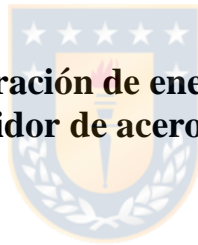


UNIVERSIDAD DE CONCEPCION
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO INGENIERIA MECANICA

Profesor Patrocinante:
Óscar Farías F.

Análisis de opciones para recuperación de energía en campana de extracción de gases de un convertidor de acero de siderúrgica CAP



Roberto Ramírez Menay

Informe de Tesis

para optar al Título de Magister en Ciencias de la Ingeniería con mención en Mecánica

Julio-2020

RESUMEN

La problemática de la industria del acero en Chile radica en su baja competitividad a nivel global, lo cual obliga a la empresa nacional a buscar formas de reducir sus costos operacionales, siendo una alternativa de eficiencia energética. Esta tesis es el desarrollo de un proyecto que consiste en aprovechar la energía residual de los gases del proceso de oxidación del arrabio para cogeneración de energía (térmica y eléctrica). La investigación se focaliza en la modelación del sistema de captación de los gases de alta temperatura producidos por la inyección de oxígeno sobre el acero, para proponer un método de acumulación de energía mediante materiales de cambio de fase (Phase Change Material (PCM)), debido a que el proceso es intermitente. En la literatura especializada, se encuentran simulaciones donde se postula que la utilización de PCM podría producir ahorros del orden del 20% de la energía residual de los gases. Se desea verificar lo anterior para el caso de CAP S.A, Chile, donde se estima una recuperación energética de 16GJ en un período de 15 minutos, en la campana de gases del proceso, los cuales entran a temperatura máxima de 1700°C aproximadamente.

El objetivo general del proyecto es realizar un análisis energético de los gases generados por la descarburación del arrabio, que circulan a través del sistema de campana extracción de gases de la siderúrgica CAP, a fin de proponer alternativas de recuperación energética a partir de los gases generados en el convertidor. En primera instancia realizando balance de energía de las campanas del sistema, cuantificando los flujos de calor transmitidos a través del proceso, para luego proponer y evaluar medidas de recuperación basadas en los resultados de la revisión y estudio energético. Luego, se modela el sistema, y por último se aplica y evalúa las medidas propuestas.

En el estudio se realiza un modelo del sistema de refrigeración de campanas, el cual será validado y posteriormente modificado para la integración un dispositivo PCM. En una primera instancia se analiza el estado del arte y las propuestas derivadas para mejorar la eficiencia energética en este tipo de procesos. En una segunda parte, se caracterizan los componentes del sistema (domo, tubos, bombas, etc.) para luego plantear los Modelo. Además, se realizan experiencias en terreno para conocer el comportamiento de los gases y comparar algunas variables obtenidas de los modelos con las medidas, y así posteriormente validar el modelo. En la tercera parte, se proponen, aplican y evalúan alternativas de recuperación de energía de los puntos más conveniente del sistema, principalmente de los humos de escape del convertidor.

A partir del balance de energía del Modelo Campana fija se estima una disponibilidad energética de 77 GJ en los humos al interior de la campana, durante los 15 minutos de soplado. Además, se detectan oportunidades de recuperación de energía, obteniendo entre 20%-30% de la energía residual del flujo de gases. Se estima una recuperación entre 10-20 GJ de la energía residual de los gases en la campana fija de extracción del convertidor de acero, mediante la incorporación de un dispositivo PCM. De esta forma, se podría generar un flujo de calor continuo durante todo el proceso para la generación de vapor, a través un sistema de refrigeración, con una potencia eléctrica a través de un Ciclo Rankine de 15 MW.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de Contenidos.....	ii
Índice de Figuras.....	iv
Índice de Tablas.....	vi
Nomenclatura.....	vii
1 Introducción	
1.1 Contexto General.....	1
1.1.1 La eficiencia energética en plantas siderúrgicas.....	1
1.1.2 Aplicación de tecnologías de recuperación mediante materiales de cambio de fase.....	2
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología.....	4
1.3.1 Análisis experimental.....	4
1.3.2 Modelo.....	4
2 Descripción de la planta acero y procesos	
2.1 Proceso de obtención del acero.....	5
2.1.1 Composición mezcla en convertidor.....	5
2.1.2 Reacciones en convertidor.....	7
2.1.3 Caracterización gases de combustión campana.....	11
2.2 Sistema de refrigeración de los gases de combustión del convertidor.....	12
2.2.1 Composición del Sistema de refrigeración.....	13
2.2.2 Campana Móvil.....	14
2.2.3 Campana fija.....	14
2.2.4 Campana corta.....	15
2.2.5 Duchas de enfriamiento.....	15
2.2.6 Domo.....	16
2.3 Caracterización del proceso.....	17
2.3.1 Comportamiento sistema de refrigeración de campanas.....	17
2.3.2 Periodo de oxidación del silicio (Inicio del soplado).....	17
2.3.3 Periodo de descarburación creciente (Soplado intermedio).....	17
2.3.4 Periodo de descarburación decreciente y oxidación del metal (Fin del soplado).....	18
2.3.5 Variación entre soplados.....	18
3 Análisis experimental	
3.1 Descripción de experiencias.....	21
3.2. Caracterización temperatura gases.....	21
3.2.1 Descripción de equipos de medición.....	22
3.2.2 Análisis de error de los equipos.....	23
3.2.3 Resultados análisis de gases.....	27
3.3. Caracterización temperatura agua de refrigeración.....	33
3.3.1 Experiencias y equipos de medición.....	34
3.3.2 Análisis de error de los equipos.....	35
3.3.3 Resultados análisis agua de refrigeración.....	38
4 Modelo intercambiador de calor del sistema de refrigeración	

4.1 Descripción general del modelo.....	42
4.2 Modelo convertidor de acero.....	43
4.3. Modelo campana móvil.....	45
4.3.1 Descripción y consideraciones del modelo.....	45
4.3.2 Ecuaciones del modelo sin PCM.....	48
4.3.3 Ecuaciones del modelo con PCM.....	52
4.4 Modelo campana fija.....	53
4.4.1 Descripción y consideraciones del modelo.....	53
4.4.2 Ecuaciones del modelo campana fija.....	53
4.5 Modelo Domo.....	54
4.5.1 Descripción y consideraciones del modelo.....	54
4.5.2 Ecuaciones de balance en el domo.....	54
4.6. Resultados del modelo.....	55
4.6.1. Resultados modelo convertidor.....	55
4.6.2. Resultados Modelo campanas.....	56
4.6.3. Discusión de resultados.....	57
4.7 Validación modelo.....	58
4.8 Potencial de recuperación de energía.....	59
4.9 Configuración del PCM.....	60
5 Conclusiones	62
6 Referencias.....	63



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Formación del acero.....	5
Figura 2.1.1 Alto Horno, Aceros CAP.....	6
Figura 2.1.2 Carga de chatarra antes de su selección.....	7
Figura 2.1.3 Inyección de oxígeno.....	7
Figura 2.1.4 Variación del PCI en función de sus componentes.....	12
Figura 2.2. Divisiones campanas.....	13
Figura 2.2.1 Distribución de tubos campana móvil.....	14
Figura 2.2.2. Distribución de tubos campana fija.....	15
Figura 2.2.4 Duchas de enfriamiento.....	16
Figura 2.2.5 Domo de alimentación de campana.....	16
Figura 2.3.1 Evolución de la composición y la temperatura del acero durante la conversión.....	18
Figura 2.3.2. Variables que afectan al sistema de refrigeración.....	19
Figura 3.2.1 Niveles de medición de temperatura de gases C. Fija.....	21
Figura 3.2.2 Equipos de medición.....	22
Figura 3.2.3. Medición perfil de temperatura.....	23
Figura 3.2.4. Banco de mediciones.....	24
Figura 3.2.5. Esquema del efecto de la radiación sobre el instrumento de medición.....	25
Figura 3.2.6. Error por procedimiento gases.....	26
Figura 3.2.7. Temperatura gases campana fija.....	27
Figura 3.2.8. Diferencias de temperatura en extremos.....	28
Figura 3.2.9. Termocuplas expuestas a los gases.....	28
Figura 3.2.10. Superficie de temperatura de los gases punto C.....	30
Figura 3.2.11. Superficie de temperatura de los gases punto C.....	30
Figura 3.2.12. Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana.....	31
Figura 3.2.13. Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana.....	32
Figura 3.2.14. Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana.....	32
Figura 3.3.1. Medición de temperatura y presión del agua en la campana.....	33
Figura 3.3.2 Equipos de medición agua.....	34
Figura 3.3.3 Esquema del banco de medición agua.....	35
Figura 3.3.4. Error por procedimiento Pt-100.....	36
Figura 3.3.5. Error por procedimiento dos cables.....	37
Figura 3.3.6. Error por resistencia Pt-100.....	37
Figura 3.3.7. Temperatura del agua refrigerante.....	38
Figura 3.3.8. Superficie de temperatura del agua a lo largo de la campana.....	39
Figura 3.3.9. Superficie de temperatura del agua a lo largo de la campana.....	39
Figura 3.3.10. Perfil de presión del sistema de refrigeración campana fija.....	40
Figura 3.3.11. Comparación de perfiles de temperatura.....	40
Figura 3.3.12. Comparación de perfiles de presión.....	41
Figura 3.3.13. Curvas de temperatura para la secuencia del grado 284.....	41
Figura 4.1.1. Modelo del sistema de refrigeración.....	42
Figura 4.1.2. Esquema del sistema de refrigeración de gases (izquierda) y detalle de elementos en el balance térmico con y sin uso de PCM (derecha).....	43

Figura 4.2. Variables y parámetros modelo del convertidor de acero.....	43
Figura 4.3.1. Modelo campana móvil.....	45
Figura 4.3.2. Curvas de emisividad CO ₂ vs Temperatura	50
Figura 4.3.3. Curvas de emisividad mezcla vs Temperatura	51
Figura 4.3.4. Modelo con integración del PCM.....	52
Figura 4.4.1. Modelo campana fija.....	53
Figura 4.5. Modelo del domo.....	54
Figura 4.6.1. Flujo de salida gases convertidor.....	55
Figura 4.6.2. Concentraciones de CO y CO ₂	55
Figura 4.6.3. Temperatura salida de gases del convertidor.....	56
Figura 4.6.4. Temperatura salida de gases campana móvil	56
Figura 4.6.5. Flujo de calor del modelo de transferencia de calor	57
Figura 4.7.1. Calor recuperado por el PCM.....	58
Figura 4.7.2 Flujo de calor transferido con y sin PCM.	59
Figura 4.8. Aplicación PCM para generación de potencia.....	60
Figura 4.9.1. Configuración del PCM.....	60
Figura 4.9.2. Instalación de PCM.....	61



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición del arrabio.....	6
Tabla 2. Características generales de las Campanas.....	13
Tabla 3.2. Errores de medición gases.....	26
Tabla 3.3.1. Errores de medición agua.....	37
Tabla 3.3.2. Resumen errores de instrumentos de medición.....	37
Tabla 4.3.1 Coeficiente para la transferencia de calor de la evaporación colectiva	47
Tabla 4.7. Calor recuperado por el PCM.....	58
Tabla 4.9.1. Características del PCM.....	60
Tabla 4.9.2. Evaluación económica.....	61



NOMENCLATURA

Símbolo/Variable	Significado
A	Área m^2
a	Absortividad -
B	Ancho m
C	Capacidad calorífica $\frac{J}{mol K}$
c	Velocidad $\frac{m}{s}$
D	Diámetro m
e	Espesor m
F	Flujo molar $\frac{mol}{s}$
f	Coefficiente de fricción -
H	Coefficiente Convectivo $\frac{W}{m^2 \cdot C}$
\bar{H}	Entalpía molar $\frac{kJ}{kmol}$
h	Entalpía específica $\frac{kJ}{kg}$
J	Difusión media en la superficie $\frac{mol}{s m^2}$
K	Coefficiente de pérdidas -
k	Coefficiente conductivo $\frac{W}{mK}$
L	Longitud m
\dot{m}	Flujo másico $\frac{kg}{s}$
n	mol (mol)
Nu	Nusselt -
P	Presión Pa
PCI	Poder calorífico $\frac{kJ}{kg}$
Pr	Número de Prandtl -
Q	Calor kJ
\dot{Q}	Flujo de calor W

R	Tasa de consumo -
Re	Reynolds -
r	Radio m
T	Tiempo s
\dot{V}	Flujo volumétrico $\frac{m^3}{s}$
Z	Altura m
ε	Emisividad -
Λ	Perdida de carga m
ρ	Densidad $\frac{kg}{m^3}$



CAPITULO 1

Introducción

1.1 Contexto General

La industria del acero contribuye intensivamente al consumo de combustibles fósiles y consecuentemente a las emisiones de gases de efecto invernadero, por lo cual en diferentes países del mundo se plantea el desafío de mejorar la eficiencia energética de los procesos a fin de obtener ahorros económicos y reducción de los contaminantes atmosféricos. Una de las formas típicas de mejorar los indicadores de eficiencia energética consiste en la recuperación de la energía residual disponible en los procesos que operan a alta temperatura ya sea para aumentar la eficiencia exergética en procesos específicos o para su aplicación en sistemas de cogeneración. En este contexto, el Departamento de Energía de USA señala que entre un 30 a 50% de los insumos de energía primaria en el sector industrial se descargan como calor residual, a una temperatura de 1400°C, lo cual equivale a una energía que oscila entre 29,7 y 62,1 TBTU/año [1].

En Chile, la Compañía Siderúrgica (CSCh) provee al mercado de aceros brutos y especiales, caracterizándose por procesos cuya intensidad energética equivale al 1% del consumo de energía primaria del país [2]. En los últimos años, la producción del acero chileno ha ido en decaimiento debido principalmente al nivel de producción y bajos precios que ofrecen compañías internacionales provenientes de China, las cuales dominan el mercado del acero con una producción que sobrepasa el 50% de la producción mundial. El éxito de estas compañías se atribuye en parte a elevados estándares de eficiencia introducidos en los distintos procesos productivos. En vista de la crisis en las economías del sector, las industrias nacionales han buscado alternativas para lograr mantenerse en el mercado, aumentando producción de aceros especiales y el último tiempo aplicando medidas de eficiencia energética, logrando obtener ahorros del 4,5% de su consumo total anual [2].

1.1.1 La eficiencia energética en plantas siderúrgicas

A nivel mundial existe potencial de mejora en la eficiencia energética de las plantas siderúrgicas y varios países han planteado una serie de medidas en vista de optimizar el uso de la energía y reducir las emisiones, promoviendo la aplicación de medidas de eficiencia energética [3]. Laia Miró (2015) evaluó el calor residual generado en distintas industrias de 33 países, observando que en países como Canadá se alcanza hasta un 71% de calor residual por energía consumida en la industria [7].

En China, el Ministerio de Industria y Tecnología de la Información emitió la “Guía de avanzada de Ahorro de Energía aplicables y tecnologías de reducción de emisiones” [4], presentando directrices para obtener ahorros de energía, costos de capital asociados y la situación actual de implementación de tecnologías. Este tipo de información permite evaluar potenciales de ahorro y rentabilidad obtenida al implementar las tecnologías seleccionadas, incluyendo los objetivos de desarrollo y las principales tareas para reducir el consumo total de energía por tonelada de acero bruto.

En varios estudios se evalúa el potencial de la energía residual de distintos procesos de las industrias. Napp (2014) revisa tecnologías carbono eficiente de baja energía para el sector industrial, centrándose en tres sectores principales: hierro y acero, cemento y las refinерías. Se plantean medidas con potenciales de ahorro entre 535-916 MJ/t de acero bruto en el proceso BOF, recuperando el gas como combustible[5]. Por otra parte, Gbemi Oluleye (2016) desarrolla una metodología para identificar el potencial de recuperación de calor residual en los sitios de proceso, considerando la cantidad de fuentes de calor

residual y su la temperatura, donde los resultaron arrojaron un 10% de aumento de la eficiencia energética mediante la recuperación de calor residual[6]. Una investigación sobre recuperación de calor residual y potencial de mitigación de emisiones de carbono en una planta siderúrgica China presenta un potencial de recuperación de 4.87 GJ/t de acero crudo, lo cual equivale a un 26% del consumo total de energía de la planta [8].

También se han realizado investigaciones sobre el potencial de energía residual desde el punto de vista de la evaluación termodinámica. Nobuyuki Shigaki (2002) desarrolló un modelo de simulación y aplicó un análisis exergético para optimizar la producción de acero y el sistema de reciclaje. Los resultados indicaron que la recuperación de calor sensible es eficaz para la mejora de la eficiencia energética global en el proceso de fabricación de acero, y que el proceso del horno eléctrico (EAF) es más deseable desde el punto de vista de la utilización eficaz de exergía que el proceso de alto horno y horno de oxígeno básico (BF-BOF), aunque los dos procesos tienen casi la misma pérdida de exergía [9]. Además, analizó el potencial de la energía residual sobre la base de datos reales de producción para las siderúrgicas Chinas y encontró que la cantidad de recursos de energía residual es 13.32 GJ/t de acero bruto.

1.1.2 Aplicación de tecnologías de recuperación mediante materiales de cambio de fase

Existen variadas oportunidades de implementación de mejoras tecnológicas en plantas siderúrgicas; sin embargo, incluso las opciones rentables no se implementan a menudo debido a información limitada sobre experiencias exitosas. En vista de esto, Kun He (2017) realizó una extensa revisión bibliográfica focalizada en el uso de energía y las medidas/tecnologías de eficiencia energética para la industria siderúrgica, presentando una lista con 158 medidas y tecnologías [10].

En la mayoría de las siderúrgicas del mundo se utilizan dos rutas principales en la producción de acero bruto: a) alto horno y conversión básica de oxígeno (BF-BOF), que utiliza principalmente mineral de hierro, y b) horno de arco eléctrico (EAF), que usa chatarra como materia prima. La ruta BF-BOF es el método de producción de acero dominante en el mundo y representa aproximadamente el 73.9% de la producción total de acero bruto [11]. Esta ruta consta de varios procesos, como sinterización, coquización, producción de arrabio, producción de acero y procesos de laminación. Kun He en su estudio demostró ahorros de energía en el caso de la fabricación de acero con horno BOF, con una recuperación del calor sensible al gas de 0,126 GJ/t y 535-916 MJ/t por uso del gas de escape como combustible. Aunque el consumo de energía del proceso BOF es el menor entre varios otros, el proceso tiene potencial para alcanzar una conversión y recuperación más eficiente de la energía secundaria.

Nobuhiro Maruo (2006) propone un nuevo proceso de recuperación de energía térmica del gas caliente proveniente desde el convertidor de acero mediante la utilización de los calores sensible y de reacción, transferido a través de un material de cambio de fase (PCM) para obtener una recuperación de la energía de 11.6 GJ/carga [12]. Por otra parte, Fabio Dal Magro (2015) propone una recuperación conjunta directa-indirecta de la energía térmica del gas residual con el fin de maximizar la eficiencia energética en los EAF con carga continua. Después de precalentar la carga de chatarra de forma directa, mediante convección y radiación de los gases, el gas residual ingresa a un dispositivo PCM (aluminio) para la absorción de energía. Esto permite reducir la variabilidad de temperatura, proporcionando una alimentación más regular del sistema para generación de vapor y posterior producción de energía a través de un ciclo Rankine, incrementando así la energía eléctrica recuperada por la compañía del 60% al 82% [13].

Un PCM es considerado como medida para recuperación de energía en las aplicaciones siderúrgicas debido a su capacidad de almacenamiento de energía, pero su alto costo y los complejos fenómenos de cambio de fase en las mezclas a menudo socavan los beneficios. En vista de esto, Nimali et al. (2017) presentan y analizan el estado del arte en diagramas de fase y las características favorables de equilibrio de fase para satisfacer los requisitos para el diseño de sistemas de almacenamiento térmico de energía mediante el uso de PCM [14]. También se tienen los materiales orgánicos de cambio de fase, los cuales han recibido una atención considerable tanto para aplicaciones como para investigación debido a sus propiedades favorables, tales como su elevado calor latente, el bajo costo, la estabilidad, la no toxicidad y la resistencia a la corrosión. Además, se destacan los nanotubos de carbono, el grafeno y el carbono poroso por sus excelentes propiedades, como una gran superficie y alta conductividad térmica, convirtiéndose en los materiales preferidos para la mejora de las propiedades térmicas, tema que X. Tong et al. (2019) se encargó de demostrar en su investigación [15]. Concluyendo que la elección del material de cambio de fase no es trivial, ya que dependiendo del propósito y condiciones de la aplicación a la que estará expuesto el sistema, esta selección puede ir desde una solución ideal y duradera hasta un rotundo fracaso debido a fallas mecánicas.

En la implementación de un material de cambio de fase metálico o no metálico en una interfaz térmica debe tener en cuenta algunas consideraciones de diseño tales como: expansión del material, medio de implementación, encapsulado, etc. En la literatura existen varias opciones, se destaca por ejemplo a Nomura et al. (2016), quien proponen el uso de recipientes cerámicos que comprenden una tapa y una copa para la macroencapsulación de metal PCM y un método de sellado de los contenedores para disminuir el estrés térmico de la expansión de volumen durante el cambio de fase. La cápsula PCM resultante tiene una excelente resistencia a la corrosión y a procesos intermitentes (ON-OFF) de flujos de calor [16]. Otra técnica innovadora para encapsular PCM consiste en recubrir un polímero no reactivo sobre el gránulo de PCM, seguido de la deposición de una capa de metal mediante una nueva técnica de deposición de metal sin vacío. Las cápsulas fabricadas han sobrepasado los 2200 ciclos térmicos en operación, lo que equivale a aproximadamente 7 años de servicio en un sistema de almacenamiento de energía térmica [17].

El presente estudio tiene por objetivo analizar la factibilidad de recuperación de energía proveniente de los gases de un convertidor de acero en la planta CSCh, a través de un modelo representativo del sistema de refrigeración de los gases. Para ello, primeramente, se realiza una caracterización de los componentes del sistema (domo, campanas y duchas), para luego plantear las consideraciones y ecuaciones del modelo de cada componente. Una segunda parte consiste en la realización de experiencias en la planta CSH para obtener datos que permitan validar el modelo. Finalmente, se plantea una propuesta que incorpora en el modelo la recuperación de energía de los humos de escape del convertidor mediante un dispositivo PCM.

1.2. Objetivos

El objetivo general del estudio es realizar un análisis energético del sistema de campana extracción de gases BOF de la siderúrgica CAP a fin de proponer alternativas de recuperación energética a partir de los gases generados en el convertidor.

Los objetivos específicos del estudio son los siguientes:

- Plantear un modelo térmico para cada componente del sistema.

- Cuantificar los flujos de calor transmitidos en el proceso.
- Proponer medidas de mejora basadas en los resultados de la revisión y estudio energético.
- Validar el modelo representativo del sistema, mediante mediciones de temperatura.
- Integrar un dispositivo PCM en el modelo propuesto, a fin de evaluar la recuperación energética a través de un ciclo Rankine.

1.3 Metodología

La tesis trata del estudio energético del sistema de refrigeración de campana de los gases de combustión de escape de un convertidor BOF para la producción de acero. En una primera instancia se analizará el estado del arte y propuestas para mejorar la eficiencia energética que se han estudiado o aplicado actualmente. En una segunda parte se hará una caracterización de los componentes del sistema (domo, tubos, bombas, etc.) para luego plantear los Modelos representativos del sistema. Además, se realizan experiencias en terreno para conocer el comportamiento de los gases, calcular ciertos parámetros de los Modelos y comparar algunas variables estimadas del modelo con las obtenidas a través de las mediciones, donde se tomará temperatura de gases, flujos volumétricos, temperatura y presión del agua. En la tercera parte se proponen alternativas de recuperación de energía de los puntos más conveniente del sistema, principalmente de los humos de escape del convertidor.

1.3.1 Análisis experimental

Durante el estudio se realizarán mediciones para gases con las finalidades de:

- 1) Conocer el comportamiento de la temperatura de los gases, tanto axialmente como a lo largo de la campana
- 2) Conocer el comportamiento de la temperatura y presión del agua al interior de los tubos a lo largo de la campana
- 3) Estimar parámetros propios de los fluidos necesarios para el modelo
- 4) Validación del modelo

Todas las mediciones se realizarán con equipos de medición correspondientes y correctamente calibrados, los cuales se detallan en el subcapítulo 3.2.1.

1.3.2 Modelo

El modelo del sistema de refrigeración será basado en una serie de ecuaciones matemáticas principalmente de energía, entre las que se destacan balance de energía y transferencia de calor, las cuales representaran los distintos procesos que ocurren. La utilidad que se le dará al modelo es:

- 1) Representar procesos de combustión, energía y transferencia de calor del sistema
- 2) Identificar variables termodinámicas relevantes del sistema
- 3) Cuantificar las energías del sistema
- 4) Modificación y aplicación de medidas de recuperación de energía

Una vez finalizado el modelo se validará utilizando las mediciones realizadas en terreno en comparación con la entregadas por este.

CAPÍTULO 2

Descripción de la planta de producción acero y sus procesos

2.1 Proceso de obtención del acero

El acero base que se produce en el BOF donde se considera una carga de 70-75 toneladas de arrabio y 25 toneladas de chatarra, ambos son vertidos en un convertidor acero. Luego se inyecta oxígeno puro dentro del convertidor mediante una lanza refrigerada con agua a una Presión de 1.2 [MPa] y temperatura ambiente 15°C, para el proceso de oxidación de los componentes indeseados.

Durante este proceso se generan gases de combustión los cuales son captados por un sistema de extracción de gases compuesto por campanas formadas por tubos de acero (en el anexo A se puede observar este sistema). Luego de esto, el acero obtenido es vaciado en una cuchara para ser llevado al siguiente proceso de colada continua.

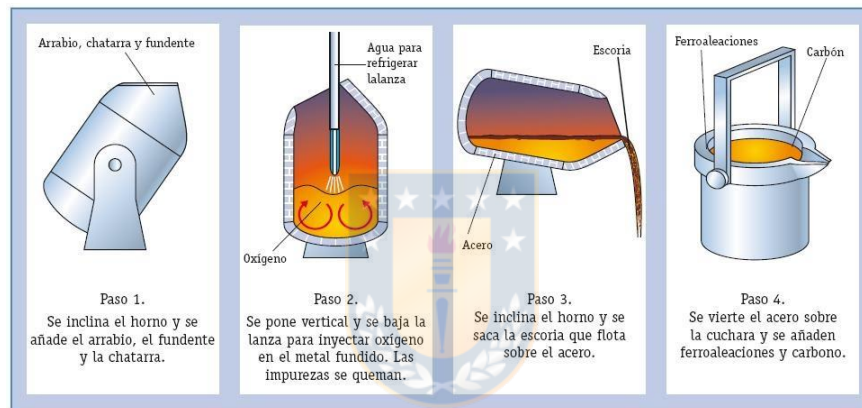


Figura 2.1 Formación del acero (Fuente: Ángel Martín (S.F)[33])

2.1.1 Composición mezcla en convertidor

La producción del acero líquido requiere aproximadamente un 75% de arrabio, el cual se produce hecho en base de mineral de hierro, piedra caliza y gas coque. Este último se quema como combustible en el horno de la compañía CAP (Figura 2.1.1), el cual al arder genera monóxido de carbono el cual reacciona con el mineral de hierro compuesto mayoritariamente por óxidos para producir su reducción. Luego, el arrabio es trasladado a la acería para el proceso de formado del acero, el cual viene con una temperatura del orden de los 1300-1350°C y con una composición que se observa en la Tabla 2.1.



Figura 2.1.1 Alto Horno, Aceros CAP (Fuente: CAP [34])

Tabla 2.1 Composición del arrabio

Elemento	Porcentaje [%]
Fe	90-95
C	4,2-4,8
Si	0,3-1,0
Mn	0,15-0,2
P	0,04-0,07
S	0,004-0,04
Escoria	0,5-2

La composición química del arrabio debe encontrarse dentro de unos límites para que el proceso de conversión y la composición final del acero sean adecuados. El silicio se oxida de forma muy exotérmica, tiene una gran influencia sobre la temperatura del baño, e incide sobre el volumen de escoria. El manganeso influye en la eliminación del azufre y el fósforo y en la formación de escoria. La desulfuración debe realizarse antes de llegar al convertidor, ya que el ambiente oxidante no la favorece. El contenido en fósforo debe controlarse dada la complejidad de su eliminación [18].

El arrabio es vaciado sobre el convertidor, el cual previamente se encuentra con chatarra que actúa como refrigerante, esta se emplea para mantener la temperatura de colada dentro de los límites admisibles absorbiendo el calor producido en las reacciones de oxidación. El consumo de chatarra depende de la temperatura y composición del arrabio y temperatura final de colada, principalmente. La chatarra representa un 20- 30% de la carga metálica [18].

Primero se carga la chatarra y luego se vierte el arrabio en el convertidor completando así como máximo las 100 toneladas que permite el sistema del convertidor, donde su composición dependerá del tipo de chatarra seleccionada. La selección de la chatarra a utilizar dependerá del tipo de acero que se quiera realizar, ya que cada una de ellas posee distinta concentración de cada componente.



Figura 2.1.2 Carga de chatarra antes de su selección (Fuente: IRASA[35])

2.1.2 Reacciones del convertidor

Una vez seleccionada la chatarra y cargada junto con el arrabio al convertidor, el proceso siguiente es la oxidación de algunos elementos del acero, principalmente del carbono el cual incrementa el índice de fragilidad en frío y hace que disminuya su tenacidad y ductilidad.

Al estar en contacto el flujo de oxígeno con la mezcla produce la oxidación de varios componentes indeseados, tales como fósforo, azufre, titanio, etc. El carbono al reaccionar se genera monóxido de carbono, un compuesto altamente tóxico, pero que al observar su poder calorífico $12 \frac{MJ}{Nm^3}$ se vuelve una fuente de energía considerable.

Este proceso se le conoce como “soplado” el cual tiene una duración promedio de 15 minutos aproximadamente. El oxígeno inyectado es puro en un 99,9% con una temperatura y presión de $15^\circ C$ y $1,2MPa$ y un flujo volumétrico en promedio $\dot{V}_{O_2} = 150 \left[\frac{m^3}{min} \right]$.

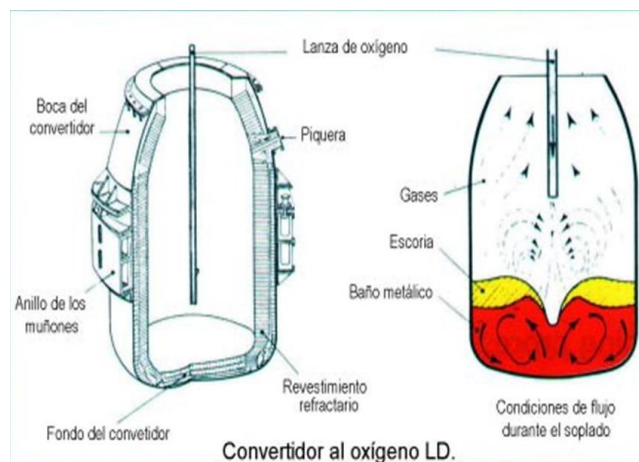


Figura 2.1.3. Inyección de oxígeno. (Fuente: Saul Rivera [36])

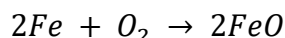
Se desciende la lanza hasta la posición de soplado, unos 90-300 cm por encima del nivel del baño, y comienza la inyección de oxígeno. La presión de inyección es suficiente para que la penetración del chorro de oxígeno en el arrabio sea adecuada y además sea capaz de atravesar la capa de escoria, la cual desde el comienzo de la operación se forma sobre el baño metálico. El impacto del chorro de oxígeno sobre el baño provoca una depresión con una zona de circulación de fluido alrededor, se producen adicionalmente salpicaduras y comienzan a elevarse los gases. En algunas zonas la agitación del baño es escasa o nula “zonas muertas”, por lo que el oxígeno no reacciona con los elementos del baño o lo hace muy lentamente. Para evitar estas zonas muertas, sin variar el diseño del proceso, se busca optimizar la relación entre el diámetro del convertidor y el diámetro de la superficie de impacto del chorro de oxígeno y la relación entre la profundidad de la depresión producida en el baño con la profundidad del baño, estudio que realizó Wei [19]. La primera relación está determinada por el diseño del convertidor y la cabeza de la lanza y no puede ser modificada. La profundidad de la depresión sí puede ser variada modificando la altura de soplado y el caudal. Xiaolin Wei realizó simulaciones numéricas de la formación de gases de escape de un convertidor de acero variando la altura de la lanza y la presión de oxígeno, obteniendo como conclusiones que a menor altura de la lanza sobre la mezcla la velocidad de descarbonación aumenta, y que a menor presión de inyección del oxígeno disminuye esa velocidad [19].

Concluyó que la posición de la lanza es muy importante para el buen funcionamiento del proceso. Si es demasiado elevada, la escoria será agitada y oxidada en exceso, con un porcentaje mayor de FeO, lo que implica mayores pérdidas de rendimiento y menor eficiencia de las aleaciones. El volumen de escoria aumenta y puede derramarse por la boca del convertidor, además la velocidad de eliminación de carbono se reduce y se vuelve irregular. Cuando la lanza es demasiado baja, aumenta la eliminación del carbono, a costa de una reducción en la formación de escoria, su reactividad y el porcentaje de FeO y con frecuencia se producen problemas en la eliminación de azufre y fósforo. También se producen proyecciones de gotas de metal que pueden producir daños en el refractario, la lanza y la campana de gas.

Las reacciones químicas que ocurre al interior del convertidor Jorge Coma las explica en su memoria [18]:

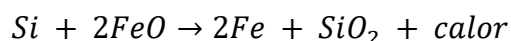
1) Oxidación del hierro

El oxígeno inyectado reacciona con el hierro y forma óxido de hierro (FeO), que es inestable en el ambiente químico del baño y es el proveedor de oxígeno para la oxidación de los demás elementos:



2) Eliminación del silicio

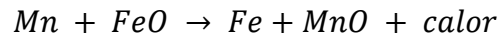
El Si es el primer elemento en reaccionar con el oxígeno proporcionado por el FeO en una reacción muy exotérmica, dando lugar a la sílice (SiO_2):



La sílice formada se combina con los óxidos básicos presentes en el baño (óxido de manganeso, de hierro y óxido cálcico), dando lugar a la escoria que flota.

3) Eliminación del manganeso

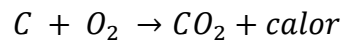
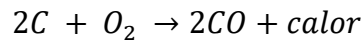
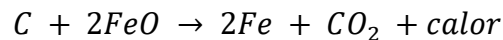
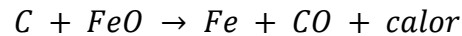
El manganeso forma óxido de manganeso reaccionando con el oxígeno de FeO. formando escoria:



Durante la etapa descarburación máxima y a elevadas temperaturas, el carbono reduce parte del Mn de la escoria, con lo que aumenta su actividad y vuelve al baño, lo cual permite reducir las ferroaleaciones.

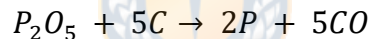
4) Eliminación del carbono

El carbono se elimina con los gases como CO y CO₂ que se eliminan por la campana extractora. La relación CO₂/(CO + CO₂) se conoce como Relación de Combustión Secundaria (PCR). Las reacciones en el convertidor son:

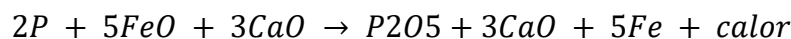


5) Eliminación del fósforo

El fósforo reacciona con el oxígeno para formar pentaóxido de fósforo (P₂O₅), pero este compuesto no es estable a las temperaturas del proceso y sería reducido por el carbono, volviendo al baño, según la siguiente ecuación.



La eliminación del fósforo solamente sería posible tras conseguir una descarburación total, lo cual implicaría grandes pérdidas de Fe y un tiempo y costes de proceso muy elevados. Para evitarlo se añade cal (CaO), generando la reacción (P₂O₅+3 CaO), el cual pasa a la escoria. La reacción completa para la eliminación del P es la siguiente:

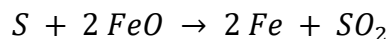


Se trata de una reacción reversible y muy exotérmica que requiere de un medio favorable, donde abunden el FeO y el CaO (escoria básica) y la temperatura no sea muy elevada.

6) Eliminación del azufre

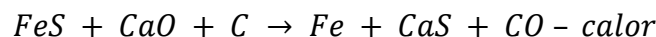
Para la eliminación del azufre existen dos vías:

- Por los humos: de esta manera se elimina entre un 10 y un 15% de la cantidad total eliminada.



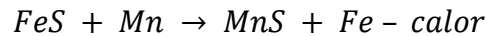
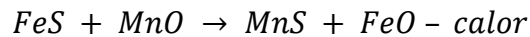
- Por la escoria: En forma de sulfuro de calcio (CaS) o sulfuro de manganeso (MnS).

Partiendo de sulfuro de hierro, en presencia de abundante cal y espatofluor se forma CaS:



Esta última es una reacción endotérmica, por lo que se ve favorecida por las altas temperaturas. En lugar del carbono también puede intervenir el silicio. En ambos casos, la reacción debe tener lugar al principio del proceso cuando estos elementos son abundantes o el sentido de la reacción podría invertirse. El volumen de escoria debe ser elevado, ya que la solubilidad del CaS es limitada.

La eliminación del azufre también se produce en forma de FeS por el manganeso, puro u oxidado (MnS).

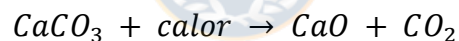


Esta reacción se ve favorecida por la abundancia de Mn y las altas temperaturas. El sulfuro de manganeso (MnS) es más soluble en la escoria que el FeS.

Por tanto, la eliminación del azufre se ve favorecida descarburando hasta contenidos muy bajos en C, aumentando la basicidad, elevando la temperatura de colada, con contenidos altos de Mn, elevando el volumen de escoria y con una buena agitación del baño [18].

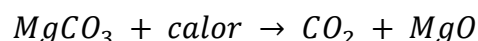
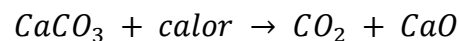
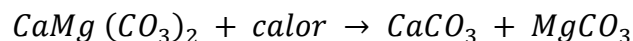
Otras reacciones que ocurren en el convertidor son en las que intervienen los fundentes, los cuales actúan como formadores y fluidificantes de escoria. Atrapan las sustancias no deseadas, que se recogen en la escoria de convertidor, y rebajan el punto de fusión de la escoria, consiguiendo que la fluidez sea suficiente para permitir que tengan lugar las reacciones químicas y la penetración del chorro de oxígeno. Como fundentes se emplean generalmente **caliza, cal, dolomía y espato flúor**.

La caliza es carbonato cálcico ($CaCO_3$). Se emplea como refrigerante y para la obtención de cal mediante calcinación:



La Cal es un material de carácter básico, facilita la captación de impurezas por la escoria y protege el refractario. El consumo medio es de unos 40-45 kg de cal por cada tonelada de acero. La cal debe estar totalmente calcinada, para evitar que la cantidad de cal sea menor de la esperada y el efecto refrigerante al ser calcinada. El contenido en azufre, SiO_2 , Al_2O_3 y MgO debe ser bajo para no contaminar el acero. El tamaño de material no debe ser demasiado fino (pueden ser absorbidos por la campana) ni gruesos (tardan demasiado en fundirse).

La dolomita es un carbonato de calcio y magnesio ($CaMg(CO_3)_2$). Al ser calcinado se descompone en caliza y carbonato magnésico que, a su vez, se descomponen dando cal y magnesia. Se usa para proteger el refractario de los ataques de la escoria, aportando MgO, y como refrigerante [18].

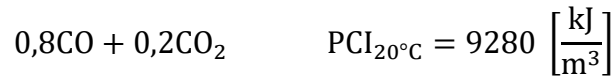


Una vez terminado el soplado cuando la composición del acero en el convertidor logra el acabado necesario, se realiza la colada o sangría. En primer lugar, se vierte el metal a la cuchara de colada, y durante este proceso se adicionan las ferroaleaciones, para realizar el ajuste final de composición en la metalurgia secundaria. Para evitar la salida de escoria durante este proceso se cuenta con dos sistemas de

vigilancia y control. El primero consiste en controlar el porcentaje de escoria que hay en el chorro de sangría con una cámara. El segundo consiste en emplear cono de refractario de densidad intermedia a las del acero y la escoria, este cono se introduce en el convertidor durante la sangría y tapa la piqueta evitando que salga la escoria. Incluso empleando estas medidas pasa una pequeña parte de la escoria, que evita que el acero de la cuchara se oxide en contacto con el aire.

2.1.3 Caracterización gases de combustión campana

Al producirse la oxidación de los componentes en el baño del convertidor, estos forman gases de combustión con una temperatura que va desde los 350°C hasta 1700°C, los cuales en su peak de formación de gases de combustión poseen una composición tal como se muestra a continuación, en base a un 1 kmol de combustible:



Para el cálculo del poder calorífico, se utiliza norma chilena NCh2380.Of97, la cual entrega una serie de ecuaciones y tablas para su aproximación, la cual se puede observar en **el Anexo B**.

El poder calorífico del gas real, sobre base volumétrica, para una temperatura de combustión t_1 y presión p_1 , de una mezcla de gas medida a una temperatura t_2 y presión p_2 se calcula según las ecuaciones:

$$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}^\circ[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)} \quad (1)$$

$$\tilde{H}^\circ[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \tilde{H}_j^\circ[t_1, V(t_2, p_2)] \quad (2)$$

$$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2 \quad (3)$$

$$x_j = \frac{\frac{y_j}{Z_j(t_2, p_2)}}{\sum_{j=1}^N \frac{y_j}{Z_j(t_2, p_2)}} \quad (4)$$

Donde

$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)]$	poder calorífico del gas real sobre base volumétrica (superior o inferior)
$\tilde{H}^\circ[t_1, V(t_2, p_2)]$	poder calorífico ideal de la mezcla sobre base volumétrica (superior o inferior)
$Z_{\text{mix}}(t_2, p_2)$	factor de compresión del gas en las condiciones de referencia medidas
x_j	fracción molar de cada componente j del gas natural considerado
$\sqrt{b_j}$	factor de sumatoria para cada componente j del gas natural considerado

y_j	porcentaje en volumen de cada componente j del gas natural
$Z_j(t_2, p_2)$	factor de compresión de cada componente j del gas natural considerado
$\tilde{H}_j^o[t_1, V(t_2, p_2)]$	poder calorífico ideal sobre base volumétrica de cada componente j del gas

De esta forma se obtiene el Poder calorífico interior a una temperatura de referencia de 20°C, cuya variación en función del CO/CO₂ se puede observar en la Figura 2.1.4.

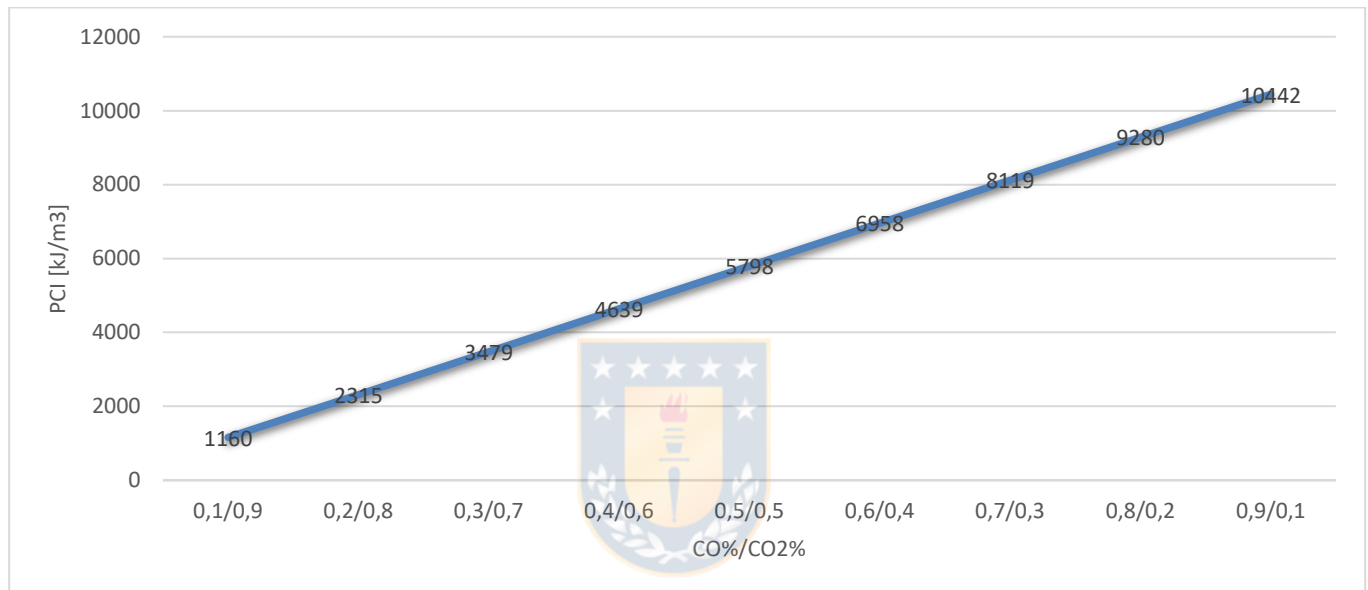


Figura 2.1.4 Variación del PCI en función de sus componentes.

2.2 Sistema de refrigeración de los gases de combustión del convertidor

Durante el proceso de inyección de oxígeno, se forman los gases de combustión primarios los cuales son captados por un sistema de campanas de refrigeración (Figura 2.2), la cual está subdividida en tres partes: campana móvil, campana fija y campana corta. Las cuales están encargadas de disminuir la temperatura de los gases de combustión de una temperatura entre los 300-1700°C hasta 200°C-1000°C.

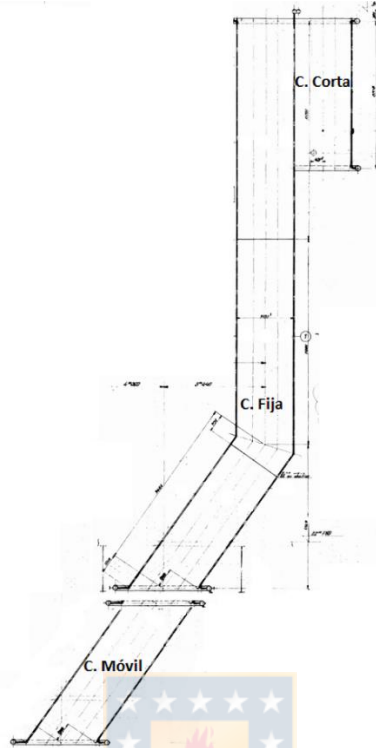


Figura 2.2. Divisiones de Campanas

Las campanas están compuestas por tubos de aceros de diferentes características mostradas en la Tabla 2, cuyas dimensiones son diámetro, espesor y largo, los cuales están unidos por membranas de acero de forma vertical, los cuales son alimentados por un circuito de agua enfriamiento proveniente de un estanque (domo), llenándolas desde su parte inferior hasta su salida en la parte superior. Además, la campana fija en su interior posee las duchas de refrigeración ubicada después de su curvatura, las cuales se encargan de enfriar los gases.

Tabla 2. Características generales de las Campanas

Campana	Tipo de tubo	Dimensiones [(\emptyset) mm x (e) mm x (L) m]
Móvil	Acero alta soldabilidad	38 x 4.0 x 8
Fija	Acero TU-37C Steel	63,5 x 4,0 x32,450
Corta	Acero SA-210 A-1	63,5 x 6,3 x 8,320

2.2.1 Composición del Sistema de refrigeración

El sistema de refrigeración tal como se mencionó en capítulo anterior, está compuesto por las campanas las cuales poseen distinto tamaño y largo, el conjunto forman una especie de “ducto” por donde circulan los gases de escape del convertidor para su refrigeración, esto se logra debido al agua de circulación al interior de los tubos, proveniente desde el domo. Además, se tienen las duchas de enfriamiento componente que fueron agregadas con el paso del tiempo, debido a las altas temperatura de los gases, lo que provocaba rotura en los tubos superiores, cuyo problema fue solucionado con la integración de estas.

2.2.2 Campana móvil

Campana formada por 222 tubos de acero de alta soldabilidad y un largo de 8 m por donde circula el agua de refrigeración, cuya distribución se muestra en la Figura 2.2.1. Esta sección se encarga de la recepción de los gases de escape del convertidor con la filtración de aire externo debido al espacio existente entre estos dos componentes, con una temperatura ambiente de 20°C. Los gases ingresan con una temperatura durante el soplado que varía entre los 300°C al inicio hasta una temperatura máxima de 1700°C y una composición en su mayoría 80% CO y 20% CO_2 .

En esta sección del sistema es donde se asumirá que se produce la combustión secundaria debido a la interacción de los gases de escape del convertidor y el aire filtrado. Además, la circulación del agua de esta campana es forzada mediante una bomba de alimentación con un caudal y presión $Q = 890 \frac{m^3}{h}$ y $P = 27,6 Bar$.

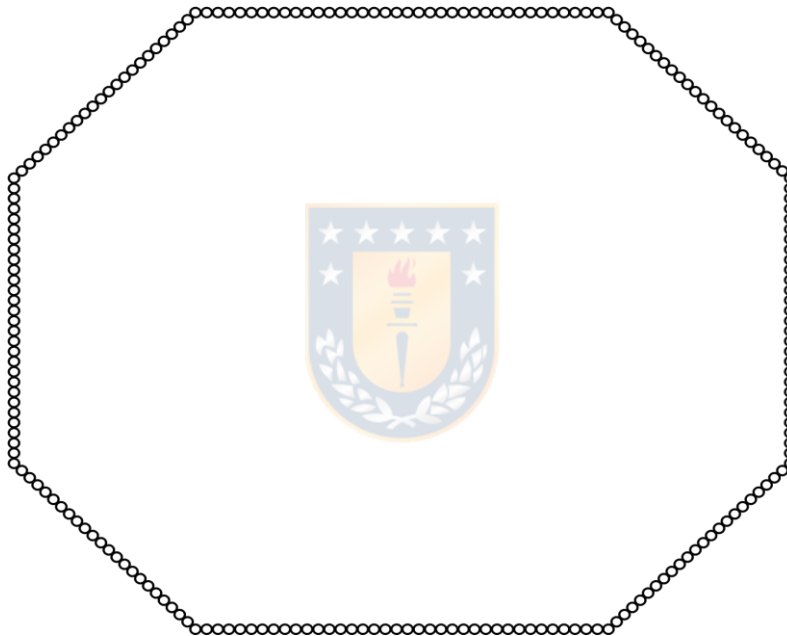


Figura 2.2.1 Distribución de tubos campana móvil

2.2.3 Campana Fija

Campana formada por 144 tubos de acero y un largo de 32,5 m, con una distribución mostrada en la Figura 2.2.2. Esta sección se encarga de la recepción de los gases de la combustión secundaria ocurrida en la campana móvil con una temperatura durante el tiempo de soplado que varía desde 300°C al inicio hasta una temperatura máxima de 1700°C y una composición de 15%CO y 85% CO_2 . Para posteriormente ser enfriados, logrando una disminución de la temperatura máxima de los gases hasta los 1000°C

En esta sección del sistema es donde ocurre la mayor disminución de temperatura de los gases de combustión, en consecuencia, el mayor aumento de temperatura del agua de enfriamiento, la cual en este caso es de circulación natural.

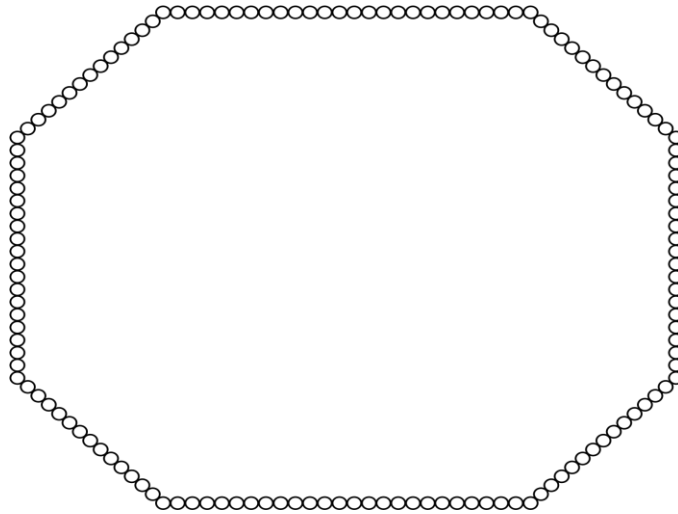


Figura 2.2.2. Distribución de tubos campana fija

2.2.4 Campana Corta

Campana formada por 144 tubos de acero y un largo de 8 m, con una distribución mostrada en la Figura 2.2.2. Esta sección se encarga de la recepción y enfriamiento de los gases luego de la campana fija. En esta sección del sistema se enfrían y preparan los gases para el proceso de lavado en el lavador primario. En este caso la circulación es del tipo natural

Un detalle a considerar es que esta campana, no será considerada para el estudio, debido a que en la actualidad su funcionamiento es casi nulo. Por ende, no afecta al sistema y sus variables.

2.2.5 Duchas de enfriamiento

En 1995 se decidió implementar un sistema de control de duchas de enfriamiento al interior de la campana fija a unos 20 [m] de la parte superior, debido a la gran cantidad de roturas de los tubos en la parte superior del circuito, por las altas temperatura de los gases.

Compuestas por una matriz de tres anillos cada uno con 16 boquillas, alimentados por un circuito de agua industrial de $Q = 30 \left[\frac{m^3}{h} \right]$ y $P = 5 [Bar]$ y contralada por una válvula de control on/off, la cual da el paso al agua cuando los gases superan la temperatura de $600^{\circ}C$ y la cierra cuando esta es inferior a $300^{\circ}C$.

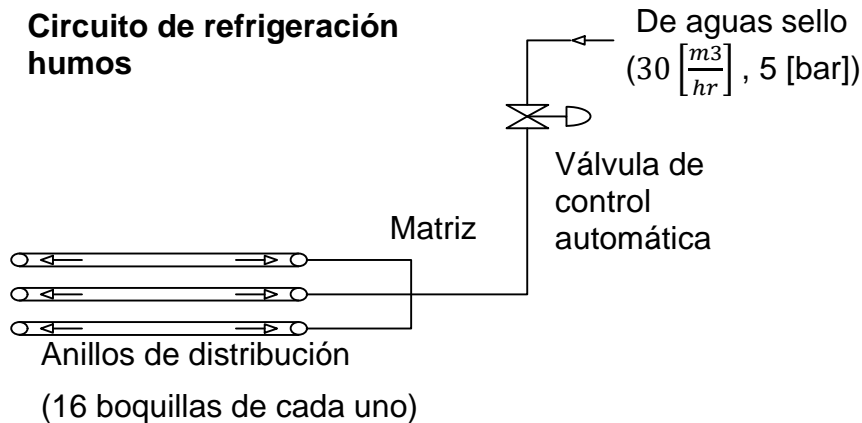


Figura 2.2.4 Duchas de enfriamiento

2.2.6 Domo

El domo es la fuente de alimentación de las campanas con un volumen de $V = 31,5[m^3]$, este proporciona un flujo volumétrico de agua para cada campana del sistema de refrigeración, los cuales una vez recorrido todo el circuito de tubos de bajada y subida (Downcomer y Raiser) retornan nuevamente al domo. Además, este es alimentado con un flujo volumétrico proveniente de un desaireador con un flujo y temperatura de: $\dot{V} = 87 \left[\frac{m^3}{h} \right]$ y $T = 90^\circ C$. Durante el tiempo de soplado al interior del domo ocurre un aumento de presión que parte desde los 7 Bar y llega hasta un tope de 23 Bar. En el momento en que el estanque de agua llega a los 12 Bar se abre la válvula de escape del vapor del domo, cuya apertura aumenta en función del aumento de presión, de esta forma escapando cada vez más el flujo de vapor generado, hasta un tope de $33[kg/s]$. Este fenómeno ocurre debido a la generación de vapor en los tubos de subida de las campanas.

Para suplir el flujo de agua líquida que se transforma en vapor durante el proceso, el domo es alimentado por agua del desaireador, cuyo flujo varía durante el tiempo de soplado, siendo regulado por una válvula, cuyo control en una primera instancia es manejado por el nivel del domo, programado para que no baje del 40% y luego cuando el flujo de vapor liberado llega a su pico máximo, la válvula es regulada en base al vapor de salida en una proporción: por cada $1 \frac{t_{vapor}}{h}$ ingresa $1 \frac{m^3_{agua}}{min}$.

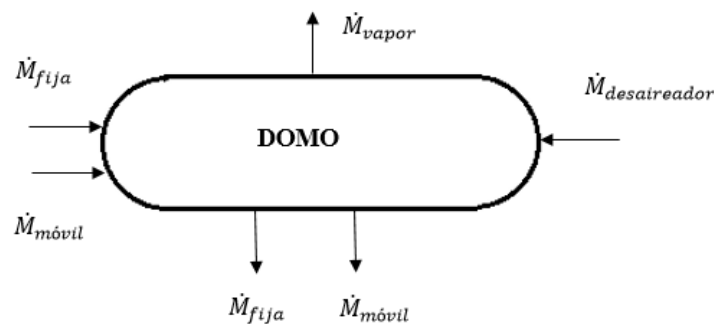


Figura 2.2.5 Domo de alimentación de campana

2.3 Caracterización del proceso

La formación y enfriamiento de gases está caracterizados por dos principales procesos, uno de ellos es el provocado por el sistema de refrigeración que se encargar de disminuir la temperatura de los gases (subcapítulo 2.3.1) y el segundo que son los gases formados debido a las reacciones de convertidor debido a la inyección de oxígeno, los cuales cambian durante el proceso y se muestran en los subcapítulos 2.3.2 a 2.3.4. Estas reacciones se pueden observar claramente, en la Figura 2.3.1 se muestra un soplado que dura 18 minutos, para una facilidad de entendimiento se le denotará con el sub índice a, b y c, para la etapa inicial, intermedia y final del soplado.

2.3.1 Comportamiento del sistema de refrigeración de campana

Al iniciar el soplado los gases son captados por la campana móvil, los cuales vienen con una composición de 80% CO y 20% CO_2 , los cuales combustionan al interior de la campana móvil debido a la apertura existente entre el convertidor y la campana, permitiendo la filtración de aire a su interior, a su vez los gases captados son enfriados por el sistema de refrigeración de la campana móvil hasta una temperatura de 1700°C. Seguido viene la campana fija la cual recibe los gases combustionados con una composición de 15%CO y 85% CO_2 , en esta sección nuevamente son enfriados los gases por el sistema, pero además, también son enfriados por las duchas ubicadas después de la curvatura de la campana, las cuales inyectan agua directamente a los gases. Por último, los gases pasan a la campana corta hacia el proceso “Lavado de Gases”.

2.3.2 Periodo de oxidación del silicio (Etapa a: Inicio del soplado)

Tiene lugar durante el primer tercio del soplado (primeros 5 minutos). La mayor parte del Si, el metal más activo, se oxida en una reacción muy exotérmica junto con algo de Fe. En esta fase se añaden los fundentes, en el comienzo del soplado se añade la mitad de la cal y unos 4 minutos después el resto.

Una buena práctica durante esta fase consiste en aumentar el contenido de FeO y obtener una buena escoria espumante al comienzo del soplado, para posteriormente estabilizarla bajando la lanza.

Durante este período también tiene lugar la oxidación de la mayor parte del P y del Mn. El oxígeno restante reacciona con parte del carbono. En esta fase la llama es corta y poco luminosa y el proceso es muy exotérmico, por lo que la formación y temperatura del gas de combustión primario aumenta lentamente.

2.3.3 Periodo de descarburación creciente (Etapa b: Soplado intermedio)

En esta etapa entre los minutos 5 y 10 tiene lugar en primer lugar la oxidación del manganeso, seguido del carbono y el fósforo. La llama alcanza su máxima luminosidad y longitud, para disminuir después hasta el final, manteniendo el flujo y temperatura del gas constante.

2.3.4 Periodo de descarburación decreciente y oxidación del metal (Etapa c: Fin del soplado)

Al finalizar el soplado (últimos 5 minutos), cuando el contenido de carbono es menor al 0.8%C, la velocidad de descarburación disminuye sustancialmente y se encuentra cada vez más limitada por la difusión del carbono en el acero, provocando una disminución en la formación los gases de combustión. Esta etapa es clave en la fabricación de aceros inoxidable, con bajos contenidos en carbono. El bajo porcentaje de carbono causa la oxidación del hierro, indicando el final del proceso.

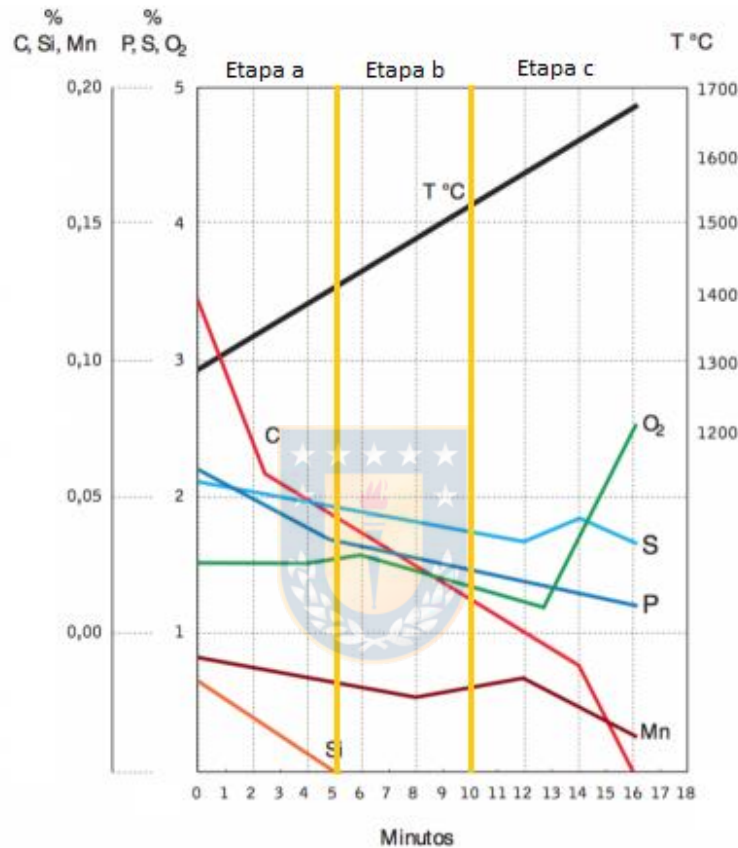


Figura 2.3.1. Evolución de la composición y la temperatura del acero durante la conversión. (Fuente: Jorge Coma [18])

2.3.5 Variación del proceso entre soplados

La variación que existe entre un soplado y otro está ligado a varias variables que lo afectan, durante los doce meses que duro el estudio se logró identificar cuáles de ellas son primordiales teniendo un efecto importante sobre los gases de combustión y como consecuencia sobre el sistema de campanas. En la Figura 2.3.2. se identifican estas principales variables en conjunto con su efecto en el sistema.

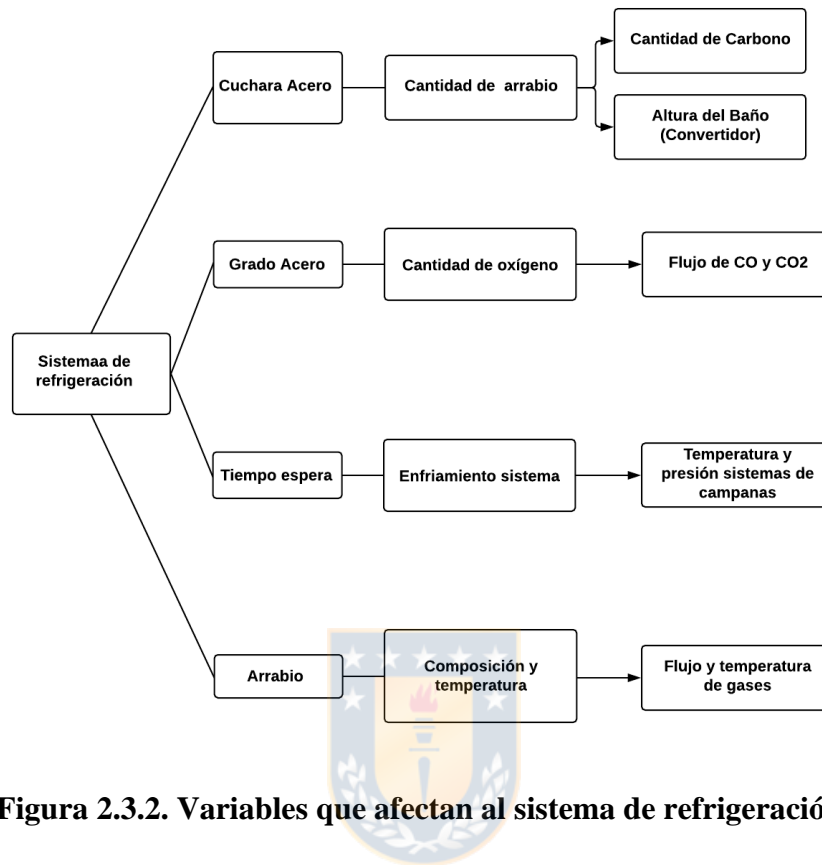


Figura 2.3.2. Variables que afectan al sistema de refrigeración.

- 1) Cuchara de acero: La cantidad de toneladas admisibles que posee cada cuchara de acero varía con el tiempo, debido a su desgaste/reparación, provocando una variación en cantidad de arrabio ingresada al convertidor, generando dos consecuencias importantes:
 - Cantidad de carbono: Una mayor/menor cantidad de arrabio, implicaría una mayor/menor cantidad de carbono en la mezcla, haciendo que el flujo total CO y CO_2 del soplado aumente/disminuya.
 - Altura del Baño: Una mayor/menor cantidad de arrabio implica una mayor/menor altura del baño y esto tiene como consecuencia una disminución/aumento del tiempo de residencia de los gases combustión, y por ende una alteración en los porcentajes de CO/ CO_2 de los gases de salida, donde a un mayor/menor tiempo de residencia provoca una disminución/aumento del CO.

- 2) Grado Acero: La gama de aceros especiales dentro de la compañía es bastante amplia y cada uno con una composición final distinta, por lo que los porcentajes de carbono y silicio también cambian, indicando que a veces necesita de una mayor/menor descarburación, lo que implica un aumento/disminución del flujo total de oxígeno sobre el convertidor, generando como consecuencia la variación total del flujo de gases formado. Esto queda demostrado en el Capítulo 3 sobre análisis experimental.

- 3) Tiempo de espera: Una secuencia, es conocida como la formación seguida de un grado acero, normalmente de grupos de no más de 12 cucharas. Al producirse un cambio de secuencia, (cambio de grado acero) el sistema se detiene un cierto intervalo de tiempo para hacer los preparativos que requiere la formación del siguiente grado de acero.

Con el sistema detenido y frío, dar inicio a la siguiente secuencia requiere de una mayor cantidad de energía para romper la inercia del sistema, por lo que la circulación de la refrigeración es más lenta, debido a que su circulación es natural. Esto genera un efecto tanto positivo como negativo en el sistema, ya que, al estar el agua con una menor temperatura, los tubos de las campanas están sometidos a una menor temperatura y presión, en comparación a cuando el sistema se encuentra “estacionario”, pero al mismo tiempo el someter el tubo a un cambio de temperatura tan brusco provoca una dilatación del tubo brusca la cual podría traer consecuencia en un futuro.

Por otra parte, una vez avanzada la secuencia el sistema se tiende a normalizar, donde las temperaturas de sus distintas componentes toman un valor estable en cada soplado sin mayores cambios. Cuando esto sucede el proceso de formación del acero tiende a volverse monótono y se reducen los tiempos de espera entre soplado, debido a que el proceso se agiliza, como consecuencia el sistema se enfría menos, y por ende la temperatura del sistema de refrigeración de las campanas al iniciar el soplado es mayor, lo que implica que la temperatura de las diferentes componentes del sistema durante el proceso sea mayor.

- 4) Arrabio: La temperatura y composición del arrabio, tiene una consecuencia directa en los gases de combustión de salida del convertidor, un mayor/menor temperatura implica una mayor/menor temperatura de los gases combustión de salida. En cuanto a la composición, tal como se indicó en “Cuchara Acero”, la cantidad de carbono presente en el arrabio tiene directa relación con el flujo total de gases de combustión formados, una composición con un mayor/menor porcentaje de carbono implica una mayor/menor flujo total de gases de combustión.

Por lo que se aprecia, el estudio de este sistema no es sencillo, debido a la gran cantidad de variables que afectan al sistema, lo que hace que una predicción exacta del sistema sea compleja de realizar, es por ello que se decide hacer mediciones, por una parte, para entender el dinamismo que posee el sistema y por otra para validar el modelo propuesto.

CAPÍTULO 3

Análisis experimental

3.1 Descripción de experiencias

Se realizaron experiencias que contemplaron: medición de temperatura de gases, temperatura y presión de agua durante los 15 minutos que dura el soplado, con la finalidad de comparar el comportamiento de ciertas variables obtenidas de los balances de energía de las campanas. Estas experiencias ayudarán a obtener y comprender el comportamiento de algunos parámetros propios del modelo, además ayudarán a demostrar si los resultados arrojados por los modelos se acercan al comportamiento real. De ser acertado, se utilizará para la modificación y aplicación de opciones de recuperación de energía para los distintos flujos de energía existentes, en caso contrario se deberán realizar las modificaciones necesarias. Todas las mediciones se pueden observar en el Anexo D.

3.2. Caracterización de temperatura gases

El comportamiento de interés para el estudio es principalmente de los gases de combustión en las campanas, por lo que se propone una campaña de medición de temperatura a lo largo de la campana fija en cuatro niveles distintos como se muestra en la Figura 3.2.1, para conocer el comportamiento, rango de temperatura y abrasión que puedan poseer los gases. Una vez identificado estos parámetros, se buscará el mejor punto de medición para la creación de un perfil de temperatura radial a través de la campana.

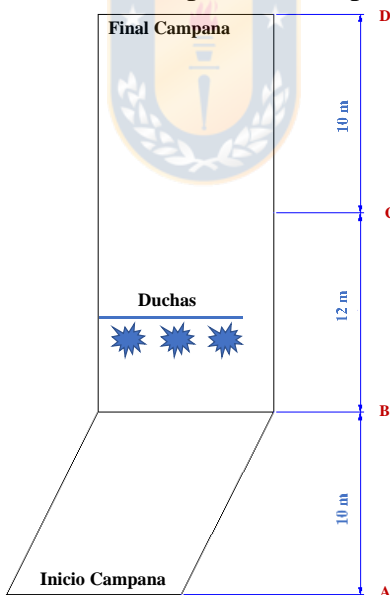


Figura 3.2.1 Niveles de medición de temperatura de gases C. Fija.

Se realizaron 3 experiencias: una para conocer los rangos de temperatura reales que tienen los gases en la campana y su abrasión, de esta forma poder escoger equipos adecuados. Otra para medir el perfil axial de los gases y por último las temperaturas en los diferentes niveles y posterior creación del perfil. No se realizaron mediciones en la campana móvil debido a la combustión secundaria que ocurre, lo cual impide la introducción y manipulación de cualquier instrumento en su interior.

3.2.1 Experiencias y equipos de medición

Experiencia 1

Objetivos

1. Conocer la temperatura de los gases en distintos niveles de la campana.
2. Identificar la existencia de diferencia de temperatura radialmente.
3. Conocer la abrasión de los gases que pueda dañar los equipos.

Variable: Temperatura

Descripción

Al inicio de la campana (A) se introduce en el espacio existente entre campanas fija-móvil un **termopar tipo S, tipo de Alambre (Platino al 10%/Rodio-Platino)**, rango de temperatura de 20°C a 1786°C, el cual está recubierto por una **funda de protección de nitruro de silicio** para proteger el termopar de la abrasión de los gases. En el segundo punto (B) se decide ingresar en una perforación realizada en una membrana entre los tubos de refrigeración de la campana, el termopar del mismo material mencionado anteriormente, pero sin vaina protectora debido al espacio reducido que se tiene para su introducción. Por último, en 3er y 4to punto (C y D) se utilizó **Termopar tipo K, tipo de alambre (Aleación Niquel-Cromel/Niquel-Alumel)**, rango de tolerancia de temperatura de -200 °C a +1370°C, introducido de la misma forma que en el segundo punto.



Figura 3.2.2 Equipos de medición (Fuente: TC.SA equipos de medición [38])

Experiencia 2

Objetivo

Medir la temperatura de los gases en distintas posiciones radiales después de las duchas para la formación de un perfil radial de temperatura.

Variable: Temperatura

Descripción

Para la formación del perfil de temperatura de los gases de combustión, la cual fue realizada en el punto C. Se Utiliza **termopares tipo K, tipo de alambre (Aleación Niquel-Cromel/Niquel-Alumel)**, rango de tolerancia de temperatura de -200 °C a +1370°C, instalados cada uno a un extremo de la campana, iniciando a una distancia de 55[cm] de la orilla, para luego introducirla por cada medición 45[cm] y así hasta llegar al centro de la campana, tal como se muestra en la Figura 3.2.3 la cual corresponde a una cuarta parte de la sección transversal de la campana, asumiendo una variación despreciable entre soplado.

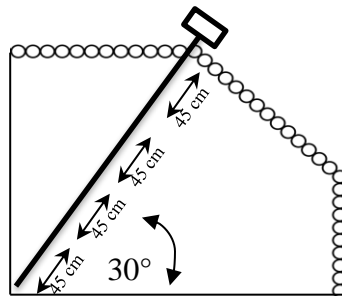


Figura 3.2.3. Medición perfil de temperatura (1/4 campana)

Experiencia 3

Objetivo

Medir la temperatura de los gases en distintos niveles de la campana por segunda vez, pero esta vez para la formación de un perfil de temperatura a lo largo de la campana.

Variable: Temperatura

Descripción

Similar a la experiencia 1, se ingresa los mismos termopares en los distintos niveles para la medición de su temperatura, pero a una distancia de 55[cm] de la orilla, para así de esta forma con las consideraciones realizadas en la experiencia 2 se logra obtener el perfil de temperatura a lo largo de la campana.

3.2.2 Análisis de error de los equipos

En el caso del análisis de error de los equipos se consideró:

- Equipos calibrados
- Error de procedimiento
- Error propio de los instrumentos

Para la medición de los gases, se tienen termocuplas tipo S y K, cuya medición es recibida por un sistema de adquisición Brain Child VR18 cuya especificación se puede encontrar en [21]. El banco de ensayo se puede observar en la siguiente Figura 3.2.4.

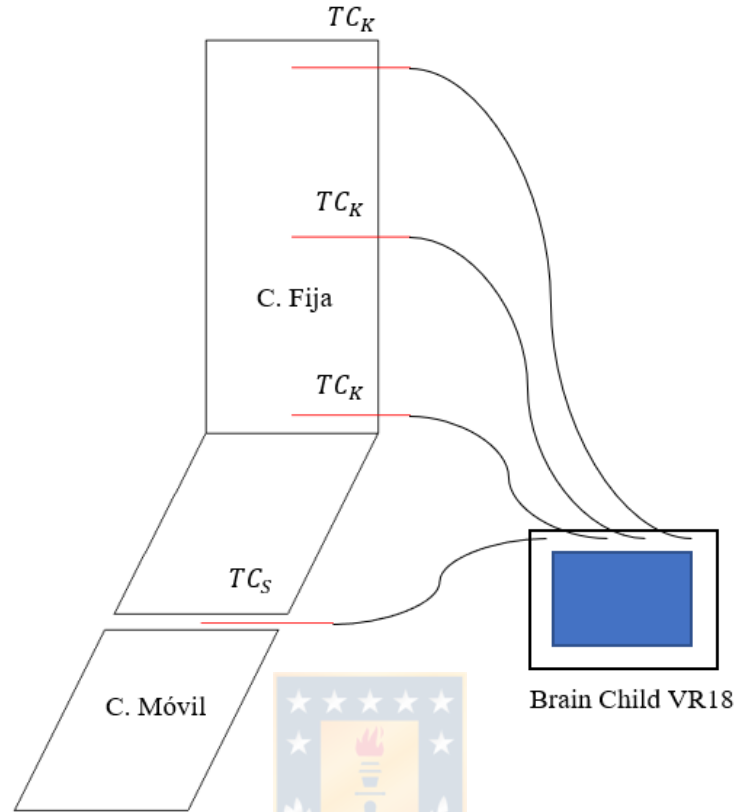


Figura 3.2.4. Banco de mediciones

Error propio de la termocupla type S o K (sensibilidad) [22]

$$\varepsilon_t = 1,5^{\circ}C$$

Error propio del Brain Child VR18 (sensibilidad) [21]

$$\varepsilon_t = 2^{\circ}C$$

Error de procedimiento

La temperatura del sensor estará determinada por el balance de energía global de éste con el medio en el cual está inserto, es por esto que se debe considerar el efecto de la radiación y convección en la variación de la temperatura del sensor con respecto a la temperatura de los gases que se quiere medir. Lo anterior se analiza bajo las situaciones más desfavorables, las cuales son: Área de proyección máxima para todos equivalente al diámetro por el largo de la termocupla y temperatura de alrededores lo más mínima posible, en este caso igual a la temperatura mínima del agua al interior de los tubos. Estos efectos se cuantificarán en forma independiente. El balance con radiación se puede ver en la Figura 3.2.5, está en conjunto de las ecuaciones de transferencia de calor y balance de energía expuestas en el capítulo 4 sobre el modelo.

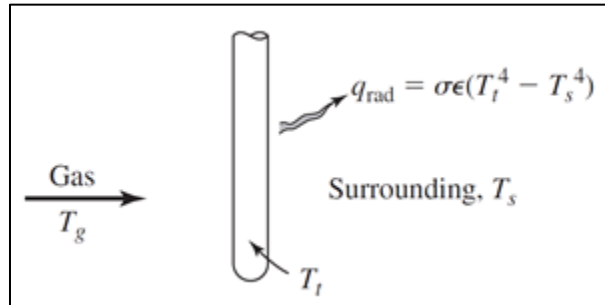


Figura 3.2.5. Esquema del efecto de la radiación sobre el instrumento de medición [Fuente J.P. Holman [22]]

El balance considerando la radiación se expresa a continuación donde se considera la misma área de transferencia:

$$h_t(T_g - T_t) + \sigma \epsilon_g(T_g^4 - T_t^4) = \sigma \epsilon_t(T_t^4 - T_s^4)$$

donde h_t : coeficiente convectivo instrumento

T_g : temperatura de gases.

T_t : temperatura del instrumento.

σ : constante de Stefan-Boltzmann.

ϵ_g : emisividad de los gases

ϵ_t : emisividad de la superficie del instrumento.

T_s : temperatura promedio de las paredes de la campana.

Se considera una emisividad de un instrumento opaco $\epsilon_t = 0,9$ [22]. El coeficiente convectivo del instrumento se obtiene considerando una convección forzada sobre en cilindro horizontal. Para obtener el número de Nusselt se ocupan las ecuaciones siguientes obtenidas desde [23]:

$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (5)$$

$$Nu_D = 0,343 + 1,11 \cdot C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{0,31} \quad (6)$$

donde D : diámetro del instrumento o vaina respectivamente

k : conductividad térmica de los gases

Pr : número de Prandtl

Re : numero de Reynolds

C y m se obtienen de [23], los cuales según el número de Reynolds correspondiente a los gases toman valores de 0,024 y 0,805 respectivamente.

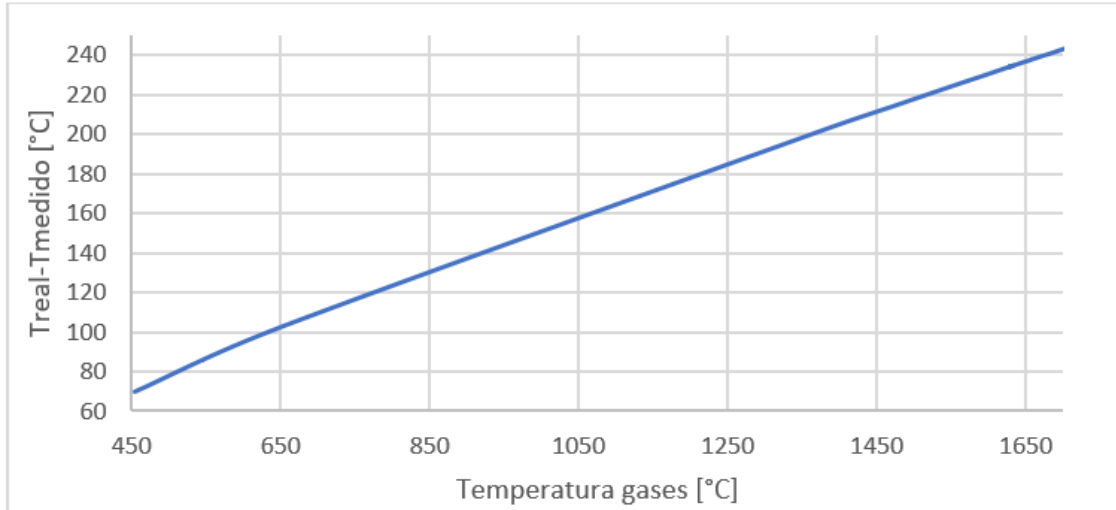


Figura 3.2.6. Error por procedimiento gases (Fuente: Elaboración propia)

Dados los resultados, se puede observar que el instrumento es altamente sensible a la radiación, llegando en promedio a un error $\varepsilon_p = 0,15 * T_{medida} \text{ } ^\circ\text{C}$. Situación que se hace peor a medida que la temperatura a medir es mayor llegando a un error superior a los 248[°C] cuando los gases están cercanos a los 1650 [°C], error que inmensamente mayor al propio de la termocupla.

$$\varepsilon = \sqrt{\sum \varepsilon_i^2} \quad (7)$$

Obteniendo un error total equivalente en el rango de $\varepsilon_p = 69 - 248^\circ\text{C}$, el equivale aproximadamente a la diferencia de un 15% de la temperatura medida.

Tabla 3.2. Errores de medición gases

Fuente de error	Magnitud del error	Magnitud del error
	Mínimo (450 [°C])	Máximo (1650[°C])
Sensibilidad Termocupla Type S	1,5	1,5
Radiación	69	248
Sensibilidad Brain Child VR18	2	2
Error Total	$\varepsilon = 69 \text{ } ^\circ\text{C}$	$\varepsilon = 248 \text{ } ^\circ\text{C}$

Donde claramente se observa que el error de procedimiento debido a la radiación es el mayor de todos, por ende, se deja en consideración simplemente que el error obtenido para cada medición de termocupla, de la forma:

$$\varepsilon_p = 0,15 * T_{medida} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (8)$$

3.2.3 Resultados análisis de gases

Experiencia 1

Objetivo: Conocer la temperatura de los gases en distintos niveles de la campana.

Se realiza dos experiencias, de las cuales una resultado con éxito, donde se registran las temperaturas observadas en las Figuras 3.2.7, donde la experiencia se logró casi en su totalidad, pues en la toma de temperatura en el punto B, la abrasión de los gases arrasó con el termopar fundiéndolo, por lo que no se logró registrar temperatura, esto debido al desconocimiento de la fuerte abrasión que poseían los gases.

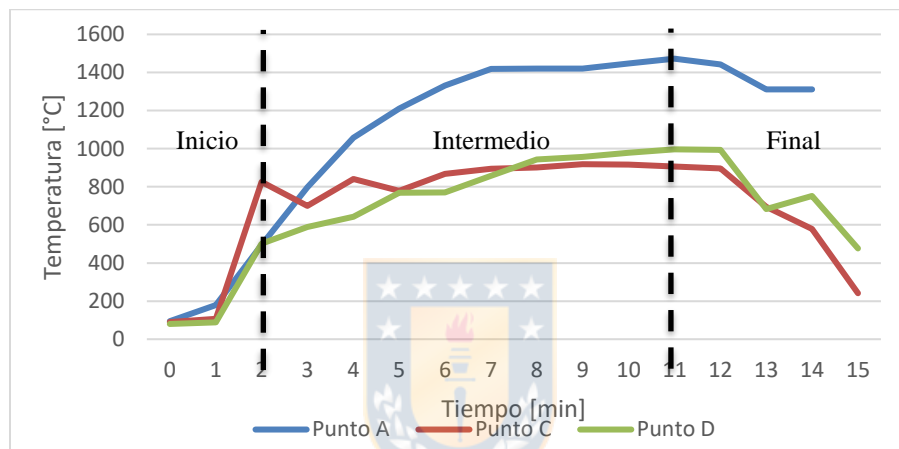


Figura 3.2.7. Temperatura gases campana fija

Las curvas de temperatura del Punto C y D, luego del minuto 7 de soplado presenta una anomalía, y es que esta última sobrepasa la temperatura medida por el punto C, lo cual no era esperado, ya que a medida que avanzan los gases en la campana estos van disminuyendo su temperatura. Esta anomalía se puede deber a que los gases en la parte final de la campana fija chocan con unas compuertas para luego pasar a la campana fija, esto provoca un calentamiento del instrumento debido a un mayor flujo de calor del alrededor del instrumento, y por ende una mayor radiación, teniendo como consecuencia una mayor temperatura de medición. Se deja planteado para próximos estudios una Modelación CFD la cual podría ayudar a responder esa disyuntiva.

Las curvas de temperatura del Punto C y D, luego del minuto 7 de soplado presenta una anomalía, y es que esta última sobrepasa la temperatura medida por el punto C, lo cual no era esperado, ya que a medida que avanzan los gases en la campana estos van disminuyendo su temperatura. Esta anomalía se puede deber a que los gases en la parte final de la campana fija chocan con unas compuertas para luego pasar a la campana fija, esto provoca un calentamiento del instrumento debido a un mayor flujo de calor por radiación del alrededor del instrumento, teniendo como consecuencia una mayor temperatura de medición. Se deja planteado para próximos estudios una Modelación CFD la cual podría ay udar a responder esa disyuntiva.

Objetivo: Identificar la existencia de diferencia de temperatura radialmente.

En el punto C se introdujeron dos termopares en dos extremos de la campana a una misma distancia del borde, registrando las temperaturas mostradas en la Figura 3.2.8, donde se observa una diferencia entre ambas mediciones, lo implica la existencia de un perfil radial de temperatura de los gases.

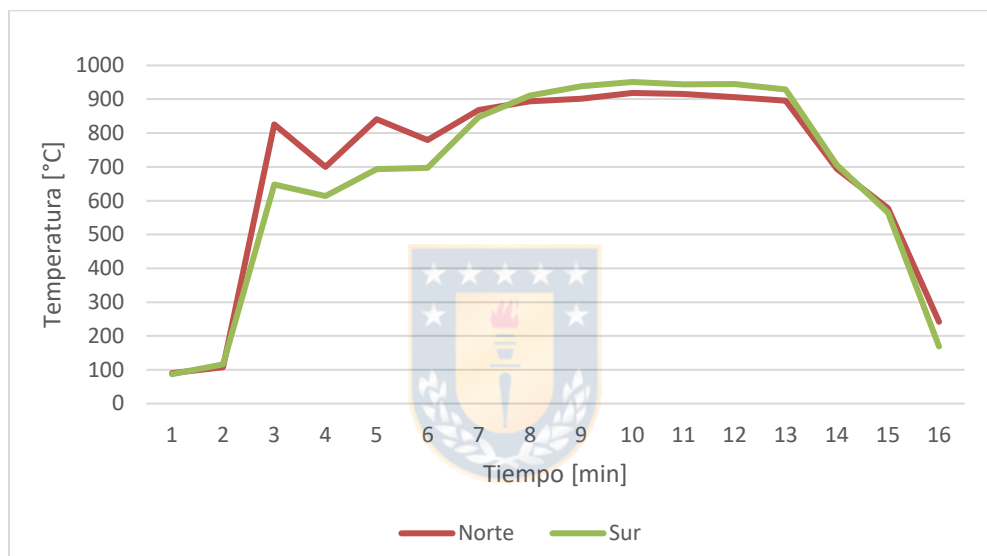


Figura 3.2.8. Diferencias de temperatura en extremos

Objetivo: Conocer la abrasión de los gases que pueda dañar los equipos

Al realizar la experiencia quedó demostrado en los equipos de medición (termopares y vaina) lo abrasivo que son los gases, lo que complica su medición en ciertos puntos. En la Figura 3.2.9 se muestran imágenes del daño causado por los gases a los termopares, llegando incluso a fundir parte de ellos, dilatándolos y deformándolos.



Figura 3.2.9 Termocuplas expuestas a los gases (Fotos Tomadas en Terreno)

En la imagen de la izquierda se aprecia el termopar introducido en el punto B (experiencia 1 y 3), donde los gases arrasaron con la vaina cerámica quebrándola, del mismo modo quemando y fundiendo la termocupla, lo que provocó que la medición fallara. La imagen de la derecha muestra el equipo utilizado en el punto A, donde debido a las altas temperaturas existentes y la previa combustión de los gases en la campana móvil, la vaina externa protectora del equipo fue abrasada por los gases o bien arrastre de escoria o metal oxidado en los gases, llegando a desgastarla y/o fundirla, reduciendo su diámetro cerca de los 5 mm, todo esto ocurrió para medición de un solo soplado. Por último, como se observa en las imágenes, las de gases provocan un desgaste considerable de los instrumentos, por lo que la instalación de cualquier artefacto para la recuperación de energía al interior de las campanas debe ser capaz soportar la abrasión a la que será expuesta.

Experiencia 2

Objetivo: Medir la temperatura de los gases en distintas posiciones radiales, después de las duchas para la formación de un perfil radial de temperatura.

En la superficie mostrada en la Figura 3.2.10 y 3.2.11, se puede apreciar de mejor manera la evolución del perfil a través del tiempo a distintas posiciones radiales.

Realizando la **suposición** que los gases desde la altura de medición del punto C hacia arriba se presentan un **comportamiento del perfil de temperatura similar al identificado en esta sección**, se decide proyectar el mismo perfil de temperatura para las posiciones superiores, mientras que para la parte inferior de la campana se presenta la mayor complejidad y es que debido a la gran abrasión de los gases y al estrecho espacio que tiene es imposible poder realizar una medición para la determinación del perfil gases previo a las duchas. En vista de esto, se toma una **segunda suposición**, proyectar el último perfil de temperatura medido en el punto C **antes** de la apertura de las duchas, el cual corresponde al minuto 3:30, ya que se encuentra mayormente desarrollado sin ser afectado por las duchas.

En las Figuras de a continuación se puede apreciar la superficie 3-D generada por el perfil de temperatura de los gases en base a las mediciones obtenidas en el punto C en función de la posición radial y el tiempo.

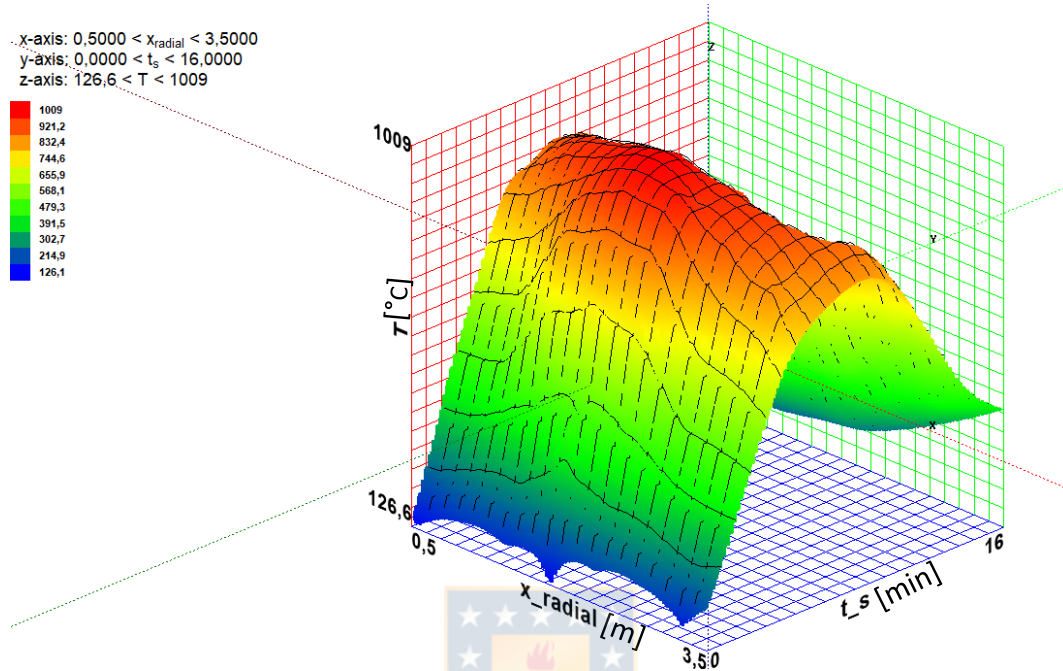


Figura 3.2.10 Superficie del perfil de temperatura de los gases a la altura del punto C

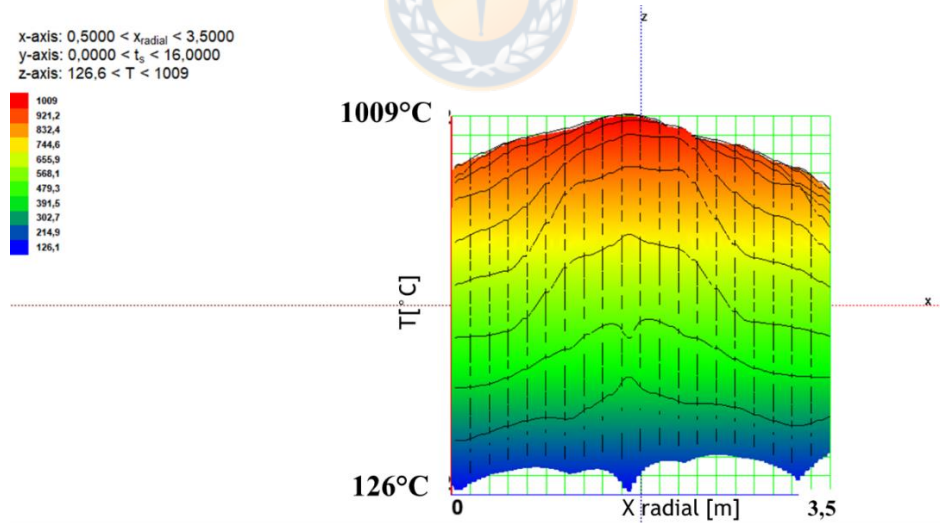


Figura 3.2.11 Superficie de temperatura de los gases punto C .

El perfil de temperatura generado muestra: la diferencia existente entre los extremos de la campana, y la diferencia de temperatura de 100°C entre el centro y el extremo. Llegando a una temperatura máxima de 1009°C.

Experiencia 3

Objetivo: Medir la temperatura de los gases en distintos niveles de la campana, para la formación de un perfil de temperatura a lo largo de ella.

Las temperaturas registradas en los distintos niveles logran formar el perfil de temperatura a lo largo de la campana, tal como se puede apreciar en la Figura 3.2.12, 3.2.13 y 3.2.14. Para cada punto de medición, se realiza un barrido transversal como se muestra en la figura 3.2.11 para un punto intermedio de la campana fija, tomando intervalos de tiempo de 30 segundos para un ciclo del proceso. Luego, se obtiene un promedio ponderado sobre el perfil transversal de temperatura para cada intervalo de tiempo, utilizando la suma intermedia de Riemann (9) [24] dividida por los n intervalos considerados, para finalmente obtener la distribución temporal a lo largo de la campana.

$$T_{prom} = \frac{2}{a^2-b^2} \int_a^b f(r) dr = \lim_{\Delta r_i \rightarrow 0} \frac{2 \sum_{i=1}^{n-1} f(r_i) \cdot r_i \cdot \Delta r_i}{a^2-b^2} \quad (9)$$

Al inferior de la campana fija se encuentra la mayor temperatura de los gases, donde se midió como máxima temperatura 1695°C, para un nivel intermedio debajo de las duchas de 1240°C y para la parte superior 1009°C.

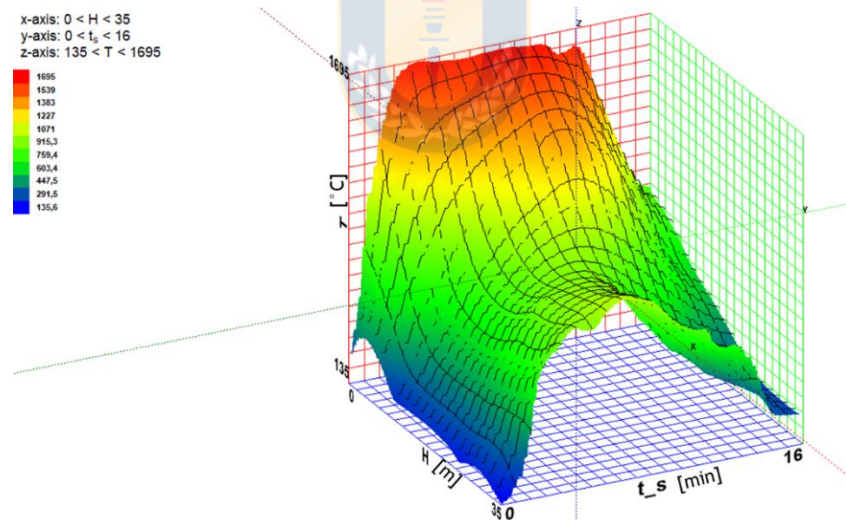


Figura 3.2.12 Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana

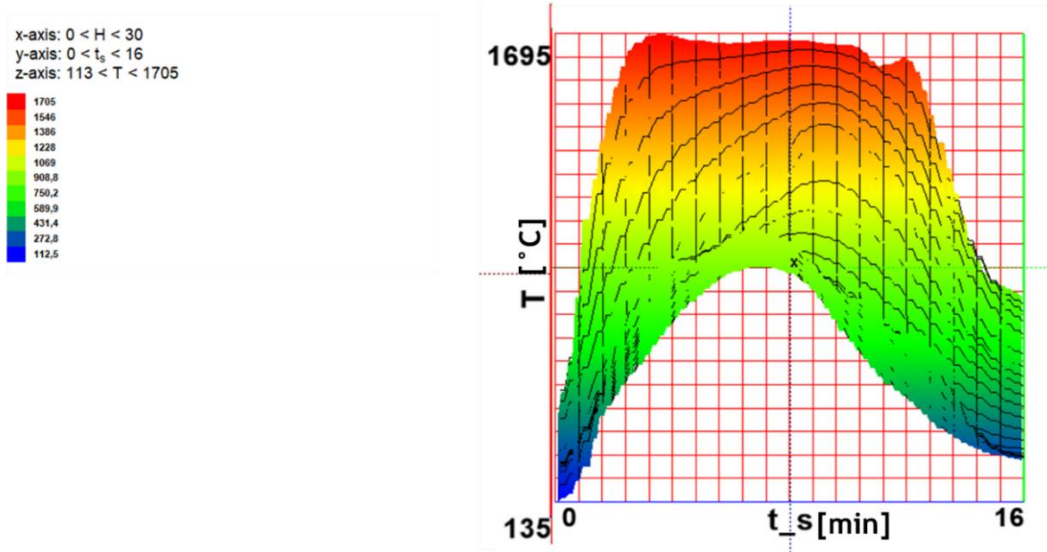


Figura 3.2.13. Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana

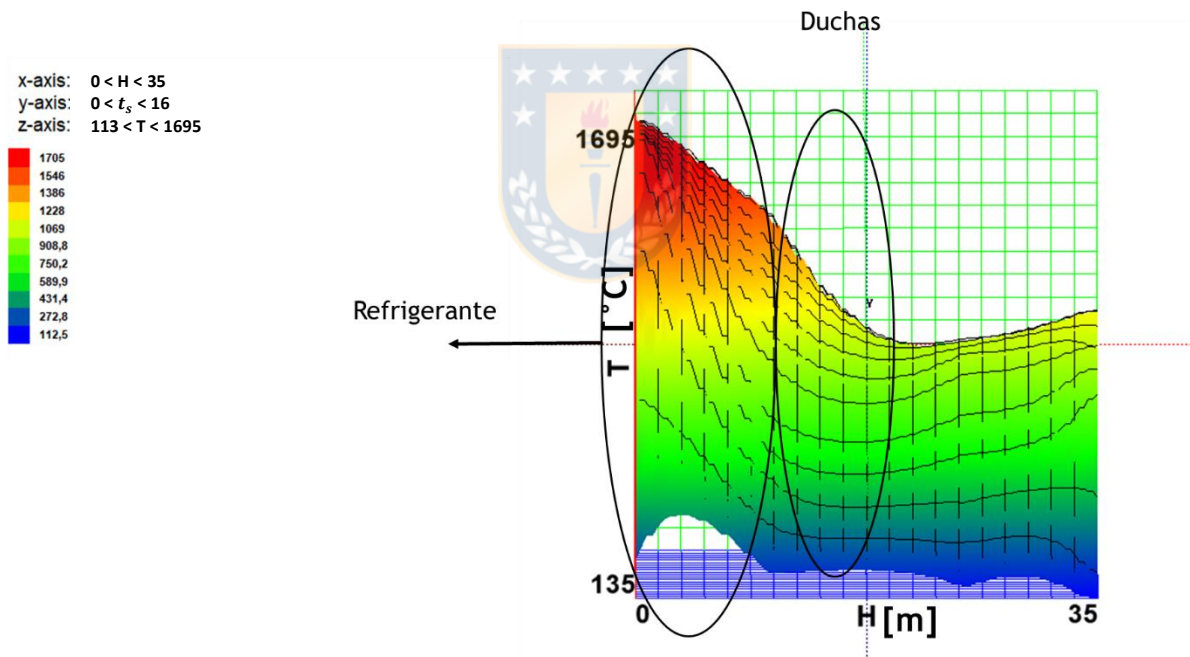


Figura 3.2.14. Superficie de temperatura de los gases a lo largo de la campana

Al inicio de la campana se registran temperatura sobre los 1600°C , llegando a un máximo de 1695°C , la cual disminuye a medida que se avanza verticalmente en la campana como se puede observar en la Figura 3.2.14. En un primer trayecto hasta antes de las duchas, la disminución de temperatura ocurre principalmente debido al agua de refrigeración, bajando hasta una temperatura cercana a los 1300°C . El segundo trayecto, el cual consiste al post-duchas hasta unos 10[m] antes del término de la campana, la temperatura disminuye hasta los 1000°C debido al efecto de enfriamiento de las duchas y en conjunto con el agua de refrigeración. Al final del trayecto se logra apreciar una pequeña elevación de la temperatura de 50°C , este fenómeno se le adjudica a la turbulencia que existe al final de la campana, ya

que en este punto los gases chocan con una compuerta de emergencia para luego pasar la campana corta, no se decide estudiar más este fenómeno debido a que no es de importancia para el objetivo del estudio.

3.3 Caracterización temperatura agua de refrigeración

El agua de refrigeración tiene como función principal reducir la temperatura de los gases a través de **toda** la campana, aun así, esto no es suficiente para enfriar los gases hasta la temperatura deseada de 900-1000°C. Lo que ha provocado que se tengan que buscar alternativas externas para la disminución de la temperatura, en este caso la incorporación de duchas.

Se plantea la medición de temperatura del agua en distintos puntos a través de los tubos de salida de la campana y toma de presión a la entrada y salida de la campana. Se considera la medición en los puntos mostrados en la Figura 3.3.1.

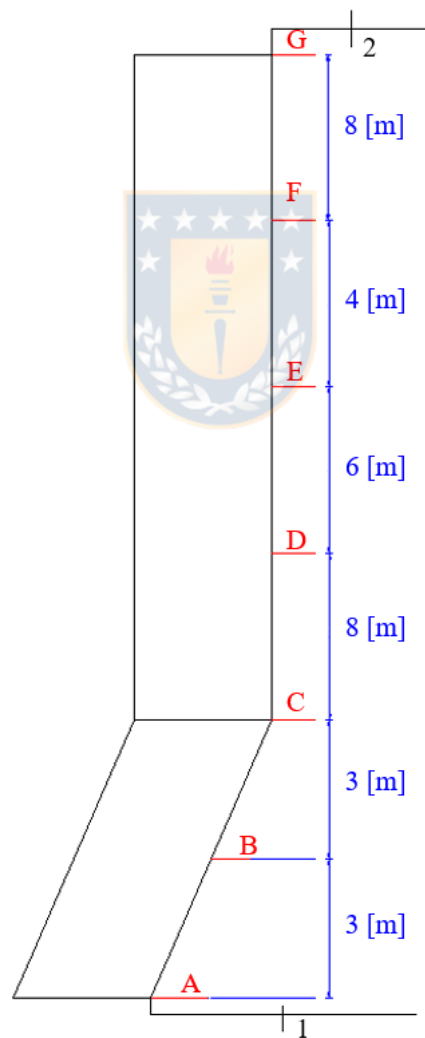


Figura 3.3.1 Medición de temperatura y presión del agua en la campana.

3.3.1 Experiencias y equipos de medición

Experiencia 1

Objetivos

1. Conocer la temperatura del agua en distintos niveles de la campana.
2. Conocer la presión de entrada y salida.

Variables: Temperatura y presión

Grado Acero: 284

Descripción

Se realiza la medición de la temperatura en 7 niveles distintos, tal como se muestra en la Figura 3.3.1 correspondiente a las letras desde A hasta G con unos **RTD-Pt100 un sensor de temperatura de alambre de platino que a 0 °C tiene 100 ohm**, y que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. La presión de entrada y salida de la campana identificados con los números 1 y 2 en la Figura. Son medidas con unos manómetros Bourdon de alta presión con un rango de 0-200 bar.

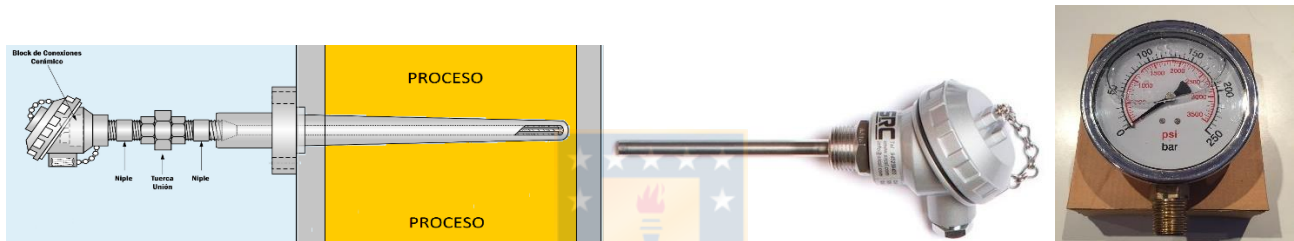


Figura 3.3.2 Equipos de medición agua (Fuente: MCI electronics Catálogo)

Experiencia 2

Objetivo

Observar si existe diferencia en el comportamiento de las curvas de temperatura y presión para grados distintos de acero.

Variable: Temperatura y presión

Grado Acero: 247

Descripción

Se realiza las mismas mediciones que la primera experiencia con los mismos instrumentos, pero esta vez para un grado distinto de Acero, en este caso un 247.

Experiencia 3

Objetivo

Observar el aumento de temperatura durante una secuencia de un grado de acero.

Variable: Temperatura

Grado Acero: 287

Descripción

Se realiza la medición de la temperatura del agua de la misma forma que la primera y segunda experiencia con los mismos instrumentos, pero esta vez para una secuencia de 7 grados de acero 284.

3.3.2 Análisis de error de los equipos

Para la medición de agua se tienen RTD-Pt100[29], cuya medición es recibida por un sistema de adquisición Brain Child VR18 cuya especificación se puede encontrar en [21]. El banco de ensayo se puede observar en la siguiente Figura 3.3.3.

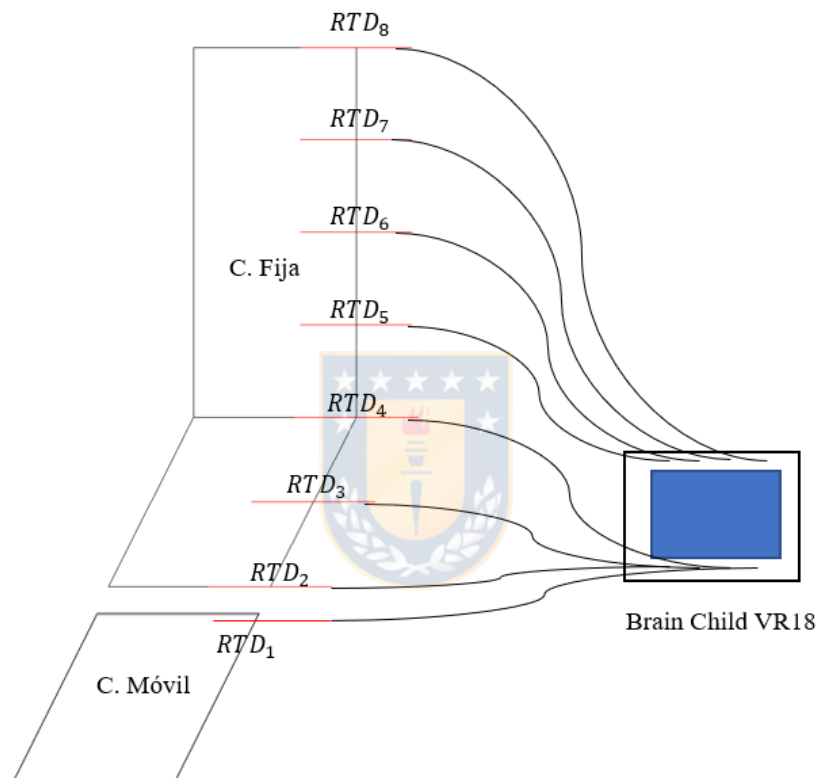


Figura 3.3.3 Esquema del banco de medición agua

Error propio del Brain Child VR18 (sensibilidad) [21]

$$\varepsilon_t = 0,4^{\circ}C$$

Error propio del RTD-Pt100 (sensibilidad) [29]

$$\varepsilon_t = 0,05^{\circ}C$$

Error de procedimiento RTD- Pt100

Para el cálculo de la sensibilidad del RTD-Pt100 se tiene que es un sensor de temperatura que consiste en un alambre de platino, que al aumentar la temperatura aumenta su resistencia eléctrica. El incremento de la resistencia no es lineal, pero si creciente y característico del platino de tal forma que mediante tablas es posible encontrar la temperatura exacta a la que corresponde, cuya gráfica se muestra a continuación

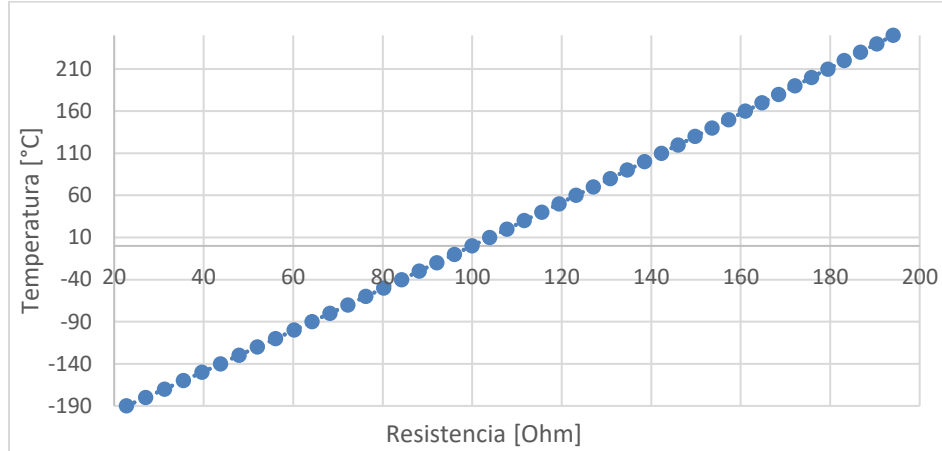


Figura 3.3.4. Error por procedimiento Pt-100

$$T = 3 \times 9710361 \times 10^{-13} R^6 - 3,1598806751 \times 10^{-10} R^5 + 1,1004630337159 \times 10^{-7} R^4 - 2,10411497684805 \times 10^{-5} R^3 + 3,34047440754233 \times 10^{-3} R^2 + 2,21320303299862 R - 241,890121650485 \quad (10)$$

El objetivo es determinar exactamente la resistencia eléctrica $R(t)$ del elemento sensor de platino sin que influya en la lectura la resistencia de los cables R_c . El modo más sencillo de conexión es con solo dos cables, cual fue utilizado en este caso, como se muestra en la siguiente figura.

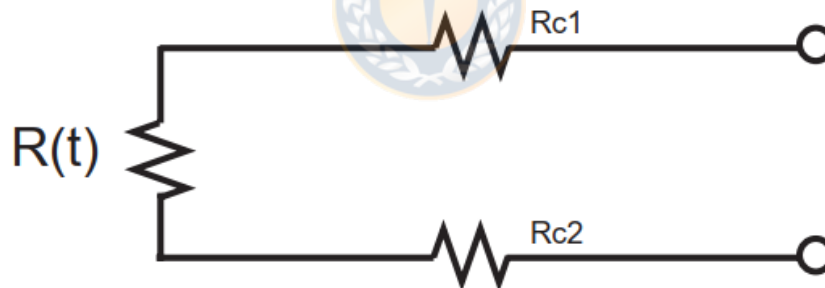


Figura 3.3.5. Error por procedimiento dos cables (Fuente: Manual Pt-100[29])

En este caso las resistencias de los cables R_{c1} y R_{c2} que unen la Pt100 al instrumento se suman generando un error inevitable. El lector medirá el total $R(t) + R_{c1} + R_{c2}$ en vez de $R(t)$. El cable utilizado genera una resistencia de 0,0193 ohms por metro. En este caso se considera una distancia media de 20 m para cada Pt100:

$$R_{c1} + R_{c2} = L * 2 * 0,0193 = 20 * 2 * 0,0193 = 0,77 \text{ ohm} \quad (11)$$

De esta forma sumando a la resistencia medida por el RTD y con ayuda de la ecuación 6, se obtiene el error generado en el gráfico siguiente:

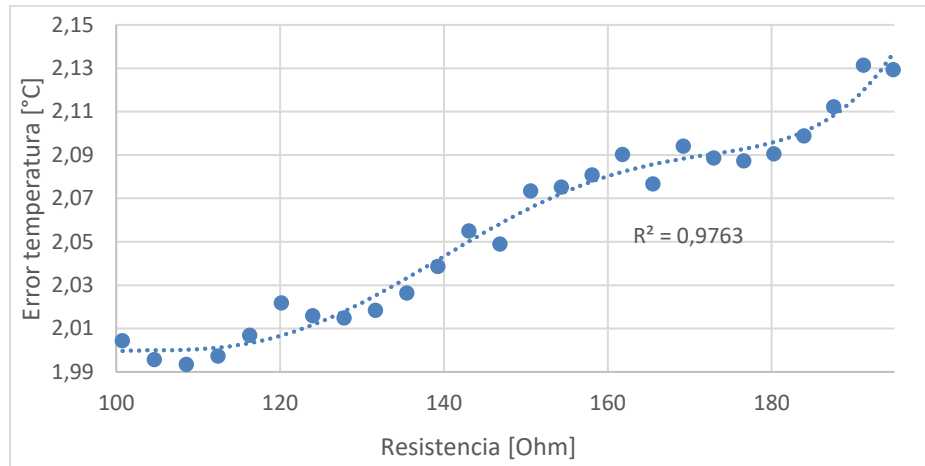


Figura 3.3.6. Error por resistencia Pt-100

Considerando el caso más desfavorable se tiene un error de $\varepsilon_R = 2,1^\circ\text{C}$

Se estima el error total equivalente mediante (7):

$$\varepsilon = \sqrt{\sum \varepsilon_i^2}$$

Tabla 3.3.1. Errores de medición agua

Fuente de error	Magnitud del error [°C]
Sensibilidad RTD-Pt100	0,05
Largo cables	2,1
Sensibilidad Brain Child VR18	0,4
Error Total	$\varepsilon = 2,17^\circ\text{C}$

Para el caso de los manómetros se tiene el error de sensibilidad y el error de procedimiento, el cual consiste en la medición que pueda tomar el personal encargado de medir presencialmente, el cual se asume que es la mitad de la sensibilidad del instrumento.

Error manómetro (sensibilidad) [30]

$$\varepsilon_t = 1 \text{ bar}$$

Error de procedimiento

$$\varepsilon_p = 0,5 \text{ bar}$$

Error total (Ecuación 8)

$$\varepsilon = 1,1 \text{ bar}$$

3.3.3 Resultados análisis agua de refrigeración

Experiencia 1

Objetivo: Conocer la temperatura del agua a los en distintos niveles de la campana.

Se registran las temperaturas observadas en las Figuras 3.3.6, generando el perfil mostrado en la Figuras 3.3.7 y 3.3.8.

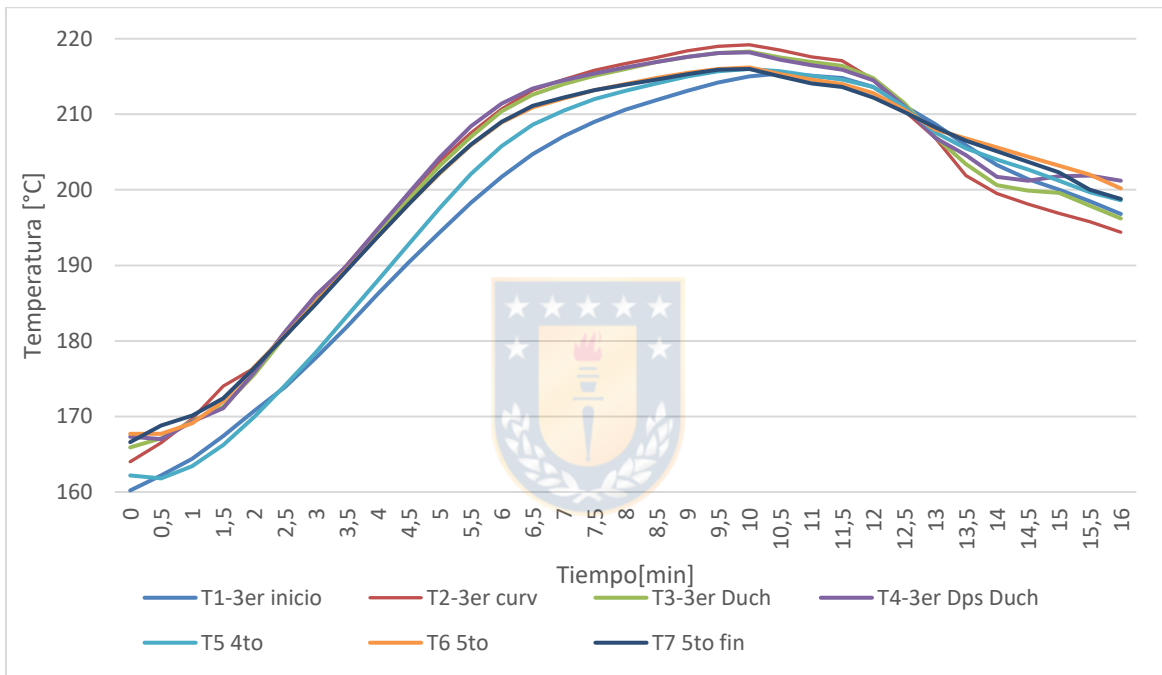


Figura 3.3.7 Temperatura del agua refrigerante.

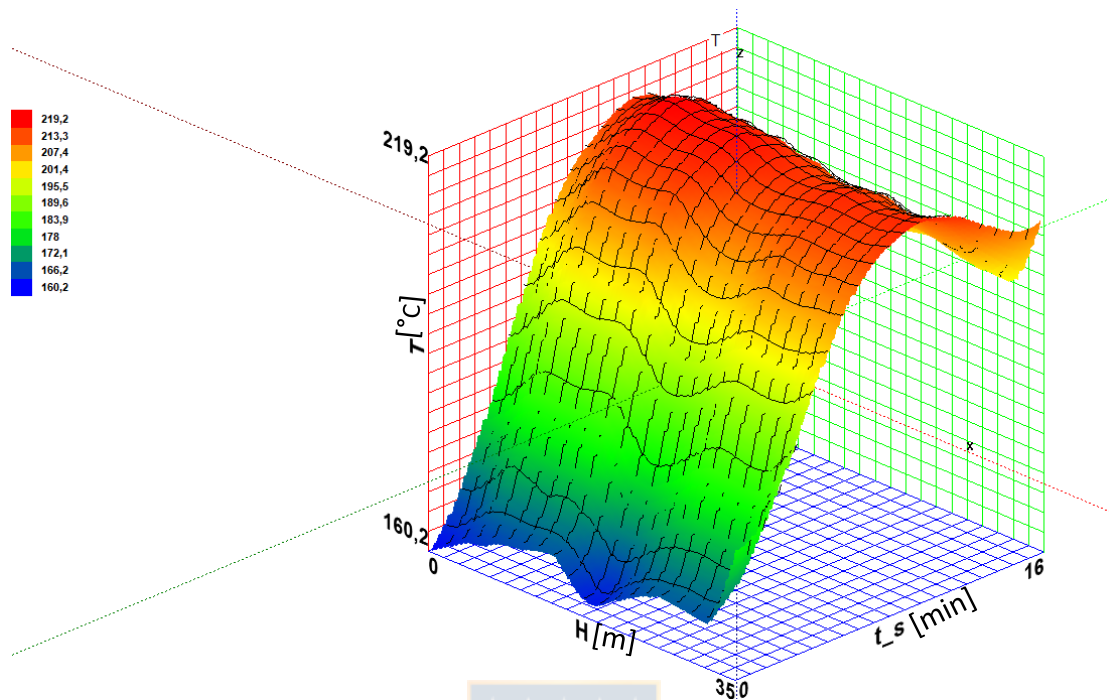


Figura 3.3.8. Superficie de temperatura del agua a lo largo de la campana.

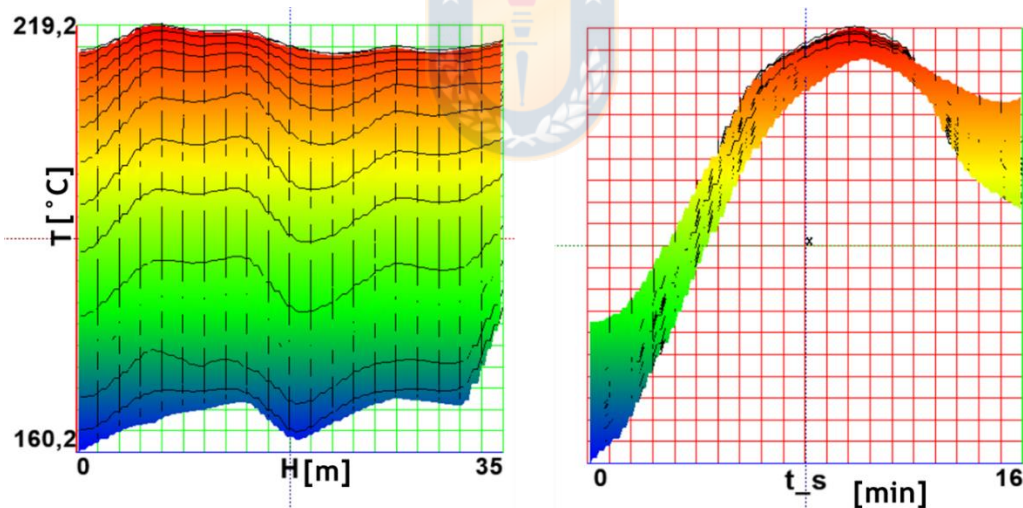


Figura 3.3.9. Superficie de temperatura del agua a lo largo de la campana.

El perfil de temperatura del agua muestra cómo es su comportamiento a través del tiempo y la altura de la campana, el cual es inesperado luego del nivel de duchas (posterior al punto D), debido a que las temperaturas disminuyen pese a que la temperatura de los gases en este punto siguen siendo alta, la razón a la que se le atribuye esta baja de temperatura es a la acción de las duchas, y es que éstas presentan un comportamiento tal que el agua al salir de las boquillas está no se evapora inmediatamente y completamente, sino que cierto porcentaje logra durar parte del trayecto de la campana que en conjunto con la succión realizada por el ventilador extractor de gases son arrastrados hasta impactar en la muralla de tubos o simplemente evaporarse, provocando el enfriamiento de tubos y como consecuencia del agua.

Objetivo: Conocer la presión de entrada y salida.

Se registran las presiones y se genera el mostrado en la Figura 3.3.9, obtenido del soplado, donde además se muestra la presión del domo, la que registra el sistema PI de la compañía antes mencionado.

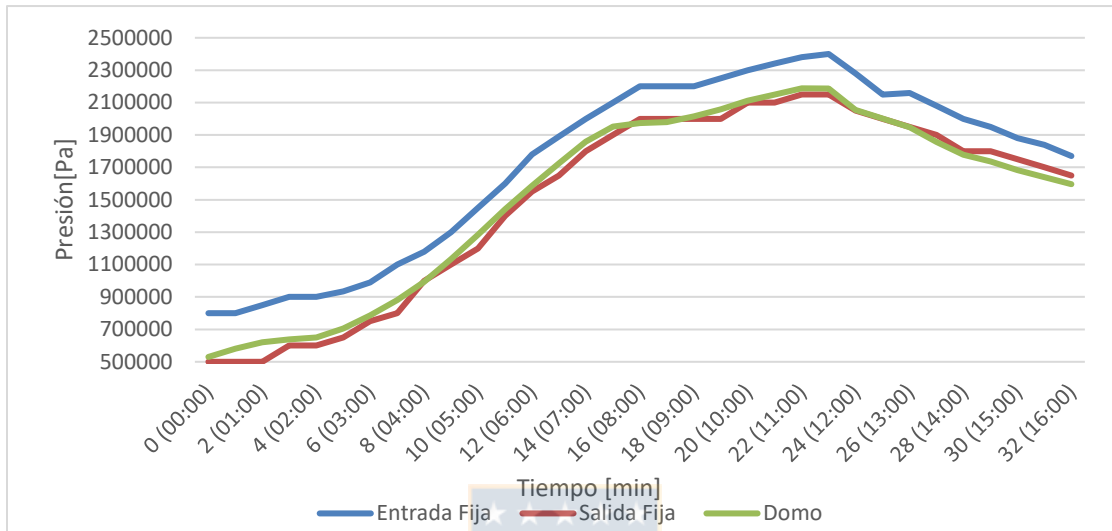


Figura 3.3.10. Perfil de presión del sistema de refrigeración campana fija.

Experiencia 3

Objetivo: Observar el aumento de temperatura durante una secuencia de un grado de acero.

Se registran la temperatura durante la secuencia de un grado 287, cuyas curvas se pueden apreciar en la Figura 3.3.12.

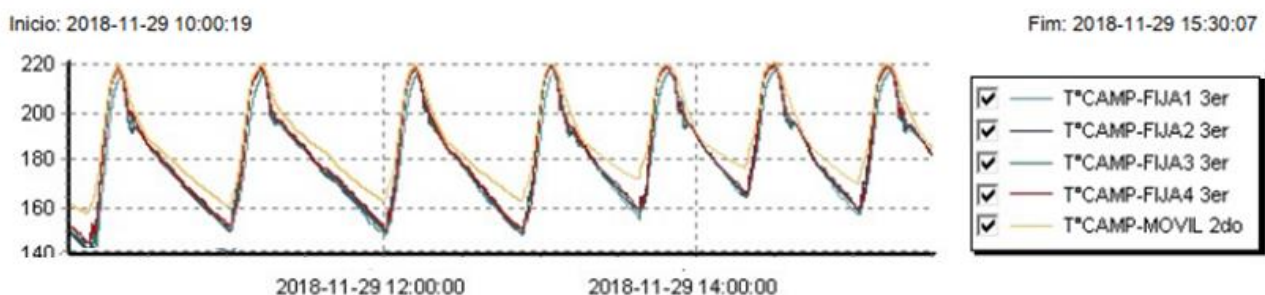


Figura 3.3.13. Curvas de temperatura para la secuencia del grado 284

Se puede apreciar, que a medida que va avanzando la secuencia la temperatura inicial del agua para el soplado es más alta, pero no así su temperatura máxima, la cual se mantiene siempre igual. Lo que implica que más cercano se esté del final de la secuencia, el agua refrigeración tardará menos tiempo en llegar a la temperatura máxima.

CAPÍTULO 4

Modelo Intercambiador de calor campanas de refrigeración

4.1 Descripción general del modelo

El modelo, esquematizado en la figura 4.1.1, está compuesto por 3 módulos que representan el sistema de refrigeración de la campana (móvil y fija), provisto por el agua proveniente del domo, e interactuando con los gases generados en un módulo externo y el aire de dilución. Este último módulo entrega variables de entrada para el modelo e incluye las reacciones del convertidor. El modelo se realizó en EE, cuyo código se puede observar en el Anexo C

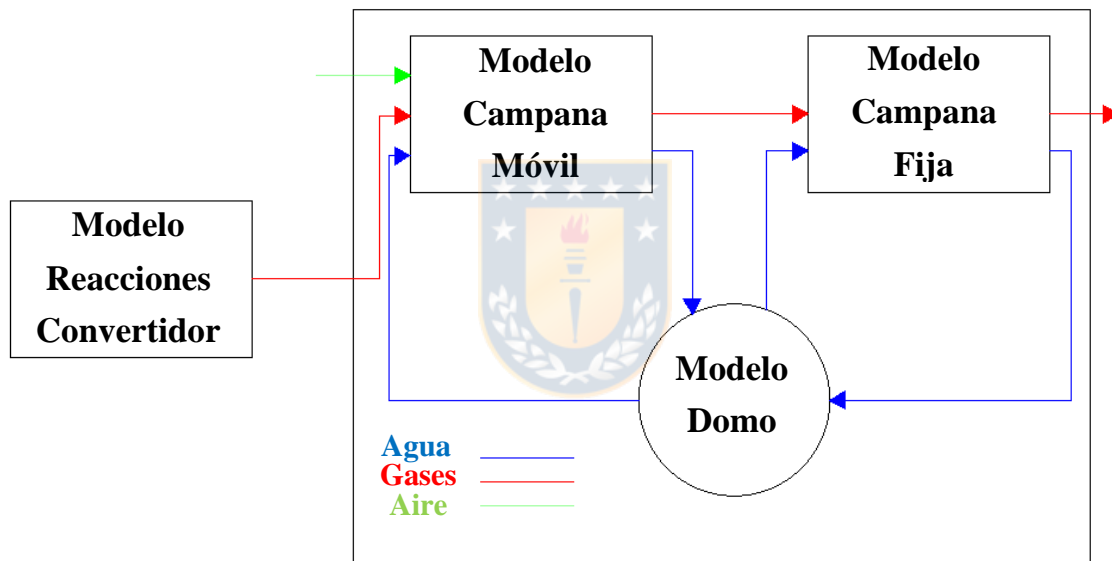


Figura 4.1.1. Modelo del sistema de refrigeración

El Modelo se considera dinámico debido a la intermitencia en la composición de entrada de los gases provenientes del convertidor. Se asume que no hay pérdidas de masa y energía en las transiciones de un submodelo a otro.

El modelo propuesto se representa a través de ecuaciones para cada submodelo presentado en la figura 4.1.2. En el caso del modelo convertidor, éste integra ecuaciones y relaciones sobre: cálculo del área de superficie de la cavidad y la interfaz de escoria-metal, modelo cinético de las reacciones de superficie de la cavidad y el modelo de cinética de las reacciones de la interfaz de escoria de metal. Para el modelo de sistema de refrigeración se consideran las ecuaciones del balance de materia, energía y transferencia de calor.

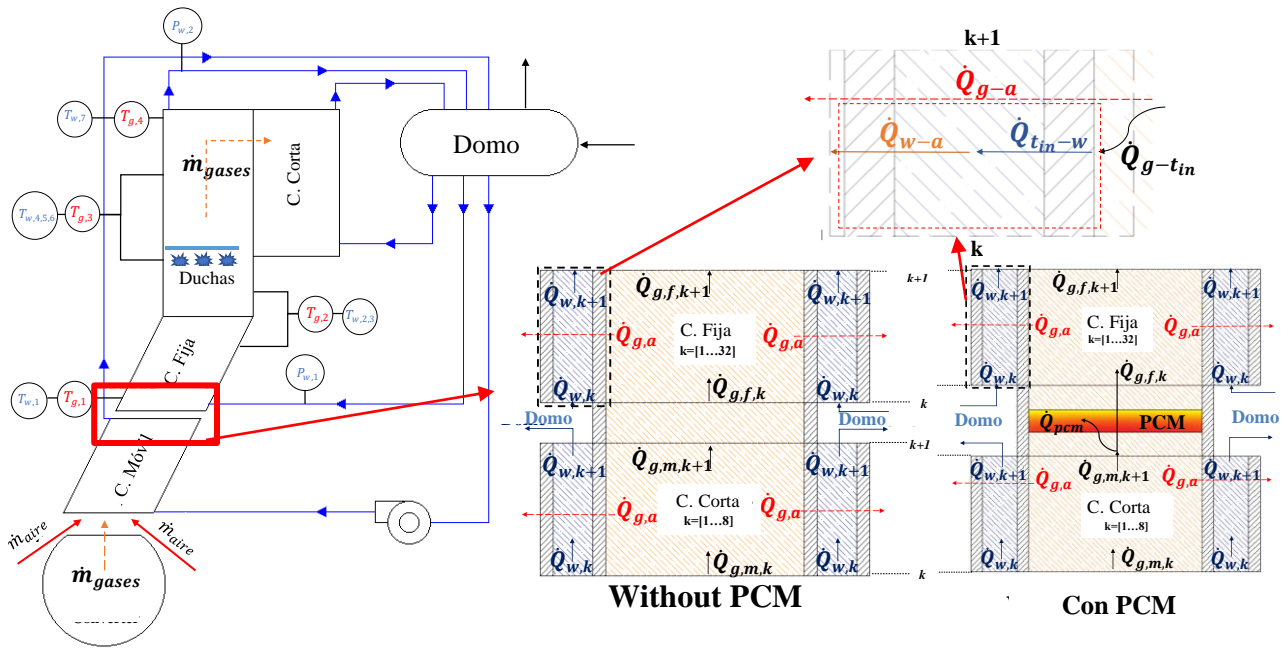


Figura 4.1.2. Esquema del sistema de refrigeración de gases (izquierda) y detalle de elementos en el balance térmico con y sin uso de PCM (derecha)

4.2 Modelo del convertidor de acero

Las reacciones que ocurren en el convertidor fueron obtenidas utilizando el modelo desarrollado por X. Wei et al. [19], por lo que esta parte de la tesis se le atribuye completamente a él. En la figura 4.2. se ilustran las variables y parámetros del modelo, donde las principales variables de salida asociadas a los gases que ingresan a la campana móvil son la temperatura T_g , los flujos volumétricos y concentración de CO y CO₂ (\dot{V}_{CO} , \dot{V}_{CO_2} , C_{CO} , C_{CO_2}).

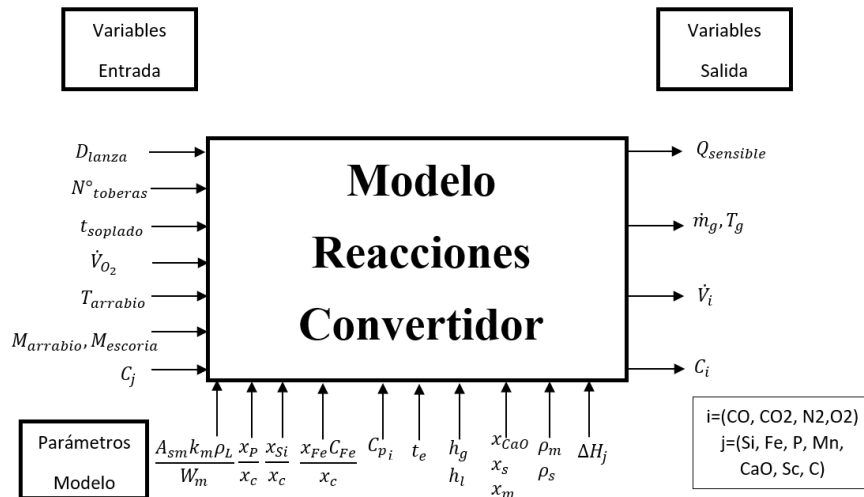


Figura 4.2. Variables y parámetros modelo del convertidor de acero

El modelo considera que el gas de escape del convertidor se mezcla completamente, el exceso de gas de escape se descarga a través boca del convertidor en el proceso de soplado de oxígeno y que las reacciones de oxidación son controladas por la transferencia de masa.

El flujo de oxígeno residual después de la oxidación de las impurezas en baño de metal fundido $F_{O_2} \frac{mol}{s}$ de acuerdo con las reacciones de oxidación de C, Si, Mn, P y Fe es:

$$F_{O_2} = \frac{\dot{V}_{O_2} \times 100 - [N_2] \times 1000}{100 \times 22,4} - \left[\frac{d(W_m C_{[C]}^b)}{dt} \right] - 2 \left[\frac{d(W_m C_{[Si]}^b)}{dt} \right] - \left[\frac{d(W_m C_{[Mn]}^b)}{dt} \right] - \frac{5}{2} \left[\frac{d(W_m C_{[P]}^b)}{dt} \right] - \left[\frac{d(W_m C_{[Fe]}^b)}{dt} \right] \quad (12)$$

Donde $\dot{V}_{O_2} \text{ m}^3/\text{s}$ es la cantidad de oxígeno soplado, $[N_2] (\%)$ es la concentración de N_2 en el oxígeno soplado, $W_m \text{ kg}$ es la masa de líquido de metal fundido, $C_{[i]}^b$ es concentración de elementos en metal líquido fundido ($i = C, Si, Fe, P$) $\frac{kmol}{kg_{Fe}}$ y F_{CO} (mol/s) el flujo de CO producido por la reacción de la descarburación, representado por:

$$F_{CO} = \sigma_C J_O A_C \quad (13)$$

Donde J_O es la difusión media del flujo de oxígeno en la superficie de la cavidad $\frac{mol}{s \cdot m^2}$, $A_C \text{ m}^2$ es el área de la superficie de la cavidad y σ_C es la relación entre el consumo de oxígeno de las reacciones de oxidación de carbono en la cavidad.

De acuerdo con el equilibrio químico del sistema reactivo al interior del reactor y dinámica de los gases de salida por la boca del convertidor está dada por las ecuaciones siguiente (14-17):

$$\frac{dn_{O_2}}{dt} = F_{O_2} - F_{out} \left(\frac{n_{O_2}}{n_v} \right) - \frac{R_{CO}}{2} \quad (14)$$

$$\frac{dn_{CO}}{dt} = F_{CO} - F_{out} \left(\frac{n_{CO}}{n_v} \right) - R_{CO} \quad (15)$$

$$\frac{dn_{CO_2}}{dt} = -F_{out} \left(\frac{n_{CO_2}}{n_v} \right) + R_{CO} \quad (16)$$

$$\frac{dn_{N_2}}{dt} = -F_{out} \left(\frac{n_{N_2}}{n_v} \right) - \frac{Q_{O_2} [N_2] \times 10}{22,4} \quad (17)$$

La mezcla gaseosa a la salida del convertidor se considera como gas ideal, por lo tanto, el número total de moles se puede expresar como:

$$n_v = n_{CO_2} + n_{CO} + n_{O_2} + n_{N_2} \quad (18)$$

De acuerdo con el equilibrio químico de CO y la conservación de material en el espacio de separación libre del convertidor, la tasa de consumo de CO (R_{CO}) y la tasa de flujo del gas de escape (F_{out}) se calculan mediante las ecuaciones (19) y (20) respectivamente.

$$R_{CO} = \frac{E - A \times D}{C + D \times B} \quad (19)$$

$$F_{out} = A + B \times R_{CO} \quad (20)$$

Los valores A hasta F se obtienen a partir de:

$$A = \frac{T_g + 273}{2T_g + 273} \left[F_{O_2} + F_{CO} + \frac{Q_{O_2} [\%N_2] \times 10}{22,4} + \frac{qn_m}{F(T_g + 273)} \right] \quad (21)$$

$$B = \frac{2(-\Delta H_{CO})n_v - F(T_g - 273)}{2F(2T_g + 273)} \quad (22)$$

$$C = \frac{1}{n_{CO_2}} + \frac{1}{n_{CO}} + \frac{1}{4n_{O_2}} \quad (23)$$

$$D = \frac{1}{2n_v} \quad (24)$$

$$E = \frac{F_{CO}}{n_{CO}} + \frac{F_{O_2}}{2n_{O_2}} \quad (25)$$

$$F = \sum_{i=1}^4 n_i C_{pi} \quad (26)$$

Donde C_{pi} es la capacidad calorífica del gas (con $i=O_2, CO, CO_2$ y N_2) $\left(\frac{J}{molK}\right)$. Según el balance de calor del convertidor de gases de escape, el cambio de temperatura del gas de escape se calcula como:

$$\frac{dT_g}{dt} = \frac{q - \frac{F_{out}}{n_v} (\sum_{i=1}^4 n_i C_{pi}) T_g + R_{CO} (-\Delta H_{CO})}{\sum_{i=1}^4 n_i C_{pi}} \quad (27)$$

Dónde, q (kJ/kg) es el calor específico total absorbido por el gas y R_{CO} la tasa de flujo molar de CO (mol/s).

4.3 Modelo de la campana móvil

4.3.1 Descripción y consideraciones del modelo

La campana móvil capta los gases de escape del convertidor generando dos fenómenos durante el tiempo de soplado: combustión secundaria de los gases de salida del convertidor y enfriamiento de humos, los cuales el modelo se encargará de representar mediante las variables y parámetros señalados en la figura 4.3.1. Por lo que, esta componente recibirá las variables de salida del Modelo Reacciones Convertidor como entrada en conjunto con algunas variables proveniente desde el Modelo Domo.

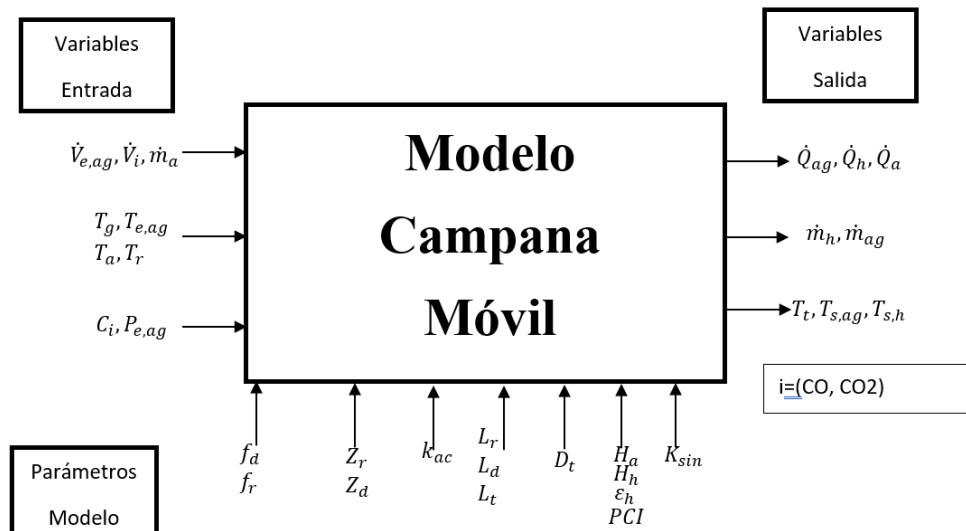


Figura 4.3.1. Modelo campana móvil

Las consideraciones del modelo son: flujo de agua y vapor homogéneo, funcionamiento continuo de la bomba de alimentación, no existen pérdidas de masa en los trayectos, variación de energía interna despreciable, concentraciones de CO/CO₂ post combustión secundaria de 15%/85%.

Se consideró un volumen de control definido por elementos discretos equivalente a un metro de la campana para el planteamiento de ecuaciones del modelo. Cada elemento (k+1) desde el anterior (k) con una cantidad de 8 elementos (ver detalle en figura 4.1.2).

Con respecto a los parámetros propios del modelo se tiene la convección de los gases de combustión circulan a través de la campana. Debido a las grandes diferencias de temperatura entre el flujo interior y la superficie de los tubos, se utiliza la correlación para flujos con grandes variaciones de temperatura [25]:

$$h = \frac{k}{D_h} \left(0,027 \cdot Re_L^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu_r}{\mu_w} \right)^{0,14} \right) \quad (28)$$

En cuanto a la pérdida de carga que ocurre en los ductos del agua de la campana móvil, es igual a la pérdida de energía debido a la rugosidad más las pérdidas locales debido a codos, contracciones Anexo E. es decir:

$$\Lambda_{total} = \left(f \cdot \frac{L}{D_h} + \sum \Lambda_i \right) \quad (29)$$

Para calcular la pérdida de carga se debe conocer el factor de fricción de la superficie. Este factor se calcula con la fórmula de Colebrook [26]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3,7D_h} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}} \right) \quad (30)$$

Cuya rugosidad es considerada a la de hierro fundido con incrustación $\varepsilon = 1,5$ mm [25].

Para los tubos en vertical las pérdidas serán estimadas mediante el método de Thom para escurrimientos bifásicos y para escurrimientos con evaporación, los coeficientes de corrección R1, R2, R3 y R4 se obtienen de [27]. En las ecuaciones siguientes subíndice “f” se refiere a las propiedades del agua líquida en condiciones de saturación a la presión del vapor [27]

a) Cambios de presión en escurrimientos con evaporación

- Pérdida de presión por gravedad

$$\Delta P_G = R_4 \cdot (h \cdot \rho_l \cdot Z_E) \quad (31)$$

- Pérdida de presión por aceleración

$$\Delta P_A = R_2 \cdot \rho_l \cdot \frac{C_f^2}{2} \quad (32)$$

- Pérdida de presión por roce

$$\Delta P_A = R_3 \cdot \rho_l \cdot f \cdot \frac{L_E}{D} \cdot \frac{C_f^2}{2} \quad (33)$$

Con Z_E altura de la columna donde existe evaporación L_E , longitud tubo donde existe evaporación C_f y es la velocidad de la corriente ascendente en condiciones de agua líquida saturada

b.- Cambios de presión en escurrimientos bifásicos

- Pérdida de presión por roce

$$\Delta P_B = R_1 \cdot \rho_l \cdot f \cdot \frac{L_B}{D} \cdot \frac{C_f^2}{2} \quad (34)$$

Con L_B longitud del tubo con escurrimiento bifásico. No existe pérdida por aceleración para flujo bifásico isotérmico con calidad de vapor constante, la pérdida de presión por gravedad se calcula con la densidad de la mezcla (cte. en este caso).

Para evaluar el coeficiente de transferencia de calor en evaporación convectiva de la muralla de tubos, existen varias correlaciones del tipo semi-empíricas, en este caso se utilizará la de Kandlikar (35) [27]:

$$h = h_L \cdot [C_1 \cdot C_O^{C_2} \cdot (25Fr_{lo})^{C_5} + C_3 \cdot B_O^{C_4} \cdot F_\eta] \quad (35)$$

$$C_O = \left[\frac{1-x}{x} \right]^{0,8} \cdot \left(\frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,5} \quad (36)$$

$$B_O = \frac{q_w}{G \cdot h_{fg}} \quad (37)$$

$$Fr_{lo} = \frac{G^2}{\rho_l^2 \cdot g \cdot D} \quad (38)$$

$$h_L = 0,023 \cdot \left(\frac{k_l}{D} \right) \cdot \left[\frac{(G \cdot (1-x) \cdot D)}{\mu_L} \right]^{0,8} \cdot P_{Rl}^{0,4} \quad (39)$$

Donde h_L es el coeficiente convectivo del agua líquida $\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$, $C_1 - C_5$ coeficiente obtenido en [27], Fr_{lo} es el número de Froud cuando todo el fluido es líquido, B_O es el número de ebullición, F_η factor de correlación de Kandilar, C_O numero de convección, x es la calidad, ρ_v y ρ_l $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$ la densidad del fluido en estado de vapor y líquido, $q_w \frac{W}{m^2}$ es el flujo de calor sobre la muralla, $G \frac{kg}{m^2 s}$ flujo másico por área, $h_{fg} \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ coeficiente convectivo de cambio de fase, g la aceleración de gravedad $\frac{m}{s^2}$, D m diámetro del tubo, $k_l \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$ conductividad térmica del líquido, $\mu_l \frac{Ns}{m^2}$ viscosidad dinámica del líquido y P_{Rl} número de Prandtl del líquido.

Valores de los coeficientes que aparecen en la correlación anterior

Tabla 4.3.1 Coeficiente para la transferencia de calor de la evaporación colectiva [Fuente: C. Saavedra [27]]

Coeficiente	Co < 0.65	Co > 0.65
C 1	1.136	0.6683
C 2	-0,9	-0,2
C 3	667.2	1058.0
C 4	0.7	0.7
C 5	0.3	0.3

Para $Fr_{lo} > 0.04$ $C5 = 0$ para tubos verticales y horizontales

F_η depende del fluido, $F_\eta = 1$ para agua

Por último, se tiene la emisividad de los gases, en la campana móvil es donde ocurre la combustión de gases, lugar el cual se asimila al hogar de una caldera acuotubular donde prácticamente todo el calor que se transfiere a la muralla de tubos de agua ocurre por radiación. Para hacer estimaciones del calor transferido, se puede utilizar un procedimiento simplificado conocido como: parámetros concentrados. Este consiste en reemplazar una distribución de temperatura por un solo valor representativo. De este modo, se asigna un valor a la temperatura de la superficie absorbente T_s y temperatura efectiva para la llama, la cual es mayor a la temperatura con que salen los gases del hogar donde $T_{GE} > T_G$, donde $T_{GE} = (T_{adiab} * T_G)^{0,5}$ y T_{adiab} es la temperatura para combustión adiabática [27].

La radiación de los gases se considerará una combinación de superficie gris y re-radiante método balance térmico, donde se tiene emisividad y absorptividad de parte de los gases y de las partículas de hollín presentes:

$$\varepsilon_m = \varepsilon_g + \varepsilon_h \quad (40)$$

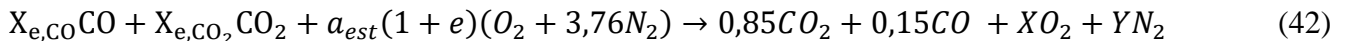
$$a_m = a_g + a_h \quad (41)$$

Debido a las altas temperaturas registradas en la cercanía de la entrada del aire hacia la campana (Temperatura sobre los 300°C) y la imposibilidad de poder medir la temperatura de aire en este lugar, lleva a tomar la consideración de una muy baja concentración de humedad del aire o nula, es decir; $C_{CO_2} \gg C_{H_2O} \rightarrow \varepsilon_{CO_2} \gg \varepsilon_{H_2O}$, en vista de esto para simplificación de cálculo, se considerará que el aire ingresa prácticamente seco a la campana. En este caso su estimación queda expuesto al final del siguiente subcapítulo.

4.3.2 Ecuaciones del modelo sin PCM

La combustión generada en la campana se representa mediante un modelo de cámara adiabática, donde ingresa el flujo de calor de la combustión de los gases (\dot{Q}_f), el flujo de calor sensible aportado por los gases (\dot{Q}_g) y el flujo de calor del aire inducido que ingresa a la campana (\dot{Q}_a), obteniendo como salida el flujo de calor de los humos post combustión ($\dot{Q}_{h,ad}$), los cuales pasan al intercambiador de calor que representa las pérdidas al ambiente debido a la exposición de la campana en su exterior al aire ambiente \dot{Q}_{am} y las pérdidas debido al enfriamiento del agua ($\dot{Q}_{w,m}$). Como resultado se tiene el calor de los humos de salida de la campana móvil (\dot{Q}_h).

Balance químico



Balance para modelo de cámara de combustión

$$\dot{Q}_f + \dot{Q}_g + \dot{Q}_a = \dot{Q}_{h,a} \quad (43)$$

$$\dot{Q}_f = \dot{m}_g \cdot PCI \quad (44)$$

$$\dot{Q}_g = \sum_{i=1}^2 \dot{m}_i (h_{e,i} - h_{r,i}) \quad (45)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a \cdot (h_{e,a} - h_{r,a}) \quad (46)$$

$$\dot{Q}_{h,ad} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i (h_{ad,i} - h_{r,i}) \quad (47)$$

Balance térmico del intercambiador de calor

$$\dot{Q}_{h,k} - \dot{Q}_{am,k} - \dot{Q}_{w,m,k} = \dot{Q}_{h,k+1} \quad (48)$$

$$\dot{Q}_{w,m,k} = \dot{m}_{w,m,k} \cdot (h_{s,w,k+1} - h_{e,w,k}) \quad (49)$$

$$\dot{Q}_{h,k+1} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{i,k} (h_{h,i,k+1} - h_{r,i}) \quad (50)$$

Ecuaciones de transferencia de calor

$$\dot{Q}_{h,k} = n_t A_t \left(\sigma \varepsilon_h (T_{p,h,k}^4 - T_{t,k}^4) + H_h (T_{p,h,k} - T_{t,k}) \right) \quad (51)$$

$$\dot{Q}_{t,k} = n_t A_t \left(\frac{k_{ac}}{r_{ext} \ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)} + \frac{r_{int}}{r_{ext}} H_w \right) (T_{t,k} - T_{p,w,k}) \quad (52)$$

$$\dot{Q}_{am,k} = \frac{n_t A_t}{r_{ext}} \left(\frac{k_{ac}}{\ln \left(\frac{r_{ext}}{r_{int}} \right)} + r_{int} (H_a + H_w) \right) (T_{p,w,k} - T_{a,k}) \quad (53)$$

Donde X,Y son los moles correspondientes para cada compuesto, \dot{m} es flujo másico, h entalpía, PCI poder calorífico inferior, n número de tubos, A área superficial del tubo, k coeficiente conductivo, r radio del tubo, σ constante de Stefan-Boltzmann, ε emisividad, T temperatura, H coeficiente convectivo. Los subíndices corresponden a: g (gases), a (aire), e (entrada), s (salida), r (referencia), am (aire ambiente), w (agua), m (móvil) h (humos), ad (adiabático), p (promedio), ext (exterior), int (interior), t (tubo) y ac (acero) con (i=O2, CO, CO2 y N2).

El modelo matemático anteriormente propuesto alberga una serie de parámetros, de los cuales el estudio permitió observar la sensibilidad de cada uno de ellos al modelo, siendo la emisividad el agente más determinante e influenciador sobre los resultados.

Su estimación se realizó en base a la investigación realizada por Michael Alberti [20], donde presenta la emisividad como la integración sobre todo el rango espectral la cual conduce a la total emitida:

$$\varepsilon = \frac{1}{\sigma \cdot T^4} \cdot \int_0^{\infty} \varepsilon_{\eta} \cdot \frac{c_1 \cdot \eta^3}{\exp\left(\frac{c_2 \cdot \eta}{T}\right) - 1} d\eta \quad (54)$$

Donde $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ es la constante de Stefan-Boltzmann $C_1 = 3,7418 \times 10^{12} W \cdot cm^2$ y $C_2 = 1.43877 cm \cdot K$ son las constantes de Planck. Cuando se debe calcular la emisividad de la banda, los límites de integración en la ecuación. Se reemplazan con los límites de la banda. La integración de la ecuación se lleva a cabo numéricamente usando la regla del rectángulo. La resolución del número de onda es $0,01 cm^{-1}$ en el caso de una presión total $P_t \geq 1 atm$ o $0,001 cm^{-1}$ para $P_t < 1 atm$. Cada línea espectral se evalúa a un coeficiente de absorción lineal mínimo de $10^{-9} cm^{-1}$ [20].

Todo esto es calculado a través del programa Excel adjunto, donde realiza la tabulación de estas emisividades para facilitar interpolaciones de forma más precisa sin tener que recurrir a correcciones de presión. Para ello se ingresan las variables de temperatura composición volumétrica del CO_2 , el largo óptico y la presión total.

Tabla 4.3.2. Variables para la emisividad de CO2

Variable	Valor
----------	-------

Temperatura humos (T_{humos})	$300^{\circ}\text{C} \leq T_{humos} \leq 1900^{\circ}\text{C}$
Composición Volumétrica (X_{CO_2})	$0,23 \leq X_{CO_2} \leq 0,245$
Longitud Óptica (L_{op})	1 m
Presión total	101325 Pa

En la tabla se puede observar las variables consideradas para la obtención de la emisividad, por una parte se tiene la temperatura de humos los cuales durante el tiempo soplado ronda entre las temperaturas 300°C - 1900°C , asimismo para la concentración volumétrica del CO_2 en la mezcla el cual ronda entre $0,23$ - $0,245 \frac{m^3_{CO_2}}{m^3_{total}}$.

Entre todas las variables, la que mayor influye es la temperatura, siendo un factor importante al momento del cálculo de la emisividad. Con la ayuda del programa de Alberti y la interpolación de la curva obtenida por un polinomio grado 6 (figura 4.3.2) y en conjunto de las ecuaciones (56 hasta 59) se obtiene el gráfico mostrado en la figura 4.3.3.

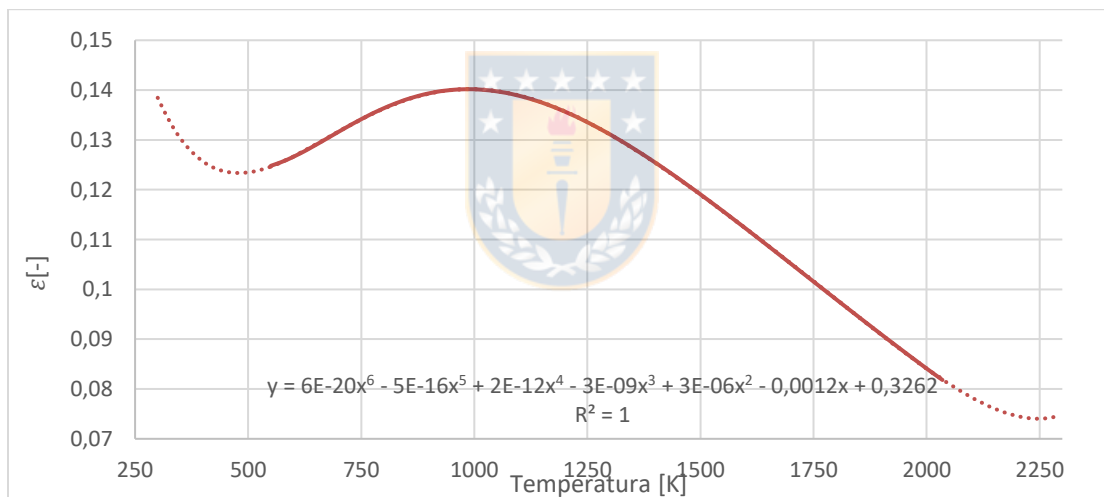


Figura 4.3.2. Curvas de emisividad CO_2 vs Temperatura

$$\varepsilon_{CO_2} = 5,5217 \cdot 10^{-20}T_h^6 - 4,7825 \cdot 10^{-16}T_h^5 + 1,6816 \cdot 10^{-12}T_h^4 - 3,0198 \cdot 10^{-9}T_h^3 + 2,8155 \cdot 10^{-6}T_h^2 - 0,001240T_h + 0,3262 \quad (55)$$

Absortividad del CO_2

En el caso de la absortividad, los coeficientes de los gases se obtienen del gráfico anterior, pero usando las siguientes correcciones para el factor (pL):

Para CO_2 se obtiene ε del gráfico con T_s y $P_{CO_2}L \cdot \left(\frac{T_s}{T_g}\right)$ el resultado se multiplica por $\left(\frac{T_s}{T_g}\right)^{0,65}$

Se genera el gráfico y se interpola obteniendo:

$$a_{CO_2} = 8,8816 \cdot 10^{-20} T_s^6 - 7,5573 \cdot 10^{-16} T_s^5 + 2,5984 \cdot 10^{-12} T_s^4 - 4,541 \cdot 10^{-9} T_s^3 + 4,109 \cdot 10^{-6} T_s^2 - 0,001761 T_s + 0,4457 \quad (56)$$

Además, nuestra llama contiene material particulado que se quema como sólido, el cual será considerado como hollín con la suposición de que sea como el generado en una cámara de combustión para cuya radiación continua del carbono (hollín) se obtiene a partir de la siguiente relación para la emisividad y absorptividad:

$$\varepsilon_h = 1 - \frac{1}{(1+350 \cdot f_v \cdot T_g \cdot L)^4} \quad (57)$$

$$a_h = 1 - \frac{1}{(1+350 \cdot f_v \cdot T_s \cdot L)^4} \quad (58)$$

La concentración de las partículas de hollín se considera constante con un valor de $f_v = 2,9 \times 10^{-8}$ [28], la temperatura efectiva de los gases T_{humos} y T_s son valores que varían en función del tiempo y largo de la campana. Obteniendo de esta forma la emisividad total de la mezcla:

$$\rightarrow \varepsilon = \frac{\varepsilon_m \cdot T_g^4 - a_m \cdot T_s^4}{T_g^4 - T_s^4} \quad (59)$$

En la figura 4.3.3. se puede observar el comportamiento de la emisividad en función de la temperatura de los humos.

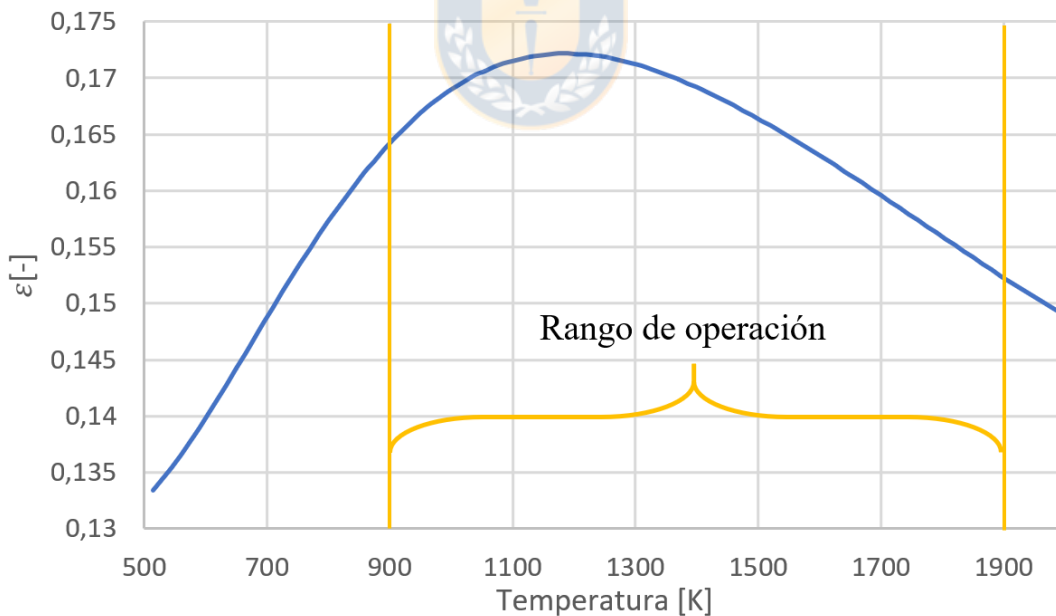


Figura 4.3.3. Curvas de emisividad mezcla vs Temperatura

Si se observa el gráfico, el rango donde opera el sistema 700K-1900K aproximadamente, la emisividad varía en 0,02 en los casos más extremos, variación que afecta directamente a los resultados donde el flujo de radiación posee una magnitud mucho mayor que la convectiva (figura 4.6.5).

Cabe considerar que es de conocimiento que los gases pueden traer elementos volatizados o gotas fundidos, que provoquen un cambio en la emisividad considerada para el hollín. Para salir de esta disyuntiva se propone un análisis experimental de los gases, aunque se advierte que debido a la limitación del espacio y ambiente de las campanas de refrigeración (altas temperaturas) se hace complejo la instrucción de algún instrumento de medición directa. Otra opción sería realizar un análisis químico de los instrumentos introducidos en las campanas y que fueron abrasados (termoculpas), así de esta manera tener un indicio del material particulado.

4.3.3 Ecuaciones del modelo con PCM

En esta sección se integra el dispositivo de PCM para la recuperación del calor sensible de los gases entre la campana móvil y fija, tal como se muestra en la figura 4.3.4.

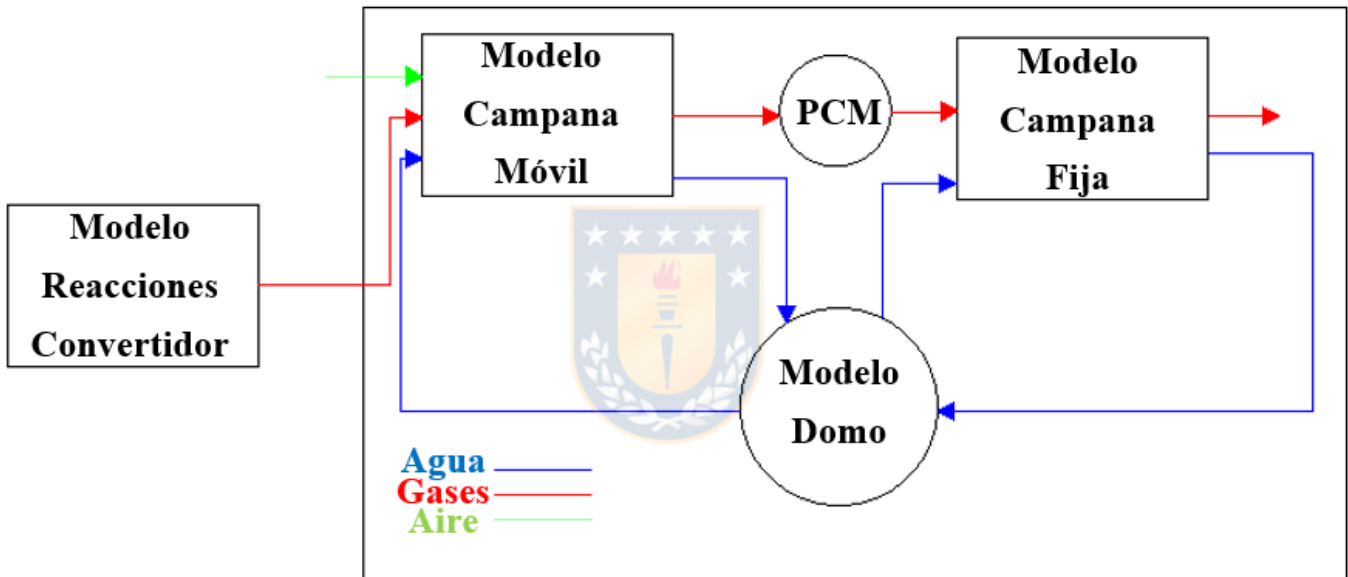


Figura 4.3.4. Modelo con integración del PCM

La diferencia de flujos de calor entre los humos de salida de la campana móvil y salida del PCM, $\dot{Q}_{h,s,m}$ y $\dot{Q}_{h,s,f}$ respectivamente, da como resultado la variación de energía interna absorbida por el PCM $\left(\frac{\partial Q_{pcm}}{\partial t}\right)$:

$$\dot{Q}_{h,s,m} - \dot{Q}_{h,s,pcm} = \frac{\partial Q_{pcm}}{\partial t} \quad (60)$$

Donde:

$$\dot{Q}_{h,s,m} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i (h_{s,m,i} - h_{r,i}) \quad (61)$$

$$\dot{Q}_{h,s,pcm} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_i (h_{s,pcm,i} - h_{r,i}) \quad (62)$$

$$Q_{pcm} = m_{pcm} \cdot h_{fg,pcm} \quad (63)$$

Donde h_{fg} corresponde a la entalpía de cambio de fase del material.

4.4 Modelo de la campana fija

4.4.1 Descripción y consideraciones del modelo

La campana fija es el segundo componente del sistema de refrigeración que capta los gases de salida de la campana móvil, produciendo un enfriamiento adicional de los humos. Este modelo, representado en la figura 4.4.1, recibe como entradas las variables de salida del modelo de la campana móvil en conjunto con algunas variables proveniente del modelo del domo.

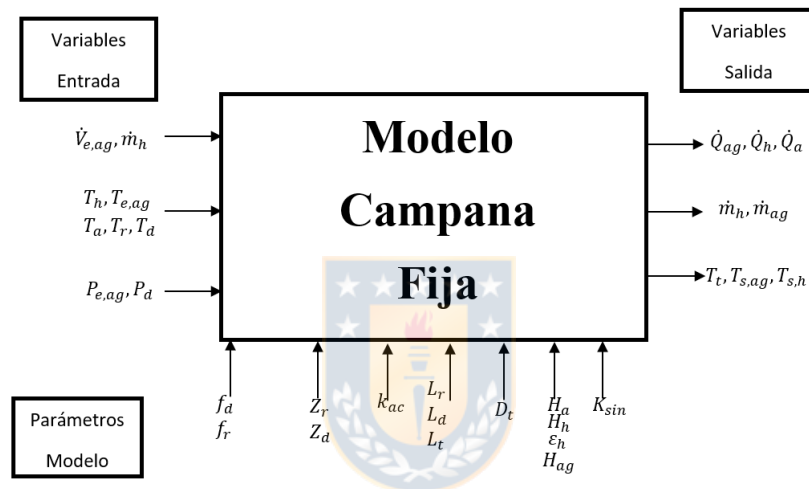


Figura 4.4.1. Modelo campana fija

Las consideraciones del modelo son: flujo de agua y vapor homogéneo, no existen pérdidas de masa en los trayectos, variación de energía interna despreciable, sección particular con la integración de las duchas controladas con un sistema ON-OFF.

Se considera un volumen de control definido por elementos discretos equivalente a un metro de la campana para el planteamiento de ecuaciones del modelo. Cada elemento (k+1) desde el anterior (k) con una cantidad de 32 elementos.

4.4.2 Ecuaciones del modelo campana fija

El modelo representa el enfriamiento de los humos después de la campana móvil. Se considera un intercambiador de calor con duchas para el enfriamiento de los humos que incluye: la pérdidas de calor al ambiente debido a la exposición de la superficie exterior de la campana \dot{Q}_{am} , las pérdidas debido al enfriamiento del agua $\dot{Q}_{ag,f}$, flujo de calor perdido por las duchas \dot{Q}_d , los humos de entrada proveniente de la campana móvil \dot{Q}_h , dando como resultado el calor de los humos de salida de la campana fija $\dot{Q}_{h,f}$.

Balance de energía del intercambiador de calor

$$\dot{Q}_{h,k} - \dot{Q}_{am,k} - \dot{Q}_{w,f,k} = \dot{Q}_{h,f,k+1} \quad (64)$$

$$\dot{Q}_{w,f,k} = \dot{m}_{w,f,k} \cdot (h_{s,f,k+1} - h_{e,f,k}) \quad (65)$$

$$\dot{Q}_{am,k} = H_a \cdot A_{t,f} \cdot (T_{t,k} - T_{a,k}) \quad (66)$$

$$\dot{Q}_{h,f,k} = \sum_{i=1}^4 \dot{m}_{i,k} \cdot (h_{h,i,k} - h_{r,i}) \quad (67)$$

Para el caso particular de la sección en que se agregan el flujo de duchas, el balance se modifica, considerando un calor de pérdida debido al ingreso de las duchas.

$$\dot{Q}_{h,k} - \dot{Q}_{am,k} - \dot{Q}_{w,f,k} - \dot{Q}_d = \dot{Q}_{h,k+1} \quad (68)$$

$$\dot{Q}_d = \dot{m}_d \cdot (h_{s,d} - h_{e,d}) \quad (69)$$

Donde las variables expresadas al final de subcapítulo 4.3.2, son equivalentes, pero en referencia a la campana fija. Se agregan los sub índices d (duchas) y f (fija) con (i=O₂, CO, CO₂ y N₂) e (i=O₂, CO, CO₂, N₂, H₂O) para el caso de las duchas. Para la transferencia de calor las ecuaciones utilizadas son las mismas que el modelo de campana móvil.

4.5 Modelo Domo

4.5.1 Descripción y consideraciones del modelo

El modelo representa el comportamiento del domo ante la circulación del agua de refrigeración de las campanas móvil y fija, así como la liberación de vapor a la atmósfera que se tiene actualmente en la planta CSCh.

Se tienen las siguientes consideraciones para el modelo del domo: flujo de agua y vapor homogéneo sobre los 19 bar, estado bifásico al interior del domo, no existen pérdidas de masa y calor en los trayectos y variación de energía interna despreciable.

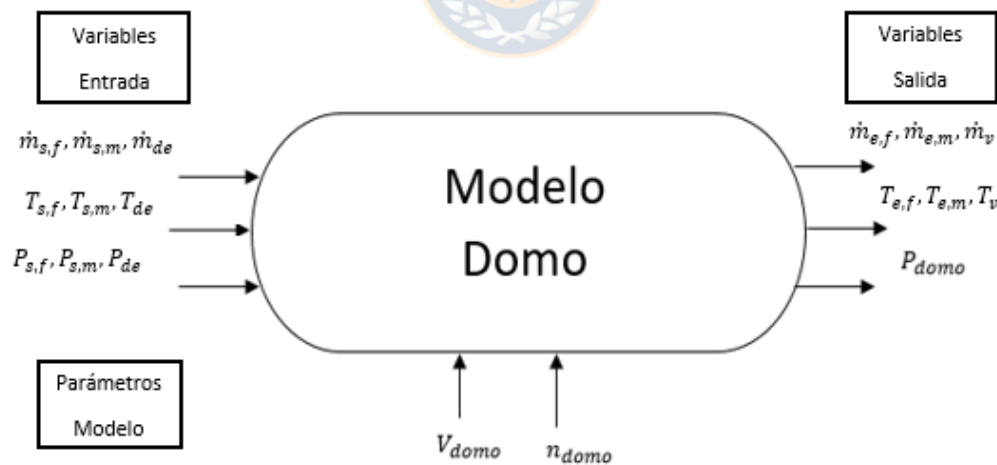


Figura 4.5. Modelo del domo

4.5.2 Ecuaciones de balance en el domo

El modelo representa la variación de energía interna del domo, incluyendo los distintos flujos de energía que ingresan y salen del sistema, los cuales provocan la apertura de la válvula y liberación de vapor.

$$\dot{m}_m(h_m - h_{w,do}) + \dot{m}_f(h_f - h_{w,do}) + \dot{m}_D h_D - \dot{m}_v h_{v,do} = \frac{\partial E}{\partial t} \quad (70)$$

Donde E es la energía interna del sistema (interior domo), los subíndices do (domo), D (desaireador) y v (vapor).

4.6 Resultados del modelo

4.6.1 Resultados del modelo del convertidor

En las figuras 4.6.1, 4.6.2 y 4.6.3 se muestran los resultados calculado por el modelo respecto al flujo de gases de salida del convertidor durante el tiempo de inyección de O_2 , las concentraciones de CO y CO_2 y su temperatura, respectivamente. Estos resultados son coherentes con los presentados por Wei [19].

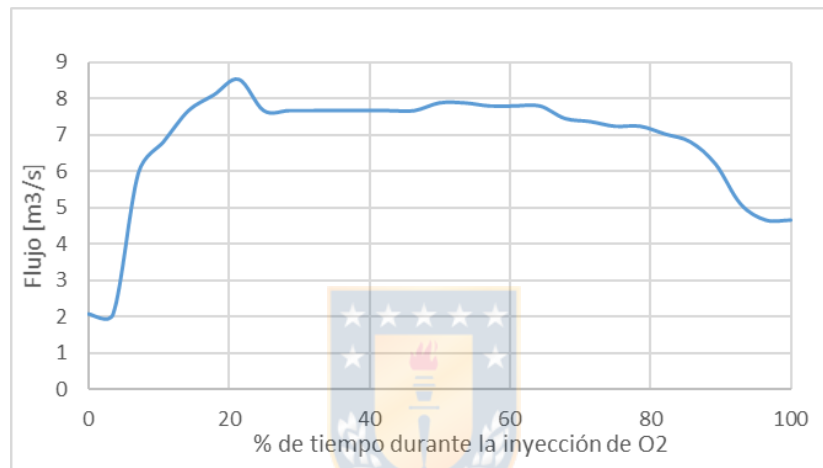


Figura 4.6.1. Flujo de salida gases convertidor.

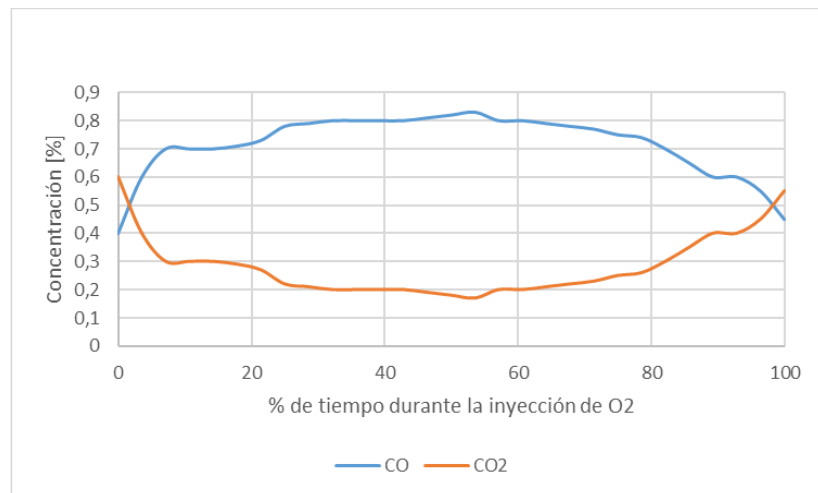


Figura 4.6.2. Concentraciones de CO y CO_2 .

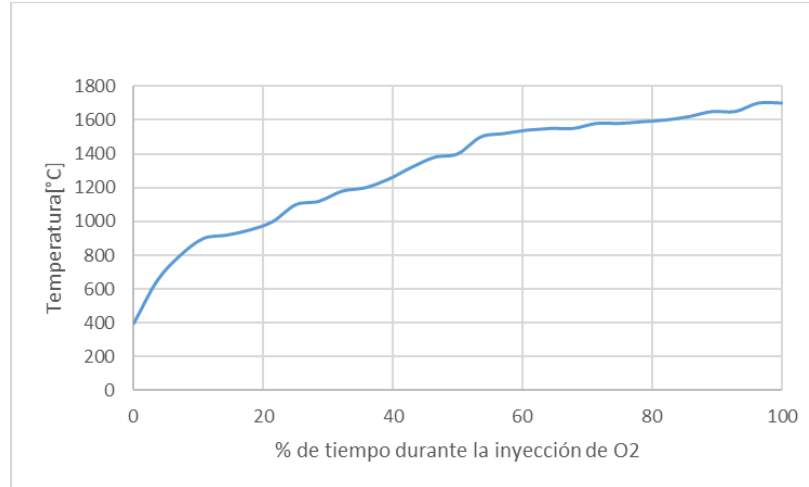


Figura 4.6.3. Temperatura salida de gases del convertidor.

4.6.2 Resultados del modelo campana móvil sin PCM

En la figura 4.6.4. se muestra que el modelo desarrollado logra predecir la evolución de la temperatura de salida de los productos de combustión secundaria, registrada mediante mediciones realizadas en terreno. Las principales diferencias entre el modelo y los resultados experimentales se observan durante los dos primeros minutos de estabilización del proceso y podrían atribuirse a la inercia de los instrumentos de medición. Luego, durante el régimen estacionario que dura sobre diez minutos, correspondiente al periodo de descarburación del arrabio, se alcanzan temperaturas entre 1600 y 1800°C, para finalmente decaer al término del proceso.

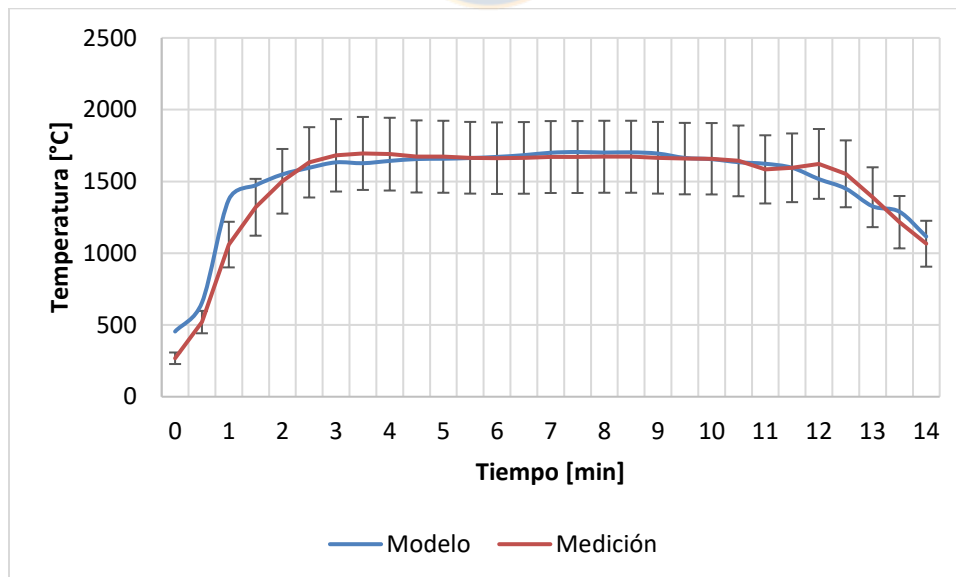


Figura 4.6.4. Temperatura salida de gases campana móvil.

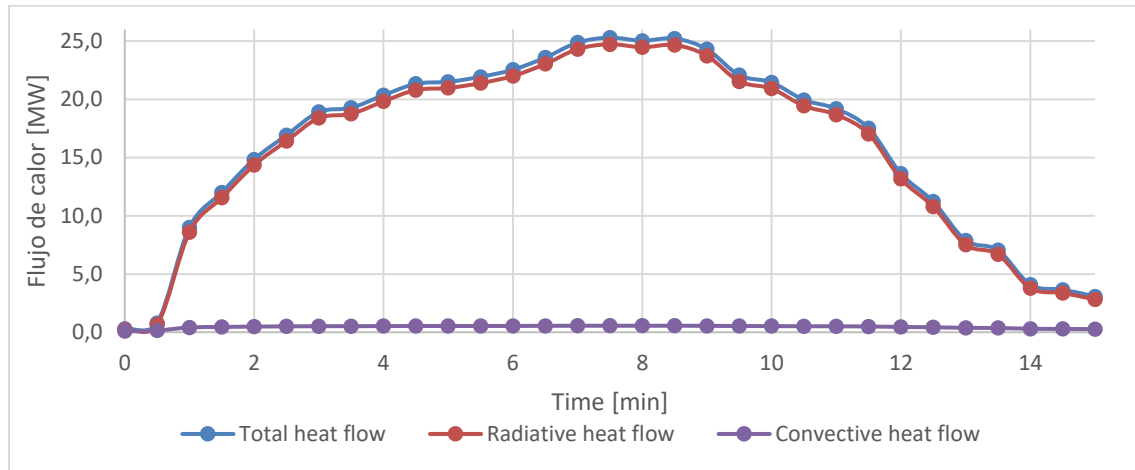


Figura 4.6.5. Flujo de calor del modelo de transferencia de calor.

En la figura 4.6.5 se puede observar la magnitud de los flujos de calor por transferencia de calor del modelo, en este caso de la campana móvil, donde la mayor parte del tiempo de soplado, el calor se transfiere hacia la campana por radiación, conformando un 97% del calor total transferido, mientras que el resto es por convección, esto demuestra lo comentado antes sobre la importancia del parámetro de la radiación de los gases y su influencia sobre el modelo.

4.6.3 Discusión de resultados

La principal discusión se centra en la temperatura de los gases a la salida de la campana móvil, ya que este es punto de importancia del estudio, que es donde se piensa incorporar el PCM. Si se observa la Figura 4.6.4, se ve como las curvas están superpuestas prácticamente una sobre la otra, lo que demuestra la cercanía del modelo respecto a lo registrados por los equipos de medición, con respecto al error del 15% estimado debido al error de procedimiento por la radiación hacen que el resultado se aleje un poco de la idealidad, pero en realidad debido a las limitancias tanto geométricas como ambientales (altas temperaturas y abrasión de gases) del proceso para el tema experimental hacen que la medición sea compleja de realizar por lo que la obtención de resultados experimental tiene una valoración importante pese al margen de error obtenido, lo que no implica que no se pueda obtener mejores resultados a través de otros métodos como por ejemplos los ópticos, donde si bien entregan resultado con bajo error de medición el hecho de que deba tener acceso visual a los gases, ya provoca que sea complejo de llevarse a cabo. J. Calvalho en su estudio sobre error de medición de termocuplas debido a la radiación en combustores cilíndricos, indica que en flujos de gases de alta temperatura puede existir un error de medición de los instrumentos en un rango que va desde 1% hasta el 10% de la temperatura registrada debido a la radiación considerando una emisividad de 0,8, donde medida que mayor es la temperatura mayor es el porcentaje de error [30]. Mientras que Mekhregin indica que en sistema de medición de temperatura sobre gases en un rango de 810-1120°C, se encuentra hasta un error de 3% debido a la radiación de paredes externas [31]. Por otra parte, Ketui muestra como en instrumentos de medición más sofisticados como pirómetros que miden temperaturas cercanas a los 1100°C en algunas turbinas a gas, se pueden encontrar errores del rango de 1% al 21% de la temperatura medida, considerando una emisividad de 0,8 [32]. Lo que hace plantearse que lo obtenido por el modelo no sea una mala estimación

pese a la gran incertidumbre, por ende, se decide aceptar lo predecido y considerarlo válido, donde paso de esta forma a la modificación del modelo e incorporación del PCM.

4.7 Resultados incorporando el PCM

En el caso del PCM se analizaron tres materiales distintos Na_2O , Manganeso y Berilio (características en Anexo F). En la tabla 4.7 se observan los resultados del calor disponible, donde el Na_2O es la mejor opción ya que es el material que recupera mayor energía. Por otra parte, en cuanto a la masa de material que se requiere para la recuperación de energía, el berilio ocupa el primer lugar.

Considerando que la estructura de la campana fija puede soportar como máximo 2 toneladas adicionales, sin introducir modificaciones mayores en su configuración, por ende, se decide escoger el berilio como la mejor opción para la recuperación de energía. Esta energía será traspasada al aire que circula al interior de la campana durante el tiempo de no inyección de oxígeno.

Tabla 4.7. Calor recuperado por el PCM.

Material	Calor Recuperado [GJ]	Calor Perdido [GJ]	Calor Disponible [GJ]	Masa [Ton]	% recuperado
Berilio	15,7	4,7	11,0	9,0	20,4
Manganeso	17,7	4,2	13,5	66,8	23,0
Na_2O	23,1	3,0	20,0	29,9	29,9

En la figura 4.7.1, se aprecia el calor recuperado por el PCM durante el tiempo de soplado, donde al inicio del proceso el calor es negativo debido a que la temperatura de los gases es menor que la del PCM, por lo que éste libera calor progresivamente para calentar y aumentar la temperatura de los humos. Cerca del minuto 14 se alcanza el peak de recuperación con un total de 15,7 GJ para el caso del Berilio.

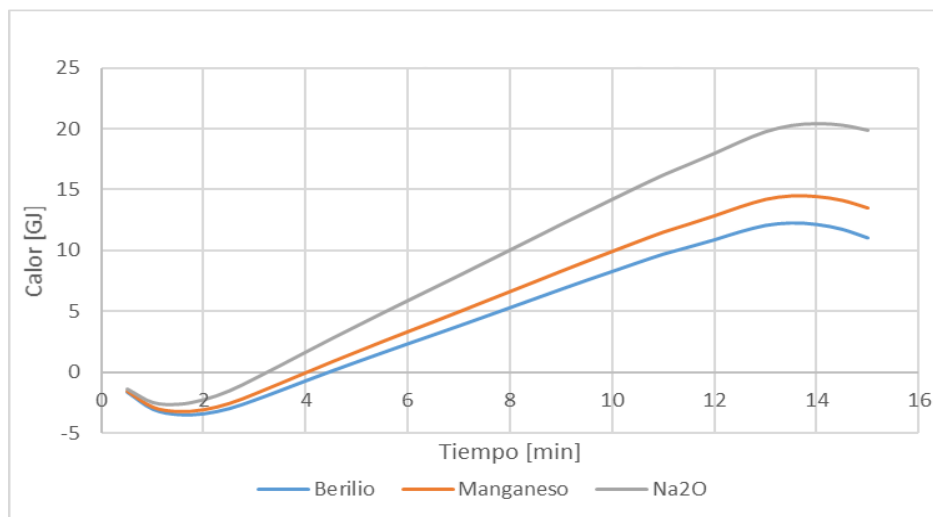
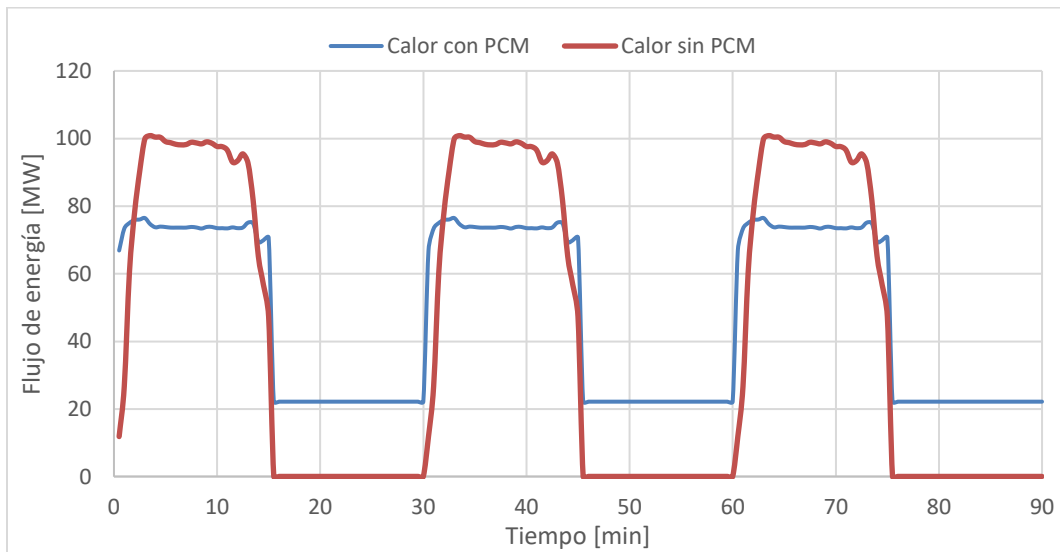


Figura 4.7.1. Calor recuperado por el PCM.**Figura 4.7.2. Flujo de calor transferido con y sin PCM.**

La aplicación del PCM tiene un impacto directo sobre la energía al interior de la campana, en la figura 4.7.2 se observa en naranja el flujo de calor normal sin modificaciones y en celeste con el PCM, donde claramente se aprecia la disminución de la brecha entre las fases de inyección y no inyección de oxígeno.

4.8 Potencial de recuperación de energía

En los gases se obtienen 77 GJ de energía disponible por los humos al interior de la campana durante los 15 minutos de inyección de oxígeno (soplado). Con el uso de un dispositivo PCM se obtiene un 20% de recuperación de la energía residual, equivalente a 15,7 GJ, el cual puede ser utilizado en calentar el flujo de aire que circula al interior de la campana durante el tiempo de no soplado. De esta forma, se podría generar un flujo de calor continuo durante todo el proceso para la generación de vapor, con un potencial de generación de energía eléctrica de 15 MW mediante un Ciclo Rankine como el que se ilustra en la figura 4.8.

Lo anterior requeriría de un acumulador ya que el calor transferido por el PCM al aire, durante el tiempo de no soplado, es inferior al calor proveniente de los gases durante el soplado. Esta diferencia afectaría al flujo de vapor generado, lo cual se soluciona con un acumulador de vapor que sea capaz de guardar la cantidad necesaria de vapor durante el peak de mayor generación de energía, para luego suplir el déficit necesario para obtener un flujo de vapor constante durante todo el proceso.

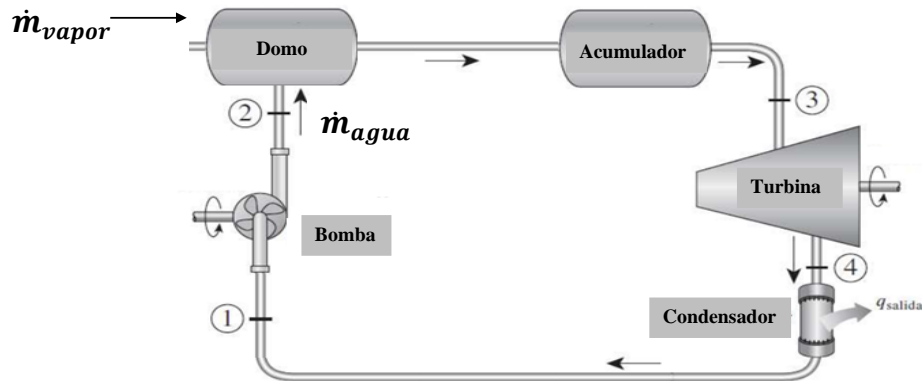


Figura 4.8. Aplicación PCM para generación de potencia.

4.9. Configuración del PCM

La incorporación del PCM al interior de la campana, presenta varias limitaciones, tanto geométricas debido a inclinación (diagonal) que presenta la campana y su forma ortogonal, como también en la mecánica de fluidos debido a que su introducción al interior presenta una pérdida de carga para los humos, la cual deberá ser suplida por el ventilador que succiona los gases. Se decidió optar por la configuración mostrada en la figura 4.9.1, cuyo PCM está compuesto de dos hileras de tubos cilíndricos compuesto por una copa y una tapa de una aleación de Tantalio-Tungsteno (Ta-10W) que se encargaran de encapsular el Berilio, utilizando la metodología implementada por [16]. Las características geométricas y mecánicas del dispositivo se pueden observar en la Tabla 4.9.1.

Tabla 4.9.1. Características del PCM.

Componente	Material	Punto de fusión [°C]	Conductividad térmica [W/m°C]	Precio [US\$/kg]	Diámetro		Largo	
					Exterior [m]	Tubo Mayor [m]	Tubo Menor [m]	
Tapa/Copa	Aleación Tantalio y Tungsteno	3030	34-52	367	0,43/0,41	0,85/3,1	0,78/2,7	
PCM	Berilio	1278	200	748	0,39	3,1	2,7	

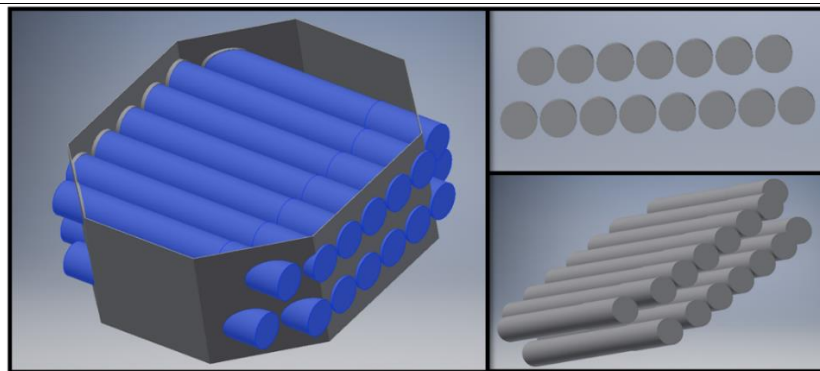


Figura 4.9.1. Configuración del PCM.

La hilera inferior está compuesta por 8 tubos, 6 centrales (tubo mayor) y 2 extremos (tubo menor), mientras que la hilera superior, está compuesta por 7 tubos centrales, existiendo una distancia de 5 cm

entre cada tubo. Estos tubos son colocados en una carcasa, la cual a su vez debe ser instalada entre campanas, tal como se muestra en la figura 4.9.2.

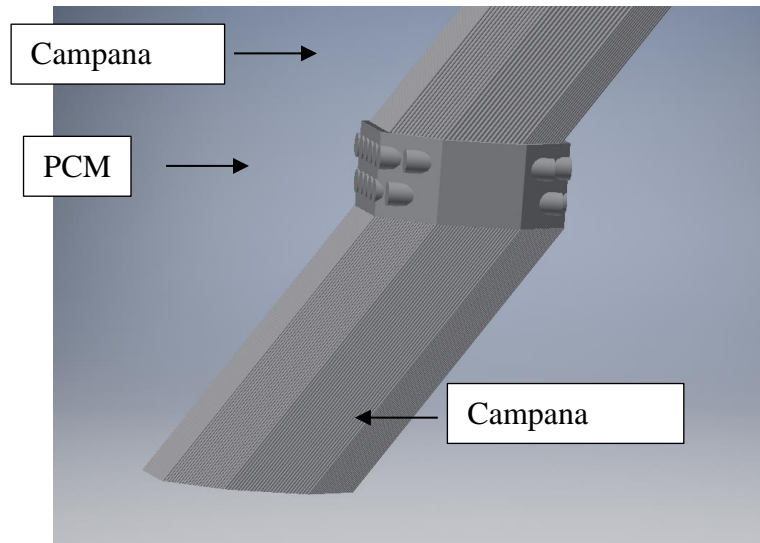


Figura 4.9.2. Instalación de PCM.

Para la geometría dada, y el precio de los materiales mostrados en la tabla 4.9.2, se realiza una estimación económica en base al costo de material del PCM.

Tabla 4.9.2. Evaluación económica.

Medida	Costo Material [USD]	Costo de funcionamiento [USD]	Ahorro monetario anual [USD]	Razón Costo/ahorro
Eficiencia Energetica				
PCM	\$72.234.000	\$196.000	\$18.771.429	3,9

Los resultados se muestran en la Tabla 4.9.2 donde se puede observar que la relación entre costo/ahorro es 3,9, esto es sin considerar el costo que tendría tener el ventilador funcionando. En base a esto, se puede plantear una propuesta futura para su implementación donde se deberá tener en consideración el gran volumen que requerirá, el cual como mínimo tendrá un retorno de lo invertido de 4 años.

5. Conclusiones

El modelo desarrollado permite estimar la energía residual de los gases provenientes de un convertidor de acero, la cual se transfiere al sistema de refrigeración en las campanas de extracción. La validación de este, en término de la distribución de temperaturas, presenta resultado cuyo error es inferior al 15%.

Incorporando al modelo procesos de cambio de fase para acumular energía mediante materiales como Na_2O , manganeso y berilio, se estima un potencial de recuperación energética del 30%, 23% y 20%, respectivamente, de la energía sensible de los gases. De estos materiales, en una evaluación inicial se selecciona el berilio por motivos prácticos relativos al peso que se agregaría a la campana.

El calor recuperado podría ser utilizado para la evaporación continua del agua al interior de los tubos del sistema de refrigeración, generando un flujo de vapor continuo en el domo, para luego ser liberado y captado por un acumulador de vapor, y finalmente ser inyectado a un ciclo de Rankine simple para la generación de energía eléctrica. Considerando un rendimiento del ciclo de 30%, se podría generar una potencia de 15 MWe.

La implementación de este tipo de medidas de eficiencia energética, en los procesos BOF de compañías siderúrgicas, permitiría generar ahorros energéticos capaces de pagar la inversión en un tiempo estimado de 4 años con un costo estimado para su implementación de USD\$72.234.000.



6. Referencias

- [1] Department Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE). “Waste Heat Recovery Technology Assessment, Department of energy”, USA 2017 <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/waste-heat-recovery-resource-page>
- [2] AETS, ECONOLER, “Estudio de Mercado de Eficiencia Energética en Chile”, 2010, [http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/11.Informe%20Final%20Mercado%20EE%20\(1047\).pdf](http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/Minerg/11.Informe%20Final%20Mercado%20EE%20(1047).pdf).
- [3] K. He, L. Wang, “A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp 1022-1039, 2017.
- [4] G. Xin Gui, “Ministry of Industry and Information Technology Issuance of the Iron and Steel Industry Twelfth Five-Year Development Plan”, 2011. <https://members.wto.org/CRNAttachments/2014/SCMQ2/law3.pdf>
- [5] T. A. Napp, A. Gambhir, T. P. Hills, N. Florin, P. S Fennell, “A review of the technologies, economics and policy instruments for decarbonising energy-intensive manufacturing industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 30, pp 616-640, 2014.
- [6] G. Oluleye, R. Smith, M. Jobson, “Modelling and screening heat pump options for the exploitation of lowgrade waste heat in process sites”, *Applied Energy*, Vol. 169, pp 267-2861, 2016.
- [7] L. Miró, S. Brückner, L. Cabeza, “Mapping and discussing Industrial Waste Heat (IWH) potentials for different countries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 51, pp 847-855, 2015.
- [8] H. Zhang, L. Dong, H. Li, B. Chen, “Investigation of the residual heat recovery and carbon emission mitigation potential in a Chinese”, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 2, pp 67-80, 2013.
- [9] N. Shigaki, T. Akiyama and F. Tsukihashi, “Exergy Analysis of Steel Production Processes, Japan”, *Materials Transactions*, Vol. 43, N°3, pp. 379-384, 2002.
- [10] Kun He, Li Wang “A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 70, pp 1022-1039, 2017
- [11] Q. Zhang, X. Zhao, H. Lu, T. Ni, Y. Li, “Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China’s iron and steel industry”, *Applied Energy*, Vol. 191, pp 502-520, 2017.
- [12] N. Maruoka, T. Akiyama, “Exergy recovery from steelmaking off-gas by latent heat storage for methanol production”, *Energy*, Vol. 31, N° 10–11, pp 1632-1642, 2006.
- [13] F. Dal Magro, A. Meneghetti, G. Nardin, S. Savino “Enhancing energy recovery in the steel industry: Matching continuous charge with off-gas variability smoothing” *Energy Conversion and Management*, Vol 104, pp 78-89, 2015
- [14] S. Nimali, V. Martin, J. Ningwei “Phase equilibrium in the design of phase change materials for thermal energy storage: State-of-the-art”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 73, pp 558-581, 2017

- [15] X. Tong, N. Li, M. Zeng, Q. Wang “Organic phase change materials confined in carbon-based materials for thermal properties enhancement: Recent advancement and challenges”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 108, pp 398-422, 2019
- [16] R. Fukahori, T. Nomura, C. Zhu, N. Sheng, N. Okinaka, T. Akiyama “Macro-encapsulation of metallic phase change material using cylindrical-type ceramic containers for high-temperature thermal energy storage” *Applied Energy*, Vol 170, pp 324-328, 2016
- [17] J. Dhau, C. Wickramaratne, R. Kamal, P. Myers, D. Goswami, E. Stefanakos “Macro-encapsulation and characterization of chloride based inorganic Phase change materials for high temperature thermal energy storage systems”. *Applied Energy*, Vol. 221, pp 587-596, 2018
- [18] J. Coma, F. Blanco, “Simulación de la metalurgia en el convertidor LD” Recuperado de : http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/38354/TFM_JorgeComaGarcia.pdf [17 de julio 2020]
- [19] S. Li, X. Wei, L. Yu “Numerical simulation of off-gas formation during top-blown oxygen converter steelmaking”, *Fuel*, Vol. 90, N° 4, pp 1350-1360, 2011
- [20] M. Alberti, R. Weber, M. Mancini “Re-creating Hottel’s emissivity charts for carbon dioxide and extending them to 40 bar pressure using HITEMP-2010 data base” *Combustion and Flame*, Vol 162, pp 597-612, 2015
- [21] Brain Child Co, (2009), “Paperless Recorder VR18” Décimo sexta edición
- [22] J.P.Holman (2001) “Experimental Methods for engineers” Octava versión
- [23] A. Fissore (2017) “Apuntes del curso transferencia de calor” Recuperado en: <https://drive.google.com/open?id=1PaLamemqVYSo6pSsSjxliDtSZogysQue> [17 de julio 2020]
- [24] Purcell Varberg Rigdon “Cálculo diferencial e integral”, Novena edición
- [25] F. Incropera (2007) “Fundamentos de la transferencia de calor”, Cuarta edición
- [26] I. Shames (1995) “Mecánica de fluidos”, tercera edición
- [27] C. Saavedra (2015) “Centrales de energía” Recuperado en: <https://drive.google.com/open?id=1PaLamemqVYSo6pSsSjxliDtSZogysQue> [17 de julio 2020]
- [28] Proterm (2019) “Medición isocinética de la emisión de material particulado total” Chimenea Acería Conox CAP. SA. Recuperado en: <https://drive.google.com/open?id=1PaLamemqVYSo6pSsSjxliDtSZogysQue> [17 de julio 2020]
- [29] ARIAN Control & instrumentación “Pt100, su operación, instalación y tablas” <https://drive.google.com/open?id=1PaLamemqVYSo6pSsSjxliDtSZogysQue> [17 de julio 2020]
- [30] DISAI Automatic Systems “WIKA Gama de productos” Recuperado en: <https://drive.google.com/open?id=1PaLamemqVYSo6pSsSjxliDtSZogysQue> [17 de julio 2020]
- [30] J.A.Carvalho, Jr. and WFN dos Santos, “Radiation errors in temperature measurements with thermocouples in a cylindrical combustor”, *INT. COMM. HEAT MASS TRANSFER* , Vol. 17, pp 663-673, 1990.

- [31] M.V. Mekhregin, I.K. Meshkivskii, V.A. Tashkinov, V.I. Guryev, A.V. Sukhinets, D.S. Smirnov, “Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines”, *Measurement*, Vol. 139, pp, 355-360, 2019.
- [32] Ketui Daniel, Chi Feng, Shan Gao “Single wavelength and ratio pyrometry reflection errors in temperature measurement of gas turbine blade”, *Measurement*, Vol. 86, pp, 133-140, 2016.
- [33] Ángel Martín (S.F) “Obtención del hierro y el acero” Recuperado de: tecnoindustrialamd.weebly.com/obtencioacuten-del-hierro-y-el-acero.html [17 de julio 2020]
- [34] Compañía de Acero del Pacífico (CAP). “Alto Horno en CSH ” Recuperado de: www.infoacero.cl/acero/ah_csh.html [17 de julio 2020]
- [35] Internacional Regiomontana de Acero S.A (IRASA) “Nuestros procesos: Cargar y descarga” Recuperado de: www.irasa.net/NuestrosProcesos/CargayDescarga/tabid/68/Default.aspx [17 de julio 2020]
- [36] Saul Rivera, “Procesos Principales de fabricación de aceros” Recuperado de: www.slideplayer.es/slide/12057907/release/release/woothee [17 de julio 2020]
- [37] TC-S.A, “Termopares tipo S – Platino -10% Rodio/Platino” Recuperado de: <https://www.tc-sa.es/termopares-informacion/tablas-referencia-internacional-termopares-tipo-s.html> [17 de julio 2020]
- [38] MCI electronics, “Sensor temperatura RTD-Pt100” Recuperado de: <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/pack-sensor-de-temperatura-pt100-interfaz-rtd-pt100-27005> [17 de julio 2020]
- [39] I.E. Idel’chik (1996) “Handbook of hydraulic resistance”

ANEXO A

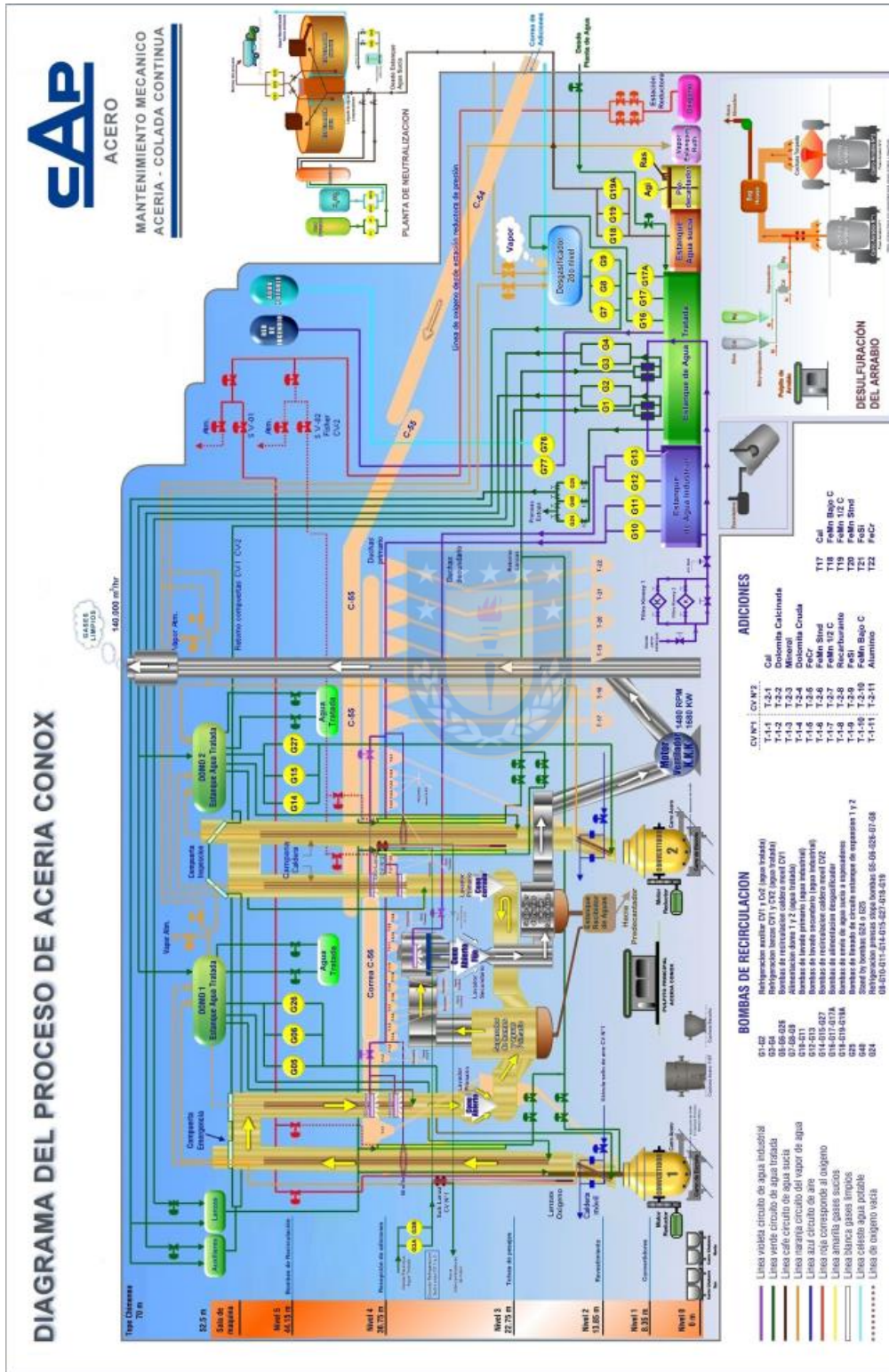


Figura A-1. Diagrama de proceso de la Acería Siderúrgica CAP.

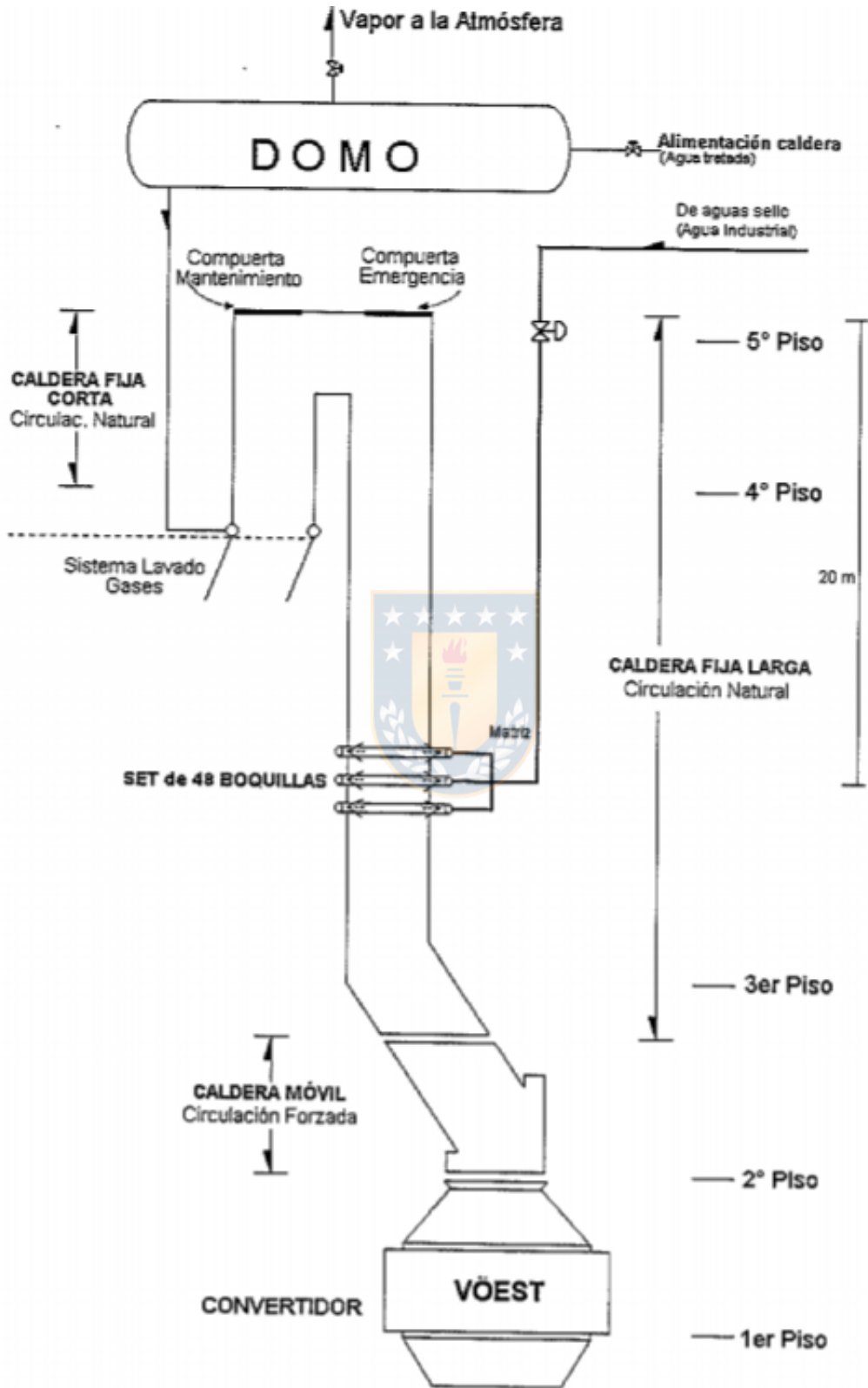


Figura A.2 Sistema de refrigeración de campanas

ANEXO B

CÁLCULO TEÓRICO DEL PODER CALORÍFICO SUPERIOR SOBRE BASE VOLUMÉTRICA DEL GAS NATURAL (METANO DILUIDO) SEGÚN LA NORMA CHILENA NCh 2380.Of97

El poder calorífico del gas real, sobre base volumétrica, para la temperatura de combustión t_1 y presión p_1 , de una mezcla de gas medida a una temperatura t_2 y presión p_2 se calcula según la ecuación:

$$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)] = \frac{\tilde{H}^o[t_1, V(t_2, p_2)]}{Z_{mix}(t_2, p_2)}$$

Donde:

$\tilde{H}[t_1, V(t_2, p_2)]$ poder calorífico del gas real sobre base volumétrica (superior o inferior)
 $\tilde{H}^o[t_1, V(t_2, p_2)]$ poder calorífico ideal de la mezcla sobre base volumétrica (superior o inferior)
 $Z_{mix}(t_2, p_2)$ factor de compresión del gas en las condiciones de referencia medidas

$$Z_{mix}(t_2, p_2) = 1 - \left[\sum_{j=1}^N x_j \cdot \sqrt{b_j} \right]^2$$

Donde:

x_j fracción molar de cada componente j del gas natural considerado
 $\sqrt{b_j}$ factor de sumatoria para cada componente j del gas natural considerado (**TABLA 1**)

$$x_j = \frac{\frac{y_j}{Z_j(t_2, p_2)}}{\sum_{j=1}^N \frac{y_j}{Z_j(t_2, p_2)}}$$

Donde:

y_j porcentaje en volumen de cada componente j del gas natural considerado (**DATO**)
 $Z_j(t_2, p_2)$ factor de compresión de cada componente j del gas natural considerado (**TABLA 1**)

$$\tilde{H}^o[t_1, V(t_2, p_2)] = \sum_{j=1}^N x_j \cdot \tilde{H}_j^o[t_1, V(t_2, p_2)]$$

Donde:

$\tilde{H}_j^o[t_1, V(t_2, p_2)]$ poder calorífico ideal sobre base volumétrica de cada componente j del gas natural considerado (superior o inferior) (**TABLA 2**)

De esta forma se puede obtener teóricamente el poder calorífico (superior o inferior) de un gas natural conociendo solamente la composición del gas en porcentaje de volumen y recurriendo a los datos de las TABLAS 1 y 2.

NCh2380

Tabla 2 - Factores de compresión y factores de sumatoria para componentes de gases naturales, en varias condiciones de referencia medidas

Todos los valores, excepto los factores de sumatoria para el hidrógeno, helio (recalcado) y neón (estimado) se han tomado o inferido del anexo M, referencia [13].

Componente	0°C, 101,325 kPa		15°C, 101,325 kPa		20°C, 101,325 kPa	
	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}	Z	\sqrt{b}
1 Metano	0,997 6	0,049 0	0,998 0	0,044 7	0,998 1	0,043 6
2 Etano	0,990 0	0,100 0	0,991 5	0,092 2	0,992 0	0,089 4
3 Propano	0,978 9	0,145 3	0,982 1	0,133 8	0,983 4	0,128 8
4 n-Butano	0,957 2	0,206 9	0,965 0	0,187 1	0,968 2	0,178 3
5 2-Metilpropano	0,958	0,204 9	0,968	0,178 9	0,971	0,170 3
6 n-Pentano	0,918	0,286 4	0,937	0,251 0	0,945	0,234 5
7 2-Metilbutano	0,937	0,251 0	0,948	0,228 0	0,953	0,216 8
8 2,2-Dimetilpropano	0,943	0,238 7	0,955	0,212 1	0,959	0,202 5
9 n-Hexano	0,892	0,328 6	0,913	0,295 0	0,919	0,284 6
10 2-Metilpentano	0,898	0,319 4	0,914	0,293 3	0,926	0,272 0
11 3-Metilpentano	0,898	0,319 4	0,917	0,288 1	0,928	0,268 3
12 2,2-Dimetilbutano	0,916	0,289 8	0,931	0,262 7	0,935	0,255 0
13 2,3-Dimetilbutano	0,910	0,300 0	0,925	0,273 9	0,934	0,256 9
14 n-Heptano	0,830	0,412 3	0,866	0,366 1	0,876	0,352 1
15 n-Octano	0,742	0,507 9	0,802	0,445 0	0,817	0,427 8
16 n-Nonano	0,613	0,622 1	0,710	0,538 5	0,735	0,514 8
17 n-Decano	0,434	0,752 3	0,584	0,645 0	0,623	0,614 0
18 Etileno	0,992 5	0,086 6	0,993 6	0,080 0	0,994 0	0,077 5
19 Propileno	0,981	0,137 8	0,984	0,126 5	0,985	0,122 5
20 1-Buteno	0,965	0,187 1	0,970	0,173 2	0,972	0,167 3
21 cis-2-Buteno	0,961	0,187 5	0,967	0,181 7	0,969	0,176 1
22 trans-2-Buteno	0,961	0,197 5	0,968	0,178 9	0,969	0,176 1
23 2-Metilpropeno	0,965	0,187 1	0,971	0,170 3	0,972	0,167 3
24 1-Penteno	0,938	0,249 0	0,949	0,225 8	0,952	0,219 1
25 Propadieno	0,980	0,141 4	0,983	0,130 4	0,984	0,126 5
26 1,2-Butadieno	0,955	0,212 1	0,963	0,192 4	0,965	0,187 1
27 1,3-Butadieno	0,966	0,184 4	0,971	0,170 3	0,973	0,164 3
28 Acetileno	0,991	0,094 9	0,993	0,083 7	0,993	0,083 7
29 Ciclopentano	0,935	0,255 0	0,947	0,230 2	0,950	0,223 6
30 Metilciclopentano	0,902	0,313 0	0,921	0,281 1	0,927	0,270 2
31 Etilciclopentano	0,841	0,398 7	0,876	0,352 1	0,885	0,339 1
32 Ciclohexano	0,897	0,320 9	0,918	0,286 4	0,924	0,275 7
33 Metilciclohexano	0,855	0,380 8	0,886	0,337 6	0,894	0,325 6
34 Etilciclohexano	0,770	0,479 6	0,824	0,419 5	0,838	0,402 5
35 Benceno	0,909	0,301 7	0,926	0,272 0	0,936	0,253 0
36 Tolueno	0,849	0,388 6	0,883	0,342 1	0,892	0,328 6
37 Etilbenceno	0,764	0,485 8	0,823	0,420 7	0,837	0,403 7
38 o-Xileno	0,737	0,512 8	0,804	0,442 7	0,821	0,423 1
39 Metanol	0,773	0,476 4	0,872	0,357 8	0,892	0,328 6
40 Metanotiol	0,972	0,167 3	0,977	0,151 7	0,978	0,148 3
41 Hidrógeno	1,000 6	-0,004 0	1,000 6	-0,004 8	1,000 6	-0,005 1
42 Agua	0,930	0,264 6	0,945	0,234 5	0,952	0,219 1
43 Sulfuro de hidrógeno	0,990	0,100 0	0,990	0,100 0	0,990	0,100 0
44 Amoniaco	0,985	0,122 5	0,988	0,109 5	0,989	0,104 9
45 Cianuro de hidrógeno	0,887	0,336 2	0,912	0,296 6	0,920	0,282 8
46 Monóxido de carbono	0,999 3	0,026 5	0,999 5	0,022 4	0,999 6	0,020 0
47 Sulfuro de carbonilo	0,985	0,122 5	0,987	0,114 0	0,988	0,109 5
48 Disulfuro de carbono	0,954	0,214 5	0,962	0,194 9	0,965	0,187 1
49 Helio	1,000 5	0,000 6	1,000 5	0,000 2	1,000 5	0,000 0
50 Neón	1,000 5	0,000 6	1,000 5	0,000 2	1,000 5	0,000 0
51 Argón	0,999 0	0,031 6	0,999 2	0,028 3	0,999 3	0,026 5
52 Nitrógeno	0,999 5	0,022 4	0,999 7	0,017 3	0,999 7	0,017 3
53 Oxígeno	0,999 0	0,031 6	0,999 2	0,028 3	0,999 3	0,026 5
54 Dióxido de carbono	0,999 3	0,081 9	0,994 4	0,074 8	0,994 7	0,072 8
55 Dióxido de azufre	0,976	0,154 9	0,979	0,144 9	0,980	0,141 4
Aire	0,999 41	-	0,999 58	-	0,999 63	-

Tabla 5 - Poder calorífico de los componentes de los gases naturales, en varias condiciones de referencia medidas y de combustión para el gas ideal sobre base volumétrica

Todos los valores se han obtenido multiplicando el valor de \bar{H} correspondiente de tabla 3 por la fracción $p_2/R T_2$.

Componente	Poder calorífico ideal sobre base volumétrica, \bar{H}^0 (MJ · m ⁻³)											
	15/15°C		0/0°C		15/0°C		25/0°C		20/20°C		25/20°C	
	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
1 Metano	37,706	33,948	39,840	35,818	39,777	35,812	39,735	35,808	37,044	33,367	37,024	33,365
2 Etano	66,07	60,43	69,79	63,75	69,69	63,75	69,63	63,74	64,91	59,39	64,88	59,39
3 Propano	93,94	86,42	99,22	91,18	99,09	91,16	99,01	91,15	92,99	84,94	96,25	84,93
4 n-Butano	121,79	112,40	128,66	118,81	128,48	118,57	128,37	118,56	119,66	110,47	119,62	110,47
5 2-Metilpropano	121,40	112,01	128,23	118,18	128,07	118,16	127,96	118,15	119,28	110,09	119,23	110,08
6 n-Pentano	149,66	138,38	158,07	146,00	157,87	145,98	157,75	145,96	147,04	136,01	146,99	136,01
7 2-Metilbutano	149,36	138,09	157,76	145,59	157,57	145,67	157,44	145,66	146,76	135,72	146,70	135,72
8 2,2-Dimetilpropano	148,76	137,49	157,12	145,05	156,93	145,04	156,80	145,02	146,16	135,13	146,11	135,13
9 n-Hexano	177,55	164,40	187,53	173,35	187,30	173,43	187,16	173,41	174,45	161,59	174,39	161,58
10 2-Metilpentano	177,23	164,08	187,19	173,11	186,96	173,09	186,82	173,07	174,14	161,27	174,07	161,26
11 3-Metilpentano	177,34	164,19	187,30	173,23	187,08	173,20	186,93	173,19	174,25	161,38	174,18	161,37
12 2,2-Dimetilbutano	176,82	163,66	186,75	172,67	186,53	172,65	186,38	172,63	173,73	160,86	173,66	160,86
13 2,3-Dimetilbutano	177,15	163,99	187,10	173,02	186,87	173,00	186,73	172,98	174,05	161,19	173,99	161,18
14 n-Heptano	205,42	190,39	216,96	200,87	216,70	200,84	216,53	200,82	201,84	187,13	201,76	187,12
15 n-Octano	233,28	216,37	246,38	228,26	246,10	228,25	245,91	228,23	229,22	212,67	229,13	212,66
16 n-Nonano	261,19	242,40	275,85	255,74	275,53	255,71	275,32	255,69	256,64	238,25	256,54	238,24
17 n-Decano	289,06	268,39	305,29	283,16	304,94	283,13	304,71	283,11	284,03	263,80	283,92	263,79
18 Etileno	59,72	55,96	63,06	59,04	63,00	59,04	62,96	59,03	58,68	55,01	58,66	55,00
19 Propileno	87,10	81,46	91,98	85,94	91,88	85,93	91,82	85,93	85,58	80,07	85,55	80,06
20 1-Buteno	114,98	107,46	121,42	113,38	121,29	113,36	121,21	113,36	112,98	105,63	112,94	105,62
21 cis-2-Buteno	114,69	107,18	121,12	113,08	120,99	113,06	120,91	113,05	112,70	105,34	112,66	105,34
22 trans-2-Buteno	114,54	107,02	120,96	112,91	120,83	112,90	120,75	112,89	112,55	105,19	112,51	105,19
23 2-Metilpropeno	114,27	106,76	120,67	112,63	120,55	112,62	120,47	112,61	112,29	104,93	112,25	104,93
24 1-Penteno	142,85	133,46	150,88	140,80	150,70	140,79	150,59	140,77	140,37	131,18	140,32	131,17
25 Propadieno	82,21	78,46	86,79	82,76	86,73	82,76	86,69	82,76	80,79	77,12	80,78	77,12
26 1,2-Butadieno	109,75	104,12	116,57	109,84	115,78	109,83	115,72	109,83	107,85	102,34	107,83	102,34
27 1,3-Butadieno	107,51	101,87	113,51	107,47	113,42	107,47	113,36	107,46	105,65	100,13	105,62	100,13

(Continúa)

Tabla 5 - Poder calorífico de los componentes de los gases naturales, en varias condiciones de referencia medidas y de combustión para el gas ideal sobre base volumétrica

(Continúa)

ANEXO C

"Variables de entrada"
 {V_dot_mw_e=1
 T_mw_e=2
 m_dot_a=3
 T_g=4
 T_a=5
 V_dot_g=6
 P_mw_e=7
 CO=8
 CO2=9}
 T_a=25
 m_dot_a=18,19
 T_r=20
 "parámetros modelo"
 "perdidas de carga"
 Z_do=37
 Z_bba=30
 Z_mdc=0
 Z_mr=37
 D_mdc=0,39
 D_mr1=0,038
 D_mr2=0,39
 {delta_H_bba=4}
 P_bba=2700000
 g=9,8
 f_do_bba=0,013
 f_mdc=0,013
 f_mr1=0,0285
 f_mr2=0,013
 L_do_bba=12
 L_mdc=32
 L_mr2=25
 L_mr1=8
 K_codo=2,5
 K_entrada=0,5
 K_salida=0,5
 delta_H_bba=200
 "combustion"
 a_est=0,325
 e=0,2
 "humos"
 epsilon_h=0,15
 r_ext=0,021
 r_int=0,019
 sigma=0,0000000567
 k_ac=16
 h_h=3
 h_mw=22000
 h_air=3



"ecuaciones de energía"

"Perdidas de carga"

"Bernoulli domo-bomba"

$$B_{do} + \Delta H_{bba} = B_{bba} + \Delta \text{pérdidas}_{do_bba}$$

$$B_{do} = P_{do} / \gamma_{do} + c_{do}^2 / (2g) + Z_{do}$$

$$B_{bba} = P_{bba} / \gamma_{bba} + c_{bba}^2 / (2g) + Z_{bba}$$

$$\Delta \text{pérdidas}_{do_bba} = (f_{do_bba} * L_{do_bba} / D_{mdc} + k_{codo} * 2 + 2 * k_{salida} + k_{entrada}) * c_{do_bba}^2 / (2g)$$

$$c_{do} = 0$$

$$c_{bba} = V_{dot_mw_e} / (A_{mdc})$$

$$c_{do_bba} = c_{bba} / 2$$

$$A_{mdc} = \pi * D_{mdc}^2 / 4$$

$$\gamma_{do} = \rho_w * g$$

$$\gamma_{bba} = \rho_w * g$$

$$\rho_w = \rho_w$$

$$\rho_w = \text{density}(\text{water}; P = P_{bba}; T = T_{mw_e})$$

"bernoulli bomba downcomer"

$$B_{bba} = B_{mdc} + \Delta \text{pérdidas}_{bba_mdc}$$

$$B_{mdc} = P_{mw_e} / \gamma_{mdc} + c_{mdc}^2 / (2g) + Z_{mdc}$$

$$\Delta \text{pérdidas}_{bba_mdc} = (f_{mdc} * L_{mdc} / D_{mdc} + k_{codo} * 9) * c_{mdc}^2 / (2g)$$

$$c_{bba} = c_{mdc}$$

$$\gamma_{mdc} = \rho_w * g$$

$$\rho_w = \rho_w$$

"bernoulli movil downcomer raiser"

$$B_{mdc} = B_{mr} + \Delta \text{perdidas}_{mdc_mr}$$

$$\Delta \text{perdidas}_{mdc_mr} = (2 * k_{entrada} + 2 * k_{salida} + f_{mr1} * L_{mr1} / D_{mr1}) * c_{mr1}^2 / (2g) + (k_{entrada} + f_{mr2} * L_{mr2} / D_{mr2}) * c_{mr2}^2 / (2g)$$

$$B_{mr} = P_{mw_s} / (\gamma_{mr}) + c_{mr}^2 / (2g) + Z_{mr}$$

$$c_{mr1} = V_{dot_mw_e}^2 / (A_{mr1} * 222)$$

$$c_{mr2} = c_{bba}$$

$$A_{mr1} = \pi * D_{mr1}^2 / 4$$

$$A_{mr2} = \pi * D_{mr2}^2 / 4$$

$$\gamma_{mr} = \rho_w * g$$

$$\rho_w = \text{density}(\text{water}; x = 0; P = P_{do})$$

"Ecuaciones cámara de combustión"

"Balance químico cámara de combustión"

"Combustible Acería"



$$C_{CO} + C_{CO_2} = X_{CO_2} + X_{CO} \quad \text{"Carbono"}$$

$$C_{CO} + C_{CO_2} * 2 + a_{est} * (1+e) * 2 = X_{CO_2} * 2 + X_{O_2} * 2 + X_{CO} \quad \text{"Oxígeno"}$$

$$a_{est} * (1+e) * 3,76 * 2 = X_{N_2} * 2 \quad \text{"Nitrogeno"}$$

$$X_{CO} = 0,15$$

"cámara adiabática"

$$V_{dot_g} * PCI * 1000000 * 0,9 + Q_{dot_g} + Q_{dot_a} = Q_{dot_h_ad}$$

$$Q_{dot_g} = m_{dot_CO_g} (h_{CO_g} - h_{CO_r}) + m_{dot_CO_2_g} (h_{CO_2_g} - h_{CO_2_r})$$

$$Q_{dot_a} = m_{dot_a} (h_a - h_{ar})$$

$$Q_{dot_h_ad} = m_{dot_CO} (h_{CO_ad} - h_{CO_r}) + m_{dot_CO_2} (h_{CO_2_ad} - h_{CO_2_r}) + m_{dot_O_2} (h_{O_2_ad} - h_{O_2_r}) + m_{dot_N_2} (h_{N_2_ad} - h_{N_2_r})$$

"flujos másicos"

$m_{\dot{g}} = m_{\dot{CO}_2} + m_{\dot{CO}}$
 $m_{\dot{CO}_2} = V_{\dot{CO}_2} \cdot \rho_{CO_2}$
 $m_{\dot{CO}} = V_{\dot{CO}} \cdot \rho_{CO}$
 $m_{\dot{h}} = m_{\dot{g}} + m_{\dot{a}}$
 $m_{\dot{CO}} = y_{CO} \cdot m_{\dot{h}}$
 $m_{\dot{CO}_2} = y_{CO_2} \cdot m_{\dot{h}}$
 $m_{\dot{O}_2} = y_{O_2} \cdot m_{\dot{h}}$
 $m_{\dot{N}_2} = y_{N_2} \cdot m_{\dot{h}}$

"porcentaje volumétrico"

$C_{CO} \cdot MM_{CO} = M_{CO_g}$
 $C_{CO_2} \cdot MM_{CO_2} = M_{CO_2_g}$
 $MM_{CO} = \text{MolarMass}(CO)$
 $MM_{CO_2} = \text{MolarMass}(CO_2)$
 $MM_{O_2} = \text{MolarMass}(O_2)$
 $MM_{N_2} = \text{MolarMass}(N_2)$
 $V_{CO_g} = M_{CO_g} / \rho_{CO}$
 $V_{CO_2_g} = M_{CO_2_g} / \rho_{CO_2}$
 $V_{total_g} = V_{CO_g} + V_{CO_2_g}$
 $C_{vol_{CO}} = V_{CO_g} / V_{total_g}$
 $C_{vol_{CO_2}} = V_{CO_2_g} / V_{total_g}$
 $V_{\dot{CO}} = C_{vol_{CO}} \cdot V_{\dot{g}}$
 $V_{\dot{CO}_2} = C_{vol_{CO_2}} \cdot V_{\dot{g}}$



$X_{CO} \cdot MM_{CO} = M_{CO}$
 $X_{CO_2} \cdot MM_{CO_2} = M_{CO_2}$
 $X_{O_2} \cdot MM_{O_2} = M_{O_2}$
 $X_{N_2} \cdot MM_{N_2} = M_{N_2}$
 $M_{total} = M_{CO} + M_{CO_2} + M_{O_2} + M_{N_2}$
 $y_{CO} = M_{CO} / M_{total}$
 $y_{CO_2} = M_{CO_2} / M_{total}$
 $y_{O_2} = M_{O_2} / M_{total}$
 $y_{N_2} = M_{N_2} / M_{total}$

"densidades"

$\rho_{CO} = \text{density}(CO; T=20; P=101325)$
 $\rho_{CO_2} = \text{density}(CO_2; T=20; P=101325)$
 $\rho_{N_2} = \text{density}(N_2; T=20; P=101325)$
 $\rho_{O_2} = \text{density}(O_2; T=20; P=101325)$

"entalpías"

$h_{CO_r} = \text{enthalpy}(CO; T=T_r)$
 $h_{CO_2_r} = \text{enthalpy}(CO_2; T=T_r)$
 $h_{O_2_r} = \text{enthalpy}(O_2; T=T_r)$
 $h_{N_2_r} = \text{enthalpy}(N_2; T=T_r)$
 $h_{CO_g} = \text{enthalpy}(CO; T=T_g)$
 $h_{CO_2_g} = \text{enthalpy}(CO_2; T=T_g)$
 $h_{CO_{ad}} = \text{enthalpy}(CO; T=T_{h_{ad}})$
 $h_{CO_2_{ad}} = \text{enthalpy}(CO_2; T=T_{h_{ad}})$
 $h_{O_2_{ad}} = \text{enthalpy}(O_2; T=T_{h_{ad}})$
 $h_{N_2_{ad}} = \text{enthalpy}(N_2; T=T_{h_{ad}})$
 $h_a = \text{enthalpy}(\text{air}; T=T_a)$
 $h_{ar} = \text{enthalpy}(\text{air}; T=T_r)$

```

-----
"intercambiador de calor"
"balance de energía"
Q_dot_h_ad-Q_dot_mw-Q_dot_amb=Q_dot_mh
Q_dot_mw=Q_dot_mw_s-Q_dot_mw_e
Q_dot_mw_e=m_dot_mw_e*h_mw_e
Q_dot_mw_s=m_dot_mw_e*h_mw_s
Q_dot_mh=m_dot_CO*(h_CO_mh-h_CO_r)+m_dot_CO2*(h_CO2_mh-h_CO2_r)+m_dot_O2*(h_O2_mh-
h_O2_r)+m_dot_N2*(h_N2_mh-h_N2_r)

"entalpías"
h_mw_s=enthalpy(water;T=T_mw_s;P=P_mw_s)
h_mw_e=enthalpy(water;T=T_mw_e;P=P_mw_e)
h_CO_mh=enthalpy(CO;T=T_mh)
h_CO2_mh=enthalpy(CO2;T=T_mh)
h_O2_mh=enthalpy(O2;T=T_mh)
h_N2_mh=enthalpy(N2;T=T_mh)

"flujo masico"
m_dot_mw_e=V_dot_mw_e*rho_mw_e*2

"transferencia de calor"
Q_dot_mh_th=sigma*epsilon_h*n_t*A_t*((T_mh_m+273)^4-(T_th+273)^4)+n_t*h_h*A_t*(T_mh_m-T_th)
Q_dot_th_mw=n_t*A_t*k_ac/(r_ext*ln(r_ext/r_int))*(T_th-T_mw_m)+n_t*r_int/r_ext*h_mw*A_t*(T_th-T_mw_m)
Q_dot_mh_th=-Q_dot_mh+Q_dot_h_ad
Q_dot_mh_th=Q_dot_th_mw
Q_dot_amb=n_t*A_t*h_air*r_ext/r_int*(T_mw_m-T_a)
h_h*(T_e-T_mh)+sigma*epsilon_h*((T_e+273)^4-(T_mh+273)^4)-0,1*sigma*epsilon_t*((T_mh+273)^4-
(T_th+273)^4)=0

epsilon_t=0,9
error=abs(T_e-T_mh)/T_e*100
A_t=(pi*r_ext^7)
n_t=222
T_mw_m=(T_mw_s+T_mw_e)/2
T_mh_m=(T_h_ad+T_mh)/2

-----
{"Variables de entrada"
V_dot_fw_e=1
T_fw_e=2
m_dot_h=6
P_fw_e=7
CO=8
CO2=9
V_dot_d=1}
P_d=500000
T_d=20

"parámetros modelo"
"perdidas de carga"

```

Z_fdc=10
 Z_fr=37
 D_fdc=0,39
 D_fr1=0,0635
 D_fr2=0,39
 f_fdc=0,013
 f_fr1=0,0285
 f_fr2=0,013
 L_fdc=30
 L_fr2=6
 L_fr1=27

"humos"

r_f_ext=0,0635
 r_f_int=0,0595
 h_fw=22000000000

"ecuaciones de energía"

"Perdidas de carga"

"Bernoulli domo-bomba"

B_domo=B_fdc+delta_pérdidas_do_fdc
 B_domo=P_domo/gamma_do+c_do^2/(2*g)+Z_do
 B_fdc=P_fw_e/gamma_fdc+c_fdc^2/(2*g)+Z_fdc
 delta_pérdidas_do_fdc=(f_fdc*L_fdc/D_fdc+2*k_salida+k_entrada+k_codo*5)*c_do_fdc^2/(2*g)
 c_fdc=V_dot_fw_e/(A_fdc)
 c_do_fdc=c_fdc/2
 A_fdc=pi*D_fdc^2/4
 gamma_fdc=rho_w_fdc*g
 rho_fw_e=rho_w_fdc
 rho_w_fdc=density(water; P=P_bba; T=T_mw_e)
 m_dot_fw_e^2=V_dot_fw_e*rho_fw_e

"bernoulli movil downcomer raiser"

B_fdc=B_fr+delta_perdidas_fdc_fr
 delta_perdidas_fdc_fr=(2*k_entrada+2*k_salida+f_fr1*L_fr1/D_fr1)*c_fr1^2/(2*g)+(k_entrada+f_fr2*L_fr2/D_fr2)*
 c_fr2^2/(2*g)
 B_fr=P_fw_s/(gamma_fr)+c_fr1^2/(2*g)+Z_fr
 c_fr1=V_dot_fw_e^2/(A_fr1*144)
 c_fr2=V_dot_fw_e^2/(A_fr2*2)
 A_fr1=pi*D_fr1^2/4
 A_fr2=pi*D_fr2^2/4
 gamma_fr=rho_fw_s*g
 rho_fw_s=density(water;x=0; P=P_do)

"balance de energía"

Q_dot_mh-Q_dot_fw-Q_dot_amb_2-Q_dot_d=Q_dot_fh
 Q_dot_fw=Q_dot_fw_s-Q_dot_fw_e
 Q_dot_fw_e=m_dot_fw_e*h_fw_e
 Q_dot_fw_s=m_dot_fw_e*h_fw_s
 Q_dot_d=m_dot_d*(h_d_s-h_d_e)
 Q_dot_amb_2=0
 Q_dot_fh=m_dot_CO*(h_CO_fh-h_CO_r)+m_dot_CO2*(h_CO2_fh-h_CO2_r)+m_dot_O2*(h_O2_fh-
 h_O2_r)+m_dot_N2*(h_N2_fh-h_N2_r)

"entalpía"

```

h_CO_fh=enthalpy(CO;T=T_fh)
h_CO2_fh=enthalpy(CO2;T=T_fh)
h_O2_fh=enthalpy(O2;T=T_fh)
h_N2_fh=enthalpy(N2;T=T_fh)
h_d_s=enthalpy(water;T=T_fh;P=101325)
h_d_e=enthalpy(water;T=T_d;P=P_d)
h_fw_s=enthalpy(water;T=T_fw_s;P=P_mw_s)
h_fw_e=enthalpy(water;T=T_fw_e;P=P_mw_e)
m_dot_d=V_dot_d*rho_d
rho_d=density(water;T=T_d;P=P_d)
"transferencia de calor"
Q_dot_fh_th=sigma*epsilon_h*n_f_t*A_f_t*((T_fh_m+273)^4-(T_f_th+273)^4)+n_f_t*h_h*A_f_t*(T_fh_m-T_f_th)
Q_dot_th_fw=n_f_t*A_f_t*k_ac/(r_f_ext*ln(r_f_ext/r_f_int))*(T_f_th-
T_fw_m)+n_f_t*r_f_int/r_f_ext*h_fw*A_f_t*(T_f_th-T_fw_m)
Q_dot_fh_th=-Q_dot_fh+Q_dot_mh
Q_dot_fh_th=Q_dot_th_fw

A_f_t=(pi*r_f_ext*30)
n_f_t=144
T_fw_m=(T_fw_s+T_fw_e)/2
T_fh_m=(T_mh+T_fh)/2

```



ANEXO D

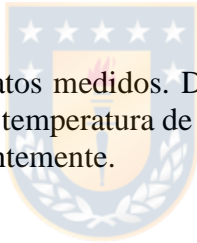
Mediciones Termografías

A continuación, se muestra la tabla con la termografías tomada a distintas alturas de la campana, durante intervalos de tiempo de 1 minuto, durante los 15 minutos de soplado.

Temperatura Termográficas		Temperatura Termográficas		Temperatura Termográficas		Temperatura Termográficas	
Posicion	T[°C]	Posicion	T[°C]	Posicion	T[°C]	Posicion	T[°C]
Inicio C. Fija	147,5	Nivel Duchas	153	Nivel 4to	145,4	Nivel 5to	155,8
	165		162		166,3		167,4
	181		180		182,7		186,9
	188		193		191,1		201
	198		203,5		201,3		210,2
	204,5		207,5		206,5		211,1
	207		212		208,4		214,2
	208		212		208,8		213,2
	212,5		220		212,8		220,5
	214,5		220		214,3		219,8
	212		217		211		215,2
	213		220		211,5		218,2
	205,5		215,5		201,7		212,5
	193		204,5		186,7		199,8
	193		202,5		185,8		198,6

Mediciones Campana móvil

A continuación, se tiene la tabla con los datos medidos. Donde se tiene instante de tiempo donde fue medido, la temperatura de entrada del agua, temperatura de salida del agua, flujo volumétrico del agua y temperatura exterior del tubo, correspondientemente.



Tiempo	T entrada [°C]	T salida [°C]	V agua [m3/s]	Texterior
0:30	176,6	176,8	0,24	166,6
1:00	178,5	182	0,25	168,5
1:30	181	184	0,25	171
2:00	184,1	189,5	0,25	174,1
2:30	188,3	193,8	0,25	178,3
3:00	192,6	198,3	0,25	182,6
3:30	197,1	202,4	0,25	187,1
4:00	201,6	206,2	0,25	191,6
4:30	205,5	209,7	0,25	195,5
5:00	208,7	212,5	0,26	198,7
5:30	210,9	214,3	0,26	200,9
6:00	212,4	215,4	0,26	202,4
6:30	213,7	216,4	0,26	203,7
7:00	214,7	217,4	0,26	204,7
7:30	215,5	218,5	0,26	205,5
8:00	216,2	219,5	0,25	206,2
8:30	216,8	220,3	0,25	206,8
9:00	217,3	220,6	0,24	207,3
9:30	217,6	220,9	0,24	207,6
10:00	217,8	221,2	0,24	207,8
10:30	217,2	220,6	0,24	207,2
11:00	215,3	218	0,24	205,3
11:30	213,2	216	0,23	203,2
12:00	210,9	213,4	0,23	200,9
12:30	208,6	210	0,23	198,6
13:00	207,3	207,9	0,24	197,3
13:30	205,1	206,4	0,25	195,1
14:00	203,1	205	0,25	193,1
14:30	201,9	203,8	0,26	191,9
15:00	200,3	202,8	0,25	190,3

Mediciones Campana fija

A continuación, se muestra la tabla con los datos medidos. Donde se tiene instante de tiempo donde fue medido, flujo volumétrico de las duchas, temperatura de salida de los gases, flujo y temperatura exterior del tubo, correspondientemente.

Tiempo	Flujo duchas [m3/s]	T salida gases [°C]	Texterior [°C]
0:30	0	113	149,5
1:00	0	376	151,9
1:30	0	380	154,3
2:00	0	381	157,2
2:30	0,004567	461	160,6
3:00	0,006666	810	164,1
3:30	0,006595	780	168,4
4:00	0,006386	895	172,8
4:30	0,006411	956	177,4
5:00	0,006361	981	181,7
5:30	0,006102	950	185,9
6:00	0,006028	922	189,8
6:30	0,005972	966	193,1
7:00	0,005938	999	196
7:30	0,005795	1020	198,2
8:00	0,005927	1005	200,3
8:30	0,005967	1002	202
9:00	0,005828	968	203,7
9:30	0,005779	929	205
10:00	0,005934	875	205,8
10:30	0,005846	815	205,8
11:00	0,005998	817	206
11:30	0,005996	850	206,4
12:00	0,005877	861	206,5
12:30	0,005826	726	205,4
13:00	0,005918	772	202,7
13:30	0,00586	765	200,3
14:00	0,005877	697	196,6
14:30	0,004414	605	193,9
15:00	0	305	191,8

Experiencias realizadas en terreno

Gases

Diferencia de gases

Mediciones realizadas para identificar la diferencia de temperatura de los entre los extremos de la campana, durante intervalos de tiempo de 30 segundos.

Diferencia de gases				Diferencia de gases			
29-11-2018	12:00:00	57,7	97,7	29-11-2018	12:52:00	90,2	85,2
29-11-2018	12:00:30	65,2	99,1	29-11-2018	12:52:30	89,2	83,2
29-11-2018	12:01:00	139,9	246,5	29-11-2018	12:53:00	140,7	165
29-11-2018	12:01:30	284	437,1	29-11-2018	12:53:30	269,4	343,7
29-11-2018	12:02:00	348,3	513,3	29-11-2018	12:54:00	355,9	431
29-11-2018	12:02:30	367,7	525,7	29-11-2018	12:54:30	398,1	438,7
29-11-2018	12:03:00	408,1	563,7	29-11-2018	12:55:00	413,3	442,9
29-11-2018	12:03:30	454,4	630,6	29-11-2018	12:55:30	474,6	528,8
29-11-2018	12:04:00	532,4	786,1	29-11-2018	12:56:00	558	659,8
29-11-2018	12:04:30	634,4	908,8	29-11-2018	12:56:30	658,5	809,2
29-11-2018	12:05:00	708,1	965,7	29-11-2018	12:57:00	719,3	900,5
29-11-2018	12:05:30	763,6	995,3	29-11-2018	12:57:30	771,5	961,5
29-11-2018	12:06:00	819,4	1013,9	29-11-2018	12:58:00	840,4	1000,1
29-11-2018	12:06:30	865,3	1013,6	29-11-2018	12:58:30	922,2	1020,8
29-11-2018	12:07:00	910,7	1024,8	29-11-2018	12:59:00	928,7	1033,4
29-11-2018	12:07:30	937	1031,5	29-11-2018	12:59:30	952,5	1037,8
29-11-2018	12:08:00	946,2	1032,3	29-11-2018	13:00:00	987,9	1046,9
29-11-2018	12:08:30	978,2	1030,3	29-11-2018	13:00:30	1027,9	1061,3
29-11-2018	12:09:00	981,3	1035,8	29-11-2018	13:01:00	1102,8	1093
29-11-2018	12:09:30	996,9	1038,8	29-11-2018	13:01:30	1121,6	1103,3
29-11-2018	12:10:00	1020,4	1047,1	29-11-2018	13:02:00	1112	1098
29-11-2018	12:10:30	1031,5	1050,6	29-11-2018	13:02:30	1091,9	1086,8
29-11-2018	12:11:00	1067,1	1065,7	29-11-2018	13:03:00	1034,7	1057,1
29-11-2018	12:11:30	1073,8	1069	29-11-2018	13:03:30	996,5	1039,6
29-11-2018	12:12:00	975,6	1023,8	29-11-2018	13:04:00	961,2	1024,2
29-11-2018	12:12:30	814,3	840,4	29-11-2018	13:04:30	910,2	998,6
29-11-2018	12:13:00	760,2	831,2	29-11-2018	13:05:00	758,9	886,2
29-11-2018	12:13:01	757,3	829,8	29-11-2018	13:05:01	751,4	875,6
29-11-2018	12:13:30	686	732,2	29-11-2018	13:05:30	626,4	693,9
29-11-2018	12:14:00	578,9	577,3	29-11-2018	13:06:00	542,3	571,3
29-11-2018	12:14:30	478,3	456,2	29-11-2018	13:06:30	438,8	462,8
29-11-2018	12:15:00	360,1	363,7	29-11-2018	13:07:00	353,2	377,5
29-11-2018	12:15:30	288,6	295,2	29-11-2018	13:07:30	268,1	302,5
29-11-2018	12:16:00	242,5	244,2	29-11-2018	13:08:00	223,8	248,1
29-11-2018	12:16:30	202,4	207,6	29-11-2018	13:08:30	190,4	199,7
29-11-2018	12:16:59	167,7	180,2	29-11-2018	13:08:59	157	167,5

Perfil Radial

Mediciones tomadas para la formación del perfil del punto C, durante intervalos de tiempo de 30 segundos.

Tiempo	Temperatura	Posicion radial
0	132,6	0,55
0,5	213,6	0,55
1	277,2	0,55
1,5	363,6	0,55
2	450,7	0,55
2,5	511,7	0,55
3	576,4	0,55
3,5	641,1	0,55
4	704,8	0,55
4,5	778,9	0,55
5	828,3	0,55
5,5	851,8	0,55
6	855,5	0,55
6,5	865,4	0,55
7	883,1	0,55
7,5	894,4	0,55
8	890,1	0,55
8,5	886	0,55
9	880,2	0,55
9,5	867,1	0,55
10	846,9	0,55
10,5	787,7	0,55
11	698,3	0,55
11,5	626,1	0,55
12	574	0,55
12,5	518,6	0,55
13	472,6	0,55
13,5	425,4	0,55
14	383,5	0,55
14,5	370,2	0,55
0	184,2	1

0,5	245,8	1
1	322,3	1
1,5	396,7	1
2	466,4	1
2,5	537,4	1
3	608,7	1
3,5	686,3	1
4	766,3	1
4,5	834,9	1
5	891,3	1
5,5	926,9	1
6	938,4	1
6,5	948,5	1
7	951,3	1
7,5	934,7	1
8	907	1
8,5	881,7	1
9	829,3	1
9,5	757,5	1
10	661,9	1
10,5	580,3	1
11	512,7	1
11,5	467,3	1
12	433,5	1
12,5	403,1	1
13	375	1
13,5	348,8	1
14	324,8	1
14,5	303,2	1
0	174,9	1,45
0,5	250,2	1,45
1	342,2	1,45
1,5	453,3	1,45
2	584,8	1,45
2,5	715,1	1,45
3	804,9	1,45

3,5	866,3	1,45
4	901,7	1,45
4,5	931,3	1,45
5	950,4	1,45
5,5	965,8	1,45
6	975,4	1,45
6,5	977,7	1,45
7	973,8	1,45
7,5	963,1	1,45
8	944,9	1,45
8,5	868,5	1,45
9	752,3	1,45
9,5	627	1,45
10	538,1	1,45
10,5	485,6	1,45
11	467,8	1,45
11,5	436,7	1,45
12	385,8	1,45
12,5	342,2	1,45
13	306,2	1,45
13,5	277,3	1,45
14	253,7	1,45
14,5	234	1,45
0	126,6	1,9
0,5	304	1,9
1	476,9	1,9
1,5	469	1,9
2	640	1,9
2,5	780	1,9
3	860	1,9
3,5	904,7	1,9
4	959,5	1,9
4,5	982,5	1,9
5	998	1,9
5,5	1007	1,9
6	1009	1,9

6,5	1006	1,9
7	998,1	1,9
7,5	957,4	1,9
8	946,8	1,9
8,5	828,2	1,9
9	793,4	1,9
9,5	738,1	1,9
10	642,3	1,9
10,5	553,5	1,9
11	472,8	1,9
11,5	422	1,9
12	379,1	1,9
12,5	345,7	1,9
13	317,2	1,9
13,5	293	1,9
14	271,1	1,9
14,5	252,8	1,9
0	201,7	2,35
0,5	286,8	2,35
1	375,8	2,35
1,5	481,4	2,35
2	608,5	2,35
2,5	734	2,35
3	839,1	2,35
3,5	901,3	2,35
4	939,7	2,35
4,5	981,3	2,35
5	968,1	2,35
5,5	946,3	2,35
6	960,7	2,35
6,5	960,4	2,35
7	962,6	2,35
7,5	948,4	2,35
8	931,5	2,35
8,5	869,9	2,35
9	753,3	2,35

9,5	629	2,35
10	529,8	2,35
10,5	509,8	2,35
11	503,4	2,35
11,5	467,1	2,35
12	449,6	2,35
12,5	410,5	2,35
13	341,9	2,35
13,5	313	2,35
14	289,4	2,35
14,5	269,7	2,35
0	211	2,8
0,5	282,4	2,8
1	355,9	2,8
1,5	424,8	2,8
2	490,1	2,8
2,5	556,3	2,8
3	642,9	2,8
3,5	721,3	2,8
4	804,3	2,8
4,5	884,9	2,8
5	909	2,8
5,5	907,4	2,8
6	923,7	2,8
6,5	931,2	2,8
7	940,1	2,8
7,5	920	2,8
8	893,6	2,8
8,5	883,1	2,8
9	830,3	2,8
9,5	759,5	2,8
10	653,6	2,8
10,5	604,5	2,8
11	548,3	2,8
11,5	497,7	2,8
12	497,3	2,8

12,5	471,4	2,8
13	410,7	2,8
13,5	384,5	2,8
14	360,5	2,8
14,5	338,9	2,8
0	159,4	3,25
0,5	250,2	3,25
1	310,8	3,25
1,5	391,7	3,25
2	474,4	3,25
2,5	530,6	3,25
3	610,6	3,25
3,5	676,1	3,25
4	742,8	3,25
4,5	828,9	3,25
5	846	3,25
5,5	832,3	3,25
6	840,8	3,25
6,5	848,1	3,25
7	871,9	3,25
7,5	879,7	3,25
8	876,7	3,25
8,5	887,4	3,25
9	881,2	3,25
9,5	869,1	3,25
10	838,6	3,25
10,5	811,9	3,25
11	733,9	3,25
11,5	656,5	3,25
12	637,8	3,25
12,5	586,9	3,25
13	508,3	3,25
13,5	461,1	3,25
14	419,2	3,25
14,5	405,9	3,25

Perfil a lo largo

Temperaturas promedio a lo largo de campana, obtenidas de la proyección de perfil de temperatura a través de la campana fija.

Altura	Temperatura	Tiempo
0	268	0
0	520	0,5
0	1060	1
0	1320	1,5
0	1501	2
0	1633	2,5
0	1682	3
0	1695	3,5
0	1690	4
0	1674	4,5
0	1672	5
0	1665	5,5
0	1662	6
0	1664	6,5
0	1670	7
0	1670	7,5
0	1672	8
0	1672	8,5
0	1665	9
0	1659	9,5
0	1658	10
0	1643	10,5
0	1584	11
0	1595	11,5
0	1622	12
0	1553	12,5
0	1390	13
0	1216	13,5
0	1066	14
0	897	14,5
10	240,2	0
10	350,3	0,5
10	818,4	1
10	1049	1,5
10	1205	2
10	1323	2,5

10	1379	3
10	1389	3,5
10	1384	4
10	1370	4,5
10	1366	5
10	1356	5,5
10	1358	6
10	1360	6,5
10	1367	7
10	1367	7,5
10	1366	8
10	1369	8,5
10	1360	9
10	1354	9,5
10	1355	10
10	1327	10,5
10	1277	11
10	1300	11,5
10	1315	12
10	1222	12,5
10	1049	13
10	880,1	13,5
10	735,9	14
10	615,4	14,5
25	170	0
25	262	0,5
25	352	1
25	426	1,5
25	531	2
25	624	2,5
25	706	3
25	771	3,5
25	831	4
25	889	4,5
25	913	5
25	920	5,5
25	929	6
25	934	6,5
25	940	7
25	928	7,5

25	913	8
25	872	8,5
25	817	9
25	750	9,5
25	673	10
25	619	10,5
25	562	11
25	510	11,5
25	480	12
25	440	12,5
25	390	13
25	358	13,5
25	329	14
25	311	14,5
35	135	0
35	158	0,5
35	242	1
35	419	1,5
35	766	2
35	814	2,5
35	861	3
35	923	3,5
35	952	4
35	922	4,5
35	922	5
35	981	5,5
35	1018	6
35	1044	6,5
35	1032	7
35	1022	7,5
35	1004	8
35	955	8,5
35	904	9
35	849	9,5
35	818	10
35	807	10,5
35	815	11
35	677	11,5
35	698	12
35	704	12,5

35	653	13
35	561	13,5
35	403	14
35	305	14,5

Mediciones Agua refrigerante

Datos de temperatura y presión del agua medidos para distintos tipos de grados de acero.

Agua

Grado 284

29-11-2018 11:04

Medición	Entrada	Salida	Entrada Domo	T1-3er inicio	T2-3er curv	T3-3er Duch	T4-3er Dps D	T5 4to	T6 5to	T7 5to fin
	Presión [Bar]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
0 (00:00)	800000	500000	500000	160,2	164	165,9	167,3	162,2	167,7	166,6
1 (00:30)	800000	500000	500000	162,2	166,5	167,1	167	161,8	167,7	168,8
2 (01:00)	850000	500000	500000	164,4	169,7	169,4	169,3	163,4	169,1	170,1
3 (01:30)	900000	600000	500000	167,4	174	171,3	171,1	166,2	172	172,4
4 (02:00)	900000	600000	500000	170,7	176,4	175,5	175,8	169,9	176,5	176,4
5 (02:30)	935000	650000	500000	173,9	180,5	180,6	181,2	174,1	180,7	180,6
6 (03:00)	990000	750000	500000	177,8	185,3	185,2	186,1	178,5	185,1	184,9
7 (03:30)	1100000	800000	600000	181,9	190,1	189,5	190	183,3	189,5	189,4
8 (04:00)	1180000	1000000	700000	186,2	194,8	194,4	194,8	188	193,8	193,8
9 (04:30)	1300000	1100000	800000	190,4	199,4	198,7	199,6	192,8	198,1	198,1
10 (05:00)	1450000	1200000	1000000	194,4	203,8	203,2	204,3	197,6	202,2	202,3
11 (05:30)	1600000	1400000	1200000	198,3	207,5	207	208,4	202,1	205,9	206
12 (06:00)	1780000	1550000	1400000	201,7	210,7	210,4	211,4	205,8	208,9	209
13 (06:30)	1890000	1650000	1600000	204,7	213,2	212,6	213,4	208,6	210,9	211,1
14 (07:00)	2000000	1800000	1800000	207,1	214,6	214	214,5	210,5	212,1	212,2
15 (07:30)	2100000	1900000	1900000	209	215,8	215,1	215,4	212	213,2	213,2
16 (08:00)	2200000	2000000	2000000	210,6	216,7	216	216,2	213,1	214	213,9
17 (08:30)	2200000	2000000	2000000	211,9	217,5	216,9	216,9	214,1	214,8	214,6
18 (09:00)	2200000	2000000	2000000	213,1	218,4	217,6	217,6	215	215,5	215,3
19 (09:30)	2250000	2000000	2000000	214,2	219	218,1	218,1	215,7	216	215,9
20 (10:00)	2300000	2100000	2100000	215	219,2	218,3	218,2	216	216,2	216
21 (10:30)	2340000	2100000	2100000	215,4	218,5	217,5	217,2	215,7	215,3	215
22 (11:00)	2380000	2150000	2100000	215,1	217,6	216,9	216,5	215,1	214,6	214,1
23 (11:30)	2400000	2150000	2150000	214,8	217,1	216,4	215,9	214,6	214	213,6
24 (12:00)	2280000	2050000	2050000	213,6	214,6	214,8	214,5	213,6	212,8	212,2
25 (12:30)	2150000	2000000	2000000	211,1	210,5	211,5	211,1	211	210,6	210,3
26 (13:00)	2160000	1950000	1900000	208,7	206,9	207	206,9	207,6	208	208,3
27 (13:30)	2080000	1900000	1800000	205,9	201,9	203,4	204,6	205,5	206,8	206,5
28 (14:00)	2000000	1800000	1700000	203,3	199,5	200,6	201,7	204	205,6	205,1
29 (14:30)	1950000	1800000	1700000	201,4	198,1	199,9	201,2	202,7	204,4	203,7
30 (15:00)	1880000	1750000	1700000	200	196,9	199,6	201,8	201,2	203,2	202,3
31 (15:30)	1840000	1700000	1600000	198,5	195,8	197,9	201,9	199,7	202	200
32 (16:00)	1770000	1650000	1600000	196,8	194,4	196,2	201,2	198,6	200,2	198,8

Grado 247

29/11/18 13:02

Medición	Entrada	Salida	Entrada Domo	T1-3er inicio	T2-3er curv	T3-3er Duch	T4-3er Dps D
	Presión [Bar]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
0 (00:00)	900000	650000	500000	165	169,5	165,7	168,1
1 (00:30)	1000000	650000	500000	167,9	173,4	169,1	172,2
2 (01:00)	1000000	750000	500000	171,1	177,8	173,7	175,8
3 (01:30)	1000000	800000	500000	174,4	181,7	178,8	179,8
4 (02:00)	1090000	850000	600000	178,5	186,5	183,9	184,5
5 (02:30)	1100000	900000	600000	182,5	191	189,5	190
6 (03:00)	1150000	950000	600000	187,1	196,1	194,8	195,6
7 (03:30)	1200000	1000000	700000	191,4	201,1	200,3	201,3
8 (04:00)	1380000	1100000	800000	196,1	206,2	205,6	206,9
9 (04:30)	1500000	1200000	1000000	200,8	210,5	209,7	210,9
10 (05:00)	1700000	1400000	1200000	204,4	213,8	212,8	213,7
11 (05:30)	1850000	1600000	1400000	207,6	215,6	214,4	215
12 (06:00)	2000000	1750000	1600000	209,7	216,6	215,4	215,7
13 (06:30)	2130000	1970000	1800000	211,5	217,7	216,6	216,7
14 (07:00)	2200000	2000000	2000000	213,1	218,5	217,4	217,5
15 (07:30)	2200000	2050000	2000000	214,3	219	218	218
16 (08:00)	2200000	2050000	2000000	215,3	219,6	218,5	218,4
17 (08:30)	2250000	2100000	2000000	216,1	220	219	218,9
18 (09:00)	2300000	2100000	2100000	216,8	220,1	219,2	219
19 (09:30)	2300000	2100000	2100000	217,2	220,2	219,2	219
20 (10:00)	2300000	2100000	2100000	217,2	219,2	218,3	217,9
21 (10:30)	2300000	2150000	2100000	216,4	217,6	217,1	216,6
22 (11:00)	2300000	2150000	2100000	215,3	216,2	216,2	215,6
23 (11:30)	2300000	2150000	2100000	212,7	211,7	212,8	212,5
24 (12:00)	2200000	2100000	2100000	210	208,3	209,1	208,3
25 (12:30)	2150000	2000000	2000000	207,8	202,6	202,3	204,2
26 (13:00)	2100000	1950000	2000000	204,4	197,5	197,9	200
27 (13:30)	2050000	1900000	1900000	203,8	198,8	200	201,6
28 (14:00)	2000000	1800000	1800000	203,1	199,3	201	202
29 (14:30)	1900000	1750000	1700000	200,4	193,8	199,5	199,7
30 (15:00)	1850000	1700000	1700000	196,5	191,8	195,1	197,8
31 (15:30)	1800000	1650000	1600000	194,5	193	193,5	196,2
32 (16:00)	1750000	1600000	1600000	193,1	193,8	194,1	194,7

Grado 247

30/11/2018

11:04

Medición	Entrada	Salida	Entrada Domo	Promedio	T1-3er inicio	T2-3er curv	T3-3er Duch	T4-3er Dps Duch	T5 4to	T6 5to	T7 5to fin
	Presión [Bar]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
0 (00:00)	800000	500000	500000	650000	159,5	165,3	161,4	162,6	158,1	163,1	163,7
1 (00:30)	900000	600000	500000	750000	161,9	168,9	166,8	166,5	162,3	166,9	167,3
2 (01:00)	900000	600000	550000	750000	164,3	171,9	171,3	170,1	166,5	171	171,1
3 (01:30)	900000	600000	550000	750000	167,2	174,4	175,5	174	171,1	175	175,1
4 (02:00)	950000	650000	600000	800000	170,6	178,4	179,7	178,5	175,7	179,5	179,6
5 (02:30)	1050000	700000	680000	875000	174,1	183,1	184,6	183,2	180,5	184	184,2
6 (03:00)	1100000	800000	750000	950000	178,4	188,8	189,4	188,2	185,2	188,4	188,5
7 (03:30)	1200000	950000	850000	1075000	182,8	193,3	193,6	192,4	189,3	192,3	192,5
8 (04:00)	1350000	1050000	950000	1200000	187,4	197,6	197,5	196,8	193,3	196,4	196,4
9 (04:30)	1480000	1150000	1050000	1315000	191,7	201,6	201,4	201,2	197,3	200,4	200,6
10 (05:00)	1570000	1250000	1200000	1410000	195,9	205,8	205,5	205,8	201,3	204,1	204,5
11 (05:30)	1700000	1400000	1300000	1550000	199,8	209,2	209	209,5	205,1	207,4	207,8
12 (06:00)	1830000	1550000	1500000	1690000	203,1	212,2	211,9	212,3	208,1	210	210,5
13 (06:30)	1940000	1650000	1600000	1795000	206	214,3	213,8	214,1	210,5	211,8	212,1
14 (07:00)	2080000	1800000	1750000	1940000	208,2	215,8	215,3	215,4	212,2	213,1	213,4
15 (07:30)	2170000	1900000	1850000	2035000	210,3	217,2	216,6	216,6	213,8	214,4	214,6
16 (08:00)	2200000	2000000	2000000	2100000	212	218,4	217,7	217,7	215,1	215,5	215,8
17 (08:30)	2270000	2000000	2000000	2135000	213,7	219,4	218,6	218,5	216,1	216,4	216,6
18 (09:00)	2280000	2050000	2020000	2165000	215	220,1	219,2	219,1	216,9	217	217,1
19 (09:30)	2300000	2100000	2050000	2200000	215,8	219,5	218,6	218,4	216,7	216,2	216,1
20 (10:00)	2350000	2150000	2100000	2250000	215,8	218,6	218,1	217,7	216,3	215,7	215,4
21 (10:30)	2380000	2150000	2150000	2265000	216	219,1	218,5	218,2	216,6	216,1	216
22 (11:00)	2300000	2150000	2150000	2225000	216,4	219,4	218,6	218,3	216,7	216,2	216
23 (11:30)	2180000	2100000	2100000	2140000	216,5	218,7	217,9	217,5	216,2	215,3	215,1
24 (12:00)	2300000	2100000	2000000	2200000	215,4	216,3	216,4	215,9	215,1	213,7	213,3
25 (12:30)	2300000	2100000	2100000	2200000	212,7	212,2	213,2	212,7	212,4	211,5	211,2
26 (13:00)	2120000	2100000	2100000	2110000	210,3	208,1	208,3	208,1	209	209,1	209,3
27 (13:30)	2140000	2000000	2000000	2070000	206,6	202,4	204,8	205,7	207,1	207,7	207,5
28 (14:00)	2060000	1950000	2000000	2005000	203,9	200,8	203,4	204,2	205,7	206,3	205,8
29 (14:30)	2000000	1750000	1900000	1875000	201,8	199,6	201,3	201,3	204,5	205,2	204,4
30 (15:00)	1950000	1700000	1800000	1825000	200,1	198,3	199,3	199,2	203,3	203,9	203,2
31 (15:30)	1880000	1650000	1750000	1765000	198,7	197,5	197,8	198,4	201,8	202,3	201,8
32 (16:00)	1860000	1650000	1700000	1755000	197,9	197,9	196,9	198,5	200,5	200,8	200,4

Grado 287
12/12/2018 10:27

Medición	Promedio	Entrada	Salida	Entrada Domc	T1-3er inicio	T2-3er curv	T3-3er Duch	T4-3er Dps D	T5 4to	T6 5to	T7 5to fin
	[Pa]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	Presión [Bar]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]	T[°C]
0 (00:00)	950000	1100000	800000	900000	171,9	171	174,2	176,1	171,1	176,2	174,8
1 (00:30)	950000	1100000	800000	1100000	174,5	173,6	176,9	179,8	172,5	177,2	174,9
2 (01:00)	1030000	1160000	900000	1200000	176,6	176,6	178	182,1	174,5	179,4	178,7
3 (01:30)	1075000	1200000	950000	1300000	178,5	181,2	182,4	185,4	178,4	183,1	182,1
4 (02:00)	1115000	1230000	1000000	1500000	181	185	186,1	187,9	182,3	186,4	186
5 (02:30)	1125000	1250000	1000000	1700000	184,1	189,6	190,6	192,1	186	190,5	190,3
6 (03:00)	1140000	1280000	1000000	1900000	188,3	194,7	195,6	197,1	190	195,2	195
7 (03:30)	1185000	1320000	1050000	2000000	192,6	199,9	201	202	194,9	200,2	200,2
8 (04:00)	1270000	1440000	1100000	2100000	197,1	205,1	206,6	206,8	200,2	205,1	205,2
9 (04:30)	1390000	1530000	1250000	2100000	201,6	209,8	211,3	211,3	205,1	209,2	209,4
10 (05:00)	1540000	1680000	1400000	2000000	205,5	213,3	214,5	214,6	208,8	212,2	212,4
11 (05:30)	1700000	1850000	1550000	2100000	208,7	215,2	216,1	216,7	211,5	213,8	214
12 (06:00)	1880000	2010000	1750000	2100000	210,9	216,1	216,6	217,5	212,9	214,5	214,5
13 (06:30)	2060000	2170000	1950000	2100000	212,4	217	217,3	218,3	214,1	215,2	215,2
14 (07:00)	2095000	2240000	1950000	2100000	213,7	217,8	218	219	215,1	215,9	215,8
15 (07:30)	2190000	2280000	2100000	2100000	214,7	218,3	218,4	219,4	215,8	216,3	216,1
16 (08:00)	2185000	2270000	2100000	2100000	215,5	218,7	218,7	219,8	216,3	216,7	216,5
17 (08:30)	2185000	2270000	2100000	2100000	216,2	219	219	220,1	216,7	217	216,8
18 (09:00)	2185000	2270000	2100000	2100000	216,8	219,3	219,2	220,4	217,1	217,3	217
19 (09:30)	2200000	2300000	2100000	2100000	217,3	219,5	219,4	220,5	217,3	217,4	217,1
20 (10:00)	2210000	2320000	2100000	2100000	217,6	219,5	219,4	220,5	217,4	217,4	217,1
21 (10:30)	2245000	2340000	2150000	2100000	217,8	219,1	218,9	220,1	217,3	217,1	216,7
22 (11:00)	2245000	2340000	2150000	1800000	217,2	217,7	217,3	218,5	216,2	215,4	215
23 (11:30)	2245000	2340000	2150000	1700000	215,3	215,6	215,1	215,5	214,6	213,4	212,7
24 (12:00)	2230000	2340000	2120000	1700000	213,2	212,3	211,1	212,3	211,7	211,4	211
25 (12:30)	2200000	2300000	2100000	1600000	210,9	211,4	208,9	210,8	208,1	208,1	208,7
26 (13:00)	2125000	2200000	2050000	1600000	208,6	206,8	206,3	208,4	204,8	205,6	206,2
27 (13:30)	2015000	2080000	1950000	1600000	207,3	204,9	204,3	206,2	201,8	203,8	203,7
28 (14:00)	1955000	2060000	1850000	1500000	205,1	203,6	202,8	205,5	198,8	200,4	200,8
29 (14:30)	1865000	1980000	1750000	1500000	203,1	201,5	201,3	204,1	196,6	198,4	198,4
30 (15:00)	1820000	1940000	1700000	1500000	201,9	199,5	199,8	201	194,7	198	197,3
31 (15:30)	1765000	1880000	1650000	1500000	200,3	198	198,4	196,4	194,1	198,2	196,8
32 (16:00)	1745000	1840000	1650000	1500000	197,9	197,2	197,4	195,2	194,5	198,3	197,2

ANEXO E

Circuito de salida de bomba entrada campana móvil y pérdidas de cargas obtenidas desde [39]

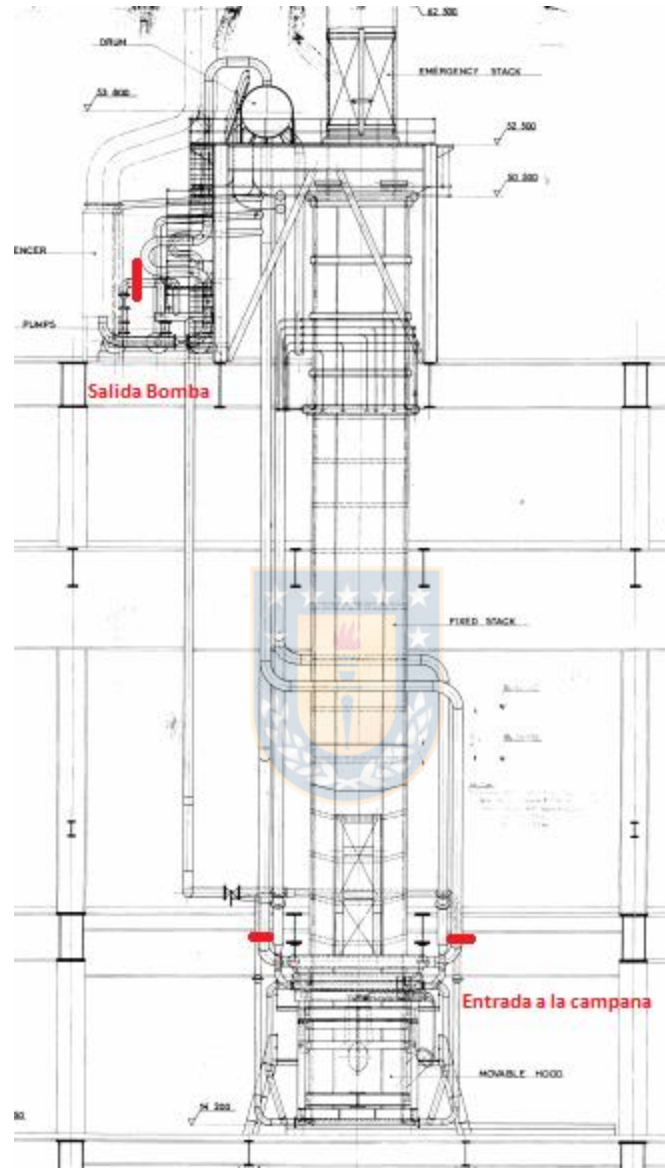


Figura E-1: Geometría de conductos

Tabla E-1. Coeficiente de pérdidas de cargas

Coeficiente de pérdida de carga	Valor
k_{salida}	0,5
$k_{entrada}$	0,5
k_{codo}	2,5
$f_{0,1}$	0,013

ANEXO F

Características de material a utilizar en el PCM [12]

Tabla F-1. Característica de los materiales.

Material	Comp. (mol%)	T_{mp} (K)	ΔH_1 (kJ/mol)	M (g/mol)	ΔH_2 (KJ/kg)	Density (kg/m ³)	ΔH_3 (kJ/m ³)	Price* [¥kg]	ΔH_4 (kJ¥)	K (W/m k)
Ag	–	1235	113	108.0	104.6	10500	1.10	22,600	0.005	377
NaF	–	1269	–	42.0	796.0	2780	2.21	40,000	0.020	–
MgF ₂ - NaF	64–36	1273	–	55.0	794.0	3017	2.40	15,000	0.053	–
KF- MgF ₂	31–69	1281	–	61.0	710.0	2943	2.09	20,000	0.036	–
Au	–	1337	12.7	197.0	64.5	19300	1.24	10,000,000	0.000	272
Sm	–	1345	8.6	150.0	57.5	7700	0.44	2,500,000	0.000	–
Cu	–	1357	13.3	63.5	209.4	8930	1.87	255	0.821	354
Na ₂ O	–	1405	–	62.0	770.0	2390	1.84	–	–	–
MgF ₂ - MgO	91.5–8.5	1502	–	60.4	922.0	3187	2.94	12,000	0.077	–
Mn	–	1517	14.6	55.0	265.5	7420	1.97	170	1.561	8
MgF ₂	–	1536	–	62.3	942.0	3150	2.97	11,200	0.084	–
Be	–	1560	15.8	9.0	1754.4	1840	3.23	2,200,000	0.001	200
Gd	–	1585	10.1	157.0	64.0	7870	0.50	2,500,000	0.000	–
Si	–	1685	39.6	28.0	1414.3	2340	3.31	6000	0.236	148
Co	–	1767	17.2	59.0	291.5	8800	2.57	6900	0.042	99