



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS DE DATOS ESPECTRALES PARA
ESTIMACIÓN DE TEMPERATURA,
IDENTIFICACIÓN DE ACRECIONES Y
CORRELACIÓN CON DINÁMICA DE VARIABLES
DE PROCESO EN HORNO FLASH**

Por: Franco Rivas Paredes

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción
para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la Ingeniería
Mención en Ingeniería Eléctrica

Enero 2024

Concepción, Chile

Profesor Guía: Sergio Torres Inostroza

© 2023, Franco Rivas Paredes

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

AGRADECIMIENTOS

A mis amorosos padres, por su apoyo incondicional y a todos quienes aportaron a la desafiante misión de instalar sondas de medición espectral en un horno flash, compañeros de laboratorio, compañeros de RS2M, profesores de la universidad y especialmente al equipo de operaciones del horno flash de Atlantic copper, quienes apoyaron en todo momento este proyecto. Y gracias a quienes han abierto las puertas de la industria a la innovación y búsqueda de nuevas formas de hacer mejor las cosas.

Resumen

La industria del cobre y en especial la pirometalurgia del cobre, esta pasando por procesos de cambio, ligados a las nuevas condiciones operacionales, tanto por normas ambientales, como por razones económicas que ejercen presión en la producción industrial. Es por estos que se abren oportunidades a la innovación, en búsqueda de formas de abordar el presente y futuro de las fundiciones de cobre. En este trabajo se plantea el análisis de datos espectrales en el rango espectral VIS NIR (500 a 1000 nm), obtenidos desde 2 sondas ubicadas en el horno flash de la fundición Atlantic Copper en Huelva, España. El fin de estos análisis es estimar temperatura, identificar la formación de acreciones en los quemadores y estudiar la correlación entre datos radiométricos y variables de proceso.

Desde los resultados de esta tesis se valida la utilidad de los datos radiométricos medidos, para estimación de temperatura, identificar los fenómenos de acrecion, y se permitió estudiar la relación entre las variables de proceso del horno y los datos espectrales medidos de él.

Keywords – Espectrometría, Temperatura, Cobre

Índice general

AGRADECIMIENTOS	I
Resumen	II
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Problema y oportunidad	3
1.3. Estado del arte	4
1.3.1. Mediciones espectrales	4
1.3.2. Mediciones de temperatura basadas en radiometría	6
1.3.3. Discusión	7
1.4. Hipótesis	8
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo General	8
1.5.2. Objetivos Específicos	9
1.6. Publicaciones asociadas	9
1.6.1. Copper concentrate dual-band joint classification using reflectance hyperspectral images in the VIS-NIR and SWIR bands	9
1.6.2. Radiometric Methods for High Temperature Flame Estimation: Robustness Analysis and Application to an Industrial Flash Smelting Furnace	12
2. Marco Teórico	14
2.1. Análisis espectral de emisión	14
2.1.1. Ley de Kirchoff	15
2.1.2. Conservación de la energía espectral	15
2.2. Métodos de calculo de temperatura espectrales	16
2.2.1. Ley de Planck	16
2.2.2. Método de dos longitudes de onda	17
2.3. Combustión Flash	19
2.3.1. Proceso de combustión flash por Outokumpu	21
2.3.2. Reacciones químicas en un horno flash de concentrado de cobre	23

3. Metodología	25
3.1. Adquisición de datos	26
3.2. Procesamiento de los datos	30
3.2.1. Base de datos espectrales	30
3.2.2. Calibración de datos espectrales.	31
3.2.3. Calculo de temperatura	33
3.2.3.1. Método de dos longitudes de onda	33
3.2.4. Identificación de acreciones	35
3.2.5. Análisis de correlación de datos espectrales y datos de Operación	36
4. Resultados	39
4.1. Estimación de Temperatura	41
4.1.1. Implementación Método de Dos Longitudes de Onda	41
4.2. Análisis formación de acreciones	55
4.3. Análisis correlación datos espectrales y datos de proceso	60
5. Conclusiones y Comentarios	71
5.1. Cálculos de temperatura	71
5.2. Análisis de formación de acreciones	71
5.3. Análisis correlación datos espectrales y datos de proceso	72
5.4. Conclusión General	72
Referencias	74
Apéndices	77
A. Información espectrómetro CCS 175	77

Índice de cuadros

4.1.1.Tabla de reporte media diaria Quemador Central	50
4.1.2.Tabla de reporte media diaria Quemador auxiliar	50
4.1.3.Reporte de la temperatura media para la sonda lateral	54
4.1.4.Reporte de la temperatura media para la sonda del quemador central	55
4.2.1.Tabla de reporte de la dinámica de formación de acreciones quemador central del 17 al 23 de julio de 2023.	60
4.3.1.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 17 de julio de 2023	65
4.3.2.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 18 de julio de 2023	66
4.3.3.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 19 de julio de 2023	67
4.3.4.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 20 de julio de 2023	68
4.3.5.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 21 de julio de 2023	69
4.3.6.Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 22 de julio de 2023	70
A0.1.Características técnicas espectrómetro CCS 175	78

Índice de figuras

1.3.1.Fotografía monitoreo temperatura desde sala de control Fundición HVL, Paipote, por parte del equipo de RS2M	8
1.6.1.Esquema de sistema experimental de medición hiperespectral basado en dos cámaras. Se destacan los dos desplazadores usados, el modelo Zaver X-LRT (desplazamiento en un solo eje) y modelo OES AT (desplazamiento en 3 ejes), además de lentes, cámaras y computador	10
1.6.2.Geometría del formato de pellet usado para las mediciones de las mezclas de concentrado.	11
1.6.3.Esquema de conectividad de implementación de sistema de medición espectral en horno Flash de la fundición Atlantic Copper. Se separan la parte del diseño que abarca los elementos que están dentro de la fundición y los que corresponden a la universidad.	12
2.1.1.Conservación de la energía espectral	16
2.3.1.Esquema general Horno Flash. Destacando las zonas de salida de gases, el quemador central, reposador y cámara de reacción	20
2.3.2.Esquema quemador de concentrado Horno Flash de Outokumpu. Se destaca la entrada del aire y el aire enriquecido con oxígeno los flujos de concentrado	23
2.3.3.Gráfica del comportamiento de la bornita a diferentes presiones, para su relación Delta G vs Temperatura	24
3.0.1.Plano de sección transversal de un Horno flash en donde se destacan las posiciones de los sistemas de medición. Zona quemador central y quemador auxiliar	26
3.1.1.Esquema de sonda portadora de fibra óptica utilizada en ambos puntos de medición. En su parte superior se encuentra entrada de aire de refrigeración y en su parte inferior se encuentra un cabezal extraíble que incorpora una ventana de zafiro, que protege la entrada de la fibra.	27
3.1.2.Fotografía del interior del gabinete aldaño a zona de quemador central, a donde llegan las fibras ópticas. Como dispositivos principales se encuentran 2 radiómetros, sistema de extinción USB, sistema de respaldo de energía y sistema de enfriamiento.	28

3.1.3.Espectrómetro VIS NIR CCS175, Thorlabs.	29
3.1.4.Esquema, de la disposición del sistema de medición, desatanca las 4 partes fundamentales, sonda, fibras, espectrómetros en gabinete de terreno y computador.	29
3.2.1.Eficiencia Cuántica sensor de espectrómetro CCS75, destaca su buena respuesta en el rango VIS NIR.	32
3.2.2.Curva de distribución de potencia de lampara SLS 202, de Thorlabs.	34
3.2.3.Ejemplos de visión el quemador central. Imagen izquierda: Corresponde a la etapa de formación de la acrecion , en donde aun la irradiancia media no baja el umbral. Imagen central: Corresponde a un momento donde la irradiancia media bajo el umbral, se ha formado la acrecion. Imagen derecha : corresponde a un instante en donde la acrecion ya se limpio y se tiene toda la visión.	35
4.0.1.Ejemplo de espectro calibrado. En la imagen izquierda. Ejemplo espectro raw, antes de aplicar procedimiento de calibración. Datos Sonda quemador central de concentrado	40
4.0.2.Ejemplo de espectro calibrado. En la imagen izquierda. Ejemplo espectro raw, antes de aplicar procedimiento de calibración. Datos Sonda quemador auxiliar	40
4.1.1.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 17 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	42
4.1.2.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 18 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	43
4.1.3.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 19 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	44
4.1.4.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 20 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	45
4.1.5.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 21 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	46
4.1.6.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 22 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	47
4.1.7.Muestra de 18 espectros de emisividad para el 23 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central	48
4.1.8.Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 17 de julio de 2023	51
4.1.9.Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 18 de julio de 2023	51

4.1.10	Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 19 de julio de 2023	52
4.1.11	Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 20 de julio de 2023	52
4.1.12	Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 21 de julio de 2023	53
4.1.13	Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 22 de julio de 2023	53
4.1.14	Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 23 de julio de 2023	54
4.2.1.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 17 de julio de 2023	56
4.2.2.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 18 de julio de 2023	56
4.2.3.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 19 de julio de 2023	57
4.2.4.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 20 de julio de 2023	57
4.2.5.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 21 de julio de 2023	58
4.2.6.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 22 de julio de 2023	58
4.2.7.	Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 23 de julio de 2023	59
4.3.1.	Gráficos paralelos de las medias diarias de coeficiente de oxígeno y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023	61
4.3.2.	Gráficos paralelos de las medias diarias de flujo de aire y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023	62
4.3.3.	Gráficos paralelos de las medias diarias de flujo de concentrado o liga y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023	62
4.3.4.	Gráficos paralelos de alimentación de concentrado, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda lateral, para el 22	63
4.3.5.	Gráficos paralelos de inyección de aire, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22	63
4.3.6.	Gráficos paralelos de enroquecimiento de oxígeno, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22	64
4.3.7.	Gráficos paralelos de coeficiente de oxígeno, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22	64
A0.1.	Fotografía espectrometro Thorlabs CCS 175	77

Capítulo 1

Introducción

La obtención de cobre metálico a partir de minerales sulfurados de cobre ocurre mediante reacciones químicas a altas temperaturas, en varias etapas, con el fin de separar el cobre del resto de elementos, estos procesos se enmarcan dentro de la pirometalurgia del cobre. Las fundiciones de cobre son las encargadas de tratar los concentrados de cobre (mezcla de minerales en forma de polvo fino, provenientes de la etapa previa de concentración), que inician con alrededor de 28 % de Cu, hasta llegar a cobre anódico con un 99.6 % de Cu, al final de la línea de producción. Las técnicas de procesamiento son variadas y se identifican según los tipos de reactores que se utilizan en cada una de las etapas del proceso.

La primera etapa en el tratamiento de concentrados, corresponde a la fusión, en donde se pueden distinguir dos tipos de reactores. Por un lado se tienen los reactores de baño, los cuales llevan el concentrado a temperaturas de alrededor de 1250 °C, lo cual los funde y genera una piscina líquida en la cual se inyectan, directamente al interior por medio de toberas, gases para lograr reacciones que separen elementos de interés de los no deseados. Generalmente este tipo de hornos entrega un producto intermedio llamado metal blanco, el cual posee un 74 % de Cu aproximadamente y que pasa a la siguiente etapa, además se genera escoria y gases de salida, que arrastran elementos no deseados, como azufre y hierro. Por otro lado, se tienen los reactores de tipo Horno Flash, más modernos y amigables con el medio, que utilizan una cámara de reacción en donde se inyecta concentrado y gases, generando una reacción exotérmica que logra altas temperaturas formando

una llama, que funde y separa el metal útil de la escoria y gases, las fases fundidas caen a una zona de acumulación en donde por diferencia de densidad se separa la escoria de la fase útil que en este tipo de hornos es llamada mata o eje que posee alrededor de 64% de Cu.

1.1. Motivación

La pirometalurgia como técnica de procesamiento de metales a altas temperaturas, se aplica al tratamiento de varios metales, como el caso de la industria del hierro, la cual representa un gran aporte económico mundial, lo que la hace atractiva para la innovación y perfeccionamiento constante. Esto contrasta con la situación que se tiene en el tratamiento de otros metales, como en el caso de la pirometalurgia del cobre que se lleva a cabo en fundiciones, las cuales son mucho menos participativas del mercado global, en comparación, por lo que resultan poco atractivas a la innovación y desarrollo de nuevas tecnologías, como lo discute [Arias et al. \(2020\)](#). Los actuales procesos de fundición aun dependen en gran medida de la experiencia de los operadores y están sujetas a seguir sus procesos mediante análisis químicos discretos en el tiempo, que no permiten un monitoreo en línea de las reacciones en el interior de los reactores. Por otro lado, factores tan relevantes como la temperatura, son medidos con muestras puntuales mediante el uso de termocuplas. Por lo anterior es que esta industria ofrece la oportunidad de innovar en métodos e instrumentación, para el mejor monitoreo de las reacciones, apuntando a realizar seguimiento en línea y al desarrollo de indicadores que aporten a la operación de los reactores y del proceso general.

Las tecnologías de sensores ópticos y en particular la espectrometría de emisión en el rango visible e infrarrojo cercano (VIS NIR), resultan ser aplicables a los procesos pirometalúrgicos, ya que estas técnicas permiten tanto mediciones de temperatura como identificación de reacciones específicas, en tiempo real, [Yañez et al. \(2018\)](#). La utilización de estas tecnologías en la industria de las fundiciones de cobre presenta desafíos en cuanto al diseño de los sensores y el estudio de las variables de interés a las que se desea apuntar, desde el punto de vista del proceso metalúrgico. Las condiciones hostiles en las cuales se operan los reactores (altas

temperaturas, polvo, presión...etc), sumado a lo reciente de la implementación de nuevas tecnologías en esta industria, son factores que se deben tomar en cuenta a la hora de pensar en instrumentación dedicada a estos procesos.

En esta tesis, se presenta el análisis de datos espectrales obtenidos desde sistemas de medición ubicados en el interior de un horno flash. En el marco del proyecto de transferencia tecnológica entre la Universidad de Concepción y la fundición Atlantic Copper de Huelva en España. Se instalaron dos sistemas de medición basados en sondas de monitoreo en el horno flash de esta fundición, estas sondas tienen accesos óptico en dos posiciones de quemadores del reactor, Figura 3.0.1 y consisten en un sistema optoelectrónico, que mediante una fibra óptica protegida, que conecta a un espectrómetro VIS NIR (500 nm – 1000 nm), captura información espectral que es emitida de las reacciones que ocurren en el interior del reactor. En base a la información espectral que se obtiene desde las sondas, se plantea realizar la estimación del perfil de temperatura en las zonas de instalación, identificación de la formación de acreciones (fenómeno de acumulación de material en los bordes del quemador que obstruye la salida de gases) y estudiar la correlación entre estos datos radiométricos y la dinámica de las variables de proceso de la operación del horno flash.

1.2. Problema y oportunidad

Los desafíos actuales a los que se enfrentan las fundiciones de cobre radican en el cumplimiento de normas ambientales, cada vez más estrictas en países occidentales y en el aumento en la complejidad de los minerales que se tratan, ya que la ley o porcentaje de cobre presente baja y la demanda de cobre metálico no disminuye, por lo que la industria de ve forzada a tratar mayores volúmenes en nuevas condiciones de operación, como lo discute Pérez et al. (2021). Es por esto que una de las principales adversidades operacionales a las que se enfrentan las fundiciones, es el control de sus procesos, apuntando a una operación que optimice recursos, sea amigable con el medioambiente y que sea resiliente ante los cambios en los minerales, como afirma Navarra et al. (2020).

Es en el contexto anterior que se presenta una oportunidad de investigación

para el desarrollo de instrumentación moderna, que aporte al monitoreo en línea dentro de las fundiciones de cobre, ayudando a seguir en tiempo real los procesos, permitiendo realizar control con una mejor respuesta, que con los métodos actuales. Es por esto que los sensores ópticos surgen como una alternativa para el desarrollo de sistemas de medición que vallan en la línea de abordar los desafíos presentes y futuros de la pirometalurgia del cobre. [Devia et al. \(2019\)](#), expone la realidad en las funciones chilenas, en donde se deja claro que los avances tecnológicos en el área y los desafíos ambientales han llevado a la búsqueda de alternativas más eficientes y productivas en la fundición y conversión de cobre. Nuevos desarrollos, principalmente originados en universidades, están emergiendo para mejorar la eficiencia y productividad.

1.3. Estado del arte

1.3.1. Mediciones espectrales

Las mediciones espectrales o espectrometría en el rango visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético infrarrojo (VIS NIR) es una técnica analítica que mide la interacción de la luz con la materia en las regiones del espectro electromagnético visible (aproximadamente de 400 a 700 nm) y el infrarrojo cercano (aproximadamente de 700 a 2500 nm). En específico la espectroscopia de emisión en la región VIS NIR es una técnica de análisis espectroscópico que se basa en la medición de la radiación emitida por una muestra u objeto en estudio, en el rango espectral de interés. Como regla general para todo los rangos estudiados por la espectrometría, las emisiones específicas en longitudes de onda puntuales se deben a transiciones electrónicas a nivel atómico y molecular, estas transiciones electrónicas están sujetas a reglas de selección que determinan qué transiciones son permitidas. Esto se traduce en patrones específicos de líneas espectrales para cada elemento, llamados espectros de emisión, los cuales son únicos para cada elemento o molécula debido a su configuración electrónica particular. En el caso de moléculas, las bandas espectrales pueden ser más anchas y complejas debido a las transiciones vibracionales y rotacionales adicionales. Debido a lo descrito, las técnicas de espectrometría han sido ampliamente utilizadas en diversos campos.

Clough et al. (2023), expone una revisión contemporánea del uso de las técnicas de espectrometría en procesos ligados a la industria de los metales e investigación de materiales. En lo que respecta a los metales ferrosos, se hace notar que estos han mostrado ser un área popular de investigación, empleando una variedad de métodos espectrométricos analíticos en las aplicaciones reportadas en el artículo. En cuanto a los metales no ferrosos y sus aleaciones, como lo expone Kuptsov et al. (2021), la situación es similar a la de los metales ferrosos, destacándose la espectrometría de ruptura inducida por láser (LIBS) como la técnica más popular entre los investigadores, además de las técnicas de emisión atómica.

Los párrafos anteriores respaldan la idea de que las técnicas de análisis espectral, en toda sus variantes, han sido y siguen siendo una herramienta importante para la instrumentación en las industrias que involucran procesos químicos, más aun en las dedicadas a los metales, como lo hacen Mohammed (2018) y Manzo et al. (2020), quienes presentan estudios sobre el uso de la espectroscopia infrarroja (IR) para caracterizar la composición de muestras preparadas de magnetita y hematita, minerales de importancia en la industria ferrosa, así como Schlegel et al. (1979), quien ya estudiada las propiedades ópticas de la magnetita en los 80's.

Esta tesis plantea la aplicación de sensores radiómetros a la industria de la pirometalurgia del cobre, analizando datos obtenidos de un entorno industrial real de operación de un horno flash. La factibilidad de este sistema de medición se basa en los estudios previos realizados a nivel de laboratorio, realizados en la Universidad de Concepción, mediante la cooperación entre el Departamento de Ingeniería Eléctrica y el Departamento de Metalurgia. Los trabajos de Reyes et al. (2021), Marín et al. (2019), Arias et al. (2018) y Toro et al. (2020), realizados en reactores de tipo 'drop tube', que simulan las condiciones de las reacciones llevadas a cabo al interior de los Hornos de Combustión Flash, ponen en estudio las características espectrales de emisión, como la emisividad y temperatura, al reaccionar diferentes minerales de cobre y minerales asociados a procesos del cobre, que comúnmente se encuentran en Chile, como la calcopirita y pirita, además de analizar la detección de la formación de óxidos de cobre, reacción que es fundamental en la pirometalurgia de este metal, los autores anteriores coinciden en la oportunidad de investigar sobre la aplicación de sensores ópticos en

instrumentación para procesos de altas temperaturas, y lo desafiante que resulta su evaluación en un ambiente de operación industrial. Otro estudio reciente de la aplicación de la espectrometría de emisión, fue llevado a cabo por [Castillo et al. \(2023\)](#) quien, realiza un estudio de la temperatura local y global de llamas de hidrocarburos, con la utilización de imagen y captación espectral puntual.

1.3.2. Mediciones de temperatura basadas en radiometría

La radiación es uno de los mecanismos que tiene el calor para ser transmitido, como lo hace la energía del sol para llegar a nuestro planeta sin haber un medio material para hacerlo. Los estudios de las emisiones de cuerpo negro realizadas por Max Planck y el modelo radiométrico propuesto por él para las emisiones de cualquier cuerpo, han sido ampliamente estudiadas para la estimación de temperatura a partir de datos radiométricos. En el artículo ligado a esta tesis, [Torres et al. \(2023\)](#), implementa métodos de estimación de temperatura espectral a partir de datos de laboratorio y desde la industrial real, se propone un sistema óptico radiométrico basado en un espectrómetro, en el rango VIS NIR, para medir la irradiancia de la reacción, con el fin de usar el espectro medido para estimación de la temperatura y la emisividad. Se hizo uso de dos métodos, uno denominado de longitud de onda múltiple (MWM) el que se compara con el método pirométrico de dos longitudes de onda (TWM), estudiado por [Jorgensen and Zuiderwyk \(1985\)](#). La comparación se realiza en función de estudiar su comportamiento frente a señales afectadas por ruido.

Los usos aplicados a la industria de estimación de temperatura mediante espectros radiométricos, se basan en resultados previos, de autores que ya desde mediados del siglo pasado, desarrollaron métodos y estudios para mediciones de temperaturas basados en información espectral obtenida por sensores ópticos. Los trabajos de [Delfino and Hodul \(1992\)](#), [Wendt et al. \(1988\)](#) (quien trabaja en relación a procesos del cobre), [Tourin and Krakow \(1965\)](#), a fines del siglo XX ya hacían ver estudios para estimar temperatura, perfiles térmicos de reacciones y variables asociadas a los procesos, mediante el análisis de espectros de emisión. Pero también se encuentran aplicaciones del método de dos longitudes de onda, en ambientes específicos y buscando mejorar el algoritmo, como lo lleva a cabo [Cheng et al.](#),

2021, en el monitoreo de la temperatura en reacciones de combustión de hidrógeno.

1.3.3. Discusión

La realidad actual de la instrumentación que se usa a nivel industrial en la pirometalurgia del cobre, es la carencia de sistemas y métodos de medición adecuados para abordar los desafíos que presenta en el corto plazo la operación de fundiciones, como ya se comentó anteriormente. [Arias et al. \(2020\)](#), expone que dentro de los métodos modernos de monitoreo de convertidores de cobre en línea, están 2 sistemas, uno es el pirometro Noranda, el cual es un sistema que mediante información espectral obtenida desde el baño de los convertidores, calcula temperatura, usando el método de 2 longitudes de onda. Por otro lado, está el sistema llamado OPC (On-line Producción Control), el cual es un sistema que monitorea la salida de gases desde los convertidores y mediante información espectral de absorción, estima la cantidad de gases de interés, como el dióxido de azufre. Es de notar que los factores que influyen en la brecha instrumental de las fundiciones de cobre, son múltiples, además de la inversión en investigación y desarrollo, están las condiciones reales de operación, en donde destacan condiciones hostiles de altas temperaturas, ambiente oxidante y presencia de polvo, es por esto que los sistemas de medición deben estar acompañados de protecciones mecánicas y químicas dedicadas a soportar la operación continua.

Desde universidades y centros de investigación se han desarrollado instrumentos que están prestando servicios en distintas fundiciones del mundo, como lo es el caso de [RS2M \(2023\)](#), que como star-up ha comercializado sistemas de medición de temperatura en línea, basados en sensores ópticos, a fundiciones en Chile, Europa y Australia, sentando un precedente de tecnología para la medición de temperatura radiométrica, diseñada especialmente para medir en las condiciones hostiles que se dan en los convertidores de cobre.



Figura 1.3.1: Fotografía monitoreo temperatura desde sala de control Fundición HVL, Paipote, por parte del equipo de RS2M

1.4. Hipótesis

La señal espectral capturada por sondas optoelectrónicas se correlaciona con variables de proceso, permitiendo estimar formación de acreciones, perfil de temperatura y dinámicas de variables de proceso en convertidores de cobre, tipo horno flash.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Medir perfil de temperatura y formación de acreciones en quemadores, a partir de datos espectrales medidos con sondas optoelectrónicas en dos quemadores de un horno flash de cobre, además de estudiar la correlación entre estos datos y la dinámica de variables del proceso de conversión.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Compilar base de datos radiométricos y de proceso para el análisis.
- Calcular perfil de temperatura en el tiempo a partir de los datos radiométricos capturados en cada una de las posiciones de las sondas.
- Identificar formación de acreciones en las zonas donde se ubican las sondas optoelectrónicas mediante técnicas de procesamiento de señales.
- Analizar correlación entre datos radiométricos y la dinámica de variables de proceso, mediante el estudio de coeficientes de correlación.

1.6. Publicaciones asociadas

Durante el desarrollo de los estudios de magíster, que concluyen en esta tesis fueron enviados y publicados 2 artículos científicos.

1.6.1. Copper concentrate dual-band joint classification using reflectance hyperspectral images in the VIS-NIR and SWIR bands

Como antecedente a la investigación durante el Proyecto Anillo de Minería ACM 170008, el autor de esta tesis desarrolló un sistema dual de cámaras hiperspectrales, una fue el modelo Resonon Pika-L en el rango de 500 a 1000 nm y la otra fue el modelo Xenics Xeva 545 en el rango de 900 a 1700 nm. El sistema se conforma de forma general de 2 cámaras, 2 desplazadores, un lente y un computador. Las cámaras utilizan el sistema de escáner en una dirección para obtener información espacial de la muestra, por lo que se montan en un desplazador que permite ir moviendo el campo de visión de la cámara en una de las dimensiones espaciales (horizontalmente). El sistema se debió sincronizar, para que el movimiento del desplazador y la captura de la imagen se realizaran de forma que la imagen mantuviera proporciones en su dimensión espacial, además de hacer coincidir la imagen objetivo en el campo de visión en ambas cámaras. Todo lo anterior se integro en un software de control del sistema.

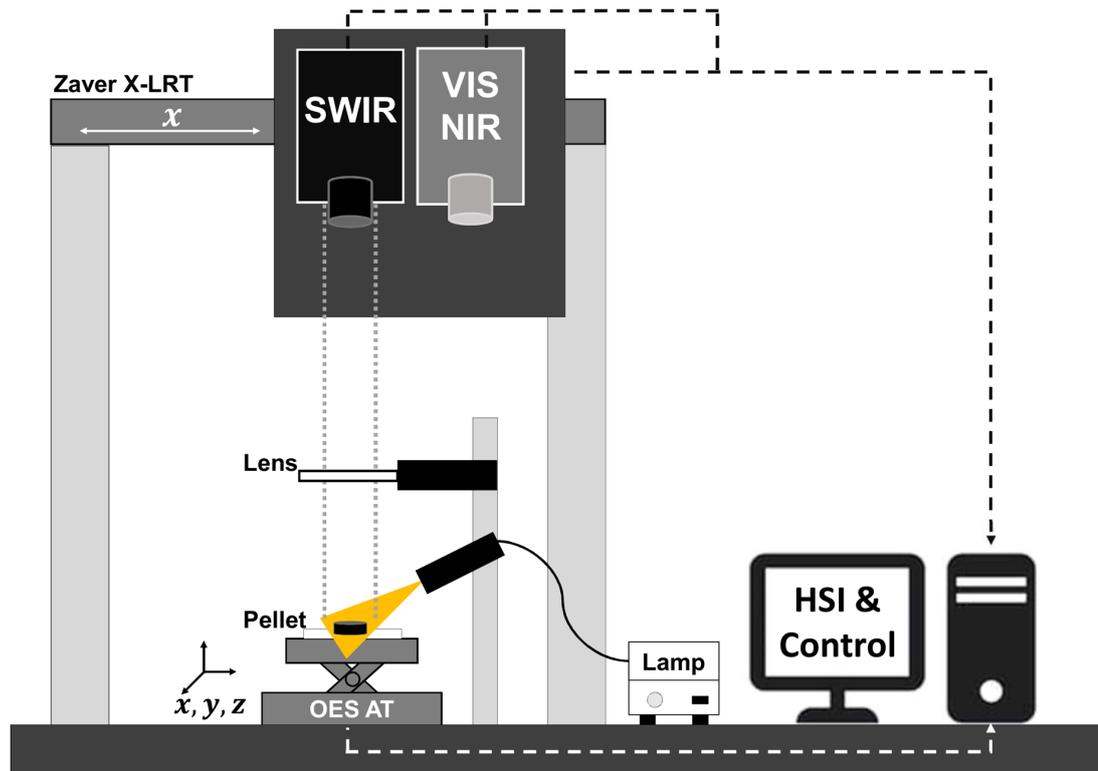


Figura 1.6.1: Esquema de sistema experimental de medición hiperespectral basado en dos cámaras. Se destacan los dos desplazadores usados, el modelo Zaver X-LRT (desplazamiento en un solo eje) y modelo OES AT (desplazamiento en 3 ejes), además de lentes, cámaras y computador

El experimento consistió en medir mediante el sistema mostrado en la Figura 1.6.1, diferentes mezclas de concentrados de cobre caracterizadas mineralógicamente, constituidas por los principales minerales sulfurados de cobre y sus demás minerales relacionados, a nivel nacional. Se tomaron imágenes de un total de 82 muestras en formato de 'pellet', como se muestra en la Figura 1.6.2, formando una gran base de datos que forman cubos que poseen información en la dimensión espacial y espectral, de cada muestra.

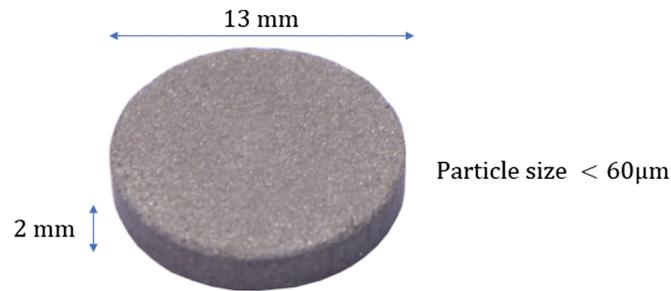


Figura 1.6.2: Geometría del formato de pellet usado para las mediciones de las mezclas de concentrado.

A partir de la base de datos generada, el autor de esta tesis, estudio el comportamiento de esta información al ser usada para entrenar algoritmos de clasificación. Para esto, primero se realizo una manipulación mediante métodos de procesamiento de imágenes de la base de datos, para ordenar los cubos de datos tanto, en dimensión espacial como espectralmente y asociarlos a la caracterización mineralógica que le corresponde a cada muestra. El estudio probo los siguientes modelos de clasificación: Clasificador Discriminante Lineal (CDL), Clasificador Discriminante Cuadrático (CDC) y Clasificador de Vecinos Cercanos K-Fino (CVCKF). Como resultado destacable, se puede decir que el modelo CVCKF demostró la mayor precisión, especialmente al combinar datos VIS NIR y SWIR, logrando precisión por sobre el 90 %, ofreciendo un enfoque prometedor para la clasificación en tiempo real y precisa de concentrados de cobre en la industria metalúrgica.([Rivas et al. \(2023\)](#)).

Los resultados de este trabajo se enviaron a la revista Applied Optics, de la OSA (Optical Society of America), y fueron publicados en su Volumen 62, el 10 de marzo del 2023. Junto a la publicación se facilitaron los datos usados en el estudio para ser accedidos de manera publica desde los servidores de la revista.

1.6.2. Radiometric Methods for High Temperature Flame Estimation: Robustness Analysis and Application to an Industrial Flash Smelting Furnace

Este artículo aborda la aplicación de métodos radiométricos para la medición de temperatura en hornos de fundición flash. Se propone un sistema óptico radiométrico usando un espectrómetro VIS-NIR, aplicando un método de estimación multi-longitud de onda basado en el modelo de radiación de Planck. Este método, contrastado con técnicas convencionales, muestra alta precisión y robustez, incluso bajo condiciones de ruido, siendo prometedor para aplicaciones industriales. (Torres et al. (2023)) Para lograr que se pudiera realizar el estudio de este artículo, con participación directa del autor de esta tesis, de debió diseñar e implementar el sistema de transferencia de datos desde los sistemas de medición en terreno hasta su análisis por parte del equipo de investigación y desarrollo en la Universidad de Concepción. La siguiente figura muestra el esquema utilizado.

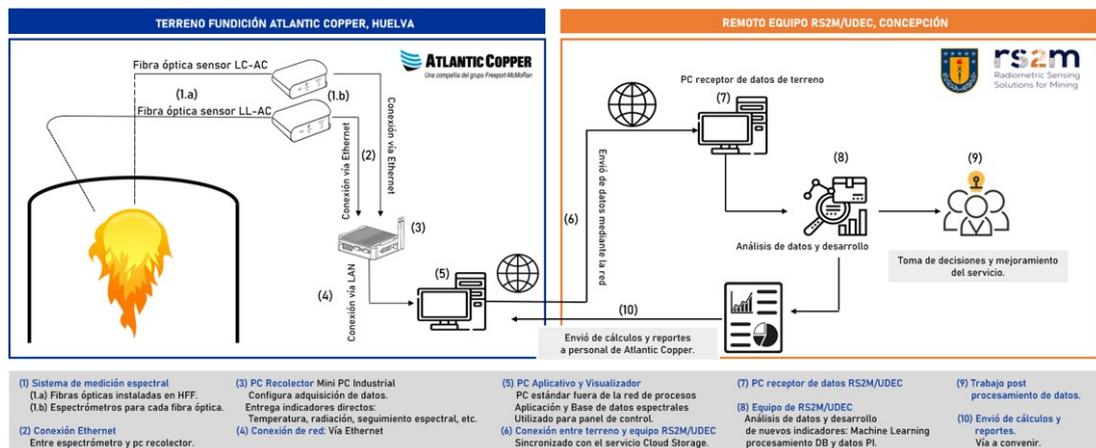


Figura 1.6.3: Esquema de conectividad de implementación de sistema de medición espectral en horno Flash de la fundición Atlantic Copper. Se separan la parte del diseño que abarca los elementos que están dentro de la fundición y los que corresponden a la universidad.

El sistema mostrado, es similar al que se usa para los fines de esta tesis, pero aquí se ha considerado la conexión entre un PC intermedio, con acceso a la red, que conecta a un servidor, que permite ser accedidos desde la universidad para obtener datos.

El análisis de los datos concluye el potencial que implica usar el método de múltiples Longitudes de onda, en escenarios donde exista una afectación por el ruido que afecta a la medición espectral.

Los resultados de este artículo, fueron enviados a la revista IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, del IEEE y fue publicada en su volumen 72, el 7 de agosto de 2023, como parte de los resultados científicos del proyecto de transferencia tecnológica entre la fundición Atlantic Copper y la Universidad de Concepción. ‘

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Análisis espectral de emisión

La espectrometría puede ser entendida como una técnica analítica que mide y cuantifica la radiación electromagnética o luz según su intensidad para diferentes longitudes de onda en diferentes zonas del espectro electromagnético. Esta técnica se basa en el uso de sensores ópticos. Estos sensores basan su potencial en la respuesta que poseen ciertos materiales semiconductores, que reaccionan al incidir luz o radiación electromagnética sobre ellos, en esta interacción entre la radiación incidente y el material del sensor, se genera una señal que pasa al dominio electrónico, para ser cuantizada, digitalizada e interpretada. El sistema completo integrado entre sensor óptico y electrónica, se materializa en un instrumentos llamados espectrómetro.

Al medir la radiación electromagnética, se pueden tomar diferentes estrategias. Considerando que la luz como onda tiene toda las propiedades de interacción de ondas con objetos y cambios de medio de propagación, como la reflexión, refracción o interferencia, por lo que se pueden estudiar fenómenos de transición o absorción, así como también se puede estudiar como la materia refleja la luz, a partir de hacer incidir una fuente sobre ella. Por otro lado la materia también es fuente de radiación por lo que se puede estudiar la emisión de la materia, para entender este fenómeno se debe comprender la Ley de Kirchoff de espectrometría y las consecuencias de la ley de conservación de la energía en espectrometría.

2.1.1. Ley de Kirchoff

El concepto de espectro continuo de radiación se refiere a un perfil espectral que no muestra franjas de absorción ni emisión. Según Kirchoff, se puede determinar físicamente la presencia de espectros continuos o discretos según los siguientes enunciados.

- 1 Un objeto incandescente, ya sea sólido, líquido o un gas denso, siempre genera un espectro continuo.
- 2 Un gas incandescente emite un espectro que consta únicamente de líneas de emisión, sin una sección continua.
- 3 Un espectro continuo que atraviesa un gas se convierte en un espectro que incluye líneas de absorción.
- 4 Las ubicaciones de las líneas de emisión o absorción son indicativas de la composición química del material que las origina. Analizar un espectro facilita la identificación de los elementos químicos responsables de su creación.

2.1.2. Conservación de la energía espectral

La potencia de la luz o radiación, puede ser entendida como potencia transmitida, reflejada o absorbida. Si se normaliza la potencia se la luz incidente ($P_{in} = 1$), se cumple que:

$$A + T + R = P_{in} \quad (2.1.1)$$

En donde T es la transmitancia (fracción transmitida), R es la reflectancia (fracción reflejada) y A es la absorvancia (fracción absorbida), como se ejemplifica en la Figura 2.1.1. Como consecuencia de la conservación de energía, la radiación absorbida es igual a energía que se emite, luego podemos expresar 2.1.1, considerando que $A = E$, en donde E es la emisividad.

$$E + T + R = P_{in} \quad (2.1.2)$$

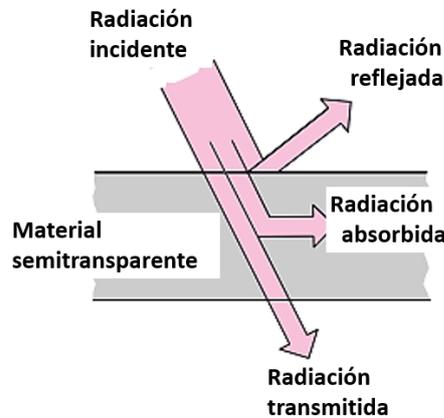


Figura 2.1.1: Conservación de la energía espectral

2.2. Métodos de calculo de temperatura espectrales

En esta tesis se estudiara el uso del método de dos longitudes de onda para el calculo de temperatura a partir de datos espectrales, en este caso se utilizaran datos en el rango espectral VIS NIR.

2.2.1. Ley de Planck

El modelo radiactivo de Planck, quien en su ley homónima, describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico en una temperatura definida, como lo detalla [Marr and Wilkin \(2012\)](#), entendienddo que un cuerpo negro es un objeto teórico ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre el, lo que hace que no refleje radiación, por otra parte este tipo de cuerpos emiten radiación, siendo esta llamada radiación de cuerpo negro, que es a lo que alude Planck en su ley. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{kT\lambda} - 1} \quad (2.2.1)$$

En donde $c = 3 \times 10^8 [m/s]$, es la velocidad de la luz en el vacío, $h = 4,135 \times 10^{-15} [eVs]$, es la constante de Plank, $k = 8,617 \times 10^{-5} [eV/K]$, es la

contante de Boltzmann, T es la temperatura en grados Kelvin y λ es la longitud de onda en nm .

2.2.2. Método de dos longitudes de onda

Este método se basa en la Ley descrita anteriormente, además de una consideración teórica para el método, que se concluye de la ley de desplazamiento de Wien, explicada por Stewart (2012), que establece que existe una relación inversa entre la longitud de onda en la que se produce el pico de emisión de un cuerpo negro, es decir para longitudes de onda pequeñas el pico de emisión del cuerpo negro sera mayor. Por lo tanto, la ecuación 2.2.1, se puede expresar de forma aproximada, considerando lo siguiente.

$$\frac{hc}{kT\lambda} \ll 1 \rightarrow \exp \frac{hc}{kT\lambda} \approx 1 \quad (2.2.2)$$

De la ecuación 2.2.2 anterior se desprende la siguiente aproximación para 2.2.1.

$$E(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{kT\lambda}} \quad (2.2.3)$$

Ahora para entender el método de las dos longitudes de onda, se debe entender que este se fundamenta en la información radiométrica provenientes de un objeto o cuerpo en estudio. Se reconoce que los objetos en la realidad no manifiestan las cualidades perfectas de emisión de un cuerpo negro, debido a que su emisividad es siempre inferior a uno (2.2.4) y puede variar en función de factores como la longitud de onda, temperatura, dirección y estado físico del objeto. La emisividad es una consecuencia de la ecuación 2.2.1, que atiende al cuerpo negro, que es un ideal teórico. En la realidad la emisividad de un cuerpo, se entiende como:

$$\epsilon(\lambda, T) = \frac{E(\lambda, T)}{E_{bb}(\lambda, T)} \quad (2.2.4)$$

En donde $\epsilon(\lambda, T)$, es la emisividad, $E(\lambda, T)$, es la radiación espectral de un

determinado cuerpo a una determinada temperatura y $E(\lambda, T)_{bb}$ es la radiación de cuerpo negro a la misma temperatura que el cuerpo en estudio. Como cuerpo teórico ideal, el cuerpo negro alcanza siempre los mayores valores de radiación en comparación a un cuerpo normal a una misma temperatura, por lo tanto el valor de la emisividad, en cada λ , no puede ser mayor a uno, es decir los valores de emisividad solo pueden toar valores entre 0 y 1.

La técnica de dos longitudes de onda, usa las mediciones de intensidad de radiación espectral en dos diferentes longitudes de onda para calcular la temperatura. Esta técnica es fiable únicamente cuando el objeto emisor actúa como un cuerpo gris, es decir, tiene una emisividad uniforme a lo largo del tiempo. Por lo tanto, en el caso de una superficie que no se ajusta a las propiedades de un cuerpo negro, la radiación espectral que emite se rige por las consecuencias Ley de Planck.

Para hacer uso del método de dos longitudes de onda, se deben cumplir los siguientes condiciones.

1. Condición de cuerpo gris, el valor de la emisividad se mantiene para toda las longitudes de onda a una misma temperatura dada.
2. Las longitudes de onda seleccionadas no deben corresponder a una linea de emisión o absorción, es decir deben estar en un sector plano, del espectro
3. Se asume la condición $\frac{hc}{kT\lambda} \ll 1$

Con las consideraciones enumeradas, además de las ecuaciones 2.2.1 y 2.2.4, se expresa la iradiancia espectral, como:

$$E(\lambda, T) = \epsilon_n \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{kT\lambda}} \quad (2.2.5)$$

La ecuación anterior, valida para las condiciones en listadas, se le conoce como la aproximación de Wien, y es aceptada cuando se cumple que $\frac{hc}{kT} < \lambda$, al menos 4 veces. Ahora, con lo considerado anteriormente, usando la ecuación 2.2.5, para 2 longitudes de onda, λ_1 y λ_2 , a la misma temperatura T y calculando la razón entre estas ecuaciones, para resolver T , se revuelve y acomodando esta esta ecuación resultan de de la razón, para finalmente obtener.

$$T = \frac{\frac{hc}{k} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \frac{E_1(\lambda_1, T)}{E_2(\lambda_2, T)} + \ln \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1} - 5 \ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} \quad (2.2.6)$$

En 2.2.6, $E_1(\lambda_1, T)$ representa la irradiancia espectral para λ_1 , mientras que $E_2(\lambda_2, T)$ corresponde a la irradiancia espectral para λ_2 . Una limitación significativa de este enfoque, compartida por otros métodos convencionales de estimación de temperatura radiométrica, radica en la función de emisividad ϵ del cuerpo emisor para λ_1 y λ_2 a una temperatura específica T .

Una forma adoptada para aplicar la ecuación 2.2.6 sin tener saber del valor de emisividad para estas longitudes de onda implica la elección de λ_1 y λ_2 de tal manera que el cuerpo radiante se aproxime al comportamiento de un cuerpo gris (mantenga el valor de emisividad en cualquier longitud de onda). Esta estrategia se basa en que resulta más sencillo conocer la relación entre dos emisividades que determinar su valor exacto. Es decir

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} \approx 1 \quad (2.2.7)$$

Sin embargo, en el caso específico de los hornos flash, no existen regiones del espectro medido en donde la emisividad se comporte exactamente como un cuerpo gris. Pero, mediante un análisis de una extensa cantidad de datos espectrales obtenido de condiciones reales de operación, se ha determinado que la relación entre las emisividades es más cercana a 1.1 que a 1, por lo que se estudiara el valor mas cercano a 1 que se obtenga de datos reales. Lo anterior, en base los resultados expuestos por [Torres et al. \(2023\)](#).

2.3. Combustión Flash

La tecnología de Combustión flash en Hornos de fusión de cobre fue desarrollada por la compañía Outokumpu en Finlandia, es considerada una de las innovaciones más importantes en la metalurgia del cobre del siglo XX. En la actualidad la fundición flash representa más del 60% de la fundición para obtención de mata de cobre.

La combustión flash en el interior de reactores se realiza mediante la inyección de oxígeno, aire, concentrado de Cu-Fe-S seco, fundente de sílice y materiales recirculantes del mismo proceso, a una cámara de reacción a temperaturas de al rededor de 1250°C. Una vez en la cámara del horno calentado, las partículas minerales de sulfuro del concentrado (por ejemplo, $CuFeS_2$) reaccionan rápidamente con el O_2 del soplado. Esto resulta en (i) la oxidación controlada del Fe y S del concentrado, (ii) una gran liberación de calor y (iii) la fusión de los sólidos.

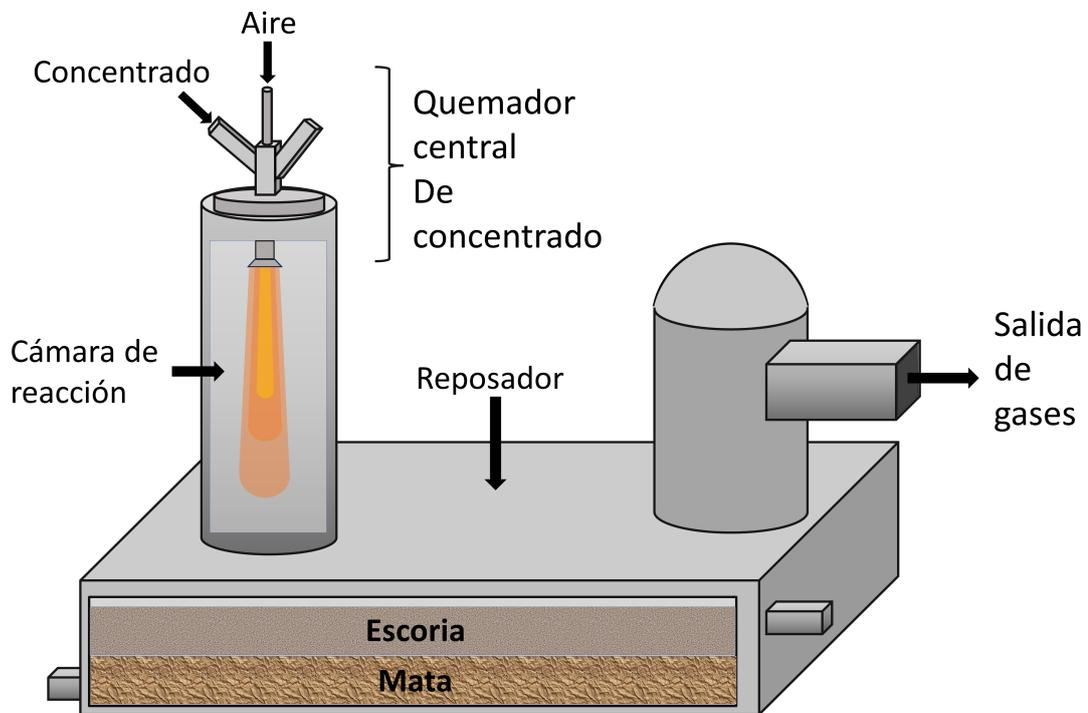


Figura 2.3.1: Esquema general Horno Flash. Destacando las zonas de salida de gases, el quemador central, reposador y cámara de reacción

Como se describe por [Davenport et al. \(2002\)](#), el proceso es continuo. Cuando se inyecta un enriquecimiento extensivo de oxígeno en el soplado, es casi autotérmico, es decir, el calor se genera por la propia corriente de alimentación para elevar su propio nivel térmico. Este tipo de hornos flash, están perfectamente diseñados para fundir y tratar los concentrados de minerales sulfurados de cobre, particulados finos que vienen de la etapa de flotación.

Los productos de las reacciones que ocurren en el interior de los hornos de fusión flash, son los siguientes:

- a Mata fundida de Cu-Fe-S, con 65 % Cu, considerablemente más rica en Cu que el concentrado que entro, que suele tener al rededor de un 27 % Cu
- b Escoria fundida, principalmente silicato de hierro que contiene 1 o 2 % de Cu
- c Gases de escape calientes cargados de polvo que contienen entre un 30 y un 70 % en volumen de SO_2 .

Por otro lado, los objetivos de la operación de un horno de fundición flash son:

- a Lograr una mata fundida de composición y temperatura constante
- b Lograr que la escoria cuando sea tratada para la recuperación de Cu, contenga un porcentaje muy bajo de Cu.
- c Lograr Gases de escape con gran cantidad en SO_2 para su captura y posterior recuperación como ácido sulfúrico

Si bien en la actualidad, se han desarrollado varios procesos ligados a un tipo específico de marca o proveedor de tecnología de reactores de combustión flash, este trabajo se enfoca en datos obtenidos desde un reactor flash de la compañía Outokumpu.

2.3.1. Proceso de combustión flash por Outokumpu

Los hornos flash de Outokumpu varían considerablemente en tamaño y forma, todos ellos, sin embargo, tienen las siguientes cinco características transversales a todos:

- a Quemadores de concentrado (generalmente 1, pero pueden ser hasta 4) que inyecta partículas secas de concentrado junto a flujo de aire con O_2 hacia la zona de reacción.
- b Un eje o cámara de reacción, que es la zona principal donde ocurre la reacción entre de O_2 y el concentrado compuesto en su mayoría por Cu, Fe y S.

- c Un reposador, en donde las partículas de mata y escoria fundidas caen y se acumulan, para ser separan por diferencia de densidad.
- d Sistema de tuberías para inyección de agua, para sistema de refrigeración de la camisa de ladrillos refractarios.
- e Un sistema de captación de gases de escape producto de la reacción, principalmente SO_2 .

Ahora, desde el punto de vista interno, el interior de un horno de fundición flash Outokumpu está compuesto por paredes de ladrillos refractarios fabricados de una aleación de cromo-magnesio de alta pureza. Estos ladrillos están respaldados por chaquetas de enfriamiento de cobre refrigeradas por agua. Tanto la cámara de reacción como el revestimiento refractario están poseen sistemas de enfriamiento refrigerados por agua o por planchas de acero, las cuales se enfrían con agua en el exterior. La base del horno se enfría con aire mediante convección natural. La duración estimada es de 8 años de operación para un horno flash, pero esta sujeto a mantenimiento y condiciones de operación regulares.

El corazón del un horno de combustión flash es el quemador central de concentrado, en el cual el concentrado seco, junto a aire enriquecido con O_2 , son inyectados y se mezclan en la cámara de reacción del reactor. También se añaden al quemador polvo reciclado y residuos triturados o recirculante.

Un quemador de concentrado consta de:

- a Toberas a través del cual se inyecta el flujo de aire enriquecido con O_2 en el eje de reacción.
- b Un conducto central por donde se inyecta concentrado al eje de reacción.
- c Un cono distribuidor en la punta del quemador, que proyecta aire horizontalmente a través del flujo descendente de sólidos.

A continuación en la Figura 2.3.2 se esquematiza las partes de un quemador central de Outokumpu.

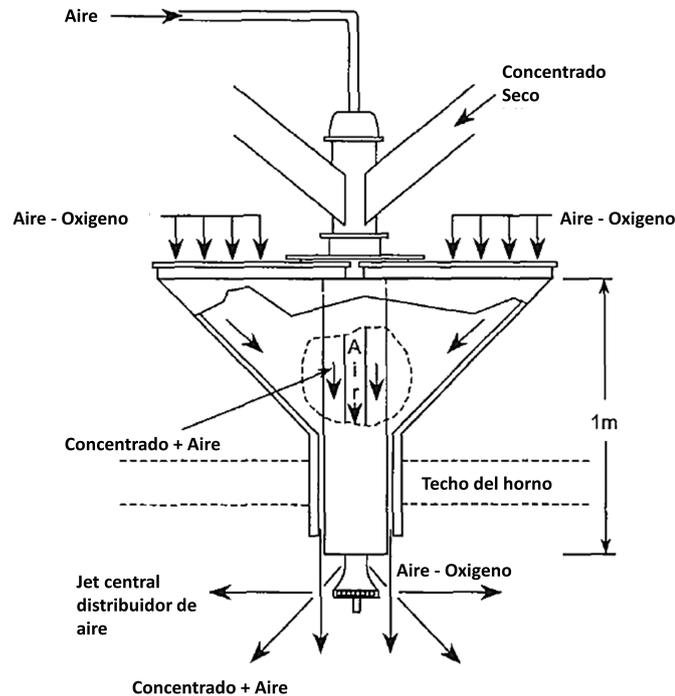


Figura 2.3.2: Esquema quemador de concentrado Horno Flash de Outokumpu. Se destaca la entrada del aire y el aire enriquecido con oxígeno los flujos de concentrado

En la operación del quemador de concentrado, se presta especial atención a la distribución uniforme del soplado de aire y la alimentación de sólidos a lo largo de la cámara de reacción, debido a que la formación de la llama debe ser lo más simétrica y estable posible, para evitar daños en la mampostería y también para homogeneizar la ocurrencia de las reacciones.

2.3.2. Reacciones químicas en un horno flash de concentrado de cobre

Los concentrados de cobre, que se inyectan a un horno flash, son una mezcla de minerales sulfurados de cobre en forma de polvo seco, compuesto principalmente por cobre, hierro y azufre, se espera que esta mezcla tenga un 27% de cobre aproximadamente. Alguno de los los minerales que se se encuentran en los concentrados son, la bornita (Cu_5FeS_4) y la calcopirita ($CuFeS_2$). Estos minerales sufren una degradación térmica al elevar su temperatura. Para el caso de la bornita

tenemos.



Si analizamos el diagrama de δG , (energía libre de Gibbs) versus temperatura para la calcopirita, obtenemos el siguiente resultado, gráfico,

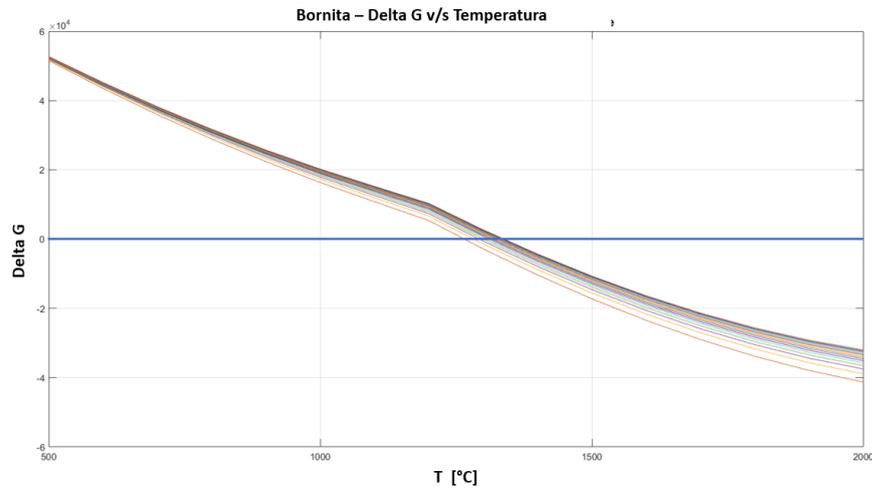
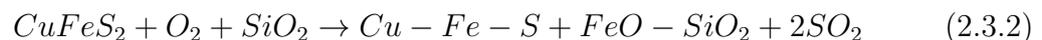


Figura 2.3.3: Gráfica del comportamiento de la bornita a diferentes presiones, para su relación Delta G vs Temperatura

Por definición una reacción ocurre, en este caso la degradación térmica, cuando el valor de Delta G (energía libre de Gibbs), es menor a 0, para el caso de la bornita, (a una precisión fija), esto ocurre a los 1250 °C aproximadamente. Una vez que se tiene la temperatura para que ocurra la reacción los elementos reaccionan al entrar en contacto con el aire enriquecido con O_2 . A continuación se expresa como ecuación química el proceso que ocurre en un horno flash, como explica [Davenport et al. \(2002\)](#).



En la ecuación anterior el termino Cu-Fe-S, corresponde a la mata (producto del horno flash con un 64 % de Cu aprox.) y el termino $FeO - SiO_2$ corresponde a la escoria.

Capítulo 3

Metodología

Esta tesis se basa en analizar datos espectrales en el rango VIS NIR, obtenidos desde un sistema de medición basado en fibras ópticas y espectrómetros, que se ubico en 2 posiciones del Horno de combustión Flash de la fundicion Atlantic Copper. (Figura 3.0.1).

La fundicion Atlantic Copper, ubicada en Huelva, España, es una subsidiaria del conglomerado estadounidense Freeport-McMoRan y es el principal productor de cobre en España. La capacidad de su complejo metalúrgico en Huelva es de aproximadamente 330,000 toneladas métricas de ánodos de cobre y 285,000 toneladas métricas de cátodos de cobre refinado, con un contenido de cobre de más del 99.99%. En los últimos años, Atlantic Copper ha demostrado un fuerte compromiso con la sostenibilidad y la responsabilidad ambiental. Realizando fuertes inversiones en desarrollos ligados a la mejora del control de las emsiones en su proceso, y mitigaciones ambientales.

En esta sección se describen los pasos que se llevaron a cabo para lograr los objetivos propuestos para esta tesis.

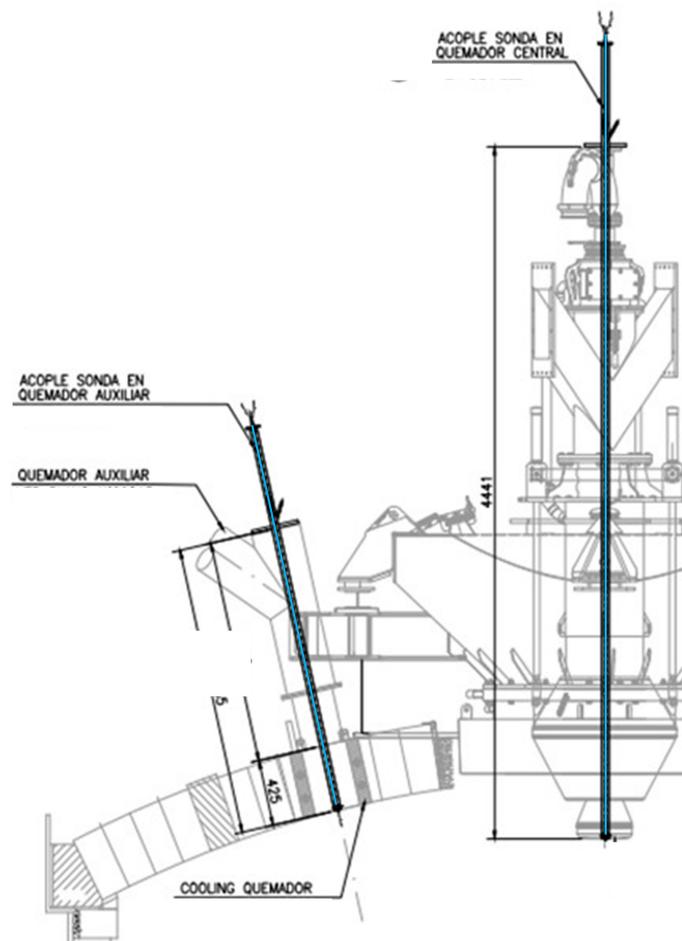


Figura 3.0.1: Plano de sección transversal de un Horno flash en donde se destacan las posiciones de los sistemas de medición. Zona quemador central y quemador auxiliar

3.1. Adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos espectrales, se basa en una parte optomecánica que esta directamente en contacto con la radiación, conformada por: Una sección llamada sonda o lanza, ver Figura 3.1.1, la cual protege en su interior una fibra óptica en el primer tramo dentro de la tobera de los quemadores, esta lanza posee un sistema de refrigeración basado en aire a presión para ayudar a que la fibra óptica soporte las altas temperaturas a las que se ve expuesta. La lanza también posee un cabezal que sostiene una ventana de zafiro, pero proteja el extremo de la fibra en caso de salpicadura, como se ve en la parte inferior de la Figura 3.1.1.

Este sistema es similar en ambos tipos de sondas en ambas posiciones, variando solo el largo y sistema de acoplamiento al horno.

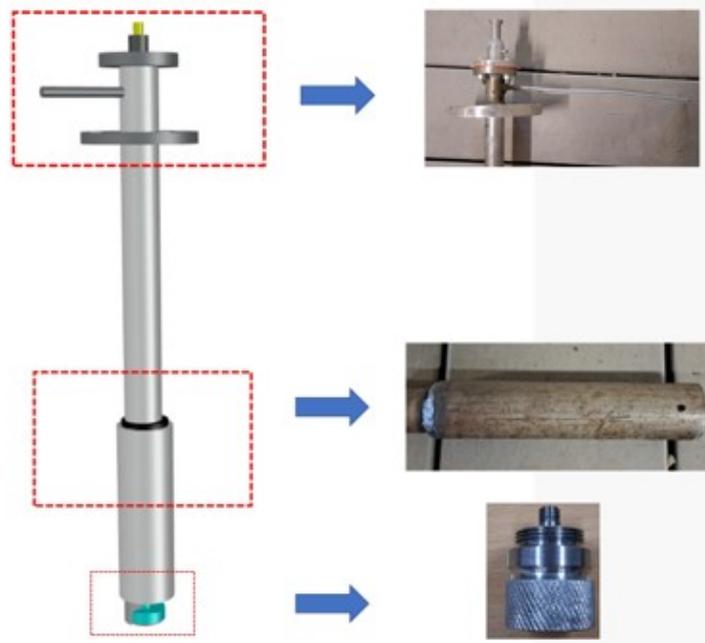


Figura 3.1.1: Esquema de sonda portadora de fibra óptica utilizada en ambos puntos de medición. En su parte superior se encuentra entrada de aire de refrigeración y en su parte inferior se encuentra un cabezal extraíble que incorpora una ventana de zafiro, que protege la entrada de la fibra.

Por otro lado, se tiene la optoelectrónica del sistema de medición, que recibe la señal de la fibra óptica. Es conformada por un espectrómetro VIS NIR modelo CCS 175, Thorlabs, que se muestra en la Figura 3.1.3 , el cual se alberga dentro de un gabinete aledaño al quemador central, como se muestra en la Figura 3.1.2. La información espectral digitalizada por el espectrómetro, se envía mediante protocolo USB, a un computador que recibe estos datos, para su almacenamiento y además ejecuta el software de adquisición de datos de ambas lanzas.

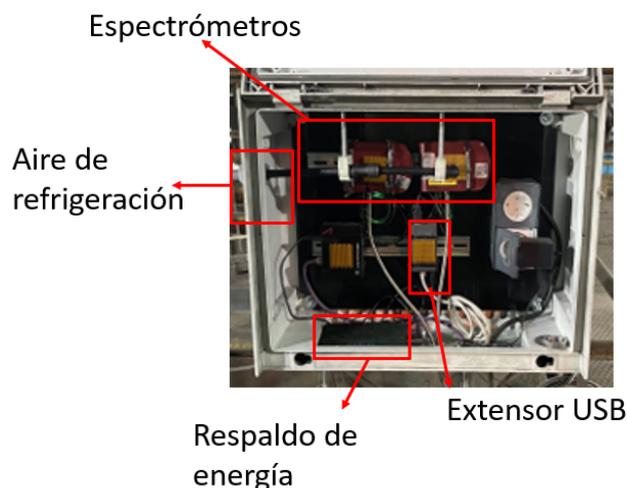


Figura 3.1.2: Fotografía del interior del gabinete aledaño a zona de quemador central, a donde llegan las fibras ópticas. Como dispositivos principales se encuentran 2 radiómetros, sistema de extinción USB, sistema de respaldo de energía y sistema de enfriamiento.

En conjunto un sistema de sistema de medición se conforma principalmente por:

- Sonda: Se le llama sonda a la parte más cercana del sistema a la reacción que da soporte mecánico y que alberga en su interior un tramo de fibra óptica, terminado en un cabezal protector. Incorpora un sistema de circulación de aire a presión, como mecanismo de refrigeración 3.1.1.
- Fibra óptica: Corresponde a un tramo de fibra de 30 metros, de un núcleo de $200\ \mu\text{m}$, protegida con una camisa de acero flexible. Esta fibra tiene un extremo mirando a la reacción, pasa por el interior de la sonda y es canalizada hasta el gabinete.
- Espectrómetros: Para este trabajo se usaron 2 espectrómetro modelo CCS175 de Thorlabs. Poseen un rango espectral de medición de 500 a 1000 nm, y 3568 bandas. Se albergan dentro del gabinete y entregan la información medida a un computador mediante protocolo USB.



Figura 3.1.3: Espectrómetro VIS NIR CCS175, Thorlabs.

- **Computador:** En este sistema un computador ejecuta un software que controla la adquisición de datos y almacena los datos recolectados desde ambas sondas. El computador se encuentra alejado de la zona de operación del horno flash, por seguridad.

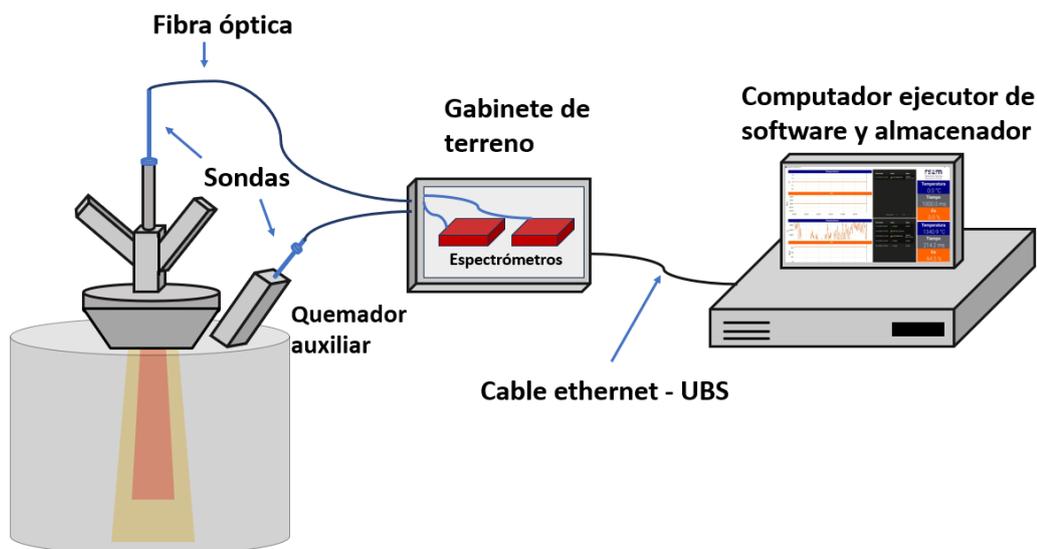


Figura 3.1.4: Esquema, de la disposición del sistema de medición, desatanca las 4 partes fundamentales, sonda, fibras, espectrómetros en gabinete de terreno y computador.

De la figura anterior, notar que la conexión entre los espectrómetros en el gabinete el el computador se realiza mediante cable ethernet, a pesar de la que salida de los espectrómetros sea USB esto es por que se ha utilizado un convertidor y extensor de protocolo USB a ethernet para poder aumentar la distancia de alcance que podría tener un cable de USB.

3.2. Procesamiento de los datos

Para los fines de esta tesis, se considero la formación de una base de datos con la información espectral de una semana de operación del sistema, considerando las mediciones en los dos puntos señalados, quemador central de concentrado y quemador auxiliar.

3.2.1. Base de datos espectrales

Para la conformación de la base de datos, se considero seleccionar una semana de operación continua del sistema del sistema de medición, dentro de los 3 meses de la campaña. Se consideraron los siguientes criterios:

- Continuidad temporal de las mediciones para ambas sondas
- Intensidad de señal espectral
- Continuidad operacional del horno
- Continuidad operacional e integridad de cada elemento del sistema de medición, individualmente

Basado en los criterios anteriores se conforma la base de datos espectrales. Una vez que se tiene claro las fechas que se consideraran para el análisis, se solicitan a la fundición Atlantic Copper, sus datos de operación ligados a el control de los procesos que ocurren en el horno Flash. Estos datos de proceso fueron entregados con un muestreo de un minuto entre muestras y se consideraron las siguientes variables, para ser añadidas a la base da datos.

- Coeficiente de oxigeno
- Enriquecimiento de oxigeno

- Tasa de alimentación de concentrado
- Tasa de inyección de aire

Los datos espectrales raw (datos digitalizados, obtenidos directamente desde el radiómetro, sin ningún procesamiento), pueden tener corrupciones y momentos de muy alta o muy baja intensidad, lo que no es adecuado para ser considerados en el análisis. Por lo tanto, se eliminan datos corruptos por ruido aditivo. Para eliminar datos por tener intensidad alta o saturada, se considero el criterio de que el máximo valor de intensidad entre toda las longitudes de onda, no puede sobre pasar el valor 0.8. Del mismo modo el mínimo valor de intensidad de entre toda las longitudes de onda no puede bajar de 0.3. Además se agregan otros criterios como eliminar espectros mal medidos, por efectos de aumentos críticos de la temperatura en el ambiente de operación del espectrómetro, que es sensible a variaciones en su comportamiento espectral y de electrónica por este efecto.

Los datos del proceso recibidos desde la fundición, también son sometidos a una revisión para filtrar aquellos valores que puedan ser anómalos o no representativos. Esta base de datos con los datos filtrados sera usada para el análisis, que se busca para lograr los objetivos de este trabajo, tanto para estimación de temperatura, identificación de acreciones y correlación entre variables radiómetros y de proceso.

3.2.2. Calibración de datos espectrales.

Los datos digitalizados que entrega el espectrómetro, son la respuesta del sensor a la radiación que recibe en su rango de operación del espectro electromagnético, es decir la respuesta espectral o eficiencia espectral del semiconductor del cual se conforma el sensor, en el caso del espectrómetro usado el semiconductor es el silicio, que es el material usado para sensores en el rango VIS NIR. La Figura 3.2.1, muestra la respuesta espectral del sensor del radiómetro CCS175, usado en este trabajo.

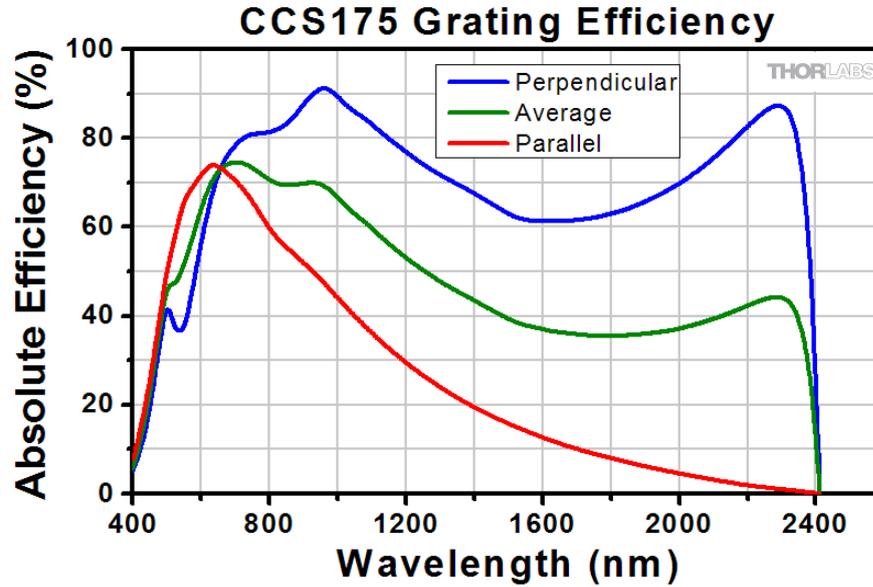


Figura 3.2.1: Eficiencia Cuántica sensor de espectrómetro CCS75, destaca su buena respuesta en el rango VIS NIR.

La respuesta del sensor no es igual para cada longitud de onda, por lo que para poder obtener el espectro real en unidades de $\mu\text{W}/\text{cm nm}$, se debe realizar un procedimiento de calibración que involucre una fuente de radiación conocida y considere todo el camino óptico de la señal, desde la punta de la sonda que mira la reacción, hasta la punta de la fibra que se conecta al espectrómetro. El procedimiento de calibración se describe a continuación.

1. Sea I_{raw} el espectro sin calibrar, también llamado espectro raw, I_{cal} el espectro calibrado. Considerando la fibra óptica y el sensor del espectrómetro como camino óptico. Entonces la señal espectral calibra la expresamos de la siguiente manera.

$$I_{cal} = I_{raw}H \quad (3.2.1)$$

en donde H , se considera función de transferencia del sistema por donde pasa la señal.

2. Para hallar H , se debe primero medir un espectro usando una luz de referencia ideal y conocida, en este caso de uso la lampara de calibración

modelo SLS 202, ver Figura 3.2.2, la cual tiene una emisión muy cercada a la un cuerpo negro en el rango VIS NIR. El foco de esta lampara se conecta apuntando a la entrada de la fibra que mira a la reacción, para ser medida desde el espectrómetro. A esta medición la llamaremos $I_{lampara}$.

Para generar la función H , se deberá calcular la razón entre el espectro de cuerpo negro, según la Ley de Planck, para la temperatura de la lampara de calibración, en este caso 2700 K.

$$H = \frac{I_{bb} \left[\frac{\mu W}{cm^2 nm} \right]}{I_{lampara} [cuentas]} A [m^2] T_{i-lamp} [s] dL [nm] \quad (3.2.2)$$

En donde A es el área de colección de la fibra óptica, T_{i-lamp} es el tiempo de integración al que fue tomado $I_{lampara}$ y dL es la función de desplazamiento de longitudes de onda (compensa las variaciones que puedan tener, es conocida y particular de cada espectrómetro). Por lo tanto se obtiene una función H , con unidades de medida $\left[\frac{\mu W}{cm^2 nm} \right] \frac{1}{[cuentas]} [m^2] [s] [nm]$.

3. Ahora que se conoce H , cuando se quiera calibrar un I_{raw} , se debe realizar la siguiente operación:

$$I_{cal} = \frac{I_{raw} [cuentas] H \left[\frac{\mu W}{cm^2 nm} \right] \frac{1}{[cuentas]} [m^2] [s] [nm]}{A [m^2] T_i [s] dL [nm]} \quad (3.2.3)$$

En este caso T_i es el tiempo de integración al que se tomo I_{cal} .

3.2.3. Cálculo de temperatura

Como se se dijo en la introducción, en este trabajo se hará uso del método de las dos longitudes de onda para la estimación de la temperatura a partir de los datos radiómetros medidos.

3.2.3.1. Método de dos longitudes de onda

Este método se explico en la subsección 2.1. Ahora bien, para implementar este método se deben realizar los siguientes pasos a partir de I_{raw} .

1. Se debe realizar el proceso de calibración según se explico en la bisección

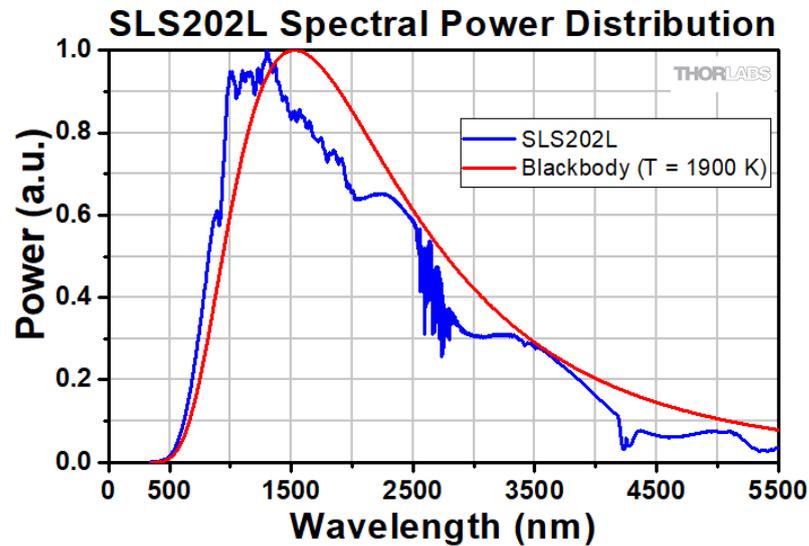


Figura 3.2.2: Curva de distribución de potencia de lampara SLS 202, de Thorlabs.

anterior. Una vez que ha generado la función H , se calibran los espectros raw con la ecuación 3.2.3.

2. Se debe realizar la selección de las dos longitudes de onda que se usaran en este método, considerando, que estén en zonas continuas del espectro, es decir, lejos de zonas de discontinuos o absorciones. Además se debe establecer la razón de emisividad para las dos longitudes seleccionadas, para lo cual se revisa el comportamiento de la emisividad en ellas para todo los espectros en estudio, para obtener un valor medio, que se establecerá para el análisis de todos los espectro. Esto se realizara analizando la media diaria de la razón de las emisividades entre las longitudes de onda λ_2 y λ_1 , $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, para varios valores representativos de pares de lambdas que cumplan con las consideraciones mencionadas en la subseccion 2.2.1 Para luego establecer un valor medio representativo, que se usara al implementar el método.
3. Se debe considerar, las variables de área de colección la fibra y tiempo de integración de cada espectro.
4. Conociendo todo los términos de la ecuación 2.2.6, se reemplazan en ella y se obtiene el valor de temperatura en escala kelvin.

Este método esta sujeto a las variaciones puntuales que ocurren en las longitudes

de onda seleccionadas.

3.2.4. Identificación de acreciones

El fenómeno de formación de acreciones, es la acumulación de material fundido en los bordes de las toberas de soplado del quemador central y lateral, lo que puede resultar en una obstrucción significativa que termine tapando completamente los lugares de soplado de aire, elemento fundamental para la reacción dentro del horno flash.

La estrategia que se abordó para identificar cuando se estaba formando una acreción, fue que en primer lugar se realizó un seguimiento visual de la zona de visión de nuestras sondas, la que se veía afectada por la formación de acreciones, lo que se veía reflejado en la irradiancia total de la señal espectral que se estaba midiendo en ese punto. Ahora bien, para establecer un método que permita identificar si existe o no la formación de una acreción, se evalúa el comportamiento de la irradiancia espectral media antes, durante y después del evento de formación de acreciones, con estas evaluaciones apoyadas con imágenes, se establecieron umbrales, bajo los cuales se alarma de la formación de una acreción para que pueda ser intervenido y evitar que este crezca, se endurezca y sea más complejo removerlo.



Figura 3.2.3: Ejemplos de visión el quemador central. Imagen izquierda: Corresponde a la etapa de formación de la acreción, en donde aun la irradiancia media no baja el umbral. Imagen central: Corresponde a un momento donde la irradiancia media bajo el umbral, se ha formado la acreción. Imagen derecha: corresponde a un instante en donde la acreción ya se limpio y se tiene toda la visión.

Por otro lado también se realizó un estudio de la duración de la acreción y la

velocidad con la que se acumulo. Para evaluar la duración, se considero el tiempo que la señal de irradiancia total estuvo bajo el umbral, que se estableció. Por otro lado para evaluar la velocidad, se toma como referencia de inicio un valor peak de irradiancia, cuando la señal tiene la tendencia a bajar, y llega a bajar del umbral establecido para decretar la formación de una acreción, se toma el porcentaje de señal que predio en un periodo de tiempo determinado, por ejemplo considerando 1 minuto, si la velocidad fue del 30 %, quiere decir que se perdió el 30 %, de la intensidad en un minuto.

3.2.5. Análisis de correlación de datos espectrales y datos de Operación

Teniendo tanto los datos espectrales como los datos de proceso filtrados en la base de datos, se realiza un procedimiento de sincronización de las estampas de tiempo de ambos tipo de variable. Ambos tipos de datos están asociados a su correspondiente estampa de tiempo, pero en el caso de los datos espectrales estos se miden con intervalos de entre 1 a 3 segundos, a diferencia de los datos de proceso que se entregaron con intervalo temporal de 1 minuto. Por lo tanto para poder estudiarlos en conjunto se realizo, un procedimiento, en el cual mediante el método de interpolación, se aumento el numero de datos de proceso disponibles, asociando cada uno de los valores interpolados a una estampa de tiempo asociada a un espectro. Por lo tanto se obtiene una base de datos en donde a cada espectro calibrado, le corresponde un valor de cada una de las 4 variables de proceso de interés en este trabajo.

Luego de los procedimientos descritos anteriormente, se tiene una base de datos en la que se puede asociar un espectro a un valor de coeficiente de oxígeno, enriquecimiento de oxígeno, tasa de alimentación de concentrado y tasa de inyección de aire. Desde cada espectro se desprende además, su valor de irradiancia media y temperatura (usando método de las dos longitudes de onda). Estos valores serán los principales a analizar junto a las variables de proceso,

Para estudiar la correlación entre las variables, se hace uso de métodos basados en calcular coeficientes de correlación entre vectores de datos. En primer lugar se hizo uso del coeficiente de correlación R de Pearson, el cual que apunta aun

comportamiento lineal, se obtiene de la siguiente ecuación:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.2.4)$$

En donde r es el coeficiente de correlación de Pearson. x_i y y_i son los valores individuales de las variables X e Y, respectivamente. \bar{x} y \bar{y} son las medias de las variables X e Y, respectivamente. La suma (\sum) se extiende sobre todos los pares de datos. Este coeficiente, denotado como r , varía entre -1 y $+1$, donde, $r=1$ indica una correlación positiva perfecta. Esto significa que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace en una relación proporcional perfecta, $r=-1$ indica una correlación negativa perfecta. En este caso, cuando una variable aumenta, la otra disminuye en una proporción perfectamente inversa y $r=0$ sugiere que no hay correlación lineal entre las dos variables.

Por otro lado también se hará estudio del coeficiente de correlación de Kendall, que es una medida de correlación que evalúa la dirección de la relación entre dos variables. A diferencia del coeficiente de correlación de Pearson, que evalúa relaciones lineales, el coeficiente de Kendall es más adecuado para identificar relaciones monótonas, lo cual lo hace útil cuando los datos no se distribuyen normalmente o cuando la relación entre variables no es lineal. Se calcula mediante el siguiente método. Primero para cada par de observaciones, se cuentan los pares concordantes y discordantes. Un par de observaciones es concordante si el orden relativo de las observaciones es el mismo para ambas variables; es discordante si el orden es diferente. Luego se aplica la siguiente ecuación.

$$\tau = \frac{(\text{numero de pares concordantes}) - (\text{numero de pares discordantes})}{\frac{1}{2} \cdot n \cdot (n - 1)} \quad (3.2.5)$$

En donde τ es el coeficiente de correlación de Kendall y n total de observaciones. Un tercer coeficiente se estudiará. El coeficiente de correlación de Spearman, es una medida no paramétrica de correlación de rango, lo que significa que evalúa la relación monótona entre dos variables. Este coeficiente se basa en los rangos de los datos en lugar de los datos en sí. Si dos variables se correlacionan perfectamente

según el orden de rango, entonces Spearman será 1 o -1, dependiendo de si la relación es directa o inversa. Un valor de 0 indica que no hay correlación. Se calcula según la siguiente ecuación

$$rho = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (3.2.6)$$

En donde d_i^2 representa el cuadrado de la diferencia de rangos entre las dos variables para cada observación. Aquí, d_i es la diferencia de rangos y 2 indica que esta diferencia se eleva al cuadrado. n es el número total de observaciones.

Se realizó un análisis de cada una de las 4 variables de interés radiómetro, para temperatura e irradiancia media, para cada uno de los 3 coeficientes descritos, para los días en estudio, para lograr un análisis del comportamiento local y global de la relación entre las variables del proceso flash y las variables radiométricas medidas en línea.

Capítulo 4

Resultados

Para lograr los objetivos de este trabajo, se analizaron los datos espectrales de la semana comprendida entre el 17 al 23 de julio de 2023. Estos datos radiométricos en el rango VIS NIR fueron obtenidos en dos posiciones del Horno flash de la fundición Atlantic Copper, en Huelva, como se explica en el capítulo Metodología de este trabajo.

Para la implementación de métodos de estimación de temperatura basados en los datos espectrales, es necesario realizar una previa calibración de la señal raw que se recibe directamente desde el radiómetro, según los pasos que se explican en la metodología, en la sección de análisis de datos. Mediante el procedimiento de calibración se le da sentido radiométrico y unidades de medida, al espectro medido.

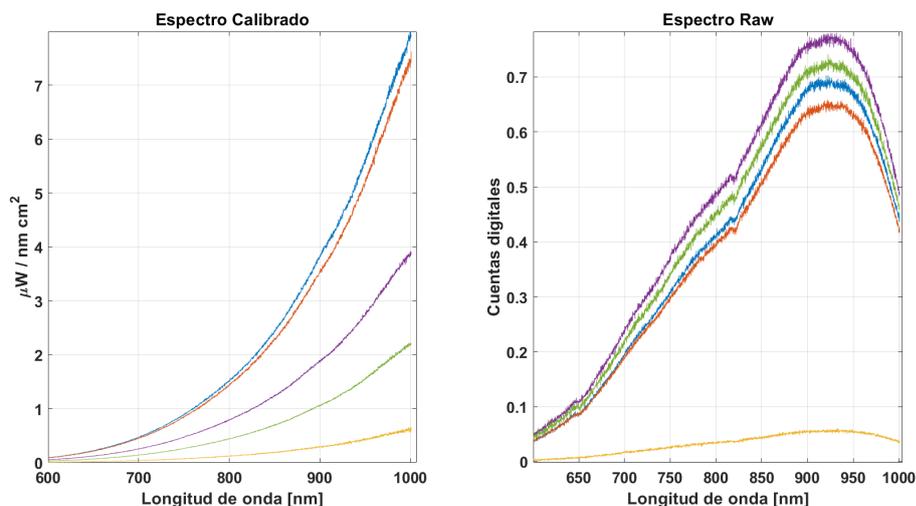


Figura 4.0.1: Ejemplo de espectro calibrado. En la imagen izquierda. Ejemplo espectro raw, antes de aplicar procedimiento de calibración. Datos Sonda quemador central de concentrado

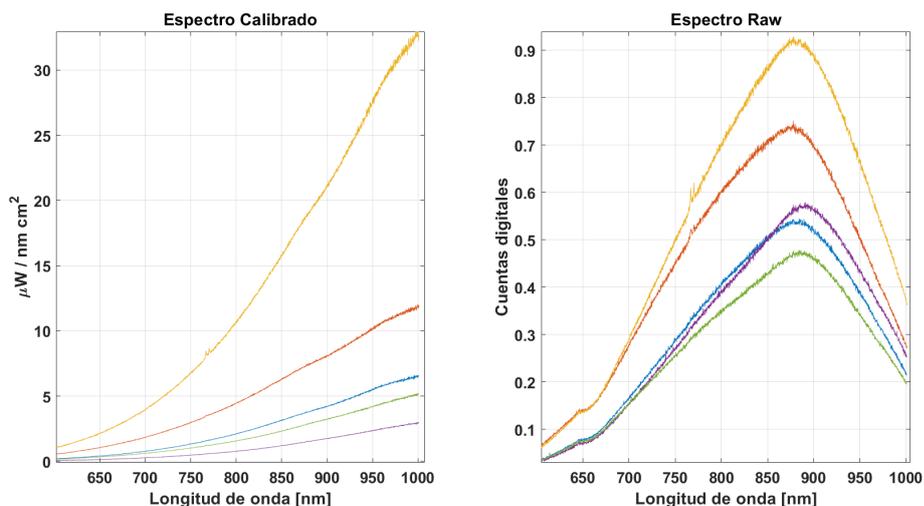


Figura 4.0.2: Ejemplo de espectro calibrado. En la imagen izquierda. Ejemplo espectro raw, antes de aplicar procedimiento de calibración. Datos Sonda quemador auxiliar

Las Figuras 4.0.1 y 4.0.2, ejemplifican el resultado del procedimiento de calibración, las imágenes de la derecha corresponden a los espectros raw, que se obtienen directamente desde el espectrómetro y las imágenes de la izquierda muestran el los espectros resultantes del proceso de calibración. En estas imágenes se aprecia que los espectros calibrados tienen formas diferentes para cada sonda y que ambas

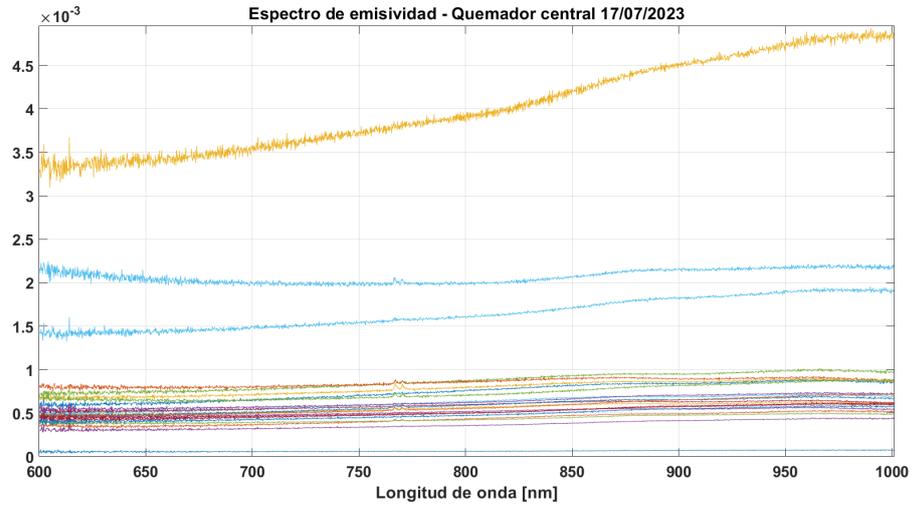
son curvas monótonas crecientes en el rango de estudio (500 a 1000 nm). La calibración entrega espectros radiométricos en unidades de $\frac{\mu W}{nmcm^2}$, los cuales serán usados para implementar los métodos de calculo de temperatura.

4.1. Estimación de Temperatura

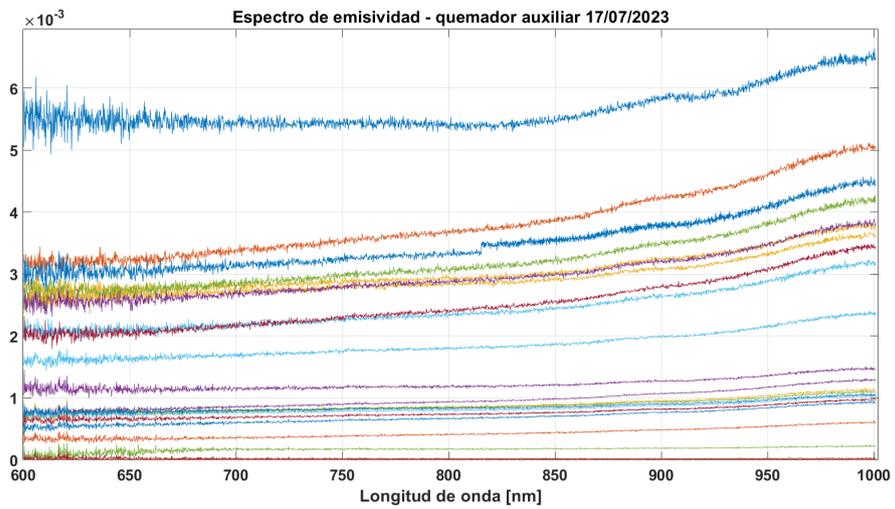
4.1.1. Implementación Método de Dos Longitudes de Onda

En primer lugar para seleccionar las dos longitudes de onda que se usaran para el calculo de la temperatura según se explica el marco teórico de este trabajo, se estudia el comportamiento de la emisividad espectral y espectro calibrado, tomando en cuenta las consideraciones expuestas en los apartados 2.2.1 y 3.2.3.1, en donde se condiciona a escoger longitudes de onda que no correspondan a zonas de emisión discontinua o absorción y que mantengan comportamiento lo más cercano a un cuerpo gris.

A continuación se muestra el resultado del calculo de la emisividad espectral para los días en estudio, para cada una de las dos sondas. Se considera una muestra de 18 espectros, equiespaciados temporalmente durante el día, para mayor representabilidad de la dinámica que tiene la emisividad a lo largo de cada jornada de medición.

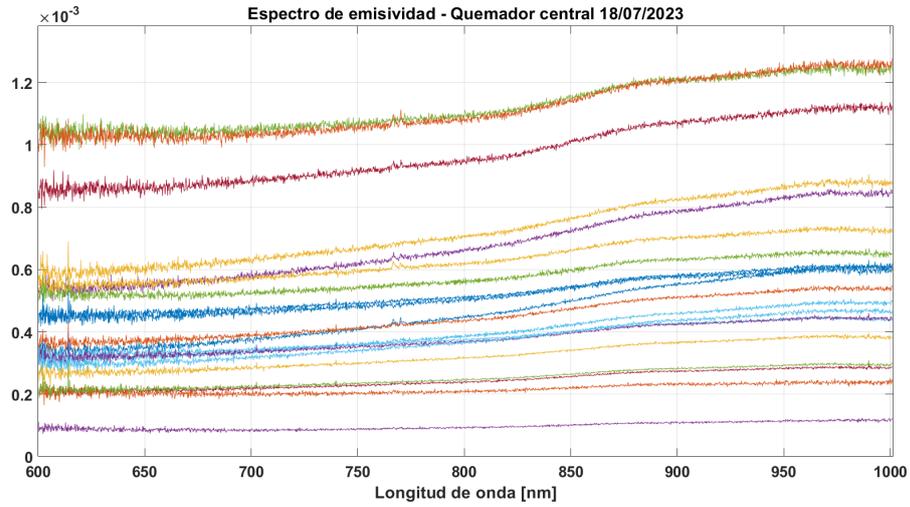


(a) Quemador central

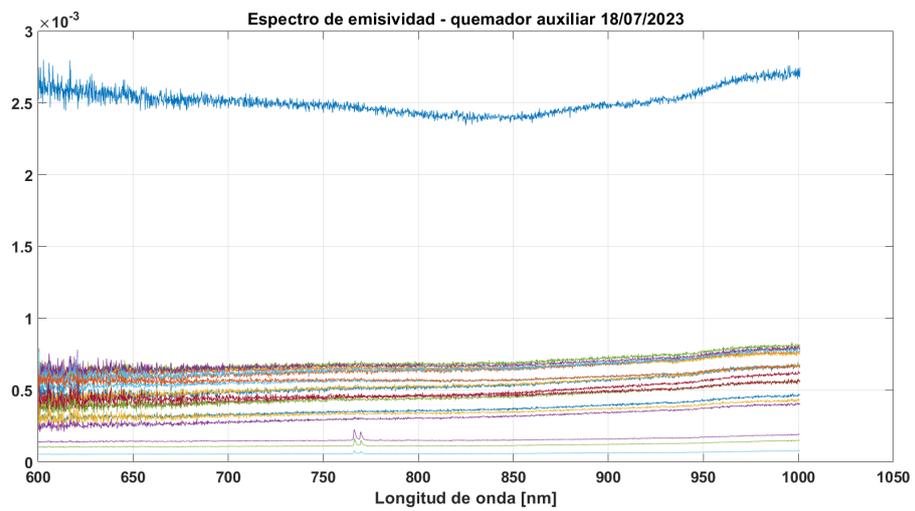


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.1: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 17 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

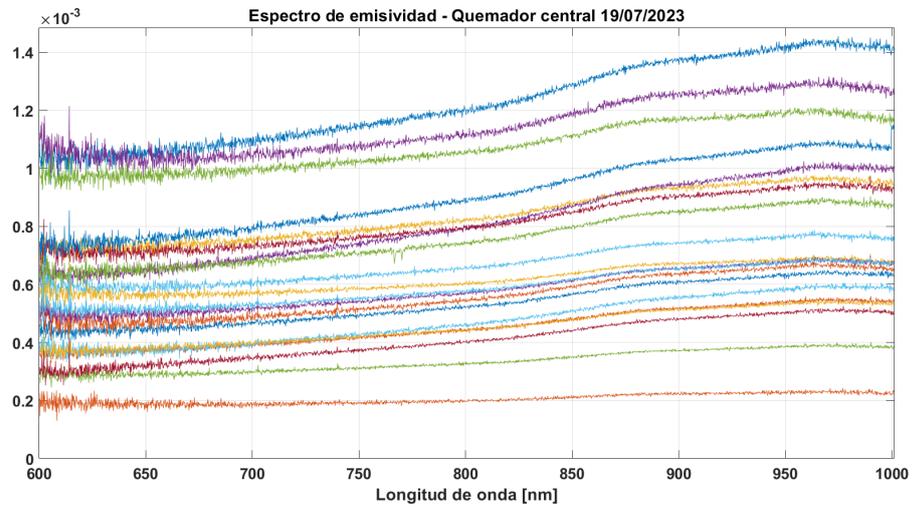


(a) Quemador central

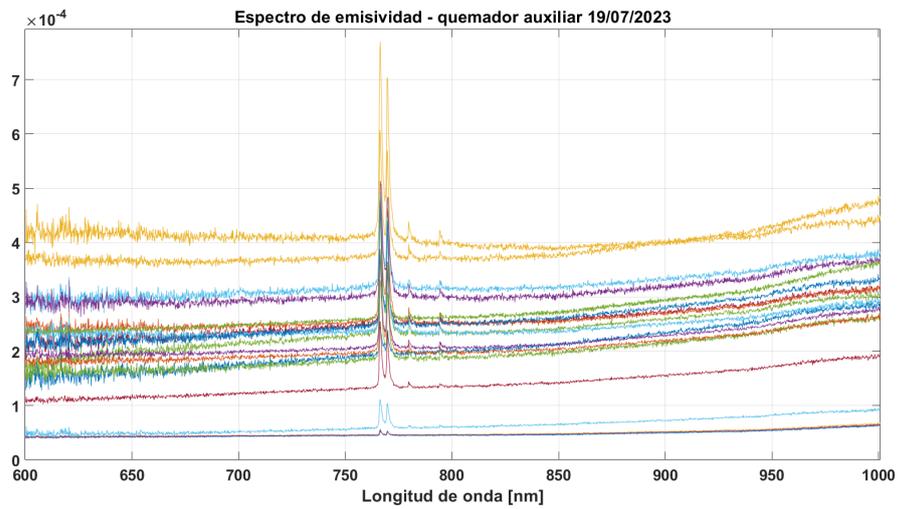


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.2: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 18 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

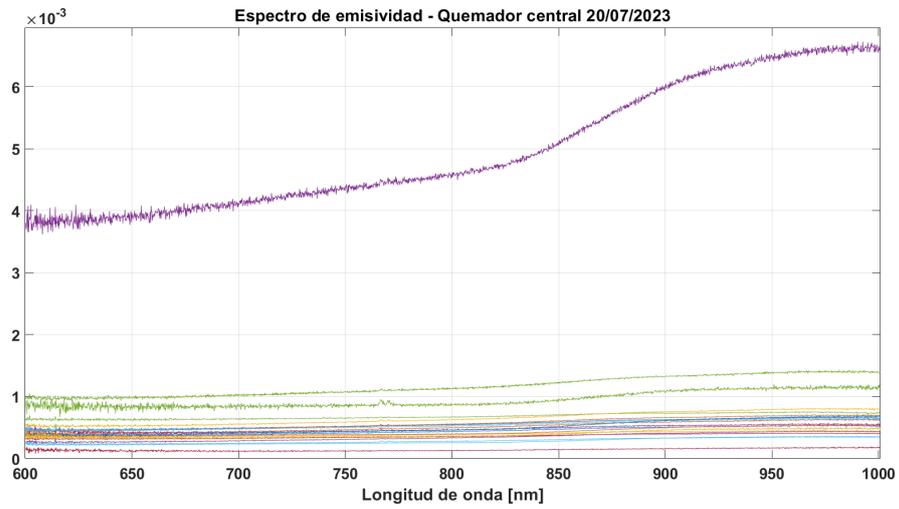


(a) Quemador central

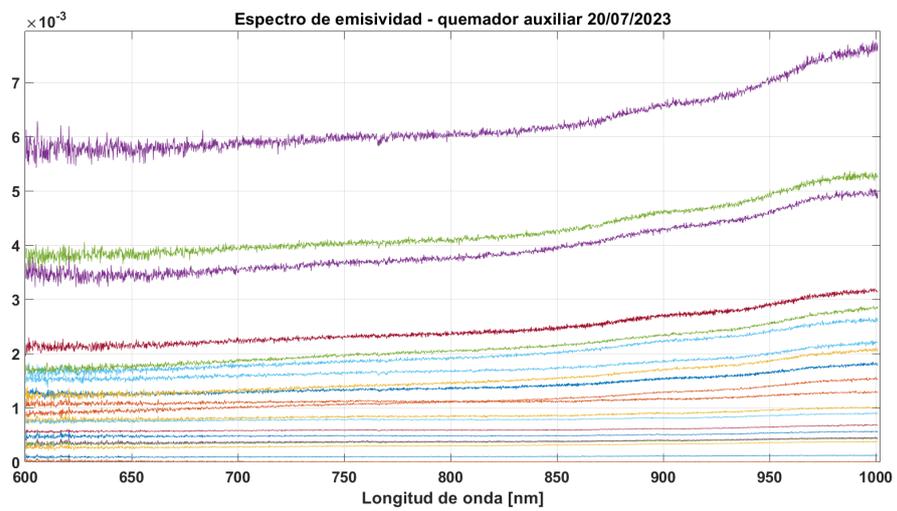


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.3: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 19 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

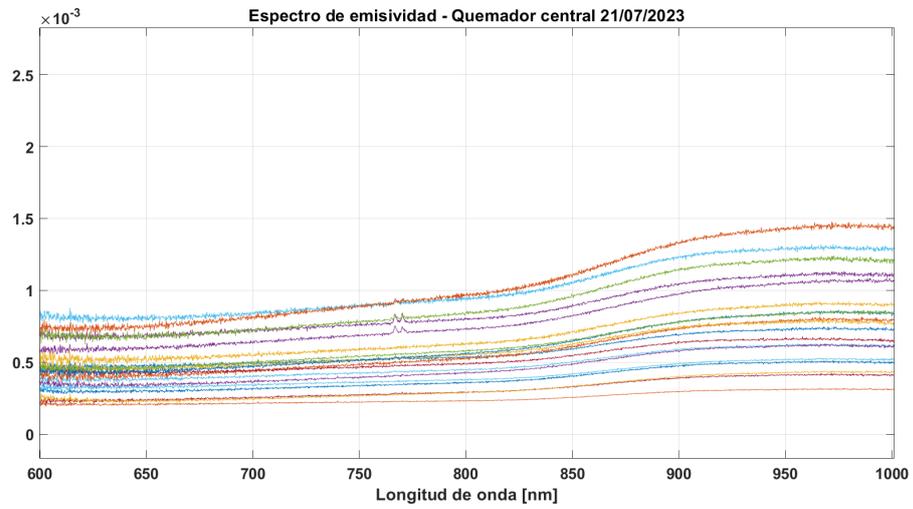


(a) Quemador central

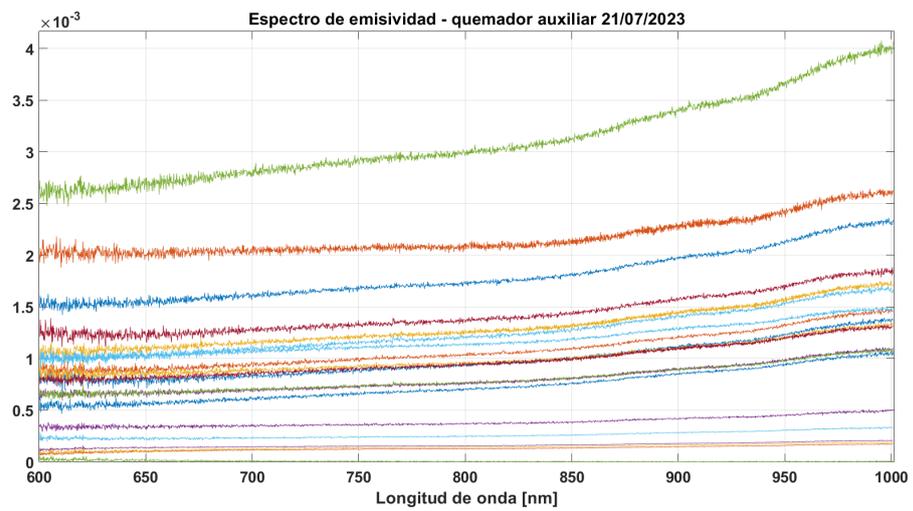


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.4: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 20 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

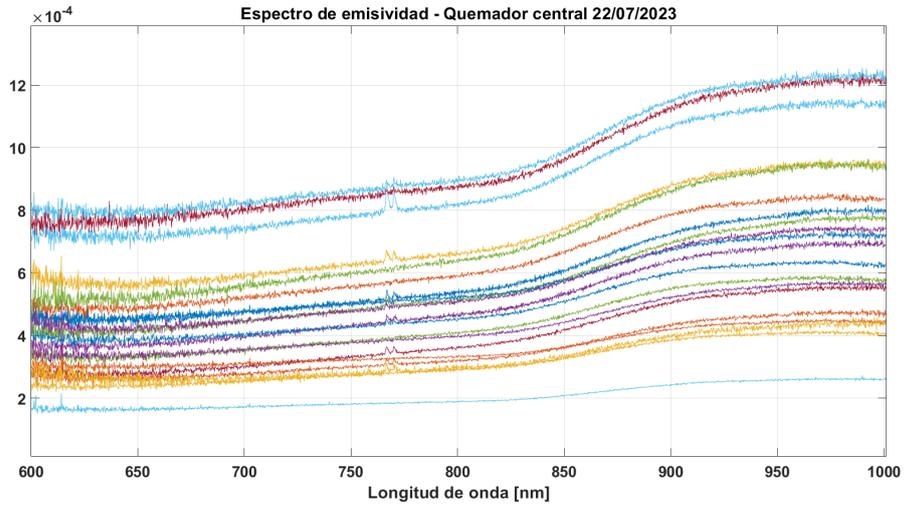


(a) Quemador central

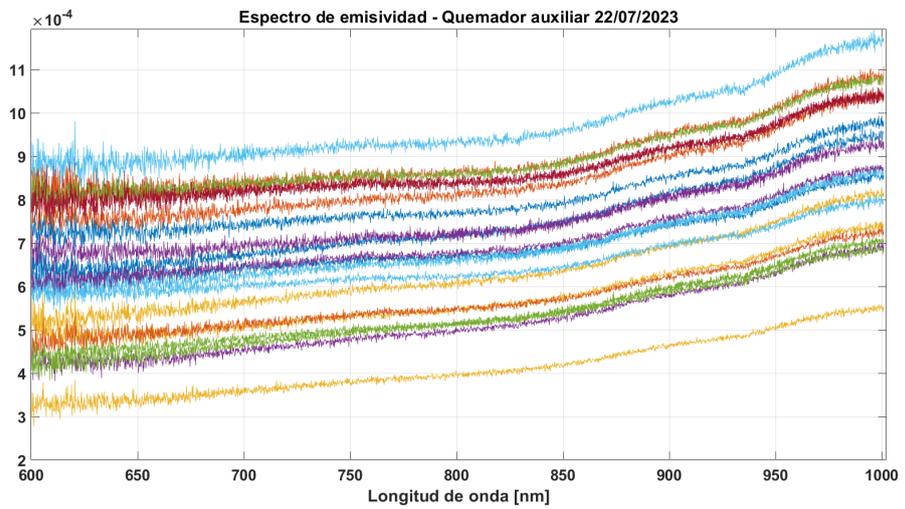


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.5: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 21 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

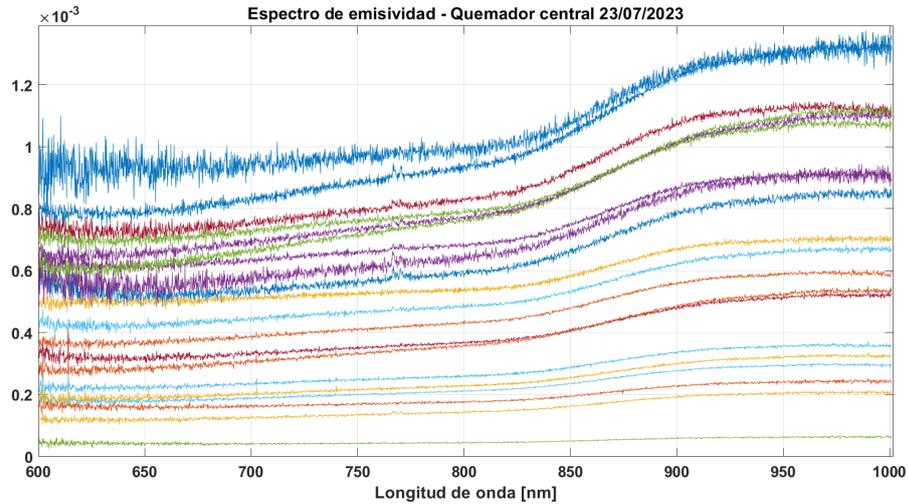


(a) Quemador central

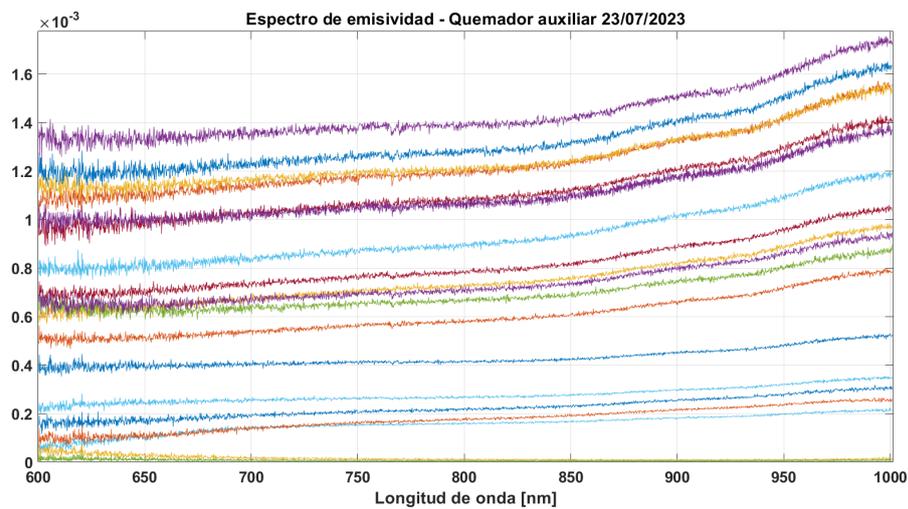


(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.6: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 22 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central



(a) Quemador central



(b) Quemador auxiliar

Figura 4.1.7: Muestra de 18 espectros de emisividad para el 23 de julio de 2023. (a) Emisividad espectral quemador central. (b) Emisividad espectral quemador central

Las figuras anteriores muestran la tendencia del comportamiento de los espectros de emisividad por día. Como las muestras son equiespaciadas temporalmente representan de buena manera el comportamiento dinámico temporal de estas. Para el análisis se considera el comportamiento que tenga la mayoría de los espectros, ya que cada jornada de medición tiene muestras que difieren significativamente ante la tendencia, por ejemplo en la figura 4.1(a), los 3 espectros superiores en

la gráfica, 2 en color celeste y uno amarillo, no serán considerados en el análisis, por diferir con la tenencia marcada por la concentración de espectros con media en torno a $0,8 \times 10^{-3}$. Desde los gráficos podemos notar la presencia de emisiones discontinuas a los espectros, en longitudes de onda puntuales, por ejemplo los espectros de emisividad mostrados en la figura 4.6(a), muestran dos peaks en 776,5 y 770,1 nm, a lo largo de todo el día, no se profundizará en la razón de estos, pero se considera que están en valores espectrales que no cumplen con los criterios buscados para el método de 2 longitudes de onda. Por otro lado, desde los gráficos se pueden distinguir zonas del espectro que poseen una pendiente marcada, por lo que claramente no tienen un valor constante de emisividad en sus longitudes de onda, por lo que se descartan todo los valores de λ en estos segmentos, los cuales están concentrados en los límites laterales, por lo que el análisis lleva a buscar valores idóneos al método en la zona media del espectro, entre 700 y 850 nm, luego de analizar cada día.

Como resultado del análisis de las condiciones antes mencionadas, se resuelva que las zonas del espectro aledañas a los 750 nm y a 820 nm, tienen un comportamiento, acorde a las condiciones deseadas, para datos desde ambas sondas. Por lo tanto los valores escogidos para implementar el método de dos longitudes de onda serán, $\lambda_1 = 750nm$ y $\lambda_2 = 820nm$, ya que estos valores están en una zona continua del espectro, la pendiente entre ellos no es marcada, como en los bordes, y no se ven afectados por emisiones discontinuos.

Una vez se han escogido los valores de λ , se debe fijar un valor para la razón $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$. Esto se logra mediante el cálculo de la razón para los valores λ escogidos, para los espectros diarios, eliminando del análisis valores outlier, que difieran significativamente como ya se mencionó.

Fecha	Media diaria razón emisividad
17/07/23	1.23
18/07/23	1.05
19/07/23	1.13
20/07/23	1.30
21/07/23	1.04
22/07/23	1.25
23/07/23	1.10
Media Semanal	1.16

Cuadro 4.1.1: Tabla de reporte media diaria Quemador Central

Fecha	Media diaria razón emisividad
17/07/23	1.17
18/07/23	1.07
19/07/23	1.13
20/07/23	1.19
21/07/23	1.05
22/07/23	1.21
23/07/23	1.10
Media Semanal	1.13

Cuadro 4.1.2: Tabla de reporte media diaria Quemador auxiliar

Las tablas 4.1.1 y 4.1.2, nos entregan el valor medio semanal, desde el cálculo de la media diaria para los datos de cada sonda, de la razón de emisividad de entre las longitudes de onda que serán el valor usados para implementar el método de las 2 longitudes de onda con λ_1 y λ_2 . Por lo tanto los valores que se usaran para implementar el método son 1,16 para el quemador auxiliar y 1.13 para el quemador central.

Una vez se se tiene fija la razón de emisividades, para implementar el método se reemplazan los valores conocidos en la ecuación 2.2.6, en donde la razón $\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$, sera el valor estimado anteriormente, 1,16 y 1.13, para cada sonda respectivamente. $E_1(\lambda_1, T)$ y $E_2(\lambda_2, T)$, son los valores de la irradiancia λ_1 y λ_2 . Como resultado se obtiene un valor de temperatura para cada espectro.

A continuación se reportan los resultados de la implementación del método de dos longitudes de onda, para las 2 posiciones de las sondas, para los días en estudio.

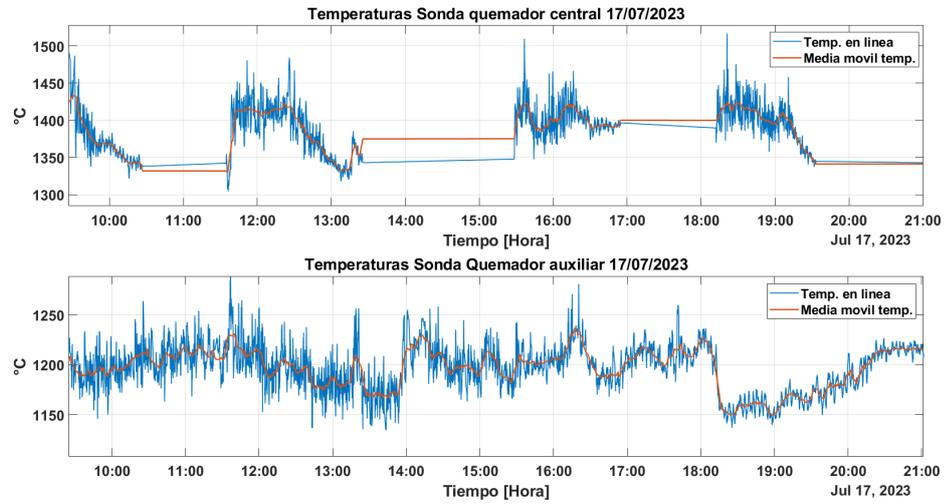


Figura 4.1.8: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 17 de julio de 2023

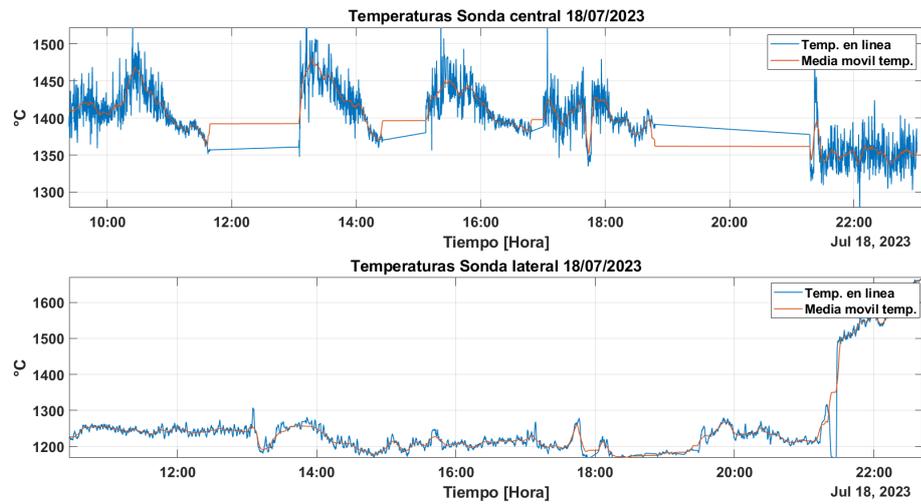


Figura 4.1.9: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 18 de julio de 2023

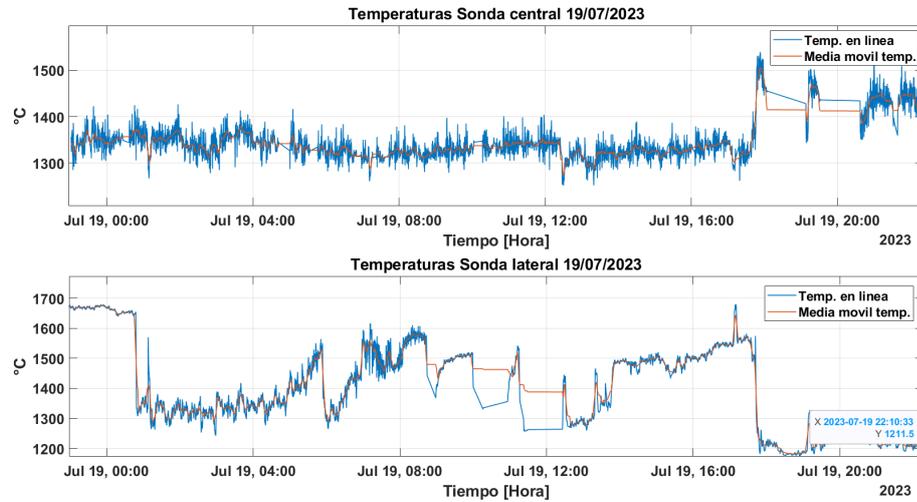


Figura 4.1.10: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 19 de julio de 2023

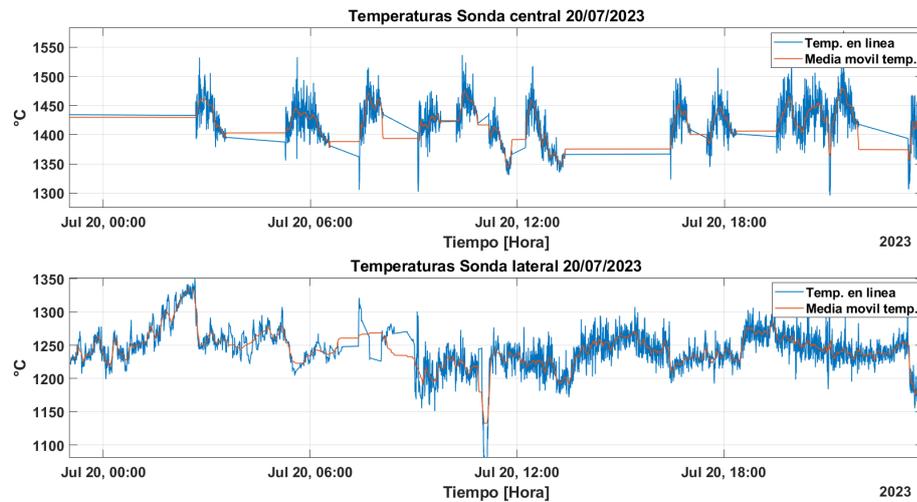


Figura 4.1.11: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 20 de julio de 2023

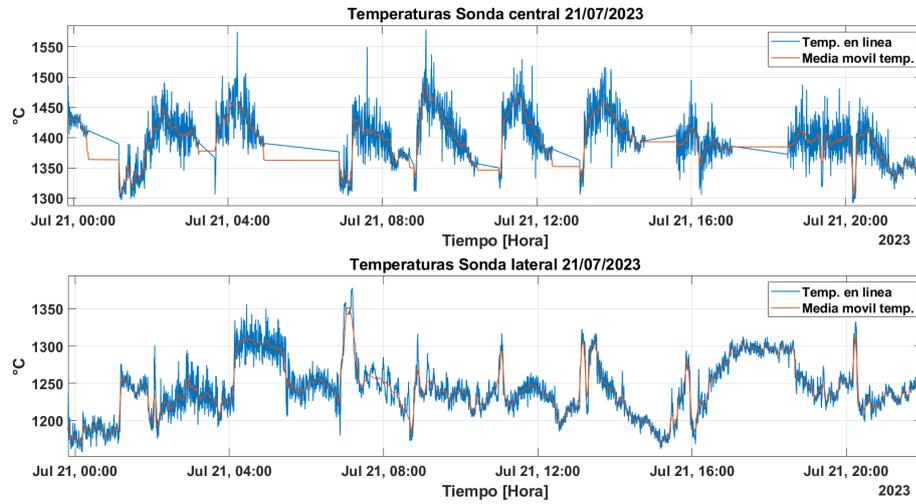


Figura 4.1.12: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 21 de julio de 2023

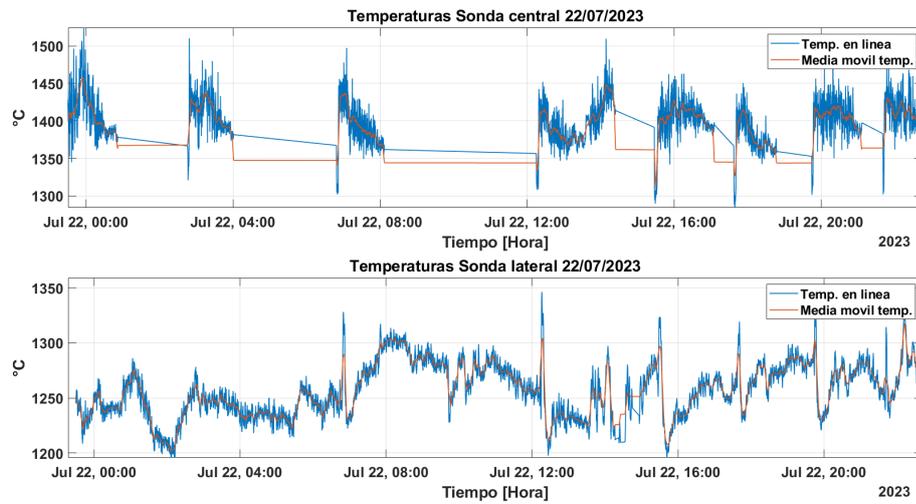


Figura 4.1.13: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 22 de julio de 2023

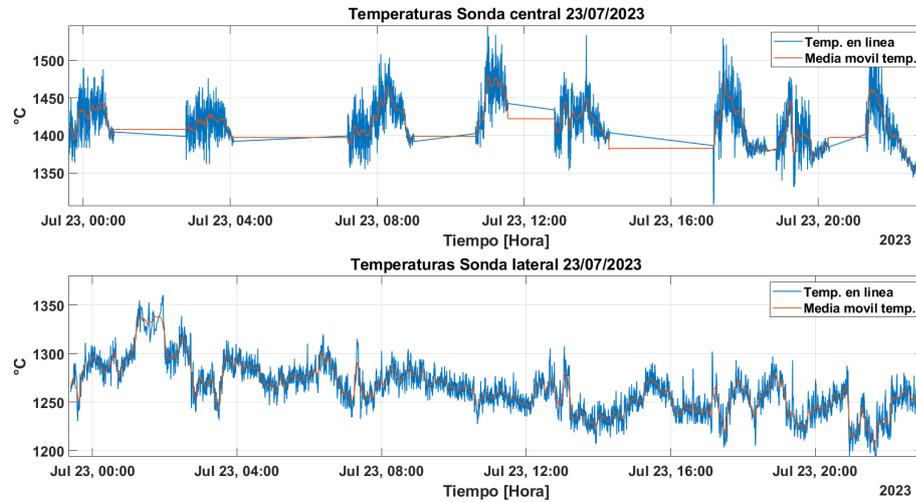


Figura 4.1.14: Reporte de la estimación de temperatura para las sondas en los quemadores central y auxiliar, para el 23 de julio de 2023

En figuras anteriores que reportan tanto la temperatura medida en línea, como la media móvil de ventana de 300 muestras, para la semana en estudio (17 al 23 de julio de 2023), los espacios que se representan con una línea recta en las temperaturas de la sonda central o del quemador central, corresponden a momentos en los cuales existe obstrucción en el campo de visión de la sonda hacia la reacción, este fenómeno de formación de acreciones también se analizó en esta tesis.

Las medias diarias son reportadas en las siguientes tablas.

Fecha	Media diaria temperatura lateral
17/07/23	1196 °C
18/07/23	1203°C
19/07/23	1418°C
20/07/23	1242°C
21/07/23	1241°C
22/07/23	1258°C
23/07/23	1262°C

Cuadro 4.1.3: Reporte de la temperatura media para la sonda lateral

Fecha	Media diaria temperatura central
17/07/23	1391 °C
18/07/23	1403 °C
19/07/23	1343°C
20/07/23	1418°C
21/07/23	1393°C
22/07/23	1397°C
23/07/23	1412°C

Cuadro 4.1.4: Reporte de la temperatura media para la sonda del quemador central

Los resultados que se han expuesto, no tienen un valor de comparación, ya que no existe instrumento para medición de la temperatura de la llama en el interior de hornos flash, pero si se puede validar, considerando estimaciones de balance de masa y energía, que estiman que la temperatura de la llama de reacción en el interior de hornos flash puede oscilar entre 1200 °C y 1600 °C , como se desprende de los trabajos de [Piceros et al. \(2022\)](#) y [Jorgensen and Koh \(2001\)](#), por lo que los valores calculados con el método de dos longitudes de onda están dentro de valores esperables.

4.2. Análisis formación de acreciones

La formación de acreciones se abordó en esta tesis, analizando el valor de la irradiancia espectral media de cada medición puntual, y como este valor cambia en el tiempo. En la semana en estudio, solo existieron eventos de formación de acreciones en la tobera del quemador central, por lo que el análisis se centrará en la información de la sonda de este quemador. La irradiancia espectral media, se expresa según la siguiente ecuación.

$$E_{media} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} E(\lambda_i, T)}{n} \quad (4.2.1)$$

Donde n , es la cantidad de bandas de cada espectro. Los resultados de la ecuación 4.2.1, se pueden asociar a su estampa de tiempo y graficar su valor en el tiempo. Dado que el fenómeno de formación de acreciones, genera una obstrucción a la

vista que tiene la sonda de la reacción, las acreciones generan bajas en el valor de irradiancia media, por lo tanto este parámetro se usa para definir un valor de umbral, el cual actúa como un limite bajo el cual se identifica la obstrucción de la vista de la sonda y por lo tanto de la tobera por efecto de la acumulación de material en sus bordes.

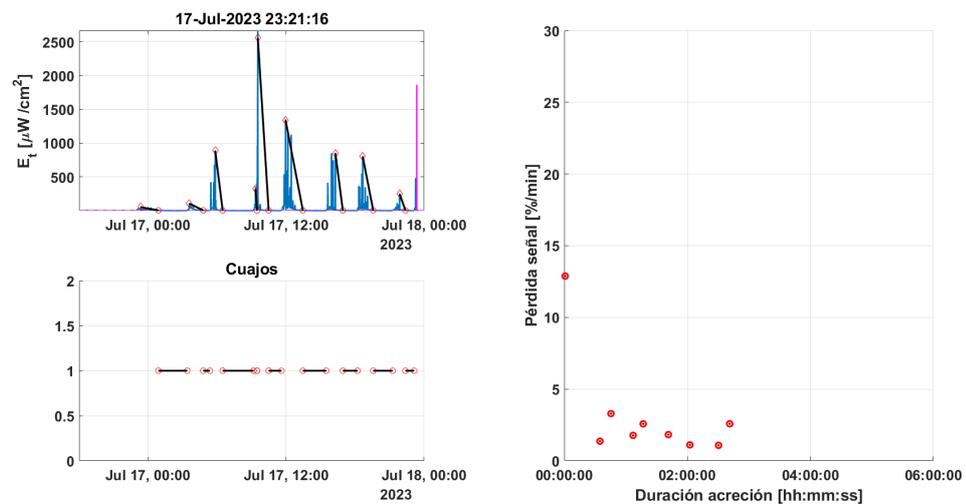


Figura 4.2.1: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 17 de julio de 2023

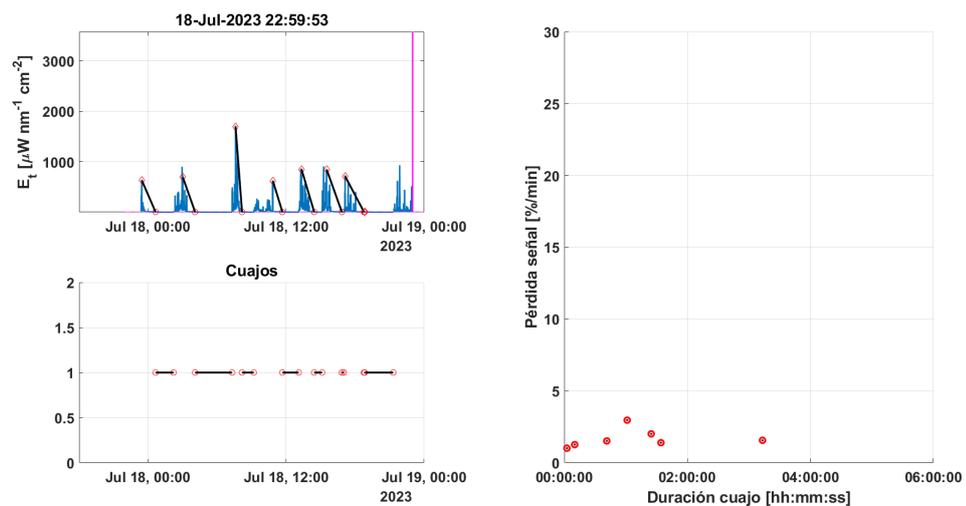


Figura 4.2.2: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 18 de julio de 2023

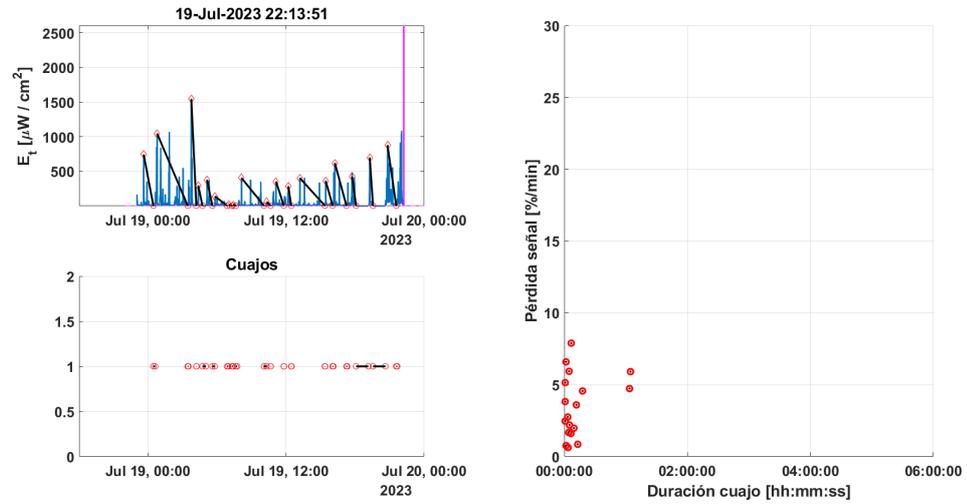


Figura 4.2.3: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 19 de julio de 2023

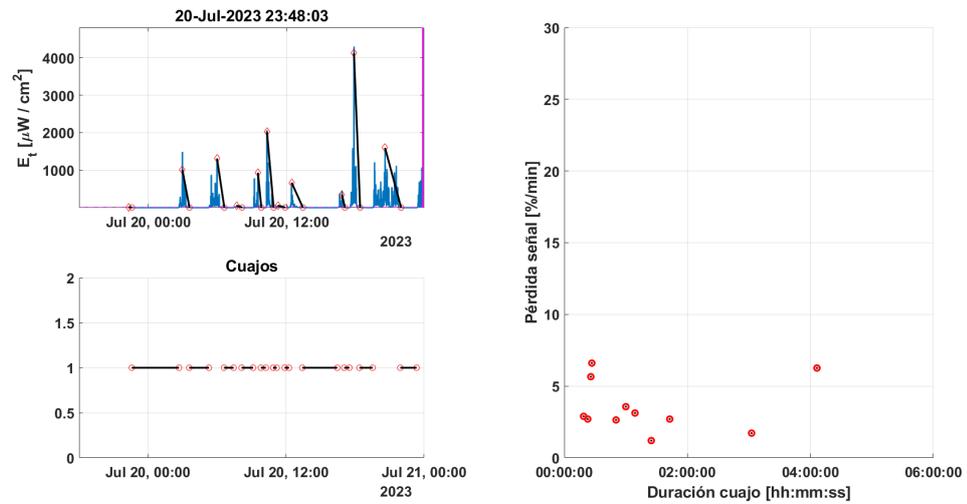


Figura 4.2.4: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 20 de julio de 2023

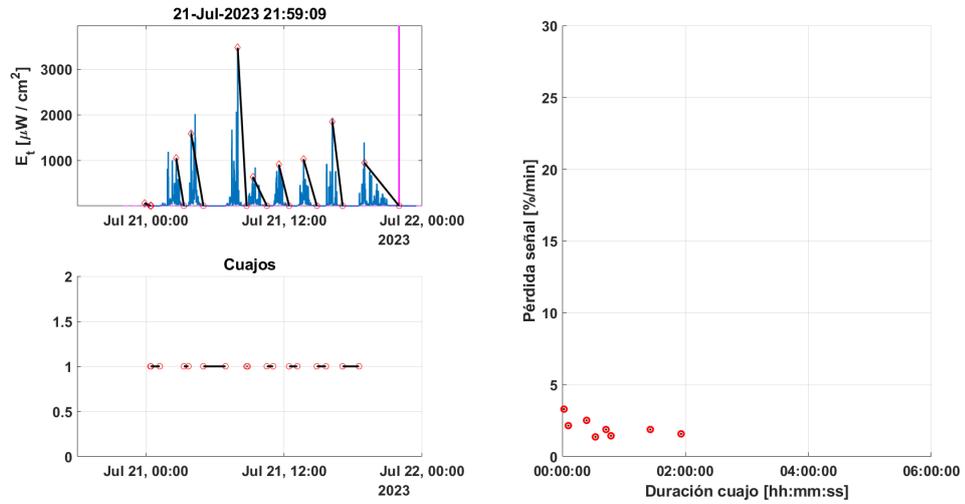


Figura 4.2.5: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 21 de julio de 2023

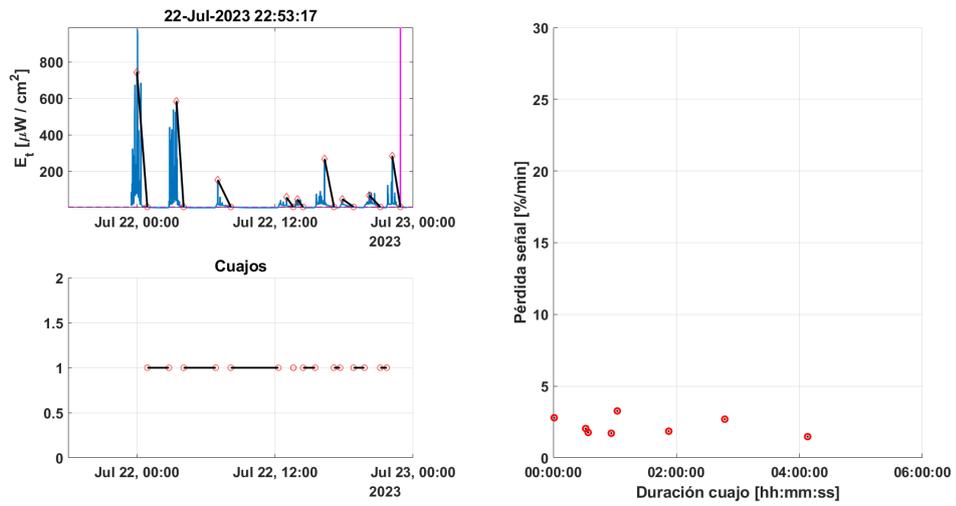


Figura 4.2.6: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 22 de julio de 2023

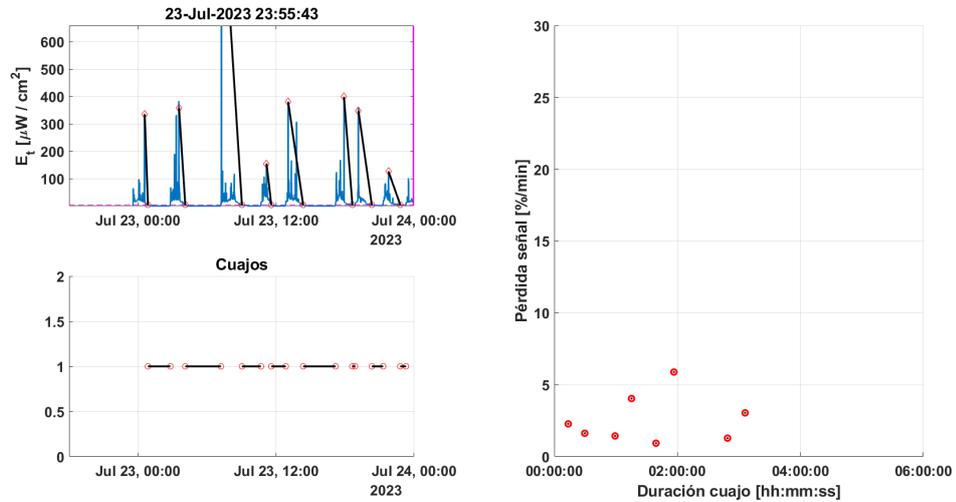


Figura 4.2.7: Reporte de identificación de acreciones del quemador central, para el 23 de julio de 2023

Los gráficos anteriores implementan el método para identificar la formación de una acrecion, según se explica en la metodología. En los gráficos de la derecha se reporta la duración y velocidad de formación que tiene el evento de obstrucción. Podemos notar que el día 19 de julio, reportado en 4.2.3, se muestra un comportamiento que difiere con los otros días, se acumulan mas eventos de acrecion de duración baja. Esto es una consecuencia de la operación del horno que ese día utilizo soporte térmico (inyectar fuel mediante el quemador auxiliar), lo que se refleja en 4.3(b), en donde se aprecian discontinuos muy marcados en torno a los 770 nm, asociados a combustión de hidrocarburos.

Fecha	Numero de acreciones	Duracion media [Horas]	Velocidad media de formación [%]	Porcentaje de tiempo en acreción [%]
17/07/2023	9	1:13	3,70 %	45,60 %
18/07/2023	8	0:58	2,67 %	32,20 %
19/07/2023	18	0:09	5,10 %	11,50 %
20/07/2023	11	1:10	4,30 %	45,80 %
21/07/2023	8	0:45	2,30 %	25 %
22/07/2023	8	0:52	2,60 %	28,80 %
23/07/2023	8	1:07	3,90 %	37 %
Media	10	0:53	4,09 %	32,2 %

Cuadro 4.2.1: Tabla de reporte de la dinámica de formación de acreciones quemador central del 17 al 23 de julio de 2023.

La Tabla 4.2.1, entrega un resumen de los valores de media diaria y semanal, del número de eventos de acreción diario, la duración de cada uno de estos, la velocidad de formación (expresada en porcentaje de pérdida de señal por minuto) y el porcentaje de tiempo que el quemador está obstruido por efecto de una acreción. El día 19 de julio, también refleja una diferencia notable frente a los valores de los otros días, con mayor número de eventos de acreción pero en tiempos más cortos, eso nuevamente asociado a la inyección de fuel, como soporte térmico.

La obstrucción de toberas en los quemadores resulta un problema no atacado, debido a la difícil detección de estas. El ciclo de una acreción, va desde que comienza a formarse, hasta que cae por efecto de su propio peso, por lo tanto la duración de la obstrucción, depende de las condiciones de operación del quemador, y de los concentrados que se estén combustionando. Si la formación de la acreción es lenta y a baja temperatura en la zona, esta puede solidificarse al punto de fusionarse con la tobera y ser muy compleja de liberar.

4.3. Análisis correlación datos espectrales y datos de proceso

La relación entre la temperatura y la radiación con factores directos que influyen en la reacción de carácter exotérmico en hornos flash, como el coeficiente de

oxígeno, son asociables a las propiedades de la llama de reacción. Como análisis preliminar se estudio el comportamiento de las medias diarias de las variable proceso de interés y de la temperatura calculada a partir de los datos radiómetros. Los datos fueron previamente filtrados para evitar incorporar valores anómalos al análisis.

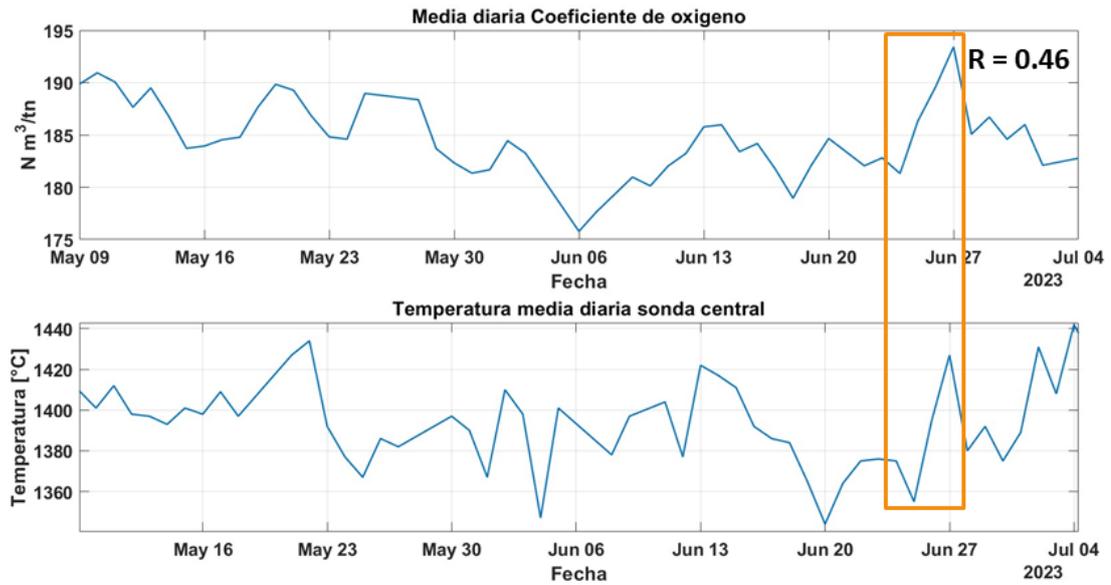


Figura 4.3.1: Gráficos paralelos de las medias diarias de coeficiente de oxígeno y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023

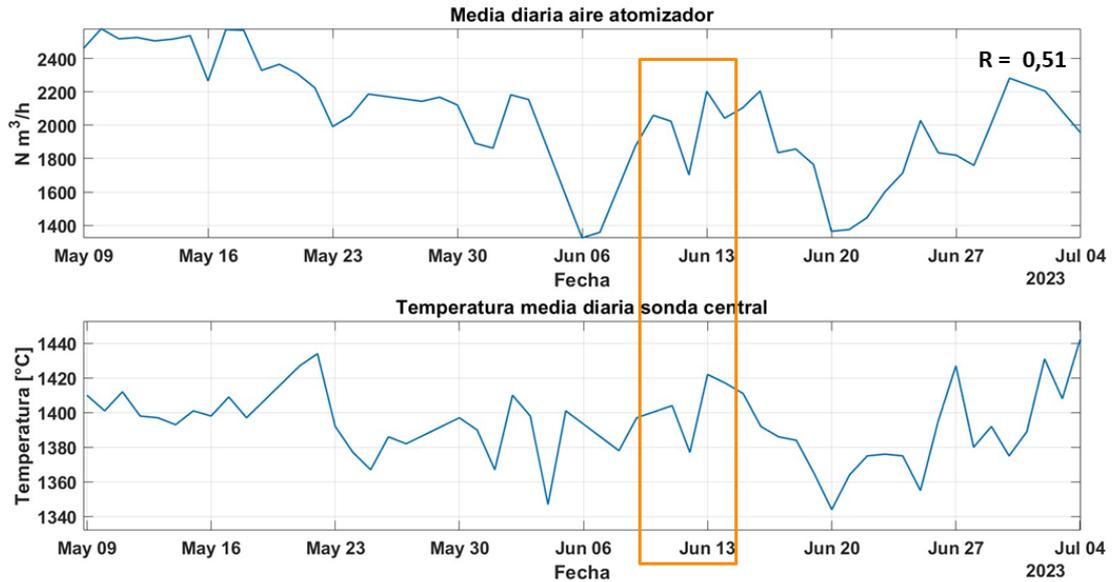


Figura 4.3.2: Gráficos paralelos de las medias diarias de flujo de aire y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023

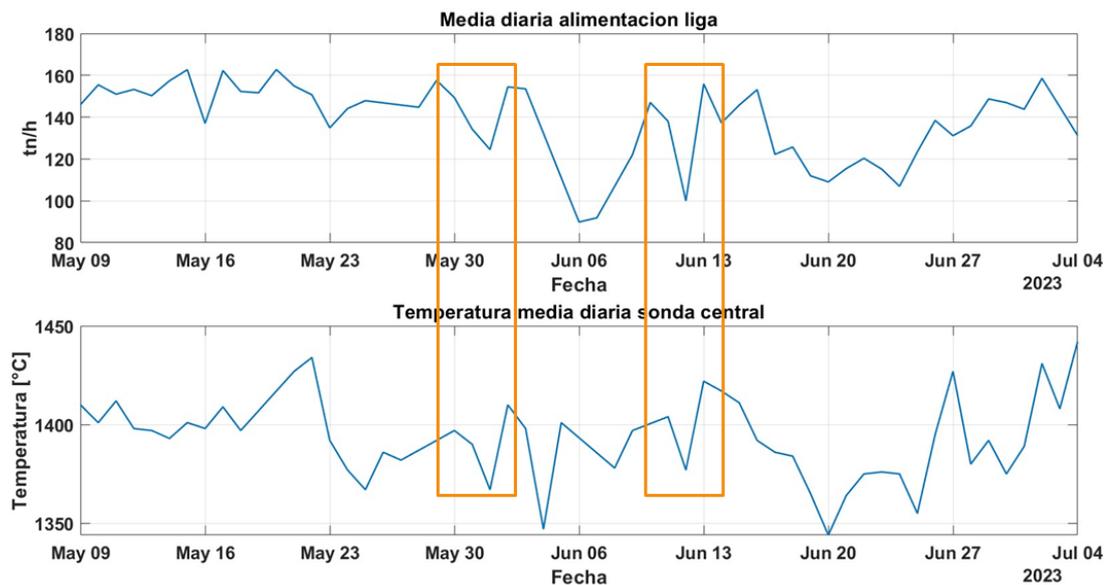


Figura 4.3.3: Gráficos paralelos de las medias diarias de flujo de concentrado o liga y temperatura, para el periodo entre el 9 de mayo y 4 de julio de 2023

De forma exploratoria se calculo el coeficiente de correlación R de Pearson, indicado en cada figura. Se destacan en las figuras anteriores zonas en las cuales existe una clara tendencia a un comportamiento relacionado. Si bien las zonas son tramos temporales puntuales, son indicativas de comportamiento dependiente entre las

variables.

Ahora haciendo uso de la base de datos filtrada para los días de interés de este trabajo, con datos espectrales y relacionados al proceso, se realiza el estudio de la correlación entre estos datos por día. Siguiendo los pasos descritos en la metodología se implementan los cálculos de coeficientes.

Dado el gran volumen de datos que se calcularen en este apartado, se mostraran solo algunos gráficos representativos del comportamiento de las variables.

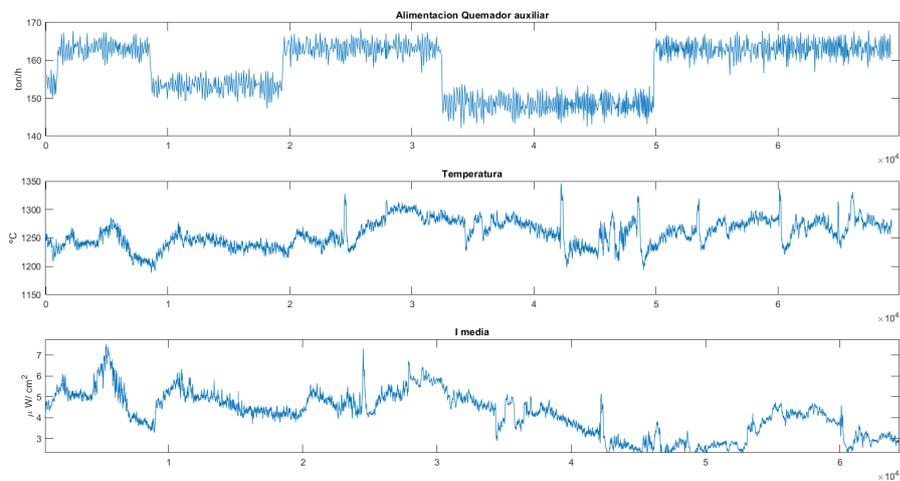


Figura 4.3.4: Gráficos paralelos de alimentación de concentrado, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda lateral, para el 22

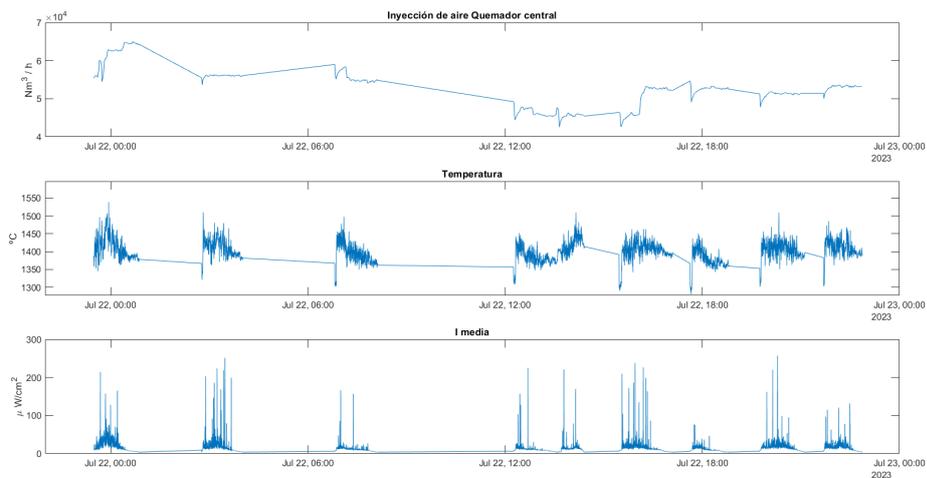


Figura 4.3.5: Gráficos paralelos de inyección de aire, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22

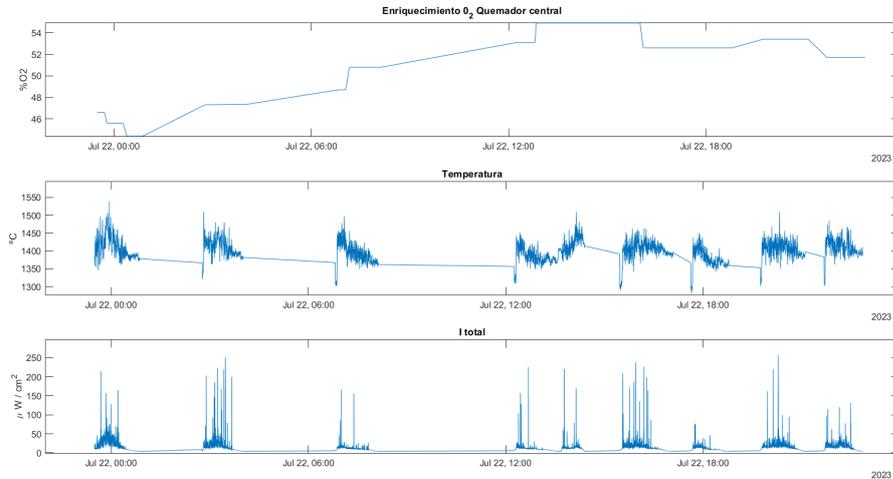


Figura 4.3.6: Gráficos paralelos de enriquecimiento de oxígeno, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22

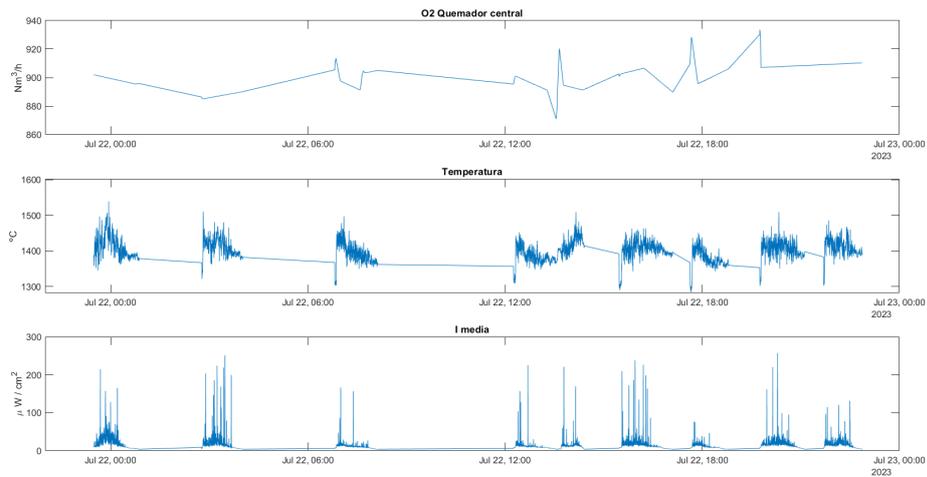


Figura 4.3.7: Gráficos paralelos de coeficiente de oxígeno, temperatura e irradiancia total, con mediciones sonda central, para el 22

Desde los gráficos se observa intuitivamente que no existe una clara correlación entre la temperatura e irradiancia media, en relación a las variables de proceso. De todos modos se han implementado todo los cálculos mencionados para las 4 variables de proceso y para los 3 coeficientes de correlación propuestos. a continuación se reportan los resultados para los días en estudio.

17/07/2023	V. de proceso	V. espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	0.151	0.0322	
		I media.	-0.004	-0.0566	
Kendall		Temperatura	0.085	0.0543	
		I media.	0.046	-0.2022	
Spearman		Temperatura	0.145	0.0838	
		I media.	0.067	-0.3256	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	-0.142	-0.0750
			I media.	0.009	0.0315
Kendall			Temperatura	-0.103	0.0045
			I media.	-0.048	0.2561
Spearman			Temperatura	-0.174	-0.0114
			I media.	-0.076	0.4404
Pearson	Alimentación		Temperatura	-0.070	0.0232
			I media.	-0.032	0.0021
Kendall			Temperatura	-0.055	0.0098
			I media.	0.001	0.0308
Spearman			Temperatura	-0.082	0.0149
			I media.	0.003	0.0450
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	0.169	0.0364
			I media.	0.008	-0.0337
Kendall			Temperatura	0.207	0.0301
			I media.	0.080	-0.1790
Spearman			Temperatura	0.280	0.0377
			I media.	0.113	-0.2982

Cuadro 4.3.1: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 17 de julio de 2023

18/07/2023	V de proseso	V espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	0.427	-0.7537	
		I media.	-0.080	-0.4392	
Kendall		Temperatura	0.161	-0.1361	
		I media.	-0.113	-0.1270	
Spearman		Temperatura	0.250	-0.2124	
		I media.	-0.178	-0.2209	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	0.414	-0.7456
			I media.	0.011	-0.3789
Kendall			Temperatura	0.262	-0.5216
			I media.	-0.067	-0.2441
Spearman			Temperatura	0.362	-0.6692
			I media.	-0.083	-0.3236
Pearson	Alimentación		Temperatura	0.545	-0.8673
			I media.	-0.067	-0.4874
Kendall			Temperatura	0.161	-0.2898
			I media.	-0.126	-0.2339
Spearman			Temperatura	0.253	-0.4234
			I media.	-0.192	-0.3616
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	0.566	-0.9623
			I media.	-0.056	-0.5814
Kendall			Temperatura	0.143	-0.3450
			I media.	-0.126	-0.2933
Spearman			Temperatura	0.222	-0.4894
			I media.	-0.200	-0.4609

Cuadro 4.3.2: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 18 de julio de 2023

19/07/2023	V de proseso	V espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	-0.058	0.0014	
		I media.	-0.038	0.1270	
Kendall		Temperatura	-0.143	0.0946	
		I media.	-0.064	-0.0809	
Spearman		Temperatura	-0.214	0.1134	
		I media.	-0.096	-0.1336	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	0.373	-0.3543
			I media.	0.086	-0.2510
Kendall			Temperatura	0.285	-0.2665
			I media.	0.141	-0.1315
Spearman			Temperatura	0.430	-0.3664
			I media.	0.204	-0.2060
Pearson	Alimentación		Temperatura	0.144	-0.2152
			I media.	-0.002	0.0449
Kendall			Temperatura	-0.045	-0.0713
			I media.	-0.038	-0.1593
Spearman			Temperatura	-0.058	-0.1349
			I media.	-0.053	-0.2557
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	0.798	-0.6657
			I media.	0.120	-0.2544
Kendall			Temperatura	0.375	-0.2622
			I media.	0.164	-0.4090
Spearman			Temperatura	0.522	-0.4045
			I media.	0.237	-0.5948

Cuadro 4.3.3: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 19 de julio de 2023

20/07/2023	V de proceso	V espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	0.305	0.4076	
		I media.	0.098	-0.1884	
Kendall		Temperatura	0.181	0.2015	
		I media.	0.220	-0.1208	
Spearman		Temperatura	0.274	0.3192	
		I media.	0.324	-0.2108	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	-0.178	-0.3186
			I media.	-0.098	0.1260
Kendall			Temperatura	-0.141	-0.1503
			I media.	-0.219	-0.0143
Spearman			Temperatura	-0.203	-0.2380
			I media.	-0.310	0.0131
Pearson	Alimentación		Temperatura	0.335	0.4323
			I media.	0.088	-0.2071
Kendall			Temperatura	0.191	0.2732
			I media.	0.208	-0.2340
Spearman			Temperatura	0.290	0.4119
			I media.	0.310	-0.3574
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	0.141	0.1732
			I media.	0.058	-0.0216
Kendall			Temperatura	0.100	0.0904
			I media.	0.037	-0.0557
Spearman			Temperatura	0.152	0.1290
			I media.	0.062	-0.0979

Cuadro 4.3.4: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 20 de julio de 2023

21/07/2023	V de proceso	V espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	0.115	-0.0794	
		I media.	0.028	0.2376	
Kendall		Temperatura	0.090	-0.0500	
		I media.	-0.020	0.1566	
Spearman		Temperatura	0.131	-0.0737	
		I media.	-0.026	0.2174	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	-0.010	0.1679
			I media.	-0.019	-0.1353
Kendall			Temperatura	-0.025	0.0750
			I media.	0.035	-0.1223
Spearman			Temperatura	-0.034	0.1128
			I media.	0.043	-0.1594
Pearson	Alimentación		Temperatura	0.127	-0.0379
			I media.	0.018	0.2638
Kendall			Temperatura	0.079	-0.0459
			I media.	-0.045	0.1592
Spearman			Temperatura	0.120	-0.0711
			I media.	-0.070	0.2394
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	-0.089	-0.1008
			I media.	-0.026	-0.1031
Kendall			Temperatura	-0.086	-0.0883
			I media.	-0.057	-0.2429
Spearman			Temperatura	-0.123	-0.1430
			I media.	-0.075	-0.3565

Cuadro 4.3.5: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 21 de julio de 2023

22/07/2023	V de proceso	V espectral	Central	Lateral	
Pearson	Aire quemador	Temperatura	0.079	-0.2734	
		I media.	0.009	0.6084	
Kendall		Temperatura	0.029	-0.2069	
		I media.	-0.020	0.4189	
Spearman		Temperatura	0.044	-0.3245	
		I media.	-0.038	0.6296	
Pearson		Enriquesimiento 02	Temperatura	-0.088	0.4060
			I media.	-0.045	-0.6422
Kendall			Temperatura	-0.025	0.2432
			I media.	0.015	-0.4656
Spearman			Temperatura	-0.038	0.3529
			I media.	0.022	-0.6549
Pearson	Alimentación		Temperatura	-0.003	0.1612
			I media.	-0.041	0.2168
Kendall			Temperatura	-0.012	0.1044
			I media.	-0.043	0.1357
Spearman			Temperatura	-0.018	0.1513
			I media.	-0.063	0.1964
Pearson		Coeficiente O2	Temperatura	-0.067	0.4416
			I media.	0.055	-0.0942
Kendall			Temperatura	0.023	0.3062
			I media.	0.117	-0.0692
Spearman			Temperatura	0.042	0.4733
			I media.	0.169	-0.1105

Cuadro 4.3.6: Tabla de reporte coeficientes de correlación, quemador central y auxiliar, para el 22 de julio de 2023

Lamentablemente no se logro acceder a los datos de procesos de día 23 de julio, por lo que solo se han considerado para el estudio de la correlación los días del 17 al 22 de julio.

Capítulo 5

Conclusiones y Comentarios

5.1. Cálculos de temperatura

A partir de la implementación del método de dos longitudes de onda se ha logrado estimar la temperatura mediante el uso de los datos espectrales obtenidos desde las sondas de terreno. En ambas posiciones se pudo estimar la temperatura, observando comportamientos diferentes tanto en el tiempo como espectralmente. La temperaturas calculadas están de acorde a lo esperado, si bien la referencia del quemador central es la principal, ya que apunta a la zona primaria de reacción, la información del quemador auxiliar resulta valiosa para estudiar el perfil de temperatura en una zona lateral de la llama.

Se concluye que el objetivo específico de estimación de temperatura se ha logrado, para una gran cantidad de datos, mas de 350 mil espectros y en medición continua durante 7 días de operación en dos posiciones del horno flash.

5.2. Análisis de formación de acreciones

La identificación de la formación de acreciones, resulta en parte de la experiencia en terreno y la respuesta de las sondas a este fenómeno, lo que permitió establecer un método que no solo identifica el evento, sino que también permite calcular su velocidad de formación y duración. Esta herramienta, permite ser asociada alarmas de formación que podría alertar antes que la obstrucción afecte a la inyección de

gases por las toberas.

Se logro el objetivo de identificar los fenómenos de formación de acreciones, mediante el análisis de la intensidad de la señal espectral media en el tiempo, añadiendo además el análisis de duración y velocidad de formación.

5.3. Análisis correlación datos espectrales y datos de proceso

La correlación entre las variables del proceso y los datos obtenidos radiométricamente, resultaron en un análisis basado en coeficientes de correlación, de 3 tipos, apuntando a relación lineal como el R de Pearson, o analizando tendencias por rango de monotonía, como los coeficientes de Spearman y Kedall. Si bien los valores muestran que la correlación es baja, mostrando en general valores mas cercamos a 0, lo que es muestra de poca correlación para los 3 tipos de coeficientes en estudio, se puede concluir que la correlación entre las variables de procesos y los datos del la sonda en que quemador lateral se correlación mejor que con los datos del quemador auxiliar. Por otro lado, la mejor correlación se logra con las variables de proceso de alimentación (cuantas toneladas de concentrado se tratan por hora) y el enriquecimiento de oxígeno.

A pesar de los bajos valores de correlación obtenidos, se logro el objetivo de análisis y estudio mediante coeficientes de correlación.

5.4. Conclusión General

Se han logrado los objetivos propuestos, por lo que se valida la hipótesis de este trabajo, se ha usado la información espectral desde las sondas ubicadas en un entorno industrial real, para estimar temperatura, identificar acreciones y analizar la correlación de estos datos con variables de proceso. La validación de los métodos de calculo y análisis usados en este trabajo, resultan de importancia para abrir paso a la transferencia tecnológica, que en este trabajo se refleja en llevar a probar en un entorno industrial los resultados obtenidos en laboratorio, siendo un precedente del potencial del uso de este tipo de sistemas en entornos de operación

reales.

La correlación de las variables radiométricas con variables del proceso, es un análisis que puede ser continuado, ya que el alcance de este trabajo, no permitió obtener datos con un muestreo temporal menor que fuese más representativo, además de no contar con una retroalimentación metalúrgica de parte de la fundición al respecto.

Bibliografía

- Arias, L., Balladares, E., Parra, R., Sbarbaro, D., and Torres, S. (2020). Sensors and process control in copper smelters: a review of current systems and some opportunities. *Minerals*, 11(1):1.
- Arias, L., Torres, S., Toro, C., Balladares, E., Parra, R., Loeza, C., Villagrán, C., and Coelho, P. (2018). Flash smelting copper concentrates spectral emission measurements. *Sensors*, 18(7):2009.
- Castillo, F., Arias, L., and Garcés, H. O. (2023). Estimation of temperature, local and global radiation of flames, using retrieved hyperspectral imaging. *Measurement*, 208:112459.
- Cheng, Y.-F., Yao, Y.-L., Wang, Z.-H., Zhang, B.-B., Xia, Y., Liu, R., and Shu, C.-M. (2021). An improved two-colour pyrometer based method for measuring dynamic temperature mapping of hydrogen-air combustion. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(69):34463–34468.
- Clough, R., Fisher, A., Gibson, B., and Russell, B. (2023). Atomic spectrometry update: review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials. *J. Anal. At. Spectrom.*, 38:2215–2279.
- Davenport, W. G., King, M. J., Schlesinger, M. E., and Biswas, A. K. (2002). *Extractive metallurgy of copper*. Elsevier.
- Delfino, M. and Hodul, D. (1992). Wavelength-specific pyrometry as a temperature measurement tool. *IEEE transactions on electron devices*, 39(1):89–95.
- Devia, M., Parra, R., Queirolo, C., Sánchez, M., and Wilkomirsky, I. (2019). Copper smelting and converting: past and present chilean developments. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 128(1-2):108–116.
- Jorgensen, F. and Koh, P. (2001). Combustion in flash smelting furnaces. *JOM*, 53:16–20.
- Jorgensen, F. and Zuiderwyk, M. (1985). Two-colour pyrometer measurement of the temperature of individual combusting particles. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 18(6):486.
- Kuptsov, A., Volzhenin, A., Labusov, V., and Saprykin, A. (2021). Atomic emission spectrometry analysis of metals and alloys using a two-jet arc plasma with

- spark sampling and calibration by solutions. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 36(4):829–835.
- Manzo, M., Ahmed, H., and Nasrazadani, S. (2020). Study on emission spectral lines of hematite and magnetite for purity's differentiation. *AIP Advances*, 10(10).
- Marr, J. M. and Wilkin, F. P. (2012). A better presentation of planck's radiation law. *American Journal of Physics*, 80(5):399–405.
- Marín, M., Toro, C., Arias, L., and Balladares, E. (2019). Estimation of spectral emissivity and s/cu ratio from emissions of copper concentrates at the flash smelting process. *IEEE Access*, 7:103346–103353.
- Mohammed, S. M. H. (2018). Characterization of magnetite and hematite using infrared spectroscopy. *Journal of Engineering Sciences and Information Technology*, 2(1).
- Navarra, A., Wilson, R., Parra, R., Toro, N., Ross, A., Nave, J.-C., and Mackey, P. J. (2020). Quantitative methods to support data acquisition modernization within copper smelters. *Processes*, 8(11):1478.
- Píceros, E., Pérez, K., Jeldres, R. I., Robles, P., Gálvez, E., Reyes, G., Loeza, C., Villagrán, C., and Toro, N. (2022). Obtaining the flame temperature from spectral emission of the combustion of copper concentrates. *Journal of Materials Research and Technology*, 17:937–947.
- Pérez, K., Toro, N., Gálvez, E., Robles, P., Wilson, R., and Navarra, A. (2021). Environmental, economic and technological factors affecting chilean copper smelters – a critical review. *Journal of Materials Research and Technology*, 15:213–225.
- Reyes, G., Diaz, W., Toro, C., Balladares, E., Torres, S., Parra, R., and Vásquez, A. (2021). Copper oxide spectral emission detection in chalcopyrite and copper concentrate combustion. *Processes*, 9(2):188.
- Rivas, F., Pérez, F., Sandoval, C., Sanhueza, I., Sepúlveda, B., nez, J. Y., and Torres, S. (2023). Copper concentrate dual-band joint classification using reflectance hyperspectral images in the vis-nir and swir bands. *Appl. Opt.*, 62(12):2970–2977.
- RS2M (2023). Radiometric sensing solution for mining. <https://rs2mining.com/>.
- Schlegel, A., Alvarado, S., and Wachter, P. (1979). Optical properties of magnetite (Fe₃O₄). *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 12(6):1157.
- Stewart, S. M. (2012). Spectral peaks and wien's displacement law. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 26(4):689–692.
- Toro, C., Torres, S., Parra, V., Fuentes, R., Castillo, R., Diaz, W., Reyes, G., Balladares, E., and Parra, R. (2020). On the detection of spectral emissions

- of iron oxides in combustion experiments of pyrite concentrates. *Sensors*, 20(5):1284.
- Torres, S. J., Rivas, F., Perez, F., Parra, R., Torres, S., and Godoy, S. E. (2023). Radiometric methods for high temperature flame estimation: robustness analysis and application to an industrial flash smelting furnace. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*.
- Tourin, R. H. and Krakow, B. (1965). Applicability of infrared emission and absorption spectra to determination of hot gas temperature profiles. *Appl. Opt.*, 4(2):237–242.
- Wendt, W., Aldén, M., and Persson, W. (1988). Application of emission and absorption spectroscopy for characterization of a copper converting process. *Appl. Spectrosc.*, 42(1):128–133.
- Yañez, J., Torres, S., Sbarbaro, D., Parra, R., and Saavedra, C. (2018). Analytical instrumentation for copper pyrometallurgy: challenges and opportunities. *IFAC-PapersOnLine*, 51(21):251–256. 5th IFAC Workshop on Mining, Mineral and Metal Processing MMM 2018.

Apéndice A

Información espectrómetro CCS 175

El espectrómetro utilizado en este trabajo es el modelo CCS 175, de la compañía THorlabs, un modelo compacto que opera en el rango VIS NIR, digitaliza A/D en 16 bit.



Figura A0.1: Fotografía espectrometro Thorlabs CCS 175

A continuación se resumen sus características técnicas.

Característica	
Rango espectral	500 - 1000 nm
Precisión espectral	<0.6 nm FWHM
Fiber Connector	SMA905
S/N	2000:1
Tiempo de integración	10 μ s a 60 μ s
N° de bandas	3648

Cuadro A0.1: Características técnicas espectrómetro CCS 175