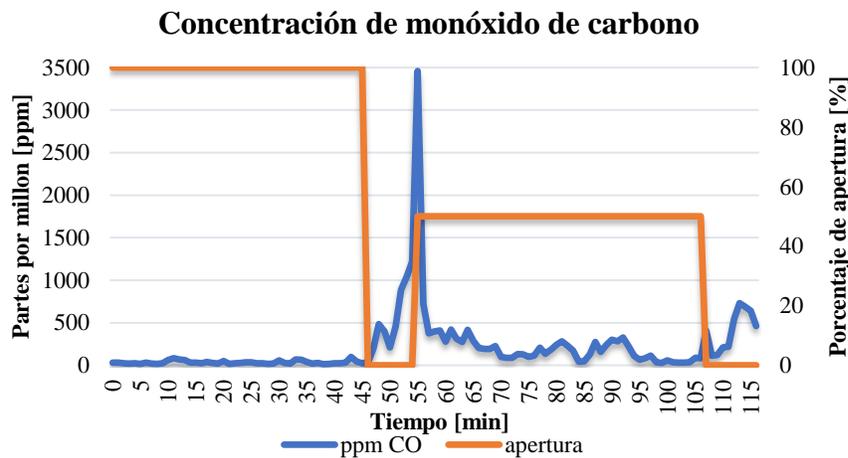


Figura 6.17: Concentración de monóxido de carbono en salida de gases de combustión de 80 milímetros

El promedio de las concentraciones de monóxido de carbono en la salida de gases de combustión con un ducto de 80 milímetros es de 292 partes por millón lo cual corresponde a un 0,029% y se encuentra dentro de la norma establecida [7] indicada en la **Sección 1.3**.

La concentración de oxígeno y dióxido de carbono se presentan en la **Figura 6.18**, las cuales se presentan en conjunto a la apertura de entrada de aire de la cámara de combustión. En la gráfica se aprecia como la concentración de oxígeno es inversamente proporcional a la del dióxido de carbono; además, se observa como al cerrar total o parcialmente la entrada de aire la concentración de oxígeno en los humos aumenta debido a la disminución de la tasa de combustión.

Concentración de oxígeno y dióxido de carbono

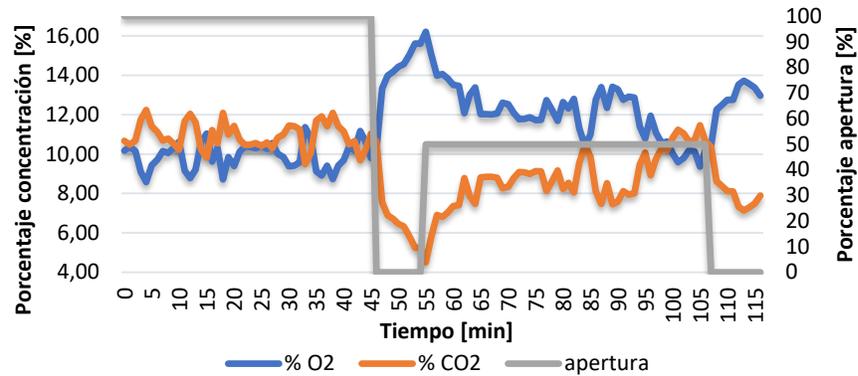
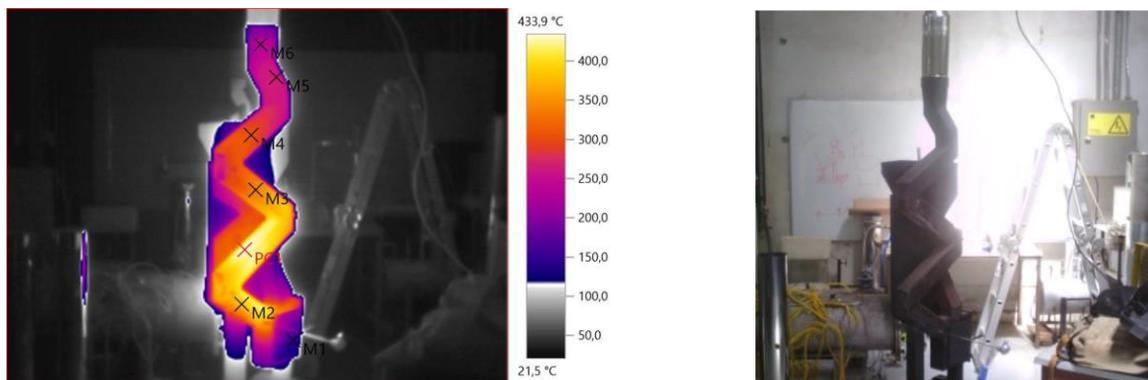


Figura 6.18: Concentración de oxígeno y dióxido de carbono en la salida de gases de combustión de 80 milímetros

6.3.3 Termografías

Las termografías realizadas en el presente ensayo nos brindan información acerca de las temperaturas superficiales de cada uno de los componentes del calefactor.

En primer lugar, en la **Figura 6.19** se presenta una termografía completa del calefactor en funcionamiento, en donde se aprecia que la mayor temperatura del calefactor se encuentra en el segundo tramo del ducto W; en donde, se alcanza una temperatura máxima de 433,9 °C.



a) Termografía

b) Imagen real

Figura 6.19: Termografía completa del calefactor en funcionamiento

En la **Tabla 6.8** se presentan las temperaturas registradas en cada uno de los puntos de medición indicados en la **Figura 6.19**.

Tabla 6.8: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la *Figura 6.19*

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Punto más caliente
Temperatura [°C]	95,3	356,6	303,5	256,1	208,3	180,3	433,9

En la *Figura 6.20* se presenta la termografía de los ductos de evacuación de gases, en donde se aprecia que la máxima temperatura se obtiene en el tramo inferior del ducto de 80 milímetros, alcanzando una temperatura de 144,7 °C.

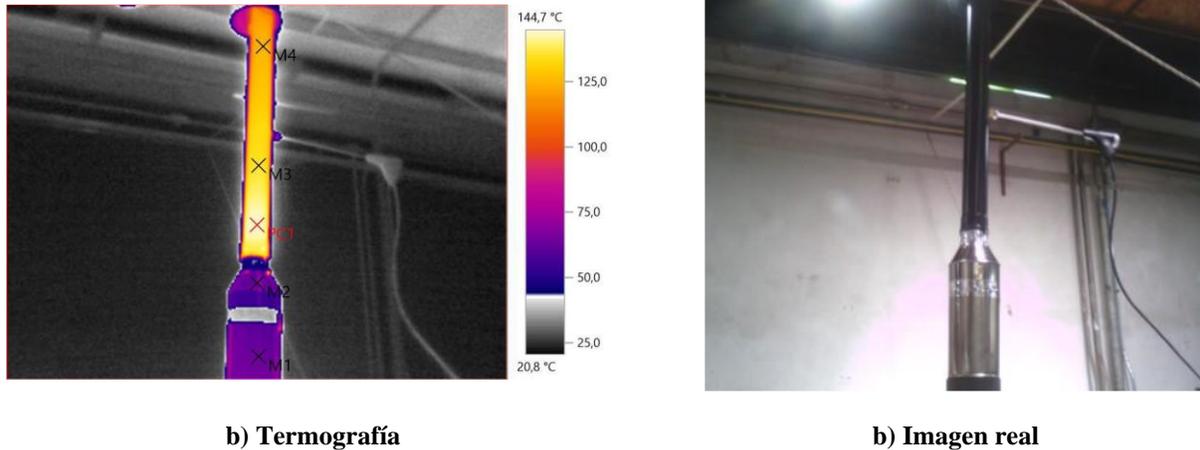


Figura 6.20: Termografía del tubo evacuador de gases combustibles del calefactor

En la *Tabla 6.9* se presentan las temperaturas obtenidas en los puntos de medición de la *Figura 6.20*, en donde se observa que en la parte inferior del ducto se alcanzan las mayores temperaturas, siendo estas de 144,7 °C; mientras que, en la parte superior, aproximadamente a 1 metro de distancia la temperatura desciende hasta los 118,8 °C.

Tabla 6.9: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la *Figura 6.20*

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	Punto más caliente
Temperatura [°C]	52,6	52,5	132,3	118,8	144,7

En la *Figura 6.21* se presenta la termografía realizada a la tolva de almacenamiento de combustible y cubierta exterior del calefactor.

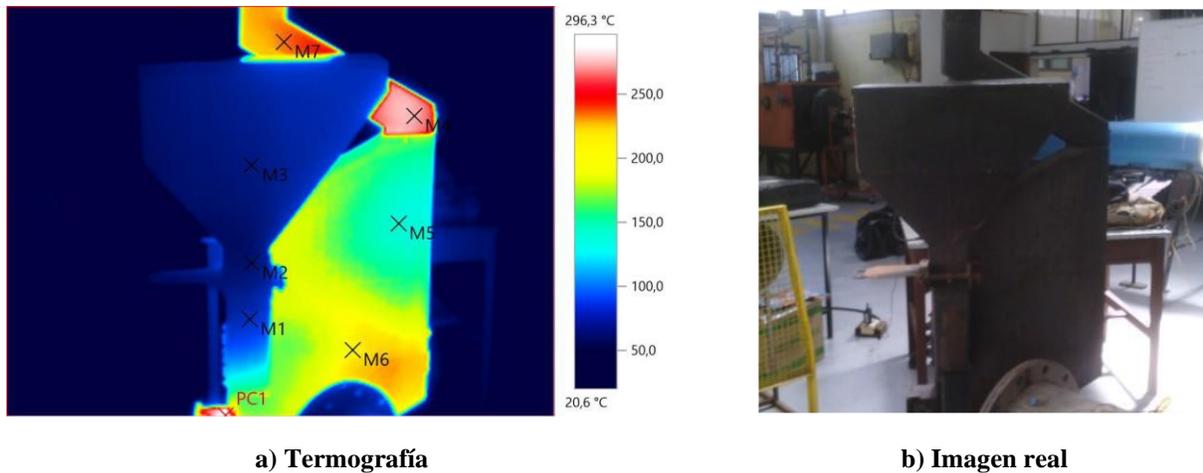


Figura 6.21: Termografía de la tolva de almacenamiento de combustible del calefactor

En la **Tabla 6.10** se presentan las temperaturas registradas de los puntos de medición de la **Figura 6.21**, en donde se observa que la temperatura de la tolva junto con el sistema de corte de suministro no superan los 45 °C; además, la temperatura exterior del ducto de alimentación del quemador aumenta gradualmente hasta la unión con la cámara de combustión, sin embargo, la temperatura de este componente no supera los 150 °C. Los ductos tras la cubierta se encuentran a una temperatura mayor a 265 °C (Punto de medición M4); sin embargo, la temperatura superficial de la cubierta en su superficie que da hacia la pared del recinto donde se instalará no supera los 250 °C.

Tabla 6.10: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.21

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	Punto más caliente
Temperatura [°C]	52,9	41,6	43,6	264,5	99,7	176,0	209,8	296,3

En la **Figura 6.22** se presenta la termografía realizada a la cámara de combustión y entrada de aire; en donde se realizaron mediciones a la cámara de combustión, sistema de bloqueo de la entrada de aire, puerta de la cámara de combustión, ducto de gases de combustión y cubierta exterior del calefactor.

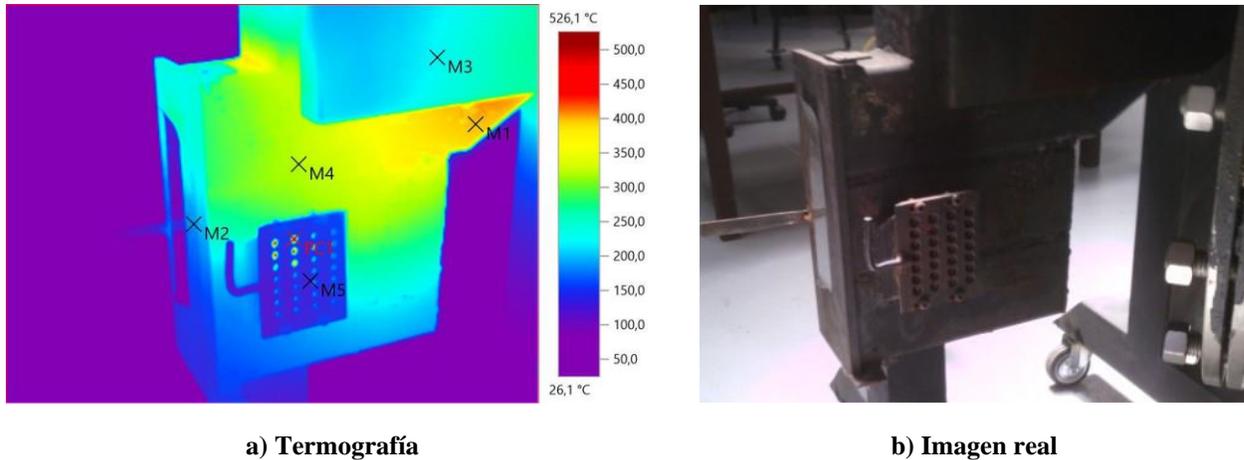


Figura 6.22: Termografía de la cámara de combustión y entrada de aire

En la **Tabla 6.11** se registran las temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.22**, de donde se obtiene que la máxima temperatura alcanzada por la cámara de combustión (Punto de medición M4) es de 261 °C; la puerta de la cámara de combustión registra temperaturas cercanas a los 200 °C en su superficie; mientras que el sistema de bloqueo de entrada de aire presenta la temperatura más baja, siendo esta de 81 °C.

Tabla 6.11: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.22

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	M5	Punto más caliente
Temperatura [°C]	348,3	123,6	152,9	261,5	81,0	526,1

En la **Figura 6.23** se presenta una termografía realizada a los componentes internos de la cámara de combustión; en donde se observa el quemador principal con pellet en combustión y las paredes exteriores del quemador secundario y cenicero.

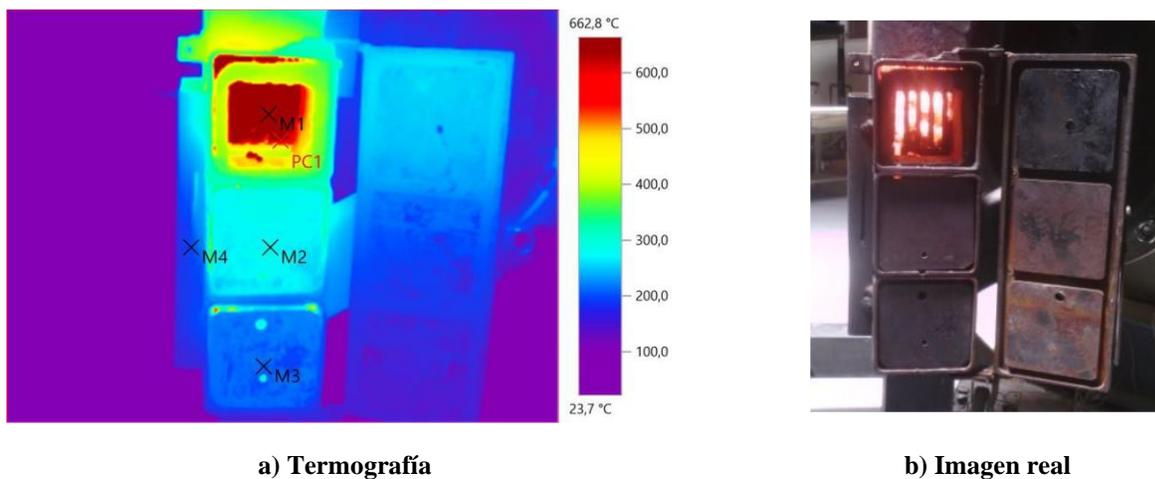


Figura 6.23: Termografía del interior de los componentes internos de la cámara de combustión

En la **Tabla 6.12** se presentan las temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la **Figura 6.23**, en donde se observa que la máxima temperatura registrada es de 662 °C en las cercanías del quemador principal; el punto de medición M1, corresponde al pellet en combustión, el cual se encuentra a una temperatura mayor a 675 °C, puesto que esa es la temperatura máxima que puede registrar la cámara termográfica. Se observa que tanto como el quemador secundario y el cenicero presentan temperaturas inferiores a los 185 °C.

Tabla 6.12: Temperaturas obtenidas de los puntos de medición de la Figura 6.23

Objeto de medición	M1	M2	M3	M4	Punto más caliente
Temperatura [°C]	Fuera de rango	185,5	123,1	117,8	662,8

6.3.4 Consumo de combustible y constituyentes combustibles en cenizas

En el presente ensayo la carga de combustible se fue reponiendo conforme avanzaba el periodo de tiempo, en donde se estimó el consumo de combustible de manera empírica tras registrar el nivel de combustible al interior de la tolva. A continuación, en la **Tabla 6.13** se presenta el registro del nivel de combustible durante el ensayo.

Tabla 6.13: Registro del nivel de combustible al interior de la tolva durante el ensayo del calefactor con ducto de 80 milímetros

Tiempo [min]	0	15	15	30	45	45	60	75	90	115
Nivel de combustible [kg]	4,0	3,25	4,0	3,5	3,0	4,0	3,75	3,25	3,0	2,25

En la gráfica de la **Figura 6.24** se presenta el consumo registrado por el calefactor a lo largo del ensayo en función de la apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.

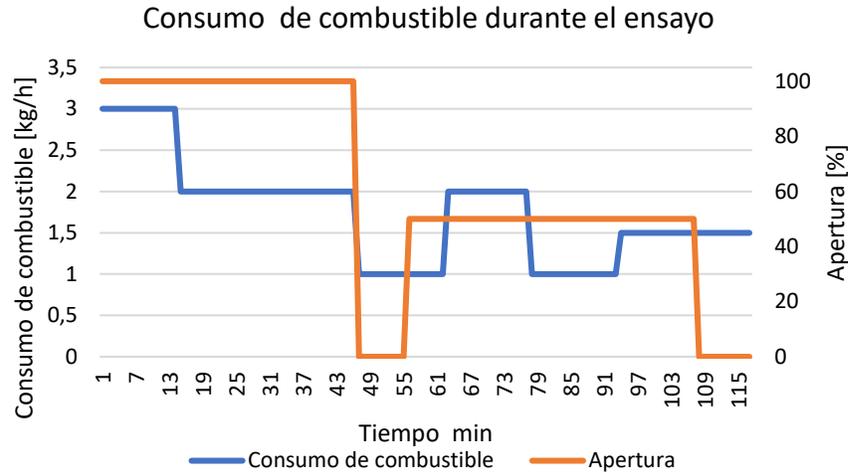


Figura 6.24: Consumo de combustible durante el ensayo de calefactor con ducto de evacuación de gases de 80 milímetros

Durante los primeros 15 minutos de ensayo se registró una mayor tasa de combustión, lo cual genera una mayor temperatura en la salida del quemador y un mayor consumo de combustible. Luego, se tiene una tasa de combustión más estable con un consumo de combustible aproximado de 2 kilogramos por hora; al momento de cerrar la entrada de aire a la cámara de combustión disminuye la tasa de combustión lo cual genera un menor consumo de combustible, en este caso, se obtuvo un consumo de 1 kilogramo por hora al estar completamente cerrada la entrada de aire y un consumo promedio de 1,5 kilogramos por hora al estar abierta en un 50% la entrada de aire a la cámara de combustión.

Para la estimación de los constituyentes combustibles se registró una masa de 117 gramos de cenizas tras combustionar 6 kilogramos de pellet de madera; en donde, se registró una masa de 53 gramos de constituyentes combustibles en los residuos.

6.3.5 Pérdidas de calor, rendimiento y potencia neta

Considerando las mediciones presentadas anteriormente e incorporándolas a las ecuaciones de pérdidas térmicas, se obtienen los siguientes valores presentados en la **Tabla 6.14**.

Tabla 6.14: Pérdidas térmicas en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros

Pérdidas por calor sensible en los humos [kJ/kg]	Pérdidas por calor latente en los humos	Pérdidas por constituyentes combustibles en los residuos
2897,02	32,88	295,92

Con los datos de la **Tabla 6.14** se obtiene el rendimiento promedio del calefactor, el cual se presenta en la **Figura 6.25** en conjunto al porcentaje de cada una de las pérdidas.

Pérdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros

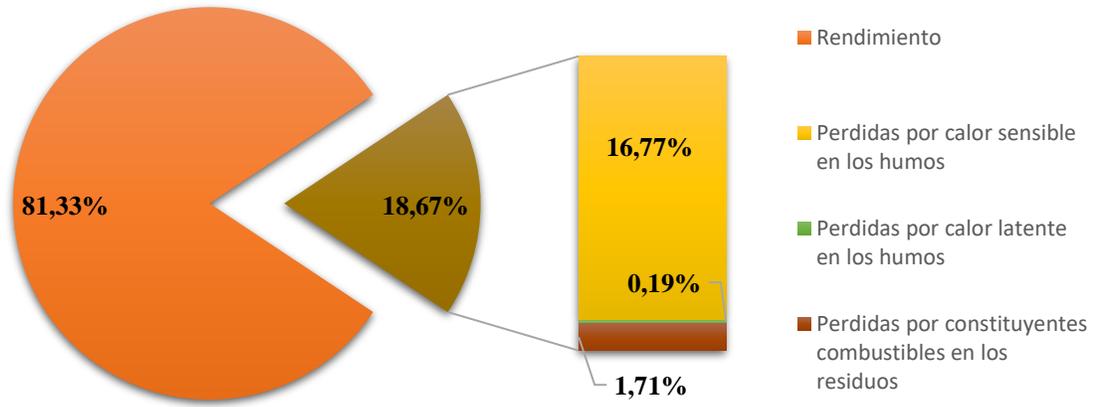


Figura 6.25: Rendimiento y pérdidas de calor en el calefactor con salida de gases de 80 milímetros

Finalmente, en la **Figura 6.26** se presenta la gráfica de la potencia térmica total del calefactor registrada en el ensayo, en donde se consideró un consumo de combustible promedio de 1,75 kilogramos por hora; la cual se contrasta con la apertura de la entrada de aire a la cámara de combustión.

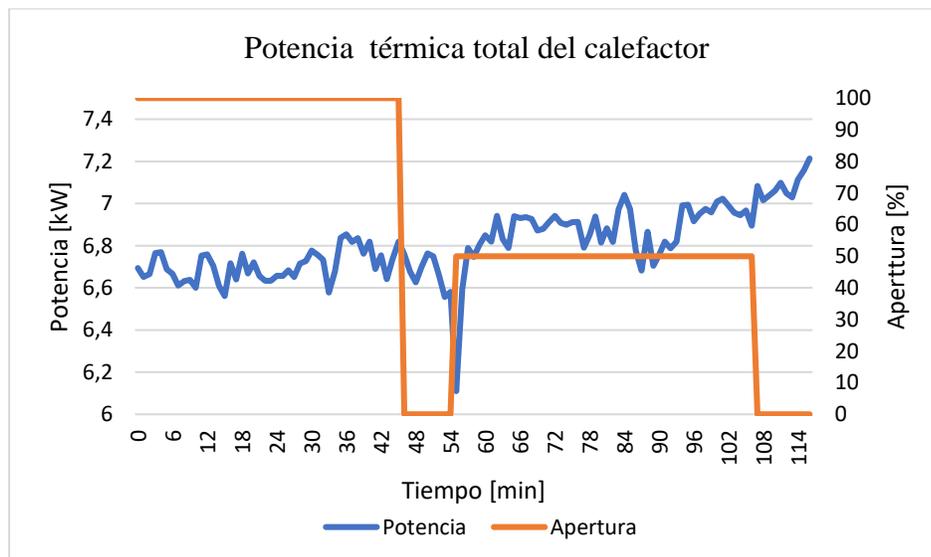


Figura 6.26: Potencia neta del calefactor con salida de gases de combustión de 80 milímetros.

En el gráfico se observa que se mantiene una media de potencia de 6,7 kW al estar completamente abierta la entrada de aire; luego, al cerrar la entrada de aire disminuye abruptamente la potencia, puesto que se disminuye la tasa de combustión. Una vez que se vuelve a abrir la entrada de aire restringiendo el paso en un 50% se obtiene una potencia mayor superando los 7 kW.

Finalmente se estimó que para el presente ensayo la media de la potencia térmica total es de 6,8 kW, con un rendimiento del 81,14% considerando un ducto de evacuación de gases de 80 milímetros.

Capítulo 7: Conclusiones y perspectivas

7.1 Conclusiones

En la presente investigación se propuso el diseño y fabricación de un calefactor a combustión de pellet no eléctrico, el cual debía cumplir con los estándares y normativas vigentes que regulan la fabricación y funcionamiento de los calefactores domiciliarios en Chile.

En primer lugar, se evaluaron diferentes aspectos técnicos de calefactores a combustión de pellet no eléctricos comercializados en el país y en el extranjero. Basándose en los modelos existentes se realizaron dos propuestas de diseño para la posterior fabricación de uno de ellos; la selección del modelo a fabricar se realizó en base los aspectos constructivos y funcionales, en donde se eligió el segundo modelo propuesto, puesto que presentaba mayores prestaciones y un menor costo en la fabricación.

Una vez seleccionado y construido el modelo del calefactor se establecieron los ensayos y pruebas a realizar para cumplir con los estándares existentes; para ello, se realizaron ensayos bajo la Norma Chilena 3282, la cual establece los requisitos y métodos de ensayo para el funcionamiento, tales como la medición de las temperaturas internas y externas del calefactor, límites en las concentraciones de gases en los humos y consumo de combustible bajo diferentes regímenes de funcionamiento.

En los ensayos se estudiaron los parámetros de funcionamiento dependiendo de las condiciones de apertura de aire a la cámara de combustión y del diámetro de la salida de gases de combustión; donde se evidencio que no se presentan mayores variaciones en el rendimiento del equipo, el cual ronda el 80%; de donde, a menor diámetro del ducto de salida de gases de combustión se obtuvieron menores pérdidas térmicas, lo que conlleva a un mayor rendimiento; sin embargo, se obtuvo mayor potencia de calefacción con un diámetro mayor de salida de gases de combustión debido a un mayor consumo de combustible.

Finalmente, en base a la presente investigación y ensayos realizados se concluye que es posible la fabricación y utilización de un calefactor a combustión de pellet que prescinda de componentes eléctricos para su funcionamiento, el cual presenta una potencia térmica nominal de 7 kW, con un consumo promedio de 1,5 kg/h de pellet al utilizar un ducto de evacuación de gases de 80 milímetros. En cuanto a la composición de los gases de combustión; se determinó que fuera del periodo de encendido y apagado del calefactor los parámetros de concentraciones se encuentran dentro de los rangos establecidos por las normas nacionales.

7.2 Trabajos futuros

Con la finalidad de incrementar la transferencia de calor y sensación de confort hacia el ambiente en donde se instale el calefactor se propone la incorporación de aletas en el ducto de gases de combustión, lo que conllevará a una mayor superficie activa permitiendo mayor transferencia térmica; además, se propone la incorporación de un cristal vitrocerámico en el segundo tramo del ducto de gases de combustión el cual permitirá visualizar la llama del calefactor brindando una mayor sensación de confort y calidez para el usuario.

Por otro lado, para mejorar la funcionalidad del equipo y disminuir las pérdidas térmicas se propone el cambio del sistema de corte de alimentación de la tolva de combustible por uno del tipo damper que permita la regulación manual del paso del combustible mediante la apertura por giro de este. Por otro lado, para disminuir las pérdidas térmicas se deberán instalar sellos de junta en cada una de las uniones pernadas y en la puerta de la cámara de combustión para así evitar las entradas de aire y/o filtraciones de gases de combustión.

Tal como se expone en la presente investigación, se realizaron diferentes ensayos al calefactor, los cuales difieren en el nivel de precisión; por lo que se propone para una posterior investigación normalizar un banco de ensayos que permita correctas mediciones, tales como, mejorar el sistema de medición de consumo de combustible con una balanza digital con registro de datos automático; utilización de data logger para el registro los datos obtenidos por las termocuplas; instalación de ducto de evacuación de gases y extractor hacia las afueras del recinto de pruebas, el cual permita la regulación de la presión de salida de los gases de combustión por tiro forzado.

Referencias

- [1] C. Yáñez, A. Fissore, and A. Leiva, “Informe final de usos de la energía de los hogares Chile 2018,” 2019. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/informe_final_caracterizacion_residencial_2018.pdf
- [2] Ministerio del Medio Ambiente, “REPORTE EVOLUCIÓN DE EPISODIOS CRÍTICOS PARA MP2,5,” 2021. <https://airechile.mma.gob.cl/download/Reporte-Anual-MP25-2021.pdf> (accessed Sep. 06, 2022).
- [3] Ministerio de Energía, “Estrategia de transición energética residencial,” 2020. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_de_transicion_energetica_residencial13082020.pdf
- [4] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, *Decreto-19 - REGLAMENTA PROGRAMA DE INTEGRACIÓN SOCIAL Y TERRITORIAL, Y MODIFICA DS N° 1, (V. Y U.), DE 2011, REGLAMENTO DEL SISTEMA INTEGRADO DE SUBSIDIO HABITACIONAL*. Congreso Nacional de Chile, 2020. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1092547>
- [5] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, “Resolución 277 Exenta,” 2021. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1157936> (accessed Mar. 20, 2023).
- [6] Ministerio del Medio Ambiente, *Decreto 39 - ESTABLECE NORMA DE EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, PARA LOS ARTEFACTOS QUE COMBUSTIONEN O PUEDAN COMBUSTIONAR LEÑA Y PELLET DE MADERA*. Congreso Nacional de Chile, 2014. Accessed: Sep. 06, 2022. [Online]. Available: <https://ppda.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/07/Norma-de-emision-de-material-particulado-para-los-artefactos-que-combustionen-o-puedan-combustionar-lena-y-pellet-de-madera-DS-39-2012.pdf>
- [7] Ministerio del Medio Ambiente, “NCh 3282-2012-043 Calefacción Doméstica Pellets de Madera”.
- [8] J. C. Pinilla, K. Luengo, M. Navarrete, and F. Navarrete, *El pellet de madera en Chile - Su producción, su uso y su mercado*. Instituto Forestal, 2020. Accessed: Oct. 24, 2022. [Online]. Available: <https://bibliotecadigital.infor.cl/bitstream/handle/20.500.12220/30473/30473.pdf;jsessionid=E939D5F9B65C76CD2492774BBBEF1E2C?sequence=1>
- [9] Instituto Nacional de Normalización, *NCh-ISO17225/2 Biocombustibles sólidos - Especificaciones y clases de combustibles - Parte 2: Clases de pellets de madera*. 2017. Accessed: Oct. 08, 2022. [Online]. Available: <https://ecommerce.inn.cl/nch-iso172252201760847>

- [10] R. Langer, “How Does a Pellet Stove Work?,” Apr. 28, 2022. <https://www.pickhvac.com/pellet-stove/how-work/> (accessed Sep. 25, 2022).
- [11] L. Hepper and C. Williamson, “Pellet stove,” *United States Patent*, Aug. 06, 2011. <https://patentimages.storage.googleapis.com/2f/99/2e/be8c15f0d2a643/US8020547.pdf> (accessed Sep. 25, 2022).
- [12] R. Siuce, “Diseño de tolvas,” 2016. <https://es.slideshare.net/RamiroSIUCEBONIFACIO1/diseo-de-tolvas-63586969> (accessed Sep. 26, 2022).
- [13] European Pellet Council, *Directrices del EPC para el almacenamiento de pellets de madera*.
- [14] J. L. Míguez, J. C. Morán, E. Granada, and J. Porteiro, “Review of technology in small-scale biomass combustion systems in the European market,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 6, pp. 3867–3875, Aug. 2012, doi: 10.1016/J.RSER.2012.03.044.
- [15] Eva Stampaggi Srl, “PELLET STOVES INSTRUCTION MANUAL”.
- [16] Flameco, “Calefaccion a pellet sin electricidad.” <https://www.flameco.cl/tienda/estufa-flameco/> (accessed Sep. 29, 2022).
- [17] L. Sikanen and T. Vilppo, “Small Scale Pilot Combustion Experiments with Wood Pellets-The Effect of Pellet Length,” *The Open Renewable Energy Journal*, vol. 5, pp. 1–6, 2012, Accessed: Oct. 04, 2022. [Online]. Available: <http://www.tulituote.com/pdf/Thermorossi-pellettitakkaesite.pdf>
- [18] L. Yuliati, N. Hamidi, M. N. Sasongko, and I. A. Ibadurrhman, “KARAKTERISTIK PEMBAKARAN WOOD PELLET STOVE DENGAN VARIASI GEOMETRI DAN BLOCKAGE RATIO FLAME CONNECTOR,” *Rekayasa Mesin*, vol. 10, no. 3, 2019.
- [19] Daniel Cuevas, “Gasificación de biomasa y RSU en un reactor de gasificación Updraft modificado,” Universidad de Concepción, Concepción, 2019.