



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



Análisis experimental de la eficiencia y emisiones de un recuperador de calor en equipos a combustión de biomasa

POR

Hylido Bayron Vega Barra

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:
Dr. Óscar Francisco Farías Fuentes

Marzo 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Hylido Bayron Vega Barra

© 2024 Hyldo Bayron Vega Barra

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

Resumen

En el año 2021 el consumo de biomasa se posiciona en el segundo puesto de la oferta de energía primaria con un 25 %, el uso de este combustible por parte del sector residencial para calefacción y cocción de alimentos se ha extendido hasta aproximadamente 1 721 000 hogares, los cuales son responsables del 98,47 % del consumo total anual de leña. A pesar de ser considerada un recurso renovable, en el año 2020 se considera el consumo de biomasa por parte del sector residencial como el causante de casi el 90 % de las emisiones de MP2,5, incluyendo cerca del 70 % de emisiones de CO y VOC, afectando a la salud de los seres vivos, vegetación, reduciendo la visibilidad y contribuyendo negativamente al cambio climático de una manera significativa, entre otros efectos.

Con el fin de mitigar este efecto se han desarrollado bastantes alternativas presentes en el mercado, no obstante, muchas abordan el problema de las emisiones de MP y no los problemas de pérdida energética en estos equipos, ni la emisión de gases producto de la combustión. Se propone una solución capaz de abordar estos problemas asociados al proceso de combustión, el cual consiste en un sistema de recuperación de calor y reducción de emisiones, capaz de minimizar las pérdidas energéticas y aumentar el rendimiento del sistema, mitigando los efectos nocivos en el ambiente.

El “Prototipo” desarrollado en este proyecto es capaz de recuperar las pérdidas térmicas gracias a calentar un estanque con agua sanitaria de aproximadamente 70 L desde los 16°C hasta los 60°C, utilizando sólo una carga de combustible, la cual para el sistema de combustión evaluado (Cocina 1) ronda los $2,35 \pm 0,24$ kg de leña. Debido a esto, el Prototipo aumenta la eficiencia energética en más de un 30 % y la potencia en más de 3 kW para la mayoría de las condiciones evaluadas, logrando un rendimiento global sobre un 89 %.

Sólo a través de la recuperación de calor, con el Prototipo se logra reducir alrededor de un 80 % las emisiones de MP2,5, esto es bastante satisfactorio considerando que, si se solucionan los problemas de infiltración de aire al integrar el precipitador electrostático, utilizando ambos sistemas en conjunto se espera obtener una reducción de emisiones de MP2,5 aún más considerable, debido a las evidencias de una alta eficiencia en la captura de moléculas de los precipitadores.

Palabras clave: Oferta primaria de energía, VOC (Compuestos Orgánicos Volátiles), MP2,5, Recuperador de calor, Precipitador electrostático.

Agradecimientos

En primer lugar, le agradezco a mis padres por inculcarme los valores, fuerza y tenacidad, para poder resistir ante las peores adversidades de mi vida, las cuales desafortunadamente coincidieron en el momento más crítico. Disculpen padres por tanto dolor y problemas que les estoy causando.

Gracias hermanito Luciano, “Darkasper” no imaginas la cantidad de veces que estuve a punto de rendirme en los momentos finales, pero tus mensajes, tu amor, motivarnos con proyectos y canciones juntos, entre tantas cosas hermosas de parte tuya que me han salvado de la oscuridad.

Gabriela Neira, sin tu cariño y aguante no estaría aquí. Sólo tú sabes mi verdadero dolor, cuantas horas diarias de insomnio, cuanto esfuerzo en cosas tan triviales como levantarme, lo que vivo día a día. Gracias por los masajes, los medicamentos, por ser la primera en procurar mi salud y aguantarme. Perdón por lo horrible que ha sido todo.

Eduardo Perales, eres el mejor amigo que pude conocer, gracias por preocuparte por mí y buscarme siempre, a pesar de que nunca estoy y respondo, siempre has insistido. Nunca olvidaré lo hermoso de tu amistad, una persona que prefiere conversar en vez de juzgar.

Emily, mi amor y mi vida, tú eres mi máxima motivación, mi cable a tierra, quien frena todo mal pensamiento y me obliga a luchar. Lo único que vi en el peor momento de mi vida fue tu carita ¡te amo con toda mi alma hija!

Sobre todo, quiero agradecer a una persona sin ningún lazo familiar ni amistad, pero junto a mi hija ha sido la persona más importante en este periodo, quien siempre estuvo para ayudarme, motivarme, enseñarme, aguantarme, perdonarme, darme oportunidades de terapia, retarme, entre muchas otras cosas. Gracias don Oscar Francisco Fariás Fuentes, nunca esperé conocer a un docente como usted, siempre estará en mi corazón y mente, de verdad, mis más sinceras disculpas por tantos problemas, ha sido como un padre para mí, el mérito es tanto suyo como mío, muchas gracias por tanto.

Siempre agradeceré haber estudiado en la mejor Universidad, con docentes hermosos y que admiro profundamente, como don Adelqui Fissore, Cristian Cuevas, Mario Razeto, Emilio Dufeu, Cecilia Gutierrez y, a pesar de una historia algo turbulenta, don Cristian Rodríguez, gracias por las oportunidades y las felicitaciones que me envió por correo, llegó en los momentos más difíciles y fue muy importante.

Un recuerdo a mi primo Jorge que en paz descanse, perdón no estar el día más importante y cuando te perdimos, ha sido una espina que caló hondo. Tanto que deseábamos ayudarte con mi hermano, pero no pudimos completar la misión, disculpa. Siempre vives en nuestros recuerdos.

Mis más sinceras disculpas a las personas que quedaron fuera, pero no puedo extenderme más.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Índice de Figuras	vi
Índice de Tablas	vii
Glosario	viii
1 Capítulo 1: Planteamiento del problema	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo general.....	4
1.3.2 Objetivos específicos	4
1.3 Hipótesis	5
1.4 Metodología.....	5
1.5 Carta Gantt.....	6
2 Capítulo 2: Estado del arte	7
2.1 Soluciones disponibles en el mercado actual.	7
2.1.1 Soluciones para aumento de eficiencia energética.....	7
2.1.2 Sistemas para reducción de emisiones	9
2.2 Contexto del análisis.....	11
3 Capítulo 3: Procedimiento de ensayos	12
3.1 Descripción del banco experimental.....	12
3.1.1 Equipos utilizados en el análisis experimental	13
3.1.2 Instrumentación.....	16
3.1.3 Sistemas de adquisición de datos	19
3.2 Desarrollo de los procedimientos de laboratorio	20
3.2.1 Determinación de eficiencia energética y potencia	21
3.2.2 Muestro de emisiones de material particulado.....	22
3.2.3 Tratamiento o Manejo de la información.....	23
3.2.4 Análisis de incertidumbre	23
3.3 Condiciones de ensayo	24
3.3.1 Ensayos Cocina sin recuperado	24
3.3.2 Ensayos con Recuperador Comercial	25
3.3.3 Ensayos con Recuperador Prototipo	26

4 Capítulo 4: Método de Cálculo	28
4.1 Rendimiento y pérdidas de calor	28
4.1.1 Pérdidas de calor sensible en los humos	28
4.1.2 Pérdidas de calor latente en los humos	29
4.1.3 Pérdidas de calor debido a los sólidos no quemados en los residuos	29
4.2 Potencia térmica total	29
4.3 Contenido de CO al 13 % de Oxígeno	30
4.4 Calor específico de los productos de la combustión.....	31
4.4.1 Calor específico de los humos secos en condiciones estándar <i>C_{pm}d</i>	31
4.4.2 Calor específico del vapor de agua <i>C_{pm}H₂O</i>	31
4.5 Emisiones de Material Particulado	31
5 Capítulo 5: Resultados de ensayos	33
5.1 Generalidades	33
5.1.1 Descripción de ensayos	33
5.1.2 Clasificación de las condiciones de ensayo	34
5.1.3 Pérdidas presentes en los residuos sólidos (cenicero).....	34
5.2 Resultados para Cocina 1 (Caso Base)	35
5.2.1 Potencia Nominal, eficiencia energética y emisiones	39
5.2.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones	40
5.2.3 Emisiones de Material Particulado	41
5.3 Resultados de la Cocina 1 + Recuperador Comercial	42
5.3.1 Potencia nominal, eficiencia energética y emisiones.....	42
5.3.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones	43
5.3.3 Emisiones de Material Particulado, Cocina 1 + Recuperador Comercial.....	44
5.4 Resultados para Cocina 1 + Prototipo	44
5.4.1 Potencia Nominal, eficiencia energética y emisiones	44
5.4.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones	45
5.4.3 Emisiones de Material Particulado, Prototipo	46
5.5 Resultados para la Cocina 2.....	47
5.6 Análisis de Resultados.....	48
5.6.1 Mejoras en Eficiencia Energética de los recuperadores con respecto a la Cocina 1	49
5.6.2 Diferencia entre el sistema con Prototipo y Rec. Comercial.	53
5.6.3 Energía recuperada como ACS	55

6 Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones..... 58
Referencias 59

Índice de Figuras

Figura 1.1 Concentraciones promedio trianuales de las estaciones de monitoreo del material particulado fino (MP _{2,5}). Elaborado por: REMA [9].....	2
Figura 1.2 Penetración de la leña a nivel residencial con respecto al total de viviendas. Elaborado por CDT, de la cámara chilena de la construcción (CChC).....	3
Figura 1.3 Distribución porcentual del número de equipos por combustible en el hogar por región, Elaborado por CDT.....	3
Figura 1.4 Carta Gantt, planificación de trabajo.....	6
Figura 2.1 Recuperadores de energía convencionales en el mercado de Chile.....	8
Figura 2.2: Soluciones para reducción de emisiones en equipos a combustión de biomasa.....	10
Figura 3.1: Diagrama general de los equipos que componen el sistema del análisis experimental. Elaborado Cristóbal Vorphal [26] y editado por Hyldo Vega.....	12
Figura 3.2: Cocina 1. Calefactor a leña fabricada por Alcázar.....	13
Figura 3.3: Recuperador de calor comercial de Alcazar.....	14
Figura 3.4: Recuperador de calor “Prototipo” de tres pasos, implementado en una cocina a leña....	15
Figura 3.5: Sistema de reducción de emisiones de MP y electrodo antes y posterior su uso, producido por MPZero. [28].....	15
Figura 3.6 Extech WTH600-kit. Fuente: Promotec.cl.....	16
Figura 3.7 Instrumentos utilizados en el monitoreo de masas.....	17
Figura 3.8 a) Delmhorst F-2000 equipo para el monitoreo de la humedad de la madera. b) Electrodo tipo martillo Delmhorst Electrodo 26-ES.....	18
Figura 3.9 Tren de muestreo de emisiones de MP por el Método isocinético.....	18
Figura 3.10 Analizador de gases de combustión, Testo 350.....	19
Figura 3.11 Sistema de registro de las temperaturas de las termocuplas.....	20
Figura 5.1: Variación del rendimiento y la temperatura de los gases durante un ensayo completo ..	36
Figura 5.2: Comportamiento de las emisiones de monóxido corregido en relación con la temperatura de los humos.....	37
Figura 5.3 Comportamiento del porcentaje de oxígeno emitido en relación con el dióxido de carbono.....	38
Figura 5.4: Comportamiento del oxígeno con respecto al rendimiento.....	39
Figura 5.5: Comportamiento del monóxido con respecto al rendimiento.....	39
Figura 5.6: Relación de la temperatura de los humos entre la cocina 1 y con el uso del recuperador comercial.....	51
Figura 5.7: Diferencia de temperatura en los humos entre la cocina 1 y el Prototipo.....	52
Figura 5.8 Diferencia de temperatura entre el Prototipo y el recuperador comercial.....	54
Figura 5.9: Calentamiento del agua al interior del estanque del Prototipo, bajo la condición de circulación de agua.....	55
Figura 5.10: Calentamiento del agua al interior del estanque bajo la condición de agua estancada, para el Prototipo.....	56

Índice de Tablas

Tabla 2.1: Precios referenciales de equipos en el mercado de Chile. Elaborada por: Sebastián Gallardo [27]	8
Tabla 2.2: Materiales usados para el diseño de intercambiadores de calor para equipos de combustión de biomasa. Elaborada por: Claudio Garcés [14]	9
Tabla 2.3: Equipos para reducción de emisiones. Elaborada por: Claudio Garcés [14]	10
Tabla 3.1: Características de la estación de monitoreo meteorológico Extech WTH600-kit.	16
Tabla 3.2: Ubicaciones del sistema de Termocuplas.	16
Tabla 3.3: Datos técnicos termocupla tipo K clase 2. Fuente: TC-SA. Elaborado por Sebastián Gallardo [27].	17
Tabla 3.4 Características de la balanza de plataforma y balanza digital de mesa.	17
Tabla 3.5 Testo 350. Fuente: Testo.com	19
Tabla 3.6: Categorías establecidas por el método CH-28 para las velocidades de quemado	23
Tabla 3.7: Condiciones de ensayos realizados para la Cocina 1 sin recuperador (Caso Base).....	24
Tabla 3.8: Condiciones de ensayos de la Cocina 1 con recuperador comercial.....	25
Tabla 3.9: Condiciones de ensayos para la Cocina 1 con recuperador “Prototipo”	26
Tabla 5.1: Categorías establecidas para la clasificación de la velocidad de quemado.....	34
Tabla 5.2: Promedio de pérdidas en los residuos sólidos para corridas de ensayo de la Cocina 1	35
Tabla 5.3: Promedio de pérdidas en los residuos sólidos para corridas de ensayo de la Cocina 2	35
Tabla 5.4: Resultados para la Cocina 1 bajo potencia nominal	40
Tabla 5.5 Resultados obtenidos para los demás regímenes de la Cocina 1.	40
Tabla 5.6: Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1	41
Tabla 5.7: Resultados con el uso del recuperador comercial bajo potencia nominal.....	42
Tabla 5.8 Resultados para los demás regímenes con el uso del recuperador comercial	43
Tabla 5.9: Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1 con el uso del recuperador comercial	44
Tabla 5.10: Resultados con el uso del Prototipo bajo potencia nominal.....	45
Tabla 5.11: Resultados para las otras condiciones con el uso del Prototipo	46
Tabla 5.12 Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1 con el uso del Prototipo	46
Tabla 5.13: Resultados obtenidos con la Cocina 2.....	47
Tabla 5.14: Evaluación de infiltraciones con el uso de MPZero, para el recuperador comercial	48
Tabla 5.15: Evaluación de infiltraciones con el uso de MPZero, para el Prototipo.....	49
Tabla 5.16: Comparación entre el Recuperador comercial y la Cocina 1 sin recuperador	50
Tabla 5.17: Comparación entre el Prototipo y la Cocina 1 sin recuperador, bajo Potencia nominal.,	51
Tabla 5.18 Comparación entre el Prototipo y la Cocina 1 sin recuperador, para las categorías de velocidad de quemado media y baja.	53
Tabla 5.19: Comparación entre el Recuperador comercial y la Cocina 1 sin recuperador	54

Glosario

bh	:	Humedad del combustible en base húmeda
bs	:	Humedad del combustible en base seca
CChC	:	Cámara Chilena de la Construcción
EPA	:	Agencia de Protección Ambiental (Environmental Protection Agency)
Fondef	:	Fondo de Fomento para la Investigación y Desarrollo en Acción
IC	:	Intercambiador de Calor
ISO	:	Organización Internacional de Normalización (International Organization for Standardization)
kt a^{-1}	:	Kilotones por año
MP10	:	Material Particulado Aerodinámico grueso
MP2,5	:	Material Particulado Aerodinámico fino
NCh	:	Norma Chilena
OECD	:	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (Organization for Economic Co-operation and Development)
PCI	:	Poder Calorífico Inferior
PCS	:	Poder Calorífico Superior
UdeC	:	Universidad de Concepción
VOC	:	Compuestos Orgánicos Volátiles

Símbolos

η	:	Rendimiento
μg	:	Microgramo

1 Capítulo 1: Planteamiento del problema

1.1 Contexto

Desde tiempos inmemoriales el fuego ha sido parte importante en el desarrollo de la humanidad, evitando enfermedades gracias a la cocción de alimentos, proporcionando iluminación, confort, protección contra animales salvajes, e incluso, como uno de los motores fundamentales para el desarrollo industrial en todos sus procesos altamente demandantes de energía. La necesidad energética ha ido de la mano con el crecimiento de la población. A pesar de la constante búsqueda de nuevos combustibles, la biomasa aún se mantiene vigente como alternativa económica para muchos hogares, siendo un recurso considerado como renovable y de fácil adquisición. En Chile actualmente la biomasa representa el 25 % de la oferta de energía primaria, sólo por detrás del petróleo crudo con 26 %, este último, en conjunto con el gas natural y el carbón forman parte del 64 % del consumo primario. Su uso es especialmente característico desde la Región del Maule hasta la Región de Aysén [1,2]

En la revista *Earth System Science Data* se publicó un artículo encabezado por la Universidad de Chile, en el cual se realiza una caracterización de las emisiones provenientes del sector vehicular, industrial, residencial, energético y minero. En este estudio, las emisiones medias totales anuales estimadas de material particulado aerodinámico grueso (MP10) y fino (MP2,5), para el periodo entre los años 2015-2017, fueron de 192 y 173 kt a^{-1} respectivamente, más del 90 % de estas emisiones provienen del sector residencial, además de que este sector es responsable del 69 % de las 872 kt a^{-1} de las emisiones totales de CO y el 78 % de los 149 kt a^{-1} de las emisiones totales de Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC) [3].

En el año 1978 se creó la primera regulación que estableció estándares de la calidad del aire para partículas a través de la resolución N°1.215 del Ministerio de Salud, la que se centraba en el control del material particulado grueso (MP10) en el Decreto N°12 [4]. Posteriormente se evidenció las consecuencias nocivas que presentan las emisiones de MP2,5 para la salud de las personas, con efectos crónicos y agudos, a largo y corto plazo, además de estar asociado a enfermedades pulmonares y cardiovasculares, trastornos neonatales, produciendo cáncer, entre otras enfermedades [5].

Pese a la legislación actual y los esfuerzos por reducir el material particulado en el aire ambiente, no se ha logrado alcanzar los niveles de la normativa primaria para el MP2,5 la que causa alrededor de 3.000 hospitalizaciones y cerca de 4.500 muertes al año [6]. Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD, siglas en inglés) en el ranking “Índice Better Life”, que mide las condiciones medioambientales de los países miembros, Chile se posiciona en el penúltimo lugar en el indicador de medio ambiente, con un promedio de 23,4 μg de MP2,4, en donde participan 41 naciones pertenecientes a los países más ricos y que cuentan con estándares de vida que se consideran desarrollados, donde Chile se encuentra número 38, sólo por delante de Sudáfrica, Corea y Turquía, siendo Finlandia, Suecia y Nueva Zelanda los top tres respectivamente [7].

En el año 2020 las estaciones de monitoreo con representatividad poblacional presentaron concentraciones del promedio trianual entre los años 2014-2020 de 56 % (28 de 50) que exceden la norma primaria anual de MP2.5 [8], la cual fija una cantidad de $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los mayores niveles de material particulado se concentran en la zona sur de Chile, la cual es producto principalmente de la combustión de biomasa residencial para cocina y calefacción, Coyhaique cuenta con el valor más alto con $43 \frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ [9].

Las concentraciones anuales son calculadas según lo establece la norma D.S. N°12/2011 del Ministerio del Medio Ambiente. En la Figura 1.1 se muestra la distribución por sector de las concentraciones trianual del material particulado fino entre 2014-2020.

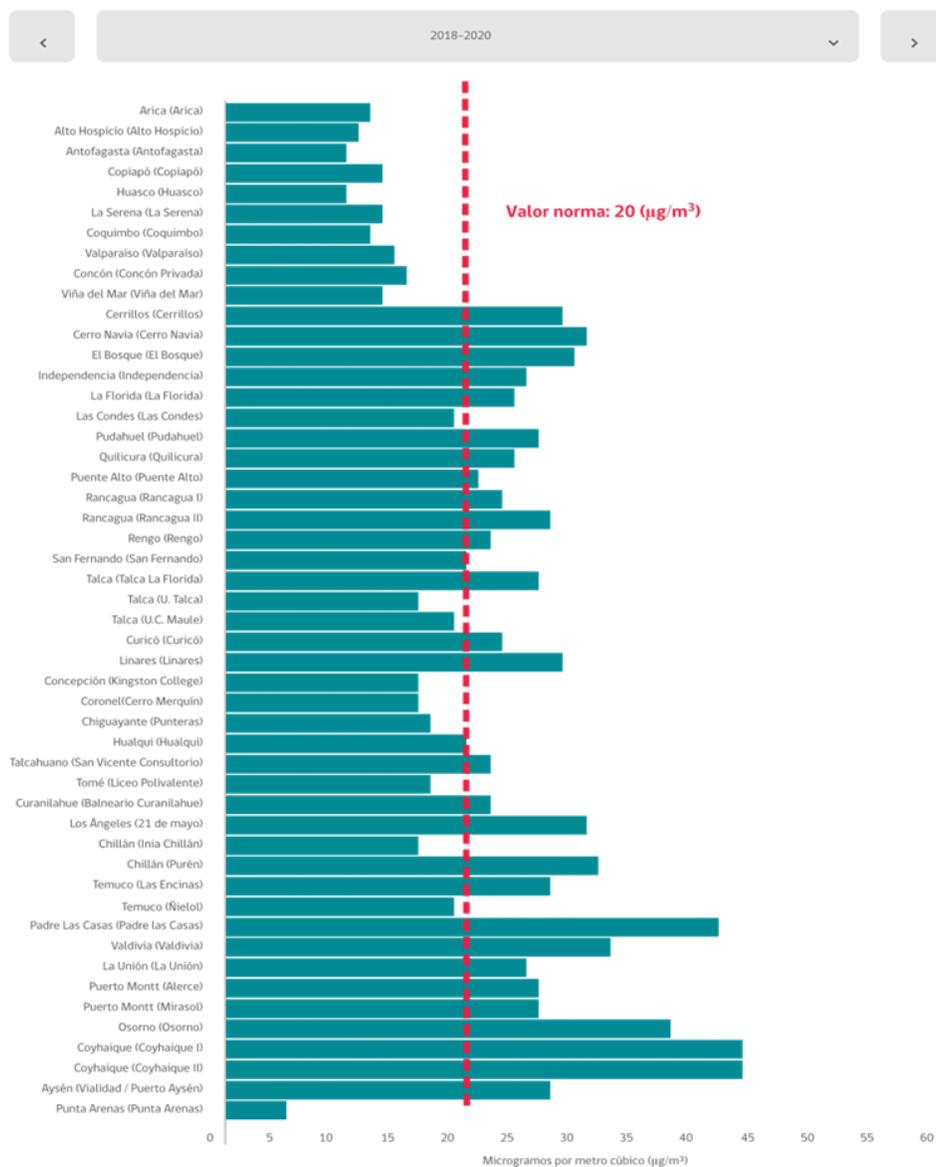


Figura 1.1 Concentraciones promedio trianuales de las estaciones de monitoreo del material particulado fino (MP2,5). Elaborado por: REMA [9]

El sector residencial es responsable del 98,47 % del consumo total anual de leña, en la cual está presente en 1.721.032 hogares a nivel nacional con un consumo de 11.770.675 m³ estéreos, teniendo una penetración de 33,2 % respecto al total de viviendas. La leña es el principal combustible utilizado para calefacción, con un 42,9 % de las casas que declaran el uso de calefacción. La Figura 1.2 muestra el nivel de penetración en el uso de leña a nivel residencial, siendo un 26,9 % zonas urbanas y 79,5 % para sectores rurales, y en la Figura 1.3 aparece la distribución porcentual por tipo de combustible para calefacción [10].

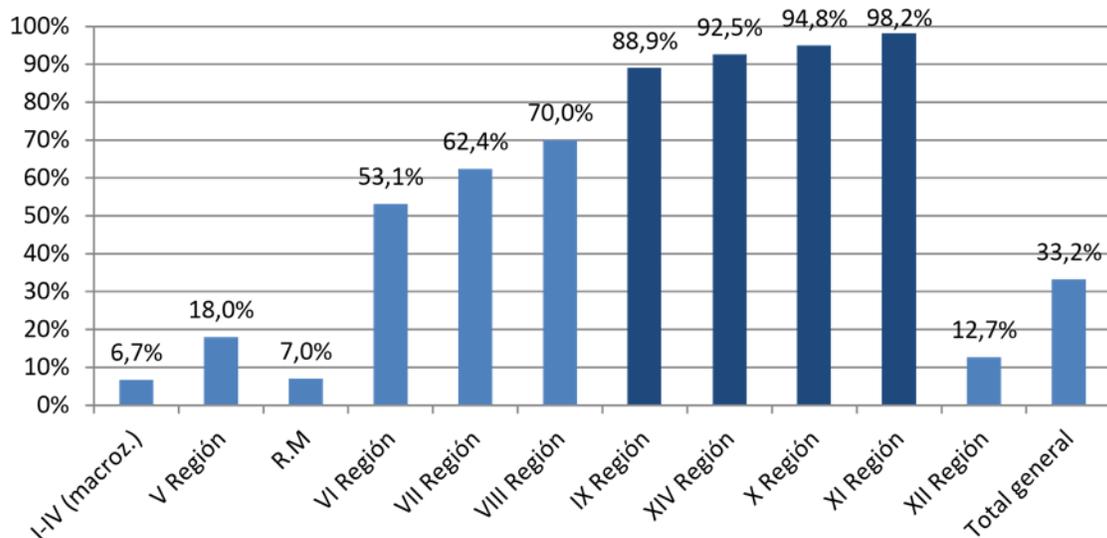


Figura 1.2 Penetración de la leña a nivel residencial con respecto al total de viviendas. Elaborado por CDT, de la cámara chilena de la construcción (CChC)

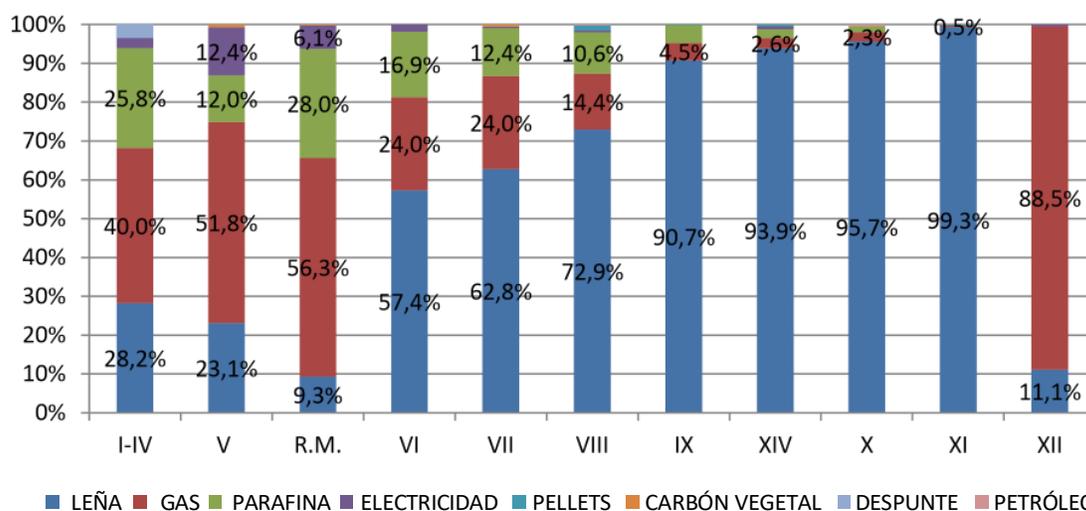


Figura 1.3 Distribución porcentual del número de equipos por combustible en el hogar por región, Elaborado por CDT

Como se puede apreciar aumenta el uso de la biomasa como combustible a medida que se avanza a la zona sur del país, debido a los extensos y fructíferos bosques de Chile, siendo una parte importante económicamente para familias de escasos recursos y en sectores rurales.

Por otra parte, considerando que según lo establecido en la norma Chilena NCh 3173.Of 2009, el rendimiento térmico de los equipos de combustión ronda en un 70 %, en donde se cuantifican tres pérdidas principales. La mayor cantidad de pérdidas se encuentran en las emisiones en forma de calor sensible de los gases secos y el calor latente presente en el vapor de agua, la menor cantidad se encuentran en los residuos sólidos no quemados, las cuales son inferiores a un 0,5 %. Producto de los antecedentes antes descritos, es de gran interés y se aprecia un amplio rango para aumentar la eficiencia energética del sistema a través del uso de un recuperador de calor.

Además, se puede agregar un filtro para mitigar el problema de las altas emisiones de MP, en el ítem 2.1 se describen varias alternativas presentes en el mercado Chileno, como por ejemplo filtros de carbón activo [11] o un precipitador electrostático, el cual presenta una buena eficiencia en la captura del material particulado fino, siendo cercana a un 90 %. [28]

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo del proyecto es caracterizar experimentalmente el desempeño de un recuperador de calor en equipos que utilizan la combustión de biomasa, en base a métodos con validez internacional, cuantificando la energía que se recupera, el rendimiento del sistema completo, y la reducción de emisiones de material particulado bajo diferentes condiciones de operación, determinando los parámetros claves que influyen en el proceso y cómo estos afectan el comportamiento del sistema.

1.3.2 Objetivos específicos

Para poder cumplir el objetivo específico en el cual se enmarca el proyecto, se definen una serie de objetivos más pequeños, los cuales, se presentan a continuación en orden cronológico

- 1.- Desarrollar procedimientos de ensayo para la caracterización de equipos de recuperación energética en gases emitidos, producto de la combustión de biomasa.
- 2.- Cuantificar experimentalmente los resultados de funcionamiento de los sistemas de recuperación energética, implementados en una cocina a leña.

3.- Analizar los resultados de eficiencia y emisiones de material particulado con un recuperador de calor convencional, el prototipo desarrollado en el proyecto y el sistema de combustión sin recuperador.

1.3 Hipótesis

La implementación de un sistema de recuperación de calor en equipos que utilizan la combustión de biomasa aumenta el rendimiento térmico entre un 15-25 % para el sistema completo, gracias a la recuperación de energía, transfiriendo el calor residual en las emisiones, hacia un circuito de agua para su uso posterior.

En caso de que el recuperador de calor logre reducir la temperatura de los gases bajo el punto de rocío, se espera obtener un mayor aumento de la eficiencia térmica del sistema, gracias a la recuperación del calor latente. Esto tiene un mayor impacto a medida que aumenta la humedad presente en la madera y en el aire ambiente.

Por otra parte, la incorporación de un precipitador electrostático en el sistema permitirá reducir en un 80-90 % las emisiones de material particulado (MP), permitiendo lograr cumplir con las normativas ambientales vigentes, mejorando la calidad de vida de las personas y reduciendo la contaminación.

1.4 Metodología

En primer lugar, se realiza una revisión bibliográfica de normas y metodologías de ensayo, con el fin de desarrollar los protocolos que regirán los procedimientos de ensayos de potencia, eficiencia y material particulado, se realizará una descripción del banco de ensayos y protocolos para seguridad, limpieza y tratamiento de la información.

Se realizarán una serie de ensayos para el sistema de combustión sin recuperador de calor, con un recuperador convencional y con un prototipo desarrollado por el proyecto de memoria de título. Para cada uno de estos sistemas se realizarán varios ensayos de caracterización bajo diferentes condiciones de operación, como por ejemplo regulaciones de tiraje, con precipitador electrostático encendido o apagado, circulación o estancamiento de agua, entre otras.

Para el análisis de las pérdidas en los gases de combustión emitidos se utilizará un analizador de gases, se monitorearán además las emisiones de material particulado dentro de un túnel de dilución con aire ambiente a través del Método Isocinético 5, con medición gravimétrica para los filtros, utilizando las normas Chilenas extraídas de la EPA, utilizando todos los sistemas de medición necesarios para el cumplimiento de estas, procurando además realizar los procedimientos de

laboratorio rigurosamente en base a los protocolos establecidos en la ISO 17025, incluyendo análisis de error e incertidumbre.

A partir del análisis de resultados de cada ensayo, se comparará el desempeño de los distintos sistemas, para así poder evaluar los beneficios en la implementación de un recuperador de calor y precipitador electrostático, además comprobando las ventajas del prototipo desarrollado en el proyecto, comparado con los recuperadores convencionales, en temas de eficiencia y emisiones.

Todo esto será realizado en primera instancia para una cocina de leña, y posteriormente, para otro equipo a combustión de biomasa residencial.

1.5 Carta Gantt

CARTA GANTT - Análisis experimental de la eficiencia térmica y reducción del material particulado de un sistema recuperador de calor implementado en dosequipos a combustión de biomasa



Figura 1.4 Carta Gantt, planificación de trabajo

2 Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Soluciones disponibles en el mercado actual.

Dentro del mercado nacional, actualmente se encuentran varias soluciones para la reducción de emisiones y aumentar la eficiencia energética, enfocados en la reducción de emisiones de material particulado y monóxido de carbono, en equipos de combustión de biomasa para cocina y calefacción residencial. En esta sección se abordarán las soluciones que se encuentran actualmente disponibles en el mercado.

2.1.1 Soluciones para aumento de eficiencia energética

En los sistemas de combustión domiciliar se producen pérdidas en forma de calor residual en las emisiones de aproximadamente un tercio de la energía contenida en el combustible. Para recuperar la energía perdida en las emisiones de los sistemas de combustión, se encuentran en el mercado varias soluciones residenciales y un sinnúmero de aplicaciones para procesos industriales, como por ejemplo, condensación de vapor en ciclos de generación energética, ciclos regenerativos, calentamiento de fluidos, entre otros [12].

En los equipos de combustión de biomasa estas pérdidas se presentan sobre todo en las emisiones, en forma de calor sensible de los gases secos y calor de latente, presente en el vapor de agua. De ser recuperada esta energía, se puede aumentar el rendimiento térmico de un 10 % a un 15 % [13], o en base al poder calorífico inferior, rendimientos globales superiores al 105 % [14 y 15].

Los dos prototipos más comunes de recuperadores de calor para equipos de combustión residenciales se encuentran en la Figura 2.1 [4], diferenciados entre serpentines y termo-cañón. Este último presenta bastantes beneficios en la recuperación del calor sensible emitida en la chimenea, en cambio los serpentines instalados en el cuerpo de los equipos de calefacción no recuperan desde las emisiones, aprovechando energía aportada al ambiente que se desea calefaccionar.



Figura 2.1 Recuperadores de energía convencionales en el mercado de Chile

En la Tabla 2.1 se encuentran algunos precios de los termo-cañones disponibles en el mercado nacional, los serpentines son fabricados a medida por las empresas que lo comercializan.

Tabla 2.1: Precios referenciales de equipos en el mercado de Chile. Elaborada por: Sebastián Gallardo [27]

Marca/Tienda	Material	Capacidad (L)	Precio
Amesti	Acero Inoxidable	65	\$329.990
Alcazar	Acero Inoxidable	100	\$463.900
Alcazar	Acero Galvanizado	100	\$259.900
HVAC	Acero Inoxidable	90	\$250.000
HVAC	Acero Galvanizado	90	\$170.000
Alvasur	Acero Inoxidable	60	\$250.000
El Constructor	Acero Galvanizado	100	\$286.990
Cocinas del Sol	Acero Galvanizado	90	\$270.000

En el proceso de diseño del intercambiador de calor (IC), una de las consideraciones importantes para aumentar la eficiencia de este, es llegar a recuperar el calor latente al condensar el vapor de agua emitido, para esto se debe bajar la temperatura de los gases hasta el punto de rocío a su presión parcial. Esto produce agentes corrosivos, los cuales se deben considerar en la selección de los materiales de diseño.

Además, en los gases de combustión se encuentran otros compuestos con temperaturas de condensación superior al punto de rocío del vapor de agua, estos son relevantes en el proceso de diseño del intercambiador de calor. La principal preocupación es la presencia de ácidos, como el Ácido sulfúrico (H_2SO_4), NO_x y SO_x , entre otros. Afortunadamente el nivel de azufre presente en la madera Chilena es casi nula, a menos que la biomasa haya sido fertilizada, esto permite

considerar el proceso con bajas emisiones de condensados ácidos. En la Tabla 2.2 se encuentran los materiales seleccionados para estas condiciones.

Tabla 2.2: Materiales usados para el diseño de intercambiadores de calor para equipos de combustión de biomasa. Elaborada por: Claudio Garcés [14]

Material	Razón de corrosión <i>mm/año</i>	
	Sobre Punto Rocío	Bajo Punto rocío
A387	0.07	0.47
Inoxidable AISI 304	< 0.01	> 0.01
Ni Alloy 22	< 0.01	> 0.01

Se puede apreciar un mayor desgaste por corrosión bajo el punto de rocío que sobre este, debido a que, debido a que sobre este punto las emisiones ácidas no son condensadas y se envían al medio ambiente, para posteriormente producir lluvia ácida.

2.1.2 Sistemas para reducción de emisiones

Actualmente existen varios mecanismos para la reducción del material particulado en el sector residencial e industrial, en donde se encuentran barreras para el paso de flujo de gases como por ejemplo filtros de manga, cerámicos o filtros orgánicos (filtro vivo). También se utilizan sistemas mecánicos de separación de partículas por ejemplo ciclones, lavador de gases o cámaras de sedimentación y también existen otros tipos de filtros que utilizan mecanismos electrostáticos donde las partículas son ionizadas para que queden adheridas a una superficie con carga opuesta, como sería el caso para un precipitador electrostático. En la Figura 2.2 y Tabla 2.3 se encuentra un resumen de varios tipos con sus mecanismos y eficiencias de captura.

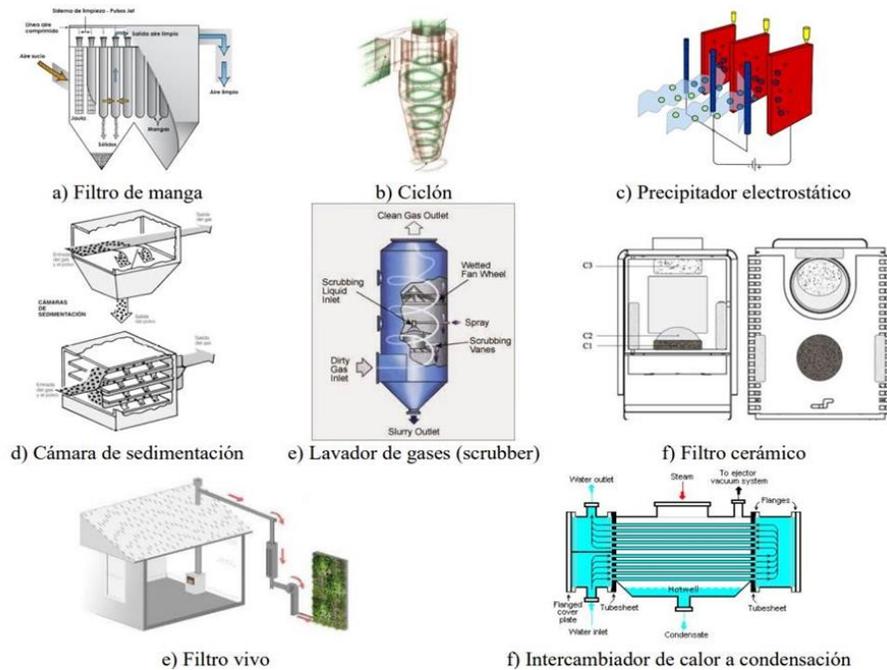


Figura 2.2: Soluciones para reducción de emisiones en equipos a combustión de biomasa

Tabla 2.3: Equipos para reducción de emisiones. Elaborada por: Claudio Garcés [14]

Equipo	Mecanismo de captura	Eficiencia
Filtro de Manga [16]	Circulación a través de un medio fibroso cilíndrico, en donde las partículas de mayor tamaño quedan adheridas al medio	99 %
Ciclón y multiciclón [17]	Separación mecánica a causa de un movimiento rotatorio del flujo de gases (torbellino) que, por medio de la acción de fuerzas centrífugas las partículas de mayor tamaño quedan retenidas en las paredes del dispositivo.	90 %
Precipitador Electrostático [18], [19]	Flujo de gases es forzado a circular por un dispositivo que ioniza positiva o negativamente el material particulado que posteriormente es atraído por fuerzas electrostáticas hacia paredes de placas colectoras con carga opuesta.	85 %
Cámara de sedimentación [20]	Separación mecánica de partículas de gran tamaño (superior a $100\mu m$) a causa de la desaceleración del flujo de gases producida por un cambio en la sección transversal, reduciendo la capacidad de desplazamiento	95 %

Lavador de gases [21]	Flujo de gases es expuesto a un flujo líquido que circula a contraflujo de los gases de combustión, en donde el líquido al entrar en contacto con las partículas contaminantes captura la partícula y precipita mediante mecanismos de impacto inercial, intercepción y difusión.	70 %
Filtro cerámico [22], [23]	Dispositivo catalizador instalado en el flujo de humos de combustión utilizando el calor contenido en el material cerámico que constituye el filtro con una segunda cámara de combustión quemando así las emisiones no deseadas.	61 %
Filtro vivo [24]	Flujo de gases es forzado a circular por filtro orgánico compuesto por plantas en donde el material particulado es capturado y/o utilizado por la vegetación como fuente de nutrientes	90 %
Intercambiador de Calor a Condensación [25], [15]	Por efectos de condensación de la humedad contenida en los humos de la combustión, el material particulado precipita junto a las gotas de agua depositándose sobre la superficie del intercambiador de calor, posteriormente el material capturado es retirado mediante un <i>Scrubber</i> .	80 %

2.2 Contexto del análisis

Esta memoria de título se realiza en el marco de un proyecto de investigación y desarrollo, financiado por el Fondo de Fomento para la Investigación y Desarrollo en Acción (Fondef ID21I10402), donde participan varios docentes y alumnos del departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial de la Universidad de Concepción, bajo la dirección del Dr. Óscar Farías Fuentes, Jefe de carrera de Ingeniería Civil Mecánica, en conjunto con el director del departamento de Ingeniería Industrial, el PhD. Jorge Jiménez.

Teniendo también, la participación de la empresa de sistemas para la reducción de emisiones de material particulado “MPZero”, los cuales se encargan del diseño del precipitador electrostático, implementado a la salida de los gases en el recuperador de calor, en conjunto con la empresa de equipos de combustión “Alcázar”, quienes son los fabricantes de la cocina a leña utilizada en el análisis.

Este estudio se realiza enfocados en dar una solución a los problemas de contaminación ambiental, sobre todo para las regiones del sur de Chile, las cuales presentan mayores índices de contaminación debido a estos artefactos, los cuales superan los valores establecidos a nivel mundial.

3 Capítulo 3: Procedimiento de ensayos

Este capítulo será abordado en dos etapas, inicialmente se realizará una descripción del banco de ensayo, el cual se compone de un artefacto de calefacción residencial, los equipos que se desea evaluar la recuperación energética y reducción de emisiones, incluyendo la instrumentación necesaria para el monitoreo, muestreo y registro de las variables influyentes en el proceso.

Posteriormente, se desarrollarán los procedimientos necesarios para realizar el análisis de eficiencia energética, potencia y muestro de emisiones de MP del sistema completo, bajo distintas condiciones de operación del equipo de combustión.

3.1 Descripción del banco experimental

El banco de ensayos se encuentra ubicado en el laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción, como se muestra en la Figura 3.1, este consta de una cocina a combustión de leña, en la sección de la chimenea se implementa un Termocañón o recuperador de calor y posteriormente un precipitador electrostático. El monitoreo de los gases de combustión se realiza en la sección posterior al precipitador electrostático, con el objetivo de cuantificar las pérdidas energéticas.

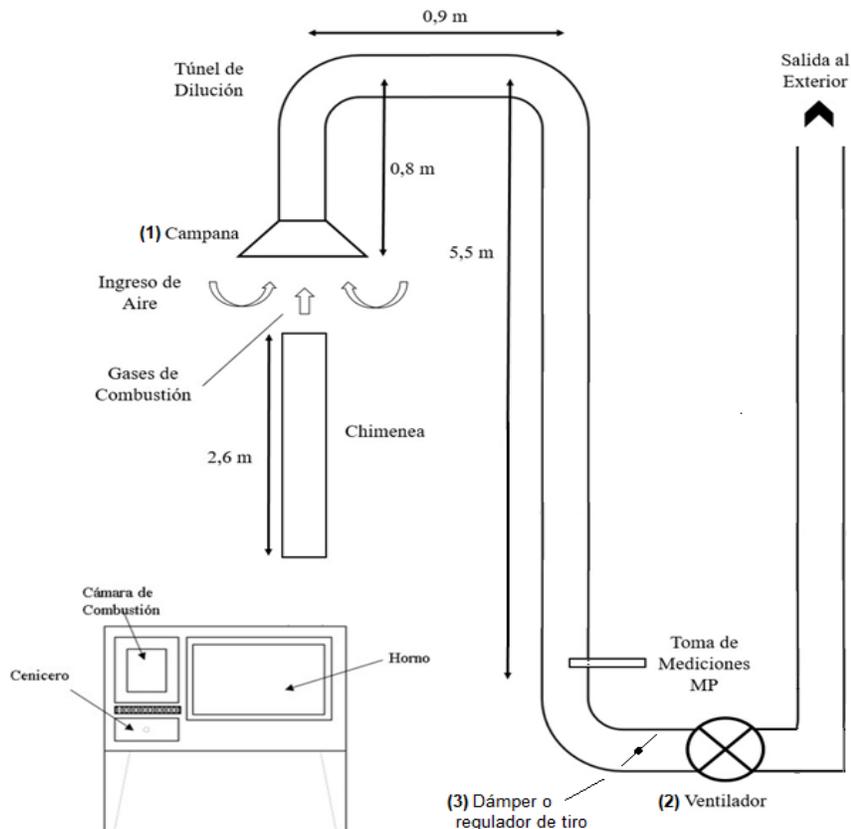


Figura 3.1: Diagrama general de los equipos que componen el sistema del análisis experimental. Elaborado Cristóbal Vorpal [26] y editado por Hyldo Vega

Sobre la chimenea se instala una campana (1) de recolección total, con el objetivo de captar el humo y diluirlo con aire ambiente, y así, poder realizar el muestreo de material particulado en el túnel de dilución a través del método isocinético, según lo establecido en el método de muestreo de contaminantes atmosféricos CH-5G. Este túnel cuenta de un ventilador (2) mecánico para realizar la aspiración, además de un dámper o regulador de tiro (3) y, posteriormente, un sistema de monitoreo de presión para la estimación del caudal de gases.

3.1.1 Equipos utilizados en el análisis experimental

El equipo de combustión utilizado es una cocina a leña fabricado por la empresa Alcázar, la cual se encuentra en la Figura 3.2, esta consta de una puerta para la carga de combustible en la cámara de combustión (1), un cenicero en la zona inferior (2) donde se retiran los residuos sólidos, un horno con su respectiva puerta en la zona de la derecha (3). Para el control de la combustión, la cocina cuenta con una rejilla en la zona inferior (4) que regula la admisión de aire y, una palanca (5) que permite regular la expulsión de los gases de combustión.

Para el monitoreo de la variación de la masa, la cocina se instala sobre una balanza de plataforma (6), la cual permite calcular la velocidad o tasa de quemado del combustible.



Figura 3.2: Cocina 1. Calefactor a leña fabricada por Alcázar.

Con el fin de aumentar la eficiencia energética del proceso de combustión, se puede implementar un equipo que recupera la energía térmica de las emisiones, en el análisis experimental se caracterizarán dos recuperadores de calor distintos. El primero es un equipo convencional presente

en el mercado, este será llamado “Recuperador Comercial”, el cual está fabricado por Alcázar, este consiste en sistema de enfriamiento los gases de combustión, utilizando un estanque de agua que rodea concéntricamente el cañón donde pasa el humo.

En la Figura 3.3 se muestra el recuperador comercial, donde el agua fría de la red ingresa al estanque por la zona inferior (1) y después de calentarse o para realizar circulación de agua, sale por el ducto de la zona superior (2), en ambos puntos se introducen termocuplas para realizar el monitoreo de la temperatura de entrada y salida del agua. El recuperador comercial también cuenta de un sistema de monitoreo de la presión interna del estanque y una válvula de seguridad (3), aliviando la presión del estanque cuando se supera los 6 MPa, a la salida del prototipo se puede apreciar el precipitador electrostático (4).

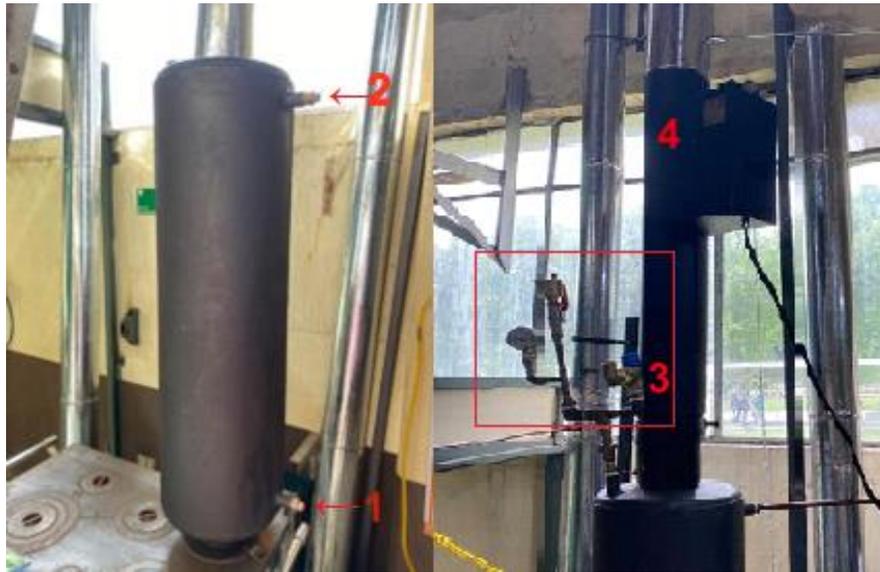


Figura 3.3: Recuperador de calor comercial de Alcázar

El segundo recuperador de calor que se utiliza es un equipo desarrollado por los académicos asociados al proyecto Fondef ID21I10402, el cual se bautiza como “Prototipo”. La característica principal de este equipo es que no es un Termocañón de una sección recta, en el Prototipo los gases de combustión circulan dentro de tres secciones o pasos de intercambio de calor, aumentando el tiempo de residencia y la recuperación de energía. Con este equipo se desea llegar a reducir significativamente la temperatura de las emisiones, logrando condensar el vapor de agua y así, recuperar las pérdidas de calor latente.

En la Figura 2.4 se muestra el Prototipo, el cual permite el control de los pasos de intercambio de calor que recorren los gases, este se puede regular entre 1 y 3 pasos, lo cual se realiza con la manilla en la zona trasera (1), aquí también se ubica una válvula para poder realizar la extracción de condensados de los gases (2). En la zona inferior (3) y superior (4) se encuentran los ductos donde ingresa y sale el agua del estanque respectivamente, en conjunto con sus respectivas termocuplas.

Este equipo también posee manómetros para el monitoreo de la presión interna del estanque y su válvula de seguridad como en el recuadro (3) de la Figura 3.4.

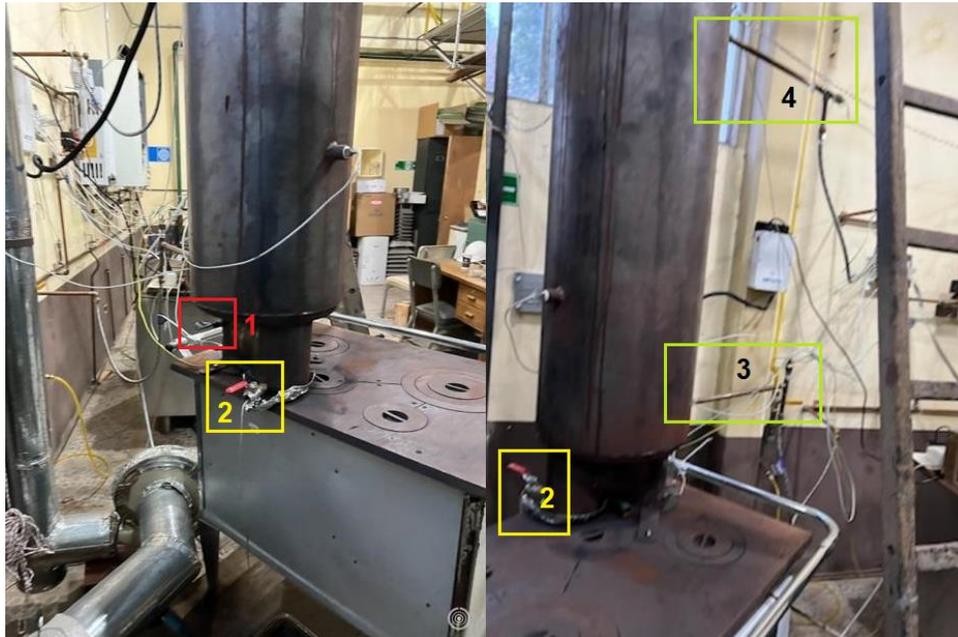


Figura 3.4: Recuperador de calor “Prototipo” de tres pasos, implementado en una cocina a leña

En la Memoria de Título de Sebastián Gallardo [27], se encuentran mayores detalles sobre las dimensiones y el diseño de los recuperadores de calor utilizados

En la sección final de la chimenea se utiliza un filtro de MPZero, con el fin de reducir las emisiones de material particulado, esto se realiza introduciendo un electrodo en el interior del ducto de emisiones, el cual, atrae eléctricamente hacia él las partículas presentes en el humo. La Figura (a) detalla los componentes que posee el precipitador electrostático y en la Figura (b) se muestra el tipo de electrodo utilizado en la captura de partículas a la salida del “Recuperador comercial”, presentando el antes y después de una corrida completa de ensayo, la cual considera el encendido, pre-ensayo y 3 cargas de combustible para el ensayo de monitoreo en las condiciones de equilibrio.

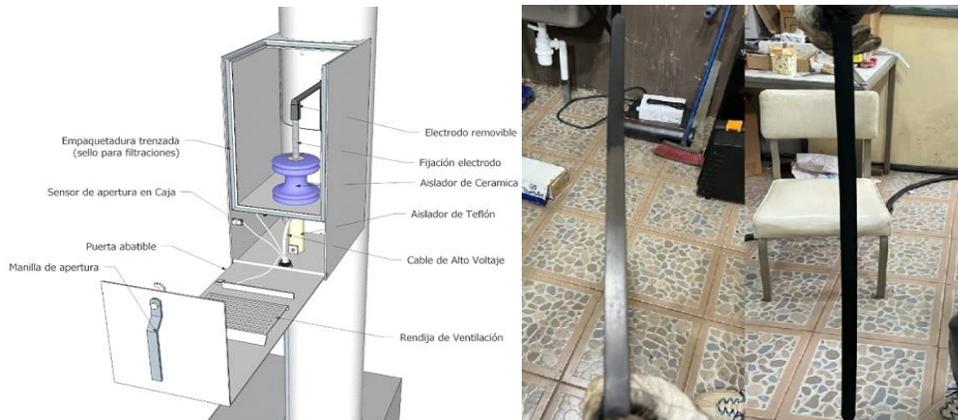


Figura 3.5: Sistema de reducción de emisiones de MP y electrodo antes y posterior su uso, producido por MPZero. [28]

3.1.2 Instrumentación

En esta sección se describe la instrumentación utilizada para realizar el monitoreo de los parámetros relevantes en el funcionamiento del sistema completo, sus rangos de medición, resolución e incertidumbre. Esta descripción es importante en la caracterización de los sistemas en estudio, además de ser necesaria para determinar el error asociado producto a los instrumentos de monitoreo.

El registro de las condiciones del ambiente de ensayo se realiza utilizando una estación de monitoreo meteorológico, la cual se encuentra en la Figura 3.6 y en la Tabla 3.1 se encuentran las características de los parámetros medidos con este instrumento.



Figura 3.6 Extech WTH600-kit. Fuente: Promotec.cl.

Tabla 3.1: Características de la estación de monitoreo meteorológico Extech WTH600-kit.

Instrumento	Parámetro	Resolución	Rango	Incertidumbre
Extech WTH600-kit	Humedad amb.	1 %	20-90 % RH	± 5 % RH
	Temperatura amb.	0,1 °C	40-70 °C	± 1 °C
	Presión amb.	0,1 mmHg	405-825 mmHg	± 3 mmHg
	Vel. Aire amb.	0,1 m/s	0-50 m/s	± 6 %

A parte de este equipo, se utilizan termocuplas para monitorear la temperatura del ambiente, incluyendo otros puntos especificados en Tabla 3.2, este sistema de monitoreo es fundamental estimar la energía transferida al agua de los recuperadores de calor. En la Tabla 3.3 se detallan los tipos de conductores utilizados.

Tabla 3.2: Ubicaciones del sistema de Termocuplas.

N°	Codificación	Puntos de medición
T1	Twex	Temperatura del agua a la salida del estanque.
T2	Twsu	Temperatura del agua a la entrada del estanque.
T3	Tgsu	Temperatura de los humos a la entrada del Termocañón
T4	Tgex	Temperatura de los humos a la salida del Termocañón
T5	Tsus	Temperatura del agua de la red
T6	Tamb	Temperatura del ambiente
T7	Tair	Temperatura del ambiente sin protección de radiación
T8	Tsu,s	Temperatura del ducto de los humos

Tabla 3.3: Datos técnicos termocupla tipo K clase 2. Fuente: TC-SA. Elaborado por Sebastián Gallardo [27].

Combinación de conductores		Rango de funcionamiento		Tolerancias de salida de termopar	
Conductor +	Conductor -	Continuo	Puntual	Clase 2	
Níquel-Cromo	Níquel-Aluminio	0 a + 1100 °C	-180 a + 1330 °C	-40°C a 333 °C	±2,5 °C
				333°C a 1200 °C	±0,0075°C

Para el registro de la variación de la masa del sistema y la carga de ensayo se utiliza una balanza de plataforma, además, la masa de carga y las perdidas en los residuos sólidos se miden con una balanza digital, las cuales aparecen en la Figura 3.7. En la Tabla 3.4 se encuentran la descripción de estos equipos.

(a) Monitor de balanza de plataforma Modelo LP-7516.

(b) Balanza digital Modelo Mettler PM 6000.

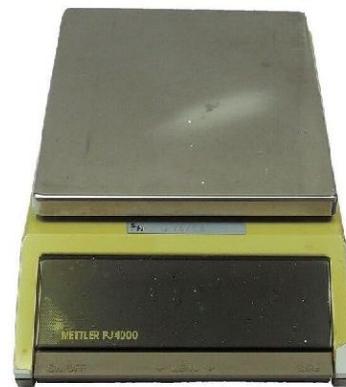


Figura 3.7 Instrumentos utilizados en el monitoreo de masas

Tabla 3.4 Características de la balanza de plataforma y balanza digital de mesa.

Equipo	Modelo	Resolución	Frecuencia de muestreo
Balanza de plataforma	LP-7516	0,01 kg	< 10 s
Balanza digital	Mettler PM 6000	0,1 g	No

La Figura 3.8 (a) se muestra el instrumento para medir la humedad que presenta la leña utilizada para cada carga de combustible, a este sistema se utiliza un electrodo para medición de humedad tipo matillo, el cual se encuentra en la Figura 3.8 (b). Este sistema tiene una resolución de 0,1 % de humedad, con un rango entre 8-23 %.



Figura 3.8 a) Delmhorst F-2000 equipo para el monitoreo de la humedad de la madera. b) Electrodo tipo martillo Delmhorst Electrodo 26-ES

Las emisiones de material particulado se monitorean con un tren de muestreo producido por Clean Air Engineering, este sistema permite realizar muestreo de emisiones de MP de calidad, a través del método isocinético, en la Figura 2.9 se muestra una imagen del sistema utilizado.



Figura 3.9 Tren de muestreo de emisiones de MP por el Método isocinético.

Monitoreo de gases de combustión

El monitoreo de la composición de los gases de combustión es realizado por un analizador marca Testo 350 (Figura 3.10), este instrumento es capaz de monitorear emisiones de CO , CO_2 , O_2 , HC , la

temperatura de los gases, entre otras variables, en la Tabla 3.5 se describen las características principales de los sensores utilizados para determinar la potencia y eficiencia.

Tabla 3.5 Testo 350. Fuente: Testo.com

Parámetro	Resolución	Rango	Incertidumbre
CO ₂	0,01 % Vol.	0-50 % Vol.	±0,3 Vol. % ±1% promed. (0...25Vol. % ±0,5 Vol. % ±1,5 % promed. (resto de la gama)
O ₂	0,01 % Vol.	0-25 % Vol.	± 0,2 Vol. %
CO	0-10000 ppm	1 ppm	±10 ppm (0...199 ppm) ±5 % promed. (200...2000 ppm) ±10 % promed. (resto de la gama)
Termistor tipo K	-200 a 1370 °C	0,1 °C	±0,4 °C (-100...200 °C) ±1 °C (rango restante)



Figura 3.10 Analizador de gases de combustión, Testo 350.

3.1.3 Sistemas de adquisición de datos

Para las termocuplas, el monitoreo de masa del sistema y de los gases de combustión, se utilizan software y códigos implementados en los computadores del laboratorio que, a través de interfaces y una tarjeta de modulación de señal, permiten realizar el registro de los datos con un paso de tiempo controlable. Estos sistemas se describen a continuación.

Para el analizador de gases se utiliza el Software del fabricante (Testo) llamado “EasyEmission”, donde se configuran los parámetros de muestreo, definiendo el registro de gases cada 30 segundos.

La medición de temperaturas se registra con a través de un tablero, con ocho termocupas conectadas a través de la tarjeta de adquisición de datos de la Figura 3.11, esta imagen también muestra los equipos donde se conecta para realizar la lectura a través del software Impview. El registro de estas variables se realiza cada 10 segundos.

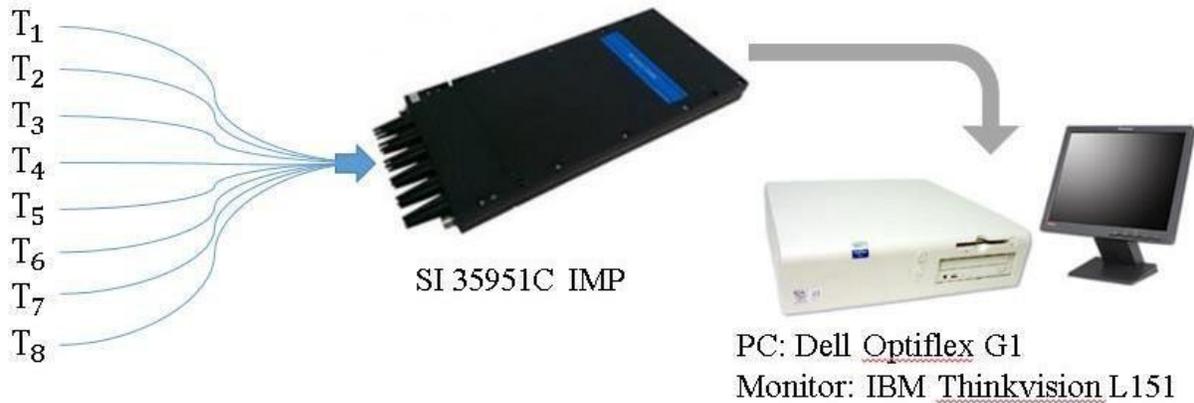


Figura 3.11 Sistema de registro de las temperaturas de las termocupas.

La variación de la masa se registra utilizando un código en Python que se encuentra en el Anexo, el cual se utiliza con el computador de lo laboratorista encargado de la corrida de ensayos.

3.2 Desarrollo de los procedimientos de laboratorio

Los procedimientos que se realizan en laboratorio son en base a una serie de protocolos para acreditar capacidades técnicas y los estándares de calidad para un laboratorio de pruebas y calibración, garantizando la obtención de resultados válidos, precisos y de manera consistente, estos protocolos se encuentran norma ISO 17025.

Además, para la evaluación del equipo de combustión y el muestreo de emisiones, se consideran las normas y métodos de medición de contaminantes atmosféricos establecidos en Chile, los cuales se detallarán en las secciones correspondientes.

En esta sección se abordarán las consideraciones principales a la hora de realizar los ensayos de caracterización, en conjunto con las características y distribución, correspondiente a los regímenes de combustión. Los detalles de los procedimientos abordados en este capítulo se encuentran en los Protocolos de ensayo: Procedimientos de Eficiencia y Potencia y, Procedimientos de Muestreo de MP.

En conjunto con establecer los procedimientos bajo el cual se realizarán los ensayos, se realizaron varios documentos, tales como una bitácora para registrar las condiciones de ensayo y cargas, procedimientos para la conexión de la instrumentación y uso de software.

3.2.1 Determinación de eficiencia energética y potencia

Para la determinación de eficiencia energética y potencia con la cual opera el sistema completo, se debe considerar la norma chilena NCh 3173.of2009, correspondiente a los requisitos relativos al diseño, fabricación, montaje, seguridad, rendimiento, instrucciones y al marcado, junto con los métodos y combustibles de ensayos, correspondientes para las estufas domésticas que utilizan combustibles sólidos cuya potencia térmica nominal es menor o igual que 25 kW. Estas deben operar a puerta cerrada y estar desprovistas de alimentación mecánica, asegurando así su funcionamiento eficiente y cumplimiento de los estándares de calidad.

Para cada régimen de combustión se realiza una corrida de ensayo diaria. Las cargas de ensayo para todos los regímenes de combustión se calculan a partir de la carga obtenida bajo Potencia Nominal (punto b).

Para el análisis de las pérdidas en los residuos sólidos, se debe extraer las cenizas que caen en la parrilla inferior de la cámara de combustión al cenicero, en el momento previo a cargar e iniciar el siguiente ensayo.

a) Corridas de ensayo

Con el fin de llegar a régimen de combustión estacionario, se deben iniciar las corridas con una carga de encendido, luego una carga de pre-ensayo y así, posteriormente, poder realizar los ensayos válidos para la caracterización del sistema total, bajo el régimen de combustión deseado. En cada corrida se realizan como mínimo dos ensayos válidos.

b) Ensayo de Potencia nominal

Para el ensayo de potencia nominal la carga de pre-ensayo se debe realizar con la carga completa calculada para la potencia nominal declarada por el fabricante. El ensayo puede comenzar cuando se alcanza una reserva de brasas de aproximadamente un 20 a 25 % de la carga.

Este ensayo se realiza con la mayor velocidad de quemado posible, la cual se obtiene con los controles de tiro del equipo de combustión en las posiciones de mayor apertura.

c) Encendido

El encendido se puede realizar con una carga a la de potencia nominal (no menor al 20 %), pero para el ensayo de potencia nominal se deben realizar el encendido y pre-ensayo con la carga completa, para alcanzar el estacionario, el cual se encuentra en una mayor temperatura promedio de los humos que para los demás ensayos. El encendido se puede realizar incluyendo hojas y/o cartones.

d) Pre-ensayo

Este periodo tiene como objetivo alcanzar la masa de la reserva de brasas que se mantendrá en toda la corrida (reserva de brasa de un 20 a 25 % de la carga). Además, para comenzar el periodo de ensayos válidos se deben mantener las condiciones estables por al menos 15 minutos.

Para el ensayo de potencia nominal se debe realizar la carga completa en el pre-ensayo, con el máximo tiraje del equipo.

e) Combustión lenta, reducida y recuperación

Para el periodo de pre-ensayo se debe regular el control de aire hasta que el consumo de combustible no sea mayor al 33 % del obtenido a potencia nominal, si se ensaya con madera o briquetas de turba (25 % si se ensaya con otros combustibles) o un nivel de consumo de acuerdo con las especificaciones del fabricante.

Si se desea cambiar de categoría de velocidad de quemado o cuando se demora al ingresar la siguiente carga de ensayo, se debe realizar una carga de recuperación, la cual se realiza con un 33 % de la carga de Potencia nominal como mínimo.

3.2.2 Muestro de emisiones de material particulado

Para realizar el muestreo de material particulado se deben utilizar los Métodos de Medición de Contaminantes Atmosféricos establecidos en Chile, con mayor relevancia para el desarrollo de los ensayos del análisis experimental en los métodos de muestreo: Métodos CH-5G, CH-28, CH 5, CH-4, CH-2, y, los cuales se basan en los métodos de muestreo establecidos por la EPA.

Debido que las corridas de ensayos para realizar el muestreo de MP también se realizan determinando Potencia y Eficiencia Energética, se realizan protocolos de ensayo considerando las metodologías de la sección anterior (3.2 y 3.2.1).

a) Generalidades

Procurar realizar la carga de ensayo con 2 astillas de características similares, las cuales deben tener una pequeña separación, la cual se puede realizar con separadores de madera. Los leños no deben tener astillas, cortezas y cortes en su sección longitudinal, con una humedad entre un 15 % y 23 % en base seca.

La temperatura de los filtros durante el ensayo no debe ser superior a 35°C (90°F)

b) Encendido y Pre-ensayo

La carga de encendido se debe realizar con una masa de carga entre un 50 % a 80 %, al obtener una reserva de brasa entre 20 y 25 % del peso de la carga de leña combustible de prueba, se puede comenzar el pre-ensayo.

El pre-ensayo se realiza con la misma carga que la sección anterior, hasta alcanzar la reserva de brasa necesaria para el ensayo, verificando con un atizador mecánico que los trozos de brasa se encuentran quebradizos. Además, si no se presentan variaciones de la masa durante 10 minutos.

3.2.3 Tratamiento o Manejo de la información

En el desarrollo de las corridas de ensayos se utiliza una bitácora para el registro de las condiciones de operación, como la carga de combustibles, condiciones ambientales, duración, entre otras. Estas se registran en la aplicación donde se encuentra el grupo del proyecto.

Para cada corrida de ensayo, se cargan todos los registros realizados por los sistemas de medición automatizados, para así posteriormente, poder procesar la información y poder obtener los valores de potencia, eficiencia y emisiones. Esta información calculada es útil para realizar la programación de las corridas de ensayos siguientes, permitiendo encontrar problemas presentes en los ensayos y, permitir tener la cantidad de ensayos necesarios para poder validar la investigación.

Según los métodos utilizados, los regímenes de combustión se clasifican en 4 categorías según las velocidades de quemado. En la Tabla 3.6, se encuentran estas categorías de velocidad de quemado.

Tabla 3.6: Categorías establecidas por el método CH-28 para las velocidades de quemado

Categorías de velocidad de quemado (Promedio kg/h. (lb/(hr). base seca)			
Categoría 1	Categoría 2	Categoría 3	Categoría 4
< 0,80	0,80 a 1,25	1,25 a 1,9	Velocidad máxima de quemado
< 1,76	1,76 a 2,76	2,76 a 4,19	

3.2.4 Análisis de incertidumbre

El análisis de incertidumbre se realiza en base a la convención establecida por el Sistema Internacional de medidas (SI). Se procura evitar errores sistemáticos a través del uso de varios sistemas de medición, metodologías y, eliminando las experiencias únicas desviadas y, utilizando el criterio de Chauvenet, para verificar la desviación en experiencias múltiples y realizar la respectiva eliminación de un posible ensayo inválido.

Para los ensayos unitarios se utiliza la teoría de dispersión de errores para analizar la incertidumbre producto del error asociado a los instrumentos de medición utilizados y, además, para experiencias múltiples, se analiza la incertidumbre de experiencias múltiples, utilizando la desviación estándar, el “t Student” y el número de ensayos realizados, con una confiabilidad de 95 %.

3.3 Condiciones de ensayo

A continuación, se presentan las condiciones con la cual se desarrollaron los ensayos.

3.3.1 Ensayos Cocina sin recuperador

Los ensayos se realizaron entre Agosto y Septiembre del año 2023, la presión atmosférica en promedio para los ensayos fue de 1015 hPa, en la tabla 2.9 se encuentran las condiciones iniciales para los ensayos de la cocina sin uso de un recuperador de calor.

Tabla 3.7: Condiciones de ensayos realizados para la Cocina 1 sin recuperador (Caso Base)

Fecha	Ensayo	Categoría de vel. de combustión	MPZero	T. amb °C	Humedad bs. Comb. %	Velocidad de quemado kg/h	Tiempo ensayo min
18-08-2023	E1	Abierto	No	14,9	13,0	2,2	60
22-08-2023	E1	Abierto	No	15,0	14,4	3,2	43
22-08-2023	E2	Abierto	No	15,9	15,1	3,3	41
22-08-2023	E3	Abierto	No	16,7	14,8	2,4	55
24-08-2023	E1	Abierto	No	16,9	15,8	2,2	59
24-08-2023	E2	Abierto	No	17,5	16,1	2,2	60
24-08-2023	E3	Abierto	No	17,2	17,4	2,7	45
29-08-2023	E1	Abierto	No	15,3	13,9	2,4	57
31-08-2023	E1	Abierto	Si	15,3	12,7	2,4	59
04-09-2023	E1	Abierto	Si	14,8	12,4	2,5	50
18-08-2023	E2	Medio	No	15,6	14,0	1,8	67
18-08-2023	E3	Medio	No	15,8	13,8	1,8	66
25-08-2023	E1	Medio	No	16,4	15,7	2,0	60
30-08-2023	E2	Medio	Si	16,8	14,4	1,8	70
04-09-2023	E3	Medio	Si	15,0	17,2	1,9	75
05-09-2023	E1	Medio	Si	15,5	13,0	1,7	81
29-08-2023	E2	Cerrado	No	16,0	16,1	1,4	85
29-08-2023	E3	Cerrado	No	17,5	15,7	1,3	95
30-08-2023	E1	Cerrado	Si	16,5	14,4	1,6	76

30-08-2023	E3	Cerrado	Si	16,9	13,4	1,7	85
05-09-2023	E2	Cerrado	Si	15,8	14,0	1,6	82
05-09-2023	E3	Cerrado	Si	17,5	13,6	1,6	81

3.3.2 Ensayos con Recuperador Comercial

Los ensayos realizados con el recuperador Comercial presentaron una presión media de 1008 hPa, y fueron realizado durante el primer semestre del año 2023. En la Tabla 2.7 se encuentran las condiciones iniciales con las cuales se realizaron los ensayos.

Tabla 3.8: Condiciones de ensayos de la Cocina 1 con recuperador comercial

Fecha	Ensayo	Tiraje	Agua	MPZero	Tamb °C	Humedad bs. comb. %	Velocidad de quemado kg/h	Tiempo ensayo min
04-05	E1	Abierto	Estancada	No	19,0	12,0	2,7	49
04-05	E2	Abierto	Estancada	Si	20,0	13,5	2,3	55
10-05	E1	Abierto	Circulación	No	17,5	13,0	2,1	50
13-09	E2	Abierto	Circulación	Si	16,2	12,1	2,1	68
11-09	E1	Medio	Estancada	Si	17,9	13,5	1,9	76
11-092	E2	Medio	Estancada	Si	18,1	12,7	1,8	80
10-05-2023	E2	Medio	Circulación	Si	17,5	13,0	1,7	69
15-05-2023	E3	Medio	Circulación	Si	20,1	13,0	1,7	80
13-09-2023	E1	Medio	Circulación	Si	15,8	10,7	1,7	76
13-09-2023	E3	Medio	Circulación	Si	16,4	12,1	2,0	71
11-09-2023	E3	Cerrado	Estancada	Si	18,3	13,2	1,6	91
09-05-2023	E1	Cerrado	Circulación	No	19,0	13,0	1,2	94
15-05-2023	E4	Cerrado	Circulación	No	20,2	13,0	1,6	79

3.3.3 Ensayos con Recuperador Prototipo

Los ensayos de la Cocina 1 implementada con el sistema de recuperación desarrollada por el proyecto Fondef se realizaron con una presión atmosférica media de 1012 hPa. Las condiciones de operación se encuentran en la Tabla 2.8.

Tabla 3.9: Condiciones de ensayos para la Cocina 1 con recuperador “Prototipo”

Fecha	Ensayo	Tiraje	Agua	MPZero	T. amb °C	Humedad bs. Comb. %	Velocidad de quemado kg/h	Tiempo de ensayo min
17-07-2023	E1	Abierto	Estancada	No	11,6	13,0	2,1	58
17-07-2023	E2	Abierto	Estancada	No	14,0	12,4	2,9	53
17-07-2023	E3	Abierto	Estancada	No	14,6	13,0	2,3	58
28-09-2023	E2	Abierto	Estancada	No	19,6	11,4	2,3	60
28-09-2023	E3	Abierto	Estancada	No	20,1	11,1	2,3	65
25-05-2023	E2	Abierto	Circulación	Si	18,4	12,0	2,6	63
04-08-2023	E1	Abierto	By-pass	No	13,5	13,1	2,4	51
04-08-2023	E2	Abierto	By-pass	No	14,8	13,0	2,6	52
07-08-2023	E1	Abierto	By-pass	Si	12,9	13,9	2,2	58
07-08-2023	E2	Abierto	By-pass	Si	13,3	13,4	3,5	38
07-08-2023	E3	Abierto	By-pass	Si	16,7	16,1	2,2	60
28-09-2023	E1	Medio	Estancada	No	19,1	11,3	1,8	64
21-09-2023	E2	Medio	Estancada	Si	17,7	11,8	1,9	95
31-05-2023	E2	Medio	By-pass	Si	18,9	11,2	1,7	74
20-09-2023	E1	Cerrado	Estancada	Si	17,8	10,7	1,6	95
20-09-2023	E2	Cerrado	Estancada	Si	17,9	12,4	1,7	84
20-09-2023	E3	Cerrado	Estancada	Si	18,2	11,6	1,6	82
21-09-2023	E1	Cerrado	Estancada	Si	17,3	12,8	1,5	85

2023								
21-09-2023	E3	Cerrado	Estancada	Si	17,9	11,4	1,6	91
31-05-2023	E1	Cerrado	Circulación	No	18,4	12,0	1,5	84
05-06-2023	E3	Cerrado	Circulación	No	18,2	12,0	1,7	75
05-06-2023	E4	Cerrado	Circulación	No	18,2	12,0	1,6	77
05-06-2023	E2	Cerrado	Circulación	Si	18,0	12,0	1,5	78

4 Capítulo 4: Método de Cálculo

En el siguiente capítulo se centra en el modelo teórico con el cuál se determinará la potencia nominal y la eficiencia energética o rendimiento térmico, para un sistema de combustión de biomasa (cocina a leña de la Figura 3.2), este equipo se encuentra instalado en base a las especificaciones de instalación de la normativa chilena.

La Potencia Nominal de un equipo de combustión de biomasa se refiere a la máxima capacidad de generación de calor que puede proporcionar de manera continua y el rendimiento térmico indica la eficiencia con la que se transforma el combustible en energía útil.

4.1 Rendimiento y pérdidas de calor

Es importante recalcar que la eficiencia se calcula en base al rendimiento indirecto, el cual se realiza cuantificando las pérdidas energéticas en las emisiones de gases de combustión con respecto al poder calorífico inferior del combustible quemado.

Las pérdidas porcentuales presentes en las emisiones se dividen en pérdidas de calor sensible (q_a) y calor latente (q_b), las cuales dependen de la composición porcentual de los gases de combustión (CO_2 , CO y O_2), composición del combustible (C , H Y O) y la humedad presente en este (W), la temperatura de referencia (temperatura ambiente promedio t_r), un componente que representa de las pérdidas del combustible en los residuos (C_r) y la temperatura de los humos (t_a), la cual se mide a la salida de la chimenea.

Cabe destacar que, el cálculo se realiza utilizando los valores promedios registrados por los sistemas de monitoreo, estos deben tener una desviación menor a 15 % y el valor del CO se debe corregir al 13 % de O_2 , la expresión para realizar esta corrección se encuentra detallada en el punto 4.4

Así para estimar el rendimiento térmico nominal se utiliza la siguiente expresión:

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_r) \quad (1)$$

4.1.1 Pérdidas de calor sensible en los humos

Para obtener las pérdidas porcentuales de calor sensible, con respecto al poder calorífico (H_u) del combustible quemado en los ensayos, se deben utilizar las siguientes expresiones:

$$q_a = 100 \cdot \frac{Q_a}{H_u} \quad (2)$$

$$Q_a = (t_a - t_r) \times \left\{ \left[\frac{C_{pmd} \cdot (C - C_r)}{(0.536 \cdot (CO + CO_2))} \right] + \left[\frac{C_{pmH_2O} \cdot 1.92 \cdot (9H + W)}{100} \right] \right\} \quad (3)$$

$$C_r = \frac{R \cdot b}{100} \quad (4)$$

Los factores t_a y t_r son la temperatura de los humos y el ambiente respectivamente. La expresión para obtener los coeficientes C_{pmd} y C_{pmH_2O} , los cuales corresponden al calor específico de los humos secos en condiciones estándar y al calor específico del vapor de agua respectivamente, se encuentran en la sección 4.4.

4.1.2 Pérdidas de calor latente en los humos

Las expresiones utilizadas para obtener estas pérdidas son:

$$q_b = 100 \cdot \frac{Q_b}{H_u} \quad (5)$$

$$Q_b = \frac{12644 \cdot CO \cdot (C - C_r)}{(0.536 \cdot (CO_2 + CO) \cdot 100)} \quad (6)$$

4.1.3 Pérdidas de calor debido a los sólidos no quemados en los residuos

Las pérdidas debido al combustible no quemado alojado en las cenizas se calculan con las expresiones siguientes, en donde “R” serían las pérdidas en los residuos con respecto a la masa de combustible quemado y “b” los Constituyentes combustibles con respecto a la masa de material residual.

$$q_r = 100 \cdot \frac{Q_r}{H_u} \quad (7)$$

Donde:

$$Q_r = \frac{335 \cdot b \cdot R}{100} \quad (8)$$

4.2 Potencia térmica total

La potencia térmica total se debe calcular a partir de la tasa de quemado (B), la cual se obtiene dividiendo la masa de combustible quemado en kg por la duración del ensayo en horas, con el rendimiento, y el poder calorífico del combustible, aplicando la ecuación:

$$P = \frac{\eta \cdot B \cdot H_u}{100 \cdot 3600} \quad (9)$$

4.3 Contenido de CO al 13 % de Oxígeno

Con este método de cálculo, los valores medios de los componentes no se ponderan, para las fluctuaciones posibles del caudal másico durante el período de ensayo, pues los caudales de humos se suponen constantes y los errores de cálculo se juzgan pequeños:

El contenido de CO se debe calcular con el procedimiento siguiente:

- El valor medio de monóxido de carbono CO se debe calcular como el valor medio de todos los datos de CO procedentes de las lecturas de los instrumentos durante el período de ensayo.

-El valor de CO , se debe convertir a un valor de contenido de CO basado en un contenido de oxígeno normalizado ($O_{2\text{ normalizado}}$) en los humos de acuerdo con una de las ecuaciones siguientes llamado:

Así el valor de del CO corregido ($CO_{corr.}$) se calcula con la siguiente expresión:

$$CO_{corr.} = CO_{med} \cdot \frac{21 - O_{2\text{ normalizado}}}{21 - O_{2\text{ med}}} \quad (10)$$

Donde el porcentaje de Oxígeno normalizado ($O_{2\text{ normalizado}}$) es igual a un 13 %

NOTA: Cuando el CO se mide sobre una base volumétrica (% en volumen o partes por millón) y como la concentración de CO se debe calcular en unidades de concentración en masa ($\frac{mg}{m^3}$), el valor medio CO_{med} se debería cambiar como sigue:

a) Si el CO se mide como partes por millón (ppm):

$$CO_{med} \left(\frac{mg}{m^3} \right) = CO_{med} \cdot (ppm) \cdot d_{CO} \quad (11)$$

b) Si el CO se mide como porcentaje (% en volumen):

$$CO_{med} \left(\frac{mg}{m^3} \right) = CO_{med} \cdot (\% vol) \cdot d_{CO} \cdot 10\ 000 \quad (12)$$

Donde la densidad del monóxido de carbono en condiciones estándar $d_{CO} = 1.25 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$

4.4 Calor específico de los productos de la combustión

4.4.1 Calor específico de los humos secos en condiciones estándar C_{pmd}

El calor específico de los humos secos en condiciones estándar se debe calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$C_{pmd} = 3.6 \cdot \left(0.361 + 0.008 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0.034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right. \\ \left. + \left(0.085 + 0.19 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0.14 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{1000} \right) \right. \\ \left. + \left(0.3 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) - 0.2 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right) \cdot \left(\frac{CO_2}{1000} \right)^2 \right) \quad (13)$$

4.4.2 Calor específico del vapor de agua C_{pmH_2O}

El calor específico del vapor de agua (C_{pmH_2O}) en los productos de combustión se debe calcular aplicando la siguiente fórmula:

$$C_{pmH_2O} = 3.6 \cdot \left(0.414 + 0.038 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right) + 0.034 \cdot \left(\frac{t_a}{1000} \right)^2 \right) \quad (14)$$

4.5 Emisiones de Material Particulado

El muestreo de material particulado (MP2,5) se realiza a través de los métodos de evaluación de contaminantes atmosféricos del Instituto de Salud Pública, del Ministerio de Salud. Principalmente se utilizan los Métodos CH-5G y CH-28 enfocados en la determinación del material particulado de calefactores a leña medidos en un túnel de dilución, para certificación y auditorías, además estos aluden a los Métodos CH-5, CH-2 Y CH-4.

Los resultados del registro de este muestreo son desarrollados por el Dr. Jorge Jimenez del Río, director del departamento de Ingeniería Civil Industrial de la UdeC. Estos resultados se registran un Excel con todos los resultados de los ensayos, los cuales se evalúan en esta Memoria de Título.

5 Capítulo 5: Resultados de ensayos

A continuación, se presentan los resultados del análisis experimental del sistema de combustión y los sistemas de recuperación energética y reducción de emisiones. El número total de ensayos realizados es cercano a 90 ensayos, pero debido a problemas en los sistemas e instrumentos de monitoreo, como por ejemplo, cortes de corriente debido al contacto del electrodo con la pared del estanque, generado por la turbulencia de los gases de combustión, no alcanzar las condiciones de equilibrio en el primer ensayo válido de la corrida, fallas del analizador gases y las desviaciones presentes para el ensayo, entre otras, se analiza un total de ensayos 57 ensayos válidos para la caracterización de las condiciones de operación del sistema.

5.1 Generalidades

En primera instancia, se desarrollan ensayos para la máxima velocidad de quemado, lo cual es necesario para evaluar la potencia nominal de la Cocina y el tiempo de duración de una carga de ensayo, bajo estas condiciones. Estos valores se requieren para calcular la carga de combustible del equipo, referencia para todos los ensayos posteriores.

La carga de combustible para potencia nominal obtenida para la Cocina 1 es de $2,35 \pm 0,24$ kg y para la Cocina 2 se obtuvo una carga de ensayo $2,69 \pm 0,27$ kg

Para la obtención de resultados se utilizan las propiedades del combustible detalladas en el anexo xx, en donde se consideran las propiedades para madera dura y blanda, a partir del poder calorífico superior (PCS) se calcula el inferior (PCI), a partir de la humedad en base seca (bs) corregida a base humedad (bh). El PCI obtenido y utilizado para los cálculos es de $17\ 140 \frac{kJ}{kg}$, cumpliendo las condiciones permitidas en la norma. La presión atmosférica promedio durante los ensayos realizados rondaba los 1015 ± 10 hPa.

5.1.1 Descripción de ensayos

En primera instancia, se realizaron ensayos del sistema de combustión operando sin ningún otro sistema adicional, con el objetivo de caracterizar el equipo de combustión utilizado en condiciones cotidianas de uso residencial, y así, poder obtener valores de referencia para evaluar el beneficio de implementar sistemas de recuperación energética o reducción de emisiones, bajo un método estandarizado.

Para cada sistema se evalúan ensayos realizados bajo los distintos regímenes de combustión. Para los casos con recuperador de calor, se realiza una distinción entre la condición de circulación y agua estancada dentro del estanque. La mayoría de las corridas de ensayos que se realizaron comenzaron

entre las 10-12 h. Cabe destacar que, a pesar de ciertas variaciones, el comportamiento del sistema es bastante estable y reproducible para todas las condiciones de operación.

5.1.2 Clasificación de las condiciones de ensayo

Para cada corrida de ensayo se utiliza una bitácora para registrar las cargas de combustible, condiciones ambientales, humedades, posicionamiento de los controles de tiraje, entre otros. En varias ocasiones no se registraron la posición de los controles de tiraje establecidas por el laboratorista, ni la categoría de velocidad de quemado que se desea obtener, lo cual dificulta la clasificación por tiraje.

Además, para obtener regímenes de combustión de algunos ensayos se utilizaba sólo el control de salida de los gases desde la cámara de combustión y, posteriormente se comprobó que el control de la rejilla delantera es más significativo para la velocidad de quemado, esto produce que ciertos ensayos tengan una velocidad de quemado incongruente con el régimen de combustión que se registró en la bitácora, ya que no se verificaba ni registraba en que condición estaba la rejilla delantera.

Debido a lo anterior y sumado a que, para los calefactores a leña evaluados, no se pudo obtener la categoría 1 y se obtuvieron sólo 2 ensayos para la categoría 2 establecidas en las normas, se realiza una nueva clasificación que permita evaluar la diferencia entre los distintos regímenes de combustión.

Las nuevas categorías de velocidad de quemado se encuentran en la Tabla x, la cual permite relacionar los consumos de combustible con el régimen de combustión y así, poder diferenciar entre los regímenes de combustión lenta para tiraje cerrado, media y rápida, para las velocidades de quemado desde menor a mayor. Este valor se mide en kg/h según lo establecido en los métodos utilizados.

Tabla 5.1: Categorías establecidas para la clasificación de la velocidad de quemado

Categorías de velocidad de quemado kg/h		
Mínima o lenta	Media	Máxima o rápida
< 1,7	1,7 a 2	> 2

5.1.3 Pérdidas presentes en los residuos sólidos (cenicero)

la norma NCh-3173.of2009 permite realizar una aproximación para estas pérdidas en equipos de combustión de biomasa residencial, este valor se utilizó en los primeros ensayos y para calcular la carga de combustible de cada cocina, el valor de las pérdidas en los residuos con respecto al combustible de ensayo es de 0,5 %. Posteriormente se realizaron mediciones de algunos ensayos, con el fin de corroborar este valor y su influencia en la eficiencia.

En la Tabla 4.2 se encuentran los valores promedio de corridas de ensayo completas, para las condiciones de tiraje abierto y cerrado de la Cocina 1. R es el porcentaje de residuos (ceniza) con respecto a la masa de combustible o carga de ensayo, b la relación entre los componentes sólidos de los residuos con respecto a la masa total de estos, C_r son los componentes sólidos en los residuos con respecto a la carga del combustible de ensayo y, Q_r las pérdidas de calor con respecto a la masa del combustible de ensayo y q_r las pérdidas porcentuales con respecto al PCI del combustible. Estos valores se obtienen utilizando las ecuaciones del capítulo 3.

Tabla 5.2: Promedio de pérdidas en los residuos sólidos para corridas de ensayo de la Cocina 1

Régimen de ensayo	Carga de ensayo kg	Residuos (ceniza) g	Sólidos en residuos g	R % masa	b % masa	C_r	Q_r kJ/kg	q_r %
Tiraje abierto	2,17	7,2	3,8	0,33	52,78	0,18	58,66	0,34
	2,22	5,1	1,5	0,23	29,41	0,07	22,64	0,13
Tiraje cerrado	2,12	7,3	4,3	0,34	58,90	0,20	67,95	0,40
	2,21	8,88	5,5	0,40	61,94	0,25	83,37	0,49

Para la Cocina 1, se puede apreciar que las pérdidas porcentuales (q_r) bajo la condición de potencia nominal son inferiores a la aproximación de la norma, con un promedio de ambas corridas de 0,24 % de pérdidas (cada valor en la tabla es el promedio de los 3 ensayos de la corrida completa, monitoreados individualmente por cada carga). Los valores en tiraje cerrado son superiores a los obtenidos para potencia nominal y cercanos a la aproximación, promediando 0,45 % de pérdidas en los residuos.

Para la Cocina 2, debido a que con este equipo no se alcanza a realizar muchos ensayos, sólo se evalúan los resultados promedio obtenidos durante solo una corrida. La Tabla 4.3 contiene los resultados obtenidos en la corrida.

Tabla 5.3: Promedio de pérdidas en los residuos sólidos para corridas de ensayo de la Cocina 2

Régimen de ensayo	Carga de ensayo kg	Residuos (ceniza) g	Sólidos en residuos g	R %	b %	C_r %	Q_r kJ/kg	q_r %
Tiraje abierto	2,9	8,6	4,6	0,30	53,49	0,16	53,14	0,31

5.2 Resultados para Cocina 1 (Caso Base)

A medida que se desarrollan los ensayos, se aprecia que los distintos sistemas analizados tienen un comportamiento reproducible y análogo bajo todos los regímenes de combustión, es decir que, para las distintas condiciones de velocidad de quemado, se registra una evolución de los parámetros monitoreados con el mismo comportamiento en el tiempo, sólo difiriendo en su cuantía.

Considerando que las especificaciones o características referenciales exigidas y utilizadas para la comercialización de estos artefactos es bajo condiciones nominales, entre otros factores, como por ejemplo la claridad con la que se visualiza los parámetros monitoreados del sistema, se selecciona un ensayo que sea representativo al comportamiento bajo la condición de potencia nominal o que presenta bajas desviaciones.

En la figura 5.1 se muestran los valores registrados para un ensayo del día 24 de agosto del 2023, el cual es realizado bajo el criterio anterior, sin el uso de un recuperador de calor ni precipitador electrostático.

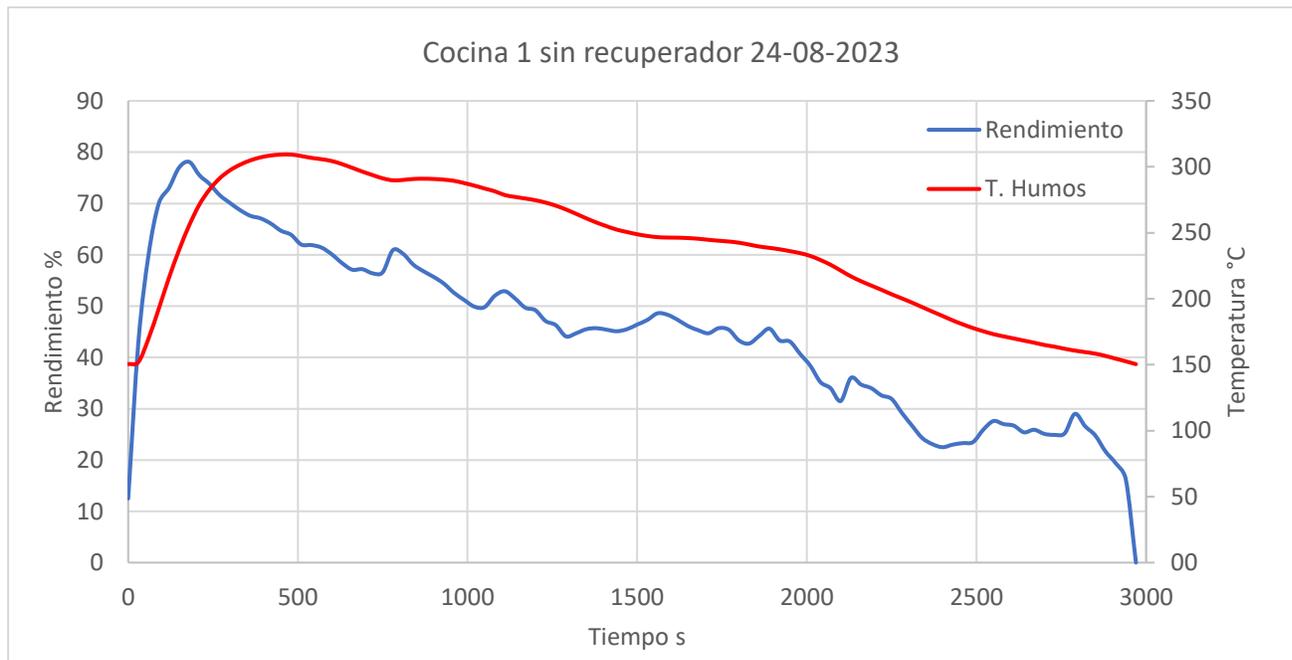


Figura 5.1: Variación del rendimiento y la temperatura de los gases durante un ensayo completo

Se puede apreciar que el rendimiento y la temperatura de los gases de combustión tienen una tendencia similar, en donde, al momento de ingresar la carga de ensayo ambos valores comienzan un aumento progresivo hasta llegar a un pick máximo y, posteriormente, descender con mayor suavidad hasta consumir completamente la carga de ensayo, finalizando el análisis cuando se alcanza la masa previa al ingreso del combustible o masa de la reserva de brasas.

En el caso de las emisiones de monóxido de carbono corregido, como se puede apreciar en la figura 5.2, las emisiones de CO_c presentan un comportamiento inverso al de la temperatura de los gases de emisiones y el rendimiento, coincidiendo el pick de máxima temperatura con el punto de mínimas emisiones de monóxido.

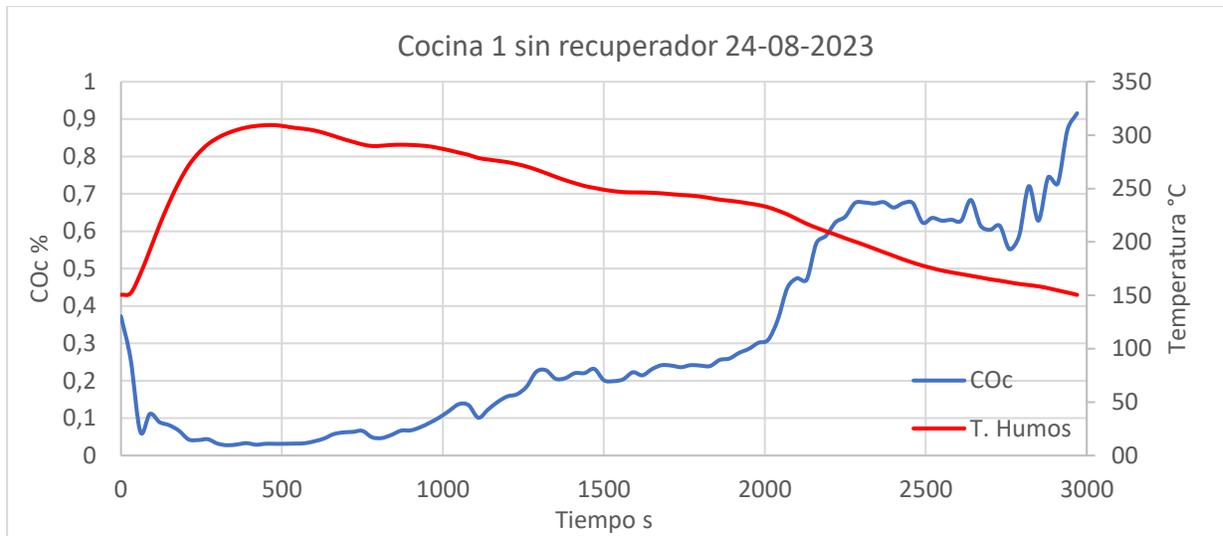


Figura 5.2: Comportamiento de las emisiones de monóxido corregido en relación con la temperatura de los humos

Al principio de la carga de ensayo, los componentes volátiles se consumen con mayor velocidad, en este periodo inicial es cuando se libera la mayor cantidad de energía y se realiza el mayor consumo de combustible, lo que se refleja en la temperatura de los gases, con un pequeño delay debido a la velocidad de reacción y a los procesos disociativos iniciales, posteriormente a medida que se va consumiendo la carga de ensayo y reduciendo el consumo de combustible, se queman los componentes de carbón y menos volátiles hasta alcanzar la masa de la reserva de brasas, en este instante final aumentan las emisiones de monóxido hasta finalizar el ensayo y muestreo, para posteriormente ingresar una nueva carga y volver a repetir el ciclo.

Cabe destacar que el CO_2 y O_2 también presentan un comportamiento inverso entre ellos, coincidiendo los valores máximos y mínimos respectivamente, los cuales se alcanzan rápidamente para después comenzar la tendencia inversa de una manera más lenta, como se puede apreciar en la figura 5.3. Estos valores, en conjunto con el rendimiento, van en una fase adelantada a los descritos en la figura 5.2.

A continuación, en la figura x se encuentra el comportamiento de las emisiones de oxígeno y CO_2 , otra consideración importante, es que el oxígeno tiene un comportamiento similar al monóxido corregido.

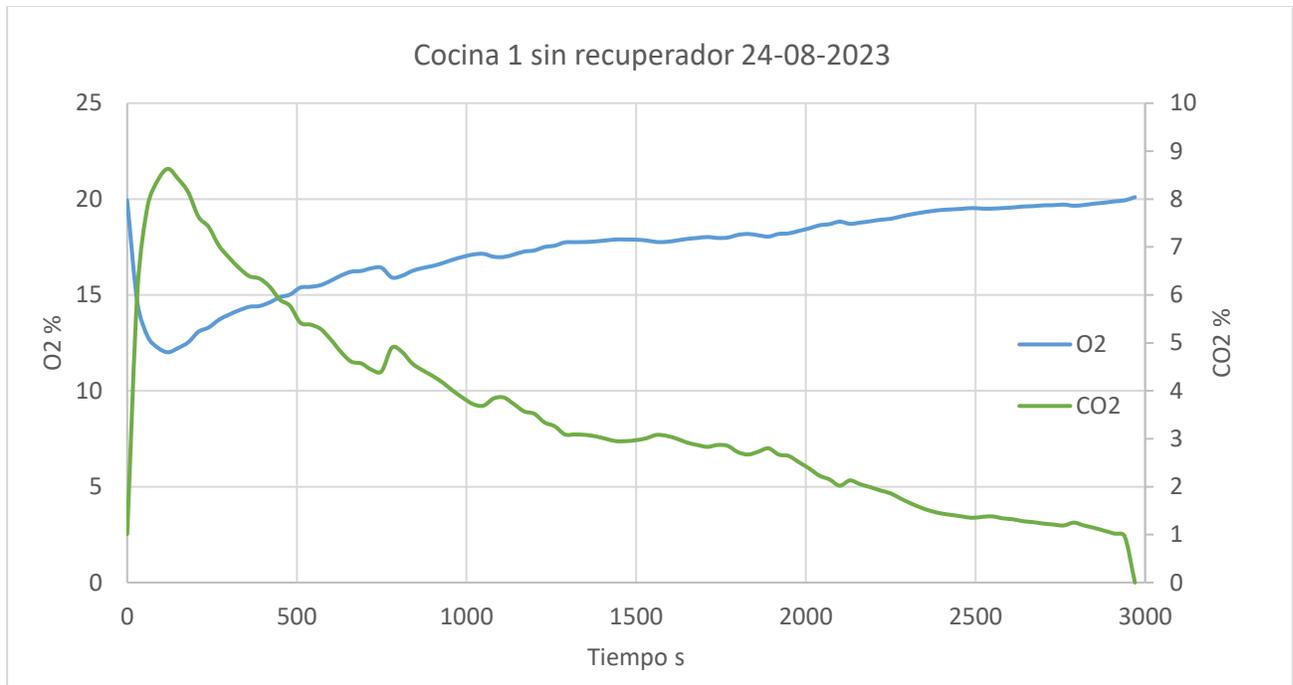


Figura 5.3 Comportamiento del porcentaje de oxígeno emitido en relación con el dióxido de carbono

Se puede inferir que, en los instantes posterior de ingresar la carga de ensayo, comienza a aumentar la producción de CO_2 , lo cual consume gran parte del aire primario que ingresa a la cocina, reduciendo la cantidad de O_2 , lo que fomenta los procesos disociativos y, a medida que se va produciendo CO aumenta los niveles de O_2 en las emisiones.

Durante el desarrollo de las experiencias de laboratorio, para algunos laboratoristas les era contra intuitivo que llegando al final del ensayo, al aumentar los niveles de CO , también aumentan las emisiones de O_2 , pero si se analiza la reacción de oxidación del Carbono en el combustible, se puede apreciar que la disociación del dióxido de carbono en monóxido libera $\frac{1}{2}$ de O_2 y una molécula de CO , por lo que cada dos disociaciones del CO_2 se produce una molécula de O_2 y dos de CO , lo cual justifica el comportamiento antes mostrado.

Para complementar lo antes descrito, se presentan otros gráficos comparativos de los valores monitoreados para el mismo ensayo.

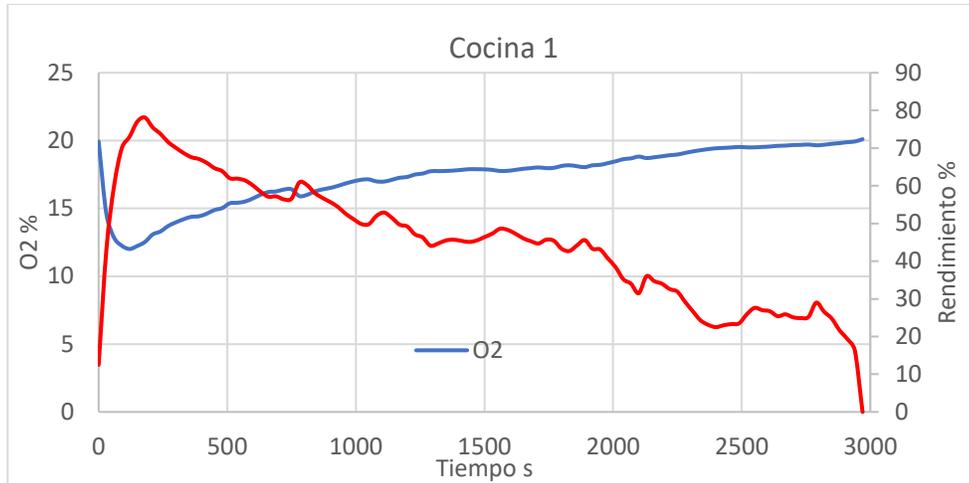


Figura 5.4: Comportamiento del oxígeno con respecto al rendimiento

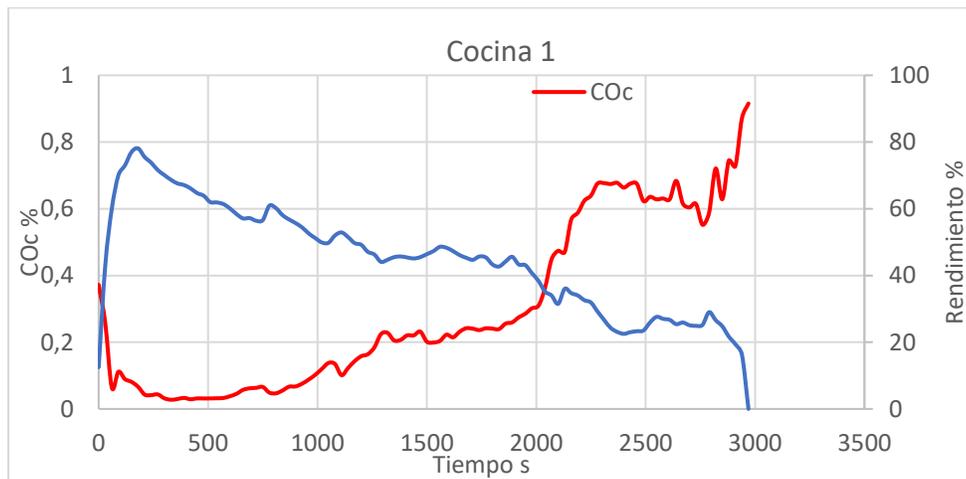


Figura 5.5: Comportamiento del monóxido con respecto al rendimiento

5.2.1 Potencia Nominal, eficiencia energética y emisiones

A continuación, en la Tabla 5.4 se encuentran los resultados obtenidos para la categoría máxima de velocidad de quemado, la cual se obtiene con los controles de tiro completamente abierto. Estos valores son los promedios obtenidos para cada experiencia según lo establecido en la Norma, además son los resultados sin utilizar el precipitador electrostático, debido a posibles infiltraciones, las cuales se abordarán en la sección 5.6 (análisis de resultados).

Tabla 5.4: Resultados para la Cocina 1 bajo potencia nominal

Parámetro	Sin Recuperador
	Abierto
Velocidad quemado kg/h	2,6
Rendimiento %	$58,8 \pm 7,4$
Potencia N. kW	$7,3 \pm 1,7$
T humos °C	204,8
O_2 %	17,09
CO %	0,12
CO ₂ %	3,71
CO _c %	0,23
Temperatura ambiente °C	16,2
Humedad combustible %	15,0
Número de ensayos	8

La potencia nominal obtenida para la Cocina 1 es de $7,3 \pm 1,7$ kW, con un rendimiento de $58,8 \pm 7,4$ %, los gases de combustión se emiten a una temperatura promedio de 204,8 °C, alcanzando el pick máximo a una temperatura cercana a los 300 °C.

Estas características nominales de operación se utilizan para declarar y/o certificar los equipos de combustión y para la descripción del producto al momento de ser comercializado, además es la condición base para evaluar el beneficio de implementar los demás equipos que se integran al sistema.

5.2.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con los demás regímenes de combustión, estos se encuentran en la tabla 5.5. Estos valores se expresan de igual manera que en la sección previa.

Tabla 5.5 Resultados obtenidos para los demás regímenes de la Cocina 1.

Parámetro	Sin Recuperador	
	Medio	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	1,9	1,3
Rendimiento %	$58,6 \pm 8,0$	$60,8 \pm 7,4$
Potencia N. kW	$5,2 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,1$
T humos °C	183,3	148,4
O_2 %	17,79	18,42
CO %	0,08	0,08

CO_2 %	3,06	2,51
CO_c %	0,20	0,25
Temperatura ambiente °C	15,9	16,8
Humedad combustible %	14,5	15,9
Número de ensayos	3	2

Se puede apreciar que, al reducir el consumo de combustible, se reducen las emisiones de dióxido de carbono y aumentan los porcentajes de O_2 y CO , no obstante, la disminución del consumo de combustible permite un mayor tiempo de residencia y transferencia de calor de los gases con el recinto, reduciendo la temperatura de los gases en la salida, aumentando el rendimiento del sistema. No obstante, este aumento de rendimiento tiene menor influencia en la potencia que la reducción de la velocidad de quemado, los cuales son los únicos parámetros variables para su cálculo.

Producto de lo anterior, bajo la condición de combustión lenta o reducida se obtiene la mayor eficiencia energética pero la menor potencia, siendo cercano a un 61 % de rendimiento y 3,4 kW de potencia de calefacción, para este sistema de combustión.

5.2.3 Emisiones de Material Particulado

En esta sección se encuentran los resultados obtenidos para los ensayos que se realizan con muestreo de MP, a través del método isocinético, los valores obtenidos se presentan de la misma manera que en las secciones anteriores. En la tabla se encuentran los resultados obtenidos para la Cocina 1 sin el uso de recuperador de calor y sin precipitador electroestático, para todas las categorías de velocidad de quemado.

Los ensayos realizados con muestreo de MP es la misma que anteriormente, por este motivo en la tabla no se encuentran todos los resultados como se plantean anteriormente, debido a que esta sección está enfocada a las emisiones de MP.

Tabla 5.6: Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1

Parámetro	Categoría		
	Abierto	Medio	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	2,56	1,9	1,3
Rendimiento %	$58,8 \pm 7,4$	$58,6 \pm 8,0$	$60,8 \pm 7,4$
Potencia nominal kW	$7,3 \pm 1,7$	$5,2 \pm 1,0$	$3,9 \pm 0,1$
T humos °C	204,8	183,3	148,4
Tasa de emisiones de MP g/h	7,0	4,1	2,7

Tasa de emisiones de MP ajustada g/h	9,0	5,8	4,2
--------------------------------------	-----	-----	-----

Se puede apreciar que las emisiones máximas de material particulado se obtienen para la condición de tiraje abierto y se van reduciendo directamente proporcional al consumo de combustible y a la temperatura de los gases.

5.3 Resultados de la Cocina 1 + Recuperador Comercial

Después de caracterizar el equipo de combustión utilizado, se procede a evaluar el sistema integrando el primer recuperador de calor, el cual es un modelo convencional en el mercado.

5.3.1 Potencia nominal, eficiencia energética y emisiones

Los resultados obtenidos con el recuperador comercial integrado al sistema se presentan en la Tabla 5.7, estos valores son los promedios obtenidos bajo distintas condiciones del agua en el interior del estanque del recuperador, estos son para la condición de agua estancada y circulación natural debido a la presión del agua de la red del laboratorio. Para ambos casos, nuevamente se evalúan los resultados sin el uso de MPZero.

Tabla 5.7: Resultados con el uso del recuperador comercial bajo potencia nominal

Parámetro	Recuperador comercial	
	Estancada	Circulación
	Abierto	Abierto
Velocidad quemado kg/h	2,7	2,1
Rendimiento %	69,3	68,0
Potencia N. kW	9,0	6,9
T humos °C	152,8	160,8
O_2 %	16,87	17,20
CO %	0,40	0,20
CO_2 %	3,75	3,54
CO_c %	0,77	0,43
Temperatura ambiente °C	19,0	17,5
Humedad combustible %	12,0	13,0
Número de ensayos	1	1

Se puede corroborar lo planteado en la hipótesis, aumentando el rendimiento del sistema completo y la potencia de transferencia de calor, producto del enfriamiento del humo debido al uso del

recuperador de calor, reduciendo las pérdidas de calor sensible. Las temperaturas monitoreadas en los gases emitidos rodean picks máximos de 200 °C, 100 °C inferior al Caso Base.

Para la condición de agua estancada, después del consumo de la carga de cada ensayo se realiza una descarga del agua contenida en el estanque, la cual se evacua a una temperatura en promedio de 60 °C y, posteriormente, se deja fluir agua hasta obtener una temperatura igual a la de la red, en la zona de entrada y salida del estanque.

Cabe destacar que los parámetros de operación obtenidos para la condición con circulación de agua son menores a lo esperado, pero para este ensayo se utilizó una masa de carga demasiado baja con respecto a la calculada, lo cual podría estar influyendo en los valores obtenidos, sobre todo para el cálculo de potencia, que depende bastante de la velocidad de quemado.

5.3.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones

En la siguiente tabla se encuentran los valores para las demás categorías de velocidad de quemado, con las consideraciones establecidas previamente. Sólo se pudo obtener dos ensayos válidos para la condición de tiraje cerrado y con circulación de agua.

Tabla 5.8 Resultados para los demás regímenes con el uso del recuperador comercial

Parámetro	Recuperador comercial
	Circulación
	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	1,4
Rendimiento %	60,3 ± 10,9
Potencia N. kW	3,9 ± 0,8
T humos °C	127,0
O_2 %	18,75
CO %	0,14
CO_2 %	2,10
CO_c %	0,52
Temperatura ambiente °C	19,6
Humedad combustible %	13,0
Número de ensayos	2

En capítulo 4.6 se encuentra una comparación más detallada de todos los resultados obtenidos en los ensayos realizados. Cabe destacar que el tiempo de ensayo para este sistema de combustión es de aproximadamente de 1 hora para potencia nominal

5.3.3 Emisiones de Material Particulado, Cocina 1 + Recuperador Comercial

Nuevamente, los ensayos realizados con muestreo de material particulado coinciden con los anteriores para este sistema, debido a esto, sólo se muestran los datos principales de esta sección. En la tabla X se encuentran los resultados del muestreo de MP

Tabla 5.9: Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1 con el uso del recuperador comercial

Parámetro	Recuperador comercial		
	Abierto		Cerrado
	Estancada	Circulación	Circulación
Velocidad quemado kg/h	2,7	2,1	1,4
Rendimiento %	69,3	68,0	60,3 ± 10,9
Potencia N. kW	9,0	6,9	3,9 ± 0,8
T humos °C	152,8	160,8	127,0
Tasa de emisiones de MP g/h	17,3	6,6	2,1
Tasa de emisiones de MP ajustada g/h	19,4	8,7	3,3

Nuevamente los valores de emisiones de MP obtenidos para las categorías altas de velocidad de quemado, son mayores a los obtenidos bajo menores velocidades, siendo bastante altas en comparación con el caso base, lo cual es bastante sospechoso. No obstante, posteriormente se realizará una mejor comparación.

5.4 Resultados para Cocina 1 + Prototipo

Finalmente, se analizan los resultados obtenidos con la integración del recuperador de calor desarrollado en conjuntos por académicos asociados al proyecto Fondef ID21I10402. El Prototipo permite controlar la cantidad de pasos con el cual se realiza el intercambio de calor, todos los resultados que se exhiben son para la condición con tres pasos, a excepción del llamado by-pass, con el cual se obtuvieron pocos ensayos válidos.

5.4.1 Potencia Nominal, eficiencia energética y emisiones

Los resultados evaluados con la máxima condición de tiraje se encuentran en la Tabla 5.10, debido a problemas en los sistemas de monitoreo y bitácora, no se obtienen resultados para el caso con circulación de agua en el Prototipo.

Tabla 5.10: Resultados con el uso del Prototipo bajo potencia nominal

Parámetro	Prototipo
	Estancada
	Sin MPZero
Velocidad quemado kg/h	2,4
Rendimiento %	89,3 ± 1,7
Potencia N. kW	10,0 ± 1,2
T humos °C	71,6
O_2 %	14,74
CO %	0,32
CO_2 %	5,86
CO_c %	0,42
Temperatura ambiente °C	16,0
Humedad combustible %	12,2
Número de ensayos	5

El rendimiento promedio obtenido por el sistema utilizando el Prototipo es de 89,3 %, lo cual es bastante alto en comparación a todos los evaluados en las secciones previas, sobre todo considerando que los demás regímenes operan con mayor eficiencia. Además, se obtiene una potencia media de 2,7 kW mayor al caso base (sin recuperador), con un menor consumo de combustible, lo cual podría aumentar cerca de 1 kW más la potencia usando el Prototipo.

Otro resultado importante obtenido con el uso del Prototipo e influyente en la eficiencia, es la baja temperatura a la cual se emiten los gases de combustión, alcanzando una media de 71,6 °C, lo cual es bastante bajo en comparación a los 204,8 °C obtenidos para el sistema sin recuperador y con la misma categoría de velocidad de quemado (caso base). Además, cabe destacar que las temperaturas máximas alcanzadas rondan los 90 °C, lo cual es 200 °C inferior al promedio máximo alcanzado con el caso base.

Para el caso de las emisiones, como se esperaba con el sistema operando con un rendimiento más alto, el porcentaje de CO_2 es mayor que el obtenido con los sistemas sin recuperador e integrando el recuperador comercial, siendo consecuente con bajas emisiones de O_2 y lo esperado del análisis de gases. No obstante, los valores con MPZero presentan las mismas desviaciones para todos los ensayos evaluados, producto de posibles infiltraciones de aire, en el análisis de resultados (5.6) se realizará un mayor análisis.

5.4.2 Regímenes restantes, eficiencia energética y emisiones

A continuación, en la tabla 5.11 se encuentran los resultados obtenidos para los regímenes de combustión restantes.

Tabla 5.11: Resultados para las otras condiciones con el uso del Prototipo

Parámetro	Prototipo	
	Estancada	Circulación
	Medio	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	1,8	1,6
Rendimiento %	91,8 ± 1,8	92,5 ± 1,0
Potencia N. kW	7,9 ± 0,8	7,1 ± 0,6
T. humos °C	48,4	60,8
O ₂ %	16,02	13,96
CO %	0,24	0,26
CO ₂ %	4,66	6,64
CO _c %	0,39	0,29
Temperatura ambiente °C	19,1	18,3
Humedad combustible %	11,3	12,0
Número de ensayos	1	3

Se puede apreciar que los resultados del Prototipo para las categorías media y baja, se obtienen rendimientos sobre el 91 %, esto es 33,2 % superior a la cocina sin recuperador y un 16,1 % en comparación con el recuperador comercial, con una alta potencia.

Cabe destacar que los valores obtenidos en todos los ensayos realizados con el Prototipo están clasificados en la categoría A de eficiencia energética, en la cual su indicador para esta categoría es un rendimiento superior a un 85 %.

5.4.3 Emisiones de Material Particulado, Prototipo

A continuación, se encuentran los resultados del monitoreo de material particulado obtenidas con el uso del Prototipo.

Tabla 5.12 Tasa de emisiones de material particulado de la cocina 1 con el uso del Prototipo

Parámetro	Prototipo		
	Estancada	By-pass	Circulación
	Abierto	Abierto	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	2,4	2,5	1,6
Rendimiento %	89,1	66,5	92,5 ± 1,0
Potencia N. kW	10,1	7,6	7,1 ± 0,6
T. humos °C	81,8	187,3	60,8

O_2 %	13,86	16,67	13,96
CO %	0,32	0,11	0,26
CO_2 %	6,71	4,12	6,64
CO_c %	0,36	0,21	0,29
Temperatura ambiente °C	13,4	14,2	18,3
Humedad combustible %	12,8	13,1	12,0
Número de ensayos	3	2	3
Tasa de emisiones de MP g/h	8,4	5,7	2,1
Tasa de emisiones de MP ajustada g/h	10,5	7,7	3,4

Los resultados del muestro de MP con el prototipo son los de menor valor obtenidos en la mayoría de los ensayos realizados, a excepción de un ensayo en que, a pesar de tener valores de emisiones altas, está en el límite superior de desviaciones permitidas, pero por considerarse influyen en que este promedio no sea aún menor.

5.5 Resultados para la Cocina 2.

Posteriormente se realizaron ensayos con un segundo equipo de combustión de un modelo más novedoso y eficiente, fabricado por Alcazar al igual que la Cocina 1, el modelo analizado es el M-70.

En la Tabla 5.13 se encuentran el promedio de los resultados obtenidos para la Cocina 2, para la condición de potencia nominal y categoría media. Debido a no contar con más ensayos, no se puede evaluar los beneficios implementando los sistemas estudiados.

Tabla 5.13: Resultados obtenidos con la Cocina 2

Parámetro	Cocina 2	
	Abierto	Medio
Velocidad quemado kg/h	2,6	1,9
Rendimiento %	$73,6 \pm 4,4$	$75,7 \pm 11,3$
Potencia N. kW	$9,2 \pm 1,0$	$6,8 \pm 1,8$
T. humos °C	210,0	172,3
O_2 %	14,55	15,37
CO %	0,17	0,18
CO_2 %	6,09	5,34
CO_c %	0,23	0,25
Temperatura ambiente °C	21,0	18,8
Humedad combustible %	11,4	11,3
Número de ensayos	8	2

5.6 Análisis de Resultados

En primera instancia, se analizarán los resultados obtenidos con el uso del precipitador electroestático, los cuales hasta ahora no se habían considerado en las secciones anteriores, debido a valores incongruentes en las emisiones, los que dan indicios de posibles infiltraciones de aire en la sección donde se agrega el sistema para introducir el electrodo en el cañón. Esta situación es bastante lamentable, debido a que se planteó en la hipótesis un aporte significativo en la reducción de MP al integrar estos equipos en un equipo de combustión.

A continuación, se realiza una comparación de los resultados obtenidos para el recuperador comercial con la condición de agua estancada.

Tabla 5.14: Evaluación de infiltraciones con el uso de MPZero, para el recuperador comercial

Parámetro	Recuperador Comercial	
	Estancada	
	Sin MPZero	Con MPZero
Tasa Quemado kg/h	2,7	2,3
Rendimiento %	69,3	66,0
Potencia N. kW	9,0	7,3
T humos °C	152,8	146,8
O_2 %	16,87	17,89
CO %	0,40	0,17
CO_2 %	3,75	2,91
CO_{corr} %	0,77	0,43
T. amb.	19,0	20,0
Humedad comb.	12,0	13,5
N° de ensayos	1	1
Tasa de emisiones de MP g/h	17,3	1,7
Tasa de emisiones de MP adj. g/h	19,4	2,9

Se puede apreciar que los valores de emisiones no son coherentes, debido a que se esperaba un aumento del oxígeno proporcional a un aumento de las emisiones de CO , ya que producto de la disociación del CO_2 se espera un aumento de los componentes de su disociación, aumentando los valores de CO y O_2 , en relación 1:1 y 1:1/2 respectivamente, lo cual solo en los ensayos realizados con MPZero se obtienen valores con otra tendencia, analizando los demás gases de combustión también se presenta una reducción de todos los parámetros monitoreados excepto para el oxígeno, posiblemente debido a que la infiltración de aire aumentan el flujo de los gases, aumentando sólo el porcentaje de oxígeno y diluyendo la concentración de los demás. Otra consideración importante, es que los ensayos válidos que se realizaron con muestreo y sin este, bajo la misma condición, solo se cuenta con un ensayo con resultados válidos, además estos se encuentran en el límite máximo permitido por el método utilizado.

Para corroborar mejor este punto, en la tabla 5.15 se muestran los resultados obtenidos para la condición de tiraje cerrado, la cual presenta la misma tendencia que la analizada anteriormente.

Tabla 5.15: Evaluación de infiltraciones con el uso de MPZero, para el Prototipo

Parámetro	Prototipo	
	Circulación	
	Sin MPZero	Con MPZero
Tasa Quemado kg/h	1,6	1,51
Rendimiento %	92,5	92,0
Potencia N. kW	7,1	6,6
T humos °C	60,8	56,3
O2 %	13,96	15,04
CO %	0,26	0,22
CO2 %	6,64	5,62
CO corr %	0,29	0,30
Temperatura ambiente °C	18,3	18
Humedad combustible %	12,0	12
Número de ensayos	3	1

Nuevamente se puede apreciar que se reduce la temperatura de los gases y aumenta el oxígeno, pero se reducen las emisiones de monóxido.

Otra consideración importante y que posiblemente afecta a estos resultados son pequeños cortes e interferencias en los sistemas de medición, ocasionados por el contacto del electrodo con las paredes del estanque, producto de la turbulencia de los gases, lo cual produce un registro nulo durante estos momentos, perjudicando los valores monitoreados.

5.6.1 Mejoras en Eficiencia Energética de los recuperadores con respecto a la Cocina 1

A continuación, en la sección siguiente se realiza una comparación de los resultados obtenidos por los sistemas con el uso de recuperador de calor y la Cocina 1 sin ningún equipo adicional (Caso Base), esto se realiza a través de la diferencia entre sus parámetros, siendo un resultado con un valor positivo cuando el parámetro obtenido con recuperador es mayor al del caso base y un valor negativo en caso contrario.

En primera instancia se evalúa el beneficio obtenido con el uso de un recuperador comercial con respecto a la cocina 1, bajo la misma categoría de velocidad de quemado. En la Tabla 5.16 se encuentran estos resultados para la categoría máxima de velocidad de quemado.

Tabla 5.16: Comparación entre el Recuperador comercial y la Cocina 1 sin recuperador

Parámetro	Abierto	
	Estancada	Circulación
Velocidad quemado kg/h	0,2	-0,4
Rendimiento %	10,5	9,2
Potencia N. kW	1,7	-0,4
T humos °C	-52,1	-44,0
O_2 %	-0,2	0,1
CO %	0,3	0,1
CO_2 %	0,0	-0,2
CO_c %	0,5	0,2
Temperatura ambiente °C	2,8	1,3
Humedad combustible %	-3,0	-2,0

Los resultados obtenidos demuestran lo establecido como hipótesis, aumentando un 10,5 % el rendimiento del sistema completo con la integración del recuperador de calor comercial, para la condición de agua estancada, también se obtiene un aumento en potencia de 1,7 kW.

Considerando que con este recuperador de calor sólo se pudo evaluar un ensayo válido para estas condiciones, no se espera resultados demasiado concluyentes, lo cual queda en evidencia para el caso con circulación de agua en el estanque, en el cual se obtiene una menor potencia de operación, no obstante, esto se obtiene con una menor velocidad de quemado en $0,4 \frac{kg}{h}$, lo cual influye en gran manera a la potencia y podría ser el motivo de obtener un valor menor para el caso con circulación de agua, en comparación al caso base.

En la figura 5.6 se encuentra un gráfico descriptivo para realizar la comparación de estos sistemas, en donde se muestra el comportamiento de la temperatura de los gases para la cocina 1 y el Recuperador Comercial, para un ensayo representativo con el sistema estabilizado según la Norma utilizada.

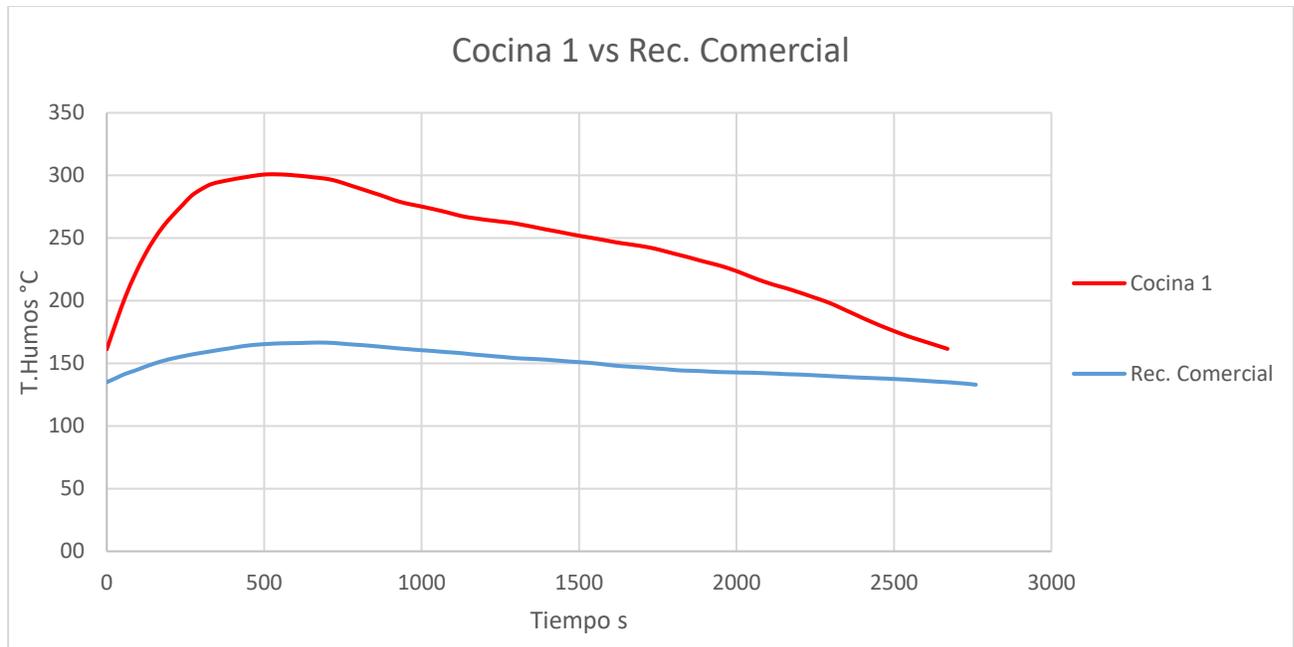


Figura 5.6: Relación de la temperatura de los humos entre la cocina 1 y con el uso del recuperador comercial

Se puede apreciar que los valores de temperatura obtenidos con el recuperador comercial son bastante inferiores y estables a esta escala en comparación al Caso Base, alcanzando un máximo inferior a los 175 °C en comparación con el pick de 300 °C para la cocina sin recuperador.

A continuación, se evalúa el beneficio obtenido integrando el Prototipo al sistema. En la Tabla 5.17 se encuentran los valores producto de la diferencia entre los resultados obtenidos con el Prototipo menos los obtenidos con el Caso Base para la condición nominal.

Tabla 5.17: Comparación entre el Prototipo y la Cocina 1 sin recuperador, bajo Potencia nominal.,

Parámetro	Abierto
	Estancada
Velocidad quemado kg/h	-0,2
Rendimiento %	30,5
Potencia N. kW	2,7
T humos °C	-133,3
O_2 %	-2,3
CO %	0,2
CO_2 %	2,1
CO_c %	0,2
Temperatura ambiente °C	-0,2
Humedad combustible %	-2,9

Se puede apreciar que los resultados obtenidos por el prototipo desarrollado en el proyecto son bastante satisfactorios, superando el aumento de rendimiento que se esperaba en lo planteado como hipótesis, justificando en gran medida el uso de este recuperador de calor. El Prototipo aumenta el rendimiento en un 30,5 % para la condición de tiraje máximo y la potencia nominal obtenida es 2,7 kW superior al Caso Base, reduciendo el porcentaje de O_2 y aumentando CO_2 en las emisiones, lo cual es coherente con un mayor rendimiento, considerando además que los gases se emiten a 133 °C menos que para el Caso Base.

Se esperaba que la cantidad monóxido monitoreada sea inferior, debido a la reducción del oxígeno y una menor disociación del CO_2 , pero esto depende de varios factores y no se aprecia muy bien a través de estos parámetros. Sería conveniente evaluar el exceso de aire para estos ensayos, lo cual podría dar justificación a estos valores, cambiando las relaciones volumétricas con respecto al combustible.

Cabe destacar que con el Prototipo se obtienen picks máximos de 90 °C, 200 °C inferior al Caso Base, siendo la temperatura media cercana a los 72 °C para la condición de Potencia nominal, en donde se obtienen los valores más altos.

Los demás ensayos de Potencia nominal presentan anomalías similares en el analizador de gases, incluso se obtienen valores menores de potencia con respecto al Caso Base, al utilizar MPZero, pero esto puede ser debido a los cortes de corriente en los sistemas de registro de datos y las infiltraciones de aire.

En la figura 5.7 se muestra un gráfico de los valores monitoreados de temperatura de los gases de combustión obtenidos con el Prototipo y el Caso base, bajo la condición de Potencia nominal, la cual es la más representativa del sistema. El registro de estos valores se realiza cada 30 segundos.

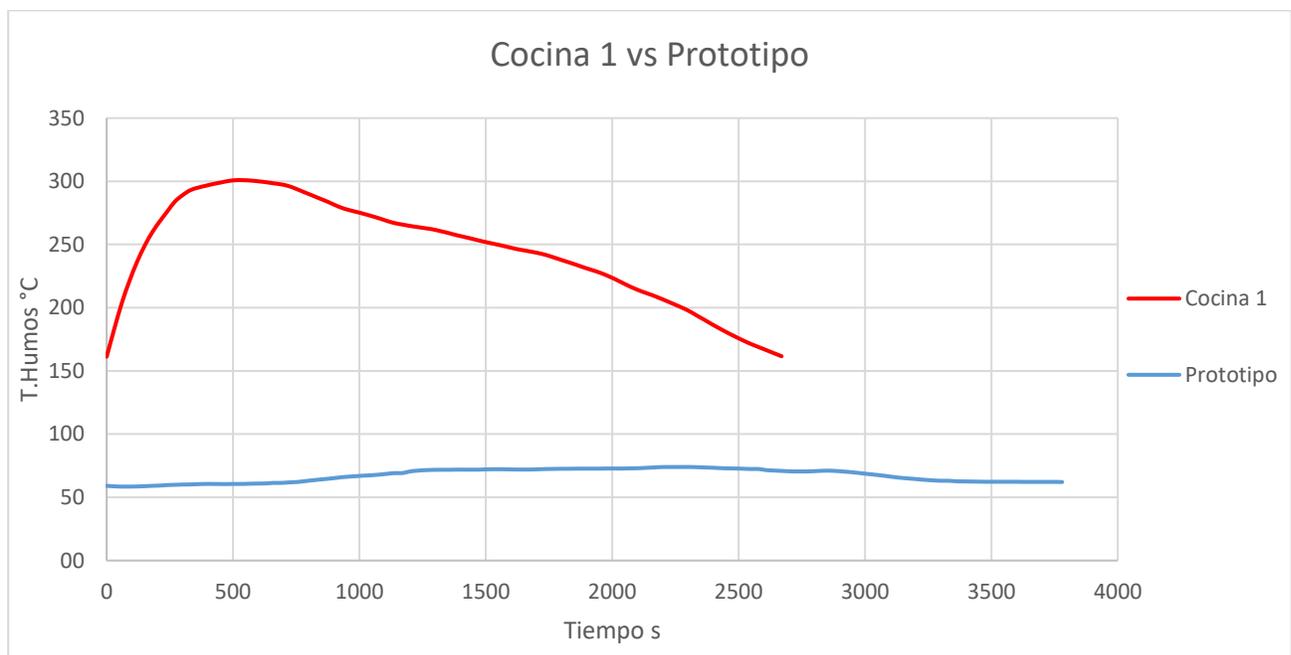


Figura 5.7: Diferencia de temperatura en los humos entre la cocina 1 y el Prototipo

Se puede apreciar que la temperatura obtenida con el Prototipo es bastante inferior y estable al Caso Base, demostrando una gran disminución en la temperatura a la cual se emiten los gases, aumentando el rendimiento en gran medida. Además, cabe destacar que los ensayos realizados con el Prototipo tienen una menor duración para todos los ensayos evaluados, bajo la misma carga de combustible calculada para la condición nominal.

En la tabla 5.18 se encuentra la diferencia entre el Prototipo y la Cocina 1 para las demás categorías de velocidad de quemado.

Tabla 5.18 Comparación entre el Prototipo y la Cocina 1 sin recuperador, para las categorías de velocidad de quemado media y baja.

Parámetro	Estancada	Circulación
	Medio	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	-0,1	0,3
Rendimiento %	33,2	31,8
Potencia N. kW	2,7	3,2
T humos °C	-134,9	-87,6
O_2 %	-1,8	-4,5
CO %	0,2	0,2
CO_2 %	1,6	4,1
CO_c %	0,2	0,0
Temperatura ambiente °C	3,1	1,5
Humedad combustible %	-3,2	-3,9

Al igual que para tiraje abierto, se obtienen rendimientos sobre un 30 % superior a la Cocina 1, con una gran reducción en la temperatura de las emisiones, se puede apreciar que siempre aumenta el porcentaje de Monóxido en todas las comparaciones realizadas.

Si se recuerda que el cálculo de potencia es bastante sensible a la variación del régimen de combustión y, considerando que los valores negativos presentes en las tablas de esta sección se interpretan como una condición en que el parámetro evaluado es mayor para el recuperador que en el Caso Base, el cual podría ser el factor influyente en una relación de potencia mayor para la condición de tiraje cerrado.

5.6.2 Diferencia entre el sistema con Prototipo y Rec. Comercial.

A continuación, se realiza una comparación de los valores obtenidos entre el Prototipo y el recuperador comercial. En la figura 5.8 se encuentra el comportamiento de la temperatura de los gases emitidos cada 30 segundos.

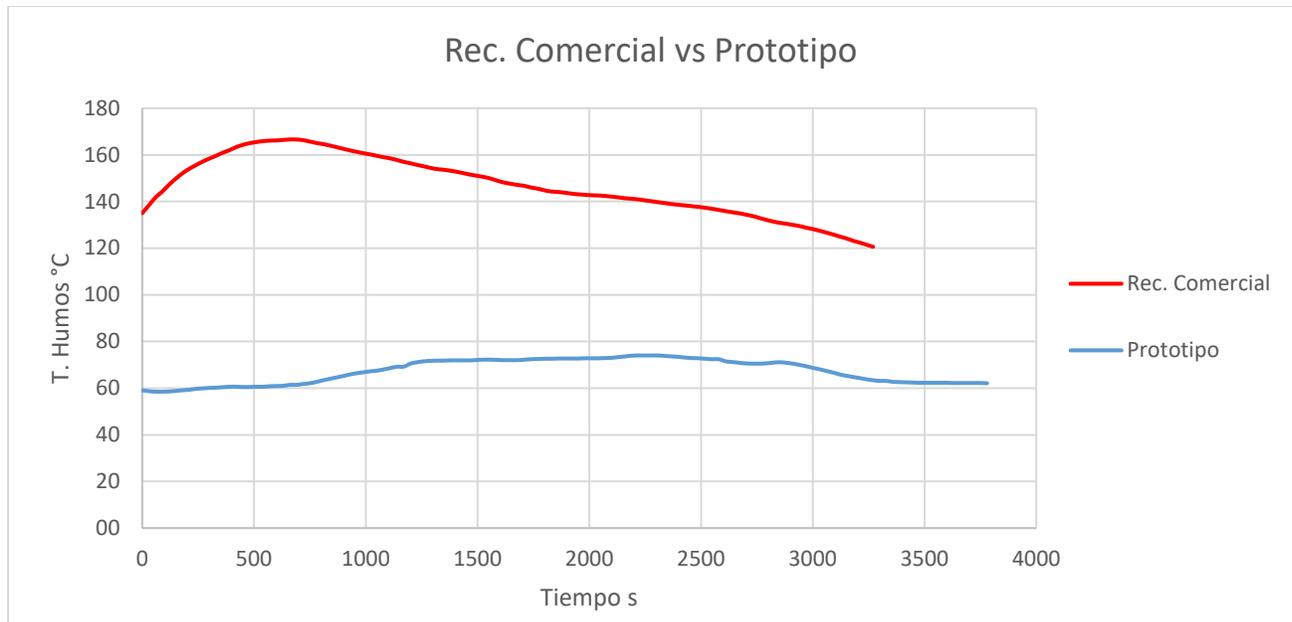


Figura 5.8 Diferencia de temperatura entre el Prototipo y el recuperador comercial

La temperatura emitida por el Prototipo aún es bastante inferior y estable en comparación a la que se obtienen en los ensayos con recuperador comercial. Al igual que antes, el ensayo con Prototipo tiene mayor duración que los demás, lo cual se nota en una menor velocidad de quemado promedio bajo el mismo régimen de combustión. Esto quizás se debe al enfriamiento de los gases, lo cual podría estar aumentando su densidad relativa, con respecto a una similar diferencia de presión entre la entrada de la cámara de combustión y la salida de la chimenea, produciendo un mayor tiempo de permanencia de los gases, lo cual también influye en el rendimiento.

En la tabla 5.19 se encuentran los valores que se pudieron comparar para las demás categorías de velocidad de quemado.

Tabla 5.19: Comparación entre el Recuperador comercial y la Cocina 1 sin recuperador

Parámetro	Estancada	Circulación
	Abierto	Cerrado
Velocidad quemado kg/h	-0,4	0,2
Rendimiento %	20,0	32,2
Potencia N. kW	0,9	3,1
T humos °C	-81,2	-66,2
O_2 %	-2,1	-4,8
CO %	-0,1	0,1
CO_2 %	2,1	4,5
CO_c %	-0,4	-0,2
Temperatura ambiente °C	-3,0	-1,3
Humedad combustible %	0,2	-1,0

Se puede apreciar que el Prototipo además de tener una mayor potencia, tiene un rendimiento un 20 % superior para la condición de tiraje medio y un 32,2 % para tiraje cerrado, siendo bastante mejor para el funcionamiento del sistema la integración del Prototipo en comparación a un recuperador de calor convencional presente en el mercado.

5.6.3 Energía recuperada como ACS

A continuación, se presenta el registro del monitoreo del calentamiento del agua al interior del estanque para 3 cargas de ensayo durante la misma corrida, donde T_{wsu} sería la temperatura de entrada al estanque y T_{wex} la temperatura de salida.

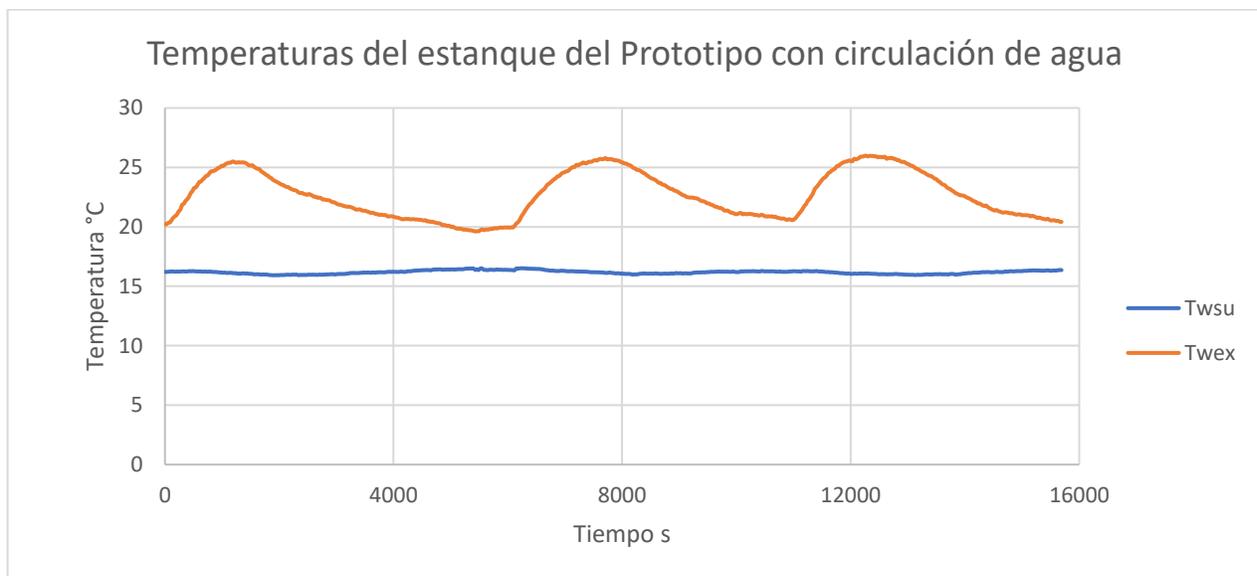


Figura 5.9: Calentamiento del agua al interior del estanque del Prototipo, bajo la condición de circulación de agua

La diferencia de temperatura máxima que se alcanza en cada carga es cercana a los 9,5 °C, considerando una capacidad calorífica $C_p = 4,19 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C}$ y un flujo de $0,083 \frac{kg}{s}$, se obtiene una energía transferida al agua del estanque de 35 680,10 kJ. El ensayo evaluado tuvo una duración de 15 708 s, por lo tanto, la potencia con la cual se calienta el agua dentro del estanque es de 2,27 kW.

Este ensayo fue realizado con tiraje cerrado, la potencia total obtenida por el sistema es de 6,61 kW, a través de la diferencia se obtiene una potencia de calefacción de 4,34 kW, este valor es 0,44 kW superior al Caso Base, considerando que además se entregó energía al agua, se evidencia el beneficio del Prototipo, sobre todo considerando que esta energía se obtiene para 1 carga de ensayo, en el cual se realiza con 108 290 kJ de energía entregada por el combustible.

A continuación, se evalúa el Prototipo para la condición de agua estancada dentro del estanque, considerando un volumen cercano a 80 L. En la Figura 5.10 se encuentran los resultados del monitoreo de un ensayo del 25-06-2023,

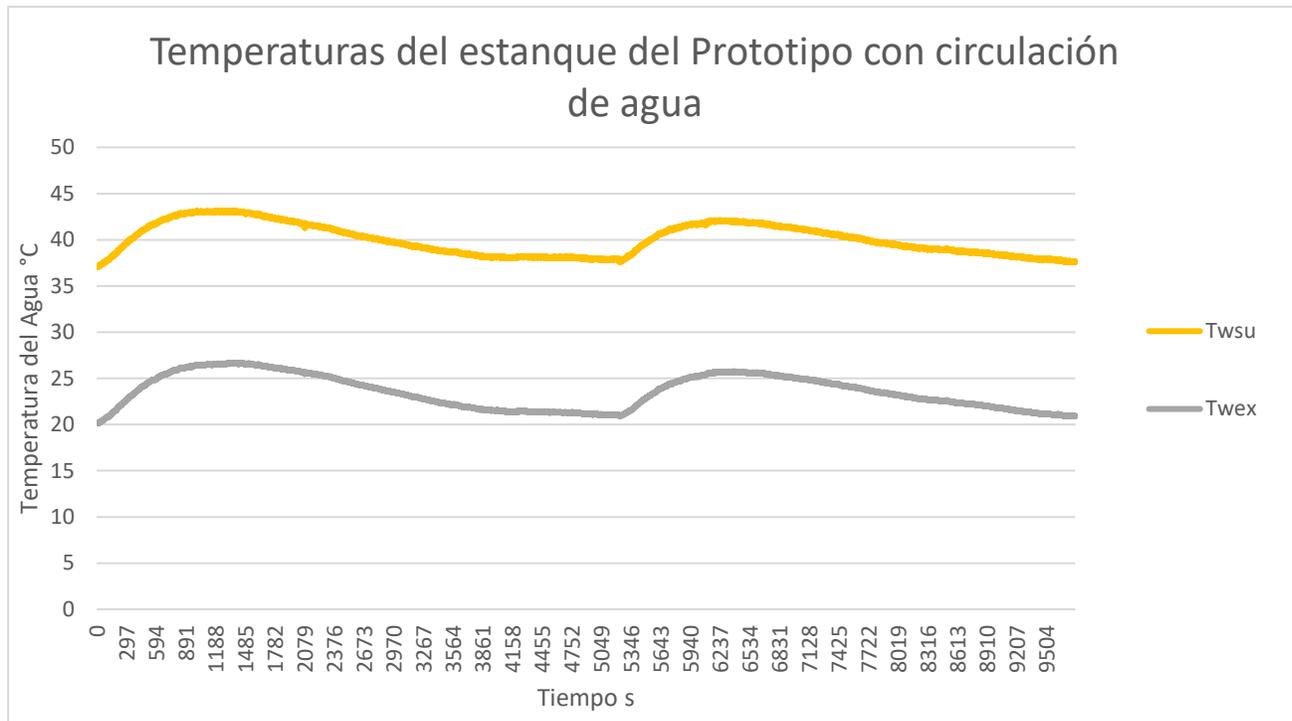


Figura 5.10: Calentamiento del agua al interior del estanque bajo la condición de agua estancada, para el Prototipo.

Cabe destacar que la medición realizada para la entrada y salida de agua se monitorea en un punto exterior de una cañería, a unos 30 cm de distancia con la superficie externa del recuperador de calor (puntos 3 y 4 de la Figura 3.4), debido a esto, las temperaturas que se registran para la condición de agua estancada son menores a las que realmente se está alcanzando en el interior del estanque, producto a las pérdidas por radiación y convección de estas secciones de 2 pulg de diámetro aproximadamente.

Para evaluar la temperatura que alcanza el agua bajo la condición estancada al interior del estanque, para el recuperador comercial y el Prototipo, al término del segundo ensayo se deja circular el agua del estanque, monitoreando la temperatura máxima que alcanza en la tubería de salida. Se detiene la circulación de agua cuando a la salida del estanque se alcanza la temperatura lo más cercana posible a la que viene de la red, para realizar otra carga de ensayo y realizar el mismo procedimiento. Con este procedimiento, una carga de ensayo eleva la temperatura del agua hasta los 60 °C bajo la condición de potencia nominal y con el agua estancada.

Considerando que el estanque tiene un volumen de 70 L aproximadamente, para los ensayos evaluados se obtiene una duración de 63 min de ensayo en promedio. Bajo estas condiciones se obtiene 12 573,5 kJ de energía recuperada con el prototipo, con 3,33 kW de potencia para una carga de ensayo.

6 Capítulo 6: Conclusiones y recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos, se puede demostrar lo planteado en las hipótesis, de que el uso de un recuperador de calor es bastante beneficioso, aumentando en gran medida el rendimiento térmico y la potencia, sobre todo para sistemas de combustión más antiguos, debido a que estos tienen rendimientos bastante inferiores a los más nuevos, producto a las exigencias de las normativas vigentes. Debido a esto, las cocinas más actuales emiten los gases a una menor temperatura, reduciendo la cantidad de rendimiento que se puede aumentar al utilizar un recuperador de calor.

El recuperador comercial evaluado no produce una mejora de rendimiento superior a un 11 %, aumentando la potencia en algo más de 1 kW, en cambio el Prototipo aumenta la eficiencia térmica cerca de un 30 % y la potencia cerca de 3 kW, elevando la temperatura del agua de la red desde los 16°C hasta los 60°C aproximadamente, con una carga de combustible de $2,35 \pm 0,24$ kg de leña. El rendimiento global que se obtiene con el Prototipo en las distintas condiciones de operación es sobre un 89 %, produciendo un ahorro en el calentamiento de agua sanitaria.

Bajo combustión lenta se obtiene un mayor rendimiento y tasa de emisión de MP que con los demás tirajes, pero con mayores de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, el aumento de rendimiento producto de una reducción del proceso de combustión, no es tan significativa en comparación con la pérdida de la capacidad de calefacción, siendo una variación de rendimiento cercana al 10 %, respecto a una pérdida de potencia de 40 % aproximadamente para tiraje cerrado.

Un hallazgo bastante importante es que los recuperadores de calor reducen las emisiones de MP considerablemente, en un valor cercano a un 80 %. Considerando que está demostrada una reducción de las emisiones debido al uso de precipitador, se espera obtener una mayor eficiencia en la captura del material particulado al combinar ambos sistemas, lo cual no se pudo verificar, debido a que el precipitador electrostático (MPZero) producía infiltraciones de aire y se obtenían resultados incongruentes. Cabe destacar que los resultados del muestreo de MP para la Cocina 1 son demasiado bajos en comparación con todas las demás tendencias lo que es bastante sospechoso y, probablemente, se debió a un mal procedimiento de muestreo, además de ciertas fallas en el analizador de gases.

Otra consecuencia con el uso del Prototipo es obtener menores velocidades de quemado que para los demás sistemas, probablemente producto de una baja temperatura de los gases emitidos, aumentando la densidad relativa, lo que repercute en una menor diferencia de presión entre la salida y entrada del sistema, además de las pérdidas de carga debido al cambio de paso en la sección de los gases del intercambiador de calor.

Es evidente que utilizar el Prototipo diseñado en Fondef es bastante beneficioso, aumentando bastante el rendimiento y potencia térmica, además realiza una gran reducción de las emisiones de MP, sin utilizar el precipitador electrostático, lo cual es bastante beneficioso. Además, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y precursores del cambio climático.

Referencias

- [1] Ministerio de Energía, "Anuario estadístico de energía", 2021. Link: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2022/07/AnuarioEstadisticoEnergia2021.pdf>
- [2] Ministerio del Medio Ambiente, "Reporte del Estado del Medio Ambiente", 2022 Link interactivo: <https://infogram.com/c-4-energia-1h0r6rpm8zxqw2e?live>
- [3] Nicolás Álamos, Nicolás Huneus, Mariel Opazo, Mauricio Osses, Sebastián Puja, Nicolás Pantoja, Hugo Denier van der Gon, Alejandra Schueftan, René Reyes, and Rubén Calvo, "High-resolution inventory of atmospheric emissions for transport, industrial, energy, mining and residential activities in Chile", *Earth System Science Data Articles. Volume 14, issue 1. ESSD*, 14, 361–379, 2022 Link: <https://essd.copernicus.org/articles/14/361/2022/>
- [4] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile , Decreto numero 12 sobre "norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10" Link: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1176988>
- [5] Organización Mundial de la Salud, "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre", actualización año 2005 Link: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=AE8%202D8D18116EC005D969D4C47C4117E?sequence=1
- [6] Informe a las naciones unidas del Center for Climate and resilience research, " El aire que respiramos: pasado, presente y futuro. Contaminación atmosférica por MP2,5 en el centro y sur de Chile", 2020. Link: <https://www.cr2.cl/contaminacion/> https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2020/09/Informe_Contaminacion_Espanol_2020.pdf
- [7] OECD indice de calidad de vida, "Better Life Index"
Link: <https://www.oecdbetterlifeindex.org/es/topics/environment-es/>
- [8] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile , Decreto numero 12 y 59 sobre norma primaria de calidad ambiental para material particulado respirable MP10 y MP2,5 y la Ley 19.300 sobre bases generales del medio ambiente modifica Link: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1025202>
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=99434&idVersion=2022-06-04&idParte=>
<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- [9] Red Estatal de Monitoreo Atmosferico (REMA), "Calidad del Aire", informe ambiental del año 2021. Link: ["https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/C14-calidad-del-aire-rema-2021.pdf](https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/01/C14-calidad-del-aire-rema-2021.pdf)
- [10] A. Leiva, Ministerio de Energía, "Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles solidos derivados de la madera", 2015. Link: <https://calefaccionsustentable.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/Medicion-del-consumo-nacional-de-lena-y-otros-combustibles-solidos-derivados-de-la-madera.pdf>
- [11] Condorchem evitech, oferta de filtros de carbon activo. Link: <https://condorchem.com/es/filtros-de-carbon-activo/>
- [12] D. A. Bartlett, "Fundamentals of heat exchangers," *Industrial Physicist*, vol. 2, no. 4, pp. 18–21, Dec. 1996, doi: 10.1016/b978-0-12-821923-2.00001-4.

- [13] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan, and S. A. Tassou, “Waste heat recovery technologies and applications,” *Thermal Science and Engineering Progress*, vol. 6. Elsevier Ltd, pp. 268–289, Jun. 01, 2018. doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [14] Claudio Garcés Lavín, O. F. Fuentes, “Recuperador de energía y material particulado para combustión de biomasa, mediante condensación de gases y filtro electrostático”.
- [15] Q. Chen et al., “Condensing boiler applications in the process industry,” *Appl Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 30–36, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.11.020.0
- [16] T. Rogoziński, “Wood dust collection efficiency in a pulse-jet fabric filter,” *Drewno*, vol. 59, no. 197, pp. 249–256, 2016, doi: 10.12841/wood.1644-3985.C27.22.
- [17] D. P. Whitelock and M. D. Buser, “Multiple series cyclones for high particulate matter concentrations, *Applied Engineering in Agriculture*”. <https://doi.org/10.13031/2013.22602>.
- [18] “Use of electrostatic precipitators in small-scale biomass furnaces to reduce particulate emissions from a range of feedstocks _ Elsevier Enhanced Reader”
- [19] A. Jaworek, A. T. Sobczyk, A. Marchewicz, A. Krupa, and T. Czech, “Particulate matter emission control from small residential boilers after biomass combustion. A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 137, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110446.
- [20] N. de Nevers, *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. México: McGraw-Hill, 1998.
- [21] A. Bianchini, F. Cento, L. Golfera, M. Pellegrini, and C. Saccani, “Performance analysis of different scrubber systems for removal of particulate emissions from a small size biomass boiler,” *Biomass Bioenergy*, vol. 92, pp. 31–39, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.06.005.
- [22] Guerrero, F., Arriagada, A., Muñoz, F., Silva, P., Ripoll, N., & Toledo, M. (2021). Particulate matter emissions reduction from residential wood stove using inert porous material inside its combustion chamber. *Fuel*, 289, 119756. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119756>
- [23] Purexhaust Cero Emision. (n.d.). Retrocatt Filtro para calefactores a leña | Purexhaust Cero Emisión. Retrieved April 13, 2021, from <https://www.purexhaust.com/productos-y-servicios/retrocatt/>
- [24] Filtro Vivo. (n.d.). Sistema de descontaminación Filtrovivo Industrial y Habitacional. Retrieved April 13, 2021, from www.filtrovivo.cl
- [25] García, R., Pizarro, C., Lavín, A. G., & Bueno, J. L. (2017). Biomass sources for thermal conversion. Techno-economical overview. *Fuel*, 195, 182–189. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.01.063>

- [26] Cristóbal Vorphal Cabezas, Oscar Farias F., “Diseño y modelado de un intercambiador de calor a condensación de recuperación de calor residual de una estufa a leña para agua caliente sanitaria”, 2023.
- [27] Sebastián Gallardo Quilapán, Pablo Cornejo O., “Propuesta y validación experimental de mejoras al diseño de un equipo para recuperación de calor”, Marzo 2023.
- [28] Precipitador electrostático. Sistemas de filtro de material particulado. link: <https://www.mpzero.cl/>