UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE

"EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN Y DE EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UN HORNO INDUSTRIAL PANADERO"

PATRICIO IGNACIO RUBIO ARELLANO

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA: DR. ING. MARIO TOLEDO TORRES
PROFESOR CO-REFERENTE: DR. RER NAT HERNÁN OLGUÍN ASTUDILLO

ENERO – 2018

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por permitirme llegar hasta acá, por darme la fuerza para sobreponerme a todos los obstáculos que han ido surgiendo a lo largo de este camino, y por regalarme todo este aprendizaje, experiencias y amistades, que de seguro me acompañarán en el futuro.

Gracias a mi familia por su amor y paciencia, por que siempre han estado presentes en todo este proceso, y me han apoyado en todas las decisiones que he tomado, con mucha comprensión y cariño. A mis padres Verónica y Ricardo, por su amor incondicional. A mi hermano Rodrigo, por aguantarme y quererme por estos ya 23 años compartiendo casa.

Gracias a mis amigas y amigos, que me acompañaron durante todo este bello proceso. Por los buenos momentos, por las risas, por el apañe, muchísimas gracias. Gracias en especial a mis amigas y amigos Sebastián Cueto, Laura Palma, Pablo Cárdenas, Marcelo Rivera, Sebastián Galvez, Bastián Orellana y Francisca Olivares.

Gracias a mis compañeras y compañeros de la Unión Nacional Estudiantil, porque con ustedes comprendí lo que significa servir a nuestra gente, en particular a las y los estudiantes de nuestra Universidad, así como también a sus profesores y funcionarias y funcionarios, asumiendo un compromiso con ellos, siempre luchando por una universidad y una sociedad mejor. Gracias por enseñarme que la disciplina, la crítica y la autocrítica son fundamentales para poder desarrollarnos individual y colectivamente, sobretodo teniendo el socialismo como objetivo estratégico.

Finalmente gracias a QUEMPIN, a cada uno de ustedes, por su apoyo durante este año de trabajo, por la oportunidad de poder aportar al desarrollo de nuevas tecnologías más limpias y eficientes y ponerlas al servicio de la gente.

DEDICATORIA

"Si muchos de nosotros dieran más valor a la comida, la alegría y las canciones que al oro atesorado, éste sería un mundo más feliz".

Thorin Escudo de Roble a Bilbo Bolsón, "El Hobbit", J.R.R. Tolkien

RESUMEN

El presente trabajo consiste en una evaluación técnica del proceso de combustión y de eficiencia energética de un horno industrial convencional de baja potencia, de marca Top Gas, modelo HSI 58-1. Para ello se implementó un sistema de medición de flujos, temperaturas y gases de combustión para la máxima y mínima potencia de operación del horno industrial. Luego se realiza la evaluación de los parámetros operacionales y la eficiencia del horno industrial, considerando particularmente la cocción de panes, y se proponen optimizaciones al diseño y su operación.

El desarrollo del trabajo considera las siguientes etapas: En primer lugar se presentan las tecnologías de hornos que utiliza el gremio panadero. Luego se muestran las características técnicas del horno objeto del estudio, detallando el diseño y el procedimiento experimental, con los respectivos sistemas de medición. Se opera el horno en máxima y mínima potencia, evaluando las temperaturas de aire interior, paredes internas y externas, composición y temperatura de gases de escape, y temperatura del pan durante el proceso de cocción. Se calculan y analizan los balances de masa y energía, la eficiencia del proceso, los indicadores de productividad de cocción de pan, y los rendimientos de combustión y quemado. En base a los resultados obtenidos, se proponen optimizaciones al diseño y operación del horno industrial.

Se concluye que el horno posee una eficiencia del 9,69% en máxima potencia (6,12 [kW] promedio) y del 8,19% en mínima potencia (5,27 [kW] promedio) para el proceso de cocción de pan de 4,75 [kg] y 5,32 [kg] respectivamente. Finalmente se plantea el cambio de las gomas selladoras de la puerta como una mejora al diseño del horno industrial, de manera de evitar filtraciones de los gases de escape.

Palabras claves: *Horno, Eficiencia energética, Quempin, Panadería, Pan*

ABSTRACT

This paper consists of a technical evaluation of the combustion process and energy efficiency of a conventional low power industrial oven, brand Top Gas, model HSI 58-1. To this end, a system for measuring flows, temperatures and combustion gases in this oven was implemented for maximum and minimum operation power. Then the evaluation of the operational parameters and the efficiency of the industrial oven was made, considering particularly the breads baking, and optimizations are proposed to the design and its operation.

The development of the paper considers the following stages: First of all, the ovens technologies used by the baker's guild are presented. Then the technical characteristics of the oven (object of the study) are shown, detailing the experimental design and procedure, with the respective measurement systems. The oven is operated on maximum and minimum power, evaluating the interior air temperatures, internal and external walls, composition and temperature of exhaust gases, and bread temperature during the cooking process. The mass and energy balances, the process efficiency, the bread baking productivity indicators, and the combustion and burning performance are calculated and analyzed. Based on the results obtained, optimizations are proposed to the design and operation of the industrial oven.

It is concluded that the oven has an efficiency of 9,69% on maximum power (6,12 [kW]) and 8,19% on minimum power (5,27 [kW]) for the bread baking process of 4,75 [kg] and 5,32 [kg] respectively. Finally, the change of the sealing grommets of the door is considered as an improvement to the design of the industrial oven, in order to avoid leakage of the exhaust gases.

Keywords: *Oven, Energy efficiency, Quempin, Bakery, Bread*

GLOSARIO

Abreviaturas

GE	Gases de Escape
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IPC	Indice de precios al consumidor
MIPYMES	Micro, pequeñas y medianas empresas
PIB	Producto Interno Bruto
SII	Servicio de Impuestos Internos
UTFSM	Universidad Técnica Federico Santa María

Nomenclatura fórmulas químicas

O_2	Oxígeno	*[%]*
CO_2	Dióxido de carbono	*[%]*
CO	Monóxido de carbono	*[ppm]*
NO_X	Óxidos de nitrógeno	*[ppm]*
N_2	Nitrógeno	*[%]*
SO_2	Dióxido de azufre	*[ppm]*

ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....I
DEDICATORIA.....II
RESUMEN.....III
ABSTRACT.....IV
GLOSARIO.....V
ÍNDICE GENERAL.....VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....IX
ÍNDICE DE TABLAS.....XI
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....1
1.1. Proceso de cocción del pan.....2
1.2. Industria panadera en Chile.....3
1.2.1. Caracterización económica.....4
1.2.2. Hornos utilizados por las panaderías chilenas.....5
1.3. Objetivos.....9
2. DISEÑO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....10
2.1. Características técnicas de horno.....10
2.2. Diseño experimental.....10
2.2.1. Perfil de temperatura de horno.....12
2.2.2. Registro de las temperaturas de cocción de pan en el horno.....14
2.2.3. Instrumentos de medición.....14
2.3. Procedimiento experimental.....19
2.3.1. Elementos y condiciones previas a la medición.....20
2.3.2. Procedimiento de medición.....21
2.3.3. Posterior a la medición.....23
3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS.....25
3.1. Balance de masa.....25

3.2. Balance de Energía.....30
3.3. Eficiencia energética.....36
3.4. Indicadores.....39
3.5. Rendimiento de combustión y de quemado.....41
4. PRESENTACIÓN DE DATOS.....43
4.1. Mínima potencia.....43
4.1.1. Temperaturas horno.....44
4.1.2. Perfil de temperaturas de paredes exteriores.....47
4.1.3. Emisiones.....48
4.2. Máxima potencia.....51
4.2.1. Temperaturas horno.....52
4.2.2. Perfil de temperaturas de paredes exteriores.....56
4.2.3. Emisiones.....57
4.3. Temperatura pan.....60
4.3.1. Mínima potencia.....60
4.3.2. Máxima potencia.....61
5. ANÁLISIS DE DATOS.....63
5.1. Balance de masa.....63
5.1.1. Flujo másico promedio de GLP.....63
5.1.2. Flujo másico instantáneo de GLP.....64
5.1.3. Flujo másico de GE.....65
5.1.4. Flujo másico de aire.....68
5.2. Balance de energía.....68
5.2.1. Flujo de energía utilizado en la cocción del pan.....68
5.2.2. Flujo de energía por GLP.....69
5.2.3. Flujo de Energía por GE.....72
5.3. Análisis comparativo de datos.....74
5.3.1. Observaciones.....75
5.3.2. Eficiencia.....75

5.3.3. Indicadores.....76
5.3.4. Rendimiento de combustión y quemado.....76
5.3.5. Posibles modificaciones al horno.....76
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES.....78
BIBLIOGRAFÍA.....80
ANEXOS.....83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1: Ventas de panaderías desde el año 2005 hasta el año 2015.....4
Figura N°2 : Número de empresas panaderas desde el año 2005 hasta el año 2015.....5
Figura N°3 : Imagen en corte de un horno de tubos anulares.....6
Figura N°4 : Imagen de un horno ciclotérmico.....7
Figura N°5 : Imagen de un horno rotatorio.....7
Figura N°6: Foto de horno chileno de Panadería Placeres.....8
Figura N°7 : Foto de horno chileno de Panadería Placeres.....8
Figura N°8 : Modelo 3D de instalación para mediciones.....11
Figura N°9: Modelo 3D de instalación de termopares en ladrillos.....12
Figura N°10 : Fotografía de ladrillos en horno.....12
Figura N°11: Modelo 3D de instalación de termopares en interior de horno.....14
Figura N°12: Fotografía de interior de horno.....14
Figura N°13 : Modelo 3D de instalación de termopares en exterior de horno.....14
Figura N°14 : Modelo 3D de instalación de termopares en parte posterior de horno. 14
Figura N°15 : Fotografía de analizador de gases Boston HD 311.....17
Figura N°16 : Fotografía de detector de fugas Inficon Gas Mate.....17
Figura N°17 : Fotografía de analizador de gases Aalborg.....18
Figura N°18 : Balance de masa en horno.....26
Figura N°19 : Balance de energía en horno.....31
Figura N°20 : Perfil de temperatura de horno. Medición mínima potencia.....44
Figura N°21 : Perfil de temperatura de paredes interiores. Medición mínima potencia. 45
Figura N°22 : Perfil de temperatura de ladrillos refractarios. Medición mínima potencia.....46
Figura N°23 : Perfil de temperatura de paredes exteriores. Medición Mínima Potencia.....47

Figura N°24 : Temperatura de gases de rscape. Medición mínima potencia.....48
Figura N°25 : Composición de GE. Medición mínima potencia.....50
Figura N°26 : Presión dinámica. Medición mínima potencia.....51
Figura N°27 : Perfil de temperatura de horno. Medición máxima potencia.....53
Figura N°28 : Perfil de temperatura de paredes interiores. Medición máxima potencia. 54
Figura N°29 : Perfil de temperatura de ladrillos refractarios. Medición máxima potencia.....55
Figura N°30 : Perfil de temperatura de paredes exteriores. Medición máxima potencia.....56
Figura N°31 : Temperatura de gases de escape. Medición máxima potencia.....57
Figura N°32 : Composición de GE. Medición máxima potencia.....59
Figura N°33 : Presión dinámica. Medición máxima potencia.....60
Figura N°34 : Perfil de temperatura de panes. Medición mínima potencia.....61
Figura N°35 : Perfil de temperatura de panes. Medición Máxima Potencia.....62
Figura N°36 : Flujo másico de GLP. Medición mínima potencia.....64
Figura N°37 : Flujo másico de GLP. Medición máxima potencia.....65
Figura N°38 : Flujo másico de GE. Medición mínima potencia.....66
Figura N°39 : Flujo másico de GE. Medición máxima potencia.....67
Figura N°40 : Flujo de energía por GLP. Medición Mínima Potencia.....70
Figura N°41 : Flujo de energía por GLP. Medición Máxima Potencia.....71
Figura N°41 : Flujo de energía por GE. Medición Mínima Potencia.....72
Figura N°42 : Flujo de energía por GE. Medición Máxima Potencia.....73
Figura N°43: Fotografía de instalación.....83
Figura N°44 : Fotografía de instalación.....83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°1 : Características técnicas de horno.....10
Tabla N°2 : Especificaciones técnicas de analizador de gases.....16
Tabla N°3: Especificaciones técnicas de Controlador de Flujo.....18
Tabla N°4 : Especificaciones técnicas de termohigrómetro ambiental.....18
Tabla N°5 : Especificaciones técnicas de balanza.....19
Tabla N°6 : Condiciones de medición de mínima potencia.....43
Tabla N°7 : Promedio de emisiones. Medición Mínima Potencia.....49
Tabla N°8 : Condiciones de medición de máxima potencia.....52
Tabla N°9 : Promedio de emisiones. Medición Máxima Potencia.....58
Tabla N°10 : Flujo másico promedio de GLP.....63
Tabla N°11 : Flujo de energía utilizado en la cocción del pan.....69
Tabla N°12 : Flujo de energía promedio por GLP.....69
Tabla N°13 : Eficiencia del horno obtenida según mediciones.....75
Tabla N°14 : Indicadores obtenidos según mediciones.....76

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La presente memoria se desarrolla al alero del concurso “Impacta Energía”, en el cuál se postuló desde la UTFSM a través de la propuesta del equipo de trabajo “QUEMPIN” [1], la cuál se llamó “quemadores industriales para panaderías eficientes” y que tiene como objetivo instalar quemadores de medios porosos inertes en hornos de panadería.

El marco de este concurso responde a un escenario nacional, que desde las instituciones involucradas (Laboratorio de Gobierno y Ministerio de Energía) se busca enfrentarlo a través de diversas medidas para así “conectar los desafíos energéticos del país con el talento y creatividad fuera del Estado, para co-crear soluciones innovadoras que cambien la forma en que las personas y las empresas de menor tamaño acceden y usan la energía, esto, con el fin último de mejorar su calidad de vida” [2]; escenario que a continuación pasaremos a revisar.

En el desafío MIPYMES de este concurso se plantea que “es necesario analizar si existen pérdidas importantes de energía o un uso excesivo de ésta para un determinado proceso productivo, y generar estrategias para reducir el consumo energético” [2], al cuál el proyecto “QUEMPIN” pretende dar respuestas enfocándose en particular en la industria panadera.

En ese sentido, una de las grandes necesidades de la panadería es la caracterización de su realidad energética, a la cual se pretende responder a través de este trabajo de título.

1.1. Proceso de cocción del pan

Para concluir el proceso de cocción de la masa de pan, esta debe pasar por una serie de procesos químicos y físicos que se generan a partir del aumento de la temperatura de esta. Según la bibliografía consultada [3] [4], a lo largo del proceso de cocción ocurren los siguientes procesos químicos y físicos:

- Salto de Horno: Al ingresar el pan al horno, continúa el proceso de fermentación durante un breve periodo, generándose gas dentro de la masa, y por ende, aumentando su volumen. Este gas logra quedar confinado dentro de la masa debido a la solidificación de una película elástica alrededor de cada burbuja. Durante este proceso se define el volumen final del pan.
- Inactivación de las levaduras: A los 41 [°C] de temperatura, las células de la levadura se inactivan y como consecuencia de ello no continúa el aumento de volumen del pan por fermentación. A las 55 [°C] el proceso de fermentación acaba producto de la muerte de la levadura.
- Inactivación de las encimas: Todos los azúcares fermentables continúan siendo fermentados por acción de las enzimas de las levaduras, hasta alcanzar una temperatura cercana a los 60 [°C] ~ 65 [°C], donde se genera su inactivación.
- Etapa Inicial: Durante esta etapa (que considera las mencionadas previamente) se genera un gradiente de temperatura entre la superficie de la masa y el centro de ella, aumentando su temperatura superficial a aproximadamente 100 [°C] durante los primeros 3 minutos (asumiendo temperatura de operación entre 200-230 [°C]), generándose una transferencia de calor por conducción desde la superficie al centro de la masa.
- Gelatinización del almidón: La gelatinización consiste en la capacidad de aumento de volumen de los gránulos de almidón al ser expuestos a agua y por efecto del aumento de temperatura. Estos se hinchan a su máxima capacidad, perdiendo su estructura cristalina, y formando un gel que recristaliza durante

el enfriado. Este proceso aumenta la digestibilidad del almidón. Físicamente, esta gelatinización tiene que ver con la esponjosidad del pan.

- Coagulación de las proteínas: Durante todo el proceso se produce la coagulación de las proteínas de la masa, y en consecuencia, la estabilización de la estructura esponjosa del pan.
- Deshidratación parcial: A medida que las capas de masa alcanzan los 100 [°C] la humedad libre de la masa se evapora en las "zonas de evaporación", escapando vapores de agua y alcohol del interior del pan, y comenzando a formarse la corteza del mismo. A este proceso se suma el vapor integrado al proceso, dependiendo del medio a través del cual se ingresa, y del tipo de pan que está en proceso de cocción.
- Generación y pardeamiento de corteza: Desde los 60 [°C] comienza a aumentar el espesor de la corteza de la superficie, perdiendo esta su elasticidad y se muestran las primeras señales de la caramelización de los azúcares de la corteza, lo cual va generando el color característico del pan. Este proceso se produce con mayor notoriedad desde 110-120 [°C] y culmina a los 200[°C], donde aparece el color marrón oscuro.

1.2. Industria panadera en Chile

Teniendo el segundo lugar del mundo con mayor consumo de pan por habitante (90 kilos por persona anual), y siendo este alimento el 2% de la canasta familiar del IPC [5], Chile es un país en el cuál la industria panadera tiene una relevancia considerable. Teniendo esto en cuenta, a continuación se presenta una caracterización económica de la Industria, como también de los hornos utilizados comúnmente por ella.

1.2.1. Caracterización económica

Durante el año 2013, el PIB de Chile correspondía a 277.238 millones de [US dólares], del cual la industria manufacturera representa alrededor de un 11% [6]. Según la misma fuente, el sector panadero en ese año representó el 4,2% de esta industria, contribuyendo al PIB con 552.048 [millones de pesos chilenos] [6] .

Según datos entregados por el SII [7], el año 2005, las panaderías tenían ventas de 34.173.833 [UF], el cual aumentando de manera considerable, ha llegado a 310.641.313 [UF] para el 2015, aumentando cerca de 10 veces sus ventas en 10 años.

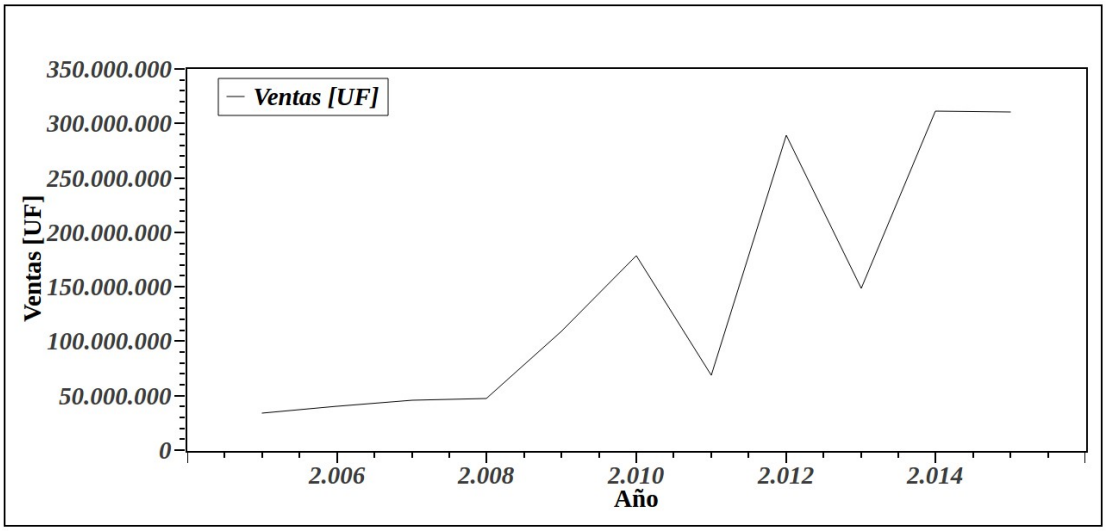

Figura N°1 : Ventas de panaderías desde el año 2005 hasta el año 2015 [7]

Por otro lado, tomando en cuenta la misma fuente, el número de empresas de la industria panadera han aumentado de manera considerable: de 9.099 en el año 2005 a 12.564 en el año 2015 [7]

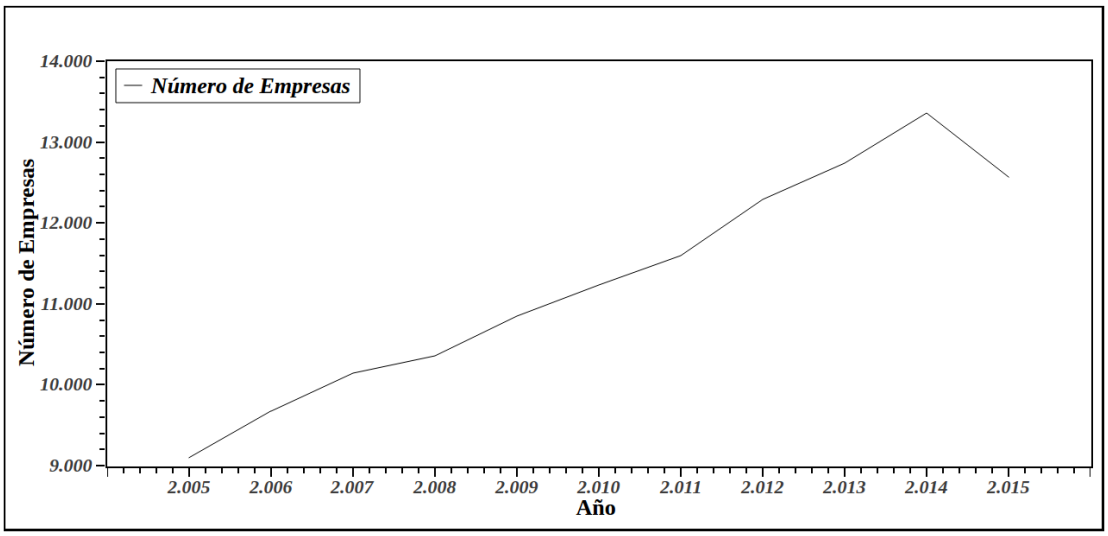

Figura N°2 : Número de empresas panaderas desde el año 2005 hasta el año 2015 [7]

1.2.2. Hornos utilizados por las panaderías chilenas

En la actualidad las panaderías de Chile utilizan mayoritariamente los siguientes tipos de hornos:

- **Horno de tubos anulares:** Hornos que poseen una cámara de combustión separada de la cámara de cocción, en los cuales la transferencia de calor se produce a través del calentamiento de tubos anulares (en los que circula por lo general agua destilada), los cuales rodean tanto la cámara de combustión como la de cocción. En este tipo de hornos se pueden utilizar distintos combustibles: leña, gas, petróleo, entre otros.

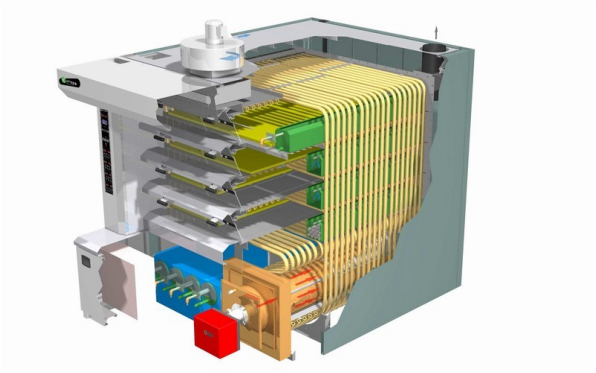

Figura N°3 : Imagen en corte de un horno de tubos anulares [8]

- **Hornos Ciclotérmicos:** Hornos que poseen cámaras de combustión y cocción separadas, en los que la transferencia de calor se genera, o a través del calentamiento del aire que se encuentra dentro de la cámara de combustión utilizando un quemador de combustible (por lo general a gas o petróleo), circulando el aire caliente (en conjunto con los gases de escape de la combustión) o utilizando calderas que calientan algún tipo de fluido térmico, los cuales calientan posteriormente radiadores que se encuentran dentro de la cámara de cocción, los cuales entregan el calor a la masa de pan. Dependiendo de si utiliza los gases de escape calientes o fluido térmico, la descarga de gases de escape se lleva a cabo desde el ducto de gases de escape del horno o desde la caldera respectivamente

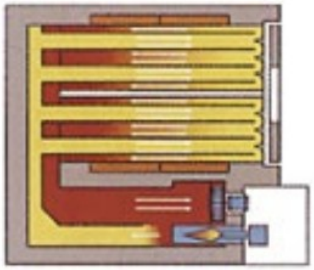

Figura N°4 : Imagen de un horno ciclotérmico [9]

- **Hornos Rotativos o Rotatorios:** Hornos que utilizan diversas fuentes de energía (por lo general gas y electricidad), que poseen bandejas rotativas, a las cuales llega el calor por convección a través de un ventilador que desplaza el aire caliente hacia ellas.

Figura N°5 : Imagen de un horno rotatorio [10]

- **Horno Chileno:** Si bien son minoría dentro de los hornos utilizados por panaderías, estos hornos tienen relevancia en tanto típicos de nuestro país. Estos consisten en una cámara única, que es construida a partir de ladrillos refractarios, cubiertos de alta cantidad de arena, y luego las respectivas murallas, techo y chimenea del mismo. En esta cámara ocurre tanto el proceso de combustión como el de cocción del pan. Sin embargo el funcionamiento difiere de los hornos antes mencionados. En este caso, el combustible (por lo general leña) ingresa durante la noche (periodo en el que no se cuece pan) con el objetivo de calentar el horno hasta una temperatura alta (por lo general entre los 300-350 [°C]). Debido a la alta inercia térmica de este horno, las temperaturas se mantienen durante parte importante del día, permitiendo a las panaderías producir solo con una carga de leña en todo el día.

Figura N°6 y N°7 : Fotos de horno chileno de Panadería Placeres

1.3. Objetivos

Los objetivos de la presente memoria de título son los siguientes:

1.3.1. Objetivo general

En el marco del proyecto Impacta Energía denominado “Quemadores de medios porosos para panaderías eficientes”, el presente trabajo tiene como objetivo general la evaluación técnica del proceso de combustión de gas licuado y de eficiencia energética de un horno industrial panadero.

1.3.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos son:

1. Implementar un sistema de medición de flujos, temperaturas y medición de gases de combustión en horno industrial panadero.
2. Evaluar temperaturas de operación del horno (refractarios, aire interior, y gases de escape) para diferentes potencias de operación.
3. Medir las concentraciones de los gases de escape para diferentes potencias de operación.
4. Evaluar las temperaturas de cocción de pan(es) en el horno.
5. Analizar la eficiencia energética del horno industrial y plantear posibles optimizaciones del proceso.

CAPÍTULO 2

2. DISEÑO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

2.1. Características técnicas de horno

A continuación se presentan las características técnicas del horno analizado durante la presente memoria de título.

Tabla N°1 : Características técnicas de horno

Marca	Topgas
Modelo	HSI 58-1
Tipo de Combustible	GLP
Presión	28 [mbar]
Consumo término nominal	9,5 [kW]
Consumo nominal	0,908 [m³/h] – 692 [g/h]
Fecha de Fabricación	2015 - 12
Organismo Certificador	Certpro
Certificado de aprobación	G-011-16-0035

2.2. Diseño experimental

Para poder llevar a cabo el proceso de análisis del horno, se ha diseñado e implementado una instalación de gas para así alimentar la combustión que ocurre en el horno. Este consiste, como muestra la Figura N°8, en la utilización de un cilindro de GLP de 45 kg, una línea de cañería de cobre que llega, primero al controlador de flujo (a través del cual se controla y mide el caudal de GLP), y luego continúa hacia el horno (se anexan fotos de la instalación en ANEXO 1).

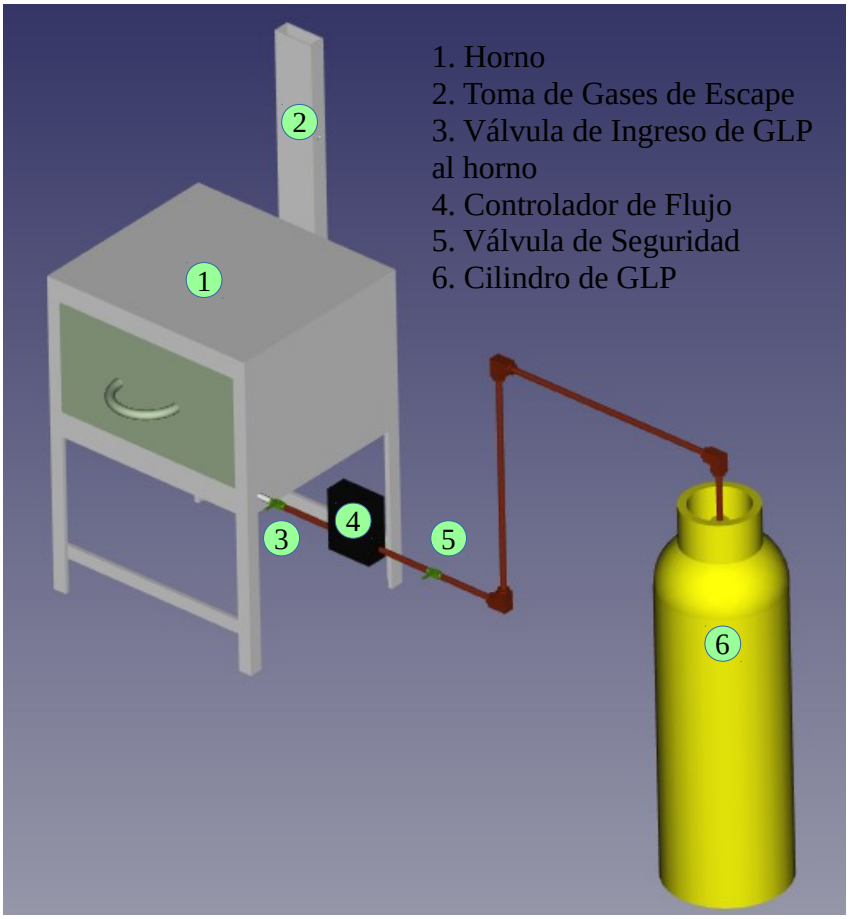

Figura N°8 : Modelo 3D de instalación para mediciones

Por otro lado, el horno se modifica con la instalación de 8 placas, con el objetivo de instalar termopares que se utilizarán para la medición de temperaturas, las cuales irán conectadas a un adquisidor de datos, el que a su vez estará conectado a un computador a través de puerto USB para así procesar la información obtenida.

Se considera además, como parte del diseño experimental, la masa de pan utilizada durante el proceso de medición.

2.2.1. Perfil de temperatura de horno

Para la construcción del perfil de temperatura, se hará uso de la información obtenida a través del uso de los termopares instalados al interior y exterior del horno : 4 en ladrillos refractarios, 4 en las esquinas superiores del horno y 4 en paredes externas. Disposición y numeración de termopares se detalla desde la Figura N°9 a la Figura N°14.

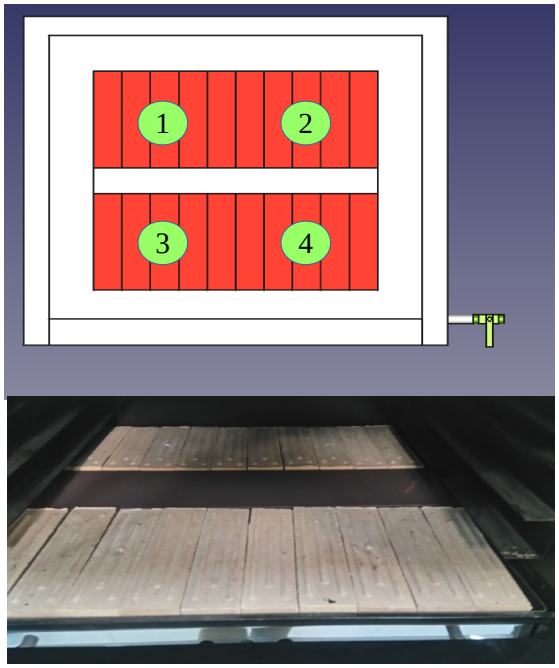

Figura N°9 y N°10 : Modelo 3D de instalación de termopares en ladrillos y fotografía de ladrillos en horno.

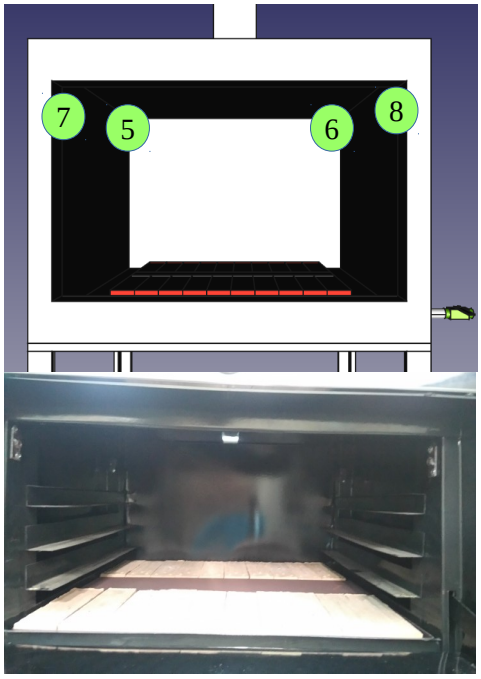

Figura N°11 y N°12 : Modelo 3D de instalación de termopares en interior de horno y fotografía de interior de horno.

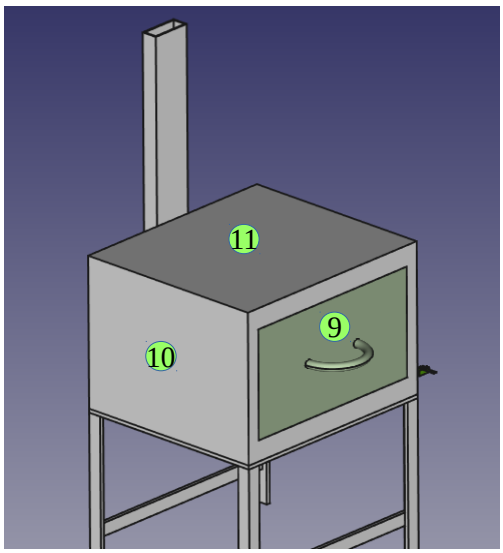

Figura N°13 : Modelo 3D de instalación de termopares en exterior de horno

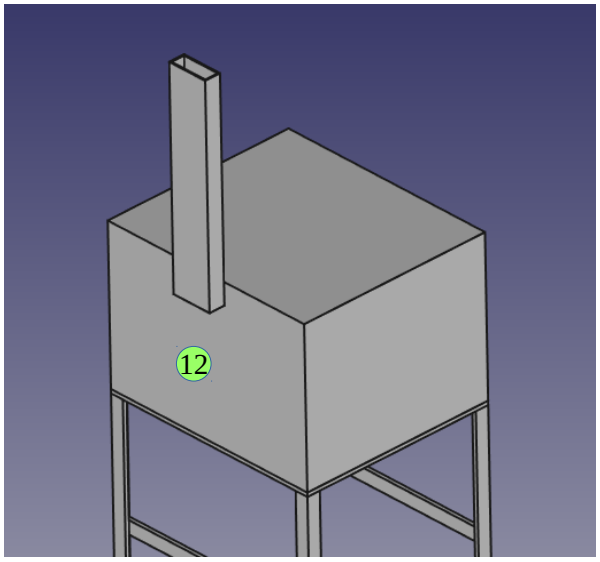

Figura N°14 : Modelo 3D de instalación de termopares en parte posterior de horno

Teniendo la información, se procederá a elaborar el perfil de temperatura, tanto en términos gráficos como a nivel numérico.

2.2.2. Registro de las temperaturas de cocción de pan en el horno

Para el registro de temperaturas en el pan durante el proceso de cocción se utiliza un termopar, el cual es introducido en la masa previo al proceso de cocción, y luego reemplazado en nuevos panes a medida que se va cociendo el pan seleccionado para portar el termopar. Este termopar conectado al módulo adquisidor de datos, entrega las temperaturas del pan.

2.2.3. Instrumentos de medición

Los instrumentos utilizados durante el proceso de medición son los siguientes:

- **Termopares:**
  - 13 Termopares tipo K, con aislamiento térmico PFA, de 2 [m] de largo, 0,5 [mm] diámetro.
    - Rango: -129 a 1.372 [°C] (-200 a 2.502 [°F])
  - Distribución:
    - 4 termopares destinados a los ladrillos
    - 4 termopares internos ubicados en la parte superior de la cámara de cocción
    - 4 termopares destinados a la parte externa (uno en una pared vertical y otro en la pared horizontal superior)
    - 1 termopar destinado a medir la temperatura de pan

- **Datalogger**
  - Marca: Omega
  - Módulo de adquisición de datos USB de entrada de tensión/termopar de 16 canales

- **Analizador de gases**
  - Marca: Boston
  - Modelo: HD BST 311
  - Rango y resolución de parámetros:

Tabla N°2 : Especificaciones técnicas de analizador de gases [11].

Parámetro	Tipo de sensor	Rango de medida	Resolución
O_2	Electroquímico	0 ~ 21%	0,1 % vol
CO-2000	Electroquímico	0 ~ 2000 [ppm]	1 [ppm]
NO	Electroquímico	0 ~ 1000 [ppm]	1 [ppm]
SO_2	Electroquímico	0 ~ 2000 [ppm]	1 [ppm]
CO_2	Calculado	0 ~ 100% vol	0,1 % vol
NO_X	Calculado	0 ~ 1500 [ppm]	1 [ppm]
T° Gases de combustión	Tc K	0 ~ 1000 [°C]	1 [°C]
Presión	Semiconductor	-50 ~ 11000 [Pa]	1 [Pa]

Figura N°15 : Fotografía de analizador de gases Boston HD 311 [12].

- **Detector de fugas**
  - Marca: Inficon
  - Modelo: Gas-Mate

Figura N°16 : Fotografía de detector de fugas Inficon Gas Mate.

- **Controlador de flujo**

Tabla N°3: Especificaciones técnicas de Controlador de Flujo. [13]

Marca	Aalborg
Modelo	GFC37
Gas medido	CH4
Rango de Caudal	0-30 [L/min]
Resolución	0,01 [L/min]

Figura N°17 : Fotografía de analizador de gases Aalborg

- **Termohigrómetro ambiental genérico:**

Tabla N°4 : Especificaciones técnicas de termohigrómetro ambiental. [14]

Rango de temperatura		Resolución
Interior	*En sonda*	1 [°C]
- 10 ~ 50 [°C]	- 50 ~ 70 [°C]	
Rango de humedad		Resolución
0 ~ 99 % RH		1%

- **Balanza**

Tabla N°5 : Especificaciones técnicas de balanza. [15]

Marca	Maigas	
Modelo	DY208E	
Dimensiones	345 x 330 x 110	[mm]
Dimensiones plataforma	345 x 230	[mm]
Consumo eléctrico	5	[W]
Rango	200 - 30000	[gr]
Resolución	5	[gr]

2.3. Procedimiento experimental

A continuación se presenta el procedimiento experimental del presente trabajo de título, el cual fue llevado a cabo en su totalidad en el Laboratorio de Termofluidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

2.3.1. Elementos y condiciones previas a la medición

A continuación se describen los elementos y condiciones previas a la medición considerados metodológicamente durante el procedimiento experimental del presente trabajo de título.

2.3.1.1. Elementos y condiciones de seguridad

- Requisito de Personal del Laboratorio: Se debe avisar por lo menos con un día de anticipación que se llevarán a cabo mediciones en laboratorio. Además, en el día de la medición, se debe verificar que exista a lo menos un funcionario de Laboratorio de Termofluidos.
- Vestimenta e indumentaria de seguridad: Se debe utilizar overol y zapatos de seguridad, y en el lugar de trabajo deben haber guantes de cuero disponibles para su uso.
- Extintor: Se debe chequear que en el lugar de trabajo se encuentre un extintor, y que esté en buenas condiciones para su uso.
- Verificación de conexiones de gas: Hacer una revisión visual de las conexiones, y posteriormente, hacer una prueba abriendo las válvulas de gas para chequear con el detector de fugas que no existan fugas en las conexiones.

- Salida de Emergencia: Asegurar de que exista siempre una salida de emergencia disponible durante el proceso de medición.

2.3.1.2. Elementos y condiciones de operación

- Preparación de instrumentos de medición: Instrumentos de medición deben estar instalados o disponibles para su uso en el lugar de trabajo previo al comienzo de la medición. Esto involucra a termopares, analizador de gases, balanza, termohigrómetro y detector de fugas.
- Preparación de Insumos: Asegurar que la masa de pan (en este caso hallulla) y otros insumos necesarios para llevar a cabo el procedimiento de medición (fósforos o encendedor) se encuentren en el lugar de trabajo.
- Verificar cilindros: Verificar la presión de cilindros, o su masa (a través de una *inspección visual),* para tener certezas si se cuenta con la cantidad de combustible necesaria para llevar a cabo la medición.
- Masar bandejas de pan: Se deben masar en la balanza cada una de las tres bandejas con masa pan utilizadas durante el proceso de medición, y registrar datos .

2.3.2. Procedimiento de medición

A continuación se describen los pasos que se llevaron a cabo durante las mediciones durante el funcionamiento del horno:

- Encender computador y dar inicio a software Personal Daq View Plus, verificar que software esté preparado para medir temperaturas con cada uno

de los termopares instalados. Luego dar inicio a la medición de temperaturas con software.

- Abrir llave de paso de gas integrada en cilindro, luego llave de paso de seguridad, luego la llave de paso integrada al horno.
- Ya que controlador de flujo está seteado como normal-cerrado, se abre con llave hasta su máxima capacidad.
- Luego se procede a encender el horno utilizando la llave moduladora de potencia y el fósforo o encendedor, encendiendo primero el piloto, y luego modificando el caudal de gas con la misma llave para la medición (máximo o mínimo en este caso).
- Luego de esto comienzan las tandas de medición cada 5 minutos aproximadamente, las cuales se repiten a lo largo de todo el proceso de medición. Cada una de ellas consiste en lo siguiente:
    - Registrar en formulario hora de medición
    - Registrar en formulario temperatura de termómetro integrado a horno
    - Registrar en formulario humedad y temperatura ambiental desde el termohigrómetro
    - Registrar en formulario caudal de gas desde controlador de flujo
    - Registrar en formulario presión, temperatura, y composición de gases de escape desde analizador de gases
- Las mediciones se deben llevar a cabo normalmente hasta que el termómetro integrado en el horno indique 220 [°C], temperatura que se considera como idónea para llevar a cabo la cocción del pan. En este punto, el estudiante usa guantes de cuero para preparar la bandeja que ingresará al horno para que sea cocida la masa de pan. Se abre la puerta del horno, se ingresa la bandeja, y previo al cierre de la puerta se instala termopar en un pan. Para las mediciones del presente trabajo este termopar se ha instalado siempre en el pan que se encuentra, desde la perspectiva del estudiante, más cercano a la puerta y al

lado izquierdo del horno, con el objetivo de estandarizar la medición de temperatura en la masa de pan durante el proceso de cocción.

- Luego, continúan las mediciones cada 5 minutos, a las que previamente se regula el caudal de gas con el objetivo de mantener la temperatura de 220 [°C] medida por el termómetro integrado en el horno, hasta que hayan pasado aproximadamente entre 15 a 20 [min] de cocción, donde se debe retirar la bandeja (con la precaución de usar guantes de cuero), retirar el termopar instalado en el pan, cerrar la puerta del horno, luego masar la bandeja con pan cocido, vaciar bandeja en una bolsa, para así masar la bandeja sin pan. Se deben registrar los valores medidos con la balanza en el formulario utilizado.
- Los dos puntos anteriores se repiten hasta haber concluido con la tercera bandeja el proceso de cocción y medición.
- Posterior a esto, se cierra el paso en la llave moduladora de caudal de gas en el horno, y continúan las mediciones hasta llegar a una temperatura cercana a la inicial (Temperatura inicial ± 20 [°C] indicados en el termómetro integrado al horno), con lo cual finaliza la medición, y se detiene la medición de temperatura en el software Personal Daq View Plus.

2.3.3. Posterior a la medición

A continuación se describen los elementos posteriores a la medición considerados metodológicamente durante el procedimiento experimental del presente trabajo de título.

2.3.3.1. Elementos y condiciones de seguridad

- Cerrar válvulas: Luego de terminada la medición, se deben cerrar la válvula de paso de gas del horno, la válvula de paso de gas de seguridad y las válvulas de paso integradas en el cilindro de gas.

2.3.3.2. Elementos y condiciones de operación

- Ordenar instrumentos de medición, insumos, bandejas y ropa de seguridad en los lugares asignados dentro del laboratorio
- Limpiar bandejas utilizadas durante proceso de medición
- Apagar computador
- Avisar a responsable de laboratorio que medición ha finalizado.

CAPITULO 3

3. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE DATOS

Para poder caracterizar el horno, se llevará a cabo la siguiente metodología, la cual tendrá como objetivo caracterizar las temperaturas del horno, llevar a cabo balances de masa y energía, teniendo como volumen de control el horno, registrar las temperaturas de cocción de pan en él, utilizar indicadores de análisis, y finalmente rendimiento de combustión y quemado.

3.1. Balance de masa

En el presente balance másico, considera el flujo de masa que ingresa tanto a través de la linea de GLP, y a través de la parte inferior del horno, y el flujo saliente como GE. Es decir:

$$\dot{m}_{aire} + \dot{m}_{glp} = \dot{m}_{gases\,de\,escape} \qquad \textbf{(1)}$$

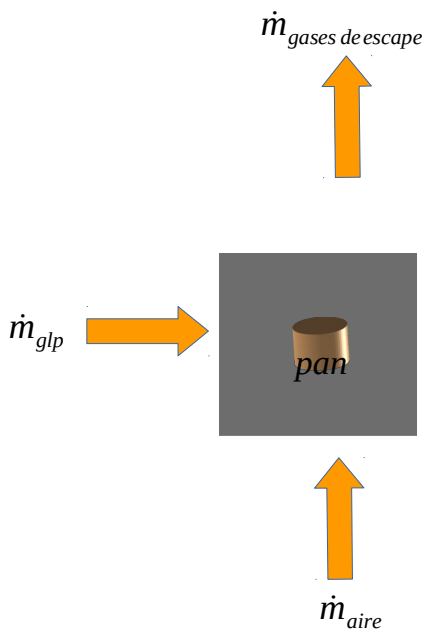

Figura N°18 : Balance de masa en horno

$\dot{m}_{aire}$ = *Flujo másico de aire que ingresa al horno.*

$\dot{m}_{glp}$ = *Flujo másico de GLP*

$\dot{m}_{gases\ de\ escape}$ = *Flujo másico de GE*

- ***Flujo másico de GLP***

Para el cálculo del flujo másico de GLP se utilizarán dos metodologías:

- ***Flujo másico promedio de GLP:***

$$\dot{m}_{glp_{prom}} = \frac{\rho * \sum_{i=1}^{n} \dot{V}_i * t_i}{t_m} \qquad \textbf{(2)}$$

$\dot{m}_{glp_{prom}}$ = *Flujo másico promedio de GLP*

$\dot{V}_i$ = *Flujo volumétrico de GLP durante el periodo i*

t_i = *Tiempo correspondiente al periodo i*

t_m = *Tiempo total de medición*

ρ_{glp} = *Densidad de GLP*[1]

- ***Flujo másico instantáneo de GLP:*** $\dot{m}_{glp_{ins}} = \rho_{GLP} * \dot{V}_{glp}$ **(3)**

$\dot{m}_{glp_{ins}}$ = *Flujo másico instantáneo de GLP*

ρ_{glp} = *Densidad de GLP*[2]

$\dot{V}_{glp}$ = *Flujo volumétrico de GLP*

- ***Obtención de datos.***

Para obtener el valor del flujo másico de GLP, se utilizará el controlador de flujo, con el cual logramos medir el flujo volumétrico de GLP, y los tiempos medidos serán tomados por un cronómetro.

- ***Flujo másico de GE:*** $\dot{m}_{gases\,de\,escape} = \frac{P * \dot{V}_{g.e.} * M}{R * T}$ **(4)**

$\dot{m}_{gases\,de\,escape}$ = *Flujo másico de GE*

P = *Presión de GE*

$\dot{V}_{g.e.}$ = *Flujo volumétrico de GE*

M = *Masa molar de la mezcla*

R = *Constante universal de los gases ideales*[3]

1. Dato obtenido asumiendo composición 80/20 de propano/butano, utilizando como referencia manual Aalborg [13]
2. Ibíd.
3. Se considerará como constante R = 8,314472 [J / mol*K] [16]

T = *Temperatura de GE*

- ***Obtención de datos:***

Los datos de presión, y temperatura se obtienen a partir de los datos medidos por el analizador de gases. A continuación se detalla como se obtiene tanto el flujo volumétrico de GE, como la masa molar de la mezcla.

- ***Flujo volumétrico de GE:*** $\dot{V}_{g.e.} = A_{ducto} * v_{g.e.}$ **(5)**

$\dot{V}_{g.e.}$ = *Flujo volumétrico de GE*

A_{ducto} = *Área transversal de ducto de GE*

$v_{g.e.}$ = *Velocidad de GE*

- ***Obtención de datos***

El área transversal del ducto se obtiene a través de la medición de las dimensiones del ducto de GE haciendo uso de un flexómetro. A continuación se detalla como se obtiene la velocidad de GE.

- ***Velocidad de GE:*** $v_{g.e.} = \sqrt{\frac{2 * P_d}{\rho_{g.e.}}}$ **(6)**

$v_{g.e.}$ = *Velocidad de GE*

P_d = *Presión dinámica del flujo de GE*

$\rho_{g.e.}$ = *Densidad de la mezcla de GE*

- ***Obtención de datos***

La presión dinámica se obtiene a través del uso del analizador de gases. A continuación se detalla como se obtiene la densidad de los GE.

- ***Densidad de gases de escape:*** $\rho_{g.e.} = \frac{P * M}{T * R}$ **(7)**

P = *Presión de GE*

M = *Masa molar de la mezcla*

R = *Constante universal de los gases ideales*

T = *Temperatura de GE*

$\rho_{g.e.}$ = *Densidad de la mezcla de GE*

- ***Obtención de datos***

La presión y temperatura se obtienen a través del uso del analizador de gases. A continuación se detalla como se calcula la masa molar de la mezcla.

- ***Masa Molar de la Mezcla:*** $M = \sum_{i=1}^{n} M_i * x_{mi}$ **(8)**

M = *Masa molar de la mezcla*

M_i = *Masa molar de la especie i*

x_{mi} = *Fracción molar de la especie i*

- ***Obtención de datos:***

La fracción molar se obtiene a partir de la fracción volumétrica (que son iguales en tanto se considera el gas como ideal). La masa molar se obtiene de tabla periódica [17].

- ***Flujo de aire que ingresa al horno:*** $\dot{m}_{aire} = \dot{m}_{gases\ de\ escape} - \dot{m}_{glp}$ **(9)**

$\dot{m}_{aire}$ = *Flujo de aire que ingresa al horno.*

$\dot{m}_{glp}$ = *Flujo de GLP*

$\dot{m}_{gases\ de\ escape}$ = *Flujo de GE*

  - ***Obtención de datos***

Los flujos másicos de GE y de GLP se extraen de los cálculos previos (ecuaciones 2, 3 y 4).

3.2. Balance de Energía

Para poder llevar a cabo el balance energético, se considerará el flujo de energía que ingresa a través de la combustión del gas, y como pérdidas se considerará el flujo de energía por gases de escape, como también el flujo de energía por convección y por radiación a través de las paredes.

Por lo tanto, si consideramos como volumen de control al horno, el balance energético sería el siguiente:

$$\dot{Q}_{glp} = \dot{Q}_{útil} + \dot{Q}_{gases\,de\,escape} + \dot{Q}_{otros} \quad \textbf{(10)}$$

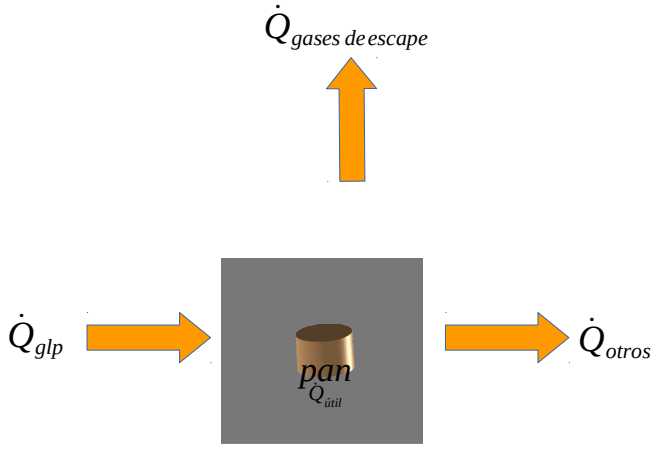

Figura N°19 *: Balance de energía en horno*

$\dot{Q}_{útil}$ = *Flujo de energía utilizado en cocción de pan*

$\dot{Q}_{gas}$ = *Flujo de energía debido a combustión de GLP*

$\dot{Q}_{gases\,de\,escape}$ = *Flujo de energía debido a pérdidas por GE.*

$\dot{Q}_{otros}$ = *Flujo de energía debido a otras pérdidas*

- ***Flujo de energía utilizado en cocción de pan*** $\dot{Q}_{útil} = \dfrac{m_{pan} * C_p * (T_f - T_i)}{t_m}$ **(11)**

$\dot{Q}_{útil}$ = *Flujo de energía utilizado en la cocción del pan*

m_{pan} = *Masa de pan ingresada a horno*

C_p = *Calor específico del pan*[4]

T_f = *Temperatura final*

T_i = *Temperatura inicial*

4. El dato a utilizar como poder calorífico de la masa del pan será C_p = 2,7 [J/ g*°C] [19]

t_m = *Tiempo de medición*

- ***Obtención de datos***

La masa de pan se obtiene haciendo uso de la balanza. Las temperaturas se obtienen a través de termopares instalados en los panes, y el tiempo de medición se obtiene a través del uso de cronómetro.

- ***Flujo de energía por combustión de GLP:*** $\dot{Q}_{glp} = \dot{m}_{glp} * PCI$ **(12)**

$\dot{Q}_{glp}$ = *Flujo de energía por combustión del GLP*

$\dot{m}_{glp}$ = *Flujo másico de GLP*

PCI = *Poder calorífico inferior [18]*

- ***Obtención de datos***

El flujo másico de GLP hacia el horno se obtiene a través de las ecuaciones 2 y 3. PCI se obtiene de la Resolución 2063 del Ministerio de Salud, del año 2005 [18].

- ***Flujo de energía por GE***

  - ***Volumen expulsado durante medición:*** $V_{tot} = \dot{V}_{g.e.} * t_m$ **(13)**

$\dot{V}_{g.e.}$ = *Flujo volumétrico de GE*

V_{tot} = *Volumen total expulsado durante medición*

t_m = *Tiempo de medición*

- ***Obtención de datos***

El flujo volumétrico de gases de escape se obtiene según lo planteado en ecuación 5, y el tiempo de medición se obtiene utilizando un cronómetro.

- ***Volumen especie:*** $V_{esp} = V_{tot} * x_{v\,esp}$ **(14)**

V_{esp} = *Volumen de la especie*

V_{tot} = *Volumen total expulsado durante medición*

$x_{v\,esp}$ = *Parte volumétrica que corresponde a la especie analizada*

- ***Obtención de datos***

El volumen total se obtiene según lo planteado previamente en ecuación 13. La parte volumétrica se obtiene haciendo uso del analizador de gases[5].

- ***Capacidad calorífica de especie*** $C^o_{pi} = a_1 + a_2 * T + a_3 * T^2 + a_4 * T^3$ **(15)**

C^o_{pi} = *Capacidad calorífica de especie i*

R = *Constante universal de los gases*

a_i = *Constante de polinomios NASA*

T = *Temperatura de GE*

5. Se asumirá que la parte no medida por el analizador de gas corresponderá a nitrógeno gaseoso (N_2)

- ***Obtención de datos***

La temperatura se obtiene a través del uso del analizador de gases. Los polinomios NASA se obtienen de la bibliografía utilizada en el presente trabajo [16]

- ***Calor específico de la mezcla:*** $$C_{pm} = \sum^{n} x_{vi} * C^{o}_{pi} \qquad \textbf{(16)}$$

C_{pm} = *Calor específico de la mezcla*

x_{vi} = *Fracción volumétrica de la especie en la mezcla*

C^{o}_{pi} = *Capacidad calorífica de especie*

- ***Obtención de datos***

La capacidad calorífica de la especie se obtiene según lo planteado previamente en ecuación 15. La fracción volumétrica de la especie en la mezcla se obtiene a través del uso del analizador de gases.

- ***Entalpía sensible de la mezcla:*** $$h_s = \int_{T_o}^{T_f} C_{pm}\, dT \qquad \textbf{(17)}$$

h_s = *Entalpía sensible de la mezcla*

T_o = *Temperatura de referencia en K (298 K)*

T_f = *Temperatura de gases de escape*

C_{pm} = *Poder calorífico de la mezcla*

- ***Obtención de datos***

El poder calorífico de la mezcla se obtiene según lo planteado en ecuación 16. La temperatura de gases de escape se obtiene a partir del uso del analizador de gases.

- ***Flujo molar:*** $$\dot{n}=\frac{P*\dot{V}_{g.e.}}{R*T} \quad \textbf{(18)}$$

$\dot{n}$ = *Flujo molar*

P = *Presión mezcla*

$\dot{V}_{g.e.}$ = *Flujo volumétrico de GE*

T = *Temperatura de la mezcla*

R = *Constante universal de los gases*

- ***Obtención datos***

El flujo volumétrico de gases de escape se obtiene según lo planteado en ecuación 5. La presión y la temperatura se obtienen a través del uso del analizador de gases.

- ***Flujo de energía por pérdidas por GE:*** $$\dot{Q}_{gases\,de\,escape}=\dot{n}*h_s \quad \textbf{(19)}$$

$\dot{Q}_{gases\,de\,escape}$ = *Flujo de energía por pérdidas a través de GE*

$\dot{n}$ = *Flujo molar*

h_s = *Entalpía sensible de la mezcla*

- ***Obtención de datos***

El flujo molar y la entalpía sensible de la mezcla se obtienen según lo planteado previamente en ecuaciones 17 y 18.

- ***Flujo de energía debido a otras pérdidas:***

$$\dot{Q}_{otros} = \dot{Q}_{glp} - \dot{Q}_{gases\,de\,escape} - \dot{Q}_{útil} \qquad \textbf{(20)}$$

$\dot{Q}_{útil}$ = *Flujo de energía utilizado en cocción de pan*

$\dot{Q}_{glp}$ = *Flujo de energía debido a combustión de GLP*

$\dot{Q}_{gases\,de\,escape}$ = *Flujo de energía debido a pérdidas por GE*

$\dot{Q}_{otros}$ = *Flujo de energía debido a otras pérdidas*

- ***Obtención de datos***

Los flujos de energía utilizados en la cocción del pan, debido a combustión de gas y debido a pérdidas por gases de escape se obtienen según lo planteado previamente en ecuaciones 11, 12 y 19.

3.3. Eficiencia energética

- ***Masa de gas licuado de petróleo:***

$$m_{glp} = \sum_{i=1}^{n} \dot{m}_{glp_i} * t_i \qquad \textbf{(21)}$$

m_{glp} = *Masa de GLP*

$\dot{m}_{glp_i}$ = *Flujo másico de GLP durante un periodo i*

t_i = *Tiempo correspondiente al periodo i donde el flujo másico de GLP es constante*

- ***Obtención de datos***

El tiempo se obtiene utilizando un cronómetro, y el flujo másico de GLP se obtiene según lo planteado previamente en la ecuación 4.

- ***Energía generada debido a combustión de GLP:*** $Q_{glp} = m_{glp} * PCI_{glp}$ **(22)**

Q_{glp} = *Energía generada a partir de la combustión de GLP*

m_{glp} = *Masa de GLP*

PCI_{glp} = *Poder calorífico inferior del GLP [18]*

- ***Obtención de datos***

La masa de gas licuado de petróleo se obtiene según lo planteado previamente en ecuación 21. El poder calorífico inferior se obtiene de la Resolución 2063 del Ministerio de Salud, del año 2005 [18].

- ***Energía utilizada en cocción de pan:*** $Q_{útil} = m_{pan} * C_p * (T_f - T_i)$ **(23)**

$Q_{útil}$ = *Energía utilizada en la cocción del pan*

m_{pan} = *Masa de Pan*

C_p = *Calor específico del pan*[6]

T_f = *Temperatura final*

T_i = *Temperatura inicial*

- ***Obtención de datos***

La masa de pan se obtiene haciendo uso de la balanza. Las temperaturas se obtienen a través de termopares instalados en los panes.

- ***Eficiencia energética***

$$\mu = \frac{Q_{útil}}{Q_{glp}} \qquad \textbf{(24)}$$

μ = *Eficiencia horno*

$Q_{útil}$ = *Energía utilizada en la cocción del pan*

Q_{glp} = *Energía generada a partir de la combustión de gas licuado de petróleo*

- ***Obtención de datos***

La cantidad de energía utilizada en la cocción del pan y debido a combustión de GLP se obtienen según lo planteado previamente en ecuaciones 22 y 23.

6. El dato a utilizar como poder calorífico de la masa del pan será C_p = 2,7 [J/ g*°C] [19]

3.4. Indicadores

A continuación se agregan tres indicadores a considerar para el análisis:

- ***kg_{GLP} / QQ_{harina} :***

$$[kg_{GLP}/QQ_{harina}] = \frac{m_{glp}}{\frac{m_{pan}}{60[kg]}} \quad [7] \qquad \textbf{(25)}$$

$[kg_{GLP}/QQ_{harina}]$ = Indicador "kilogramos de GLP utilizados por Quintal de harina"

m_{glp} = Masa de GLP

m_{pan} = Masa de Pan

- ***Obtención de datos***

*L*a obtención de la cantidad masa de GLP utilizada se lleva a cabo según lo planteado previamente en ecuación 21. La masa de pan se obtiene haciendo uso de la balanza.

- ***kWh /QQ_{harina}:***

$$[kWh/QQ_{harina}] = [kg_{GLP}/QQ_{harina}] * PCI_{glp} \qquad \textbf{(26)}$$

$[kWh/QQ_{harina}]$ = *Indicador "kilowatt-hora producidos por la combustión de GLP por Quintal de harina"*

$[kg_{GLP}/QQ_{harina}]$ = *Indicador "kilogramos de GLP por Quintal de harina"*

PCI_{glp} = *Poder Calorífico Inferior del GLP*

7. En este indicador se divide la masa del pan por 60 [kg], en tanto se asume un rendimiento de 60 [kg] de pan por cada quintal de harina, rendimiento utilizado por FECHIPAN [21].

- ***Obtención de datos***

El indicador kg_{GLP}/QQ_{harina} se obtienen según lo planteado previamente en ecuación 25. El poder calorífico inferior se obtiene de la Resolución 2063 del Ministerio de Salud, del año 2005 [18].

- ***CLP $ / QQ$_{harina}$***

$$[CLP\,\$/QQ_{harina}]=[kg_{GLP}/QQ_{harina}]*[CLP\,\$/L_{GLP}]*(\frac{1}{\rho_{GLP}}) \quad \textbf{(27)}$$

$[CLP\,\$/QQ_{harina}]$ = *Indicador "Pesos chilenos gastados en consumo de combustible por Quintal de harina"*

$[kg_{GLP}/QQ_{harina}]$ = *Indicador "kilogramos de GLP utilizados por Quintal de harina"*

$[CLP\,\$/L_{GLP}]$ = *Precio en pesos chilenos de litro de GLP*

ρ_{GLP} = *Densidad del GLP*[8]

- ***Obtención de datos***

El indicador kg_{GLP}/QQ_{harina} se obtiene según lo planteado previamente en ecuación 25. El precio en pesos chilenos de litro de GLP se obtiene del informe semanal de variaciones de precios de combustibles, de ENAP [20].

8. Dato obtenido asumiendo composición 80/20 de propano/butano, utilizando como referencia manual Aalborg [13]

3.5. Rendimiento de combustión y de quemado

- ***Rendimiento de combustión*** $$R_c = \frac{CO_{2\ medido}}{CO_{2\ máximo\ teórico(\lambda=1)}} \quad \textbf{(28)}$$

Rc = *Rendimiento de combustión*

$CO_{2\ medido}$ = *CO_2 medido*

$CO_{2\ máximo\ teórico(\lambda=1)}$ = *Máximo teórico de CO_2 con un $\lambda=1$*

  - ***Obtención de datos***

El CO_2 medido se obtiene de los datos entregados por el analizador de gases. El CO_2 máximo teórico se obtiene a través de balance químico de la combustión, considerando λ igual a 1.

- ***Rendimiento de quemado*** $$R_q = \frac{CO_{2\ medido}}{CO_{2\ máximo\ teórico(\lambda real)}} \quad \textbf{(29)}$$

Rq = *Rendimiento de quemado*

$CO_{2\ medido}$ = *CO_2 medido*

$CO_{2\ máximo\ teórico(\lambda\ real)}$ = *Máximo teórico de CO_2 con un λ real*

  - ***Obtención de datos***

El CO_2 medido se obtiene de los datos entregados por el analizador de gases. El CO_2 máximo teórico se obtiene a través de balance químico de la combustión, usando λ medido.

- ***Balance químico de la combustión***

$$C_x H_y + \lambda A_{est}(O_2 + 3{,}76 N_2) \rightarrow xCO_2 + \left[\frac{y}{2}\right] H_2O + \lambda A_{est} 3{,}76 N_2 \qquad \textbf{(30)}$$

$C_x H_y$ = *Molécula de hidrocarburo con "x" átomos de carbono e "y" átomos de hidrógeno*

λ = *Coeficiente de exceso de aire*

A_{est} = *Aire estequiométrico*

x = variable x

y = variable y

- ***Obtención de datos***

El C_xH_y se obtiene de la composición del hidrocarburo a utilizar (en el caso del presente trabajo es 20% butano (C_4H_{10}), 80% propano (C_3H_8)), el λ puede ser real (medido por analizador de gases) o teórico (en caso de mezcla estequiométrica, es igual a 1), el aire estequiométrico se obtiene de bibliografía [22].

CAPITULO 4

4. PRESENTACIÓN DE DATOS

A continuación se presentarán los datos extraídos durante las mediciones llevadas a cabo para el presente trabajo de título, las cuales dividiremos en los datos recabados utilizando mínima potencia y máxima potencia en quemadores de horno, y las temperaturas registradas en el pan cocido.

4.1. Mínima potencia

A nivel general, la medición llevada a cabo a mínima potencia se hizo bajo las siguientes condiciones:

Tabla N°6 : Condiciones de medición de mínima potencia

Tiempo medición	04:16:39	[hh:mm:ss]
Rango temperatura ambiental	15,6 – 19,6	[°C]
Rango humedad ambiental	54 – 62	[%]
Caudal GLP en transciente	1,8	[l/m]
Rango Caudal GLP durante cocción	1,8 – 4,6	[l/m]
Masa de pan cocida	5,324	[kg]

Por otro lado, los datos registrados de las temperaturas tanto al interior como al exterior del horno son los siguientes:

4.1.1. Temperaturas horno

A continuación se presentan los perfiles de temperatura interior y exterior del horno estudiado durante la medición de mínima potencia.

4.1.1.1. Perfil de temperaturas de interior de horno

El perfil de temperaturas del interior del horno analizado se divide por motivos de análisis en perfil de temperatura registrado por medidor integrado, perfil de temperatura de paredes interiores, y perfil de temperatura en ladrillos refractarios.

4.1.1.1.1. Perfil de temperatura de horno, en medidor integrado

La Figura N°20 representa el registro de temperaturas entregadas por el medidor integrado en el horno durante el proceso de medición.

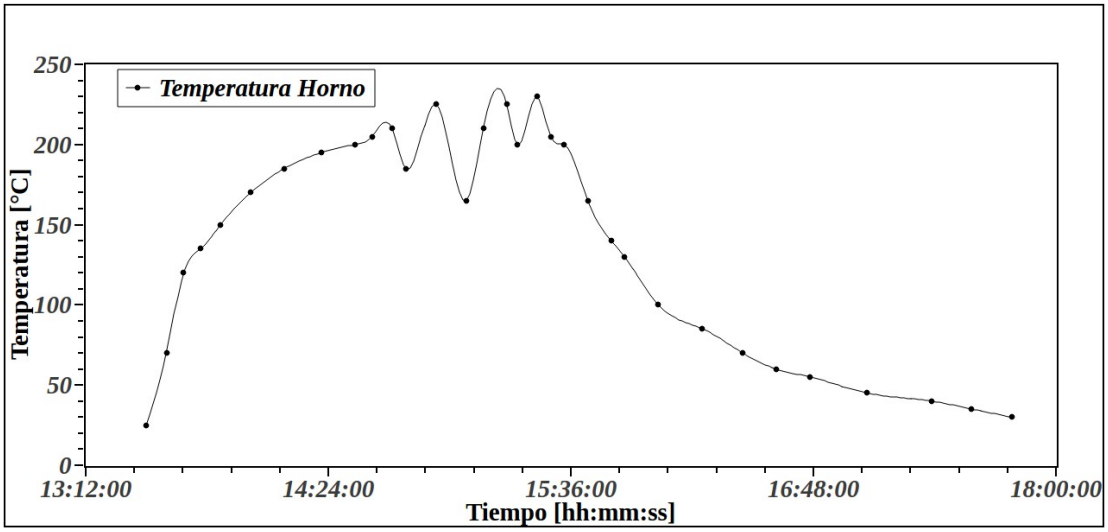

Figura N°20 : Perfil de temperatura de horno. Medición mínima potencia.

En la Figura N°20 se pueden distinguir con claridad tres tramos: El transiente inicial, el proceso de cocción (a las 14:45), y el apagado (transiente final), cerca de las 15:36. La temperatura máxima alcanzada durante el periodo de cocción son 240 [°C].

4.1.1.1.2. Perfil de temperaturas paredes interiores

La Figura N°21 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en las paredes internas del horno durante el proceso de medición.

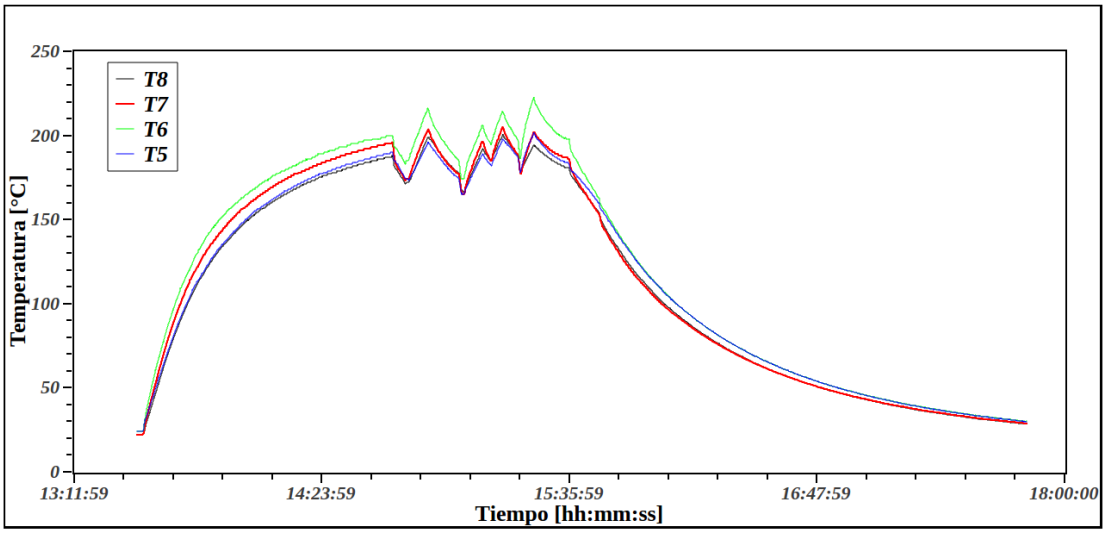

Figura N°21 : Perfil de temperatura de paredes interiores. Medición mínima potencia.

Al igual que en la Figura N°20, se puede dar cuenta en la figura n°21 de que se muestran tres etapas: Transiente inicial, cocción, y apagado. La temperatura máxima alcanzada son 220 [°C].

4.1.1.2. Perfil de temperaturas de ladrillos refractarios

La Figura N°22 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en los ladrillos refractarios ubicados al interior del horno durante el proceso de medición.

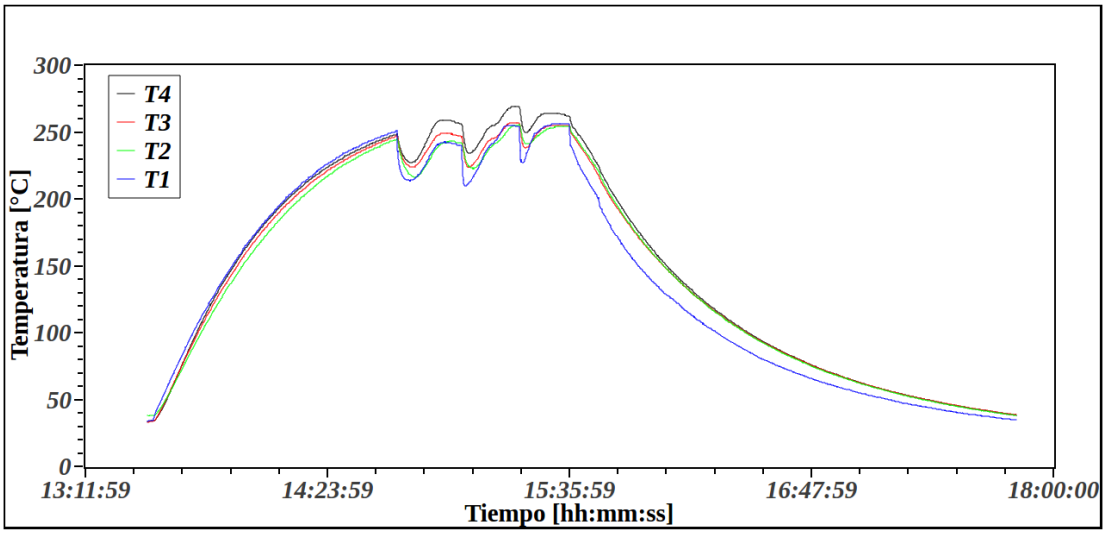

Figura N°22 : Perfil de temperatura de ladrillos refractarios. Medición mínima potencia.

Al igual que en las figuras previas, se puede dar cuenta de tres etapas: Transiente inicial, cocción, y apagado. La mayor temperatura alcanzada en los ladrillos es de 270 [°C]. Se observa una homogeneidad de temperaturas entre los ladrillos a lo largo del tiempo, con variaciones por debajo de los 20 [°C].

4.1.2. Perfil de temperaturas de paredes exteriores

La Figura N°23 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en las paredes internas del horno durante el proceso de medición.

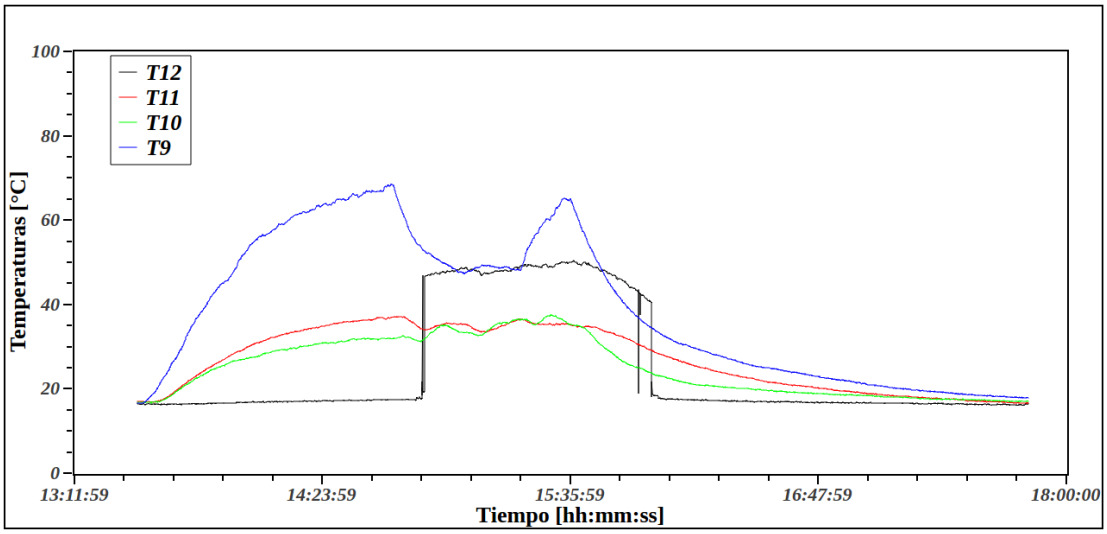

Figura N°23 : Perfil de temperatura de paredes exteriores. Medición Mínima Potencia.

Se puede observar que durante la presente medición el termopar 12 (que representa la pared posterior del horno) entrega errores de medición durante el proceso de medición. Sin embargo, para cuestiones de análisis se considerará como válida la información que se encuentra en el tramo medio de la curva del T12.

En ese sentido, se puede destacar que el termopar 9 (instalado en la puerta) es el que posee mayores temperaturas, donde aumenta considerablemente ya que la puerta tiene contacto directo con los GE, aunque esta temperatura va disminuyendo durante el periodo de cocción del pan; por otro lado, se destaca que la pared posterior también

posee un contacto directo con los gases producto a través del ducto, generando temperaturas mayores a las paredes que representan los termopares 10 y 11.

La mayor diferencia de temperatura ocurre a las 15:35 entre la pared lateral y la puerta del horno, de aproximadamente 30 [°C].

4.1.3. Emisiones

Las mediciones que guardan relación con las emisiones se presentan a continuación, siendo divididos para facilitar el análisis en temperatura de gases producto, composición de GE y presión dinámica de GE.

4.1.3.1. Temperatura de GE

La Figura N°24 representa el registro de temperaturas de GE entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

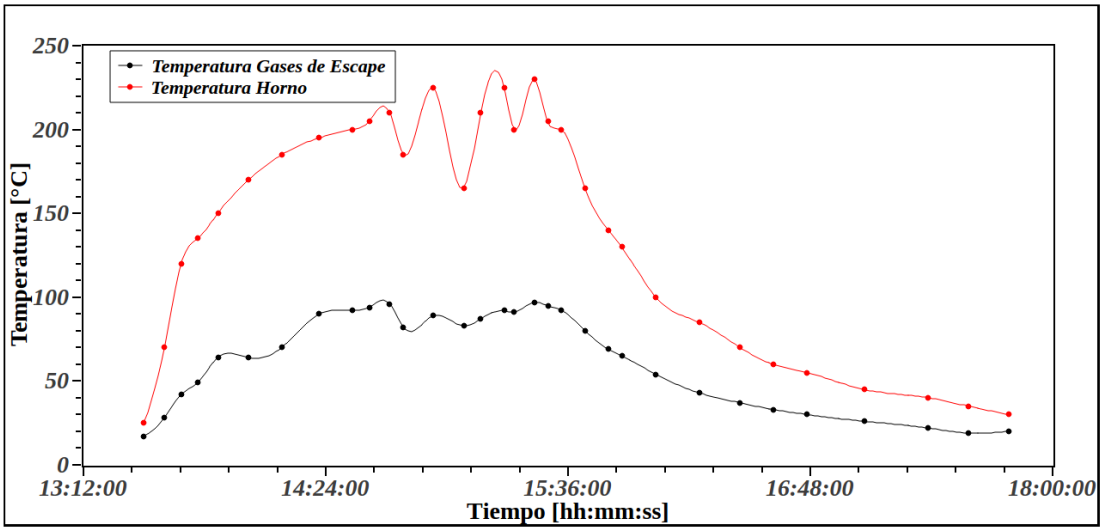

Figura N°24 : Temperatura de gases de rscape. Medición mínima potencia.

A partir de la Figura N°24 se puede dar cuenta de las tres etapas antes mencionadas (Transiente inicial, cocción, y apagado), y sin embargo, es menos notorio el cambio en las temperaturas de los gases de escape, donde la mayor temperatura registrada es de 90 [°C] aproximadamente.

4.1.3.2. Composición GE

A continuación se presenta el promedio de la composición de emisiones, y el perfil de composición de los GE.

4.1.3.2.1. Promedio emisiones

La Tabla N°7 presenta el promedio de la composición de emisiones medidas durante el periodo de funcionamiento del horno a mínima potencia:

Tabla N°7 : Promedio de emisiones. Medición Mínima Potencia.

Especie	[%]
CO_2	1,15
O_2	19,25
SO_2	0,00
CO	0,00
NO_x	0,00

Dentro de las emisiones medidas, existe una completa ausencia de dióxido de azufre, y bajos niveles de CO (en promedio 47 [ppm]) y NO_x (en promedio 0,3 [ppm])

4.1.3.2.2. Composición de GE (O2 y CO)

La Figura N°25 representa el registro de composición de GE entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

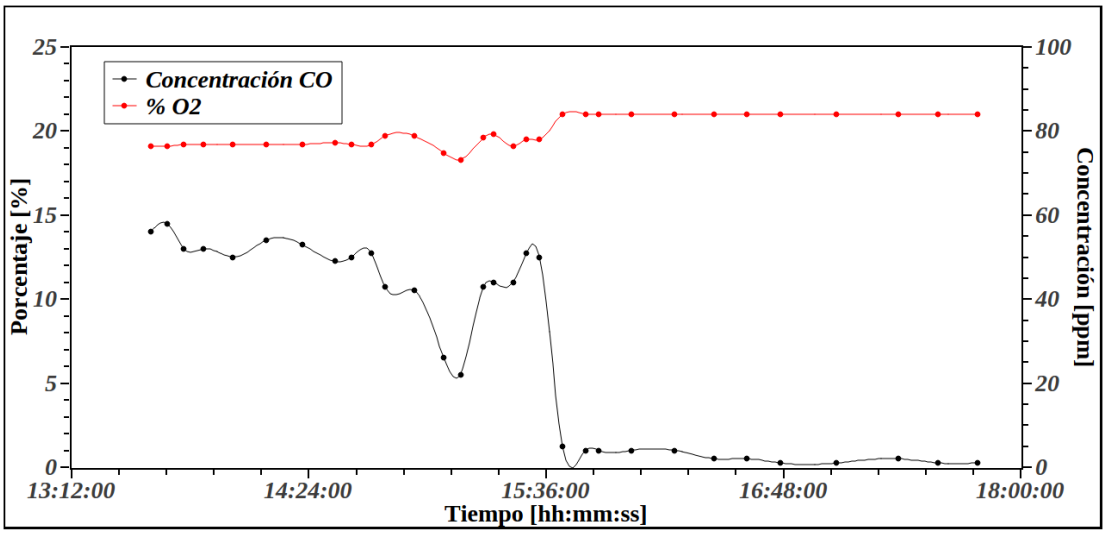

Figura N°25 : Composición de GE. Medición mínima potencia.

En esta figura se puede dar cuenta de que las variaciones de concentraciones ocurren en su mayoría en el periodo de cocción, debido al funcionamiento del quemador del horno estudiado y a las variaciones de temperatura ocurridas a partir del ingreso del pan.

4.1.3.3 Presión dinámica

La Figura Nº26 representa el registro de temperaturas de gases de escape y de presión dinámica entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

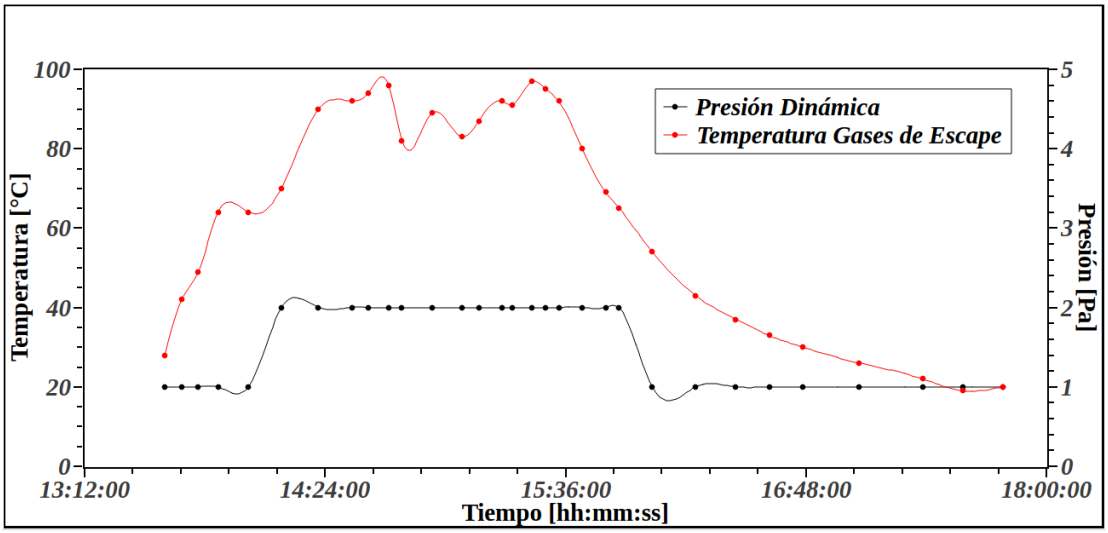

Figura N°26 : Presión dinámica. Medición mínima potencia.

No existen grandes variaciones de presión en los gases de escape a lo largo de la medición, esto a partir de que los gases de escape escapan también por la puerta del horno disminuyendo.

4.2. Máxima potencia

A nivel general, la medición llevada a cabo a máxima potencia se hizo bajo las siguientes condiciones:

Tabla N°8 : Condiciones de medición de máxima potencia.

Tiempo medición	02:50:55	[hh:mm:ss]
Rango temperatura ambiental	17,4 – 21,9	[°C]
Rango humedad ambiental	50 – 56	[%]
Caudal en transciente	4,6	[l/m]
Rango Caudal durante cocción	2,13 – 4,6	[l/m]
Masa de pan cocida	4,75	[kg]

Por otro lado, los datos registrados de las temperaturas tanto al interior como al exterior del horno son los siguientes:

4.2.1. Temperaturas horno

A continuación se presentan los perfiles de temperatura interior y exterior del horno estudiado durante la medición de máxima potencia.

4.2.1.1. Perfil de temperaturas de interior de horno

Al igual que en el caso de la medición de mínima potencia, el perfil de temperaturas del interior del horno analizado se divide por motivos de análisis en perfil de temperatura registrado por medidor integrado, perfil de temperatura de paredes interiores, y perfil de temperatura en ladrillos refractarios.

4.2.1.1.1. Perfil de temperatura de horno, en medidor integrado

La Figura N°27 representa el registro de temperaturas entregadas por el medidor integrado en el horno durante el proceso de medición.

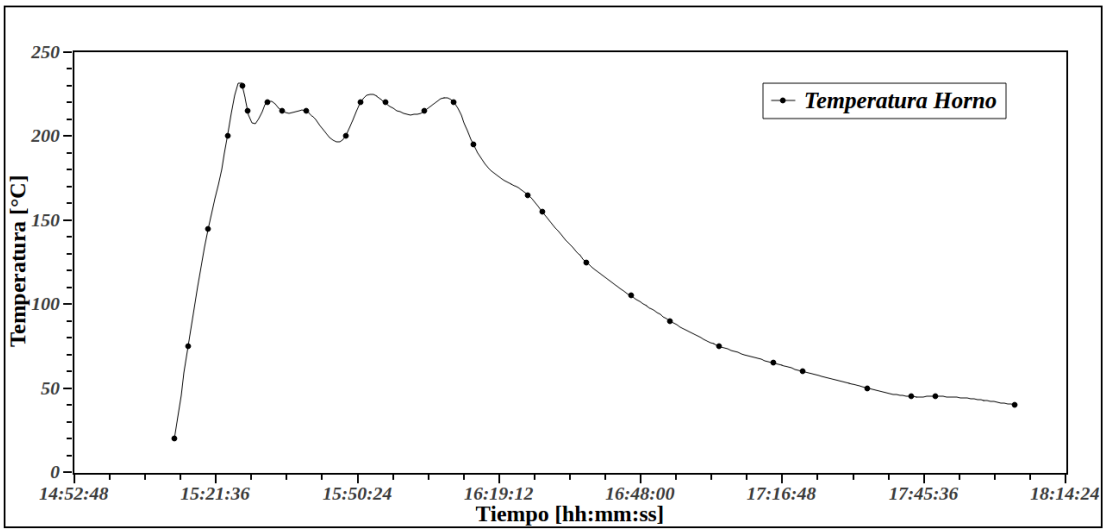

Figura N°27 : Perfil de temperatura de horno. Medición máxima potencia.

En la Figura N°27 se pueden distinguir con claridad tres tramos: El transiente inicial, el proceso de cocción (a las 15:27 aproximadamente), y el apagado (transiente final), cerca de las 16:17. La temperatura máxima alcanzada durante el periodo de cocción son 230 [°C].

4.2.1.1.2. Perfil de temperaturas paredes interiores

La Figura N°28 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en las paredes internas del horno durante el proceso de medición.

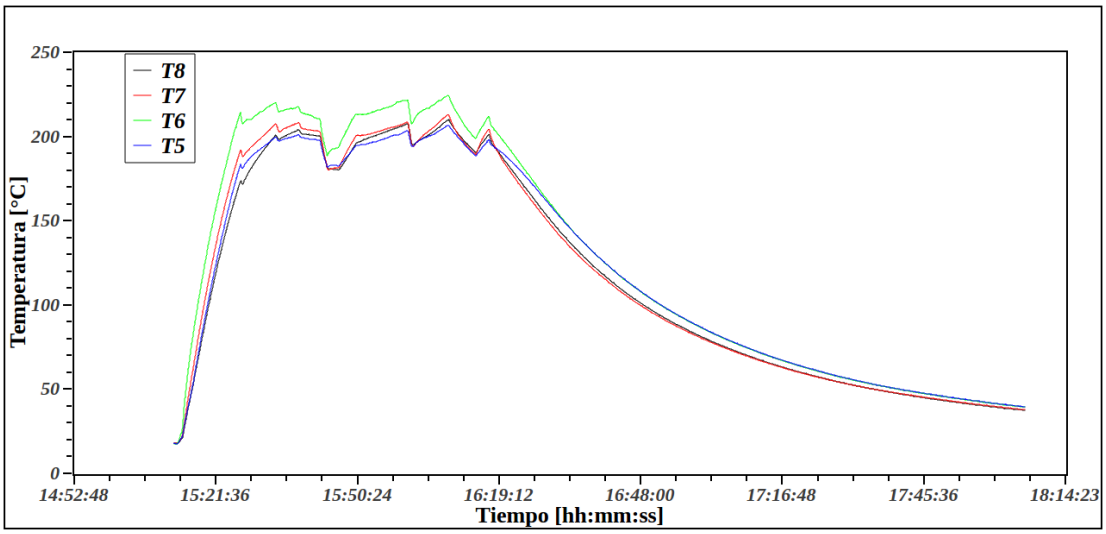

Figura N°28 : Perfil de temperatura de paredes interiores. Medición máxima potencia.

Al igual que en la Figura N°27, en la Figura N°28 se puede dar cuenta de que existen tres etapas durante la medición: Transiente inicial, cocción, y apagado. La temperatura máxima alcanzada son 220 [°C] y la mayor diferencia de temperatura es aproximadamente de 20 [°C].

4.2.1.2. Perfil de temperaturas en ladrillos refractarios

La Figura N°29 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en los ladrillos refractarios ubicados al interior del horno durante el proceso de medición.

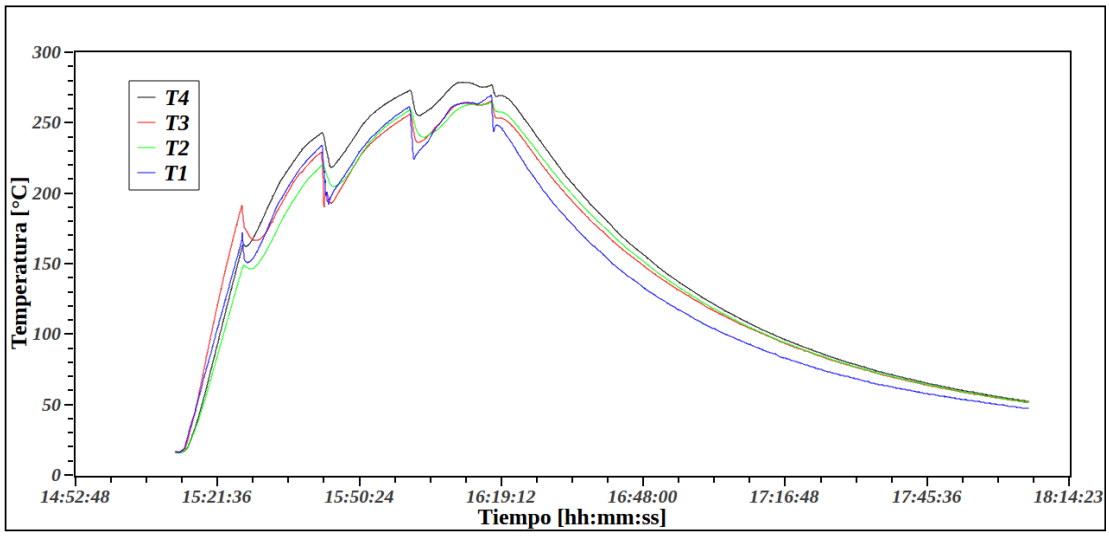

Figura N°29 : Perfil de temperatura de ladrillos refractarios. Medición máxima potencia.

Al igual que en la figura previa, en la Figura N°29 se puede dar cuenta de tres etapas en las curvas: Transiente inicial, cocción, y apagado. La mayor temperatura alcanzada en los ladrillos es de 280 [°C] aproximadamente. Se observa una homogeneidad de temperaturas entre los ladrillos a lo largo del tiempo, con variaciones por debajo de los 20 [°C].

En este caso, la forma del perfil de temperatura de los ladrillos refractarios difiere de las curvas generadas por los perfiles de temperatura de paredes internas y del horno. Esto da cuenta de las diferencias de las propiedades térmicas de los materiales que componen el horno y el de los ladrillos refractarios en particular.

4.2.2. Perfil de temperaturas de paredes exteriores

La Figura N°30 representa el registro de temperaturas entregadas por los termopares instalados en las paredes internas del horno durante el proceso de medición.

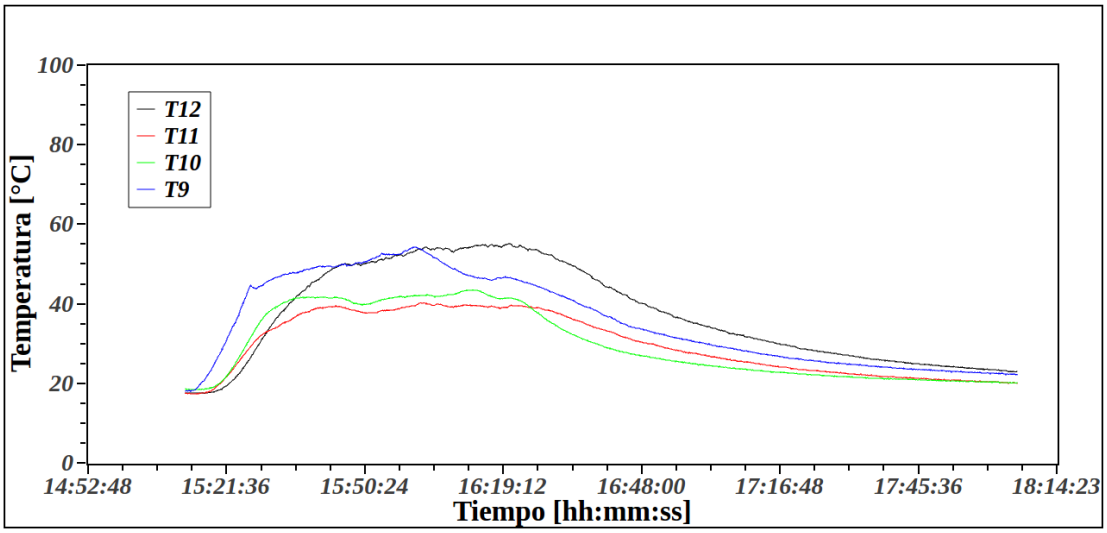

Figura N°30 : Perfil de temperatura de paredes exteriores. Medición máxima potencia.

A diferencia de la medición de mínima potencia, los perfiles de temperatura de las paredes externas tienden a ser más cercanos, con diferencias menores a 20 [°C] entre los puntos de menor y mayor temperatura. Sin embargo se repite la tendencia en tanto son las temperaturas de la puerta y de la parte posterior del horno las que poseen mayores temperaturas a lo largo del proceso de medición.

4.2.3. Emisiones

Las mediciones que guardan relación con las emisiones se presentan a continuación, siendo divididos para facilitar el análisis en temperatura de GE, composición de GE y presión dinámica de GE.

4.2.3.1. Temperatura GE

La Figura N°31 representa el registro de temperaturas de GE entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

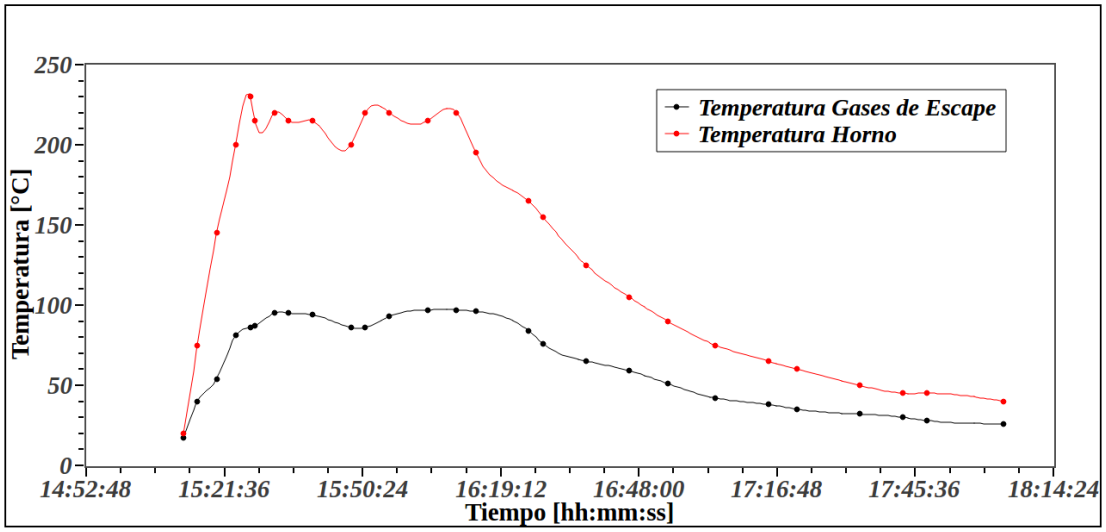

Figura N°31 : Temperatura de gases de escape. Medición máxima potencia.

A partir la Figura N°31 se puede dar cuenta de las tres etapas antes mencionadas (Transiente inicial, cocción, y apagado), y sin embargo, es menos notorio el cambio en las temperaturas de los GE, donde la mayor temperatura registrada es de 100 [°C] aproximadamente.

4.2.3.2. Composición GE

A continuación se presenta el promedio de la composición de emisiones, y el perfil de composición de los GE.

4.2.3.2.1. Promedio emisiones

La Tabla N°9 presenta el promedio de la composición de emisiones medidas durante el periodo de funcionamiento del horno a máxima potencia:

Tabla N°9 : Promedio de emisiones. Medición Máxima Potencia.

Especie	[%]
CO_2	1,72
O_2	18,42
SO_2	0,00
CO	0,00
NO_x	0,00

Al igual que en la medición de mínima potencia, existe una completa ausencia de dióxido de azufre, y bajos niveles de CO (en promedio 26 [ppm]) y NO_x (en promedio 4 [ppm])

4.2.3.2.2. Composición de GE (O_2 y CO)

La Figura N°32 representa el registro de composición de GE entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

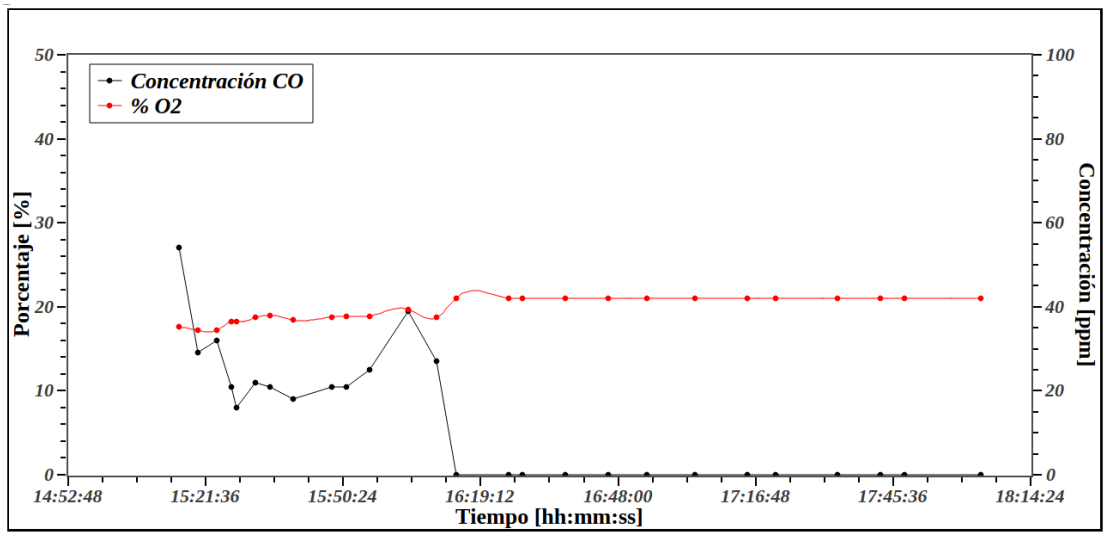

Figura N°32 : Composición de GE. Medición máxima potencia.

En esta figura, se puede dar cuenta que las variaciones de concentraciones ocurren en su mayoría previo al periodo de cocción, y en el periodo de cocción tienden a estabilizarse.

4.2.3.3 Presión dinámica

La Figura N°33 representa el registro de temperaturas de GE y de presión dinámica entregadas por el analizador de gases durante el proceso de medición.

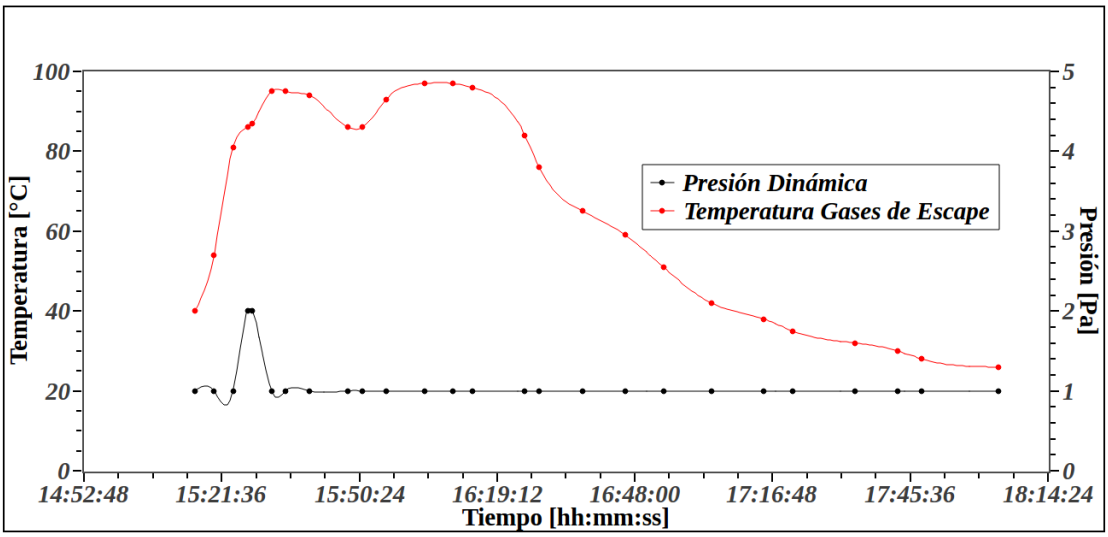

Figura N°33 : Presión dinámica. Medición máxima potencia.

No existen grandes variaciones de presión en los GE a lo largo de la medición, esto a partir de que los gases de escape escapan también por la puerta del horno disminuyendo.

4.3. Temperatura pan

A continuación se presentan los perfiles de temperatura obtenidos por el termopar instalado en el pan durante los distintos procesos de cocción de masa.

4.3.1. Mínima potencia

La Figura N°34 representa el registro de temperatura del termopar instalado en el pan durante la medición de mínima potencia.

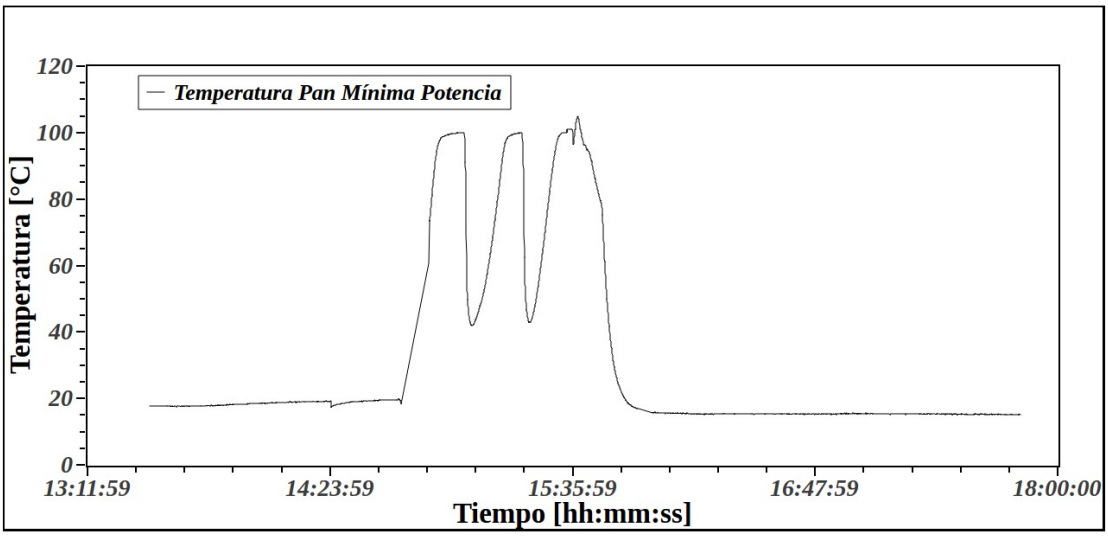

Figura N°34 : Perfil de temperatura de panes. Medición mínima potencia.

Los tres peaks de la curva, corresponden a los tres panes a los cuales se introdujo el termopar durante el proceso de medición. La mayor temperatura registrada durante esta medición es de 104,94 [°C].

4.3.2. Máxima potencia

La Figura N°35 representa el registro de temperatura del termopar instalado en el pan durante la medición de máxima potencia.

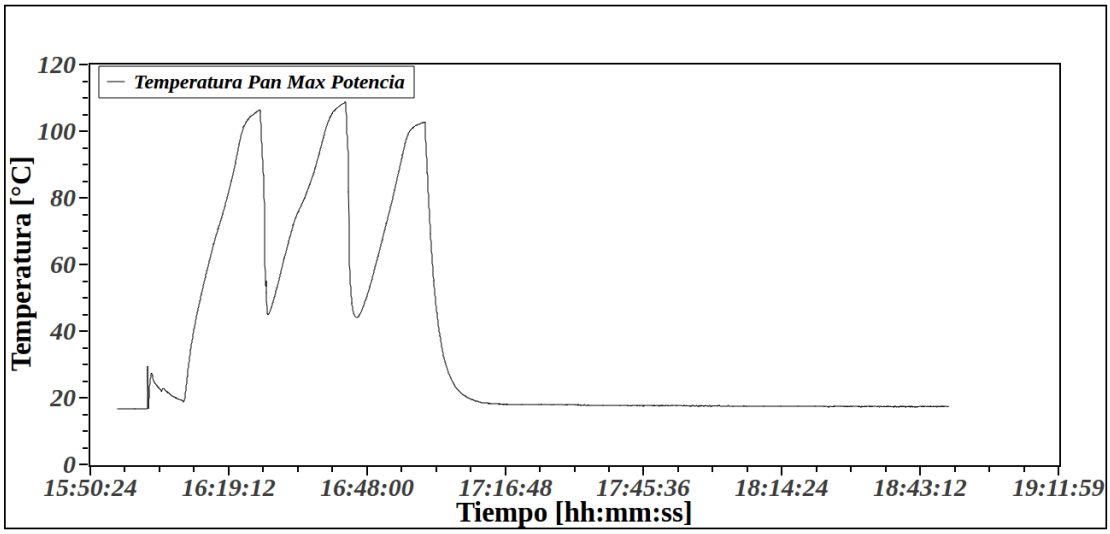

Figura N°35 : Perfil de temperatura de panes. Medición Máxima Potencia.

Los tres peaks corresponden a los tres panes a los cuales se introdujo el termopar durante el proceso de medición. La mayor temperatura registrada durante esta medición es de 108.78 [°C]. Al superar los 100 [°C] disminuye la rapidez de aumento de temperatura debido a que ocurre la evaporación del agua que se encuentra con la masa del pan.

CAPITULO 5

5. ANÁLISIS DE DATOS

5.1. Balance de masa

A continuación se presentan los resultados del análisis de datos para el balance de masa en las mediciones llevadas a cabo, considerando flujo másico de GLP, flujo másico de GE y flujo másico de aire.

5.1.1. Flujo másico promedio de GLP

La Tabla N°10 presenta tanto el tiempo de duración de las etapas de transiente y cocción, como los flujos másicos promedio medidos en ambas etapas tanto a mínima como a máxima potencia:

Tabla N°10 : Flujo másico promedio de GLP

Etapa	Duración [hh:mm:ss]	Flujo másico promedio [g/min]
Transiente – Mínima Potencia	01:16:39	3,86
Cocción – Mínima Potencia	00:47:00	6,33
Transiente – Máxima Potencia	00:18:55	9,89
Cocción – Máxima Potencia	00:42:00	7,94

La duración del periodo transiente a máxima potencia es mucho menor que a mínima potencia, lo cual se debe al aumento del flujo másico, que a su vez significa mayor aporte energético al horno.

5.1.2. Flujo másico instantáneo de GLP

A continuación se presentan los perfiles de flujo másico instantáneo de GLP durante mediciones de mínima y máxima potencia.

5.1.2.1. Mínima potencia

La Figura Nº36 representa el flujo másico de GLP utilizado a lo largo de la medición de mínima potencia.

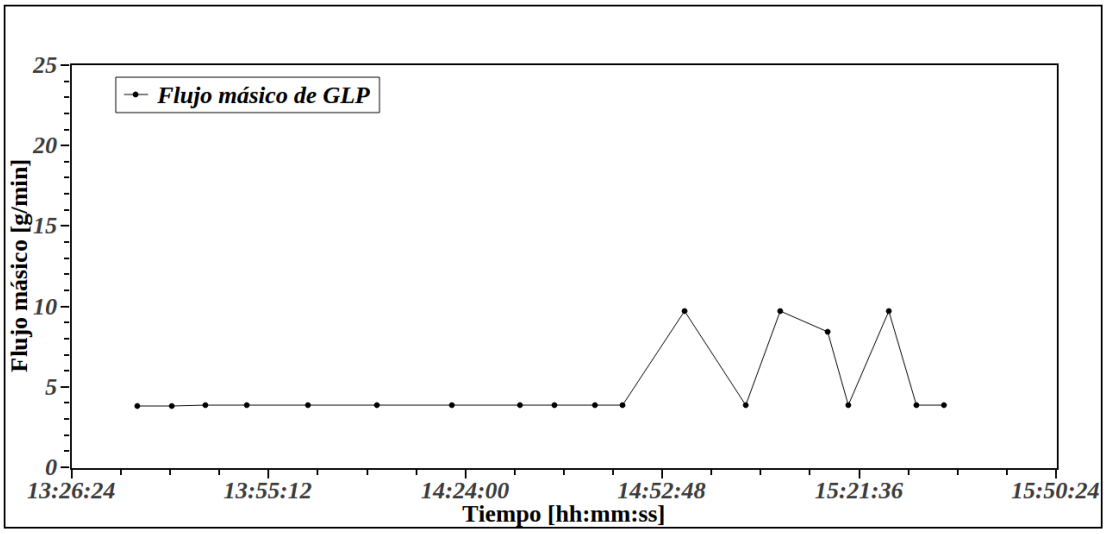

Figura N°36 : Flujo másico de GLP. Medición mínima potencia.

Durante el periodo transiente se produce un perfil estable de flujo másico, cercano a los 3,9 [g/min], el que varía al comenzar la cocción de pan debido a la disminución de temperaturas en el horno, generándose la necesidad de variar la potencia térmica entregada por el horno, y por ende, también el flujo másico de

combustible, con el objetivo de mantener la temperatura de cocción escogida (220 [°C]).

5.1.2.2. Máxima potencia

La Figura N°37 representa el flujo másico de GLP utilizado a lo largo de la medición de máxima potencia.

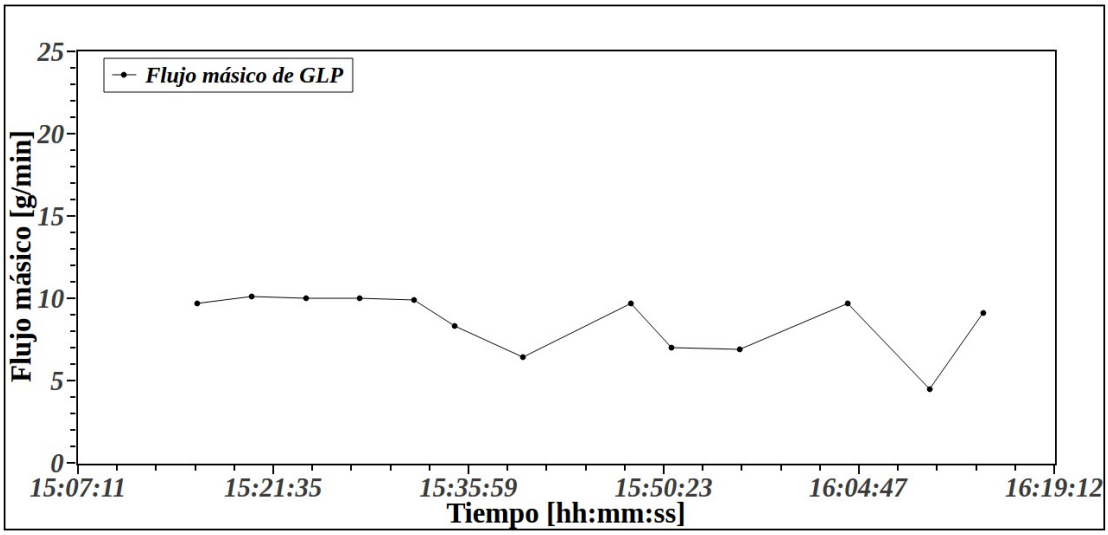

Figura N°37 : Flujo másico de GLP. Medición máxima potencia.

Durante el periodo transiente, de duración menor al de la medición de mínima potencia, se produce un perfil estable de flujo másico, cercano a los 4,7 [g/min]. Al comenzar la cocción de pan varía debido a la variación de temperaturas en el horno, generándose la necesidad de variar la potencia térmica entregada por el horno, y por ende, también el flujo másico de combustible, con el objetivo de mantener la temperatura de cocción escogida (220 [°C]).

5.1.3. Flujo másico de GE

A continuación se presentan los perfiles de flujo másico de gases de escape durante mediciones de mínima y máxima potencia. Cabe destacar que los flujos de gases de escape presentados no corresponden a los flujos totales, en tanto una porción de ellos escapaban por la puerta del horno, los cuales no pudieron ser medidos.

5.1.3.1. Mínima Potencia

La Figura N°38 representa el flujo másico de gases expulsado por el ducto de gases de escape a largo de la medición de mínima potencia.

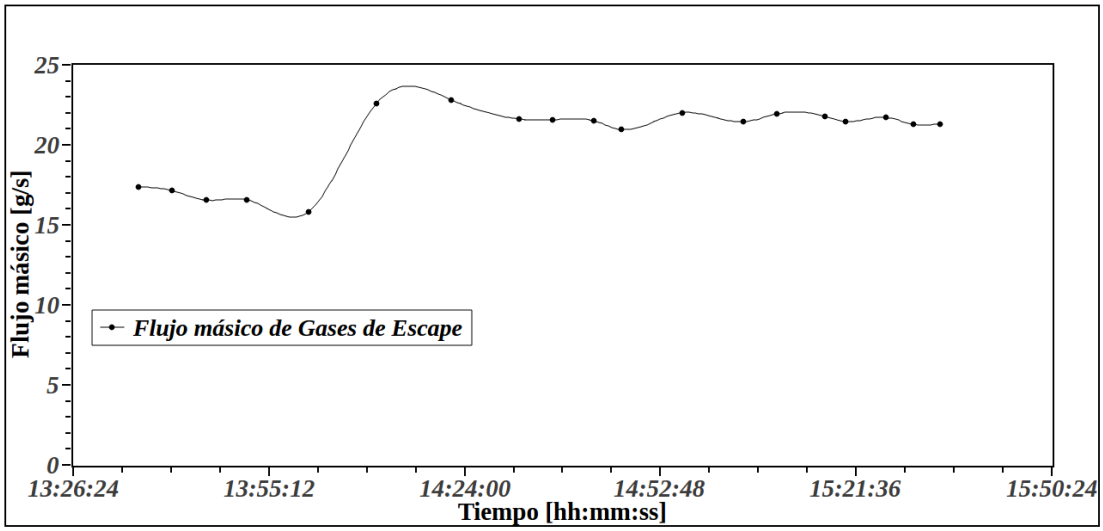

Figura N°38 : Flujo másico de GE. Medición mínima potencia.

Luego de las 14:01 se genera un aumento de flujo másico, debido a las variaciones de temperatura y de la presión de gases producto.

5.1.3.2. Máxima potencia

La Figura N°39 representa el flujo másico de gases expulsado por el ducto de gases de escape a largo de la medición de máxima potencia.

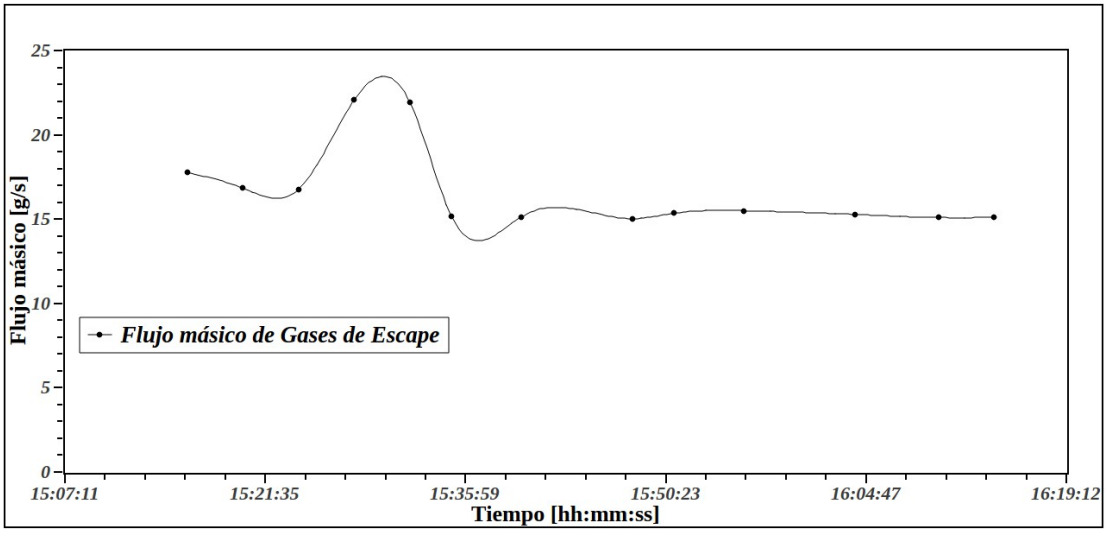

Figura N°39 : Flujo másico de GE. Medición máxima potencia.

Al igual que en el caso anterior, luego de las 15:24 se genera un aumento de flujo másico, debido a las variaciones de temperatura y de la presión de gases producto, el cual luego disminuye al disminuir la presión.

5.1.3.3. Flujo másico de GE expulsado por puerta de horno

Como ya fue mencionado previamente, dentro del análisis de gases de escape no se consideran los gases que salían expulsados por la puerta del horno, tanto debido a la carencia de instrumentos para medir propiedades de ellos, como también por las

dificultades técnicas que implica el poder llevar a cabo la medición. Por lo tanto, solo se considerarán los GE expulsados por el ducto posterior del horno.

5.1.4. Flujo másico de aire

Como consecuencia de lo anterior, es que no se ha calculado el flujo másico de aire, en tanto faltaría una porción de flujo másico para cumplir con la ley de conservación de masa dentro del volumen de control utilizado para el análisis.

5.2. Balance de energía

A continuación se presentan los resultados del análisis de datos para el balance de energía en las mediciones llevadas a cabo, considerando flujo de energía utilizado en la cocción del pan, flujo de energía por GLP, flujo másico de GE y flujo másico de aire.

5.2.1. Flujo de energía utilizado en la cocción del pan

La Tabla N°11 presenta los flujos de energía utilizados en la cocción del pan – tanto promedio como considerando cada una de las bandejas cocidas –, obtenidos a partir de las mediciones a mínima y a máxima potencia:

Tabla N°11 : Flujo de energía utilizado en la cocción del pan.

Medición	Promedio [kW]	Primera Bandeja [kW]	Segunda Bandeja [kW]	Tercera Bandeja [kW]
Mínima Potencia	0,40	0,35	0,46	0,40
Máxima Potencia	0,33	0,33	0,33	0,33

Cabe recalcar que la variación de los flujos de energía utilizada se debe a las variaciones de masa de la – valga la redundancia – masa de pan.

5.2.2. Flujo de energía por GLP

A continuación se presenta el resultado del análisis del flujo de energía promedio e instantáneo por GLP durante mediciones de mínima y máxima potencia.

5.2.2.1. Flujo de energía promedio por GLP

La Tabla N°12 presenta los flujos de energía promedio por GLP, en las etapas transiente y de cocción de pan, obtenidos a partir de las mediciones a mínima y a máxima potencia:

Tabla N°12 : Flujo de energía promedio de GLP

Etapa	Flujo de energía promedio [kW]
Transiente – Mínima Potencia	3,07
Cocción – Mínima Potencia	5,27
Transiente – Máxima Potencia	7,90
Cocción – Máxima Potencia	6,12

5.2.2.2. Flujo de energía instantáneo por GLP

A continuación se presentan los perfiles de flujo de energía instantáneo por GLP durante mediciones de mínima y máxima potencia.

5.2.2.2.1. Mínima potencia

La Figura N°40 representa el flujo de energía instantáneo por GLP a lo largo de la medición de mínima potencia.

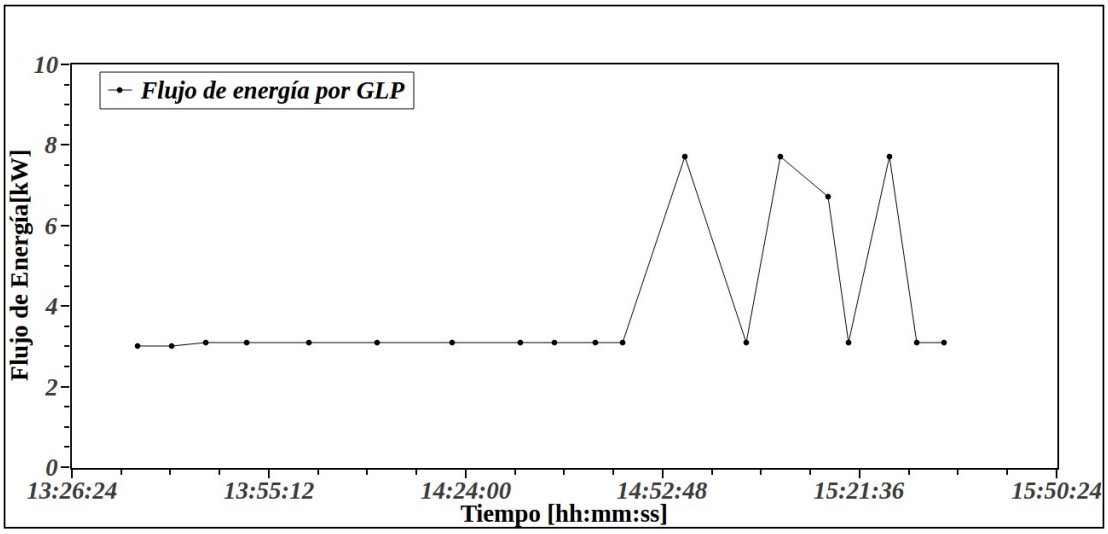

Figura N°40 : Flujo de energía por GLP. Medición Mínima Potencia.

Durante el transiente se mantiene el caudal de GLP al mínimo, lo que hace que el flujo de energía sea constante durante este periodo. Luego, al ingresar el pan al horno, se modifica el caudal de gas y en consecuencia la energía que ingresa al horno a partir de la combustión del GLP, con el objetivo de mantener la temperatura de operación, que es 220 [°C].

5.2.2.2.2. Máxima Potencia

La Figura N°41 representa el flujo de energía instantáneo por GLP a lo largo de la medición de máxima potencia.

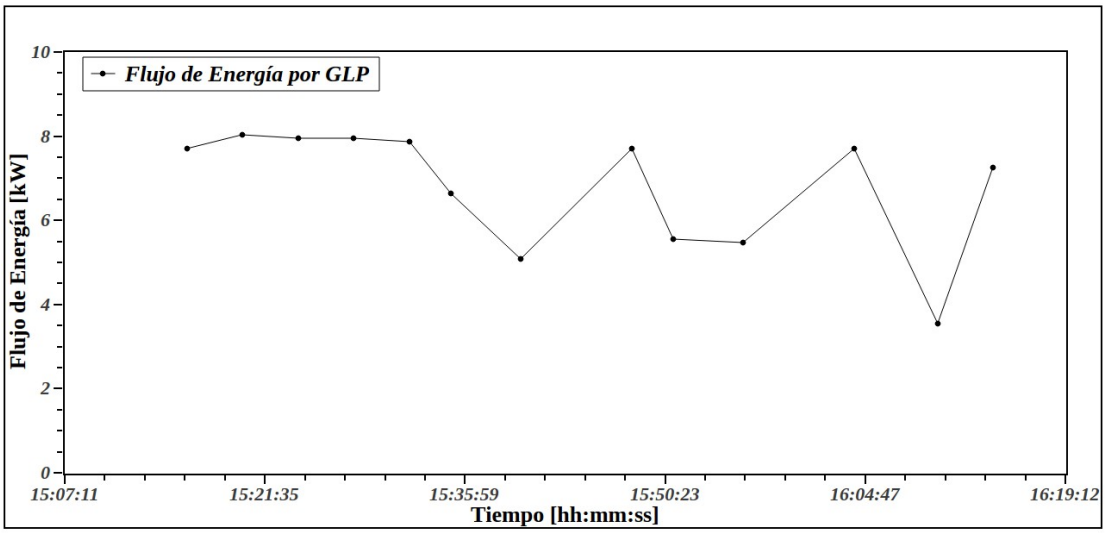

Figura N°41 : Flujo de energía por GLP. Medición Máxima Potencia.

Durante el transiente se mantiene el caudal de GLP al máximo, lo que hace que el flujo de energía sea constante durante este periodo. Luego, cuando ingresa el pan al horno, al igual que en la medición de mínima potencia, se modifica el caudal de gas y en consecuencia la energía que ingresa al horno a partir de la combustión del GLP, con el objetivo de mantener la temperatura de operación, que es 220 [°C].

5.2.3. Flujo de Energía por GE

A continuación se presenta el resultado del análisis del flujo de energía por gases de escape durante mediciones de mínima y máxima potencia, obtenido a partir de los flujos másicos de gases de escape medidos.

5.2.3.1. Mínima Potencia

La Figura N°41 representa el flujo de energía por gases de escape a lo largo de la medición de mínima potencia.

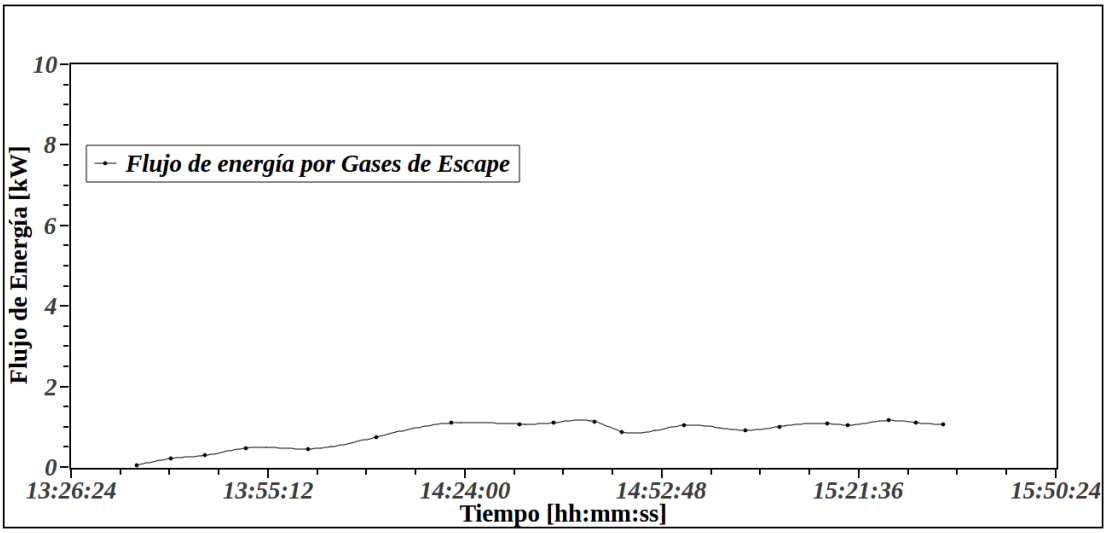

Figura N°41 : Flujo de energía por GE. Medición Mínima Potencia.

La energía transportada por los GE va en aumento a lo largo de la medición, como consecuencia del aumento general de temperaturas del horno, y sobre todo de los ladrillos refractarios, debido a que estos son en parte importante quienes

transmiten la temperatura a la cámara de cocción y por ello a los gases que escapan tanto por la puerta como por el ducto de gases.

5.2.3.2. Máxima Potencia

La Figura N°42 representa el flujo de energía por GE a lo largo de la medición de máxima potencia.

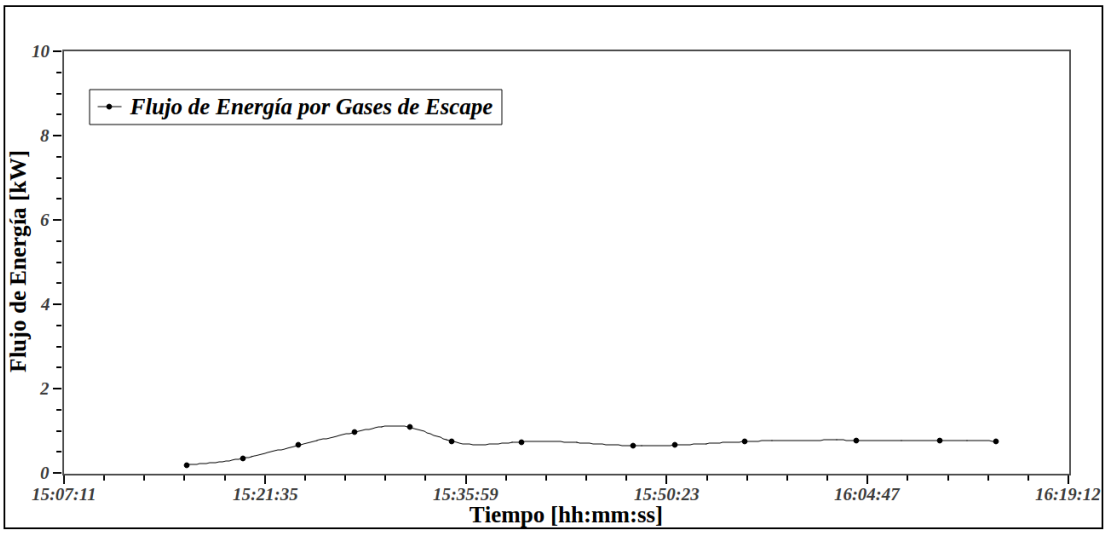

Figura N°42 : Flujo de energía por GE. Medición Máxima Potencia.

Al igual que en el caso de la medición de mínima potencia la energía transportada por los GE va en aumento a lo largo de la medición, como consecuencia del aumento general de temperaturas del horno, y sobre todo de los ladrillos refractarios. Sin embargo, en esta medición el ingreso de pan afecta de manera más considerable el flujo de energía, lo cual puede ocurrir debido a que las temperaturas de los ladrillos al ingreso de pan son menores en comparación con la medición de mínima potencia.

5.3. Análisis comparativo de datos

- La duración de la etapa transiente en ambas mediciones varía de manera considerable. La duración de esta etapa en la medición de mínima potencia es de cuatro veces la duración de la misma durante la medición de máxima potencia. Sin embargo, en la medición de máxima potencia, los ladrillos refractarios llegan a temperaturas entre los 190 y 150 [°C], en cambio en la medición de baja temperatura, al finalizar la etapa transiente los ladrillos se encuentran a temperaturas cercanas a los 250 [°C]
- La temperatura de pan oscila en ambas mediciones entre la temperatura ambiente, y un máximo de 105 ± 5 [°C] aproximadamente. Se destaca que la temperatura medida corresponde a temperaturas internas de la masa y no superficiales, por lo cual no es posible registrar todas las etapas mencionadas en el marco teórico.
- El flujo másico de GLP (y por ende, también el flujo de energía por GLP) entregado durante el proceso de cocción es inestable en ambos casos, en tanto la temperatura del horno aumentaba por sobre la temperatura deseada, o disminuía con mucha rapidez, lo cual da cuenta de que la inercia térmica del horno es baja y que la modulación de la potencia térmica que ingresa al horno es ineficiente.
- En ambas mediciones, se produce un aumento del flujo másico de gases de escape durante los procesos de cocción, lo cual ocurre debido al vapor de agua que se genera a partir del aumento de temperatura de la masa de pan. Esto coincide con la cantidad de energía que esta masa de gases porta, en tanto va aumentando de manera progresiva su temperatura a lo largo del proceso de medición.

5.3.1. Observaciones

- A pesar de que la cantidad en unidades de hallullas por bandeja utilizada durante las mediciones era la misma a lo largo del proceso de medición (24), la masa por bandeja tendía a variar, lo cual afecta en el nivel de estandarización de la medición.
- Las mediciones se llevaron a cabo a distintas horas del día, pudiendo esto afectar en los niveles de humedad y temperatura ambiental.
- El tiempo de fermentación de las masas también difiere entre las bandejas y en ambas mediciones, lo cual puede llegar a afectar el volumen propio del pan, y por ende en la transferencia de calor.

5.3.2. Eficiencia

La Tabla N°13 presenta los resultados de los cálculos de eficiencia, obtenidos a partir de las mediciones llevadas a cabo a mínima y a máxima potencia:

Tabla N°13 : Eficiencia del horno obtenida según mediciones

Medición	Eficiencia [%]
Mínima Potencia	8,19
Máxima Potencia	9,69

Cabe destacar que estos resultados son superiores al promedio de eficiencia de los datos obtenidos por QUEMPIN en el concurso Impacta Energía, donde el promedio de las panaderías ronda el 5% de eficiencia [23]. Es probable que esto ocurra debido a que en el horno analizado en el presente trabajo no existe una separación entre cámara de combustión y de cocción a través de un intercambiador.

5.3.3. Indicadores

La Tabla N°14 presenta los resultados de los cálculos de indicadores considerados para el presente análisis:

Tabla N°14 : Indicadores obtenidos según mediciones

Indicador	Mínima Potencia	Máxima Potencia
[kg GLP / QQ Harina]	3,61	3,05
[kWh / QQ Harina]	47,83	40,40
[CLP $ / QQ Harina]	$1.776	$1.500

5.3.4. Rendimiento de combustión y quemado

Tomando en cuenta que existe una filtración importante de gases de escape por la puerta del horno, es que se vuelve complejo el cálculo de rendimiento de combustión y quemado, ya que esto hace variar de manera considerable la concentración de gases de escape, y en particular el CO_2 que es utilizado para el cálculo. En ese sentido, el resultado de este cálculo podría ser falso, no siendo útil para el presente análisis.

5.3.5. Posibles modificaciones al horno

- Modificación de goma selladora de puerta: Debido al mal sellado de la puerta del horno, una porción considerable de gases producidos por la combustión se filtran por la puerta, perdiéndose energía térmica al ambiente, y en consecuencia, afectando en la eficiencia del horno.

- Evitar el contacto de gases de escape del quemador con la masa de pan: Si bien parte del calor llega hacia el pan por la radiación térmica emitida por los ladrillos refractarios, parte importante de este llega a través de los gases de escape generados por la combustión del gas licuado de petróleo, donde el odorizante del gas impregna en parte de los panes.

CAPITULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En el marco del proyecto Impacta Energía denominado “Quemadores de medios porosos para panaderías eficientes”, el presente trabajo desarrolló la evaluación técnica del proceso de combustión de gas licuado y de eficiencia energética de un horno industrial panadero de baja potencia.

Los principales resultados y conclusiones para el horno industrial convencional seleccionado, marca Top Gas, modelo HSI 58-1, se tiene:

- Se diseñó e implementó un sistema de medición de flujos, temperaturas y medición de gases de combustión para el horno industrial. La principal dificultad está en la precisión de la medición de la composición de los gases de combustión debido a la detección de las fugas de estos gases por la puerta del horno.
- Se evaluaron las temperaturas de operación del horno mediante termopares ubicados en las paredes externas, internas y los ladrillos refractarios, para dos potencias de operación seleccionadas (máxima y mínima). Las potencias se mantienen estables durante el periodo transiente, y durante el periodo de cocción del pan varían en torno a la necesidad de mantener la temperatura de cocción, que en este trabajo fue de 220 [°C].
- Se midieron y analizaron las concentraciones de gases de escape en el ducto instalado en el horno para las dos potencias seleccionadas. Como se mencionó anteriormente, parte considerable de estos gases escapan por la puerta del horno, por lo que no se logró analizar la composición de todos los gases generados por la combustión del gas licuado de petróleo. Esto no permite a su vez calcular los rendimientos de combustión y quemado, ya que la

concentración de CO_2 obtenida – utilizada para calcular los rendimientos – no considera el total de los gases de escape, y por ende, entregaría resultados erróneos. Aun así, se asume que dentro del 90% de pérdidas de energía, hay un porcentaje que se debe a deficiencias en la combustión.

- Se miden y evalúan las temperaturas del pan registradas durante el proceso de cocción, las cuales alcanzan los 108 [°C]. Esta temperatura se registra en un punto ubicado en el interior de la masa del pan, por ende, no caracteriza el perfil de temperatura de las cortezas u otros puntos de la misma. Se debe tener presente además que la masa de pan es variable en cada medición, lo cual afecta el cálculo de indicadores de productividad y de eficiencia.
- El horno analizado posee una eficiencia del 9,69% en máxima potencia (6,12 [kW] promedio) y del 8,19% en mínima potencia (5,27 [kW] promedio) para el proceso de cocción de pan de 4,75 [kg] y 5,32 [kg] respectivamente.
- Para optimizar el funcionamiento del horno se propone modificar la goma selladora de la puerta para así evitar las fugas de gases de escape del horno.

BIBLIOGRAFÍA

[1] UTFSM, “Proyecto de la USM buscará hacer más competitivas a las panaderías chilenas" . Consultado el 22 de Noviembre de 2017.
Sitio: *http://www.noticias.usm.cl/2016/12/15/proyecto-de-la-usm-buscara-hacer-mas-competitivas-a-las-panaderias-chilenas/*

[2] Bases Concurso de Innovación Abierta “Impacta Energía”, Laboratorio de Gobierno, junio del 2016, Santiago de Chile, Chile.

[3] Ehrenfeld, D., “Desarrollo de pan tipo marraqueta y hallulla con incorporación de harina de bagazo de uva”, 2013, Santiago de Chile, Chile.

[4] Quezada, N., “Clasificación de la calidad sensorial de pan tipo hallulla mediante visión computacional”, 2011, Santiago de Chile, Chile.

[5] SERNAC, Departamento de Estudios e Inteligencia, “Reporte mensual de precios de pan Área Metropolitana”, Octubre del 2015, Región Metropolitana, Chile.

[6] FECHIPAN, “Posición de FECHIPAN respecto al proyecto que modifica la ley N.º 19.496 sobre protección de los derechos de los consumidores”, Chile.

[7] SII, “Estadísticas de empresas por rubro, subrubro y actividad económica (2005-2015)”, Consultado 12 de abril del 2017.
Sitio: *http://www.sii.cl/estadisticas/rubro/PUB_Rub_Sub_Act.xlsx*

[8] Europa-zone, “Leonardo New Edition". Consultado el 22 de Noviembre de 2017.
Sitio: *http://www.europa-zone.com/upl/013/spaccato-leo_copia.jpg*

[9] Gashor, “Thermocar: Horno ciclotérmico de carro estático”, Gipuzkoa, España.

[10] Sveba Dahlen, “Catálogo V-Series”, Fristad, Suecia.

[11] Tecnocontrol, “Portable Flue Gas Analyser Boston HD Instruction manual”, 2015, Milán, Italia.

[12] Direct Industry, “Analizador de gas / de temperatura / portátil BOSTON HD". Consultado el 22 de Noviembre de 2017.
Sitio: *http://www.directindustry.es/prod/tecnocontrol-geca-cpf-industriale/product-78843-1606325.html*

[13] Aalborg, “Operating Manual: GFC Mass Flow Controller”, Diciembre de 2014.

[14] Ilku, “Catálogo de Productos 2017”, 2017, Quilpué, Chile.

[15] Maigas, “Catálogo 2011: Balanza Maigas Modelo DY208E”.

[16] Çengel, Y., Boles, M., “Termodinámica”, séptima edición, Editorial Mc Graw Hill, 2012, México D.F., México.

[17] Chang, R., College, W., “Química”, séptima edición, Editorial Mc Graw Hill, 2002, Colombia.

[18] Ministerio de Salud; Secretaría Regional Ministerial Región Metropolitana, “Establece fuentes estacionarias a las que son aplicables las normas de emisión de monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO2)”. Consultado el 25 de mayo del 2017.

Sitio: *https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=235207*

[19] Matuda, T. G., Pessôa Filho, P. A., Tadini, C. C., “Enthalpy and heat capacity of bread dough at freezing and refrigeration temperaturas”, escrito para presentación en el CIGR Section VI International Symposium on Future of Food Engineering, abril del 2006, Varsovia, Polonia.

[20] ENAP, “Informe Semanal de Variaciones de Precios de Combustibles”. Consultado el 11 de Octubre de 2017.
Sitio: *https://www.enap.cl/pag/53/784/informe-precios*

[21] FECHIPAN, INDUPAN, “Gremio Industria del Pan: Chile”, consultado el 6 de junio del 2017.
Sitio: http://www.sofofa.cl/_doc/gremial/seminario%20trigo/Fechipan.pdf

[22] Martín, F., Sala, V., “Estudio comparativo entre los combustibles tradicionales y las nuevas tecnologías energéticas para la propulsión de vehículos destinados al transporte”, 2004, Barcelona, España.
[23] QUEMPIN, “Informe final fase piloto: QUEMPIN”, Octubre 2017, Valparaíso, Chile.

ANEXOS

Anexo n°1: Fotografías de instalación

Figura N°43 y N°44 : Fotografías de instalación