



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR  
DE RECUPERACIÓN DE CALOR RESIDUAL DE UNA COCINA A LEÑA PARA  
AGUA CALIENTE SANITARIA**

POR

**Cristóbal Ignacio Vorphal Cabezas**

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:  
Doctor Cristian Alberto Cuevas Barraza  
Doctor Oscar Francisco Farías Fuentes

Marzo 2023  
Concepción (Chile)

© 2023 Cristóbal Ignacio Vorphal Cabezas

© 2023 Cristóbal Ignacio Vorphal Cabezas

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

## **Agradecimientos**

Gracias a todos los profesores de Departamento de Ingeniería Civil Mecánica con los que tuve el agrado de compartir estos 8 años de estudios en la Universidad de Concepción, al personal auxiliar de facultad y laboratorios, personas de gran carisma que sin ellos este trabajo no podría ser posible.

Gracias a mi familia por todo el apoyo durante el proceso y la frágil paciencia en los últimos meses. Especial gracias a Francisca Valdebenito, mi pareja incondicional en el último periodo de carrera, que fue un gran pilar para finalizar este proceso.

A mis amigos y compañeros, que me ayudaron en todo momento para sortear los obstáculos de esta carrera, a Matías, Nicolás, Sebastián, Rodrigo, David, y muchos otros buenos amigos.

Señores Cristian Cuevas, Oscar Farías, muchas gracias por su apoyo y conocimiento brindado en la realización de este documento, y al profesor Jorge Jiménez por sus apoyos en toma de mediciones, instrumentación y conocimientos.

*Esta memoria está dedicada...*

A Ingrid Sandra Vorphal Vivallos, madre, esposa, hija, hermana, y mi querida tía. Luchó por años contra el cáncer, y cedió a pocos días de finalizar este trabajo, que en paz descansa y en este texto dejó plasmado su recuerdo.

A toda mi familia, mis queridos amigos y compañeros, a mi amada Francisca, que juntos terminamos nuestra etapa de estudiantes, y juntos comenzamos nuestras vidas de profesionales.

## Resumen

Esta memoria de título analiza el comportamiento energético de un equipo recuperador de calor. En primer lugar, se presentan datos sobre el impacto de los métodos de calefacción a leña sobre el medio ambiente y la salud de las personas. Luego, se presentan algunas soluciones comercializadas a nivel nacional para aumentar la eficiencia en el intercambio de calor con el ambiente, y para la producción de agua caliente; ya sea para calefacción o uso sanitario. El estudio se centra en este caso.

Se caracteriza el banco de ensayos, con sus componentes y equipos de medición. Además, se establece la metodología de ensayos, mediciones, y cálculos posteriores para determinar distintas magnitudes como: tasa de quemado, temperaturas del agua, temperaturas de los gases de combustión, energías transferidas en el proceso, rendimiento energético, emisiones de material particulado, etc.

Se realizan 5 ensayos con diferentes propósitos, utilizando leña de eucalipto como combustible, en distintas proporciones y condiciones de operación. A partir de los resultados, se analizan las características de la transferencia de calor en régimen transitorio, para las diferentes condiciones operacionales, y se calcula la energía transferida por los gases de combustión hacia el agua y al ambiente.

Para el final de este informe, se deduce que, bajo las condiciones de medición del banco de ensayos, se incurren en varios errores que desvían los cálculos teóricos. Principalmente, en la medición de temperaturas tanto del agua como de los gases de combustión, datos con los cuales se determinan los flujos de energía del proceso, los que interfieren en los cálculos de rendimientos. Esto termina por explicar las diferencias entre los flujos de energía, por ejemplo, de los gases de combustión y el agua del estanque. Concretamente, los flujos de energía de los gases de combustión serían más bajos que los calculados teóricamente, la energía acumulada por el agua sería mayor. Estos dos hechos incrementan el rendimiento general del sistema, y disminuye el diferencial de energía en el proceso de transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el agua del estanque. Los errores en las mediciones de temperatura vienen dados por la inexactitud que implica no medir la temperatura dentro del estanque, la temperatura media entre la salida y la entrada del estanque no se condice con la temperatura del agua dentro del estanque, lo que se corrobora con las tomas de termografía al estanque.

Los resultados indican que para cada ensayo se obtuvo un rendimiento diferente, siendo alrededor del 16 %, por otro lado, el equipo precipitador electrostático logró reducir hasta un 48 % las emisiones de material particulado para ensayos en las mismas condiciones de operación. Ambos resultados por debajo de lo esperado.

Además, se describen algunas recomendaciones para la mejor adquisición de datos, y mejor calidad al banco de ensayos. Lo que disminuiría la brecha entre los cálculos energéticos teóricos y los reales, haciendo los futuros experimentos más precisos.

## Abstract

This title memory analyzes the energetic behavior of a heat recovery equipment. Firstly, data on the impact of wood heating methods on the environment and human health are presented. Then, some nationally marketed solutions are presented to increase the efficiency in heat exchange with the environment, and for the production of hot water; either for heating or sanitary use. The study focuses on this case.

The test bank is characterized, with its components and measurement equipment. In addition, the methodology for tests, measurements, and subsequent calculations is established to determine different magnitudes such as: burning rate, water temperatures, combustion gas temperatures, energy transferred in the process, energy efficiency, particulate matter emissions, etc.

Five tests are carried out with different purposes, using eucalyptus firewood as fuel, in different proportions and operating conditions. Based on the results, the characteristics of the heat transfer in transitory regime are analyzed, for the different operational conditions, and the energy transferred by the combustion gases towards the water and the environment is calculated.

By the end of this report, it is deduced that, under the test bank measurement conditions, various errors are incurred that deviate from the theoretical calculations. Mainly, in the measurement of temperatures of both the water and the combustion gases, data with which the energy flows of the process are determined, which interfere in the performance calculations. This ends up explaining the differences between the energy flows, for example, of combustion gases and pond water. Specifically, the energy flows of the combustion gases would be lower than those calculated theoretically, the energy accumulated by the water would be higher. These two facts increase the overall performance of the system, and decrease the energy differential in the heat transfer process from the combustion gases to the pond water. The errors in the temperature measurements are given by the inaccuracy that implies not measuring the temperature inside the pond, the average temperature between the exit and the entrance of the pond is not consistent with the temperature of the water inside the pond, which is corroborated with the thermography shots to the pond.

The results indicate that for each test a different performance was obtained, being around 16%, on the other hand, the electrostatic precipitator equipment managed to reduce particulate material emissions by up to 48% for tests under the same operating conditions. Both results lower than expected.

In addition, some recommendations are described for the best data acquisition, and better quality to the test bank. Which would decrease the gap between theoretical and actual energy calculations, making future experiments more accurate.

## Tabla de Contenido

Lista de Tablas .....	9
Lista de Figuras .....	10
1 <b>CAPÍTULO 1: Introducción</b> .....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos .....	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2 Objetivos Específicos .....	3
1.3 Hipótesis de trabajo.....	4
1.4 Metodología .....	4
2 <b>CAPÍTULO 2</b> .....	6
2.1 Estado del Arte.....	6
1.1 Marco Teórico.....	10
3 <b>CAPITULO 3: Descripción del Banco de Ensayos</b> .....	14
3.1 Descripción General del Termocañón Comercial.....	14
3.2 Descripción de los Componentes.....	15
3.3 Descripción de los Sistemas de Medición.....	19
4 <b>CAPITULO 4: Descripción, Resultados y Análisis de los Ensayos</b> .....	24
4.1 Descripción Ensayos.....	24
4.1.1 Ensayo 1 .....	24
4.1.2 Ensayo 2 .....	25
4.1.3 Ensayo 3 .....	25
4.1.4 Ensayo 4 .....	26
4.1.5 Ensayo 5 .....	26
4.2 Resultados de los Ensayos. ....	26
4.2.1 Ensayo 1: Equipo con flujo de agua constante. ....	26
4.2.2 Ensayo 2: Primer ensayo sin flujo .....	29
4.2.3 Ensayo 3: Segundo ensayo sin flujo .....	32
4.2.4 Ensayo 4: Análisis Energético Gases de Combustión .....	35
4.2.5 Ensayo 5: Análisis Precipitador Electroestático .....	37
4.3 Análisis de los Resultados.....	39

4.3.1	Ensayo 1: Equipo con flujo de agua constante .....	39
4.3.2	Ensayo 2: Primer ensayo sin flujo .....	40
4.3.3	Ensayo 3: Segundo ensayo sin flujo .....	42
4.3.4	Ensayo 4: Análisis Energético Gases de Combustión .....	44
4.3.5	Ensayo 5: Análisis Precipitador Electroestático .....	52
4.4	Discusión de Resultados .....	53
5	Conclusiones .....	57
6	Referencias.....	60
7	Anexos .....	61
7.1	Procedimiento para la realización de ensayos y mediciones. ....	61
7.2	Diagrama General de la Instalación.....	63
7.3	Especificaciones Bomba BRS-120 .....	64
7.4	Características Leña de Eucalipto .....	65
7.5	Códigos Programa EES.....	66
7.5.1	Cálculos Energéticos Gases de Combustión .....	66
7.5.2	Cálculo Pérdidas Energéticas al Ambiente.....	68
7.6	Muestras de Material Particulado .....	69
7.7	Temperaturas Sección de Chimenea en Medición de MP .....	71
7.8	Detalles de Construcción Recomendados para el Túnel de Dilución .....	72



## Lista de Tablas

<b>Tabla 1: Componentes Medidos por Equipo Testo 320.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2: Resumen Ensayos Realizados. ....</b>	<b>24</b>
<b>Tabla 3: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 1.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabla 4: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 2.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 5: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 3.....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 6: Datos Principales Ensayo 4.....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 7: Datos para Cálculos Térmicos Ensayo 1.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 8: Datos para Cálculos Energéticos Ensayo 2.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 9: Datos para Cálculos Energéticos Ensayo 3.....</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 10: Resultados Análisis Energético de los Gases de Combustión. ....</b>	<b>46</b>
<b>Tabla 11: Temperatura de Termografías y Agua del Estanque. ....</b>	<b>48</b>
<b>Tabla 12: Pérdidas Energéticas por Convección en cada Periodo. ....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 13: Pérdidas Energéticas por Radiación en cada Periodo.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabla 14: Datos Principales Ensayo 5.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabla 15: Resumen Rendimiento Energético del Termocañón. ....</b>	<b>54</b>
<b>Tabla 16: Composición Química Leña de Eucalipto. ....</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 17: Códigos de Muestras de MP para cada Sub-Ensayo del Ensayo 5.....</b>	<b>70</b>
<b>Tabla 18: Temperaturas Gases de Combustión en Sección de Chimenea de Medición de MP.....</b>	<b>71</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura 1: Soluciones de Intercambiador de Calor Aire-Aire.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 2: Intercambiador de Calor de Espiral para Agua. ....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 3: Intercambiador de Calor Aire-Agua con Espiral Interno.....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 4: Estanque Adosado a Cañón de Cocina de Biomasa.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 5: Gráfico Temperatura del Agua vs Tiempo.....</b>	<b>8</b>
<b>Figura 6: Gráfico de Energía y Potencia transferida al Agua del Estanque.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 7: Esquema Intercambiador de Calor de Equipo Termocañón.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 8: Esquema de los Flujos de Energía.....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 9: Gráfico Calor Específico del Agua a 3 Bar.....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 10: Equipo Termocañón Alcázar.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 11: Medidas del Equipo Termocañón.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 12: Purgador Automático.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 13: Válvula de Seguridad.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 14: Equipo MPZero Instalado y Esquema.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 15: Modo de Instalación de Filtro MPZero.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 16: Esquema Ductos de Extracción Gases de Combustión.....</b>	<b>18</b>
<b>Figura 17: Esquema Hidráulico del Sistema.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 18: Esquema de Conexión y Lectura de Termocuplas.....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 19: Analizador de Gases de Combustión Testo 320.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 20: Modo de Inserción de Sonda Testo 320.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 21: Balanza de Plataforma.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 22: Indicador Digital de Peso Programable LP-7516.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 23: Flujómetro F-1000-RT.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 24: Medidor de Material Particulado Plantower PMS5003.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 25: Gráfico del Peso del Sistema y Flujo de agua durante Ensayo 1.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 26: Gráfico Tasa de Quemado Ensayo 1.....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 27: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 1.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 28: Gráfico de Temperatura de Entrada y Salida del Estanque de los Gases de Combustión durante Ensayo 1.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 29: Gráfico del Peso de Sistema y Temperatura del Horno durante Ensayo 2.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 30: Tasa de Quemado Ensayo 2.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 31: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 2.....</b>	<b>31</b>
<b>Figura 32: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 2.....</b>	<b>32</b>
<b>Figura 33: Gráfico del Peso del Sistema y Temperatura del Horno durante Ensayo 3.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 34: Tasa de Quemado Ensayo 3.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 35: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 3.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 36: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 3.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 37: Gráfico de Temperatura del Agua y Gases de Combustión, a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 4.....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 38: Gráfico % Volumétrico O<sub>2</sub> y CO durante Ensayo 4.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 39: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 5.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 40: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 5.....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 41: Gráfico % Volumétrico O<sub>2</sub> y CO durante Ensayo 5.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 42: Gráfico de Potencia Transferida al Agua durante Ensayo 1.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 43: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 2.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 45: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 3.....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 45: Energía Transferida por los Gases de Combustión.....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 46: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 4.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 47: Termografía del Equipo Termocañón.....</b>	<b>48</b>
<b>Figura 48: Ubicación de Termocuplas de Medición de Temperatura del Aire.....</b>	<b>49</b>

<b>Figura 49: Temperaturas del Aire y Superficie del Estanque.</b> .....	49
<b>Figura 50: Gráfica Comparativa MP 2,5 Ensayos 5.2 y 5.3.</b> .....	52
<b>Figura 51: Gráfica Comparativa MP 2,5 Ensayos 5.4 y 5.5.</b> .....	53
<b>Figura 52: Termografía de Plancha de Cocina durante Ensayo 4.</b> .....	56
<b>Figura 53: Termocuplas Adicionales en Estanque.</b> .....	58
<b>Figura 54: Esquema General Banco de Ensayos.</b> .....	63
<b>Figura 56: Dimensiones Bomba BRS-120.</b> .....	64
<b>Figura 56: Muestras del Filtro de Equipo Auxiliar de Medición de MP.</b> .....	69
<b>Figura 57: Detalles de Construcción Recomendados para el Túnel de Dilución.</b> .....	72

## Glosario

### Abreviaturas

EPOC	: Enfermedad Pulmonar Obstructiva Crónica.
FONDEF	: Fondo de Fomento del Desarrollo Científico y Tecnológico.
MP 10	: Material Particulado 10 Micrómetros.
MP 2.5	: Materia Particulado 2,5 Micrómetros.
msnm	: Metros sobre el nivel del mar
OMS	: Organización Mundial de la Salud
PPDA	: Planes de Prevención y/o Atmosférica.
ppm	: Partes por Millón.
RCA	: Relación Combustible Aire
VGA	: Video Graphics Array (Matriz de Gráficos de Video).

### Símbolos

A	: Área
$C_p$	: Calor Específico [kJ/kg·K]
d	: Diferencial
g	: Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]
h	: Coeficiente de Transferencia de Calor [W/m <sup>2</sup> ·K]
H	: Entalpía [kJ/kg]
k	: Conductividad Térmica [W/m·K]
L	: Largo [m]
M	: Masa
$\dot{M}$	: Flujo Másico
$\dot{m}$	: Caudal
MM	: Masa Molar [kg/kmol]
Nu	: Número Nusselt
PC	: Poder Calorífico [kWh/kg]
Pr	: Numero de Prandtl
Q	: Calor o Energía Calorífica
Ra	: Numero de Rayleigh
T	: Temperatura [°C]
t	: Tiempo
y	: Fracción Másica

## Letras griegas

$\alpha$	: Difusividad Térmica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$\beta$	: Coeficiente de Expansión Térmica [ $1/\text{K}$ ]
$\varepsilon$	: Emisividad
$\eta$	: Rendimiento
$\rho$	: Densidad [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$\sigma$	: Constante de Stefan-Boltzmann [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]
$\nu$	: Viscosidad Cinemática. [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]

## Subíndices

a	: Aire
amb	: Ambiente
comb	: Combustible
cv	: Convección
cvr	: Convección y Radiación
e	: Entrada
est	: Estequiométrico
f	: Película o Capa Limite
g	: Gas
rad	: Radiación
s	: Salida
sist	: Sistema
sup	: Superficie
w	: Agua

# 1 CAPÍTULO 1: Introducción

## 1.1 Contexto

En Chile, al igual que en países con climas similares, el uso de la leña es muy común en los hogares, este combustible puede ser utilizado para diferentes fines; como cocinar, calefacción y para procesos industriales. El uso de la leña como combustible es considerado un indicador de pobreza, y se estima que un 40% de los hogares utiliza este combustible a nivel global. En las ciudades de Chile, generalmente al sur, la contaminación atmosférica es un problema grave que no se ha podido erradicar, debido a la quema no sostenible de la leña, lo que es causante del 85% del material particulado fino en el aire. Esto se evidencia en los periodos invernales donde se puede apreciar a simple vista en los sectores urbanos, densas nubes de humo gris sobre los sectores habitacionales donde evidentemente el responsable es la combustión de estufas a leña [1] .

El sector residencial es el mayor consumidor de leña en Chile, de todo el consumo anual de leña en el país, más de un 98% se destina a uso domiciliario, donde se estima que 33,2% de los hogares hace uso de leña. Las viviendas de la zona sur del país corresponden a los mayores demandantes de este combustible, donde en las regiones del Bio Bio, Araucanía, Los Ríos, Los Lagos y Aysén; los niveles de consumo superan el 70%, hasta llegar a más de un 98% en las zonas más australes [1] .

En otros ámbitos, como el sector público, el uso de la leña supera el 15% en establecimientos educacionales, y en una mínima fracción en el sector salud (> 1%)[1] .

Las estufas a leña no superan el 80% en rendimiento, eso si se considera una estufa de buena calidad. El problema puede ser abordado de 2 maneras, reemplazando las fuentes de consumo, o mejorando la eficiencia de estas. Hacer un cambio en las fuentes es una tarea difícil; sobre todo por temas de costo, lo que repercute aún más en los sectores de menores ingresos. En el sector privado, las empresas incentivan a los grandes conjuntos habitacionales al uso de artefactos a gas para la producción de aguacaliente sanitaria y calefacción, así como también el uso de bombas de calor para estos fines.

Para contrarrestar la contaminación del aire, el Ministerio de Medio Ambiente toma algunas medidas en ciertas ciudades como la prohibición de uso de chimeneas a hogar abierto, se prohíbe la quema de otros combustibles distintos de la leña en equipos destinados a esta función, también está restringido el uso de la calefacción a leña en edificios de departamentos, comercio y servicios ubicados en zonas denominadas saturadas.

Más de la mitad de la población en Chile está expuesta a niveles altos de contaminación, lo que causa alrededor de 3600 muertes prematuras al año. Por otro lado, se estima que 2000 muertes al año son atribuibles a la alta concentración de MP 2.5, siendo un causante de decesos mayor a la de los accidentes de tránsito (alrededor de 1600 al año). Según datos de la Organización Mundial de la Salud, 9 de cada 10 personas en el mundo respiran aire de mala calidad, lo que es causante de múltiples enfermedades respiratorias, cuya exposición duplica el riesgo de sufrir neumonía, principalmente en personas en etapa de niñez. La neumonía es una de las principales causas de muerte dentro de los

primeros 5 años de vida. Otra de las enfermedades graves que causa este fenómeno es la EPOC (Enfermedad pulmonar obstructiva crónica) y bronquitis crónica, que se manifiesta mediante serios problemas para respirar y la obstrucción de las vías respiratorias. La Cardiopatía isquémica es una enfermedad que causa más de un millón de muertes al año y una de las causantes es la contaminación del aire, esta afección produce la obstrucción de las arterias coronarias, es decir, las que conducen sangre al corazón. Otros ejemplos de enfermedades causadas por la contaminación del aire son el cáncer de pulmón y el asma bronquial.

Con el objetivo de reducir la contaminación en las ciudades del país, el gobierno de Chile a través del Ministerio del Medio Ambiente, define los llamados PPDA o Planes de Prevención y/o Descontaminación Atmosférica [2]. En aquellos documentos se definen medidas y acciones específicas con el fin de salvaguardar la salud de la población. En el año 2006, la zona del Gran Concepción fue declarada zona latente por material particulado respirable MP10, abarcando a las comunas de Lota, Coronel, San Pedro de la Paz, Hualqui, Chiguayante, Concepción, Penco, Tomé, Hualpén y Talcahuano [3]. Luego en el año 2015, se publicaría el Decreto 15 en donde este mismo compendio de comunas se declara zona saturada de material particulado fino respirable MP2,5 como concentración diaria [4]. Es por esto que en el año 2019 se publicó el Plan de Prevención y de Descontaminación Atmosférica para las comunas de Concepción Metropolitano [5].

En el PPDA se establecen, por ejemplo; regulaciones referidas al mejoramiento térmico de las viviendas, como nuevos estándares de transmitancia térmica de los elementos envolventes de las construcciones, y la fiscalización y capacitación de estos programas. Controles de emisiones para material particulado, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, control de emisiones contaminantes en centrales termoeléctricas, para grandes establecimientos industriales compensación de emisiones. Se establecen controles de emisiones asociadas a quemas agrícolas, forestales y domiciliarias, emisiones en el rubro del transporte. Se definen también un programa de difusión y educación, y la generación de áreas verdes y ciclovías [5].

Por otro lado, el gobierno otorga ciertos beneficios para contrarrestar el uso de leña en calefacción. A través del Ministerio del Medio Ambiente, el “Programa de Recambio de Calefactores” concede subsidios a los hogares que usen artefactos de combustión de leña, para cambiarlos por equipos más modernos y sustentables como aires acondicionados o estufas a pellet [6].

Con el tiempo se han desarrollado múltiples soluciones orientadas a disminuir las emisiones de gases contaminantes al ambiente. En esta investigación se evaluará un equipo comercial usado para recuperar la energía perdida en los gases de combustión, una cocina de combustión de leña usada para calefaccionar un hogar. Cabe destacar que este proyecto se realiza en el marco del Fondo de Fomento del Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) [7], que en este caso, se busca fabricar y evaluar un nuevo prototipo de equipo recuperador de energía, a partir del modelo original del equipo a evaluar en este informe.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo de esta investigación es caracterizar el desempeño de un recuperador de calor, en conjunto con sistemas de captación de material particulado, para una cocina a leña para la producción de agua caliente sanitaria.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- I. Descripción del banco de ensayos y sus componentes.
- II. Recopilación de datos mediante un sistema de mediciones del banco de ensayos.
- III. Evaluar el desempeño energético de un termocañón comercial
- IV. Analizar el desempeño de un equipo precipitador electrostático para la disminución de las emisiones de material particulado al ambiente



### 1.3 Hipótesis de trabajo

Se espera implementar un banco de ensayos que permita evaluar el desempeño energético de un equipo recuperador de calor. Se calculará el rendimiento del equipo a partir de los datos obtenidos de los equipos de medición. Se realizarán diversos ensayos en los cuales 3 de ellos, tendrán como propósito obtener el rendimiento energético del equipo, analizando los flujos de energía tanto hacia el agua como el del combustible. Un cuarto ensayo se realizará para analizar el comportamiento de la transferencia de energía desde los gases de combustión hacia el estanque, para así concluir la cantidad de energía que se pierde en cada proceso, y cuanta es la energía aprovechada por el sistema en cada paso. Luego un último ensayo se evaluará la implementación de un equipo precipitador electrostático y su impacto en la emisión de material particulado.

El rendimiento del equipo recuperador de calor se espera que se cercane al 20 %, es decir, que un 20 % de la energía entregada por la combustión de la leña sea aprovechada para el calentamiento de agua en el estanque.

Por otro lado, se espera una considerable reducción de las emisiones de material particulado mediante el uso del equipo precipitador electrostático, que, según el fabricante, reduce hasta un 90 % las emisiones de MP.

### 1.4 Metodología

Se estudiará el comportamiento energético de un equipo termocañón comercial, para dicho estudio, se usarán diversas condiciones de operación, en las cuales se medirían flujos de agua, temperaturas del agua a la entrada y salida del intercambiador de calor, temperaturas de los gases de combustión a la entrada y salida del intercambiador. También se medirán variables relacionadas a la composición de los gases de combustión, como el porcentaje de oxígeno, cantidad de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos, entre otros, a la salida del intercambiador de calor.

Los ensayos diferirán en el flujo o consumo de agua, en la cantidad y frecuencia de carga de combustible (leña de eucalipto). Todos los ensayos contarán con una constante medición del peso del equipo, por lo que se podrá obtener la tasa con la que se quema el combustible, y, por consiguiente, el flujo de gases hacia el intercambiador de calor.

Se calculará la energía entregada al agua dentro del estanque y comparará con la energía desprendida del combustible para analizar el rendimiento energético del equipo. La energía transferida al agua se obtiene a partir de; en el caso del primer ensayo, el flujo de agua que pasa a través del equipo, las temperaturas de entrada y salida del agua, y el calor específico del fluido. En el caso del resto de los ensayos en los que no hay flujo, la energía se calcula a partir de la masa de agua acumulada, y si diferencial de temperatura a lo largo del tiempo del experimento.

Se registrará y analizará la temperatura de los gases de combustión, tanto a la entrada como a la salida del equipo recuperador de calor. Esto permitirá visualizar el comportamiento de las temperaturas en comparación con los momentos de tiempo en los cuales se carga combustible, y como estos varían a medida que se consume la leña.

Junto con las temperaturas de los gases de combustión, se analizará la composición de estos en la salida del intercambiador de calor, con el propósito de evidenciar la proporción volumétrica de los compuestos gaseosos presentes en los gases de combustión. Esto permitirá calcular la pérdida de energía que experimentan los gases de combustión al pasar por el equipo recuperador. Para aquello se procederá a calcular en cada instante e tiempo la reducción de temperatura de los gases, y así, sus entalpías. Luego las entalpías deben corresponderse a cada gas idea que componen el flujo de gases, por lo que se deberá obtener la cantidad de cada componente, proveniente de los análisis del equipo medidor de composición, formula química de la combustión de la madera, balance estequiométrico y fracción másica de cada componente. Finalmente se obtendrá la energía desprendida de los gases de combustión, que será comparada con la energía entregada al agua, y se calcularan las pérdidas asociadas al proceso.

Se realizará un experimento en el cual se mida el material particulado de los gases de combustión, en primer lugar, en condiciones normales de operación, y luego, con un equipo precipitador electrostático para conocer su influencia en la disminución de las emisiones contaminantes.

En el Anexo 7.1 se describen los procedimientos adoptados para la realización de un ensayo

## 2 CAPÍTULO 2

### 2.1 Estado del Arte

Investigaciones anteriores han tratado el tema sobre el aprovechamiento del calor residual de la combustión de distintos combustibles, tanto para lo que atañe la presente investigación (agua caliente sanitaria) como para otros fines externos.

Con el objetivo de mejorar el rendimiento energético de una estufa convencional, una solución rápida es aumentar el área de transferencia de calor, entre los gases de combustión que fluyen por la chimenea, y el ambiente (Intercambiador de calor aire-aire). Esto mejoraría la transferencia de calor en el ambiente, pero no es una solución para producción de agua caliente [8].



**Figura 1: Soluciones de Intercambiador de Calor Aire-Aire.**

Por otro lado, si se desea calentar agua mediante el uso del calor residual de la chimenea, existen varias soluciones que resuelven el problema. Una opción menos invasiva y que da mayores facilidades de instalación, es la que se muestra en la Figura 2.



**Figura 2: Intercambiador de Calor de Espiral para Agua.**

Este intercambiador de calor estilo espiral, consta de una cañería que se instala alrededor del cañón de la estufa, de preferencia, fabricado de cobre debido a su maleabilidad y capacidad de transferir el calor. En este caso, la transferencia de calor se hace mediante la conducción entre la chimenea y la cañería [8].

Sin embargo, la solución anterior conlleva varios problemas. En primer lugar, las temperaturas de los gases de combustión en la chimenea son muy variables, por lo cual, los factores que permiten estimar la temperatura que alcanzará el agua también son difíciles de conocer, por ejemplo, no se podría tener un valor exacto de la longitud de la cañería que rodea la chimenea. También, reduciría la transferencia de energía por convección entre la chimenea y el aire ambiente, impactando así al confort térmico del recinto donde la estufa este ubicada. Los gases de combustión estarían expuestos a un rápido descenso de su temperatura a medida que fluyen por la chimenea, por lo que el riesgo de condensación es mayor.

Una idea más eficiente que la anterior, es instalar el espiral de cañería por dentro de la chimenea, lo que ayudaría la transferencia de calor, ya que la temperatura al interior de la chimenea es siempre mayor que en el exterior.



**Figura 3: Intercambiador de Calor Aire-Agua con Espiral Interno.**

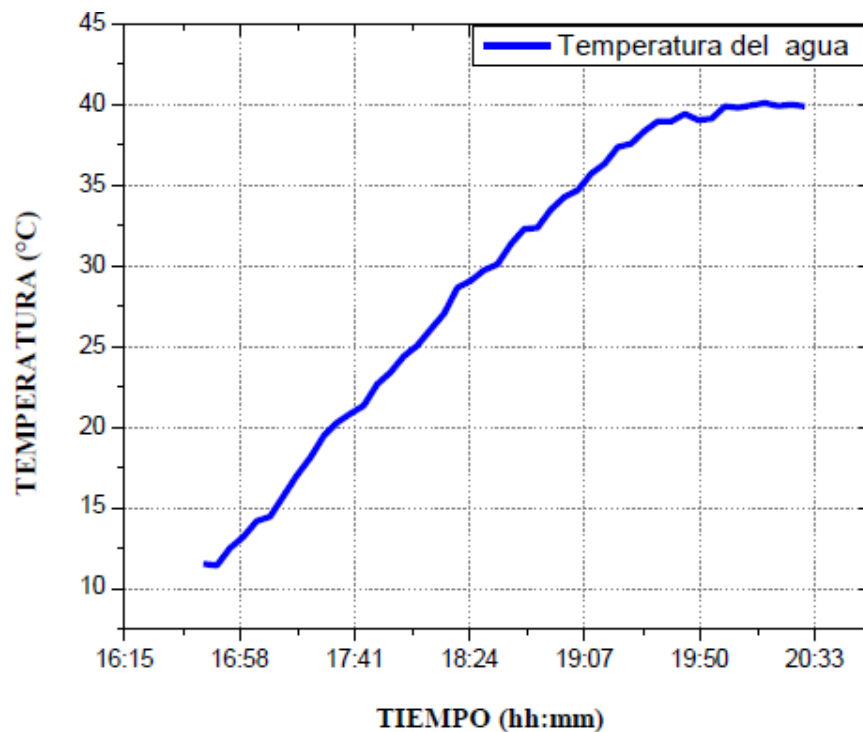
En el equipo de la Figura 3, la carcasa del intercambiador de calor es capaz de retener el calor, por lo que es posible calentar el agua en las cañerías incluso a bajas temperaturas de los gases de combustión. En este caso, la cañería no entra en contacto con el material de la chimenea, a diferencia de la solución mostrada en la Figura 2, lo que podría evitar excesos de calentamiento del agua. La solución anterior es difícil de implementar, tanto por el rediseño que implica en la sección de la chimenea, como en el mantenimiento, ya que la cañería interior se expone a altos niveles de ensuciamiento.

En 2019, se realizó un estudio del comportamiento térmico de un estanque adosado a una cocina de biomasa. Este estudio se realizó en área rural y alpina del Departamento de Arequipa, en la República del Perú, a 4500 msnm. El estudio se realizó en base a un ensayo en que, durante aproximadamente 3 horas y media, se enciende la cocina y se deja calentar el estanque de 95 litros de capacidad [9]. En la Figura 4 se muestra el equipo en cuestión.



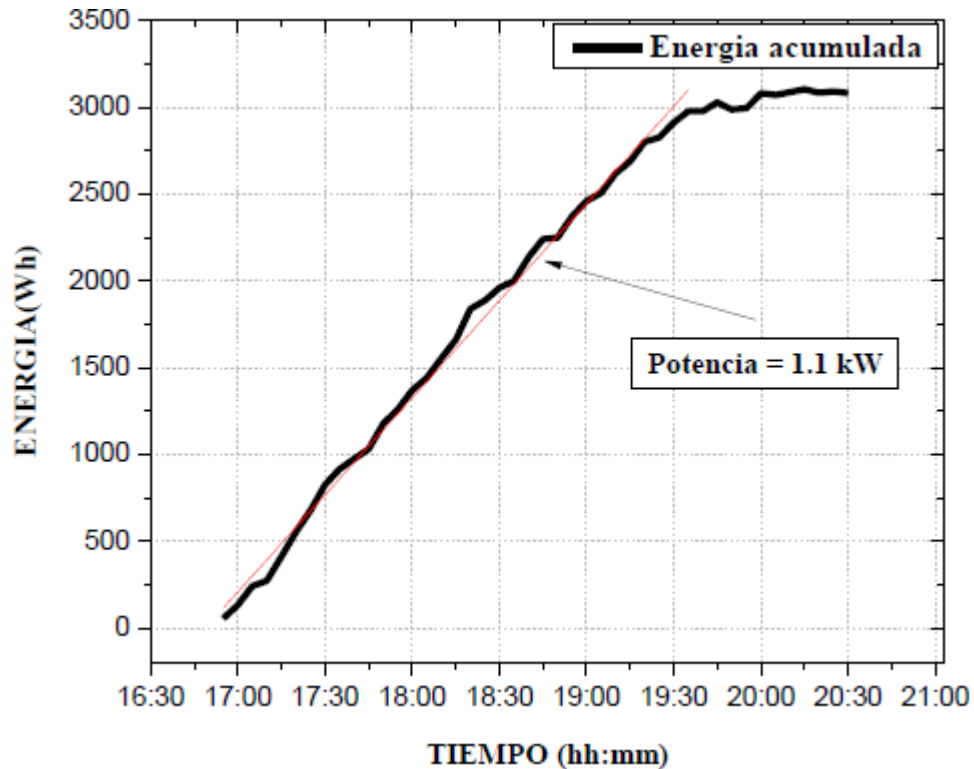
**Figura 4: Estanque Adosado a Cañón de Cocina de Biomasa.**

Se obtuvo un aumento de temperatura constante durante las 3 primeras horas, llegando por sobre los  $40^{\circ}\text{C}$ , para luego dejar de ingresar leña a la cámara de combustión. Posterior a eso se observó que la temperatura del agua se mantuvo constante. En la Figura 5 se aprecia la evolución de la temperatura del agua contenida en el estanque a lo largo del tiempo.



**Figura 5: Gráfico Temperatura del Agua vs Tiempo.**

Luego, se procedió a calcular la energía acumulada dentro del estanque según la cantidad de agua y el diferencial de temperatura en el transcurso del experimento.

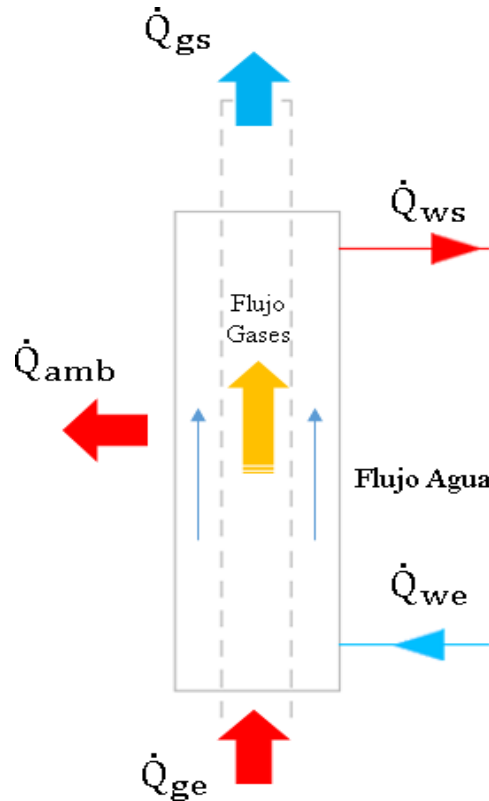


**Figura 6: Gráfico de Energía y Potencia transferida al Agua del Estanque.**

Los resultados del experimento arrojaron que el estanque acumuló 3,17 [kWh] de energía durante 3 horas y media con un consumo de leña de 12,2 kg. Esto representa un 6% de la energía contenida en el combustible. La temperatura resulta ser adecuada para uso doméstico, a pesar de las bajas temperaturas ambientales que tiene la zona geográfica en cuestión, donde se pueden llegar a tener hasta 23°C bajo cero, aunque la temperatura del agua de la red no era tan fría como se hubiese esperado; 11.8°C a la entrada del estanque [9].

## 1.1 Marco Teórico

El modelo de intercambiador de calor a utilizar se presenta en la Figura 7.



**Figura 7: Esquema Intercambiador de Calor de Equipo Termocañón.**

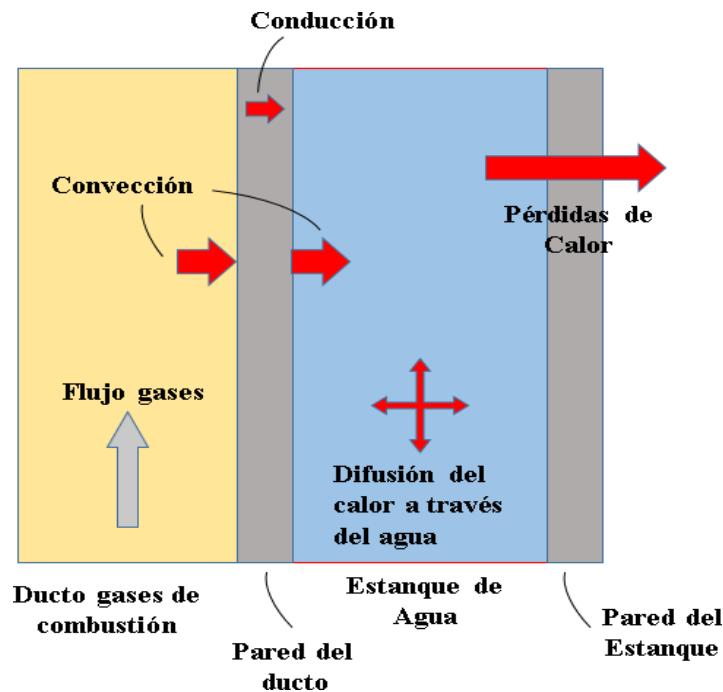
En la figura anterior, la definición de los términos es la siguiente:

- $Q_{ge}$ : Es el flujo de calor que entra al sistema a través de los gases de combustión que ingresan al intercambiador de calor.
- $Q_{we}$ : Es el flujo de calor que entra al sistema a través del agua fría que ingresa al intercambiador de calor.
- $Q_{ws}$ : Es el flujo de calor que sale del sistema a través del agua caliente que sale del intercambiador de calor.
- $Q_{gs}$ : Es el flujo de calor que sale del sistema a través de los gases de combustión que salen del intercambiador de calor.
- $Q_{amb}$ : Es el flujo de calor que se pierde hacia el ambiente.

Los gases de combustión fluyen desde abajo hacia arriba por el centro del intercambiador de calor. Este sistema consta de un estanco cilíndrico que en su eje contiene el ducto por donde fluyen los gases de combustión. A continuación, la ecuación que describe los flujos de energías presentados en la Figura 7.

$$Q_{ge} + Q_{we} = Q_{ws} + Q_{gs} + Q_{amb} \quad (1)$$

Ahora, se presenta el detalle de los flujos de energía que ocurren en las paredes de estanco del equipo recuperador de calor.



**Figura 8: Esquema de los Flujos de Energía.**

En el esquema anterior, se muestra como los gases de combustión transfieren su energía hacia el agua contenida en el estanque. Primero mediante convección hacia la pared del ducto de los gases, que separa los humos del agua, luego por conducción a través de la pared, y nuevamente por convección entre la pared y el agua. Se asume como pérdidas térmicas la ganancia de energía por el material del estanque, y la que se pierde mediante radiación y convección hacia las afueras del estanque, producto del intercambio de calor entre las paredes externas del estanque y el ambiente.

El intercambio de calor descrito anteriormente se define mediante la siguiente ecuación.

$$M_g \cdot C_{p,g} \cdot (T_{ge} \cdot T_{gs}) - M_w \cdot C_{p,w} \cdot (T_{we} \cdot T_{ws}) - h_{crr} \cdot A_{sup} \cdot (T_{sup} \cdot T_a) = M_{sist} \cdot C_{p,sist} \cdot \frac{dT_{sist}}{dt} \quad (2)$$

El primer término de la ecuación anterior corresponde a la energía contenida en los gases de combustión, el segundo término define la ganancia de energía del agua, y el tercer término es la energía perdida hacia el ambiente a través de la carcasa del estanque, proporcional a un coeficiente de transferencia de calor convectivo radiativo.

Las pérdidas de calor pueden expresarse también de la siguiente manera:

$$Q_{amb} = Q_{cv} + Q_{rad} \quad (3)$$

Estas dependen de 2 mecanismos de transferencia de calor; el calor por convección transferido al ambiente ( $Q_{cv}$ ), y el calor trasferido por radiación hacia el entorno ( $Q_{rad}$ ). Cada término es definido a continuación.

$$Q_{cv} = h_{cv} \cdot A_{sup} \cdot (T_{sup} - T_a) \quad (4)$$

$$Q_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon_{sup} \cdot A_{sup} \cdot (T_{sup}^4 - T_{amb}^4) \quad (5)$$



El flujo de calor transferido por los gases de combustión también puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación.

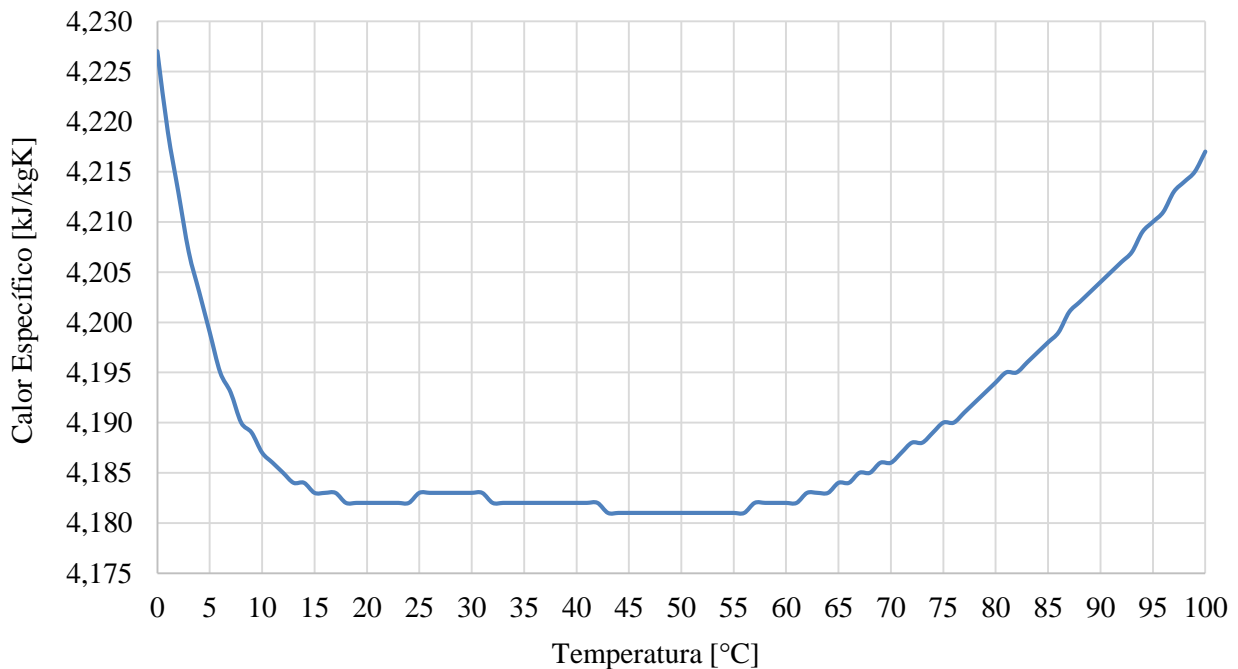
$$\dot{Q}_g = \dot{M}_g \cdot \sum [y_{gi} \cdot H_{gi}[(T_{ge}) - H_{gi}(T_{gs})]] \quad (6)$$

Esta ecuación permite calcular la energía aportada por cada componente presente en el gas, a partir de la diferencia de entalpías del flujo de gases.

La energía transferida hacia el agua del estanque depende de; la masa de agua (o flujo), el calor específico y el diferencial de temperatura.

$$Q_w = M_w \cdot C_p \cdot \frac{dT_w}{dt} \quad (7)$$

Donde el calor específico del agua dependerá de las condiciones de temperatura y presión del fluido. A continuación, se grafica el valor del calor específico del agua a 3 [bar] de presión, que corresponde a la presión estimada de trabajo de la red de agua potable.



**Figura 9: Gráfico Calor Específico del Agua a 3 Bar.**

Por otro lado, para obtener el aporte energético del combustible, en este caso leña, se define la siguiente ecuación:

$$Q_{leña} = PC_{leña} \cdot M_{leña} \quad (8)$$

Donde  $Q_{leña}$  es la energía entregada por la combustión de la leña en kWh,  $PC_{leña}$  es el poder calorífico de la leña en kWh/kg, y  $M_{leña}$  es la masa de la leña en kg.

Para saber cuánto combustible se consume, o, mejor dicho, cuanto combustible se gasifica, se calcula la tasa de quemado de la leña. Esta magnitud se obtiene a partir de la diferencia de masa del sistema. Una vez obtenida la diferencia de masa entre cada medida, se divide entre 5 para cuantificar este dato en [kg/min]. La división por 5 se debe a que las medidas de la balanza se registraron cada 5 minutos.

La siguiente ecuación explica este cálculo.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{M_i - M_{i+1}}{5} \text{ [kg/min]} \quad (9)$$

Donde  $dM$  es el diferencial de masa del sistema,  $M_i$  es la masa del sistema medida en un instante de tiempo, y  $M_{i+1}$  es la masa del sistema medida 5 minutos después.

La energía acumulada por el agua del estanque se calcula a partir del diferencial de temperatura del agua a lo largo de los ensayos. La energía total acumulada será igual a la sumatoria entre las ganancias de calor de cada intervalo (i a i+1).

$$Q_w = \sum C_{p,w} \cdot M_w \cdot (T_{i+1} - T_i) \quad (10)$$

El rendimiento del sistema será determinado según la cantidad de energía que se transfiere al agua, respecto a la entregada por el combustible.

$$\eta = \frac{Q_w \cdot 100}{Q_{leña}} \quad (11)$$

### 3 CAPITULO 3: Descripción del Banco de Ensayos

En esta sección se describirá el banco de ensayos, sus componentes, las mediciones que se realizaron y la metodología de post-tratamiento de estos ensayos.

El banco de ensayos se basa en un equipo “Termocañón” comercial, el cual será sometido a varios ensayos con el fin de evaluar su rendimiento energético.

En el Anexo 7.2 se muestra un esquema general de la instalación, donde aprecian los componentes que se describirán más adelante.

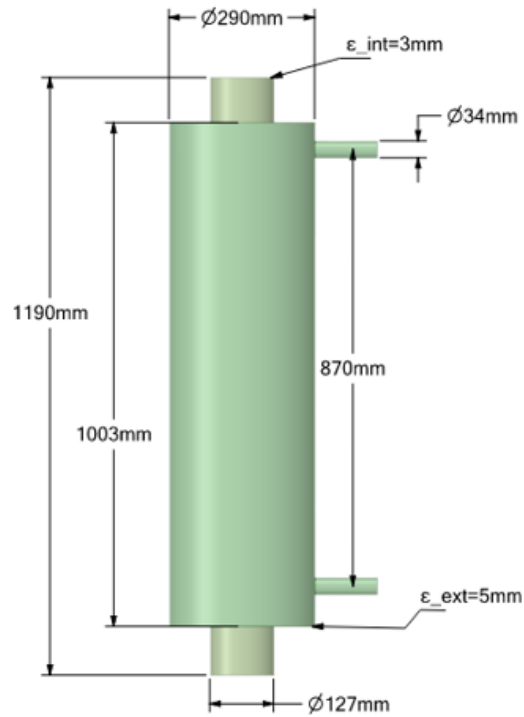
#### 3.1 Descripción General del Termocañón Comercial.

El equipo termocañón es de la marca Alcázar, y consta de un estanque cilíndrico adosado a una cocina a leña del mismo fabricante. En la Figura 10 se muestra una fotografía del equipo instalado, situado en el Laboratorio de Termofluidos de la Universidad de Concepción.



**Figura 10: Equipo Termocañón Alcázar.**

El equipo termocañón se instala sobre la salida de los gases de combustión de la cocina a leña, permitiendo el flujo de estos por el tubo que atraviesa por el eje al estanque. Las dimensiones del estanque se muestran en la Figura 11 (S. Gallardo, 2022). La altura del estanque es de aproximadamente 1 metro, el ducto de los gases de combustión es de un diámetro de 5”.



**Figura 11: Medidas del Equipo Termocañón.**

Para calcular el volumen del estanque, se realiza la siguiente operación. El primer paso es medir el peso del equipo sin agua, para lo cual se procede a realizar el vaciado completo del sistema. Luego se llena de agua y se vuelve a registrar el peso, para aquello se posiciona la cocina sobre una báscula de plataforma.

- Peso equipo sin agua: 153.78 kg
- Peso equipo con agua: 211.34 kg

Realizando la resta de ambos pesos, se tiene que ingresaron al estanque 57.56 kg de agua. Considerando una densidad de  $999.1 \text{ [kg/m}^3\text{]}$  (densidad del agua a  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  y condiciones de presión normal), son 57,6 litros de agua.

El estanque es fabricado de Acero al Carbono y posee un espesor de pared de 0,5 cm. El estanque posee conexiones exteriores de 1/4" en la parte superior e inferior. Además, posee otra conexión en la cara superior del estanque, en donde se instalan una válvula de alivio y un purgador automático.

### 3.2 Descripción de los Componentes.

Para permitir el flujo de agua sanitaria hacia y desde el estanque, se instalan cañerías de cobre de 1/4". La entrada de agua fría se hace por la parte inferior, y la salida del agua caliente es por la parte superior. Como elementos de seguridad, son instalados en la parte superior del estanque; un purgador automático de 12 bar,  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  y una conexión de 1/2" (Figura 12). y una válvula de seguridad de 6 bar y de diámetro de conexión de 3/4" (Figura 13).



**Figura 12: Purgador Automático.**



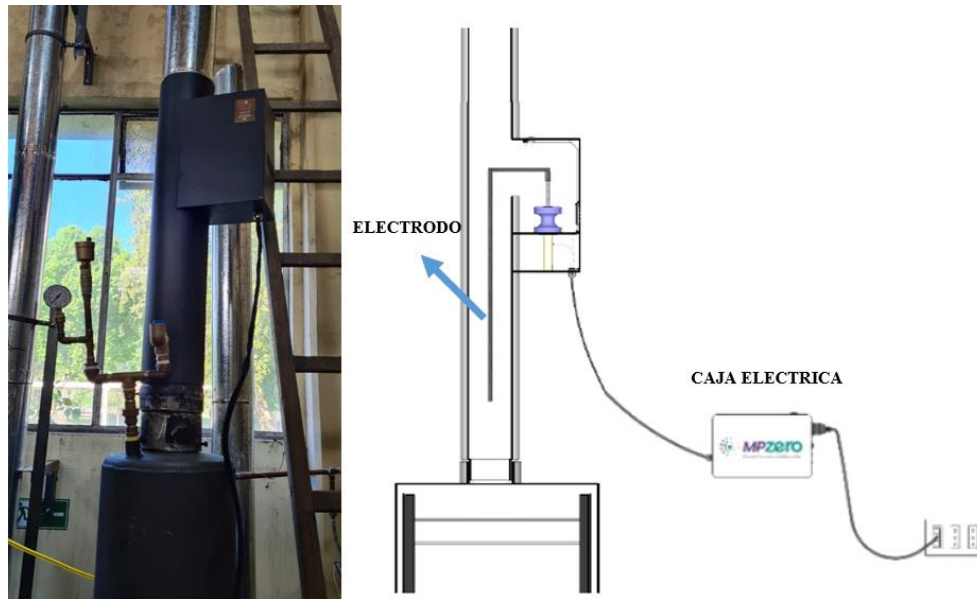
**Figura 13: Válvula de Seguridad.**

El equipo está conectado a la red de agua sanitaria del laboratorio, además, el sistema tiene la capacidad de recircular el agua mediante una bomba instalada entre las cañerías de salida y entrada al estanque. La bomba tiene una potencia de 120 W y conexiones de 3/4". Los datos de la bomba de muestran en el apartado de Anexos en 7.3.

La bomba de recirculación tiene como objetivo recircular el agua a través del estanque en un sistema cerrado, o bien, realizar una mezcla hacia la entrada del estanque, entre el agua que sale de él, y la que entra desde la red.

Del lado de los gases de combustión, un ventilador ayuda a la extracción de estos hacia el ambiente, dado que los ductos poseen gran longitud y, por ende, una alta pérdida de carga.

El siguiente equipo es un precipitador electrostático “MPZero”, será utilizado para las pruebas de medición de material particulado, y su uso deberá disminuir la emisión del MP presente en los gases de combustión.

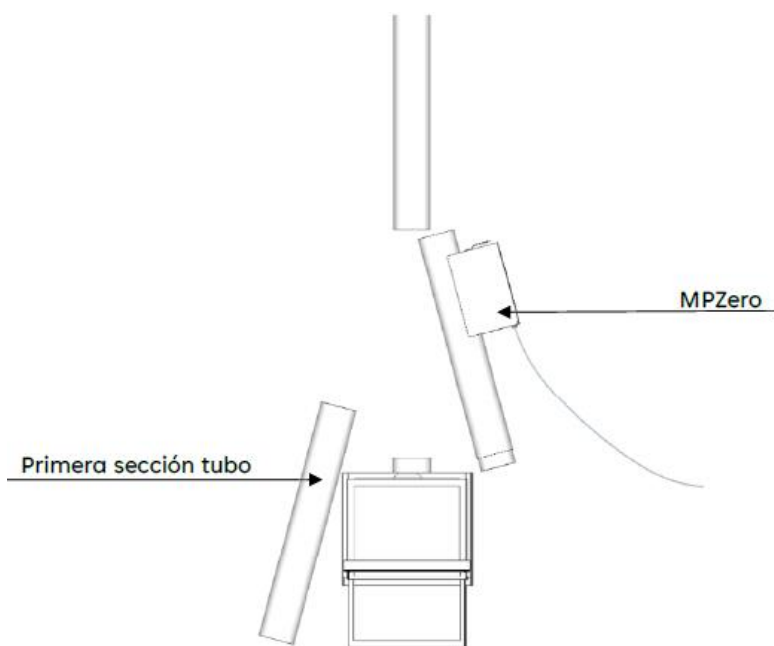


**Figura 14: Equipo MPZero Instalado y Esquema.**

El precipitador MPZero consta de una varilla metálica (Electrodo) que se inserta por dentro del ducto de los gases de combustión, ubicado concéntricamente a este. La caja eléctrica es la encargada de energizar el electrodo, el cual, a su vez, carga eléctricamente a las partículas contaminantes presentes en los gases de combustión, las cuales se mueven en dirección radial al electrodo, hacia las paredes del ducto de la chimenea, donde se adhieren a la superficie, y se evita su expulsión al ambiente. La caja eléctrica cuenta con 2 niveles de funcionamiento, uno con mayor voltaje que el otro. A continuación, se muestran algunos datos de precipitador.

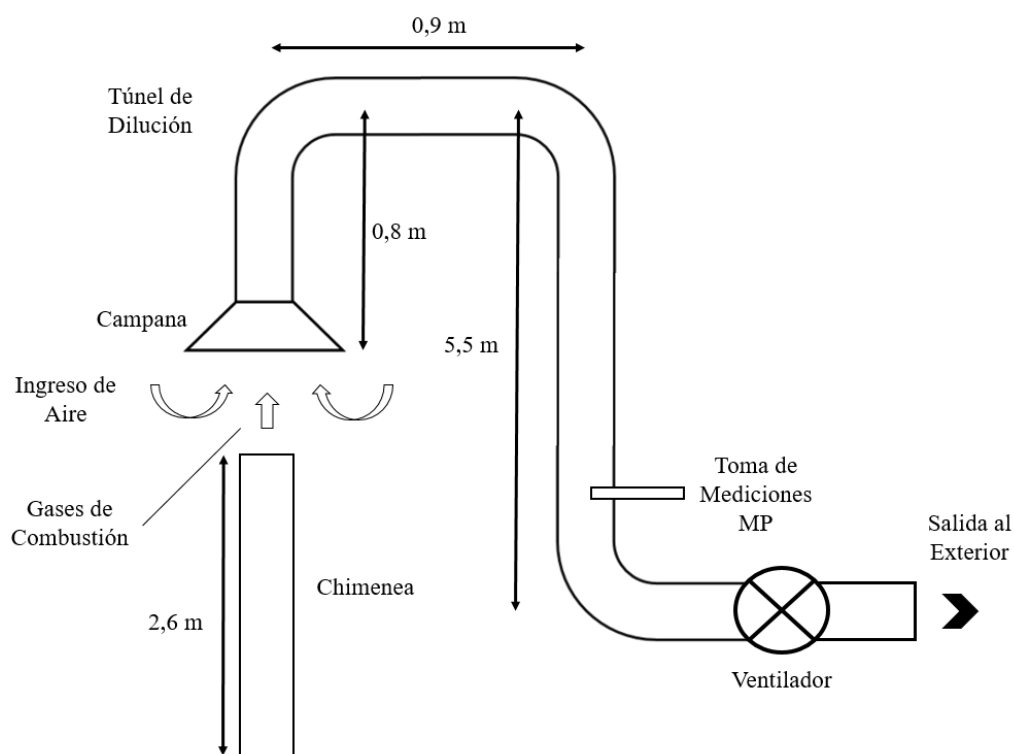
- Consumo medio: 15 [kWh/mes]
- Potencia máxima: 200 W
- Potencia normal de funcionamiento: 60 – 100 W
- Largo: 1 m
- Peso: 12 kg
- Material del tubo: Acero

La instalación del precipitador MPZero es sencilla, se debe cortar una sección de la chimenea, e introducir el tubo del equipo entre el espacio cortado.



**Figura 15: Modo de Instalación de Filtro MPZero.**

Por último, el mecanismo de conducción de los gases de combustión se compone de varios metros de ductos hacia el techo del laboratorio, y cuenta con un túnel de dilución, que se muestra en el siguiente esquema.



**Figura 16: Esquema Ductos de Extracción Gases de Combustión.**

En el esquema anterior se muestra una campana que recoge el flujo de gases de combustión y lo diluye con aire ambiente. Otra función importante del túnel de dilución es la de disminuir la temperatura de la mezcla de gases, lo que contribuye con la condensación de algunos productos de combustión. La condensación y solidificación de los compuestos volátiles permite que estos sean medibles junto al material particulado. El largo del túnel de dilución es un factor importante para maximizar la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el ambiente, a través de la chimenea. Si el largo de los ductos en el túnel de dilución es mayor, aumenta el área de transferencia de calor, lo que contribuye con la disminución de temperatura de los gases de combustión diluidos.

El material particulado no podría medirse, por ejemplo, en el lugar de medición de los compuestos de los gases de combustión (Justo a la salida superior del estanque de agua), o en otro lugar cercano a la salida directa desde la cocina. La alta temperatura de los gases de combustión tiene como consecuencia que sus compuestos estén en su mayoría en un estado gaseoso, lo que evitaría su medición como material particulado. Una mezcla más diluida permite una mayor vida útil de los filtros del medidor de material particulado, ya que evita su saturación.

### 3.3 Descripción de los Sistemas de Medición.

Varias mediciones son necesarias para realizar los análisis del equipo, tales como las temperaturas del agua en varios puntos del sistema, las temperaturas de los gases de combustión, temperatura ambiente, flujo de agua, peso del sistema, peso del combustible, composición de los gases de combustión, entre otras.

A continuación, se muestra un esquema del sistema hidráulico del termocañón y la cocina, en él se muestran 7 puntos de medición de temperatura (ubicación de las termocuplas), ubicación de la bomba de recirculación, válvulas de paso y caudalímetro.

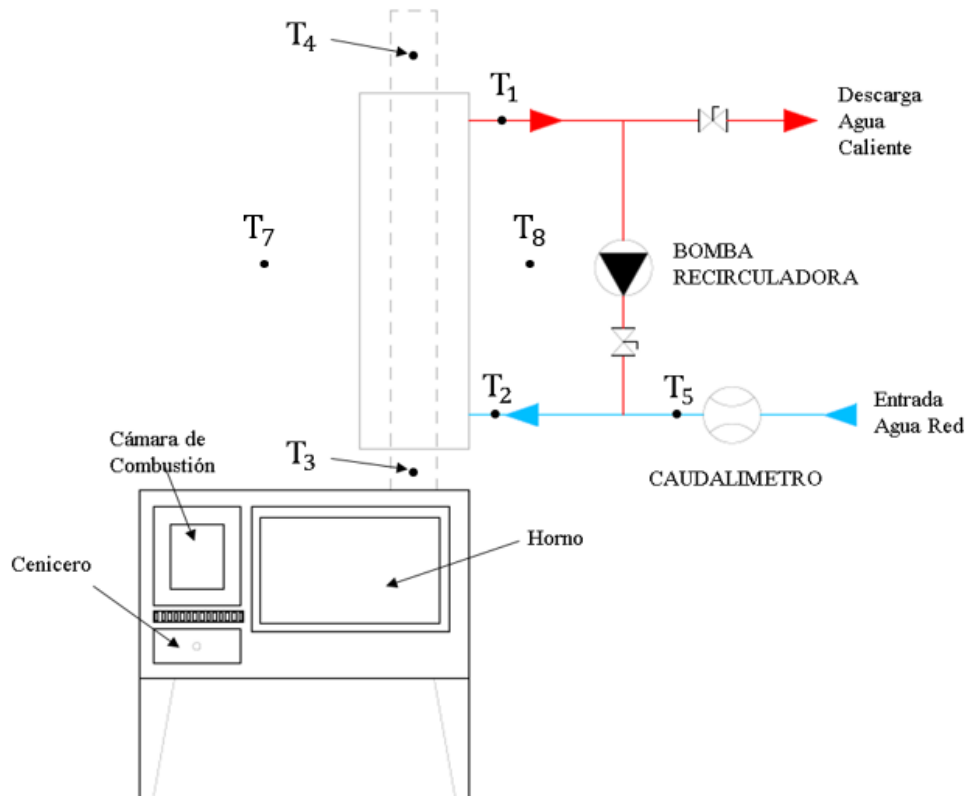


Figura 17: Esquema Hidráulico del Sistema.



En el esquema;  $T_1$ ,  $T_2$  y  $T_5$  son termocuplas que miden temperaturas de agua, por otro lado,  $T_3$  y  $T_4$  corresponden a termocuplas ubicadas en el cañón y censan temperatura de gases.

$T_1$ : Temperatura del agua a la salida del estanque.

$T_2$ : Temperatura del agua a la entrada del estanque.

$T_3$ : Temperatura de los humos a la entrada del termocañón.

$T_4$ : Temperatura de los humos a la salida del termocañón.

$T_5$ : Temperatura del agua de red antes de mezcla de recirculación.

$T_7$ : Temperatura del aire por encima de la cocina.

$T_8$ : Temperatura del aire al costado opuesto a  $T_7$ .

La termocupla número 6 no se muestra en la Figura 17, es la que mide la temperatura del ambiente general del laboratorio.

En la siguiente imagen se muestra el esquema sobre la adquisición de datos de las temperaturas medidas por las termocuplas.



**Figura 18: Esquema de Conexión y Lectura de Termocuplas.**

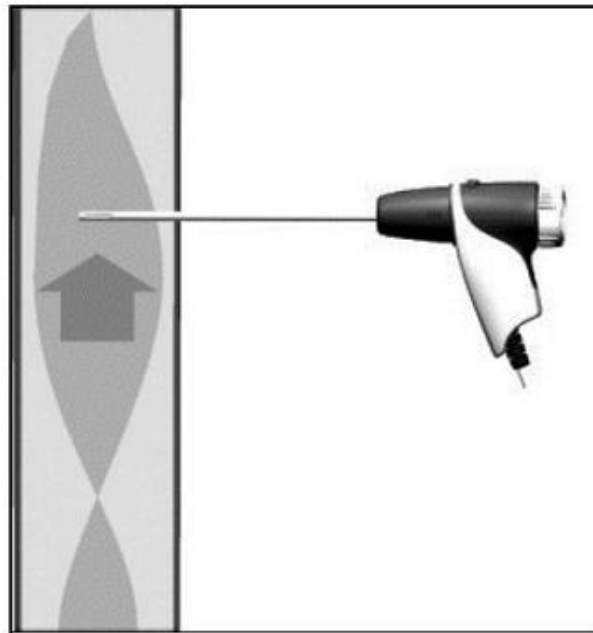
Todas las termocuplas están conectadas al dispositivo IMP 35951C, el cual, a su vez, envía información a través de una conexión VGA a un computador en donde mediante el programa IMP View, es posible visualizar en tiempo real las mediciones de todas las temperaturas, y a su vez realizar un registro de estas.

En el esquema de la Figura 17 también se muestran 2 válvulas, donde la válvula superior a la salida del agua hacia la descarga, es la encargada de regular el flujo dentro del circuito. La válvula ubicada bajo la bomba de recirculación, permite el reingreso del agua caliente hacia la entrada del estanque. Esta última válvula permitiría el flujo de agua en circuito cerrado, si se cierran las válvulas de salida y la entrada desde la red de agua del laboratorio.

La medición de los componentes de los gases se hace mediante un Analizador de Gases de Combustión Testo 320 (Figura 19). Este equipo analiza la composición de los gases mediante una varilla que se inserta en el flujo. Para este caso, se realizó una perforación en el ducto de los gases a la salida del termocañón, por donde se inserta la varilla del analizador. El modo de inserción se muestra en la Figura 20.



**Figura 19: Analizador de Gases de Combustión Testo 320.**



**Figura 20: Modo de Inserción de Sonda Testo 320.**

La sonda deberá estar ubicada en el centro del ducto por donde circulan los gases de combustión, en esta zona es donde los gases de combustión alcanzan la mayor temperatura.

Este equipo mide también la temperatura de los gases, similar función de la termocupla  $T_4$  (Ver Figura 17), y temperatura ambiente. Tiene una capacidad de medición de temperatura de hasta 400 °C en el flujo de gases y de hasta 100 °C de temperatura ambiente. Su error de medición es de  $\pm 1$  °C entre 0 y 100 °C.

Algunos de los componentes medidos por el equipo Testo 320 se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1: Componentes Medidos por Equipo Testo 320.**

Componente	Unidad
CO <sub>2</sub>	Porcentaje Volumétrico
O <sub>2</sub>	Porcentaje Volumétrico
CO	Partes por millón (ppm)
NO <sub>x</sub>	Partes por millón (ppm)
HC	Partes por millón (ppm)
H <sub>2</sub>	Partes por millón (ppm)

El peso del sistema es medido por una balanza de tipo plataforma que se ubica por debajo de la cocina (Ver Figura 10), y gracias a ella es posible analizar la disminución del peso del sistema provocado por la gasificación del combustible. La balanza de plataforma utilizada es similar a la presentada en la siguiente imagen de referencia.

**Figura 21: Balanza de Plataforma.**

Las mediciones de la balanza son visualizadas digitalmente en un indicador de peso programable LP-7516.

**Figura 22: Indicador Digital de Peso Programable LP-7516.**

El flujo de agua es medido por un flujómetro o caudalímetro en la entrada del agua de la red (Ver Figura 17). Fabricado por Blue-White Industries, modelo F-1000-RT. Este equipo tiene un diámetro de 1/2", y tiene un rango de medición de 2,0 a 20,0 litros por minuto.



**Figura 23: Flujómetro F-1000-RT.**

El equipo usado para medir el material particulado es un dispositivo que mide la dispersión de la luz mediante un sensor óptico, cuyo nombre comercial es Plantower PMS5003. El dispositivo funciona mediante la extracción de material particulado desde la chimenea, y conducido hacia una caja al vacío mediante una pequeña bomba de succión.



**Figura 24: Medidor de Material Particulado Plantower PMS5003.**

El medidor de material particulado muestra de manera digital las mediciones de material particulado de 2,5 y 10  $\mu\text{m}$  de diámetro.

## 4 CAPITULO 4: Descripción, Resultados y Análisis de los Ensayos

En este capítulo se caracterizarán los ensayos hechos al equipo recuperador de calor, además de mostrar los resultados experimentales, y resultados de los modelos de post-tratamiento.

**Tabla 2: Resumen Ensayos Realizados.**

	Condición	Fecha	Objetivo
Ensayo 1	Flujo de agua permanente.	13/10/2022	- Tasa de Quemado - Potencia Agua
Ensayo 2	Acumulación y descarga.	13/10/2022	- Tasa de Quemado - Energía Agua - Rendimiento
Ensayo 3	Acumulación, recirculación con bomba, y descarga.	18/19/2022	- Tasa de Quemado - Energía Agua - Rendimiento
Ensayo 4	Acumulación.	27/10/2022	- Tasa de Quemado - Energía Agua - Rendimiento - Energía Gases
Ensayo 5	Flujo de agua permanente	18/01/2023	- Tasa de Quemado - Material Particulado

### 4.1 Descripción Ensayos.

Para los 5 ensayos realizados entre el 13 de octubre de 2022 y el 18 de enero de 2023, se ocupa leña de eucalipto en forma de astilla normal y comercial. La humedad de esta será variable, y solo se medirá para el Ensayo 5. Sus dimensiones serán también variables, pero el largo es relativamente constante, de alrededor de 30 cm. Dado que el resto de las dimensiones de la astilla no es constante para cada unidad, el peso no será posible generalizar para una astilla.

#### 4.1.1 Ensayo 1

El primer ensayo es realizado con la condición de un flujo constante y tuvo una duración de poco menos de 3 horas. El flujo de agua es controlado por una válvula de bola ubicada unos metros antes de la salida a desagüe del agua caliente. En este ensayo es importante la medición permanente del flujo de agua. El experimento simulará un sistema de calentamiento instantáneo, lo que quiere decir que no habrá acumulación de agua dentro del estanque al tener un flujo permanente.

El Ensayo 1 fue realizado el día 13 de octubre de 2022. Se realizó el encendido (o primera carga) con 2,71 kg de leña de eucalipto, a las 10:50 horas, posteriormente, una segunda carga de biomasa es añadida a la cámara de combustión de la cocina, de 3,02 kg. Finalmente se añade una tercera carga de 3,09 kg. El Ensayo 1 finaliza a las 13:40 horas del mismo día.

### 4.1.2 Ensayo 2

Posterior al primer ensayo, se realizaron 2 ensayos (Ensayo 2 y Ensayo 3) en los que no había flujo de agua externo, se cerraron las válvulas que permiten la entrada de agua al sistema y solo se considera una recirculación natural por efecto sifón y de las diferencias de densidad del agua (causado por la diferencia de temperatura del agua dentro del estanque).

Dado que el agua dentro del estanque está completamente confinada, a medida que aumenta su temperatura, incrementa la presión del sistema, por lo que se deben realizar evacuaciones de agua abriendo la válvula de bola ubicada en la cañería que va hacia la descarga. Los alivios de presión se hacen con el objetivo de que la presión del sistema no supere los 6 bar, ya que a esta presión se activa la válvula de seguridad del estanque ubicado en su parte superior.

En el Ensayo 2 se almacenó el agua para que se calentara sin perturbaciones, para luego descargar el agua simulando un flujo de entre 5 y 6,5 [L/min]. Este ensayo, al igual que el Ensayo 1, fue realizado el día 13 de octubre de 2022, y tuvo una duración de poco más de 2 horas. En este ensayo se realiza una primera carga de 3,05 kg de leña alrededor de las 14:45 horas, y una segunda carga de 2,94 kg 55 minutos posterior a la primera carga. Durante el procedimiento se realizaron 4 aperturas de válvula para permitir el alivio de presión del sistema. El experimento se hace en un circuito cerrado, permitiendo la circulación natural del agua a través del circuito que une la parte superior y la parte inferior del estanque. La simulación de consumo se hace abriendo la válvula de descarga del circuito, y cerrando la válvula bajo la bomba de recirculación (Ver Figura 17). A las 16:00 del mismo día, transcurridos 1 hora y 15 minutos una vez iniciado el ensayo, se procede a realizar la apertura de la válvula de salida y entrada de agua del sistema, dando paso al ingreso de agua fría de la red hacia el estanque. Este procedimiento simula un consumo de agua común domiciliario (entre 5 y 6,5 [L/min]) durante un lapso de 10 minutos. Luego de esto, se cierran las válvulas mencionadas anteriormente, y se sigue el régimen anterior de flujo cero. El experimento finaliza cercade las 17:00 horas de aquel día.

### 4.1.3 Ensayo 3

El Ensayo 3 es de mayor duración que el segundo, por lo que se alcanzan mayores temperaturas del agua dentro del estanque, donde se almacena el agua, para luego activar la bomba de recirculación y bajar la temperatura, y finalmente se descarga el agua hacia el desagüe.

El Ensayo 3 corresponde al segundo ensayo sin flujo de agua exterior. Este ensayo tuvo una duración de poco menos de 3 horas y fue realizando el día 18 de octubre de 2022, comenzando las mediciones a las 09:20 horas y finalizando a las 12:25 horas del mismo día. La carga de encendido fue de 3,23 kg de leña de eucalipto. Luego, a las 10:00 horas se realiza una segunda carga de 2957,9 gr. Alrededor de las 11:00 una tercera carga de 2,88 kg, y una cuarta y última carga de 3,13 kg a las 11:30 horas. Durante el experimento se realizaron múltiples aperturas de la válvula de salida hacia la descarga para aliviar la presión del estanque, donde una gran cantidad de ellas se realizaron cada 5 minutos, debido al rápido aumento de presión.

Hacia el final del experimento, a las 11:58 horas, se activa el encendido de la bomba de recirculación para bajar la temperatura del sistema, para luego finalizar el experimento abriendo la válvula de ingreso de agua fría de la red, para acelerar el proceso de enfriado, a las 12:25 horas. Las mediciones de las variables siguen hasta alrededor de las 14:20 horas del mismo día.

#### **4.1.4 Ensayo 4**

El Ensayo 4 tiene como objetivo principal calcular la energía transferida desde los gases de combustión hacia el estanque. Este ensayo se realizó en régimen de almacenamiento, sin flujos externos de agua. Este experimento tuvo una duración de 3 horas y media, comenzando a las 09:05 horas, y finalizando a las 12:35 horas del día 27 de octubre de 2022. La carga inicial de encendido fue de 2,13 kg de leña de eucalipto. La segunda carga se realiza 1 hora después del encendido, 2,00 kg a las 10:05 horas. A las 11:15 horas se realiza una tercera y última carga de 2,00 kg. Al igual que todos los experimentos anteriores sin flujo de agua, se debieron realizar alivios de presión del estanque.

#### **4.1.5 Ensayo 5**

Se realiza un quinto ensayo para analizar un sistema de reducción de material particulado, con el fin de conocer su impacto en la reducción de emisiones contaminantes. Este ensayo consta de varios sub-ensayos, con diferentes condiciones de operación; las cuales diferirán en el uso del equipo precipitador electrostático, humedad de la leña, y apertura del tiraje de la cocina.

En cada uno de los subensayos, se realizan cargas aproximadas de 2 kg de leña. El procedimiento comienza con la carga de leña, se esperan 2 minutos y medio, y se comienza a realizar las mediciones manuales de peso, material particulado, temperaturas de humos en la salida de la cocina (entrada del termocañón) y temperatura de humos en el punto de medida del material particulado.

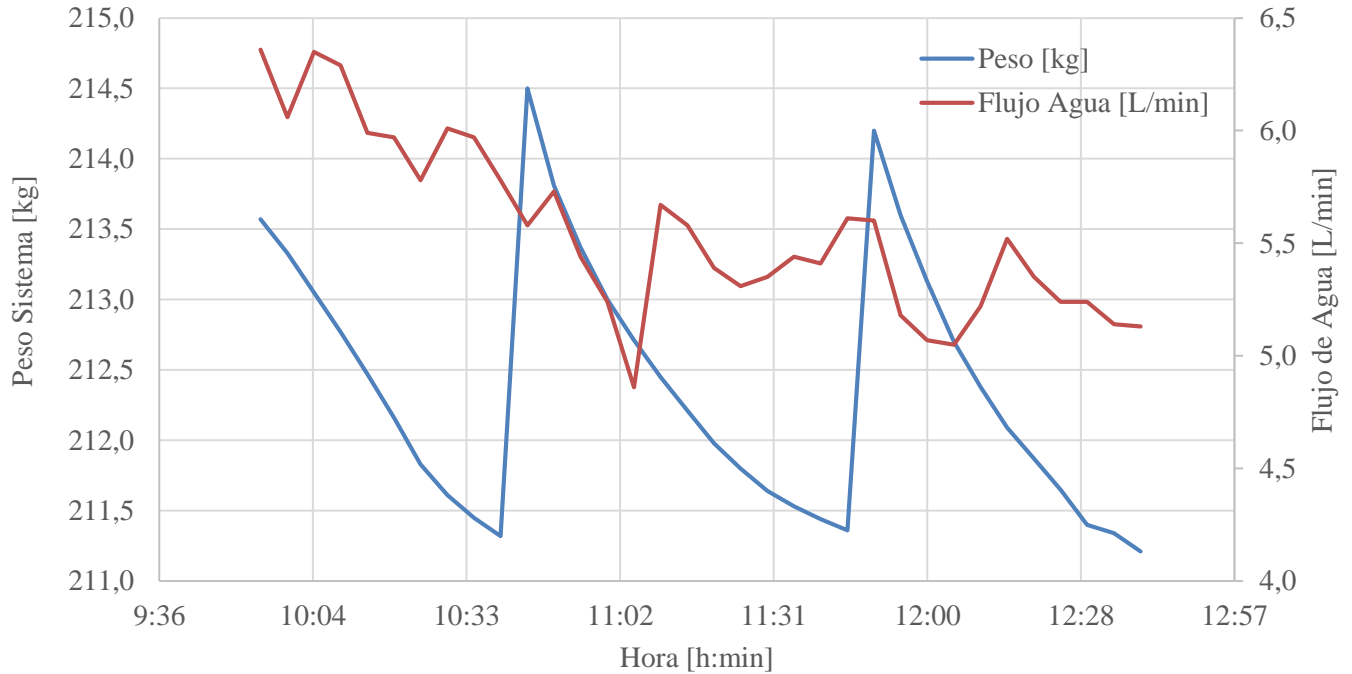
En la sección 4.2 se presentan los detalles de los resultados preliminares de las mediciones de cada ensayo, como las temperaturas de agua y gases, y más adelante en la sección 4.3, se presentan los resultados del post-tratamiento de las mediciones y resultados de la sección 4.2, según el objetivo de cada ensayo, descrito en la Tabla 2.

### **4.2 Resultados de los Ensayos.**

En esta sección se presentarán los resultados de los ensayos hechos al equipo termocañón. Los resultados consisten en ilustrar resultados tales como; peso del sistema, tasa de quemado, temperaturas del agua a la entrada y salida del estanque del termocañón, temperaturas de los gases de combustión a la entrada y salida del termocañón.

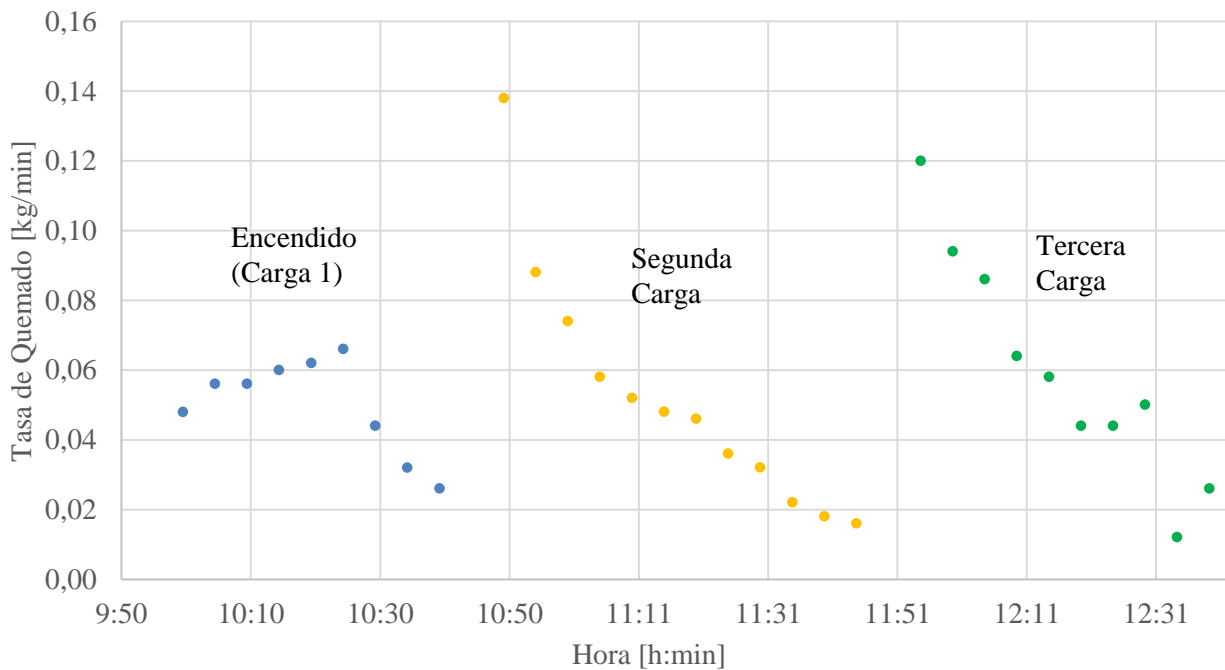
#### **4.2.1 Ensayo 1: Equipo con flujo de agua constante.**

La Figura 25 muestra la variación de la masa de la estufa y el flujo de agua a lo largo del Ensayo 1. Estos valores se registraron con una frecuencia de 5 minutos.



**Figura 25: Gráfico del Peso del Sistema y Flujo de agua durante Ensayo 1.**

Luego, en la Figura 26 se calcula y grafica la tasa de quemado del sistema, obtenido a partir de los datos de la Figura 25.



**Figura 26: Gráfico Tasa de Quemado Ensayo 1.**



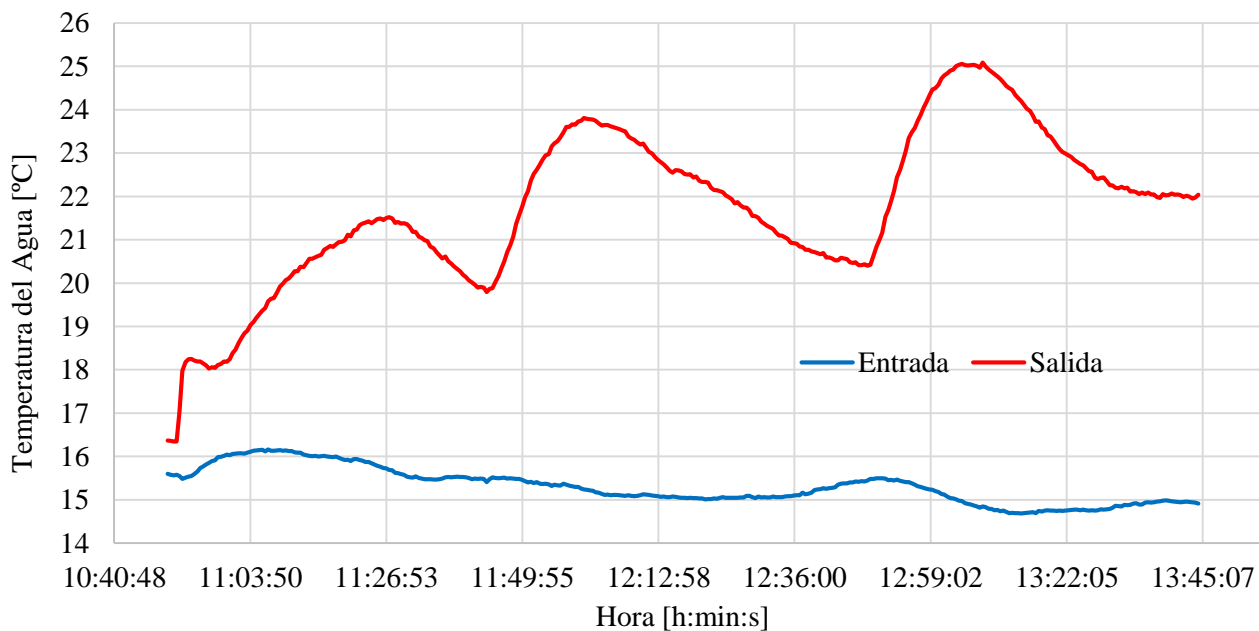
En la Figura 26 se muestran 3 periodos de medición, el primero es entre la carga inicial y la segunda carga (primer grupo de puntos azules a la izquierda del gráfico). La tasa de quemado inicia en 0,048 [kg/min], sube hasta los 0,066 [kg/min] en la mitad de la primera carga, y desciende hasta los 0,026 [kg/min]. Luego hay un vacío en la medición ya que, al agregar masa de la segunda carga, el diferencial de masa es negativo, por lo cual, para efectos de mejor visualización de la tasa de quemado, se omite este dato, lo mismo para las siguientes cargas. Al principio de la segunda carga (Grupo de puntos naranjas) la tasa de quemado experimenta un máximo de 0,139 [kg/min], desde donde disminuye constantemente hasta alcanzar los 0,016 [kg/min]. El grupo de puntos verdes de la derecha del gráfico representa la tasa de quemado durante la combustión de la tercera carga. El comportamiento de esta última carga es similar al de la segunda, pero experimenta aumentos de la tasa de quemado en la última etapa de combustión.

Para obtener un resultado más generalizado del Ensayo 1, se calcula el promedio de la tasa de quemado a lo largo del experimento, lo que corresponde a 0,054 [kg/min]. Este resultado corresponde al promedio de todos los puntos de tasa de quemado en la Figura 26. Ahora, también se puede calcular la tasa de quemado para cada periodo en forma general, mediante las masas al inicio y término de cada carga, multiplicado por la duración (en horas) del consumo de la carga de leña.

**Tabla 3: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 1.**

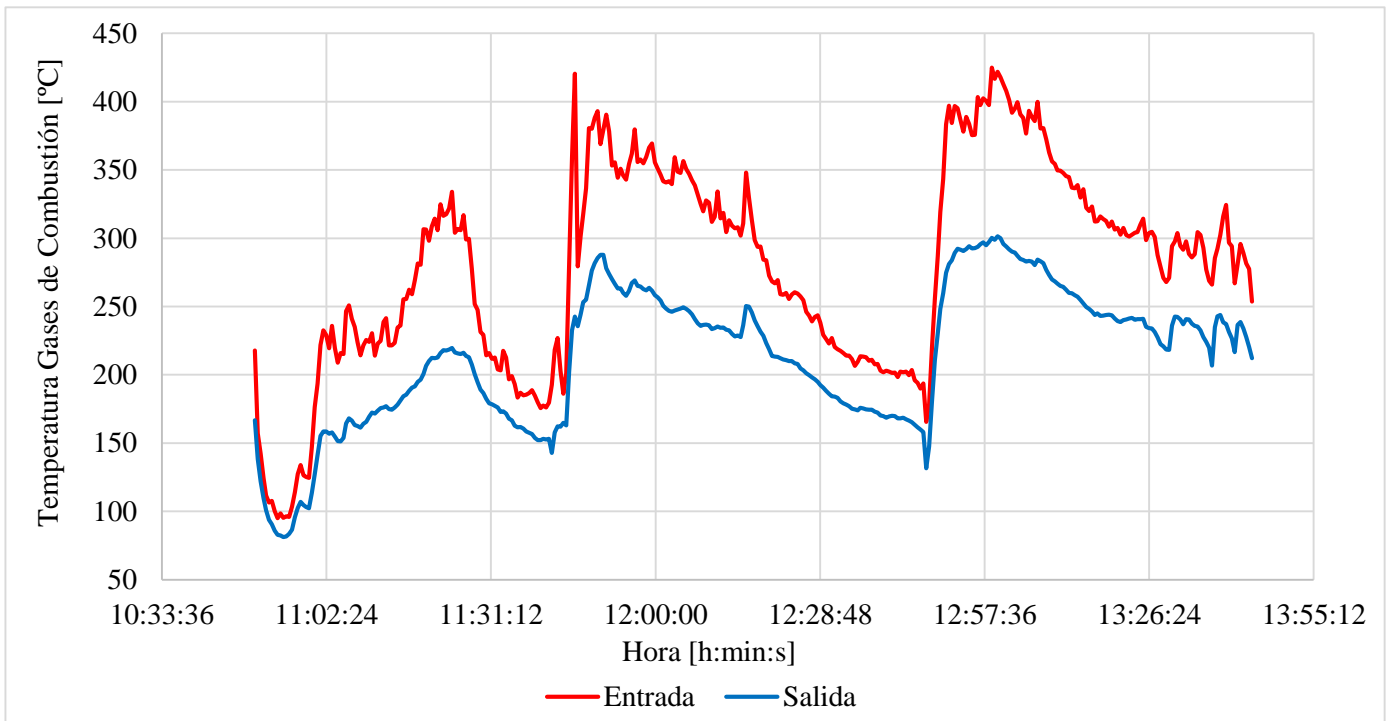
Periodo	Tasa de Quemado [kg/h]
Primera Carga	3
Segunda Carga	3,14
Tercera Carga	3,58

A continuación en la Figura 27, se grafican las temperaturas de entrada (en azul) y salida (en rojo) del agua durante el transcurso del Ensayo 1.



**Figura 27: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 1.**

En los primeros 5 minutos del experimento, la temperatura del agua a la salida del estanque aumentó rápidamente hasta los 18,2 °C, luego, se estabiliza por un pequeño lapsus, y después comienza a ascender constantemente hasta los 21,4 °C poco más de media hora comenzado el experimento. Esta temperatura comienza a descender hasta los 19,8 °C, para luego repetir el comportamiento anterior. Los puntos mínimos coinciden con los momentos en los que se realizaba una carga de leña, por lo que después de esto la energía transferida aumenta, junto con la temperatura del agua. Para entender mejor este fenómeno, se incluye la Figura 28, que muestra las temperaturas de entrada y salida de los gases de combustión del termocañón.

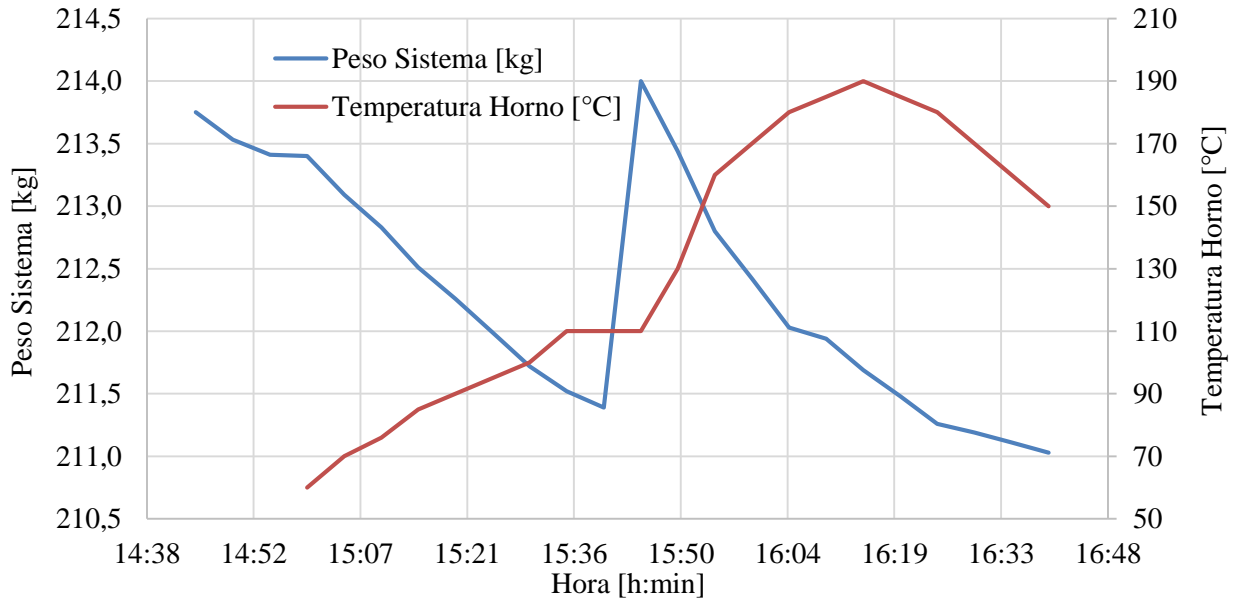


**Figura 28: Gráfico de Temperatura de Entrada y Salida del Estanque de los Gases de Combustión durante Ensayo 1.**

Similar al análisis realizado para la Figura 27 sobre el ciclo de aumento y descenso de temperatura del agua a la salida del estanque, se puede apreciar en la Figura 28 que este ciclo es parecido para la temperatura de los gases de combustión, tanto a la salida como entrada del termocañón, es decir, que a medida que se consume el combustible, disminuye paulatinamente la temperatura de los gases de combustión y, análogamente, la temperatura del agua en el estanque. La temperatura de los gases de combustión comienza a ascender desde el momento en que se ingresa una nueva carga de leña.

#### 4.2.2 Ensayo 2: Primer ensayo sin flujo

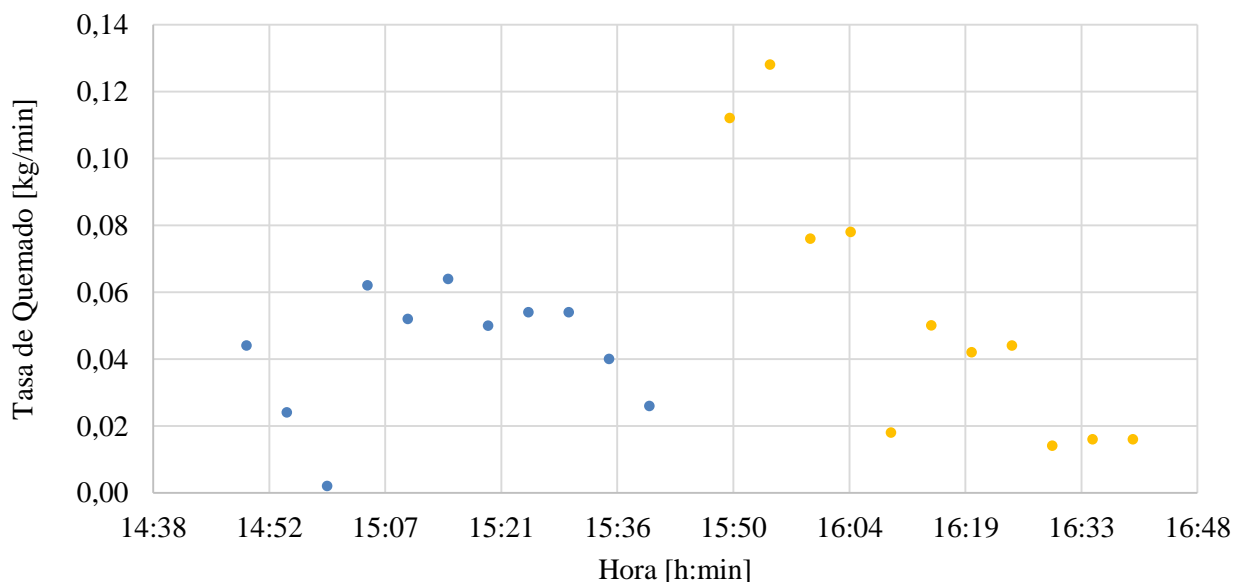
En la Figura 29 se grafican el peso del sistema y la temperatura del horno de la cocina a leña, durante el Ensayo 2. La temperatura del horno es medida por el mismo termómetro inserto de fábrica en el horno de la cocina.



**Figura 29: Gráfico del Peso de Sistema y Temperatura del Horno durante Ensayo 2.**

En cuanto al peso del sistema (línea azul), el comportamiento es similar al Ensayo 1, y las variaciones se deben a la misma razón, el punto de inflexión en donde aumenta, es el momento en donde se realiza la segunda carga. La temperatura del horno va en aumento en el tiempo que dura la primera carga de leña para luego estancarse al final del primer periodo (Se entiende por primer periodo el punto desde el inicio, hasta el punto de inflexión del peso del sistema, 15:40 hrs). Luego de la segunda carga, la temperatura del horno vuelve a aumentar hasta llegar a un máximo de 190 °C, para posteriormente disminuir hasta el final del experimento debido al consumo de la leña hasta quedar en brasas. Cabe mencionar que el peso del sistema se ve disminuido no solo por la combustión de la leña, sino que también por la evacuación de agua que se realizó para aliviar la presión del estanque.

Con los datos de la masa del sistema de la Figura 29, se calcula la tasa de quemado de la misma manera que se hizo en el Ensayo 1, la que se muestra a continuación en la Figura 30.



**Figura 30: Tasa de Quemado Ensayo 2.**

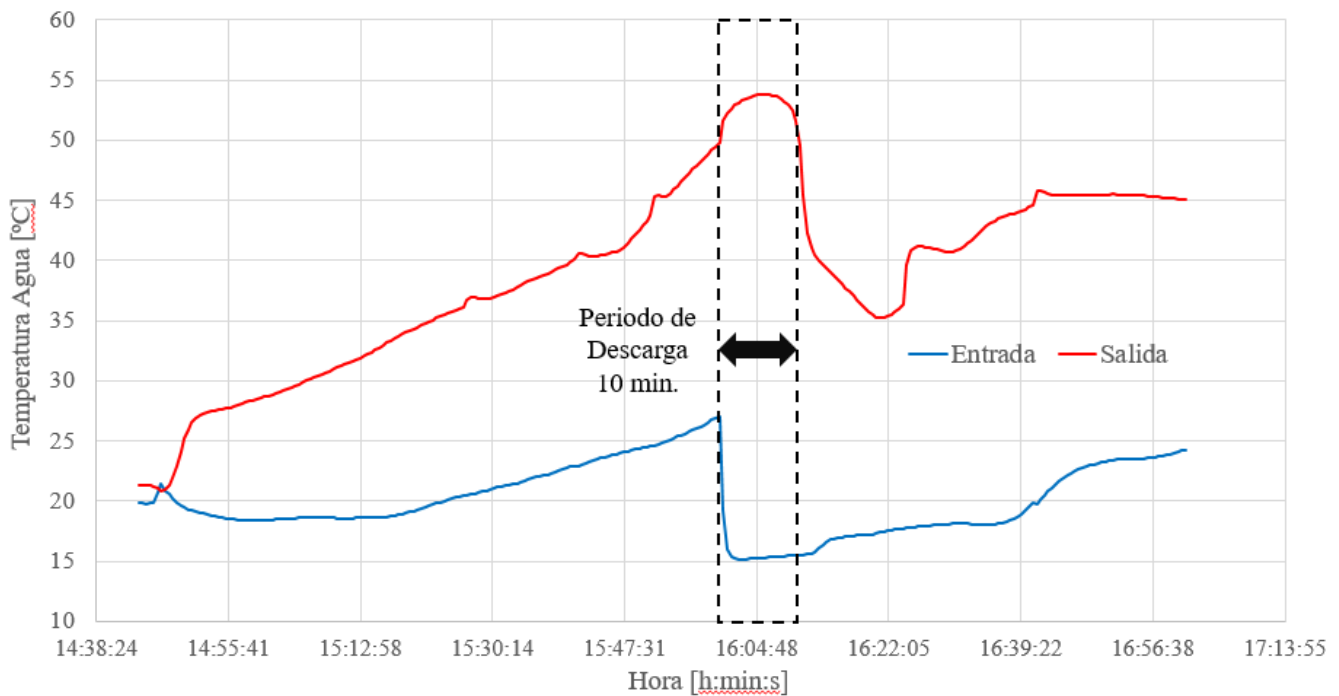
En la gráfica anterior se aprecia que durante el primer periodo de carga (Grupo de puntos azules) existe una medición más bien estable, y una disminución hacia el final de la carga inicial. Durante la segunda carga (Grupo de puntos naranjas) se puede ver que se experimenta una alta tasa de quemado al principio, y una disminución durante el resto de la carga. El promedio de la tasa de quemado del Ensayo 2 es de 0,048 [kg/min].

Alternativamente, se calcula la tasa de quemado en kg/h, considerando las masas al inicio y término de cada carga.

**Tabla 4: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 2.**

Periodo	Tasa de Quemado [kg/h]
Primera Carga	2,57
Segunda Carga	3,24

Por otro lado, el comportamiento de la temperatura del agua es similar al de la temperatura del horno. La cual aumenta a medida que transcurre el tiempo, tanto para la primera y segunda carga realizada entre las 15:40 y 15:45 hrs. En la Figura 31 se grafican las temperaturas de entrada (en azul) y salida (en rojo) del agua al termocañón, donde se puede apreciar el aumento de temperatura descrito anteriormente, y el periodo en donde se realiza la simulación de consumo.



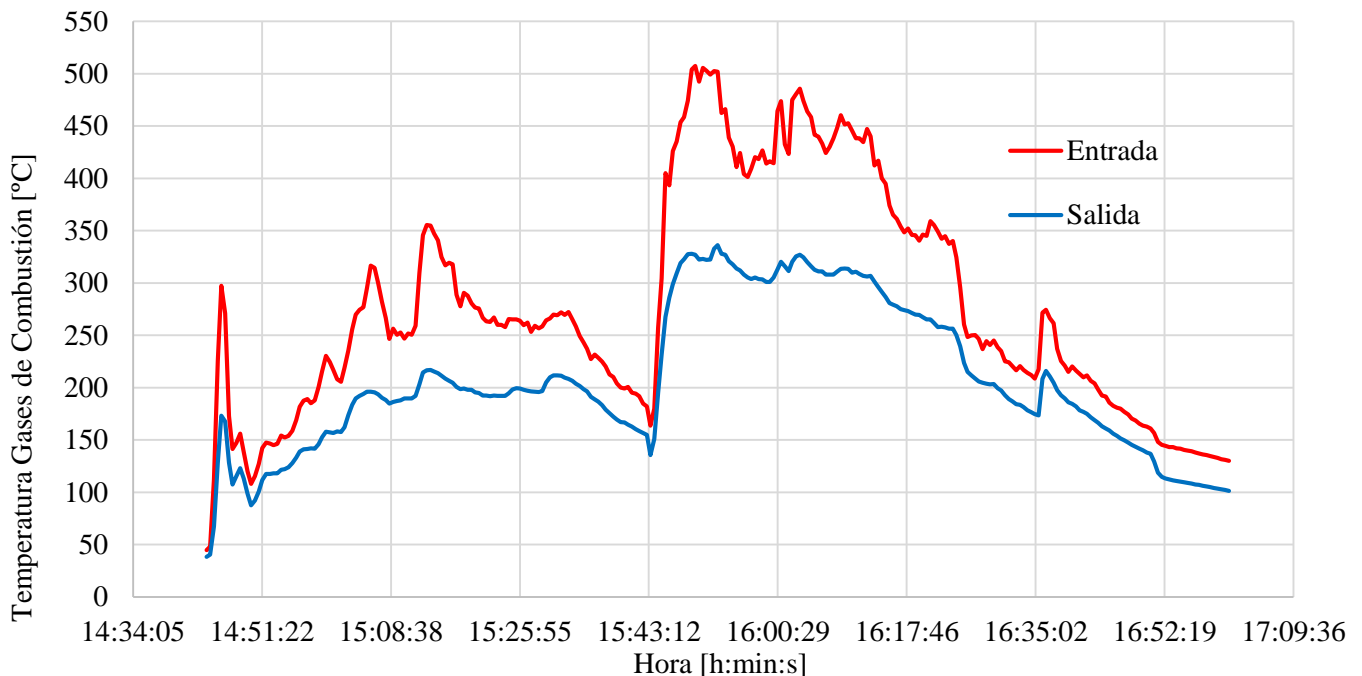
**Figura 31: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 2.**

En el instante en que se abre la válvula de descarga para simular un consumo (16:00 hrs.), la temperatura del agua a la salida del termocañón experimenta un aumento repentino, para luego disminuir incluso pasado el tiempo de consumo. Esto es producido por que el agua dentro del estanque está a mayor temperatura que la medida por la termocupla en la salida del agua del termocañón, entonces esta agua a mayor temperatura fluye rápidamente hacia la salida, mientras que el agua en los estratos más bajos del estanque, fluye por detrás (o aguas abajo) de este flujo de mayor temperatura, lo que, sumado al ingreso de agua fría desde la red, explican la rápida disminución de la temperatura del agua a la salida del estanque. Asimismo, el repentino descenso de

la temperatura del agua que ingresa al estanque, disminuye repentinamente al iniciar el flujo externo, para luego retomar el aumento cuando se termina el consumo, y se retoma la recirculación natural. Este efecto es el causante del aumento de la temperatura del agua de ingreso al estanque, en la primera etapa del ensayo (antes del consumo).

En la Figura 31 se puede apreciar que la temperatura de salida del agua (línea roja) experimenta leves perturbaciones. Estos aumentos pequeños y repentinos de temperatura son causados por los alivios de presión realizados a lo largo del ensayo, y que, al ejecutar estas evacuaciones de agua, se produce un aumento en el flujo de agua desde el estanque hacia la cañería de salida donde se ubica la termocupla, y dado que el agua dentro del estanque está más caliente que la medida por dicha termocupla, la temperatura aumenta levemente.

A continuación, en la Figura 32 se grafica la temperatura de los gases de combustión tanto a la salida (en azul) como a la entrada (en rojo) del termocañón.

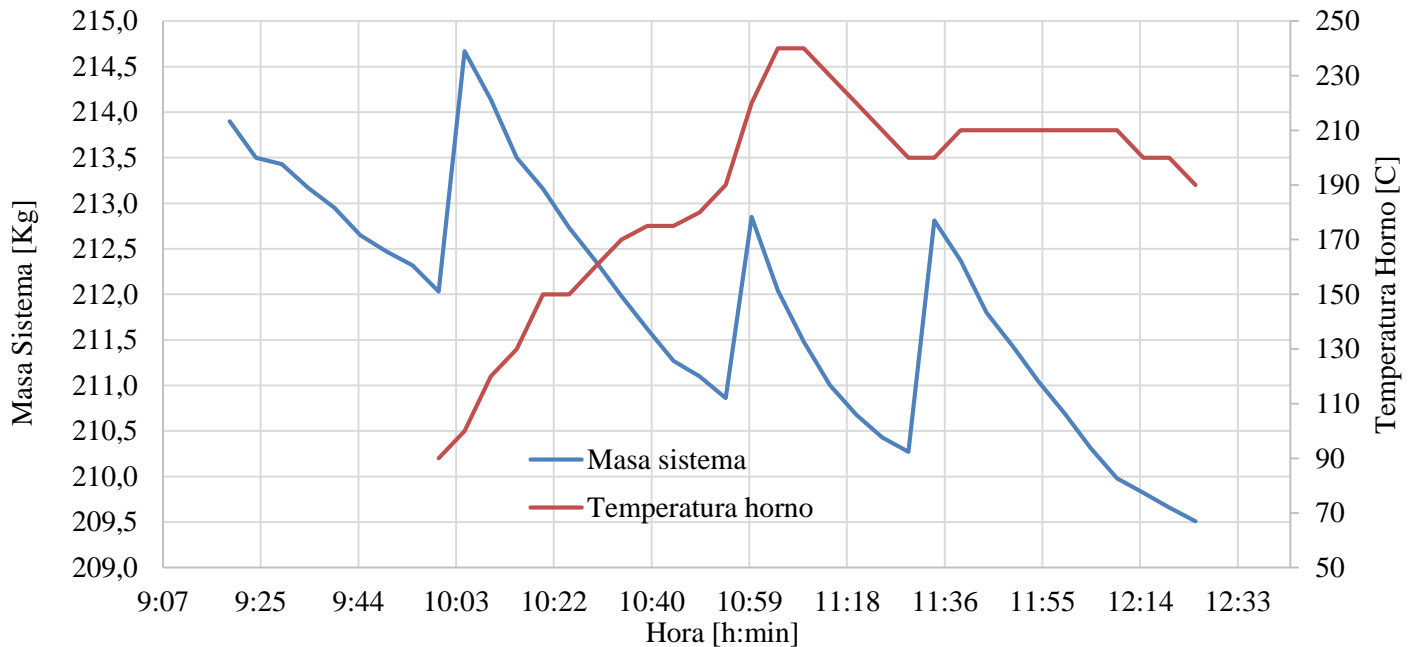


**Figura 32: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 2.**

Al igual que en el Ensayo 1, la temperatura aumenta en primera instancia durante el consumo de la primera carga, para luego comenzar el descenso producido por la disminución de la masa de combustible. Luego, a continuación de la segunda carga se repite el ciclo de aumento y descenso de la temperatura de los gases de combustión.

#### 4.2.3 Ensayo 3: Segundo ensayo sin flujo

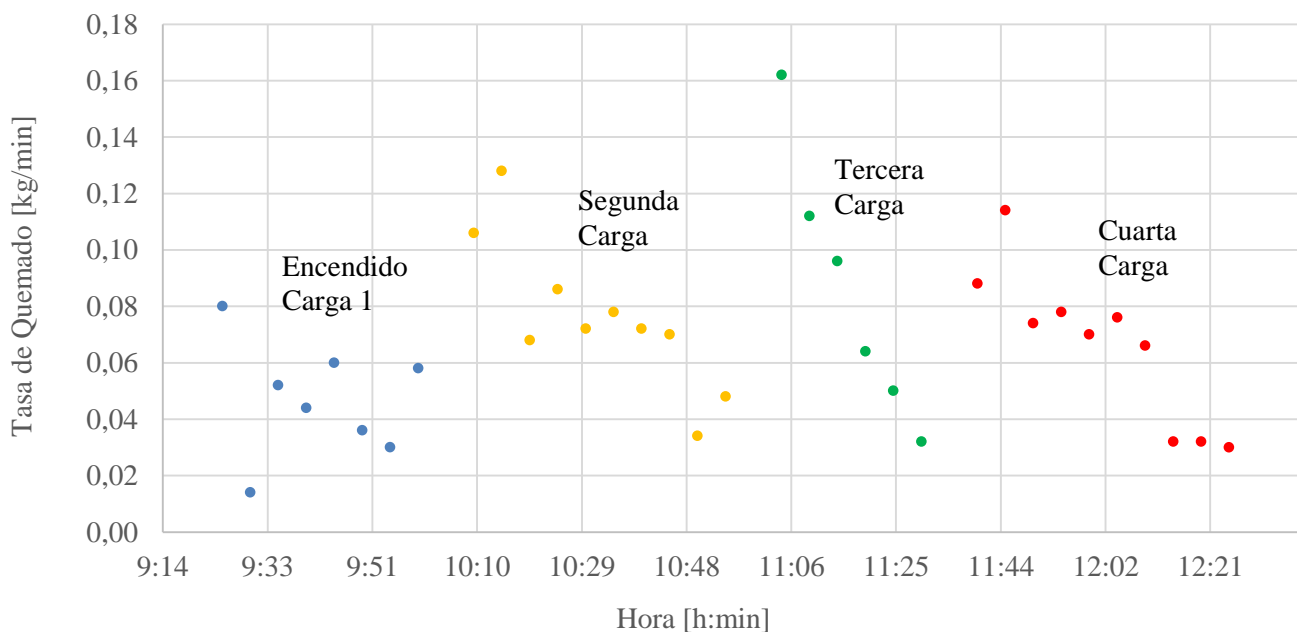
En la siguiente gráfica se aprecia el variación de la masa del sistema y la temperatura del horno de la cocina, medida por el termómetro integrado del equipo.



**Figura 33: Gráfico del Peso del Sistema y Temperatura del Horno durante Ensayo 3.**

En el gráfico anterior se aprecian 3 puntos de inflexión de la masa del sistema, que al igual que los ensayos anteriores, indican el momento en el que se realizan las cargas de leña. La primera carga fue de 3,23 kg, luego, la segunda carga es de 2,96 kg, la cual se aprecia en el primer punto de ascenso de la masa del sistema (línea azul). A continuación, 56 minutos más tarde, se realiza una tercera carga de 2,88 kg, para concluir con una cuarta carga, 35 minutos después, de 3,13 kg.

A continuación, en la Figura 34, se grafica la tasa de quemado. Se pueden apreciar 4 periodos de medición, que al igual que los ensayos anteriores, representan la tasa de quemado de cada carga. Los espacios vacíos entre cada periodo corresponden a los momentos en los que se realizan las cargas de leña.



**Figura 34: Tasa de Quemado Ensayo 3.**

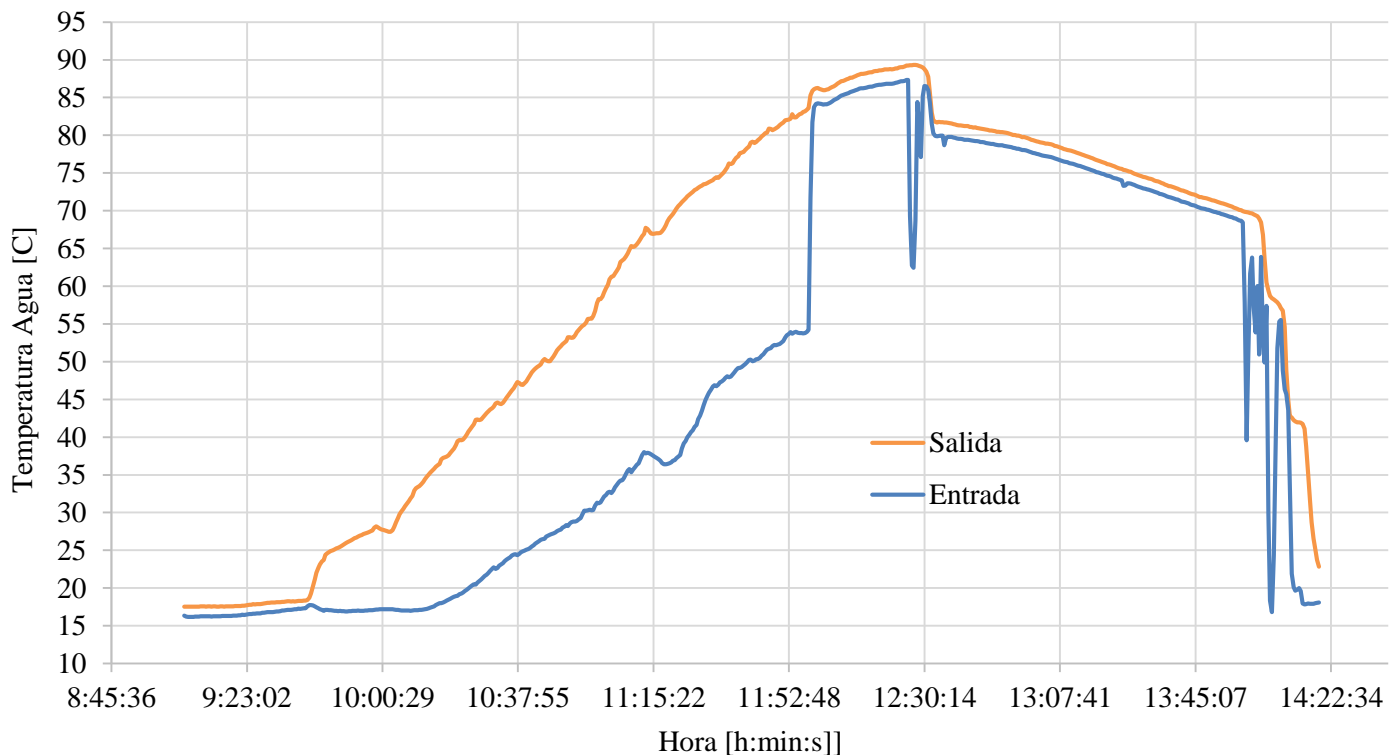
La tasa de quemado durante el consumo de la primera carga es muy variable, al igual que la segunda, sin embargo, durante la tercera carga de leña se tendió a normalizar su comportamiento, con un descenso constante. Además, en la tercera carga se experimenta un máximo de 0,162 [kg/min] al inicio. Finalmente, el comportamiento de la tasa de quemado en la cuarta carga es bastante similar que la del segundo periodo. La tasa de quemado promedio durante el Ensayo 3 fue de 0,068 [kg/min].

En la siguiente tabla se muestra la tasa de quemado para cada periodo (en kg/h) tomando como referencia los valores del peso de sistema al inicio y final de cada periodo.

**Tabla 5: Tasa de Quemado por Periodo de Ensayo 3.**

Periodo	Tasa de Quemado [kg/h]
Primera Carga	2,805
Segunda Carga	4,572
Tercera Carga	5,16
Cuarta Carga	3,96

Ahora, en la Figura 35 se grafican las temperaturas de entrada y salida de agua del estanque, en azul y naranja respectivamente.

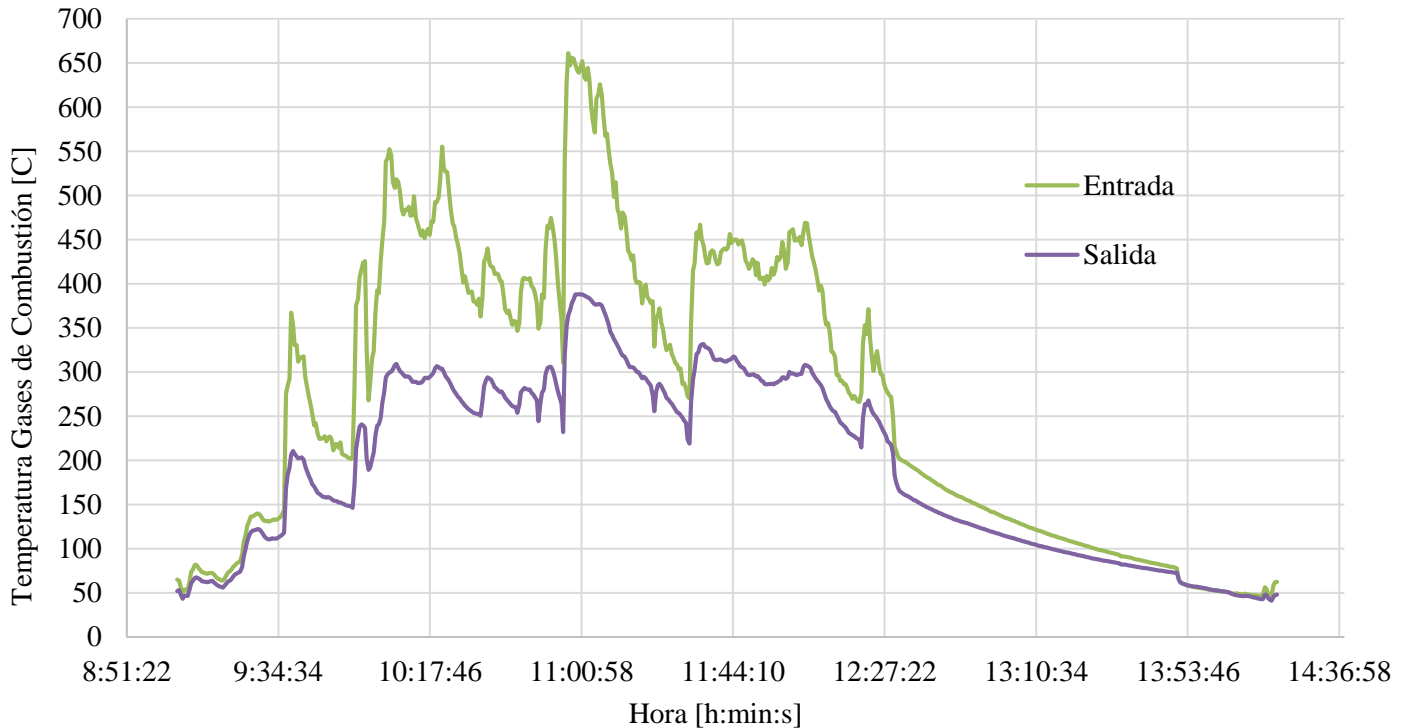


**Figura 35: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 3.**

Como se explicó anteriormente, luego de casi 3 horas de experimento y 4 cargas de leña, debido a la elevada temperatura del agua medida a la salida del estanque (sobre los 81 °C), se comenzó la recirculación forzada del agua mediante el encendido de la bomba a las 11:58 hrs. En ese momento, como se aprecia en el gráfico anterior, aumenta drásticamente la temperatura del agua a la entrada del termocañón (en azul). Transcurridos 27 minutos, como la temperatura del agua en la salida no disminuía y bordeaba ya los 90 °C, se procedió a abrir las válvulas de salida del sistema para evacuar el agua caliente y permitir el ingreso del agua fría de la red. Este último procedimiento explica el

descenso que experimentan tanto el agua de entrada como salida del estanque.

Por otro lado, el comportamiento de la temperatura de los gases de combustión es similar a lo mostrado en los Ensayos 1 y 2. En la Figura 36 se grafican estas medidas.



**Figura 36: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 3.**

Nuevamente, las temperaturas de los gases de combustión a la entrada y salida del termocañón experimentan el mismo ciclo de aumento y descenso entre cada carga de combustible, para luego disminuir hasta temperaturas similares a las que se tenían al inicio del ensayo.

#### 4.2.4 Ensayo 4: Análisis Energético Gases de Combustión

En este ensayo se prestará especial atención a los datos registrados por el equipo Testo 320, el cual analiza la composición de los gases, temperatura, y otros datos necesarios para determinar cuanta energía transfieren los gases de combustión durante su paso a través del termocañón.

En la Tabla 6 se muestran los principales datos del Ensayo 4.

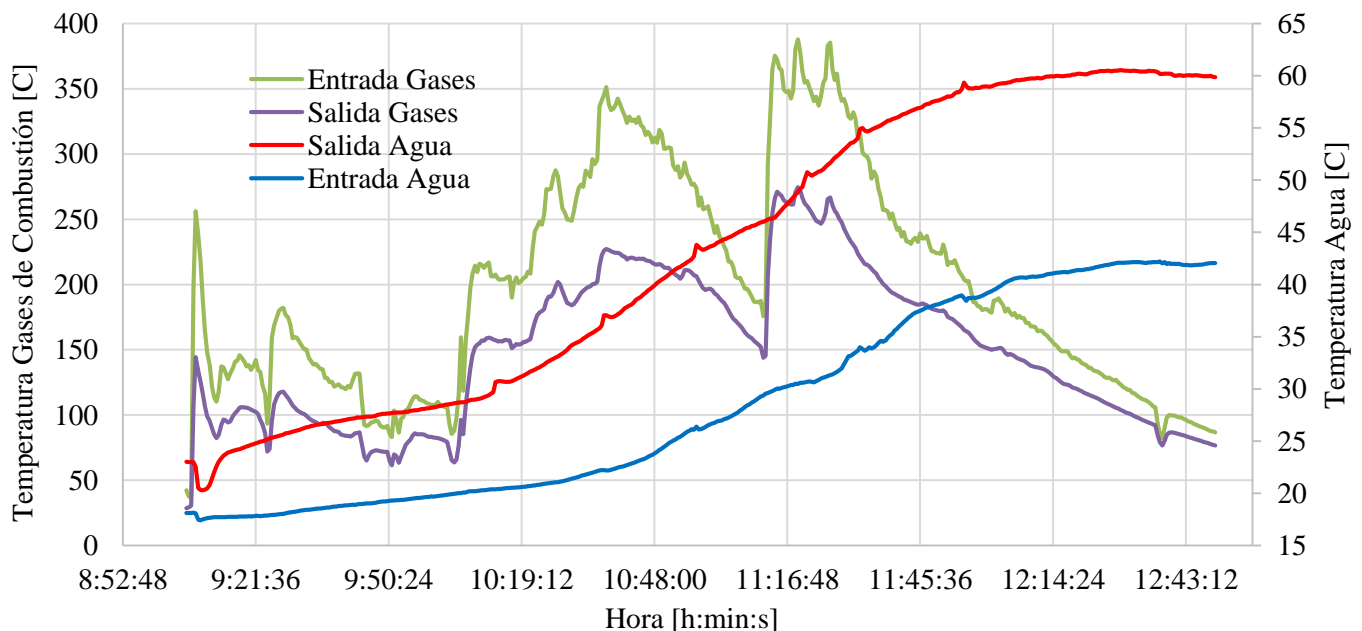


**Tabla 6: Datos Principales Ensayo 4.**

Masa Inicial	212,97 [kg]
Carga Inicial Leña	2,13 [kg]
Carga N°2 Leña	2,00 [kg]
Carga N°3 Leña	2,00 [kg]
Carga Total Leña	6,13 [kg]
Duración Ensayo 4	3,42 horas
Tasa Quemado Promedio	3,02 [kg/h]
<b>Temperaturas iniciales del agua</b>	
Entrada Estanque	17,5 [°C]
Salida Estanque	20,3 [°C]
Promedio Estanque	18,9 [°C]
<b>Temperaturas finales del agua</b>	
Entrada Estanque	42,1 [°C]
Salida Estanque	60,5 [°C]
Promedio Estanque	51,3 [°C]
<b>Punto de Máxima Temperatura de los gases</b>	
Entrada Estanque	387,9 [°C]
Salida Estanque	274,7 [°C]
$dT_g$	113,2 [°C]

Al igual que los ensayos anteriores, la temperatura inicial del estanco se obtiene a partir de la media entre las temperaturas del agua a la entrada y salida del estanco, mismo procedimiento aplica para obtener las temperaturas finales del agua.

Este ensayo tiene como objetivo analizar el comportamiento de la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el estanco, para lo cual, en primer lugar, se analizan las temperaturas de entrada y salida de los gases de combustión en el estanco. En la Figura 37 se muestran estas mediciones, junto con las temperaturas de entrada y salida del agua.

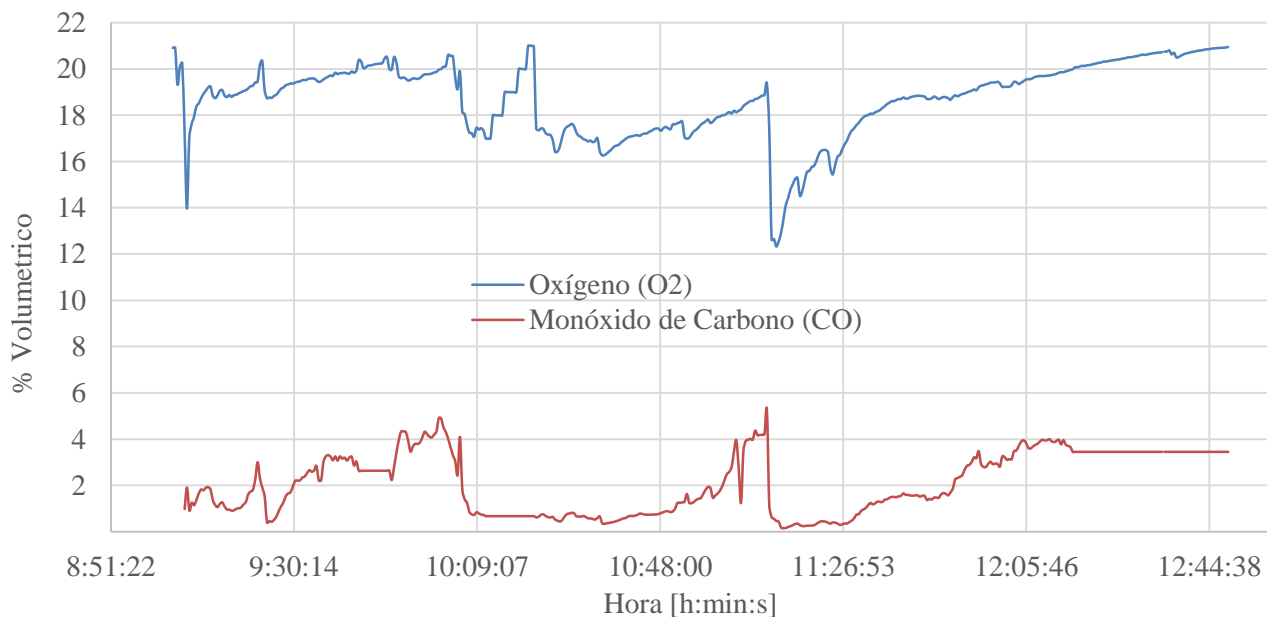


**Figura 37: Gráfico de Temperatura del Agua y Gases de Combustión, a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 4.**

El comportamiento de las curvas de las temperaturas de los gases sirve para apreciar los periodos entre cargas de combustible, ya que al igual que los ensayos anteriores, los puntos de inflexión corresponden a cargas de leña, en donde inmediatamente después de realizarse, se retoma el ascenso de las temperaturas.

En la Figura 38, se muestran los porcentajes volumétricos de oxígeno y monóxido de carbono durante el Ensayo 4, medidos por el Analizador de Gases de Combustión Testo 320. La cantidad de estos componentes serán utilizados como base para obtener la proporción del resto de los componentes presentes en los gases de combustión, y dichas magnitudes serán útiles para calcular la energía que proporcionan los gases de combustión hacia el estanque. Dado que la cantidad de monóxido de carbono es medida en ppm por el equipo Testo 320, el porcentaje volumétrico se obtiene de la siguiente forma.

$$\% \text{ Volumétrico} = \frac{\text{ppm}}{10.000} \quad (12)$$

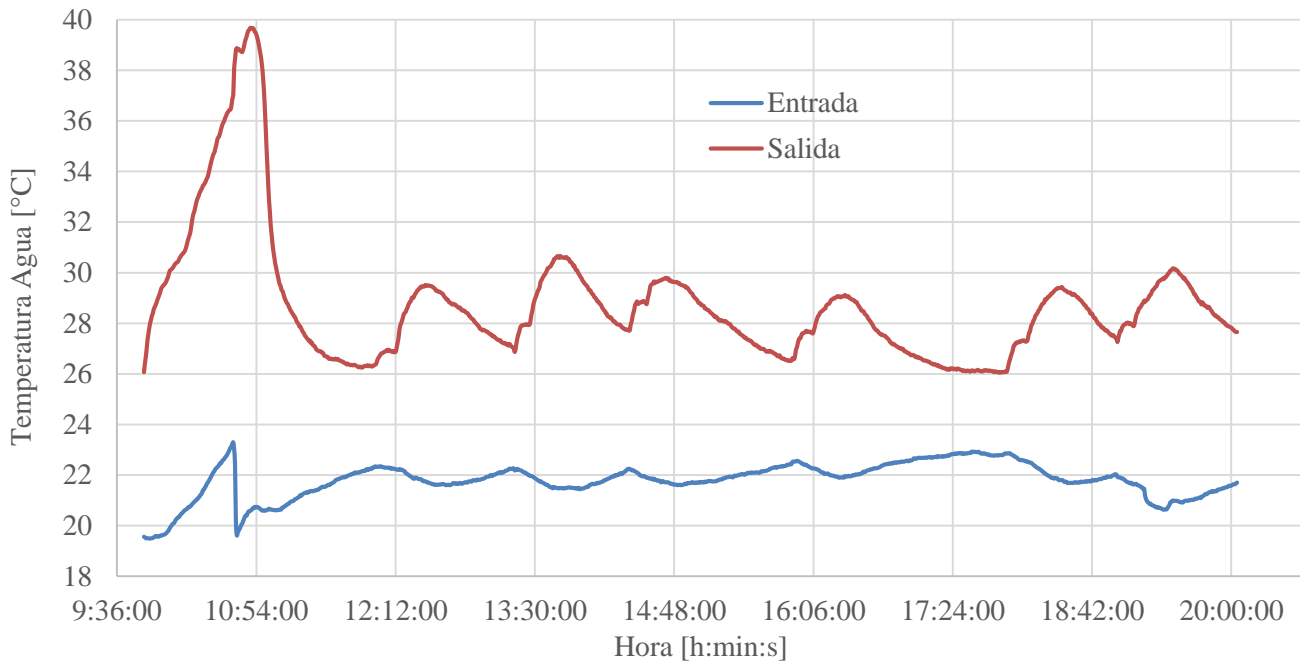


**Figura 38: Gráfico % Volumétrico  $O_2$  y CO durante Ensayo 4.**

Con respecto a la curva del porcentaje volumétrico del monóxido de carbono, esta presenta datos en blanco por momentos, debido a errores del equipo Testo 320.

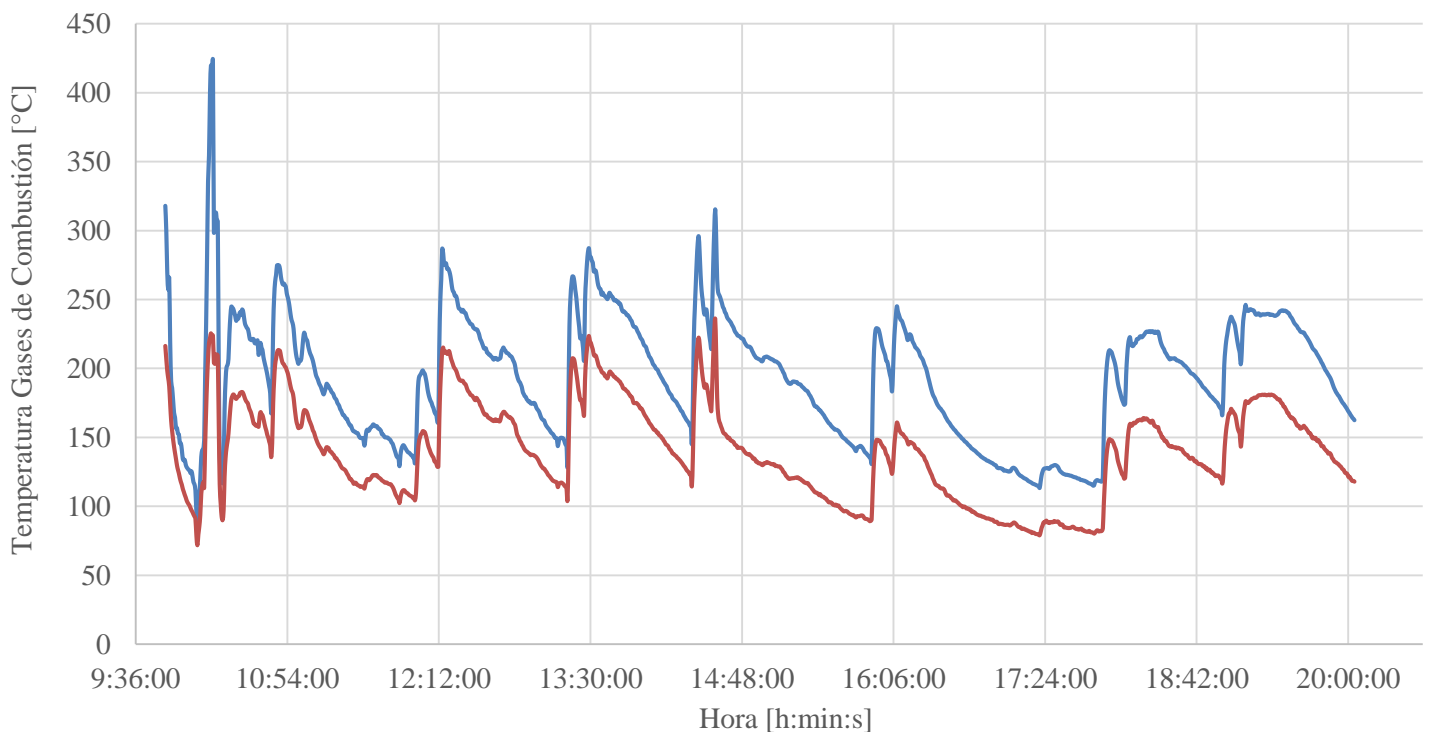
#### 4.2.5 Ensayo 5: Análisis Precipitador Electroestático

Este ensayo se realizó durante más de 10 horas, y constó de 8 sub-ensayos realizados en distintas condiciones de operación de la cocina. Como este ensayo se divide en varias partes, la tasa de quemado no se muestra en un gráfico como el análisis para los ensayos anteriores, se presentara como información para cada sub-ensayo, más adelante en la sección 4.3.5 en la Tabla 14. En la Figura 39 se muestran las temperaturas de agua en la entrada y salida del estanque.



**Figura 39: Gráfico de Temperatura del Agua a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 5.**

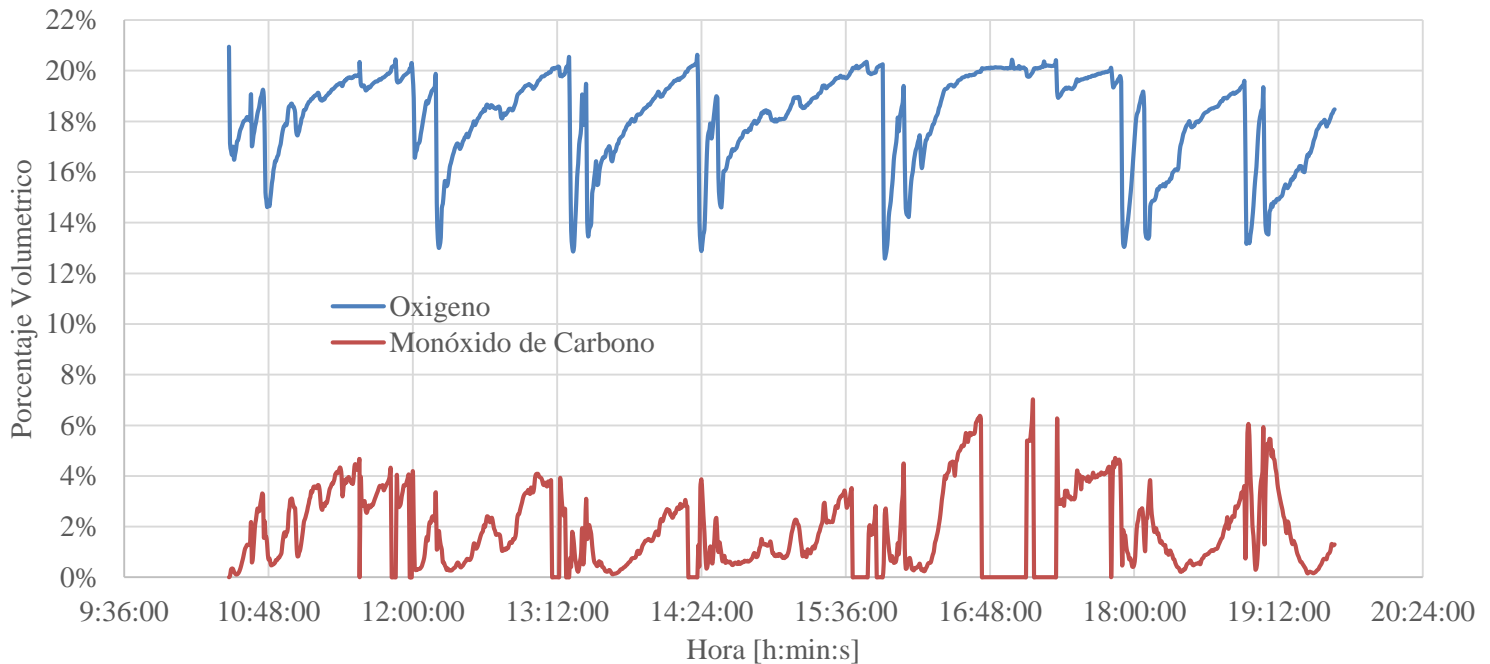
En la gráfica anterior se puede apreciar a simple vista la división de cada sub-ensayo. En el comienzo del Ensayo 5 no hubo flujo de agua, y la energía se acumuló dentro del estanque, he ahí la alta temperatura del agua, tanto a la salida como a la entrada. El resto de los ensayos se hizo con un flujo de agua entre los 4 a 4,5 [L/min]. La temperatura del agua a la salida del estanque presenta ciclos similares en cada sub-ensayo, de igual forma que la temperatura de los gases de combustión, la cual se gráfica en la Figura 40.



**Figura 40: Gráfico de Temperatura de los Gases de Combustión a la Entrada y Salida del Estanque durante Ensayo 5.**

Ahora, para el resto de los análisis, no se considerará el primer sub-ensayo, puesto que no se realizaron mediciones de material particulado dentro de ese lapso. Por lo tanto, de ahora en adelante se considerará como primer ensayo, el posterior a las 10:45, que es donde se realiza la carga inicial del resto del experimento. En la siguiente sección 4.3.5, correspondiente al análisis de los resultados del Ensayo 5, se muestran los datos y principales resultados en la Tabla 14.

Finalmente, se muestra la gráfica para las medidas del porcentaje volumétrico de oxígeno y monóxido de carbono.



**Figura 41: Gráfico % Volumétrico  $O_2$  y CO durante Ensayo 5.**

### 4.3 Análisis de los Resultados

En esta sección se expondrán los resultados del post-tratamiento de las mediciones de los ensayos realizados. Se calculará la energía transferida al agua en los ensayos, la energía entregada por el combustible, el rendimiento energético del equipo en cada ensayo, y energía transferida por los gases (Ensayo 4).

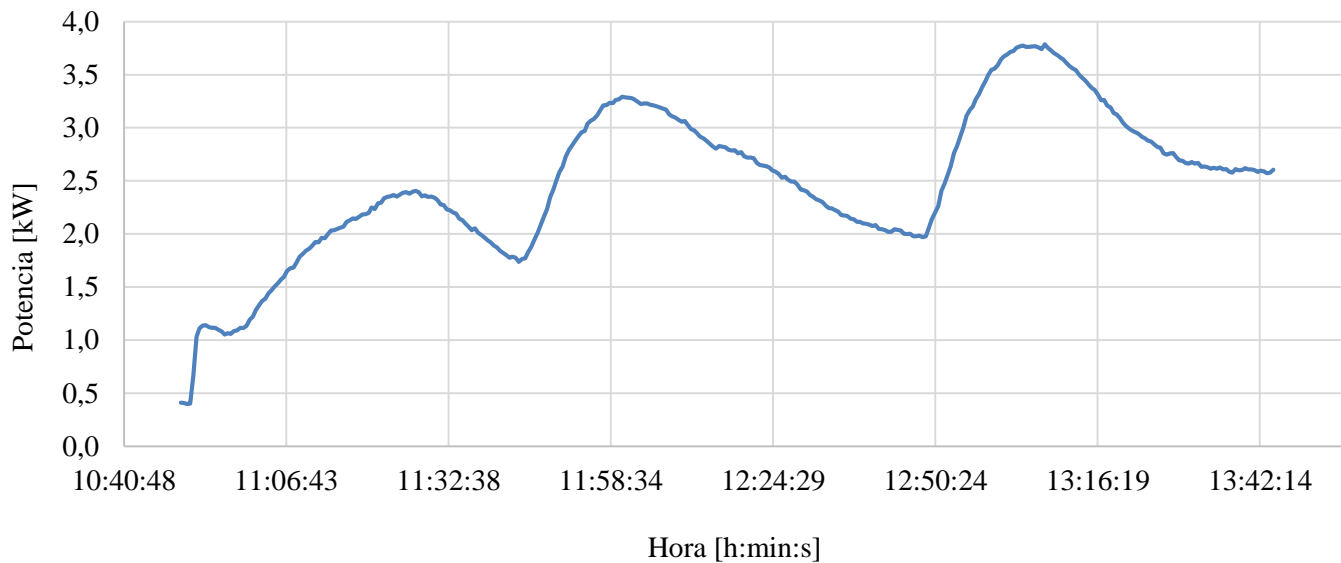
#### 4.3.1 Ensayo 1: Equipo con flujo de agua constante.

A continuación, se procederá a calcular la energía que se transfiere al agua durante el ensayo. Para tal efecto, se considerará un caudal de agua promedio ( $\dot{m}_w$ ), que se obtendrá a partir de los datos de la gráfica presentada en la Figura 25, y por otro lado, desde la gráfica de la Figura 27, se obtendrá la temperatura de agua promedio a la entrada del termocañón ( $T_{we}$ ) y las temperaturas de salida de agua ( $T_{ws}$ ). Con estos datos, se procede a calcular potencia térmica absorbida por el agua circulante.

**Tabla 7: Datos para Cálculos Térmicos Ensayo 1.**

<b><math>T_{we}</math> promedio</b>	15,3 [°C]
<b>Densidad agua</b>	0,9992 [kg/L]
<b><math>\dot{m}_w</math> promedio</b>	5,56 [L/min]
	0,0926 [kg/s]
<b>Calor Específico Agua</b>	4,183 [kJ/kgK]

La densidad y el calor específico del agua fueron obtenidos a partir de la temperatura promedio del agua a la entrada del estanque (15,3 °C), y la presión inicial del estanque (3 bar). Luego se procede a calcular la potencia transferida a partir de variación de la temperatura en la salida del estanque durante el tiempo del Ensayo 1.

**Figura 42: Gráfico de Potencia Transferida al Agua durante Ensayo 1.**

La potencia transferida al agua es proporcional a la temperatura que alcanza el agua a la salida del estanque, por lo cual en el momento en el que se alcanza la máxima temperatura, a las 13:07:52, se tiene asimismo la máxima potencia transmitida. En este punto, la temperatura del agua a la salida del estanque alcanza los 25,1 °C, y una potencia de 3,78 [kW].

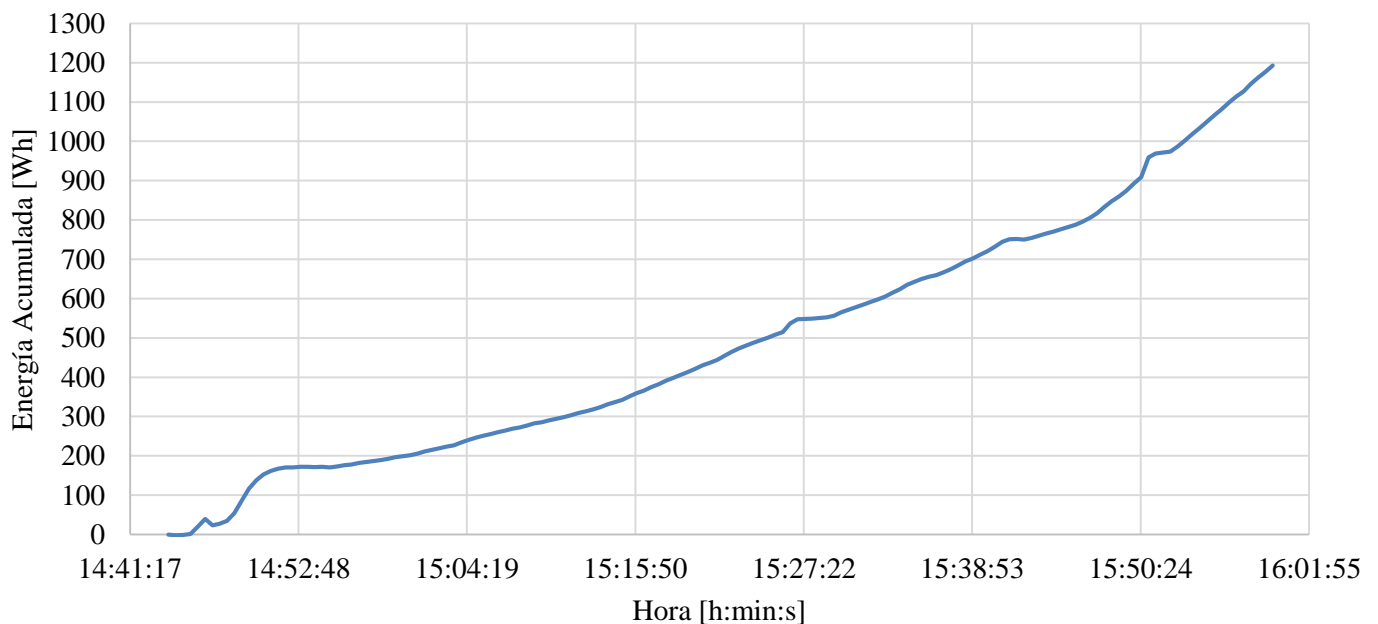
#### 4.3.2 Ensayo 2: Primer ensayo sin flujo

Para el cálculo de la energía acumulada en el estanque, en primer lugar, se define la temperatura inicial del estanque como el promedio entre las temperaturas iniciales del agua a la entrada y salida del estanque. A continuación, se muestran los datos iniciales para el cálculo de la energía acumulada en el estanque.

**Tabla 8: Datos para Cálculos Energéticos Ensayo 2**

<b>Masa Agua</b>	57,6 [kg]
<b>Calor Específico Agua</b>	4,182 [kJ/kgK]
<b>Temperaturas iniciales del agua</b>	
<b>Entrada Estanque</b>	19,8 [°C]
<b>Salida Estanque</b>	21,3 [°C]
<b>Promedio Estanque</b>	20,6 [°C]
<b>Temperaturas finales del agua</b>	
<b>Entrada Estanque</b>	27,1 [°C]
<b>Salida Estanque</b>	49,8 [°C]
<b>Promedio Estanque</b>	38,4 [°C]

El cálculo de energía se realizará desde el inicio hasta el punto en el que se inicia la circulación del agua (16:00 hrs), utilizando la temperatura media entre la entrada y la salida del estanque como referencia para cada punto de tiempo. El calor específico del agua fue obtenido a partir de la temperatura promedio inicial del estanque y la presión inicial del estanque, equivalente a la presión de la red de agua (3 bar).

**Figura 43: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 2.**

Desde el inicio de las mediciones (14:44 hrs) hasta el final de estas (16:00) se obtuvieron unos 1,19 [kWh] de energía acumulados en el estanque. Esto quiere decir que dentro de este periodo (1,26 h), el flujo promedio de energía inyectado al agua fue de 0,94 [kW].

Luego, para evaluar el consumo de combustible durante este periodo, se suman las cargas totales de leña hechas hasta este punto, y la última carga parcial antes de las 16:00 hrs. La primera carga fue de 3,05 kg, con respecto a la segunda carga, al momento de realizarla se midieron 214 kg, y para las 16:00 hrs. la masa del sistema era de 212,42 kg, por lo tanto, de un total de 2,94 kg de esta carga, se consideran 1,58 kg, así, para el cálculo del aporte energético del combustible se contemplan un total de 4,63 kg.

El poder calorífico de leña de eucalipto a 25% de humedad es de 1,906 [kWh/kg] [10]. En el Anexo 7.4 se especifican las características del eucalipto; composición y PCI (J. E. Gil, J. A. Baca, M. E. Álvarez. 2019-2020)

Por lo tanto, para el Ensayo 2:

$$Q_{leña} = 8,82 [kWh]$$

Ahora, es posible comparar la energía entregada por la leña, con la energía acumulada por el estanque durante el mismo periodo de tiempo, con el fin de obtener el rendimiento energético del equipo termocañón.

$$\eta_2 = \frac{Q_{w2} \cdot 100}{Q_{leña}}$$

Donde  $\eta_2$  es el rendimiento energético del equipo durante el Ensayo 2, y  $Q_{w2}$  es la energía del agua acumulada durante el Ensayo 2, previamente calculada (1,19 [kWh]). Por lo tanto;

$$\eta_2 = 13,49 \%$$

Esto quiere decir que el 13,49 % de la energía desprendida de la combustión de la leña, es aprovechada por el equipo termocañón para calentar el agua dentro del estanque.

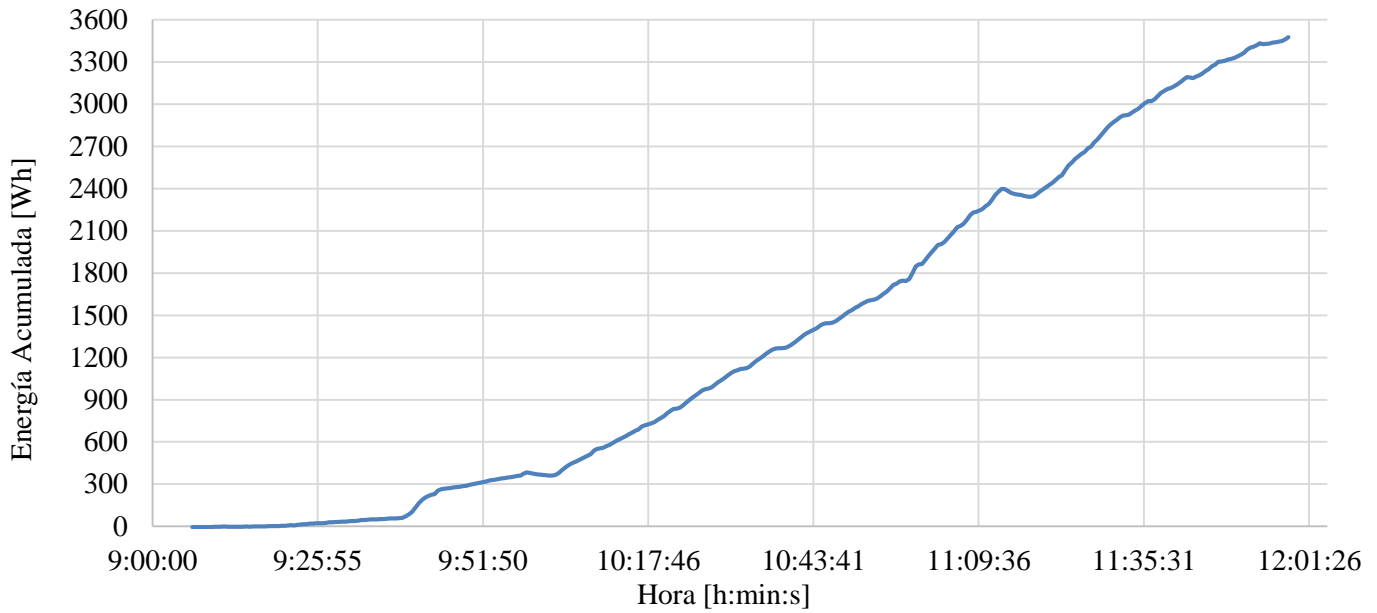
### 4.3.3 Ensayo 3: Segundo ensayo sin flujo

Ahora, para calcular la energía entregada al agua dentro del estanque se considera lo siguiente.

**Tabla 9: Datos para Cálculos Energéticos Ensayo 3.**

<b>Masa Agua</b>	57,6[kg]
<b>Calor Específico agua</b>	4,182 [kJ/kg K]
<b>Temperaturas iniciales del agua</b>	
<b>Entrada Estanque</b>	16,3 [°C]
<b>Salida Estanque</b>	17,5 [°C]
<b>Promedio Estanque</b>	16,9 [°C]
<b>Temperaturas finales del agua</b>	
<b>Entrada Estanque</b>	54,2 [°C]
<b>Salida Estanque</b>	83,6 [°C]
<b>Promedio Estanque</b>	68,9 [°C]

Al igual que el cálculo de energía y potencia acumulada en el estanque del Ensayo 2, para el Ensayo 3 se considerará solo el periodo de acumulación, es decir, el periodo desde el inicio del ensayo hasta la activación del flujo dado por el encendido de la bomba de recirculación (periodo de tiempo comprendido entre las 09:05 y las 11:58 hrs).



**Figura 44: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 3.**

Dentro del periodo mencionado, se logra alcanzar una temperatura máxima promedio de  $68,9\text{ }^{\circ}\text{C}$  en el estanque, por lo tanto, la energía acumulada llega hasta los  $3,48\text{ [kWh]}$  ( $Q_{w3}$ ). El tiempo transcurrido durante este lapso es de 2 horas 53 minutos, es decir,  $2,88\text{ hrs}$ , luego, es posible calcular el flujo de calor promedio recibido por el agua del estanque, dando un total de  $1,21\text{ [kW]}$ .

En el periodo considerado para el cálculo energético, se quemaron en su totalidad 3 cargas de leña, y la cuarta en forma parcial. La carga inicial fue de  $3,23\text{ kg}$ , la segunda de  $2,96\text{ kg}$ , la tercera de  $2,88\text{ kg}$ , obteniendo hasta tal momento un total de  $9,07\text{ kg}$ . Para el momento en el que se realizó la cuarta carga (de  $3,13\text{ kg}$ ), la balanza indicaba una masa de  $212,81\text{ kg}$ , y para obtener la masa de combustible que se quema durante el periodo de evaluación del desempeño energético, se debiera restar los  $212,81\text{ kg}$  menos la masa medida en tal punto. Para aquello, se interpola linealmente la masa entre las  $11:55$  y las  $12:00$ , para obtener la masa a las  $11:58$ , donde la masa estimada es de  $210,83\text{ kg}$

Así, restando los  $210,83\text{ kg}$  y la masa medida al momento de la última carga ( $212,81\text{ kg}$ ), se obtienen  $1,98\text{ kg}$  de leña, lo que equivale a la masa parcial que se quema de la cuarta carga. Luego, el total de la masa de combustible a considerar es de  $11,05\text{ kg}$ .

Ahora, a partir del poder calorífico de la leña de eucalipto considerada en el Ensayo 2 ( $1,906\text{ [kWh/kg]}$ ), se obtiene la energía entregada por la leña.

$$Q_{leña} = 21,06\text{ [kWh]}$$

Luego, se calcula el rendimiento del equipo para el Ensayo 3;

$$\eta_3 = \frac{Q_{w3} \cdot 100}{Q_{leña}}$$

$$\eta_3 = 16,52\%$$



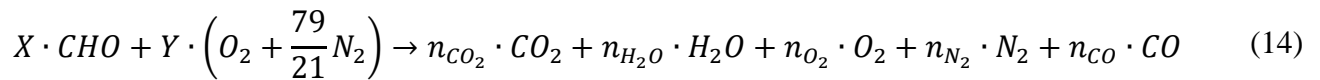
#### 4.3.4 Ensayo 4: Análisis Energético Gases de Combustión

En primer lugar, se determina la masa de los gases de combustión que ingresan al intercambiador de calor, la cual dependerá de la tasa de quemado del combustible, y del exceso de aire involucrado en el proceso de gasificación.

$$M_g = M_a + M_{leña} \quad (13)$$

$M_{leña}$  se determinó experimentalmente a partir de la tasa de quemado, y la masa de aire  $M_a$  se calcula a partir del exceso de aire. El exceso de aire corresponde a la relación entre la masa de aire real y la masa de aire teórica (Lagemann, 2016).

A continuación, se describe la fórmula química de la combustión de madera.



De la ecuación anterior,  $n_{O_2}$  y  $n_{CO}$  se obtienen de los datos medidos por analizador de gases de combustión Testo 320, presentados anteriormente en la Figura 38.

Mientras que  $n_{CO_2}$ ,  $n_{H_2O}$  y  $n_{N_2}$  se obtienen de las siguientes ecuaciones.

$$n_{N_2} = 100 - n_{CO_2} - n_{O_2} - n_{CO} \quad (15)$$

Esta ecuación corresponde al balance porcentual de los productos de la combustión de la madera, en base seca.

Por otro lado, se presenta a continuación el balance estequiométrico de los compuestos reactantes y productos.

$$C: \quad X = n_{CO_2} + n_{CO} \quad (16)$$

$$H: \quad X = 2 \cdot n_{H_2O} \quad (17)$$

$$O: \quad X + 2 \cdot Y = 2 \cdot n_{CO_2} + n_{H_2O} + 2 \cdot n_{O_2} + n_{CO} \quad (18)$$

$$N: \quad 2 \cdot \frac{79}{21} \cdot Y = 2 \cdot n_{N_2} \quad (19)$$

Luego, se debe obtener la fracción másica de cada compuesto;

$$y_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{m_{CO_2} + m_{H_2O} + m_{O_2} + m_{N_2} + m_{CO}} \quad (20)$$

$$y_{H_2O} = \frac{n_{H_2O}}{m_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO}} \quad (21)$$

$$y_{O_2} = \frac{n_{O_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO}} \quad (22)$$

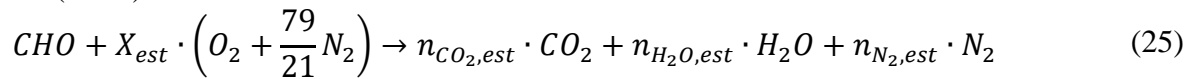
$$y_{N_2} = \frac{n_{N_2}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO}} \quad (23)$$

$$y_{CO} = \frac{n_{CO}}{n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2} + n_{CO}} \quad (24)$$

Para obtener la energía aportada por cada uno de los componentes, estos se trabajan como gases ideales para obtener su entalpía, la cual dependerá de las temperaturas de los gases de combustión a la entrada y salida del termocañón. El diferencial de entalpías obtenido para cada compuesto se debe multiplicar por su respectiva fracción másica, para obtener el aporte energético de cada compuesto.

Como se mencionó anteriormente, para obtener el flujo de gases ( $M_g$ ), se deben sumar el flujo de combustible ( $M_{leña}$ ) y el flujo de aire que ingresa al intercambiador de calor ( $M_a$ ). Este flujo de aire dependerá del exceso de aire presente en la combustión, el proceso para obtener este valor se describe a continuación.

En primer lugar, se presenta la fórmula estequiométrica de la combustión de la madera para 1 [kmol] de combustible (CHO).



Luego, el balance para cada elemento:

$$C: \quad 1 = n_{CO_2,est} \quad (26)$$

$$H: \quad 1 = 2 \cdot n_{H_2O,est} \quad (27)$$

$$O: \quad 1 + X_{est} = 2 \cdot n_{CO_2,est} + n_{H_2O,est} \quad (28)$$

$$N: \quad X_{est} \cdot \frac{79}{21} \cdot 2 = 2 \cdot n_{N_2,est} \quad (29)$$

Ahora, se define la Relación Combustible Aire (RCA) como sigue:

$$RCA = \frac{M_{comb}}{M_a} \quad (30)$$

En donde:

$$M_{comb} = X \cdot MM_{comb} \quad (31)$$

$$M_a = Y \cdot \left( 1 + \frac{79}{21} \right) \cdot MM_a \quad (32)$$

$MM_{comb}$  es la masa molar del combustible (CHO), igual a 29,02 [kg/kmol], y  $MM_a$  la masa molar del aire, igual a 28,97 [kg/kmol].

Por otro lado, el RCA estequiométrico se define como;

$$RCA_{est} = \frac{1 \cdot MM_{comb}}{X_{est} \cdot \left(1 + \frac{79}{21}\right) \cdot MM_a} \quad (33)$$

Y el coeficiente de exceso de aire;

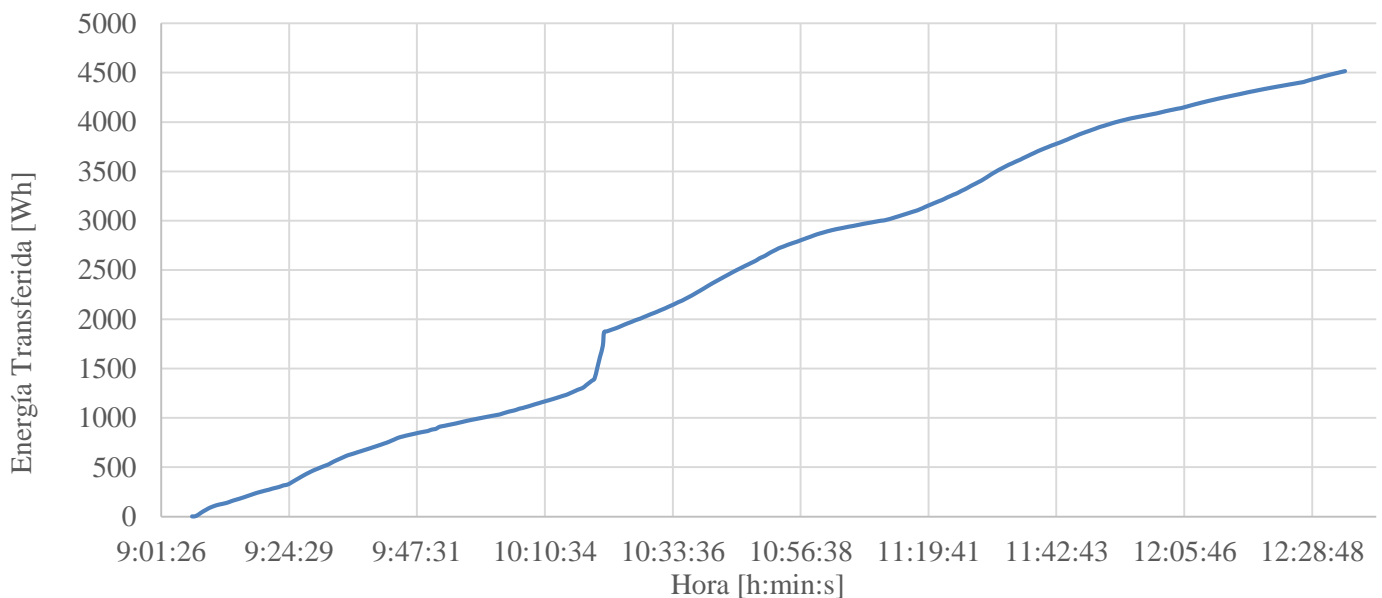
$$e = \frac{RCA_{est}}{RCA} - 1 \quad (34)$$

Una vez obtenido el RCA, y al igual que la relación entre las masas de combustible y del aire, se calcula el flujo de aire en función del flujo de combustible.

$$RCA = \frac{\dot{M}_{comb}}{\dot{M}_a} \quad (35)$$

El procedimiento adoptado para realizar los cálculos energéticos de los gases de combustión; se muestra en el Anexo 7.5.1.

A continuación, se presenta gráficamente el cálculo obtenido para la transferencia de energía desde los gases de combustión hacia el estanque, procedente de resolución de la ecuación (6). Los datos necesarios para resolver dicha ecuación vienen de las ecuaciones (20),(21),(22),(23) y (24), correspondientes a las fracciones másicas de cada compuesto, las entalpías de cada compuesto (Obtenidas del programa EES) dependientes de las temperaturas de los gases de combustión (Figura 37), y la masa de gases ( $M_g$ ) de la ecuación (13).



**Figura 45: Energía Transferida por los Gases de Combustión.**

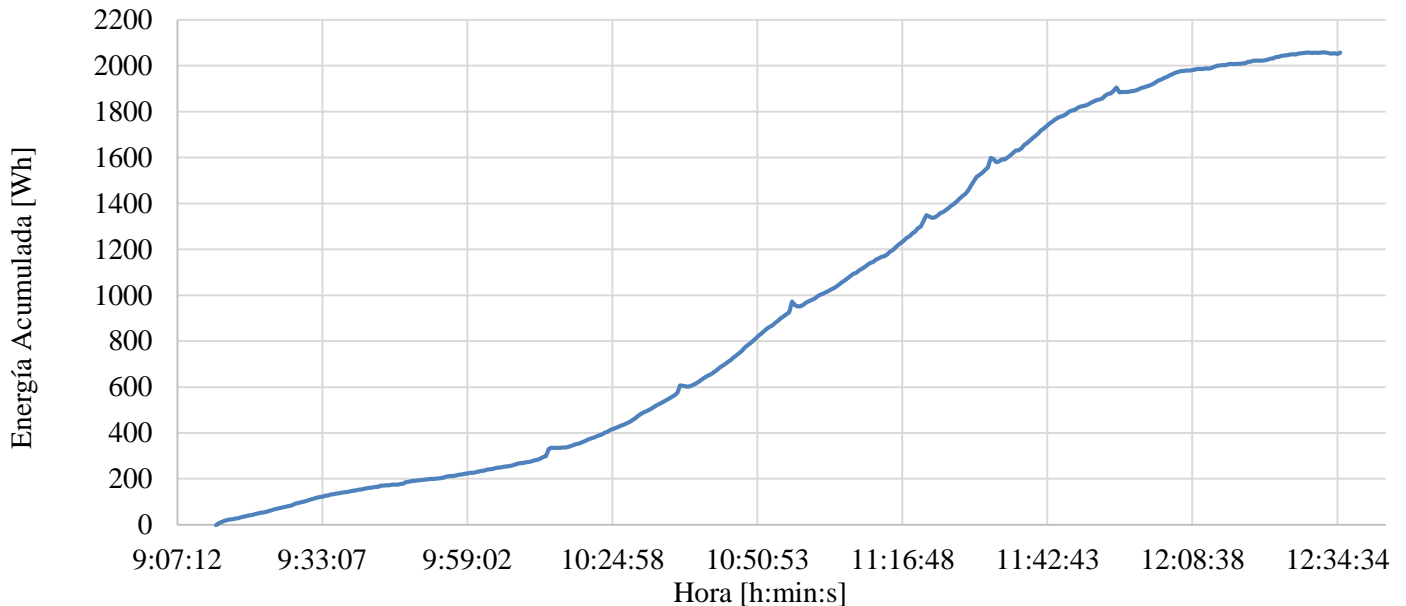
En la siguiente tabla, se muestran algunos datos generales obtenidos a partir de las ecuaciones anteriores.

**Tabla 10: Resultados Análisis Energético de los Gases de Combustión.**

$Q_g$ Total	4,52 [kWh]
Exceso de Aire promedio	6,43
RCA promedio	0,042
$\dot{M}_a$ promedio	0,4484 [kg/s]
$\dot{M}_g$ promedio	0,4734 [kg/s]

Ahora, para el cálculo de la energía transferida al agua, se tomará como referencia la temperatura inicial a las 9:10 hrs.; 18,9 °C (Tabla 6), y la temperatura media del agua entre la salida y entrada del estanque en cada punto de tiempo, obtenidos a partir de los datos de la Figura 37.

Recordar que la masa de agua es 57,6 kg y el calor específico es de 4,182 [kJ/kgK]. La energía acumulada a lo largo del Ensayo 4 se muestra en la Figura 46.



**Figura 46: Energía Acumulada por el Agua del Estanque durante Ensayo 4.**

La energía total acumulada por el agua del estanque es de 2,056 [kWh].

Por otro lado, la masa de leña utilizada en el experimento es de 6,13 kg, y considerando un poder calorífico de 1,906 [kWh/kg], se obtiene un total de 11,68 [kWh].

Finalmente, el rendimiento del equipo durante el Ensayo 4 es de un 17,6 %.

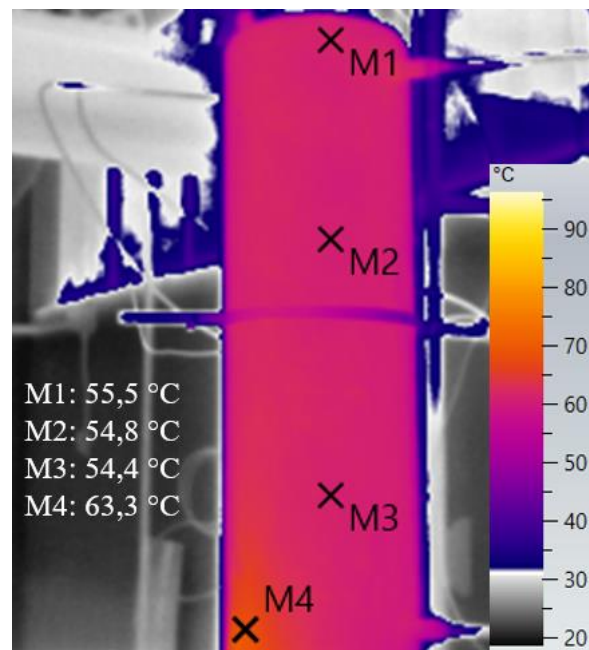
#### 4.3.4.1 Pérdidas Energéticas

La energía que se pierde al ambiente sucede a través del manto o superficie exterior del estanque. Es posible estimar este flujo de calor hacia el exterior mediante la temperatura de superficie del estanque, y las temperaturas exteriores. Mediante tomas de termografías se puede obtener las temperaturas superficiales del estanque, las que fueron registradas aleatoriamente a lo largo del Ensayo 4. En la Tabla 11 se muestran las temperaturas promedio del estanque medidas en las termografías, las cuales fueron analizadas mediante el software Testo IRSofit.

**Tabla 11: Temperatura de Termografías y Agua del Estanque.**

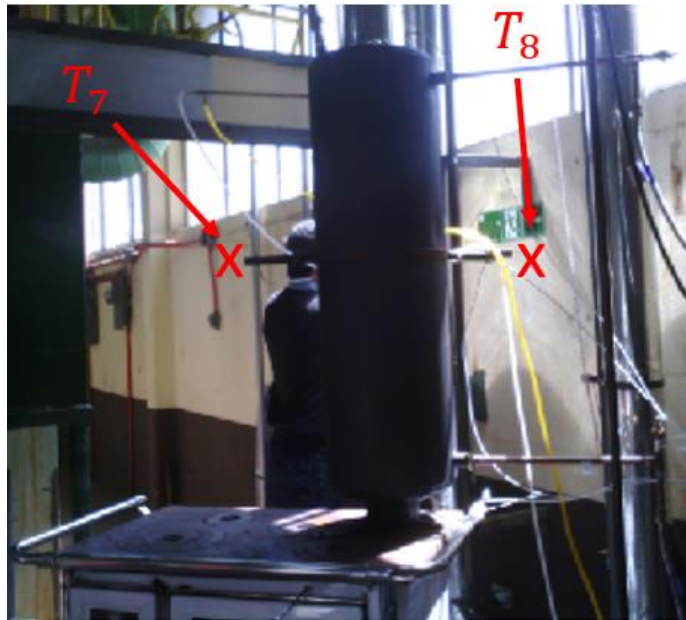
Hora	Temperatura Promedio Termografía [°C]	Temperatura Agua Entrada [°C]	Temperatura Agua Salida [°C]	Temperatura Agua Media [°C]
9:29	23,4	18,2	25,8	22,0
10:15	27,8	20,5	30,7	25,6
10:55	43,1	25,9	42,1	34,0
11:33	51,8	33,8	55,0	44,4
11:54	54,9	38,9	58,4	48,7
12:12	55,7	40,8	59,8	50,3

A modo de ejemplo, en la siguiente imagen se muestra una de las termografías realizadas, la correspondiente al instante de tiempo 12:12 hrs.

**Figura 47: Termografía del Equipo Termocañón.**

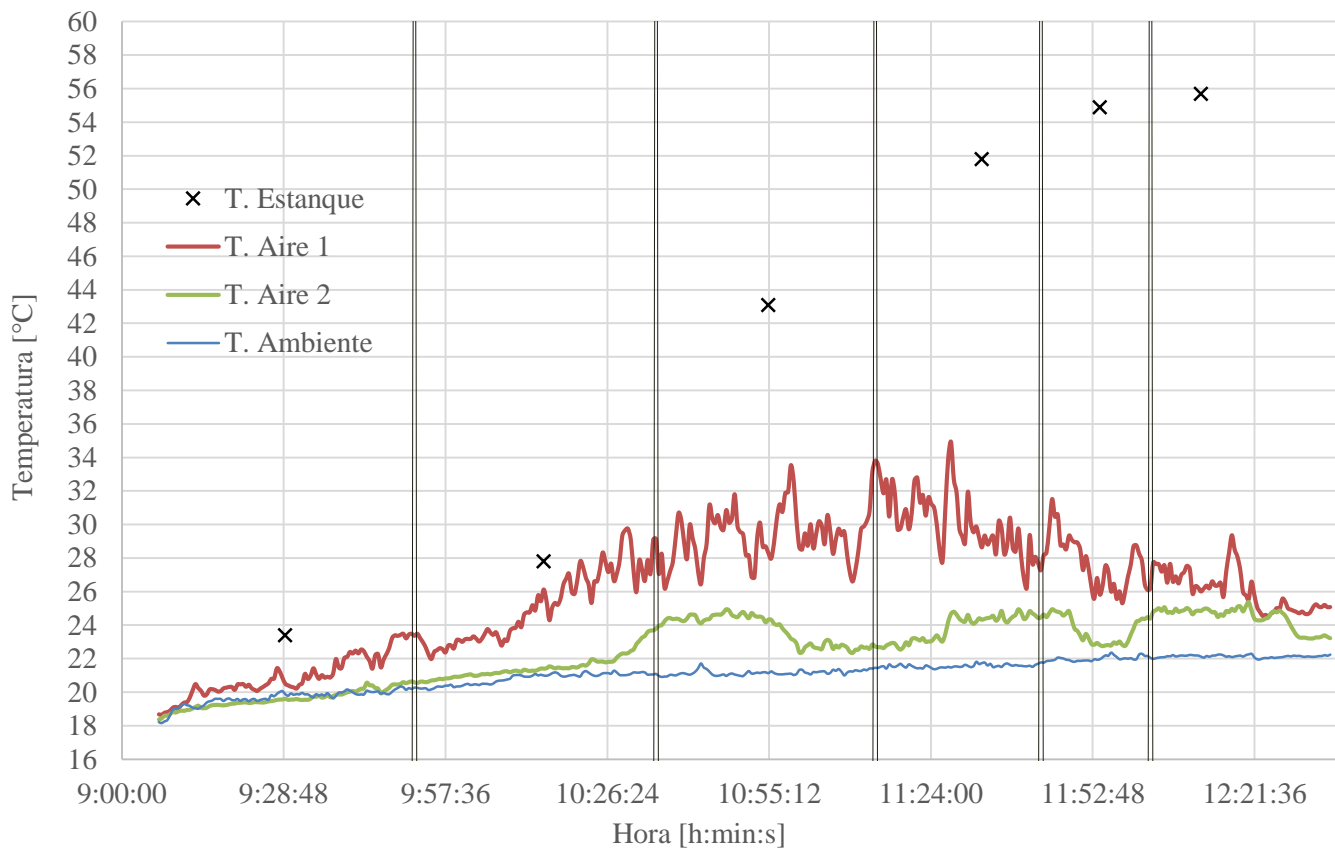
El punto M4 presenta la mayor temperatura, ya que esa parte del estanco está más próxima a la superficie superior de la cocina, que presenta temperaturas de hasta 400 °C, y trasfiere gran cantidad de energía por radiación hacia esta parte del estanco. Este hecho es también el causante de que Como se puede apreciar en la termografía, existen diferencias de temperatura, sobretodo, en la parte inferior izquierda del estanco, la cual está levemente a mayor temperatura que el resto de la superficie. Por otro lado, se puede notar que los puntos M1, M2 y M2, a pesar de presentar diferencias despreciables, las temperaturas son mayores en la parte superior del estanco.

Teniendo la temperatura superficial del estanco, el siguiente paso hacia el cálculo de la energía transferida hacia el ambiente, es determinar la temperatura del ambiente, que corresponderá a la temperatura media entre la temperatura del aire a la izquierda del termocañón, por sobre la plancha de la cocina ( $T_7$ ) y la temperatura del aire a la derecha del estanco ( $T_8$ ).



**Figura 48: Ubicación de Termocuplas de Medición de Temperatura del Aire.**

En la siguiente imagen se grafican los datos obtenidos de la medición de las termocuplas  $T_7$  y  $T_8$ , junto con las temperaturas de las termografías (Tabla 11) y la temperatura del ambiente general del laboratorio.



**Figura 49: Temperaturas del Aire y Superficie del Estanque.**

T. Aire 1 corresponde a la temperatura a la izquierda del estanque (Termocupla  $T_7$ ), T. Aire 2 la temperatura a la derecha del estanque (Termocupla  $T_8$ ) y T. Estanque las medidas de las termografías. Es posible apreciar que la temperatura del aire en la izquierda del estanque es siempre mayor que la de la derecha, producto de su ubicación directamente por sobre la estufa. Las líneas verticales en el gráfico representan las divisiones entre periodos de tiempo. Estos periodos de tiempo servirán para calcular las pérdidas energéticas, y los datos en los puntos medios (Puntos de tiempo donde se hacen las termografías) servirán como referencia para el periodo en el que se encuentran. Los límites de los periodos (Líneas verticales) fueron determinados por el punto de tiempo medio entre tomas de termografías. Por ejemplo: la primera línea vertical (En el instante 9:52) es el punto medio entre la primera termografía (9:29) y la segunda (10:15). Los datos de temperatura de la primera termografía (9:29) serán representativos para el periodo comprendido entre el inicio del Ensayo 4 y la primera línea vertical. Los datos en el instante de tiempo de la segunda termografía (10:15) serán representativos para el periodo comprendido entre la primera línea vertical (9:52) y la segunda línea vertical (10:35), y así sucesivamente.

Ahora se precede a calcular la energía transferida por convección hacia el ambiente. Primero que todo se debe obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h_{cv}$ ), el cual dependerá de la temperatura de la película de aire ( $T_f$ ) en la superficie del estanque, obtenida a partir de la temperatura media de la superficie ( $T_{sup}$ ) y el aire ( $T_a$ ).

$$T_f = \frac{T_{sup} + T_a}{2} \quad (36)$$

Donde  $T_a$  a su vez se calcula mediante el promedio entre T. Aire 1 y T. Aire 2 ( $T_{a1}$  y  $T_{a2}$ ).

Luego de obtener  $T_f$ , se calculan los siguientes parámetros, obtenidos gracias al programa EES. Estos parámetros dependen también de la presión atmosférica, establecida en 1 [atm].

Conductividad Térmica:  $k$  [W/m K]

Viscosidad Cinemática:  $\nu$  [m<sup>2</sup>/s]

Número de Prandtl:  $Pr$

Difusividad Térmica:  $\alpha$  [m<sup>2</sup>/s]

Coefficiente de Expansión Térmica:  $\beta$  [1/K], en este caso:

$$\beta = \frac{1}{T_f + 273} \quad (37)$$

Luego de obtener los parámetros anteriores, se calcula el Número de Rayleigh.

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_{sup} + T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (38)$$

Lo siguiente es calcular el Número de Nusselt:

$$Nu = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( 0,492/Pr \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (39)$$

Y el coeficiente convectivo:

$$h_{cv} = \frac{k}{L} \cdot Nu \quad [W/m^2 \cdot ^\circ C] \quad (40)$$

Luego, se procede a calcular el área del cilindro. No se considerarán la cara superior ni inferior (Tapas). El diámetro  $D$  es de 0,29 m y el largo  $L$ : 1 m.

$$A_{sup} = D \cdot \pi \cdot L \quad [m^2] \quad (41)$$

Luego, en la siguiente tabla se muestran los resultados para cada periodo.

**Tabla 12: Pérdidas Energéticas por Convección en cada Periodo.**

Periodo	$T_{sup}$ [ $^\circ C$ ]	$T_a$ [ $^\circ C$ ]	$h_{cv}$ [ $W/m^2 \cdot K$ ]	$Q_{cv}$ [W]	Duración [h]	$\dot{Q}_{cv}$ [Wh]
1	23,4	20,05	2,25	6,87	0,767	5,27
2	27,8	24,76	2,365	8,70	0,717	6,24
3	43,1	26,31	3,604	55,13	0,65	35,83
4	51,8	26,47	4,061	93,72	0,483	45,27
5	54,9	24,31	4,303	119,9	0,333	39,93
6	55,7	25,42	4,282	118,1	0,533	62,95

Así, la pérdida total de energía por convección durante el Ensayo 4 es:  $\dot{Q}_{cv} = 195,5 [Wh]$

El cálculo de la energía perdida hacia el ambiente con convección se hizo gracias al programa EES, cuyo código se registra en el Anexo 7.5.2.

Ahora, se realiza el cálculo de la energía transferida al ambiente por radiación. Para este caso, las temperaturas a considerar serán las de la superficie del estanque  $T_{sup}$  y la temperatura del ambiente del laboratorio  $T_{amb}$  (T. Ambiente en la gráfica de la Figura 49). La emisividad de la superficie considerada es de 0,9.

**Tabla 13: Pérdidas Energéticas por Radiación en cada Periodo.**

Periodo	$T_{sup}$ [ $^\circ C$ ]	$T_{amb}$ [ $^\circ C$ ]	$Q_{rad}$ [W]	Duración [h]	$\dot{Q}_{rad}$ [Wh]
1	23,4	19,89	16,7	0,767	12,81
2	27,8	21	33,27	0,717	23,85
3	43,1	21,14	116,16	0,65	75,51
4	51,8	21,74	166,57	0,483	80,45
5	54,9	21,97	185,51	0,333	61,78
6	55,7	22,14	190,0	0,533	101,25

La energía total transferida al ambiente por radiación es de:  $\dot{Q}_{rad} = 355,6 [Wh]$

Por lo tanto, la energía total que pierde el estanque hacia el ambiente es de:  $\dot{Q}_{amb} = 551,1 [Wh]$  durante el Ensayo 4.



### 4.3.5 Ensayo 5: Análisis Precipitador Electroestático

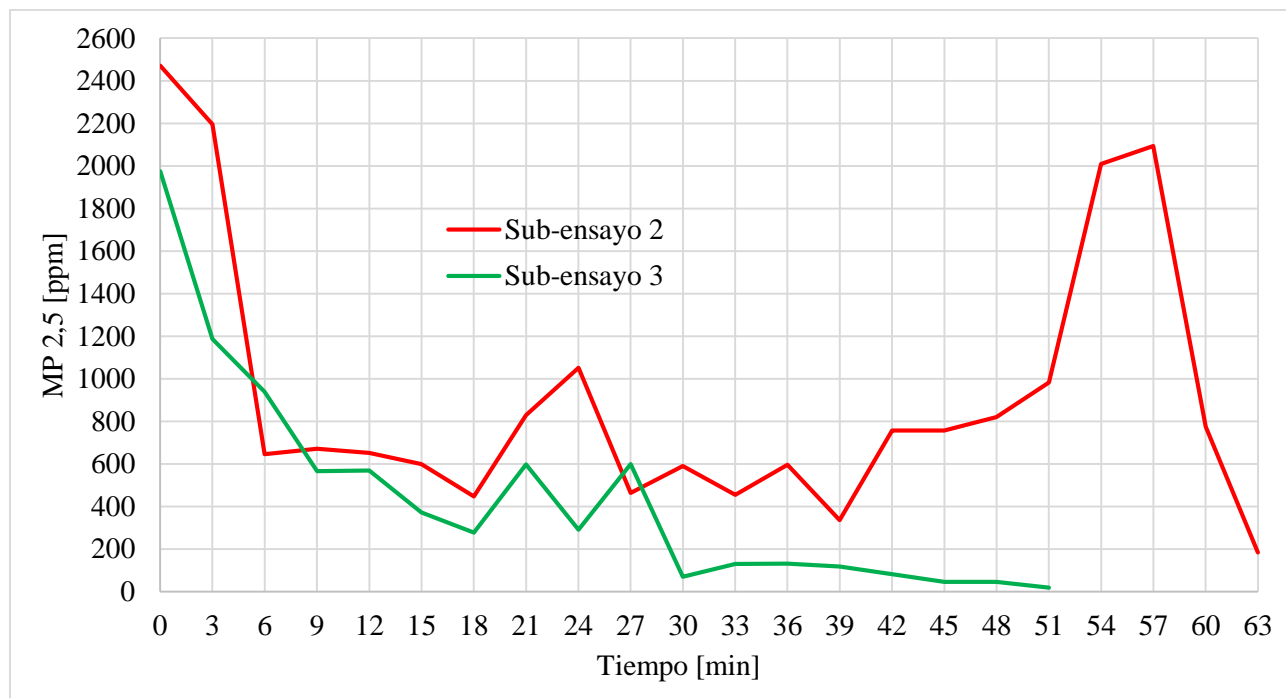
En la siguiente tabla, se muestra un resumen de las condiciones y principales resultados de los 7 sub-ensayos.

**Tabla 14: Datos Principales Ensayo 5.**

Ensayo	MPZero	Hora Inicio	Hora Término	Duración [min]	Carga leña [kg]	Humedad [%]	Tiraje	Tasa quemado [kg/h]	MP 2,5 promedio [ppm]
5.1	✘	10:47	11:58	69	2,129	41,9	25%	1,42	1945
5.2	✘	12:14	13:19	63	1,95	31,9	25%	1,62	926
5.3	✔	13:30	14:21	51	1,954	35	25%	1,94	445
5.4	✔	14:35	15:53	78	2,148	46	Cerrado	1,47	807
5.5	✘	16:07	17:49	102	2,149	46	Cerrado	1,13	1261
5.6	✔	18:08	18:54	45	1,952	17	Cerrado	2,23	881
5.7	✘	19:07	20:00	51	2,136	17,5	Cerrado	2,32	860

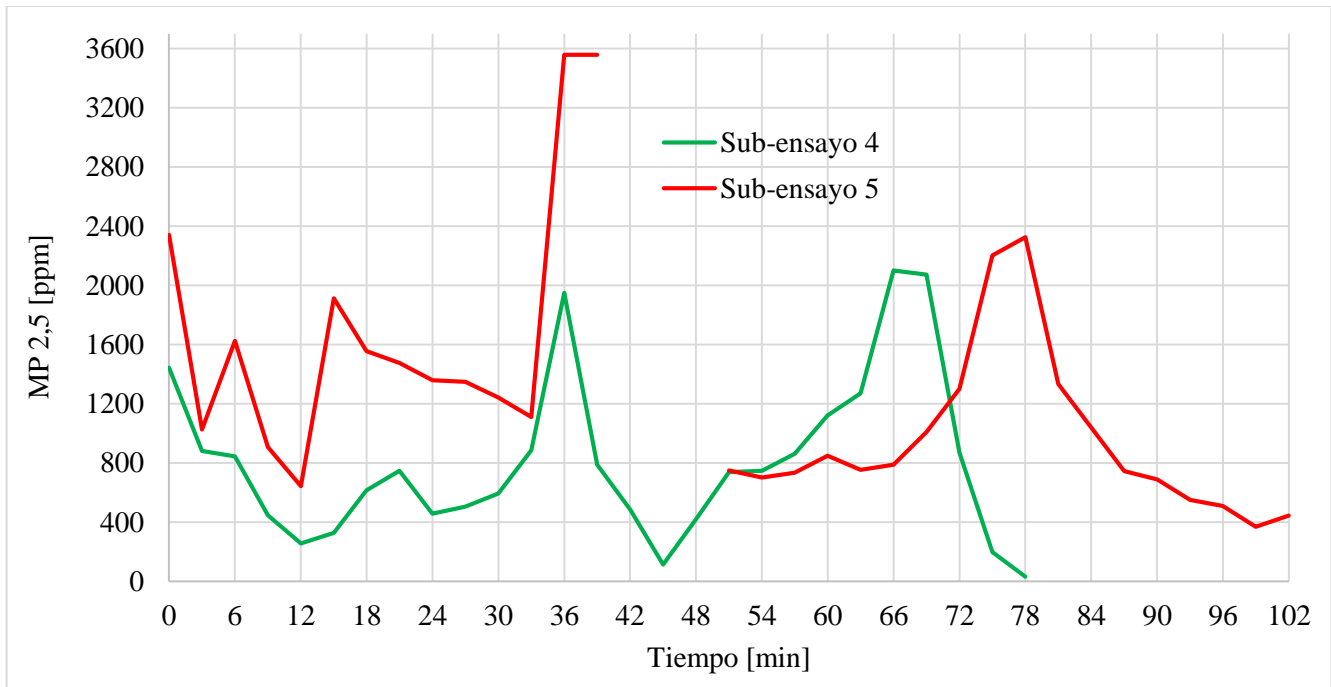
En la tabla anterior, se puede hacer una comparación entre sub-ensayos con condiciones similares, solo diferenciadas por el uso del equipo MPZero.

El sub-ensayo 5.2 y 5.3 se realizaron en condiciones similares; la carga de leña es casi idéntica, la diferencia de humedad es de un 3,1%, ambos con el mismo nivel de tiraje y la tasa de quemado del tercer sub-ensayo es 19% mayor que la del segundo sub-ensayo. La gran diferencia entre estos sub-ensayos radica en la medición del MP 2,5 promedio, el cual en el tercer sub-ensayo se redujo en un 52% con respecto al segundo.



**Figura 50: Gráfica Comparativa MP 2,5 Ensayos 5.2 y 5.3.**

Los sub-ensayos 5.4 y 5.5 también tienen condiciones similares, salvo que en el cuarto sub-ensayo se utilizó el filtro MPZero. A continuación, se muestra el gráfico comparativo de las mediciones del material particulado 2,5.



**Figura 51: Gráfica Comparativa MP 2,5 Ensayos 5.4 y 5.5.**

La reducción de emisión de material particulado 2,5 del sub-ensayo 4, con respecto al sub-ensayo 5, fue de un 37%.

A diferencia de las 2 comparaciones presentadas anteriormente, el ensayo 5.6 y 6.7, presentaron mediciones similares de las emisiones de material particulado. Cabe mencionar que ambos ensayos fueron realizados con leña seca, 17% y 17,5% respectivamente, y la tasa de quemado de aquellos sub-ensayos fue de casi el doble con respecto a los ensayos 5.4 y 5.5, realizados con leña húmeda (46% de humedad).

En el Anexo 7.6 se muestran en detalle las muestras tomadas de material particulado por un equipo auxiliar, en filtros de fibra de vidrio.

#### 4.4 Discusión de Resultados

La tasa de quemado dentro de los experimentos es bastante variable, y si se quisiera estudiar los resultados de esta en los ensayos realizados en este proyecto, se deberían comparar la tasa de quemado obtenida en los Ensayos 1 y 5, en donde el desarrollo de tales experimentos fue con un flujo de agua. La selección de estos ensayos es consecuencia de que los otros (Ensayos 2, 3 y 4), fueron realizados con el agua almacenada en el estanque (Sin flujo forzado), y esto producía subidas de temperatura excesivas, y por lo tanto subidas de presión en el estanque, lo que se debía solucionar manualmente liberando agua hacia el desagüe. Estas acciones inciden inevitablemente en la medición del peso del sistema, por lo tanto, la medición de la tasa de quemado se ve infringida por los alivios de presión.

La tasa de quemado promedio durante los 3 periodos del Ensayo 1 (Ver Tabla 3), fue de 3,24 kg/h. Por otro lado, la tasa de quemado promedio en los sub-ensayos 5.2 y 5.3 fue de 1,78 kg/h, en los sub-ensayos 5.4 y 5.5 fue de 1,3 kg/h, y en los sub-ensayos 5.6 y 5.7 es de 2,28 kg/h (Datos obtenidos a partir de la Tabla 14). La diferencia entre los ensayos anteriores es que el Ensayo 1 las cargas de leña de los 3 periodos fueron de 2,71, 3,02 y 3,09 kg respectivamente, en cambio, la cantidad de biomasa en los sub-ensayos del Ensayo 5 fueron de alrededor de 2 kg. Otra gran diferencia es la condición del tiraje en el Ensayo 1, la cual fue completamente abierta. Es posible

explicar estas diferencias de tasa de quemado bajo 3 circunstancias: Cantidad (o peso) de la carga de leña, condición de tiraje, y humedad. Lamentablemente no se tienen datos de la humedad de la biomasa ocupada en el primer ensayo, sin embargo, la alta tasa de quemado en la primera experiencia, se explica por la alta carga en peso de leña, y la mayor cantidad de oxígeno resultante de la apertura total de la rejilla del cenicero de la cocina, y el completo paso de los gases de combustión hacia la chimenea gracias a la apertura total de la vara de tiraje. Mientras que durante todo el Ensayo 5, las cargas de cada sub-ensayo fueron aproximadamente 1 kg menos que las cargas del Ensayo 1, además de tener la rejilla del cenicero cerrada, limitando en gran medida el ingreso de oxígeno a la cámara de combustión. Lo anterior explicaría el descenso de la tasa de quemado en todas las experiencias del Ensayo 5.

El Ensayo 5 podría considerarse más completo que el resto de los ensayos a la hora de analizar la tasa de quemado. Ya se mencionó que la rejilla del cenicero estuvo completamente cerrada durante toda la experiencia, solo abierta a los inicios de cada sub-ensayo para ayudar al encendido de la carga de biomasa. Es posible concluir que la humedad de la leña es directamente proporcional a la tasa de quemado para condiciones similares. Ya que, la menor tasa de quemado se experimenta en los sub-ensayos 5.4 y 5.5 (Con tiraje completamente cerrado, y ambos con 46% de humedad), de 1,3 kg/h en promedio, luego, le procede la tasa de quemado de los ensayos 5.2 y 5.3 (Con una leve apertura del 25% del tiraje, y 33,5 % de humedad en promedio), de 1,78 kg/h, y finalmente, la mayor tasa de quemado (2,28 kg/h) es de los últimos sub-ensayos 5.6 y 5.7, con tiraje cerrado y una baja humedad de 17,3 % en promedio.

En todos los ensayos, durante la combustión de la primera carga, la tasa de quemado medida cada 5 minutos presenta valores aleatorios, y a partir de la segunda carga en adelante se puede apreciar un patrón de descenso a lo largo de cada carga.

A continuación, a modo de resumen, se muestran los rendimientos de los Ensayos 2, 3 y 4 en la siguiente tabla. Obtenidos en base a la energía acumulada por el agua en el estanque, en relación con la energía desprendida de la combustión de la biomasa.

**Tabla 15: Resumen Rendimiento Energético del Termocañón.**

	Rendimiento
Ensayo 2	13,49 %
Ensayo 3	16,52 %
Ensayo 4	17,6 %
<b>Promedio</b>	<b>15,87 %</b>

El rendimiento promedio del equipo está por debajo de lo que se esperaba. El factor dependiente de este resultado es la energía acumulada por el agua. La cual, en su cálculo, depende de 2 variables fundamentales y que, en caso de incurrir en error, desvían el resultado considerablemente, y estas son las temperaturas del agua. Las temperaturas que se medían para obtener (o estimar) la temperatura del estanque en cada instante de tiempo, correspondían a las del agua en las cañerías de salida y entrada, y no se medían en el punto de encuentro entre la cañería y el estanque, sino que, a unos 50 cm a las afueras del estanque, por lo que la temperatura medida en estos puntos, es siempre menor que si se midieran justo en la entrada/salida del estanque. Por otro lado, el material de la cañería es cobre, metal que presenta una alta conductividad térmica, lo que incrementa la pérdida de calor por unidad de largo de la cañería. Es posible evidenciar este hecho con la comparativa realizada en la Tabla 11, la cual muestra las diferencias de temperatura entre la medida por la termografía, las temperaturas de entrada y salida, y la media entre estas últimas. La temperatura

superficial del estanque es siempre mayor que la temperatura media del agua, incluso en un punto medido es mayor que la temperatura de salida. Dado la alta conductividad térmica del acero, es deducible que la temperatura superficial del estanque (medida por las termografías) sea más certera a la hora de determinar la temperatura del agua en el estanque.

Las temperaturas de las termografías y la temperatura media del agua alcanzan una diferencia por sobre los 9 °C, un 21,1 % de error. Y, es más, es probable que la temperatura del agua dentro del estanque sea aún mayor que la temperatura externa superficial del estanque.

En el Ensayo 4, en la sección 4.3.4, se hizo un análisis energético más completo, de los cuales es posible concluir lo siguiente:

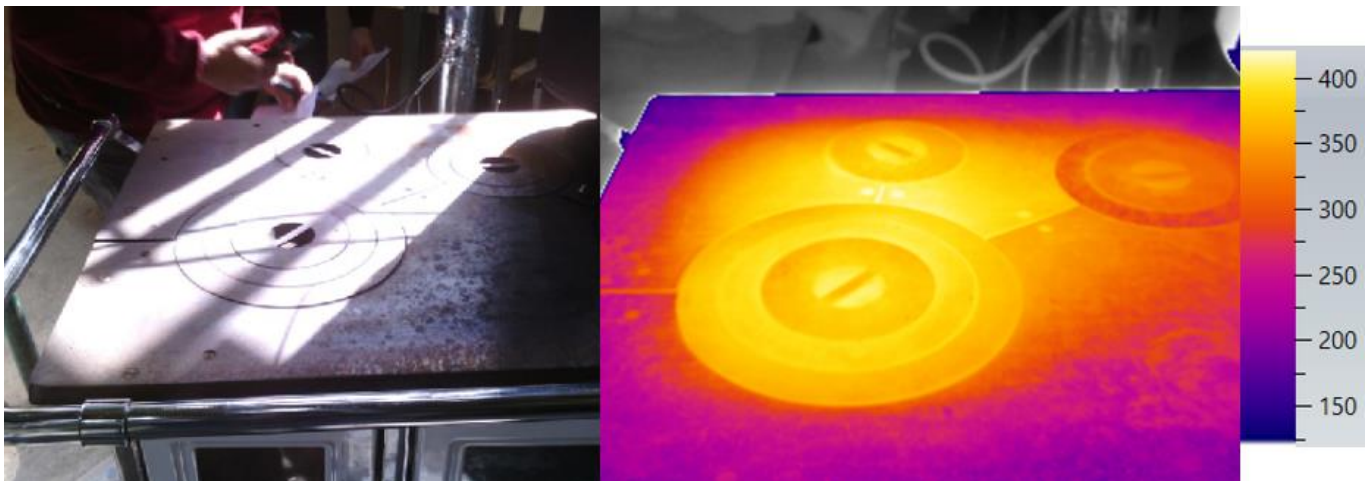
- La energía entregada por los gases de combustión en el estanque corresponde al 38,7% de la energía entregada por el combustible.
- La energía acumulada por el agua del estanque corresponde al 45,5 % de la energía entregada por los gases de combustión en el estanque. El 55,5 % de la energía corresponde a pérdidas hacia el ambiente y ganancia de energía del material del estanque.
- Energía perdida al ambiente cuantificada: 0,551 [kWh]
  - 35,5 % por convección (0,196 kWh)
  - 64,5 % por radiación. (0,356 kWh)
- La energía perdida al ambiente corresponde a:
  - Un 4,7 % de la energía entregada por el combustible.
  - Un 12,2 % de la energía entregada por los gases de combustión.
  - Y a un 26,8 % de la energía acumulada por el agua en el estanque

De lo anterior, se desprende que, en primer lugar, la energía que transfieren los gases de combustión hacia el estanque es baja en comparación con la producida por la combustión de la leña, lo que resulta obvio ya que es un cocina o artefacto cuyo objetivo es transferir su energía a través de las mismas paredes del aparato, y por, sobre todo, la plancha de la cocina y el horno. Considerando el hecho de que este equipo termocañón es instalado para aprovechar la pérdida energética de los gases de combustión, este es un muy buen resultado. La energía que absorbe el agua en este proceso es bastante baja en comparación a la entregada por los gases de combustión, la que no alcanza ni la mitad de esta. Nuevamente, es posible argumentar este resultado bajo el hecho del posible error en el que se incurre al determinar la energía del agua.

En cuanto a la energía perdida hacia el ambiente, existe una gran parte de la energía que no fue posible cuantificar, 2,46 [kWh] son desaprovechados por el estanque, con respecto a la energía entregada por los gases de combustión. Es posible explicar esta gran diferencia con respecto a las pérdidas calculadas (0,551 [kWh]), mediante el hecho de que solo fueron considerados la cara cilíndrica del estanque, y no las tapas, pero estas no representan una proporción considerable en comparación con el área total del termocañón, por lo que no justifica la gran cantidad de energía no cuantificada. Por otro lado, al momento de calcular las pérdidas de calor por convección, el estanque fue considerado como una placa plana, lo que es posiblemente un error dado el largo del estanque y por considerarse un cuerpo esbelto, lo que conlleva a que se haya considerado un régimen de convección natural laminar, y no turbulento, pero tampoco es concluyente que esta sea la razón de las grandes pérdidas de energía. El régimen laminar en cilindros es altamente complejo de calcular, y debido a la baja importancia que tiene en este proyecto calcular las pérdidas energéticas por convección, no se consideró de esa forma.

Otros factores que explican la gran diferencia entre la energía de los gases y el agua, es que la temperatura que se considera para los gases de combustión tanto a la salida del estanque como a la entrada, se mide en el centro de los ductos de la chimenea, lugar en donde, claramente, la temperatura es mayor, y, por ende, se termina calculando entalpías mayores y con eso, flujos de energía más grandes. La capa de gas dentro de la chimenea que está en contacto con las paredes interiores del estanque, tendrán una temperatura menor que la del centro del flujo de gases de combustión, por lo que la transferencia de calor por convección hacia las paredes del estanque será menor a la que se calcula. La energía de los gases de combustión también es acumulada por el material del estanque y por los ductos de la chimenea, mediante convección y conducción. Sumado a lo anterior, es posible que las pérdidas energéticas por radiación calculadas en la sección 4.3.4.1, sean mayores, dado que las paredes que rodean al estanque, estarían mucho más frías que la temperatura ambiente.

Por otro lado, el estanque, y a su vez, el agua contenida en él, presenta ganancias de energía, aparte de las que le brindan los gases de combustión. La energía desde la cocina es transfiere por conducción a través de la sección de chimenea de acero entre la cocina y el estanque, la cual no es posible medir en esta experiencia. Además de esto, existe una considerable energía por radiación que absorbe la cara del estanque por el lado de la cocina. La plancha de la cocina se eleva por temperaturas extremadamente altas, intercambiando energía en forma de radiación con cualquier objeto por sobre de ella, entre ellas, la cara cilíndrica izquierda del estanque. En la siguiente imagen se muestra una termografía realizada a la plancha de la cocina a leña.



**Figura 52: Termografía de Plancha de Cocina durante Ensayo 4.**

En la termografía anterior, la temperatura máxima medida es de 422,3 °C, lo que, sumado a la alta absorción del acero negro, es una fuente de calor importante.

En cuanto a lo realizado en el Ensayo 5, según los resultados presentados en la Tabla 14 el equipo MPZero logró reducir hasta en un 48 % la emisión de material particulado, sin considerar los sub-ensayos 5.6 y 5.7 que no presentan casi ninguna diferencia, posiblemente ocasionado por fallos en el medidor de material particulado.

## 5 Conclusiones

Se logró exitosamente realizar una metodología de ensayo efectiva y ordenada para evaluar el desempeño tanto energético del equipo, como del equipo precipitador electrostático.

En general, en cuanto a los resultados esperados sobre el rendimiento del equipo, fueron más bajos que los establecidos en la hipótesis. Como se explicó en la sección anterior los errores en la medición de temperatura inciden directamente en la determinación de la energía aportada hacia el agua, la que realmente es más alta que la calculada, lo que incrementaría hipotéticamente el rendimiento del sistema. Si se considerara la temperatura superficial del estanque (Termografías) igual a la temperatura del agua dentro de él, se incrementaría hasta en un 14 % la energía acumulada por el agua, y hasta en un 2,5 % el rendimiento del equipo.

Otra incidencia del hipotético aumento de la energía acumulada por el agua, es la reducción de la brecha entre esta energía y la energía entregada por los gases de combustión. Ya se mencionó en la sección anterior que la energía transferida por los gases de combustión (teórica) es mayor que la que realmente pierden los gases durante su paso a través del estanque. Es por eso entonces que el rendimiento del proceso de transferencia de calor entre los gases de combustión y el agua del estanque, sería bastante mayor que estimado. Anteriormente se había calculado en un 45,5 % de este proceso, y bajo la premisa anterior, esta sería mayor, lo que, además, reduce el porcentaje de energía perdida al ambiente no cuantificable.

El estudio de la tasa de quemado es factible realizarlo en condiciones en las que no se afecten la masa del sistema por causas externas. Como se ha reiterado, el estado confinado del agua tiene como efecto altas temperaturas y, por ende, altas presiones. Aliviar la presión de estanque trae como consecuencia la alteración del peso del sistema, que influye en la determinación de la tasa de quemado. Por lo tanto, bajo las condiciones de mediciones actuales, solo sería posible obtener una tasa de quemado medida correctamente para ensayos con flujo de agua constante.

Para los casos de acumulación de agua, se podría implementar el siguiente procedimiento. Medir la masa del sistema al inicio de una carga, y cuando se haya consumido por completo. Medir la cantidad de agua que se evacúa del sistema por los alivios de presión, y sumarla al diferencial de masa. Dividir el diferencial de masa por el tiempo (en horas) y obtener la tasa de quemado en kg/h, calculando así una tasa de quemado por cada carga de un ensayo. Ahora, queda la duda de si considerar o no la masa de cenizas que produce la quema de la carga. En el caso de considerarla, se debiera restar al diferencial de masa, y calcular la tasa de quemado con este nuevo dato.

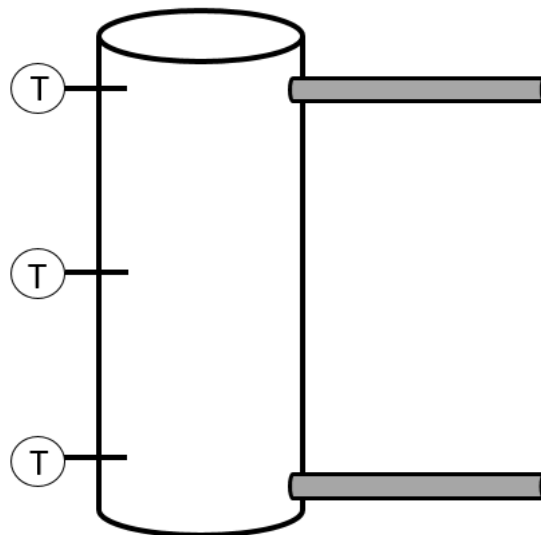
Con respecto al funcionamiento del precipitador MPZero, se mencionó en la sección anterior que se lograba reducir hasta un 48 % la medición de material particulado 2,5. Sin embargo, se considera que las mediciones de material particulado no son muy exactas, ya que se hicieron con un dispositivo y métodos no certificados ni reconocidos. Además, la temperatura a las que se medía el material particulado en los gases de combustión, era bastante alta aun en esa sección de la chimenea, por lo que es posible que algunos compuestos no se hayan alcanzado a medir dado su estado volátil en la sección e la chimenea donde se toman las mediciones de material particulado. En el Anexo 7.7 se muestran en la Tabla 18 las temperaturas de los gases de combustión en el lugar de medición del material particulado. En conclusión, la reducción de material particulado está muy por debajo del máximo susodicho por el fabricante, igual al 90 %.

La metodología adoptada para medir el material particulado no se concierne con la especificada en el Método CH-5 G, sobre la determinación de las emisiones de partículas de calefactores a leña medidas desde un túnel de dilución [11], por lo que para futuras experiencias, se recomienda realizar un análisis bibliográfico a esta metodología para una correcta recopilación de datos.

Los resultados no esperados justifican 2 ítems importantes, en primer lugar, mejorar las condiciones de medición del banco de ensayos, con equipos adicionales, y por otro lado, desarrollar nuevos prototipos que permitan una evolución en el diseño de estos equipos aprovechadores de calor residual, que logren incrementar el rendimiento, particularmente, mejorar el proceso de transferencia de calor entre los gases de combustión y el agua dentro del estanque.

### **Recomendaciones para futuras experiencias.**

En la última sección se puso especial énfasis en los errores incurridos en el cálculo de la energía acumulada por el agua, por lo cual, es recomendable mejorar el sistema de medición dentro del estanque. En la siguiente imagen se muestra a modo de ejemplo la recomendación anterior.



**Figura 53: Termocuplas Adicionales en Estanque.**

Las 3 termocuplas adicionales mostradas en la Figura 53, podrían colaborar con una determinación más exacta de la temperatura dentro del agua, además de informar de forma más evidente la estratificación térmica del estanque, la cual se puede apreciar en menor medida en las termografías del estanque como el de la Figura 47.

Por otro lado, la incorporación de elementos aislantes en el estanque, reduciría la energía que se pierde al ambiente, mejorando el rendimiento energético durante la transferencia de calor desde los gases de combustión hacia el agua dentro del estanque. Así mismo, la instalación de aislación alrededor de las cañerías en la salida y entrada del estanque, mejoraría el aspecto descrito anteriormente.

Se recomienda diseñar y/o mejorar el túnel de medición para mejorar la precisión de las mediciones de material particulado. Aumentar el diámetro de la toma de aire, incorporar deflectores, medidas

para disminuir la temperatura en la toma de medidas de material particulado, entre otras. (En el Anexo 7.8 se muestra una imagen de un esquema general del túnel de dilución) [11].

Adicionalmente se recomienda la instalación de un caudalímetro o equipo símil, que sea capaz de medir flujos de agua pequeños, con el fin de medir esta magnitud cuando el sistema esté funcionando en circuito cerrado, como se hizo en los Ensayos 2, 3 y 4, sea con la bomba de recirculación encendida o apagada. Esto con el fin de conocer la magnitud del flujo de agua que se produce por la circulación natural del agua provocado por las diferencias de temperatura, y si es que este flujo influye o no a la hora de calcular la energía absorbida por el agua durante los ensayos. También serviría para medir el flujo de agua cuando la bomba de recirculación este encendida, para el mismo fin de calcular la energía durante un ensayo de este tipo. Para una mejor idea de la localización del equipo recomendado, ver Figura 17. El equipo debería instalarse en; el tramo de cañería entre la salida del estanque y la bomba de recirculación, o, en el tramo de cañería entre la bomba y la entrada del estanque.

En relación a lo anterior, como se puede ver en las especificaciones de la bomba de recirculación, en el Anexo 7.3, esta tiene un máximo de temperatura de operación de 60 °C, por lo que se recomiendan 2 opciones; en el caso de un ensayo en el que se requiera recircular el agua del estanque, la temperatura del agua no debe superar el límite de operación de la bomba, de lo contrario se expone al equipo a trabajar por fuera de su capacidad e incurrir en daños a este, lo segundo sería sustituir la bomba actual por una que sea capaz de trabajar por sobre temperaturas que se alcanzaron en los ensayos realizados en este proyecto.



## 6 Referencias

- [1] Ministerio de Energía. *Medición del consumo nacional de leña y otros combustibles sólidos derivados de la madera*. Diciembre de 2015.
- [2] Ministerio del Medio Ambiente. *Planes de Descontaminación Atmosférica*. <https://ppda.mma.gob.cl/>.
- [3] DTO 41 - 2006. Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 25 de junio de 2006. <https://bcn.cl/2kh1g>.
- [4] DTO 15 - 2015. Ministerio del Medio Ambiente, 14 de julio de 2015. <https://bcn.cl/2kh1f>.
- [5] DS 6 - 2018. Diario Oficial de la República de Chile, 17 de diciembre de 2019.
- [6] Ministerio del Medio Ambiente (s. f.). *Programa Recambio de Calefactores*. Consultado el 14 de marzo de 2023. <https://calefactores.mma.gob.cl/>
- [7] CONICYT, Ministerio de Educación. (s. f.). *Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico*. Consultado el 23 de enero de 2023. <https://www.conicyt.cl/fondef/sobre-fondef/que-es-fondef/>.
- [8] Optolov. *Intercambiadores de calor en el diagrama de conexión de la chimenea*. Consultado el 03 de diciembre de 2022. <https://optolov.ru/es/door/teploobmenniki-na-dymohod-shema-podklyucheniya-delaem-sami.html>
- [9] Soria Guía, L V. (2019). *Evaluación de un sistema integrado cocina a leña con tanque de agua para calefacción de viviendas rurales en zonas altoandinas del Perú*. [tesis de maestría, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
- [10] Gil-Mora, J. E., Baca-Flores, J. A. y Alvares-Moscoso, M. E. (2021). Consumo de leña y estimaciones del valor calorífico de especies utilizadas por las comunidades campesinas de la cordillera del Vilcanota, Cusco. *Q'EUÑA*, 11(1), 41-58. <https://doi.org/10.51343/rq.v11i1.431>.
- [11] Método CH-5 G. Instituto de Salud Pública, Ministerio de Salud, diciembre de 2012.

## 7 Anexos

### 7.1 Procedimiento para la realización de ensayos y mediciones.

Para resumir esta sección, se establecen 2 tipos de ensayos; con flujo de agua, o en modo acumulación. En primer lugar, según el tipo de ensayo, se deberán regular las válvulas correspondientes para configurar el flujo del agua según se desee.

En el caso de un ensayo con flujo de agua, se deben abrir todas las válvulas del sistema de cañería, excepto la de recirculación de agua, en el tramo donde se encuentra la bomba de recirculación. Se deberán tomar mediciones manuales del flujo de agua desde el indicador digital del flujómetro, y anotarlas según el tiempo que se desee, para obtener una gráfica del flujo de agua que será necesaria para la evaluación energética del sistema. El caudal de agua se deberá regular mediante la válvula tipo compuerta que se encuentra a la salida del agua del sistema (válvula con llave circular). Si el ensayo es de tipo acumulación, se deben cerrar todas las válvulas, excepto la de recirculación. En ambos tipos de ensayos, se debe tener abierta la válvula ubicada en el lavabo el laboratorio, para permitir la descarga de agua constante.

Una vez establecido el flujo de agua, se deberá medir el peso del sistema, también manualmente. En el caso de que el estanque este vacío, medir el peso sin agua primero, y luego con el estanque lleno, para tener constancia de la cantidad de agua que puede acumular el estanque.

Se debe establecer la cantidad de leña con la que se hará el ensayo, en el caso de este informe, se intentó redondear en los 2 kg para algunos casos, y para otros en 3 kg. Introducir la carga de leña a la cámara de combustión y medir el peso. Antes de proceder al encendido, se debe cerciorar que las mediciones de temperatura y las mediciones de los componentes de los gases de combustión estén bien configuradas y que la hora y fecha sean las mismas en las dos computadoras. La computadora para el equipo medidor de temperaturas (IMP 35951C) utiliza el programa IMP View, por otro lado, la computadora encargada de registrar los datos del analizador de gases Testo 320, utiliza el programa easyEmission. Para el caso del analizador de gases, se debe instalar la lanza de la sonda en el pequeño agujero en la chimenea ubicado justo por encima del equipo MPZero.

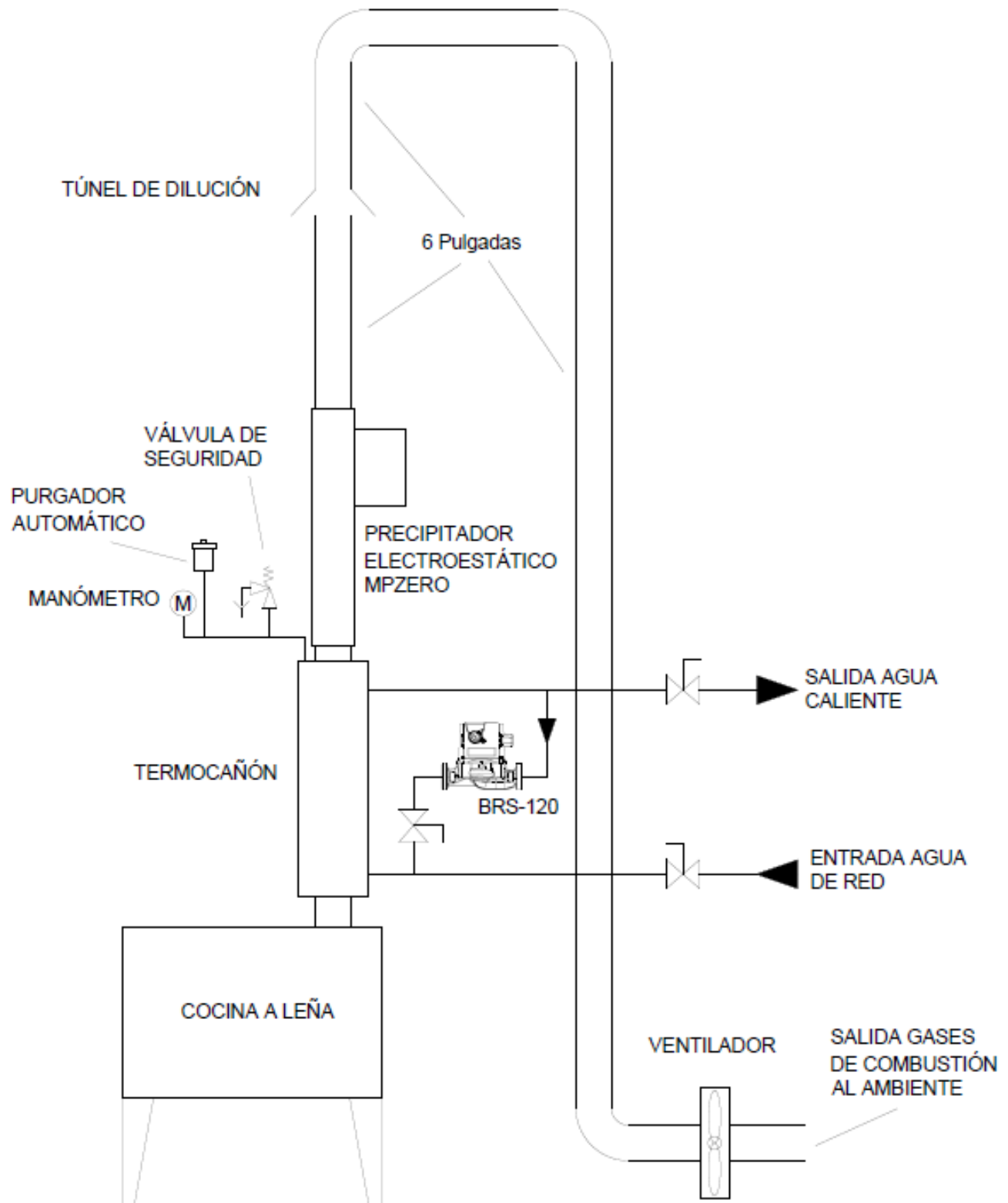
Proceder con el encendido de la carga y anotar el peso del sistema constantemente en el tiempo que se estime conveniente (5 minutos en este informe). A partir de este punto el ensayo solo se limita a tomar mediciones, tanto del peso y el flujo de sistema. Una vez consumida la carga de leña, proceder con una nueva carga y continuar con las mediciones.

Ahora bien, si se trata de un ensayo de tipo almacenamiento, se debe tener especial atención a la presión del sistema medida por el manómetro ubicado en la parte superior de estanque. En caso de que la presión llegue a los 6 bar, actuara la válvula de seguridad, la que expulsara agua que caerá encima de la plancha de la cocina. Para evitar esto, cuando la presión este cerca de los 6 bar, se deben realizar alivios mediante la apertura de la válvula compuerta ubicada a la salida del agua del sistema, cerciorándose que la válvula de descarga en el lavabo este abierta. La válvula compuerta debe ser abierta de a poco, se sentirá el flujo del agua por el sonido en la cañería. Bajar la presión entre los 2 y 3 bar. Repetir el proceso en caso de nuevas subidas de presión. Se recomienda ubicar una probeta o cualquier dispositivo que sirva para medir el agua expulsada del sistema. También se puede ocupar la bomba de recirculación para bajar la temperatura del sistema, pero cuidado, la bomba instalada tiene una temperatura máxima de operación de 60 °C. Se recomienda que una vez alcanza esta temperatura en la salida del agua del estanque, se dé por finalizado el ensayo.

Si se desea finalizar un ensayo, suspenda la adición de carga de leña, y finalice el registro de las temperaturas y mediciones de gases en ambos computadores, y guarde la información según el procedimiento de cada programa.

Ahora, en el caso del registro de las mediciones de MP 2,5 y/o MP 10, en este proyecto las mediciones fueron hechas cada 3 minutos, midiendo MP 2,5, MP 10, temperatura gases de combustión a la salida del termocañón, y en la sección de chimenea donde se toman las muestras de material particulado, y el peso del sistema.

## 7.2 Diagrama General de la Instalación



**Figura 54: Esquema General Banco de Ensayos.**

### 7.3 Especificaciones Bomba BRS-120

- Marca: Splendid
- Modelo: BRS-120
- Potencia Máxima: 120 W
- Frecuencia: 50 Hz
- Caudal Máximo: 26 L/min
- Altura Máxima: 9 m
- Material: Latón con pintura electrostática.
- Peso 2,8 kg
- Conexión: 3/4"
- Presión Máxima de agua: 6 bar
- Grado de protección: IP 42.
- Temperatura Máxima: 60 °C



**Figura 55: Dimensiones Bomba BRS-120.**

## 7.4 Características Leña de Eucalipto

En este anexo se resumen las características de la leña de eucalipto.

**Tabla 16: Composición Química Leña de Eucalipto.**

Nitrógeno	0,15 %
Azufre	0,06 %
Carbono	39,30 %
Oxígeno	52,40 %
Hidrógeno	6,00 %
Agua	12,33 %
Cenizas	4,30 %

Poder Calorífico Inferior leña de eucalipto:

- 12.654,6 [kJ/kg]
- 3.023, 1 [kcal/kg]

Características para la especie *Eucalyptus Globulus* a un 25 % de humedad (Gehú, 1981, y Pedrotti 1992):

Densidad	:	720	[kg/m <sup>3</sup> ]
Energía	:	1,18	[Gcal/m <sup>3</sup> ]
Poder Calorífico	:	1.638,9	[kcal/kg]
Poder Calorífico	:	6.860,4	[kJ/kg]

## 7.5 Códigos Programa EES

### 7.5.1 Cálculos Energéticos Gases de Combustión

"Balance Nitrogeno"

$$n_{n2}=100-n_{co2}-n_{o2}-n_{co}$$

"Equilibrio quimico para ecuacion de combustion de madera"

"Carbono"

$$A=(n_{co2})+(n_{co})$$

"Hidrogeno"

$$A=2*n_{h2o}$$

"Oxigeno"

$$A+2*B=2*n_{co2}+n_{h2o}+2*n_{o2}+n_{co}$$

"Nitrogeno"

$$2*(79/21)*B=2*n_{n2}$$

"Fracciones masicas"

$$y_{co2}=n_{co2}/(n_{co2}+n_{h2o}+n_{o2}+n_{n2}+n_{co})$$

$$y_{h2o}=n_{h2o}/(n_{co2}+n_{h2o}+n_{o2}+n_{n2}+n_{co})$$

$$y_{o2}=n_{o2}/(n_{co2}+n_{h2o}+n_{o2}+n_{n2}+n_{co})$$

$$y_{n2}=n_{n2}/(n_{co2}+n_{h2o}+n_{o2}+n_{n2}+n_{co})$$

$$y_{co}=n_{co}/(n_{co2}+n_{h2o}+n_{o2}+n_{n2}+n_{co})$$

"Entalpias de entrada"

$$he_{co2}=\text{Enthalpy}(\text{CO2};T=T_{\text{entrada}})$$

$$he_{h2o}=\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_{\text{entrada}})$$

$$he_{o2}=\text{Enthalpy}(\text{O2};T=T_{\text{entrada}})$$

$$he_{n2}=\text{Enthalpy}(\text{N2};T=T_{\text{entrada}})$$

$$he_{co}=\text{Enthalpy}(\text{CO};T=T_{\text{entrada}})$$

"Entalpias de salida"

$$hs_{co2}=\text{Enthalpy}(\text{CO2};T=T_{\text{salida}})$$

$$hs_{h2o}=\text{Enthalpy}(\text{H2O};T=T_{\text{salida}})$$

$$hs_{o2}=\text{Enthalpy}(\text{O2};T=T_{\text{salida}})$$

$$hs_{n2}=\text{Enthalpy}(\text{N2};T=T_{\text{salida}})$$

$$hs_{co}=\text{Enthalpy}(\text{CO};T=T_{\text{salida}})$$

$$E_{co2}=y_{co2}*(he_{co2}-hs_{co2})$$

$$E_{h2o}=y_{h2o}*(he_{h2o}-hs_{h2o})$$

$$E_{o2}=y_{o2}*(he_{o2}-hs_{o2})$$

$$E_{n2}=y_{n2}*(he_{n2}-hs_{n2})$$

$$E_{co}=y_{co}*(he_{co}-hs_{co})$$

"Calor desprendido por los gases de combustión"

$$Q_g=M_g*(E_{co2}+E_{h2o}+E_{o2}+E_{n2}+E_{co})$$

"Combustion estequiometrica 1 mol de combustible (CHO)"

"Carbono"

$$x_1=1$$

"Hidrogeno"

$$2*x_2=1$$

"Oxigeno"

$$1+2*A_{est}=2*x_1+x_2$$

"Nitrogeno"

$$A_{est}*(79/21)*2=2*x_3$$

"Cálculo RCA"

$$RCA_{est}=MM_{comb}/(A_{est}*(1+(79/21))*MM_a)$$

$$MM_{comb}=29 \text{ [g/mol]}$$

$$MM_a=MolarMass(Air)$$

$$RCA=(A*MM_{comb})/(B*(1+(79/21))*MM_a)$$

$$M_g=M_a+M_{leña}$$

"exceso de aire"

$$RCA=RCA_{est}/(1+e)$$

$$RCA=M_{leña}/M_a$$

**Nota:  $n_{o_2}$ ,  $n_{co}$ ,  $T_{entrada}$  y  $T_{salida}$ ; son definidos en una tabla paramétrica, valores para cada instante de tiempo.**



## 7.5.2 Cálculo Pérdidas Energéticas al Ambiente

"Presion Ambiente"

$$P1= 101,3$$

"Temperatura de pelicula"

$$T_f=(T_{amb}+T_{sup})/2 [C]$$

"Coeficientes"

$$k=Conductivity(Air;T=T_f)$$

$$Pr=Prandtl(Air;T=T_f)$$

$$v=KinematicViscosity(Air;T=T_f;P=P1)$$

$$beta=1/(T_f+273)$$

$$alpha=ThermalDiffusivity(Air;T=T_f;P=P1)$$

"Numero de Grashof"

$$Gr_L=(9,8*beta*(T_{sup}-T_{amb})*(L^3))/(v^2)$$

$$Dm=(35*L)/(Gr_L^{(1/4)})$$

"Numero de Rayleigh"

$$Ra_L=(9,8*beta*(T_{sup}-T_{amb})*(L^3))/(v*alpha)$$

"Nusselt"

$$Nusselt=(0,825+((0,387*(Ra_L)^{(1/6)}))/((1+(0,492/Pr)^{(9/16))^{(8/27)}))^{(8/27)})^2$$

"Coeficiente Convectivo"

$$h_{cv}=(k/L)*Nusselt$$

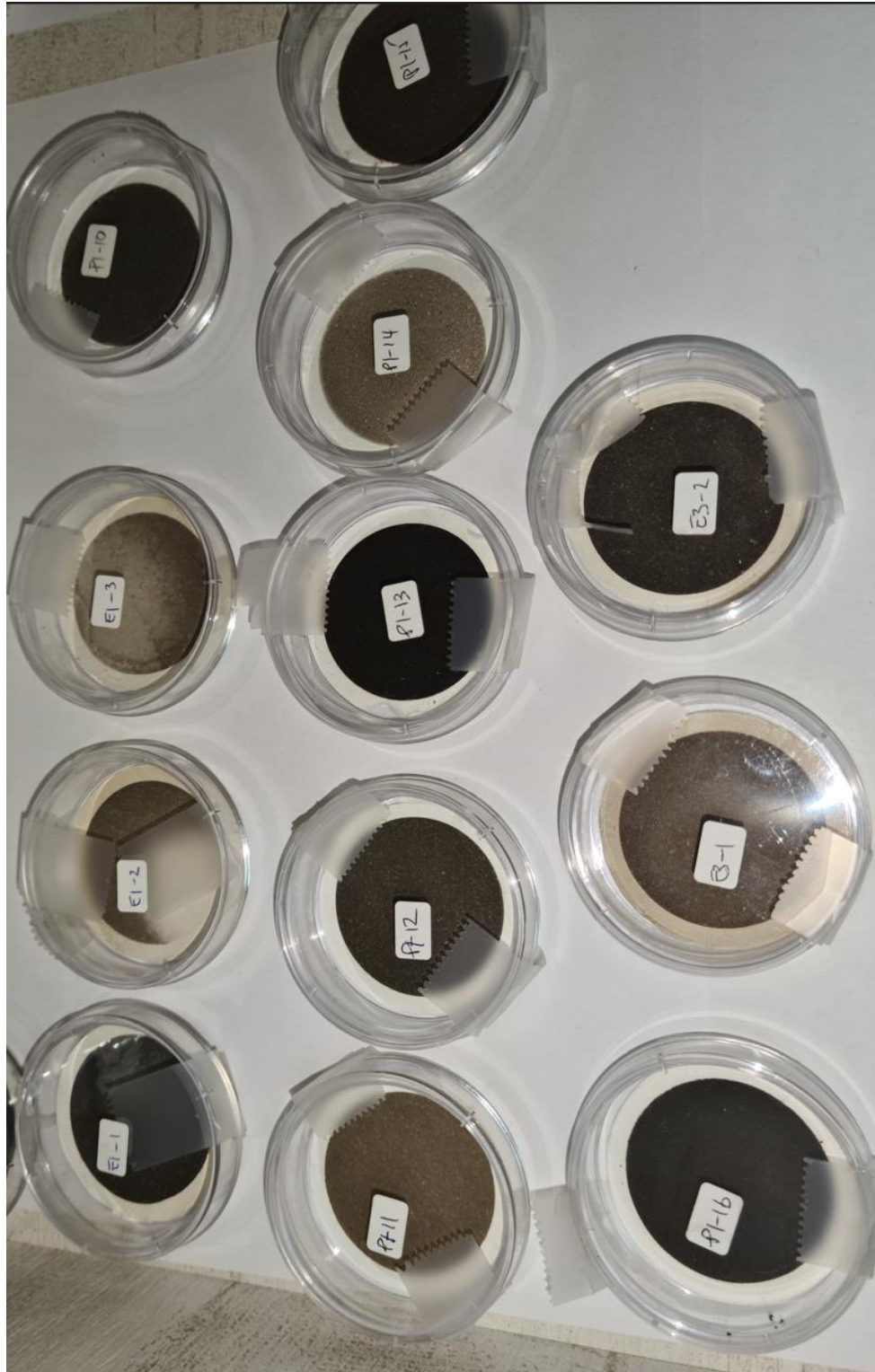
"Calor Conveccion"

$$Q=h_{cv}*A_{sup}*(T_{sup}-T_{amb})$$

$$A_{sup}=D*pi*L$$

**Nota:**  $T_{sup}$  y  $T_{amb}$  son definidos en una tabla paramétrica, valores para cada instante de tiempo.

## 7.6 Muestras de Material Particulado



**Figura 56: Muestras del Filtro de Equipo Auxiliar de Medición de MP.**

**Tabla 17: Códigos de Muestras de MP para cada Sub-Ensayo del Ensayo 5.**

Ensayo	Código Muestra
5.1	PI-11
5.2	PI-12
5.3	PI-10
5.4	PI-13
5.5	PI-15
5.6	PI-14
5.7	PI-16

## 7.7 Temperaturas Sección de Chimenea en Medición de MP

Las temperaturas en la chimenea a la altura del lugar donde se medían las emisiones de material particulado, se presentan en la Tabla 18, para cada sub-ensayo del Ensayo 5. Al igual que las mediciones manuales hechas en dicho ensayo, estas se tomaban cada 3 minutos. Las temperaturas están en °C.

**Tabla 18: Temperaturas Gases de Combustión en Sección de Chimenea de Medición de MP.**

Minuto	Sub-Ensayo						
	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7
0	59,4	55,9	57,3	53,2	47,4	46,1	48,1
3	59	55,8	56,4	49,9	47,2	47,7	48,2
6	56,7	54,5	53,8	48	46,1	48,1	48,2
9	50,2	52,7	53,4	47,3	45,9	48,6	48,5
12	46,3	51,2	56,3	45,8	44,8	49,2	49,2
15	47,3	50,1	56,8	45,3	43,2	48,3	50
18	45,1	48,9	55,2	44,3	41,4	48,8	49,9
21	43,4	47	54,6	43,6	39,8	45,7	49,8
24	42,3	46,3	52,4	43,3	39		49
27	41,5	45,3	50	43,3	37,8	44,5	47,9
30	40	45,9	48,6	42,8	36,9	43,7	47,6
33	39,7	45,7	47	42,3	36,1	42,8	46,4
36	38,7	44,8	45	41	35,9	42,5	45,6
39	37,5	41,9	43,9	40,9	35,1	41,7	43,9
42	36,8	42,2	42,7	40,8	34,7	40,8	
45	36,5	40,9	42	39,6	34,2	40,4	40,7
48	37,7	40,8	41,8	39,2	33,9		39,8
51	37,7	39,5	41,2	38,6	34,4		38,7
54	37,1	38,9		38	33,3		
57	37,2	37		37,3	33,3		
60	36,1	37,6		36,1	33,2		
63	35,4	36,5		35,4	32,9		
66	35,6			35,3	32,8		
69	34,6			34,6	32,5		
72				34,3	32,3		
75				34,4	33,1		
78				34	33,7		
81					33,7		
84					33,4		
87					33,2		
90					33,1		
93					32,9		
96					32,8		
99					32,6		
102					32,8		

### 7.8 Detalles de Construcción Recomendados para el Túnel de Dilución

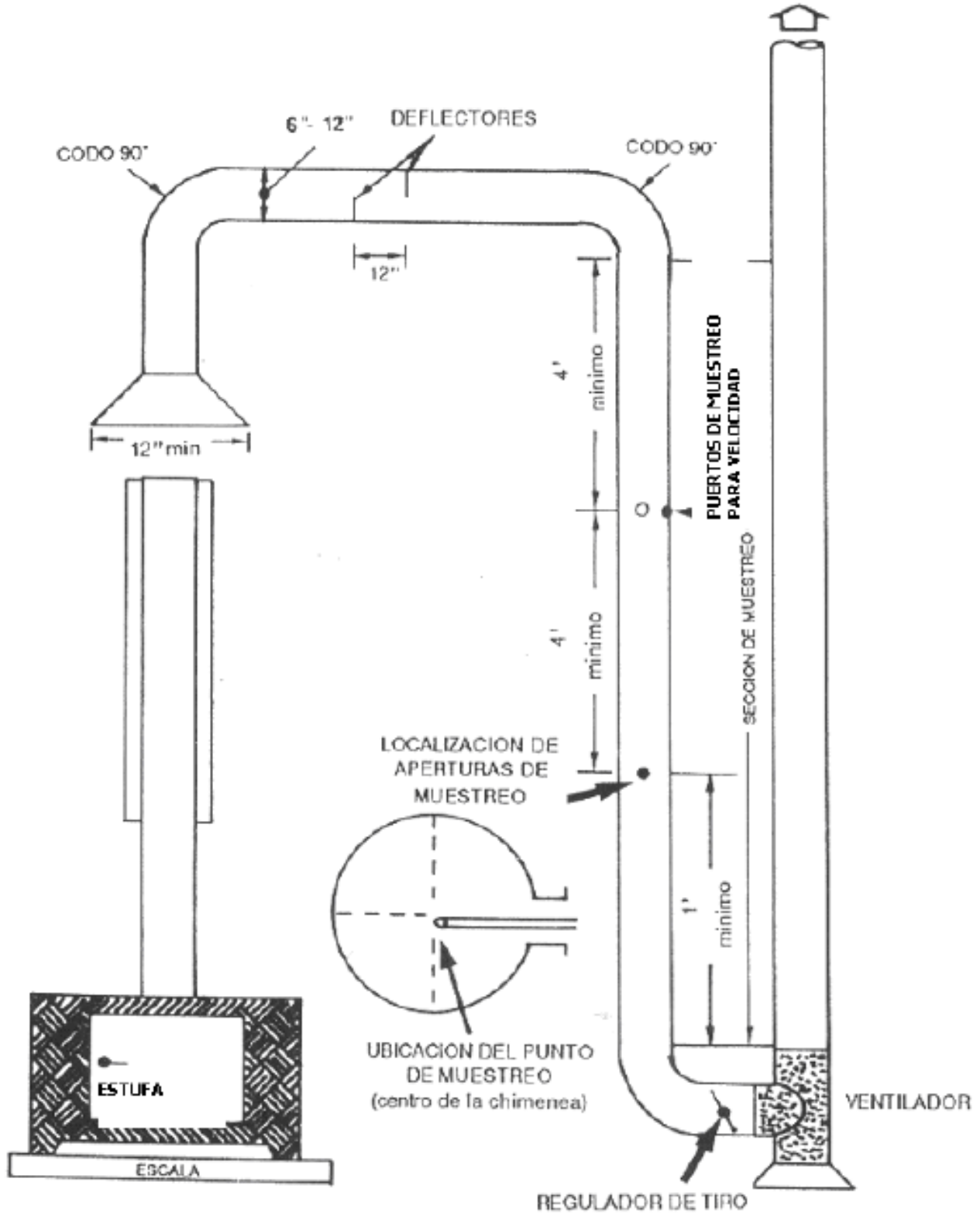


Figura 57: Detalles de Construcción Recomendados para el Túnel de Dilución.