



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Prof. Patrocinante:
Dr. Luis Arias Parada.

Modelación radiométrica de la combustión de especies minerales y concentrado de cobre



Milton Felipe Marín Seguel

Tesis para optar al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería, mención en Ingeniería Eléctrica

Concepción, Chile.

Marzo de 2019

Resumen

En esta tesis se propone el desarrollo de un trabajo experimental que permita obtener una caracterización espectral fenomenológica en el rango visible del proceso de combustión de concentrado de cobre en hornos flash bajo diferentes condiciones de operación: tipo de concentrado, razón S/Cu, tamaño de partículas y porcentaje de oxígeno presente en la atmósfera de combustión. La caracterización espectral permitirá plantear un modelo matemático que sea capaz de predecir las variables involucradas en el proceso a partir de la información contenida en el espectro de emisión.

Como trabajo previo, ya se determinó la existencia de relaciones directas entre la intensidad de los espectros medidos y las variables de operación asociadas al proceso, por lo que ahora se recurre a estimar curvas a partir de los datos, usando como indicador la radiación total estimada a través del cálculo del área bajo la curva. Esto da pie a un estimador en tiempo real de la razón S/Cu, la cuál se presenta como una variable de interés para el operador del horno.

Se presenta la teoría asociada que permite plantear un modelo de emisividad para las partículas de concentrado de cobre, llegando a plantear una función que describe radiométricamente la radiación emitida de acuerdo a 6 variables independientes que tienen injerencia directa en el proceso de combustión. Finalmente, se presenta un análisis de componentes principales, el cuál es capaz de entregar una clasificación visual de concentrado de cobre y/o especies puras de acuerdo a una gráfica, entregando así un posible nuevo indicador de interés para este proceso.

Tabla de Contenido

Resumen	II
Índice de Figuras	VI
Índice de Tablas	VIII
Agradecimientos	IX
1. Investigación Propuesta	1
1.1. Introducción	1
1.2. Definición del Problema	2
1.3. Estado del arte	3
1.3.1. Del Análisis espectral	3
1.3.2. De los modelos de emisividad	6
1.3.3. De la separación de espectros	7
1.3.4. Discusión	7
1.4. Hipótesis de trabajo	8
1.5. Objetivos	8
1.5.1. Objetivo General	8
1.5.2. Objetivos Específicos	9
1.6. Alcances y limitaciones	9
2. Marco Teórico	10
2.1. Introducción	10



2.2.	Fusión Flash	10
2.3.	Cuerpo Negro	12
2.4.	Ley de Planck	12
2.5.	Aproximación de Wien	13
2.6.	Emisividad	13
2.7.	Ley espectral de Kirchhoff	14
2.8.	Estimación de Temperatura	14
2.8.1.	Dos longitudes de onda	15
2.9.	Modelos de Emisividad	17
2.9.1.	Para partículas de hollín, [22]	17
2.9.2.	Para partículas de carbón, [13]	18
2.10.	Análisis PCA	20
2.10.1.	Definición	20
2.10.2.	Cálculo de componentes principales	20
3.	Metodología y materiales	23
3.1.	Setup Experimental	23
3.2.	Metodología	24
3.2.1.	Adquisición de datos	24
3.2.2.	Pre-procesamiento de datos	26
3.2.3.	Corrección de línea de base	26
3.2.4.	Separación del espectro de background	27
4.	Resultados	30
4.1.	Resultados previos	30
4.1.1.	Estimación de Temperatura	32
4.1.2.	Área bajo la curva	34
4.2.	Resultados obtenidos	35
4.2.1.	Separación del background	35
4.2.2.	Estimación S/Cu	37



4.2.3. Estimación en espectros de la industria	38
4.2.4. Emisividad para concentrado de cobre	40
4.2.5. Modelo radiométrico	42
4.2.6. Análisis PCA	43
5. Conclusiones	45
5.1. Sumario	45
5.2. Conclusiones	46
5.3. Trabajo Futuro	47
5.4. Publicación	47
Bibliografía	48



Índice de Figuras

2.1. Esquema de fusión flash Outokompu (Fuente: Total Materia DataBase).	11
2.2. Espectro de Radiación de Cuerpo negro (Fuente: Tesis F. Ramos [19].	12
2.3. Scattering del hollín (Fuente: Elaboración propia) [25].	17
3.1. Esquema de setup experimental a escala en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).	23
3.2. Captura de sistema de adquisición de espectros (Fuente: Elaboración propia). . .	25
3.3. Procedimiento de filtrado de los datos, (Fuente: Elaboración propia).	26
3.4. Ejemplo de estimación de línea de base con airPLS (Fuente: Elaboración propia). .	27
3.5. Influencia del background en medición espectral, (Fuente: Elaboración propia). .	28
3.6. Setup experimento vela-lámpara, (Fuente: Elaboración propia).	28
3.7. Separación de background en setup vela-lámpara (Fuente: Elaboración propia). .	29
4.1. Espectros medidos a diferentes temperaturas de control en zona de reacción del horno, (Fuente: Elaboración propia).	30
4.2. Comparación de espectros medidos para diferentes S/Cu,(Fuente: Elaboración propia)	31
4.3. Temperatura vs % Oxígeno para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia). .	33
4.4. Área bajo la curva vs % oxígeno para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia). .	34
4.5. Resultados de separación de background para una razón S/Cu de 1.79 (alta), (Fuente: Elaboración propia).	35
4.6. Resultados de separación de background para una razón S/Cu de 1.21 (media), (Fuente: Elaboración propia).	36

4.7. Radiación total vs % O_2 para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia). . .	36
4.8. Estimación S/Cu en diferentes condiciones de operación, (Fuente: Elaboración propia).	38
4.9. Espectro medido en horno de fusión flash industrial, (Fuente: Elaboración propia).	39
4.10. Estimación S/Cu en espectros de la industria,(Fuente: Elaboración propia). . . .	39
4.11. Función de emisividad para el concentrado de cobre, (Fuente: Elaboración propia).	40
4.12. Modelo de emisividad vs emisividad estimada, (Fuente: Elaboración propia). . .	41
4.13. Modelo radiométrico planteado vs medición real, (Fuente: Elaboración propia). .	42
4.14. Primeros 4 componentes principales, (Fuente: Elaboración propia).	43
4.15. Clasificación de especies mineralógicas usando PCA, (Fuente: Elaboración propia).	44



Índice de Tablas

3.1. Detalle del setup Figura 3.1, (Fuente: Elaboración propia)	24
3.2. Detalle de set de mediciones (Fuente: Elaboración propia).	25
4.1. Media para estimación de temperatura de llama, (Fuente: Elaboración propia). .	32
4.2. Error al estimar S/Cu, (Fuente: Elaboración propia).	37



Agradecimientos

Quisiera agradecer a cada una de las personas que formaron parte de mi etapa universitaria, quienes estuvieron presente y fueron partícipes en hacerme crecer como persona y profesional. Especialmente, me gustaría agradecer profundamente a mi familia por apoyarme en cada momento de esta etapa, mis padres quienes con esfuerzo me brindaron la oportunidad de estudiar y alcanzar mis objetivos, mi hermano Vicente quien a pesar de su corta edad siempre me apoyó y me dió ánimo para que termine mis “trabajos”, y por su infinita curiosidad y ganas de saber qué estoy haciendo.

Por otro lado, quisiera agradecer especialmente a mis ya colegas Daniel, Nicole, Diego, Fernando y Barry; por estar presentes en las agotadoras noches y días de estudio y trabajo que tuvimos en pregrado. Agradecer también a los compañeros del lab de Spyr y de Optrónica por siempre recibirme y acompañarme pasándo el rato. Quisiera agradecer a los profesores de la carrera Ingeniería Civil en Telecomunicaciones por su buena disposición, especialmente al Profesor Arias por darme la confianza de trabajar junto a él en este proyecto, y al Profesor Pezoa por entregarme la oportunidad de asistir a un Workshop en Beijing el año pasado.

De forma especial, quisiera agradecer a mi novia Carolina por apoyarme durante esta etapa, entenderme en los períodos de estrés, ayudarme a salir de ellos, brindarme lindos momentos a su lado y contribuir a formarme como un hombre profesional.

Finalmente, agradezco el apoyo entregado a este trabajo por el proyecto FONDEF IT16M10029. A todos ustedes, sinceramente.

Milton Felipe Marín Seguel

Esta Tesis fue patrocinada por:

- Proyecto FONDEF IT16M10029.



Capítulo 1

Investigación Propuesta

1.1. Introducción

Uno de los procesos más importantes en el procesamiento de minerales sulfurados de cobre a nivel mundial es la fusión en hornos flash, que tiene como objetivo la generación de matas de cobre con una pureza de 60-64 %, con el beneficio de capturar el dióxido de azufre de los gases resultantes, el cual es post-procesado para la obtención de ácido sulfúrico. De esta forma se tiene una técnica que permite la generación de cobre pero que reduce el impacto ambiental al no liberar el dióxido de azufre a la atmósfera.

Para Chile, la industria minera del cobre representa una pieza clave para el desarrollo del país, estando en la primera posición del ranking de producción mundial con 30 % de participación en el mercado [1]. Actualmente, un gran número de empresas proveedoras de servicios se centran en subsanar necesidades generadas a partir de los nuevos desafíos planteados por las mineras, sin embargo, hay una tarea pendiente en cuanto al desarrollo tecnológico que permita aumentar la eficiencia energética, reducir la emisión de contaminantes y realizar un monitoreo permanente de variables de interés de los distintos procesos [2]. En este contexto, la espectrometría de emisión ha sido utilizada en diferentes tipos de industrias durante décadas, permitiendo importantes avances de acuerdo a la evolución misma de la tecnología y el uso de nuevos materiales semiconductores. A pesar de esto, se encuentra ausente de los procesos de monitoreo mineros, debido a lo hostil del ambiente con presencia de polvo, altas temperaturas y vibraciones. Se hace necesario, por tanto,

estudiar los principios detrás de este tipo de tecnologías, permitiendo plantear un prototipo de monitoreo en tiempo real de la llama de combustión durante el proceso de fusión en hornos flash, que permita correlacionar las variables presentes en el proceso con su espectro de emisión.

Como trabajo previo, se realizó un análisis preliminar de espectros de emisión medidos en un horno droptube, encontrando relaciones directas entre temperatura de llama, área bajo la curva, porcentaje de oxígeno, temperatura de operación del horno y la razón S/Cu del concentrado de cobre que entró en combustión, relaciones que se dan a conocer en este trabajo.

1.2. Definición del Problema

Actualmente la producción de cobre tiene como uno de sus grandes desafíos el control de los procesos involucrados, dado el aumento en sus volúmenes de producción y la utilización de materiales con contenidos de impurezas cada vez mayores. La operación de los equipos bajo estas condiciones ha dificultado su control, causando la disminución en el rendimiento global del proceso, en términos de variabilidad en la calidad de los productos, inestabilidad en sus niveles de producción, aumento de pérdidas metalúrgicas y disminución en la captura de gases fugitivos.

En este contexto, resultará muy útil encontrar una correlación entre la intensidad y forma de los espectros de emisión de concentrado de cobre durante el proceso de combustión en los hornos, respecto al nivel de oxígeno del proceso, mineralogía de los concentrados, tamaño de las partículas, temperatura de la cámara de reacción, presencia de gases y tasa de alimentación. Esto será realizado en este proyecto, el que permitirá a futuro desarrollar un prototipo de instrumento que pueda operar y medir bajo el ambiente hostil de los hornos de fusión flash en la industria.

1.3. Estado del arte

1.3.1. Del Análisis espectral

- Roberto A. Rebolledo, “Estudio Espectrométrico de una Llama de Concentrados de Cobre”, Informe de memoria de título de Ingeniería Civil Electrónica, Depto. Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Chile, 2011, [5].

Estudia la radiación emitida en el rango de 340 a los 1025 [nm] por las partículas de concentrado de cobre durante el proceso de combustión, utilizando una llama de gas natural como fuente de excitación. Se identifican líneas de emisión generadas por Sodio (586-589 [nm]), Litio (670.8 [nm]), Potasio (767-769 [nm]), Rubidio (780-794 [nm]) y Bario (553.6 [nm]), además de distintas bandas de emisión correspondientes a diferentes moléculas de cobre. Sin embargo, cuestionó la presencia de algunos de aquellos elementos y los relacionó a la llama de gas natural utilizada, puesto que no se hizo una caracterización previa de ella y las líneas de emisión que aportaban al proceso.

- Eder Piceros Fuentes, “Caracterización espectral de reacciones a alta temperatura de intereses en la pirometalurgia del cobre”, Tesis de magíster, Depto. Ing. Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile, 2016, [6].

Se realizaron mediciones espectrales de la llama producida en la combustión de concentrados de cobre, en un horno “droptube”, utilizando un espectrofotómetro que opera en el VIS-NIR. La temperatura del horno fue de 500 °C, y se realizaron mediciones para distintas concentraciones de oxígeno en mezcla con nitrógeno desde 30 a 80 %.

Se observa un peak a 750 [nm], asociado al azufre de los concentrados, así como dos peak de menor intensidad en torno a los 590 [nm]. Se determinó la temperatura de la llama durante las reacciones por el método de pirometría de dos colores, seleccionando pares de longitudes de onda que incluyen los 650 [nm], 750 [nm] y 850 [nm] de forma arbitraria, obteniendo valores que variaron desde los 1650 hasta los 2100 [K].

- K. L. Maxwell and M. K. Hudson. “Spectral Study of Metallic Molecular Bands in a Hybrid Rocket Plumes”, Journal of Pyrotechnics, Issue 21, Summer 2005, [7].

Se realizó un análisis espectral de la emisión presente en la llama del escape de un cohete a escala construido en la Universidad de Arkansas, que utiliza combustible compuesto con distintas sales metálicas: Magnesio (Mg), Calcio (Ca), Bario (Ba), Cobre (Cu), Estroncio (Sr), Manganeso (Mn) y Aluminio (Al).

En forma específica, se identifican líneas de cobre durante la combustión a los 324 y 327 [nm]. El compuesto CuH se ha asociado a la banda de 428 [nm], y por otro lado el CuOH esta relacionado tanto con la banda 533-535 [nm], como a la banda desde los 615 a los 625 [nm]. Finalmente, las bandas de emisión presentes desde los 605 a los 615 [nm] se atribuyen principalmente al óxido de cobre (CuO).

- F. Jorgensen and P. Koh, Combustion in flash smelting furnaces, JOM Comb. Pyrometall., 53, 16-20 (2001), [8].

Se realiza un análisis en un horno de la fundición Saganoseki de la empresa Nippon Mining's, con un enriquecimiento de oxígeno de 72 %, y se ingresan partículas minerales de distintos tamaños, con distintas temperaturas para el proceso de combustión.

Para las partículas más pequeñas, menores a 20 [μm], el proceso de combustión tiene una duración menor a 6 [ms]. El aumento de temperatura provocado por la combustión de las pequeñas partículas, contribuye en el aumento de temperatura que provoca que las partículas más grandes entren en ignición.

La mena de cobre de mayor importancia en la industria es la calcopirita (CuFeS_2), y a partir de las pruebas de este documento se registra una temperatura de ignición promedio de 480 $^{\circ}\text{C}$.

- Sun Yipeng, Lou Chun, Zhou Huaichun, A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity, *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2011) 735–741, [9].

Este artículo revisa los conceptos básicos del método de dos longitudes de onda para estimación de temperatura en flamas en base a la información espectral entregada por estas. Se utilizan espectrómetros calibrados en el rango de 200-1100 [nm].

Se destaca que para utilizar este método, el cuerpo de interés debe tener un comportamiento de cuerpo gris (debe tener una emisividad continua). Se utilizan flamas generadas por gasolina, fósforo rojo y carbón, y se estima temperatura por el método de dos longitudes de onda. Los resultados son comparados con la temperatura real de la llama, encontrando rangos espectrales donde la estimación es más precisa en torno a 500-900 [nm].

- Luis Arias, Sergio Torres, Carlos Toro, Eduardo Balladares, Roberto Parra, Claudia Loeza, Camillo Villagrán and Pablo Coelho, Flash Smelting Copper Concentrates Spectral Emission Measurements, *Sensors* 2018, 18, 2009, [21].

Este artículo, da cuenta de las características espectrales de emisión en el rango visible, producidas en el proceso de fusión de concentrados de cobre que contiene mayoritariamente calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) y pirita (FeS_2). Se estudian diferentes condiciones de combustión, como la razón azufre-cobre del concentrado y el exceso de oxígeno en la zona de combustión. Se estima temperatura usando el método de dos longitudes de onda usando un par de longitudes de onda que reduce el error de estimación. Por otro lado, la emisividad espectral es estimada de acuerdo a modelos radiométricos, obteniendo un comportamiento de intensidad creciente para mayores proporciones azufre-cobre y contenido de oxígeno, pero que se mantiene aproximadamente constante a lo largo del rango espectral visible para todas las condiciones de operación. Finalmente, se observa que las características de las líneas de emisión CuO y FeO a lo largo del espectro visible parecen ser una alternativa de detección que puede describir las reacciones presentes en la combustión.

1.3.2. De los modelos de emisividad

- H.Watanabe, M. Susa and K. Nagata, Discontinuity in Normal Spectral Emissivity of Solid and Liquid Copper at the Melting Point, Metallurgical and materials transactions, Volume 28A (1997), [11].

En este trabajo se determina la emisividad espectral para el cobre líquido y sólido en el punto de fusión, poniendo énfasis en la discontinuidad de esta en el punto de fusión.

La emisividad espectral se determinó comparando la intensidad de radiación espectral de la muestra a la del cuerpo negro en un punto fijo en el rango de longitud de onda de 550 a 750 [nm]. Las muestras fueron calentadas en un crisol, y se estimó la emisividad, la cual es sumariada en una tabla y comparada con los resultados obtenidos en otros artículos.

- Joseph Kalman and Trevor Hedman, On the Origin and Use of the Emissivity Approximations for Alumina Particles, Propellants Explos. Pyrotech, (2016), 41, [12].

En este artículo se plantea un modelo de emisividad para partículas de aluminio durante el proceso de combustión. Se plantea el uso de las consideraciones teóricas de Mie, y se plantean ecuaciones para calcular los coeficientes de absorción y de scattering. Se realizaron ensayos en rangos de temperatura entre 2320-3000 K, observándose en los resultados una dependencia directa de la emisividad respecto de la longitud de onda.

Al considerar las partículas como esféricas, se hacen suposiciones que simplifican eventualmente los modelos planteados, siendo está una herramienta muy útil.

- J.Stasiak, M.W. Collings, Experimental and theoretical study on the of gases containing dust particles, Warme-und Stoffubertragung 28 (1993), 185-193, [13].

En este artículo se plantea un modelo de emisividad general para partículas de polvo. Se generaliza el coeficiente de absorción y de scattering, realizando aproximaciones que permiten obviar ciertos parámetros. Estas aproximaciones dependen de un tamaño relativo de las partículas, $p = \pi d/\lambda$, teniendo una dependencia directa para ambos casos. Al considerar el tamaño medio de las partículas de concentrado de cobre, así como el rango de longitud de onda visible, se estima un tamaño relativo mayor que 5, implicando que la suma del coeficiente de scattering y de absorción es aproximadamente 2.

1.3.3. De la separación de espectros

- H.C. Schau, Spectral Background Subtraction Errors in Infrared Field Measurements Made with Fourier Transform Spectrometers, Raytheon Systems Company PO, 1999, [14].

En este artículo se propone una técnica matemática que permite separar el espectro de emisión de un fondo respecto de un objeto de interés. En este caso, se trabaja con la aplicación de detección de aeronaves o misiles, teniendo como gran background la emisión del cielo. Se presenta un modelo heurístico que permite reducir los errores en la estimación de los espectros del proceso, dado un set de entrenamiento de espectros de background. Esto permite aplicar un modelo simple de separación de espectros, que puede ser aplicado a las mediciones de laboratorio realizadas en el horno droptube.

1.3.4. Discusión

Actualmente, la aplicación de técnicas espectrales para evaluar procesos industriales que involucren reacciones químicas es un prometedor campo de investigación y desarrollo, debido a que el uso de sensores ópticos combinados con métodos de medición bien definidos pueden proporcionar información espectral relevante que puede relacionarse con las condiciones de operación del proceso a evaluar. El tratamiento de los espectros medidos como señales, permite su descomposición en parte continua y discontinua, así como la separación respecto a un background que amplía la posibilidad de análisis, y sumado a una gran cantidad de datos puede entregar correlaciones claras entre las variables de entrada del proceso, las características espectrales medidas y el resultado final del proceso industrial (variables de salida).

El plantear un método de medición espectral bien definido necesita de un modelo de emisividad para las partículas presentes en el proceso, por lo que se hace imperativo llegar a plantear uno que se ajuste a las características propias del concentrado de cobre. Durante años, científicos han buscado plantear estos modelos de emisividad dándole una respectiva validación que permite respaldar estos modelos y hacerlos aceptables de mejor manera por parte de la comunidad. Si bien la mayoría utiliza la teoría de Mie que asume a las partículas como esféricas para simplificar los cálculos, existen otros modelos que realizan diferentes suposiciones de acuerdo al tamaño relativo de las partículas. Dada la complejidad de estimar los coeficientes de absorción

y scattering en este proceso, se concluye que es conveniente usar las presunciones en función del tamaño de la partícula planteado por Stasiak [13].

1.4. Hipótesis de trabajo

El comprender de mejor forma el comportamiento de las partículas de concentrado de cobre durante el proceso de combustión, permitirá ser más precisos con el análisis espectral posterior, por lo que se hace imperativo proponer un modelo de emisividad para ellas, el cual pueda ser validado con mediciones. Este set de mediciones permitirá generar un análisis espectral que pueda extraer características fenomenológicas propias del proceso medido, facilitando así el encontrar correlaciones entre las condiciones de operación del proceso de combustión, la eficiencia de éste y los espectros medidos.

1.5. Objetivos



1.5.1. Objetivo General

En este trabajo se espera proponer un modelo de emisividad para la nube de partículas de concentrado de cobre durante el proceso de combustión, lo cual permitirá mejorar la estimación de parámetros del proceso para obtener una caracterización espectral del proceso de combustión de concentrado de cobre en un horno flash bajo distintas condiciones de operación, como lo son: el tipo de concentrado, porcentajes de oxígeno presente en la atmósfera de combustión, razón S/Cu, tasa de alimentación y tamaño de partículas. La generación de una base de datos espectral permitirá eventualmente realizar un análisis temporal de los datos que ayude a determinar correlaciones entre las variables y el proceso de combustión, así como plantear un modelo matemático que represente de buena forma el proceso.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar mediciones espectrales en el rango visible variando parámetros de operación del horno droptube bajo condiciones de laboratorio.
- Desarrollar un modelo matemático de emisividad para las partículas de concentrado de cobre, planteando un set de mediciones que permita realizar la validación respectiva.
- Analizar y correlacionar las mediciones espectrales con las variables de operación del horno droptube, extrayendo además características propias mediante algoritmos de procesamiento de señales.
- Plantear un modelo matemático de la radiación de las partículas de concentrado de cobre en función de las variables presentes en el proceso.

1.6. Alcances y limitaciones



- El alcance de este proyecto es plantear modelos matemáticos que puedan ser validados mediante ensayos de laboratorio.
- Se debe asegurar la pureza de las especies minerales puras, de tal forma de no dejar duda que la respuesta espectral entregada en las pruebas esta asociada solo a ella.
- La tasa de alimentación de las partículas que entran al horno droptube debe ser constante, de modo de no inducir cambios espectrales asociados a la no uniformidad de esta.
- La distribución de tamaño de las partículas que entran al horno debe estar debidamente caracterizada.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Introducción

La generación de cobre contenido en minerales sulfurados requiere de una larga cadena de procesos que permitan llevar las pequeñas partículas dispersas en la roca que tienen una concentración entre 0.4 a 1.2% Cu, hasta un producto de mayor valor. La tecnología actual permite que esta cadena tecnológica tenga como resultado cobre con un 99.99% de pureza, el cual es comercializado alrededor del mundo.

Una de las etapas más importante en la generación del cobre son los procesos de alta temperatura, donde se descompone la especie mineralógica para liberar la especie metálica de interés. Este segmento comienza con la fusión del concentrado de cobre, donde se generan dos fases líquidas inmiscibles: mata y escoria, sumado a una fase gaseosa.

2.2. Fusión Flash

La fusión flash es una técnica utilizada para generar una mata fundida rica en cobre a partir del concentrado que proviene de la flotación de los minerales sulfurados. Se busca aprovechar la energía de las reacciones químicas al producirse oxidación de los componentes presentes en el concentrado, utilizando aire enriquecido en oxígeno.

El proceso consiste en alimentar con concentrado seco dentro de un horno vertical que se encuentre a alta temperatura, rodeado de una atmósfera enriquecida de oxígeno, la que

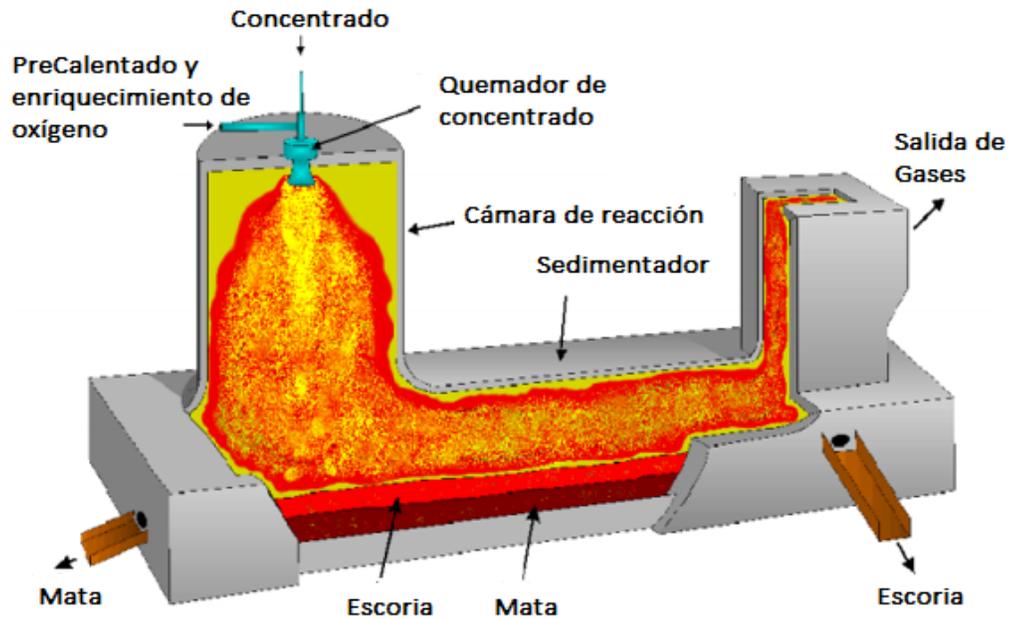


Fig. 2.1: Esquema de fusión flash Outokumpu (Fuente: Total Materia DataBase).

permite que dicho concentrado reaccione. Las partículas en reacción son fundidas y descienden verticalmente a lo largo del horno para caer al sedimentador, donde se separan por diferencia de densidad en capas de mata y escoria. La mata se lleva a un proceso de conversión a cobre metálico, mientras que la escoria es tratada para la recuperación de Cu. Este proceso puede ser visto gráficamente en el esquema de la Figura 2.1. En la zona donde se quema el concentrado se produce una llama, y cuando la suspensión sólido-gaseosa fluye hacia abajo por el reactor, las partículas sólidas se calientan hasta que alcanzan la temperatura de ignición y comienzan a reaccionar. Luego, estas se oxidan y se convierten en pequeñas gotas fundidas, las que conforman una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre, sulfuros y óxidos de fierro y ganga.

Esta técnica permite principalmente:

- Generación de mata y escoria.
- Generación de calor.
- Captación total de los gases resultantes (especialmente del SO_2).

Cerca del 50 % de las fundiciones de cobre del mundo usan la tecnología de fusión flash, dado la alta productividad y mejor desempeño ambiental que otorga al proceso [17].

2.3. Cuerpo Negro

Un cuerpo negro es un objeto ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él, lo que implica que además no refleja esta radiación. Por otro lado, el cuerpo negro emite radiación de forma uniforme en toda su superficie, siendo esta llamada radiación de cuerpo negro. El nombre cuerpo negro fue introducido por Gustav Kirchhoff en 1862 [20].

Los cuerpos no emiten con igual intensidad a todas las frecuencias o longitudes de onda, sino que siguen la ley de Planck. A igualdad de temperatura, la energía emitida depende también de la naturaleza de la superficie. En la Figura 2.2 se observa un espectro de emisión de cuerpo negro para distintas temperaturas [19].

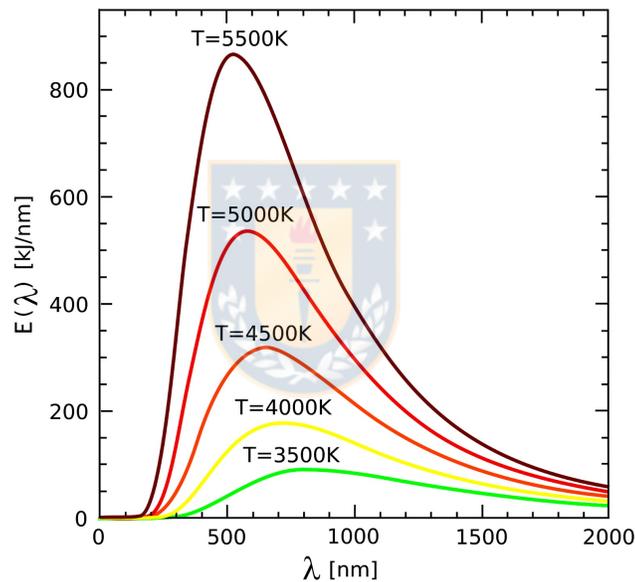


Fig. 2.2: Espectro de Radiación de Cuerpo negro (Fuente: Tesis F. Ramos [19]).

2.4. Ley de Planck

La radiación emitida por todo cuerpo que tiene una temperatura mayor al cero absoluto es función de la temperatura y de la longitud de onda, siendo la Ley de Planck la que describe su valor cuantitativo como:

$$E(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)} \quad (2.1)$$

donde $C_1 = 8\pi hc^2 = 1,498 \times 10^{-15} \text{Wm}^2$ y $C_2 = \frac{hc}{k} = 1,4385 \times 10^{-2} \text{mK}$. Por lo tanto, la unidad de medida asociada a la radiación emitida es $[\frac{\mu\text{W}}{\text{nm} \cdot \text{cm}^2}]$, [19].

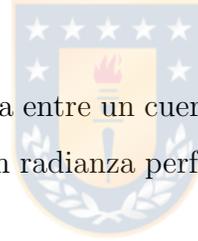
2.5. Aproximación de Wien

Para longitudes de onda menores a $1 \mu\text{m}$, se tiene que $c_2/\lambda \cdot T \ll 1 \rightarrow \exp(c_2/\lambda \cdot T) \approx 1$, [18]. De esta forma, la ecuación 2.1 se puede reescribir como:

$$E(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad (2.2)$$

2.6. Emisividad

Se define como la razón de radianza entre un cuerpo real sujeto a estudio y un cuerpo negro que es considerado como un objeto con radianza perfecta. Su expresión matemática se presenta a continuación en la ecuación 2.3.



$$\varepsilon_h(\lambda) = \frac{M(\lambda)}{M^{BB}(\lambda)} \quad (2.3)$$

donde $M(\lambda)$ es la radianza de un cuerpo real para una longitud de onda determinada, mientras que $M^{BB}(\lambda)$ es la radianza asociada al cuerpo negro [19].

De acuerdo a la razón presentada en la ecuación 2.3, la radianza espectral para cualquier cuerpo real se define como:

$$E_{rb}(\lambda, T) = \varepsilon_{rb}(\lambda) E_{bb}(\lambda, T) \quad (2.4)$$

donde ε_{rb} depende de la longitud de onda.

2.7. Ley espectral de Kirchhoff

Se conoce como espectro continuo a la curva espectral que no presenta bandas de absorción ni de emisión. Kirchhoff plantea que es posible determinar físicamente cuando se está en presencia de espectros continuos o discretos [20].

1. Un sólido, líquido o gas denso incandescente, produce siempre un espectro continuo.
2. Un gas incandescente produce un espectro de líneas de emisión, sin parte continua.
3. Un espectro continuo cuando pasa a través de un gas se transforma en un espectro con líneas de absorción.
4. Las posiciones de las líneas de emisión o absorción son características de la constitución química de la materia que las produce. El estudio de un espectro permite la identificación de los elementos químicos que lo produjeron.

Cabe señalar que en la práctica los espectros continuos se discretizan por efectos del muestreo de los instrumentos utilizados, sin embargo, hablaremos de espectro continuo cuando nos refiramos a un vector que represente el muestreo de un espectro continuo real.

2.8. Estimación de Temperatura

En pirometría óptica (PO) la intensidad de radiación es medida usualmente a diferentes longitudes de onda. Para el caso en el que la intensidad de radiación se mida a una longitud de onda es necesario conocer la emisividad a esa longitud de onda. Cuando es para dos longitudes de onda, se debe conocer el cociente de las emisividades para ambas longitudes de onda. Estos métodos de PO permiten determinar con mucha precisión la temperatura de los cuerpos para los cuales sus características ópticas y su espectro de emisión son conocidos, con la ventaja de no ser invasivas y no contaminar la zona de interés al ser medida de forma remota. Además, al ser un método de medición remoto, permite que la vida útil de los instrumentos sea mucho mayor en comparación con los métodos de medición de contacto como las termocuplas [18].

2.8.1. Dos longitudes de onda

Esta técnica se basa en la detección de radiación electromagnética emitida por un objeto, sabiendo además que los objetos reales no exhiben las características ideales de radiación de cuerpo negro, ya que la emisividad siempre es menor que uno y puede depender además de la longitud de onda, temperatura, dirección y también de las condiciones físicas del cuerpo.

La pirometría de dos colores es una técnica que utiliza los valores de intensidad de radianza espectral en dos longitudes de onda para estimar la temperatura. Sólo entrega valores confiables cuando el cuerpo emisor se comporta como un cuerpo gris, lo cual quiere decir que tiene una emisividad constante. Entonces, para una superficie que no se comporta como cuerpo negro, la radianza espectral emitida es según la Ley de Planck:

$$E(\lambda, T) = \frac{\varepsilon_{\lambda, T} C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} \left[\frac{\mu W}{nm \cdot cm^2} \right] \quad (2.5)$$

donde $C_1 = 8\pi hc^2 = 1,498 \times 10^{-15} W m^2$ y $C_2 = \frac{hc}{k} = 1,4385 \times 10^{-2} mK$, [9].

Ahora, haciendo las siguientes consideraciones:

- Emisividad constante (cuerpo gris).
- Se debe trabajar con espectros calibrados, con unidades de medida radiométricas.
- Las longitudes de onda seleccionadas no deben corresponder a una línea de emisión o absorción.
- Las longitudes escogidas deben tener una emisividad similar, por lo que se recomiendan sean cercanas.
- La intensidad del espectro debe ser alta, sobre todo en las vecindades a las longitudes de onda escogidas.
- Se asume que $\frac{C_2}{\lambda T} \gg 1$.

Bajo estas suposiciones, la ecuación 2.5 se puede expresar como :

$$E(\lambda, T) = \frac{\varepsilon C_1 \lambda^{-5}}{e^{\frac{C_2}{\lambda T}}} \quad (2.6)$$

Esta expresión se conoce como simplificación de Wien, y es válida para longitudes de onda de 3 o 4 veces menores a $\lambda = \frac{c_2}{T}$.

Al tomar dos longitudes de onda distintas, medir su intensidad y tomar el cociente entre ambas expresiones se tiene:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\lambda_1^{-5} \lambda_2^5}{e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T}} e^{\frac{c_2}{\lambda_2 T}}} \quad (2.7)$$

Aplicando logaritmo natural y trabajando la expresión 2.7, se obtiene:

$$T = C_2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \ln \left(\frac{E_2 \lambda_2^5}{E_1 \lambda_1^5} \right) \quad (2.8)$$

Al tomar dos mediciones, este método es susceptible a tener un grado de error, por lo que puede ser mejorado aumentando el número de muestras tomadas, lo que se conoce en los métodos de 3 colores, o 4 colores, que tienen una lógica de desarrollo similar a la pirometría de dos colores [9]. Este error mencionado, tiene su origen en la diferencia de emisividad en las longitudes de onda seleccionadas, λ_1 y λ_2 , ya que la información respecto a la emisividad generalmente no está disponible, el objeto radiante debe tratarse como un cuerpo gris, que no siempre es apropiado y puede llevar a errores significativos, como muestra matemáticamente Coates [10]. Para el pirómetro de dos longitudes de onda, el error asociado en forma de $C_2(1/T - 1/T')$ es:

$$C_2 \frac{\Delta T}{T^2} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \left(\frac{\Delta \epsilon_1}{\epsilon_1} - \frac{\Delta \epsilon_2}{\epsilon_2} \right) \quad (2.9)$$

donde $C_2 = \frac{hc}{k} = 1,4385 \times 10^{-2} mK$, T corresponde a la temperatura estimada, ΔT la diferencia entre la temperatura estimada y la real, $\lambda_{1,2}$ la longitud de onda seleccionada y $\epsilon_{1,2}$ la emisividad en dichas longitudes de onda.

2.9. Modelos de Emisividad

2.9.1. Para partículas de hollín, [22]

La intensidad de radiación espectral (I_λ) es atenuada exponencialmente cuando pasa por una superficie con absorberancia-scattering. Esto es representado por la ley de Bourger's ([23]) como:

$$I_\lambda = I_{\lambda 0} \exp(-K_\lambda L) \quad (2.10)$$

donde K_λ es el coeficiente extinción para la nube de partículas, L es el largo del camino óptico y $I_{\lambda 0}$ es la intensidad en el origen del camino.

Del total de radiación incidente desde una nube de partículas de hollín, parte es dispersada por el hollín, parte transmitida a través de ella y otra parte absorbida por el material. El coeficiente de extinción $K_{\lambda s}$ es igual a la fracción dispersada σ_λ más lo absorbido A_λ .

$$K_\lambda = A_\lambda + \sigma_\lambda \quad (2.11)$$

La teoría de Mie es una de las más utilizadas en la evaluación de la extinción total de las partículas de carbón, y es una solución completamente analítica a las ecuaciones de Maxwell para la dispersión de la radiación electromagnética por partículas esféricas. La solución de la ecuación de Mie se da en términos de dos parámetros: la razón entre el perímetro de las partículas respecto la longitud de onda ($x = D\pi/\lambda$), y un índice de refracción complejo de la partícula.

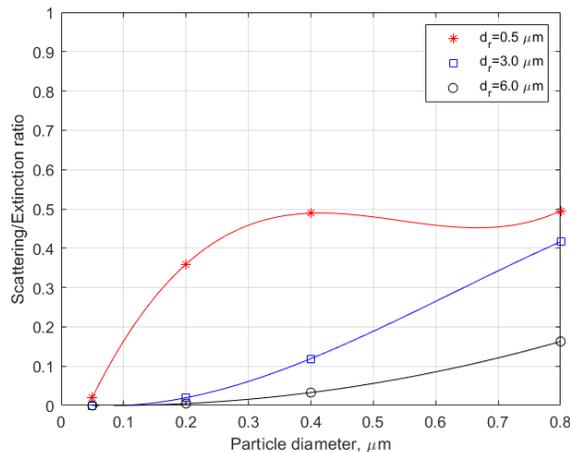


Fig. 2.3: Scattering del hollín (Fuente: Elaboración propia) [25].

De acuerdo a los resultados de Godridge y Hammont mostrados en la Figura 2.3, el scattering puede despreciarse para pequeñas partículas de hollín que se encuentran en la combustión [25]. Sin embargo, los grandes aglomerados de hollín se unen con los rangos de longitudes de onda bajas y conducen a niveles de scattering de hasta un 50 % de la extinción total del hollín.

En el límite de Rayleigh de la teoría de Mie ($x \ll 1$) el scattering es despreciado en la ecuación 2.11, por lo que el coeficiente de absorción A_λ es:

$$A_\lambda = \frac{36n_\lambda k_\lambda \left(\frac{\pi}{\lambda}\right) f_v}{(n_\lambda^2 - k_\lambda^2 + 2)^2 + 4n_\lambda^2 k_\lambda^2} \quad (2.12)$$

Entonces, para determinar la emisividad del hollín en una llama asumiendo la ley de Kirchoff tenemos que:

$$\varepsilon_\lambda = A_\lambda = 1 - \exp(-F(\lambda)f_v L) \quad (2.13)$$

Reemplazando el índice de refracción complejo en la ecuación 2.12 y 2.13, se obtiene:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{6,2f_v L}{\lambda}\right) \quad (2.14)$$

donde f_v corresponde a la densidad por unidad de volumen y L es el camino óptico.

$$f_v = \int_0^\infty 4/3\pi r^3 N(r) dr \quad (2.15)$$

2.9.2. Para partículas de carbón, [13]

El coeficiente de extinción K_λ es igual a la fracción de radiación dispersada σ_λ más lo absorbido A_λ , es decir:

$$K_\lambda = A_\lambda + \sigma_\lambda \quad (2.16)$$

Las características de scattering y absorción de una partícula se rigen por tres factores: forma de la partícula, tamaño relativo de la partícula respecto a la longitud de onda de la radiación incidente ($p = \pi D/\lambda$) y las propiedades ópticas de la partícula.

De acuerdo a [24], cuando $p \gg 1$ se puede establecer la siguiente relación respecto a la ecuación 2.16:

$$K_\lambda = A_\lambda + \sigma_\lambda \approx 2 \quad (2.17)$$

Como la emisividad espectral para un medio con absorción y scattering se encuentra dada por la ecuación:

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\left(\frac{K_\lambda}{f_v}\right)f_v L\right) \quad (2.18)$$

y se sabe que el coeficiente de extinción para este medio se encuentra dado por:

$$K_\lambda = 2 \frac{N\pi d_p^2}{4} = \frac{\pi}{2} N d_p^2 \quad (2.19)$$

donde la ecuación 2.19 es válida para una nube de partículas esféricas uniformes.

De esta forma, se obtiene una ecuación que describe la emisividad de partículas y que tiene en cuenta la tasa de alimentación y la mineralogía de las partículas.

$$\varepsilon = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{2} d_p^2 N L_{opt}\right) \quad (2.20)$$

donde N corresponde a la densidad partículas por unidad de volumen, d_p^2 al diámetro promedio de las partículas presentes en la nube, y L_{opt} el camino óptico hasta el origen de la radiación [13].

2.10. Análisis PCA

2.10.1. Definición

PCA (Principal components analysis) es una técnica estadística que permite proyectar un set de datos multivariable en un nuevo sistema de referencia. Estos ejes estarán ordenados de tal forma que la distribución de la información será máxima en el primer eje e irá decreciendo hasta llegar a tal punto que ciertos ejes no tendrán varianza, por lo que es posible despreciarlos [19].

Desde el punto de vista matemático, PCA es una transformación lineal que permite distribuir datos en un sistema de referencia más conveniente para la reducción de su dimensión. En efecto, si se tiene un set de datos bidimensionales que depende de x_1 y x_2 , se pueden rotar los ejes hasta obtener y_1 e y_2 de modo que estas nuevas variables son combinaciones lineales de las dos primeras, como se muestra en las ecuaciones 2.21 y 2.22.

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 \quad (2.21)$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 \quad (2.22)$$

Los coeficientes a_{11} y a_{12} conforman un vector componente, mientras que a_{21} y a_{22} son referidos a otro vector. Dependiendo de la varianza de cada uno de ellos, se les llamará primer y segundo componente principal. Finalmente, si se tiene d variables x_1, x_2, \dots, x_d , el nuevo sistema de referencia y_1, y_2, \dots, y_d puede ser representado de la siguiente forma:

$$y_1 = a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1d}x_d \quad (2.23)$$

$$y_2 = a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2d}x_d$$

$$\vdots$$

$$y_d = a_{d1}x_1 + a_{d2}x_2 + \dots + a_{dd}x_d$$

2.10.2. Cálculo de componentes principales

Existen diferentes formas de cálculo de componentes principales, siendo los métodos más ocupados el cálculo de vectores propios y el método SVD (Simple Value Descomposition). Ambos pueden trabajar sobre la matriz de correlación R o sobre la matriz de covarianza C . Ambos

métodos necesitan de una matriz de datos a la cual aplicar PCA, y que recibe el nombre de matriz de Entrenamiento $M_{m \times n}$, que contiene n muestras que dependen de m variables.

La construcción de la matriz de correlación $R_{m \times m}$ se define en la ecuación 2.24.

$$R = [r_{i,j}] = \frac{\text{cov}(M_i, M_j)}{\sqrt{\text{var}(M_i)\text{var}(M_j)}} \quad (2.24)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Donde M_i es la i -ésima columna de la matriz de entrenamiento. El cálculo con la matriz de correlación equivale a obtener componentes con variables estandarizadas, ya que la correlación es normalizada por las desviaciones estándar, como se muestra en la ecuación 2.24.

Luego, se construye la matriz de covarianza $C_{m \times m}$ de acuerdo a la ecuación 2.25.

$$C = [c_{i,j}] = \text{cov}(M_i, M_j) \quad (2.25)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Al realizar el cálculo con la matriz de covarianza no se tendrán los componentes principales estandarizados.

- Cálculo de vectores propios: Se calculan los valores propios de la matriz R o C , de la forma típica mostrada a continuación en la ecuación 2.26.

$$\det(C - \lambda I) = 0 \quad (2.26)$$

Una vez determinados los valores propios λ_i , es necesario calcular los vectores propios v_i solucionando el sistema de ecuaciones representado en forma matricial en la ecuación 2.27.

$$(C - \lambda_i I) \cdot v_i = 0 \quad (2.27)$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Estos m vectores propios son los componentes que tienen información asociada al proceso, y aquellos que tengan mayor cantidad de información son llamados componentes principales. La cantidad de varianza es directamente proporcional al valor propio correspondiente y se puede calcular su porcentaje sumando todos los valores propios que representan el 100% de la varianza. Esto quiere decir que los m vectores propios forman una base de la matriz de entrenamiento M , de modo que como los componentes principales tienen la mayor cantidad de información se tiene una buena representación solo con ellos.

- Cálculo con SVD: El método de descomposición de valores singulares de una matriz C o R , consiste en factorizar dicha matriz en 3 matrices. Una corresponde a una matriz diagonal S y dos matrices unitarias U y V , de modo que se cumple [26].



$$C = USV^t \quad (2.28)$$

En la diagonal de S se encuentran los valores propios de C y en las columnas de V se encuentran los vectores propios (componentes principales). Finalmente, el análisis de la varianza es análogo al del caso del cálculo por el método de los vectores propios.

Capítulo 3

Metodología y materiales

3.1. Setup Experimental

El setup implementado para el desarrollo de este trabajo fue presentado en el trabajo previo de Memoria de Título. Se detalla en la Tabla 3.1 y se muestra un esquema en la Figura 3.1.

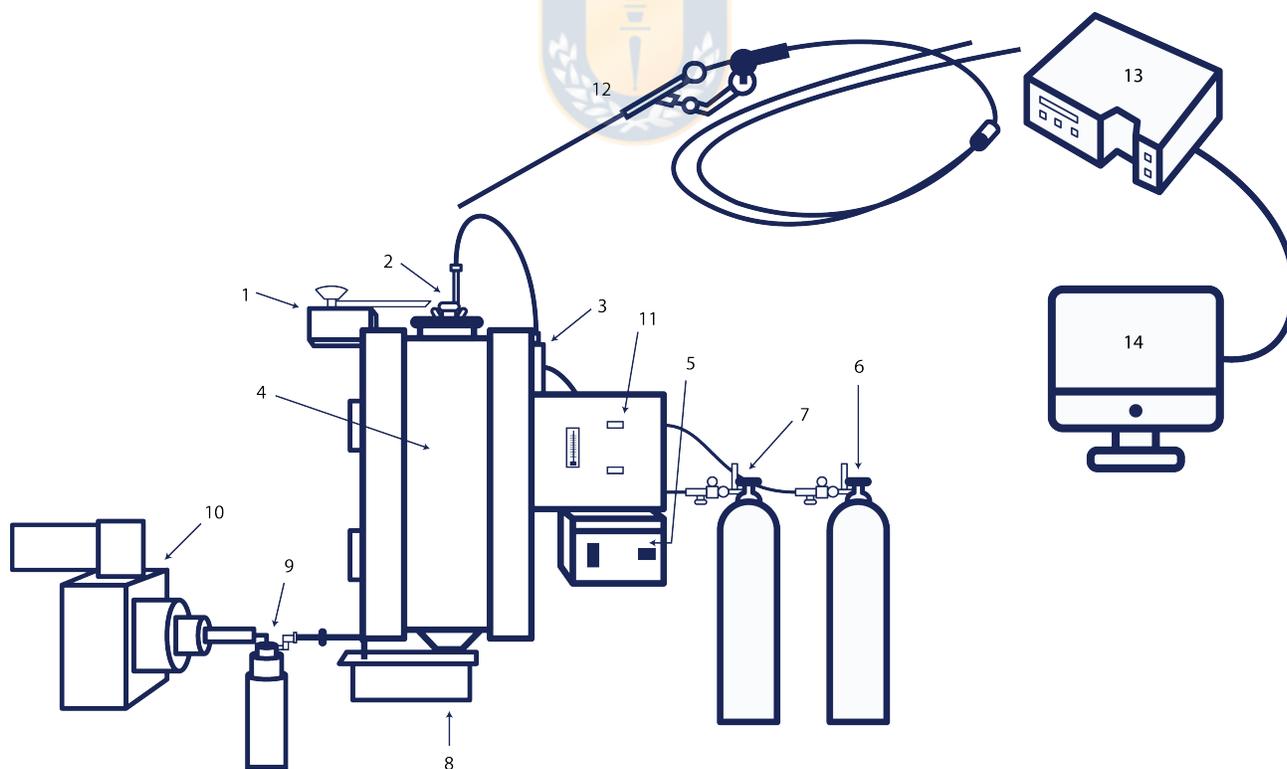


Fig. 3.1: Esquema de setup experimental a escala en laboratorio (Fuente: Elaboración propia).

Tabla 3.1: Detalle del setup Figura 3.1, (Fuente: Elaboración propia)

Etiqueta	Detalle	Etiqueta	Detalle
1	Alimentador de concentrado	8	Colector de material
2	Lanza de alimentación	9	Sistema recuperador polvo
3	Mezclador de gases	10	Succión de gases
4	Horno	11	Flujómetros
5	Controlador del horno	12	Sonda de alta temperatura
6	Bombona de N_2	13	Espectrómetro
7	Bombona de O_2	14	Computador

3.2. Metodología

Es preciso explicar los diferentes aspectos en los que se trabajó durante este estudio, y que permitieron obtener los resultados.



3.2.1. Adquisición de datos

El concentrado de cobre fluye desde el alimentador a una tasa de alimentación constante de 5.7[g/min] hacia la lanza de alimentación del horno. Las partículas de concentrado caen a una zona de reacción dentro de las paredes del horno, donde combustionan, liberando gran cantidad de energía y elevando la temperatura. Un sistema de succión se encarga de extraer los gases desde dentro del horno, pasando antes por un sistema de lavado de gases que extrae parte de los polvos generados en el proceso y neutralizando el SO_2 generado. Por otro lado, la lanza de alimentación es una estructura diseñada para mantener fría la sonda de medición al utilizar una camisa de agua, además de facilitar el ingreso de nitrógeno y oxígeno a la zona de reacción. Los flujos de gases son controlados en todo momento por los flujómetros, mientras que la temperatura es monitoreada por el controlador del horno. Finalmente, la combustión de las partículas es detectada por una sonda de alta temperatura que se encuentra dispuesta dentro de la lanza, de tal modo de permitir la conexión vía fibra óptica hasta un espectrómetro que envía la información a un computador en tiempo real para ser visualizada como se muestra en la Figura 3.2.

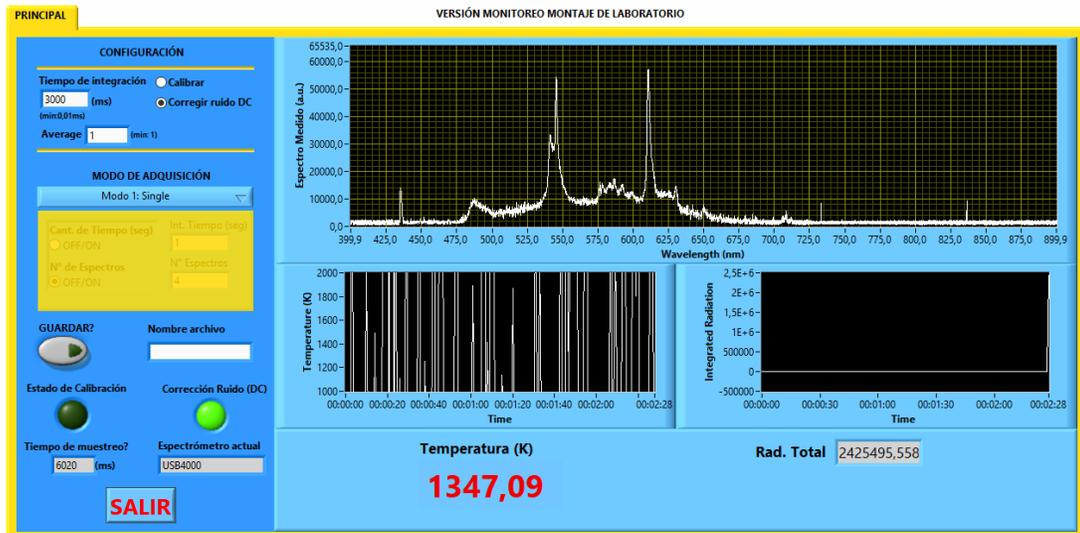


Fig. 3.2: Captura de sistema de adquisición de espectros (Fuente: Elaboración propia).

De acuerdo a la disponibilidad de minerales y capacidad de funcionamiento del horno dispuesto en la planta piloto del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, se realizó un set de mediciones el cual es mostrado en la Tabla 3.2. Los concentrados de cobre provenientes Las Tórtolas tienen razones de concentración S/Cu de 1.79 (Alto), 1.21 (Medio) y 1.19 (Bajo), y se dispuso de pruebas que permiten analizar el comportamiento espectral bajo 5 condiciones de Oxígeno, y 3 temperaturas de control del horno droptube. Por otro lado, se observó el comportamiento de 3 especies puras para sólo una temperatura del horno, y la mezcla binaria de ellas bajo diferentes concentraciones.

El resumen del set de pruebas realizadas, se muestra a continuación en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Detalle de set de mediciones (Fuente: Elaboración propia).

Temperatura	900°C	950°C	1000°C
Tórtolas Alto	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)
Tórtolas Medio	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)
Tórtolas Bajo	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)	30-50-60-70-80 (%O ₂)
Bornita			80 (%O ₂)
Pirita			80 (%O ₂)
Calcopirita			80 (%O ₂)

3.2.2. Pre-procesamiento de datos

Debido a lo irregular de la tasa de alimentación, los espectros medidos son irregulares respecto a la intensidad, por lo que no se logra obtener datos representativos del proceso en función de las condiciones de operación en las que fueron medidos. En la Figura 3.3 (a) se observa esta irregularidad al estimar la radiación total (área bajo la curva) de los espectros en función del tiempo.

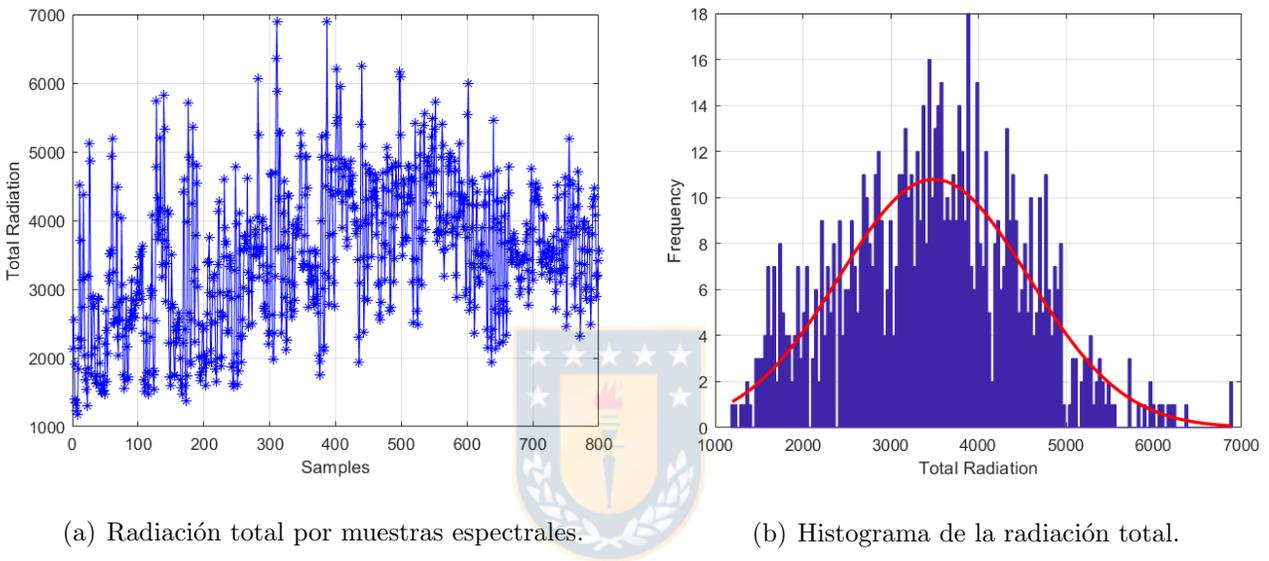


Fig. 3.3: Procedimiento de filtrado de los datos, (Fuente: Elaboración propia).

Al realizar un histograma de la radiación total 3.3 (b), es posible obtener una media y varianza de la radiación total del proceso, los cuales son utilizados como parámetros para filtrar los espectros, dejando así un set de datos homogéneo sin irregularidades abruptas, por lo que se asume este nuevo set de datos como el medido bajo ciertas condiciones de operación.

3.2.3. Corrección de línea de base

Como los espectros medidos tienen una parte continua que sigue la forma de radiación de Planck, y una parte discontinua que tiene relación con las líneas de emisión elementales y moleculares presentes en la reacción de combustión, es posible separarlas a través de un algoritmo de corrección de línea de base. Del trabajo previo realizado, se concluyó que la forma

más efectiva para este caso es el algoritmo airPLS [15], puesto que no necesita información previa para la estimación, el bajo costo computacional, y el bajo error en la estimación [16]. En la Figura 3.4 se observa un ejemplo de aplicación del método.

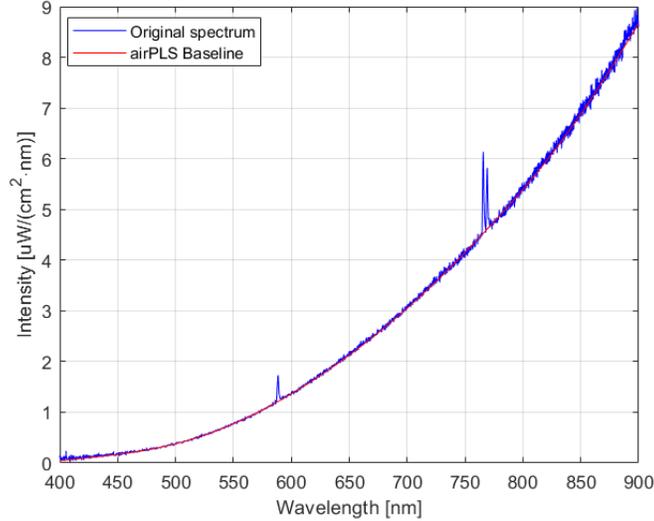


Fig. 3.4: Ejemplo de estimación de línea de base con airPLS (Fuente: Elaboración propia).

3.2.4. Separación del espectro de background

El horno droptube donde fueron realizadas las mediciones espectrales, consiste en resistencias eléctricas que calientan las paredes de la zona reacción, produciendo que emitan radiación.

El espectro de emisión del background, tiene una relación directa con la temperatura de operación del horno, por lo cual a 1000°C se observa el de la Figura 3.5. Es por esto, que la medición de las partículas al combustionar, recibe un aporte de radiación de las paredes del horno, el cual puede separarse con un modelo lineal de acuerdo a lo revisado en el estado del arte [14].

$$E_{medido(1xn)}(\lambda) = \alpha_{1(1x1)} \cdot E_{proceso(1xn)}(\lambda) + \alpha_{2(1x1)} \cdot E_{background(1xn)}(\lambda) \quad (3.1)$$

De acuerdo a la ecuación 3.1, el espectro medido es una combinación lineal entre el espectro del proceso y el espectro atribuido al background. Como el background es conocido y no cambia, además de obtener una estimación del espectro del proceso a través de la ley de Planck, es posible estimar las constantes que forman parte de la combinación lineal de acuerdo a la ecuación 3.2.

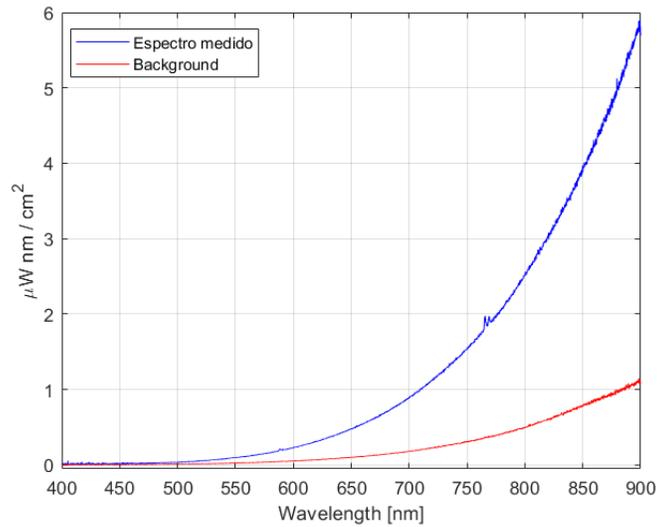


Fig. 3.5: Influencia del background en medición espectral, (Fuente: Elaboración propia).

$$x = B/A \quad (3.2)$$

donde $x = [\alpha_1\alpha_2]$, $B = [E_{medido}]$ y $A = [E_{proceso}E_{background}]$.

A modo de validar este modelo, se plantea un experimento simple que es posible realizar en laboratorio, teniendo el escenario controlado como se muestra en la Figura 3.6.



Fig. 3.6: Setup experimento vela-lámpara, (Fuente: Elaboración propia).

Se cuenta con una vela que emitirá la llama asociada al proceso de interés, y una lámpara halógena detrás de la vela que se considera el background. Con el setup dispuesto se procede a capturar 3 espectros diferentes, los cuales se observan en la Figura 3.7 (a).

- Proceso (vela).
- Background (lámpara).
- Mezcla (vela y lámpara).

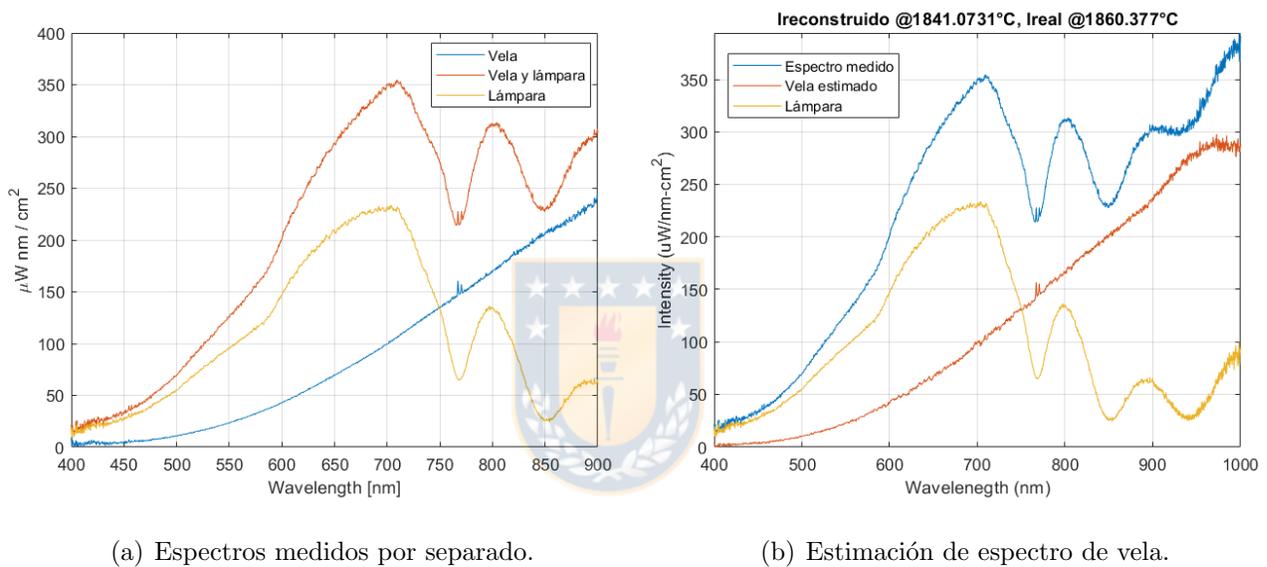


Fig. 3.7: Separación de background en setup vela-lámpara (Fuente: Elaboración propia).

Con el modelo lineal es posible estimar sin problemas el espectro de emisión de la vela, el cual al estimar temperatura con el método de dos longitudes de onda se obtiene 1841°C , mientras que la temperatura real de la vela es de 1860°C , lo cual es bastante cercano a la realidad. De esta forma, se cuenta con un método sencillo y validado en laboratorio que permitirá separar el background asociado a las paredes del horno droptube.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados previos

En primer lugar se presentan los resultados previos obtenidos en el desarrollo de la Memoria de título, [16]. Se muestra la influencia del nivel de oxígeno dentro de la zona de reacción de las partículas de concentrado.

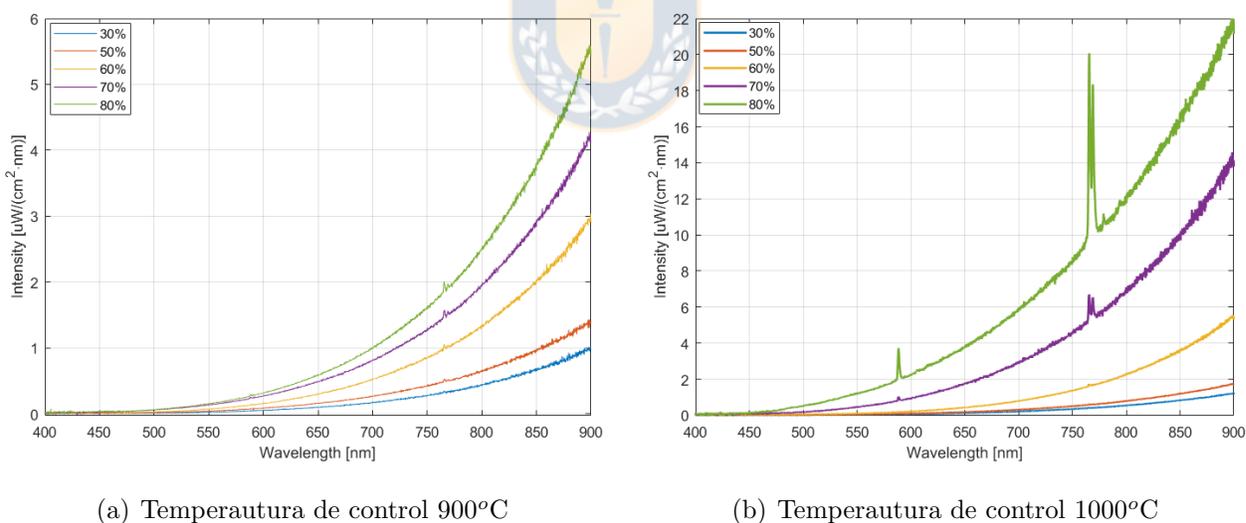
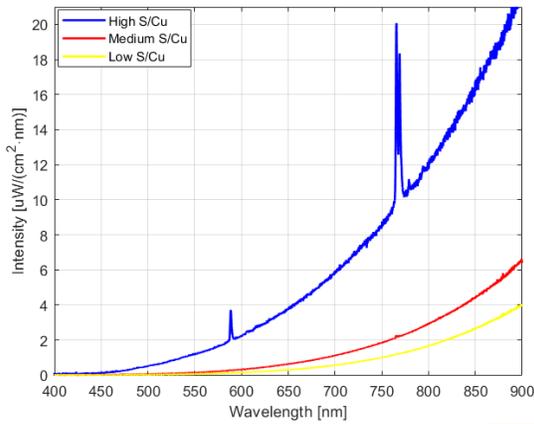


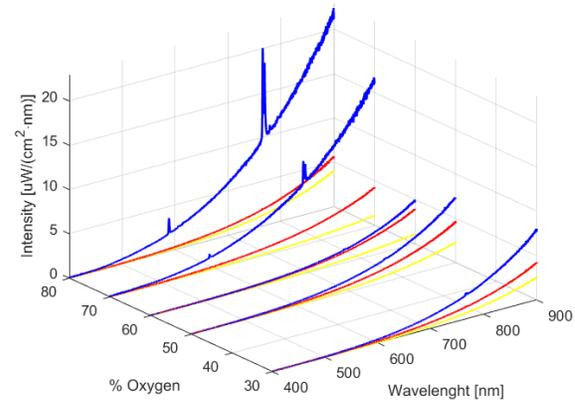
Fig. 4.1: Espectros medidos a diferentes temperaturas de control en zona de reacción del horno, (Fuente: Elaboración propia).

Se observa en la Figura 4.1, como el aumento del nivel de oxígeno partícipe en la reacción influye en el aumento de la intensidad del espectro continuo, independiente de la temperatura de control en la cual se esté operando. Al cambiar la razón S/Cu del concentrado que ingresa

al horno, se obtienen resultados similares a los anteriormente mostrados. De esta forma a partir de los resultados, se observa que la intensidad y la forma del espectro continuo tiene relación directa con la temperatura de control del horno, planteándose la hipótesis de que al aumentar el nivel de oxígeno presente en la zona de combustión, o la temperatura de operación del horno, la energía liberada por la nube de partículas de concentrado de cobre es mayor.



(a) 1000°C a 80% de oxígeno.



(b) 1000°C para diferentes % de oxígeno

Fig. 4.2: Comparación de espectros medidos para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia)

Por otro lado, en la Figura 4.1 se observa que al tener una razón S/Cu mayor en el concentrado que ingresa al horno, la intensidad de los espectros continuos es mayor. Esta comparación es realizada las 3 temperaturas de control con las que se operó y los diferentes niveles de oxígeno, obteniéndose resultados equivalentes con un par de excepciones atribuidas a variables no controladas durante el proceso de medición.

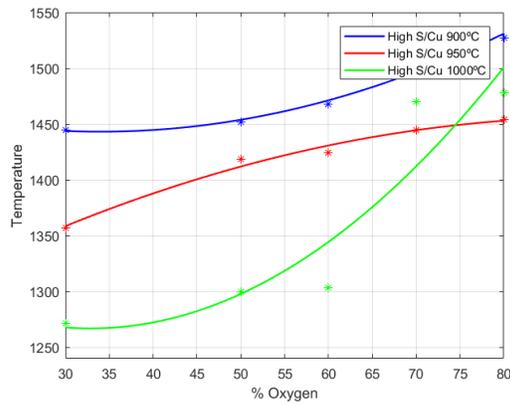
4.1.1. Estimación de Temperatura

Puesto que los espectros obtenidos siguen una distribución según la Ley de Planck, es posible usar técnicas de pirometría óptica para estimar temperatura. La temperatura de las partículas de concentrado de cobre al entrar en combustión fue estimada a partir del espectro con el método de dos longitudes de onda explicado en el Capítulo 4. Para ello, fueron escogidas arbitrariamente 3 pares de longitudes de onda que cumplen con las consideraciones mencionadas en aquel Capítulo, $\{(620 \text{ nm}, 720 \text{ nm}), (650 \text{ nm}, 750 \text{ nm}) \text{ y } (680 \text{ nm}, 780 \text{ nm})\}$. Las tres temperaturas estimadas fueron promediadas, obteniendo así una temperatura estimada referencial para cada espectro.

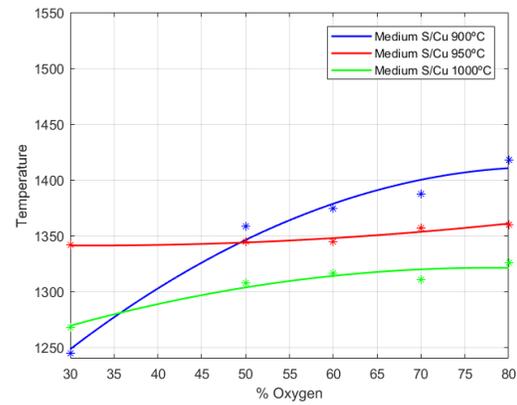
Tabla 4.1: Media para estimación de temperatura de llama, (Fuente: Elaboración propia).

	T°	% Oxígeno				
	Horno	30 %	50 %	60 %	70 %	80 %
S/Cu Alto	900 °C	1444.8 °C	1451.8 °C	1468.0 °C	1504.9 °C	1527.4 °C
	950 °C	1357.2 °C	1418.7 °C	1424.0 °C	1444.5 °C	1454.3 °C
	1000 °C	1271.3 °C	1299.9 °C	1303.6 °C	1470.3 °C	1477.9 °C
S/Cu Medio	900 °C	1245.0 °C	1358.6 °C	1374.6 °C	1387.5 °C	1418.0 °C
	950 °C	1341.4 °C	1344.6 °C	1344.8 °C	1357.2 °C	1359.5 °C
	1000 °C	1267.9 °C	1307.5 °C	1316.2 °C	1310.9 °C	1325.6 °C
S/Cu Bajo	900 °C	1178.1 °C	1143.0 °C	1260.1 °C	1337.1 °C	1298.4 °C
	950 °C	1139.2 °C	1157.5 °C	1247.2 °C	1265.1 °C	1344.4 °C
	1000 °C	1264.7 °C	1290.5 °C	1320.5 °C	1240.6 °C	1217.0 °C

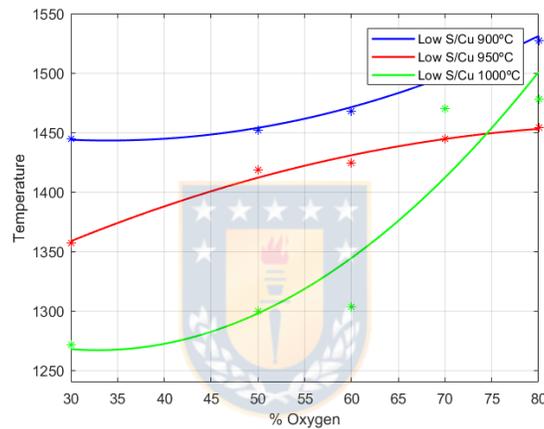
A partir de los resultados registrados en la Tabla 4.1, se observa que al aumentar el porcentaje de oxígeno del proceso la temperatura sigue una tendencia a aumentar para los diferentes tipos de concentrados (con excepciones para algunas de las mediciones realizadas). Sin embargo, el aumento de la temperatura se hace más significativo cuando la razón S/Cu es mayor. Por otro lado, cuando el concentrado tiene una razón S/Cu baja, la tendencia en el comportamiento de la temperatura puede no ser tan notoria al aumentar el oxígeno, obteniendo temperaturas bajas a alto porcentaje de oxígeno.



(a) S/Cu alto.



(b) S/Cu medio.



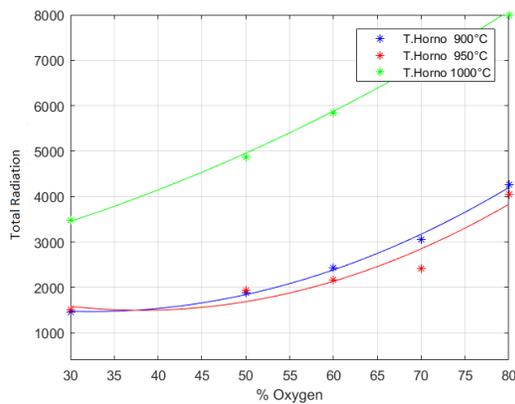
(c) S/Cu bajo.

Fig. 4.3: Temperatura vs % Oxígeno para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia).

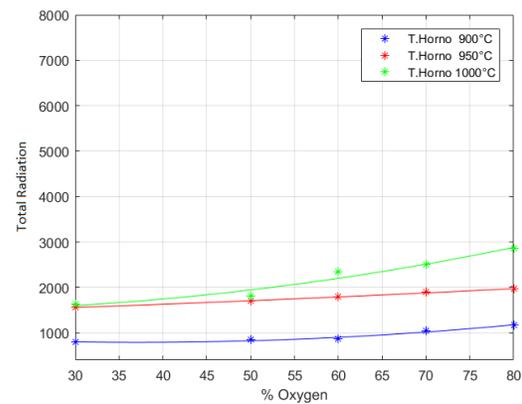
A partir de los resultados de temperatura media estimada que se muestran en la Tabla 4.1, se realizó una gráfica en función de los distintos niveles de oxígeno partícipe en el proceso. Además, se generó una curva a partir de cada set de puntos, de forma de poder visualizar el comportamiento de una forma más continua. Se observa en la Figura 4.3 que la temperatura tiene una relación directamente proporcional con el nivel de oxígeno, independiente de la temperatura de control del horno o de la razón S/Cu. Finalmente, las temperaturas medias estimadas para las partículas de concentrado de cobre, oscilan entre los 1340°C hasta los 1550°C para los niveles de oxígeno más elevados, sin encontrarse una relación directa entre la temperatura de control del horno y la de las partículas.

4.1.2. Área bajo la curva

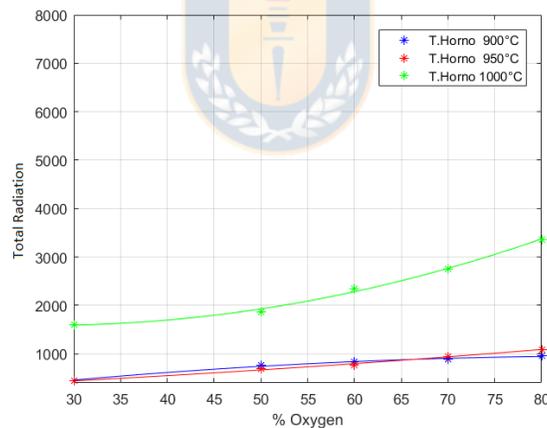
Al tener los espectros continuos estimados para las mediciones del proceso, es posible calcular el área bajo la curva, la cual puede ser usada como un parámetro de control que puede ser correlacionado con las variables del proceso.



(a) S/Cu alto.



(b) S/Cu medio.



(c) S/Cu bajo.

Fig. 4.4: Área bajo la curva vs % oxígeno para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia).

Como se ve en la Figura 4.4, a diferencia de la temperatura de llama, el comportamiento del área bajo la curva sigue una tendencia clara al aumento en función del porcentaje de oxígeno. Además, la intensidad de este parámetro tiene una relación directa con la razón S/Cu, y la temperatura de control del horno. Cuando este parámetro es mayor, significa que la llama de combustión es más brillante, y produce más calor dentro de la zona de combustión. Estas

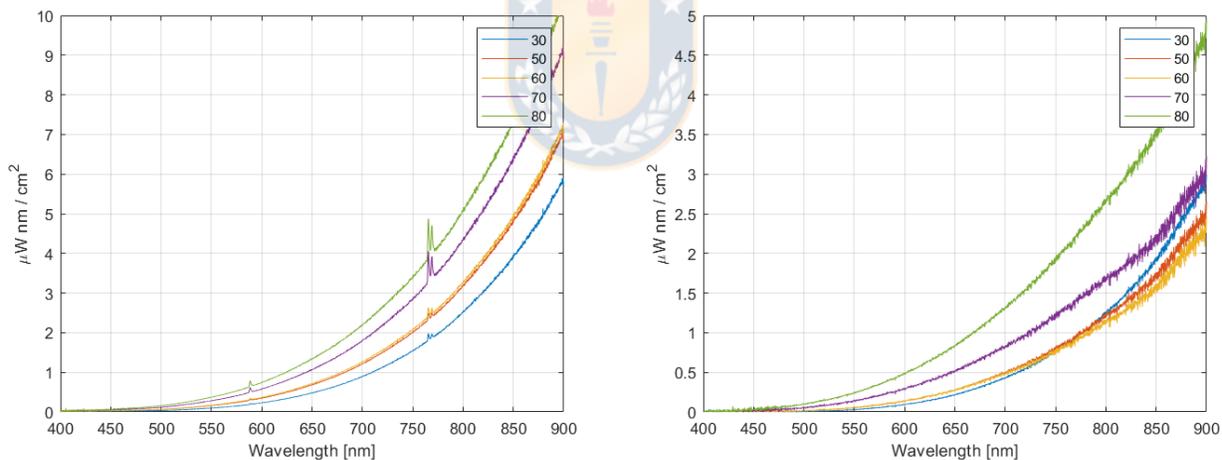
relaciones directas entre las variables del proceso, hacen que el cálculo de este parámetro pueda ser usado eventualmente como variable de control del proceso.

4.2. Resultados obtenidos

De acuerdo al modelo planteado en la ecuación 3.2, y considerando solo espectros medidos con el horno operando a $1000^{\circ}C$, diferentes porcentajes de oxidación y diferentes razones S/Cu, se obtienen los siguientes resultados.

4.2.1. Separación del background

A continuación, en la Figura 4.5 (a) se observa el espectro original medido a $1000^{\circ}C$ con una razón S/Cu 1.79 a difentes porcentajes de oxígeno, mientras que en la Figura 4.5 (b) los espectros estimados al aplicar el modelo lineal planteado.



(a) Espectro original medido.

(b) Espectro del proceso estimado.

Fig. 4.5: Resultados de separación de background para una razón S/Cu de 1.79 (alta), (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado, a continuación en la Figura 4.6 (a) se observa el espectro original medido con una razón S/Cu de 1.21, mientras que en la Figura 4.6 (b) la estimación al separar el background.

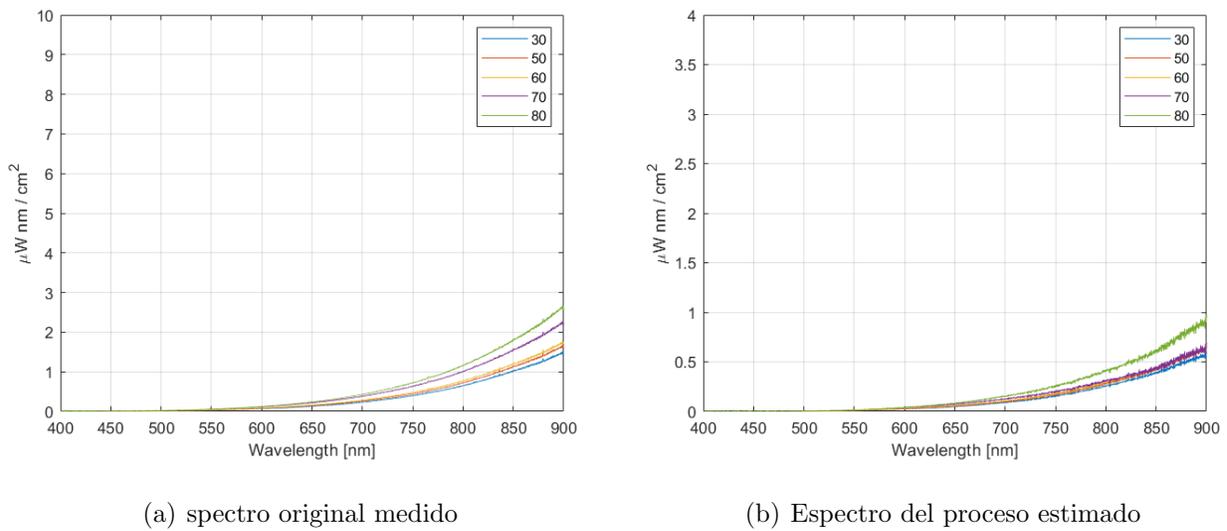


Fig. 4.6: Resultados de separación de background para una razón S/Cu de 1.21 (media), (Fuente: Elaboración propia).

Al contar ahora con los espectros atribuidos al proceso, bajo diferentes condiciones de operación del horno droptube, se estima la radiación total a través del área bajo la curva, obteniendo así una relación que se presenta en la Figura 4.7.

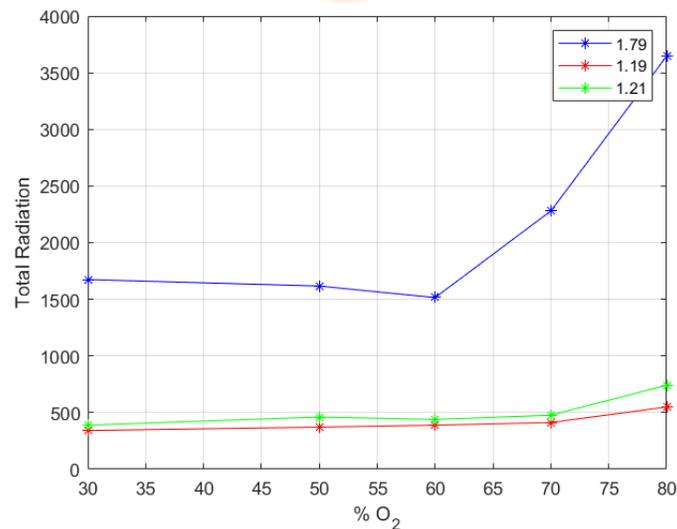


Fig. 4.7: Radiación total vs % O₂ para diferentes S/Cu, (Fuente: Elaboración propia).

4.2.2. Estimación S/Cu

A partir de la Figura 4.7 es posible inferir que existe una relación entre la radiación de los espectros, la razón S/Cu del concentrado de cobre y el porcentaje de oxígeno presente en la zona de combustión, por lo cual se realizan regresiones utilizando diferentes funciones. De acuerdo a los resultados, la mejor función que sigue la distribución de los datos es exponencial, y se presenta en la ecuación 4.1.

$$T_{radiation} = a \cdot \exp(b \cdot S/Cu) \quad (4.1)$$

donde S/Cu corresponde a la razón de azufre cobre del concentrado, y las constantes son estimadas en función del porcentaje de oxígeno en la zona de combustión, de acuerdo a la ecuación 4.2 y 4.3.

$$a = -0,01736 \cdot O^2 + 1,982 \cdot O - 27,18 \quad (4.2)$$

$$b = 0,0008846 \cdot O^2 - 0,09261 \cdot O + 4,581 \quad (4.3)$$

Con la función presentada en la ecuación 4.1 que describe la relación entre la radiación total, porcentaje de oxígeno y S/Cu; es posible realizar una estimación en línea del S/Cu solo a partir de los espectros medidos en tiempo real. Reescribiendo en función de S/Cu, se obtiene la ecuación 4.4.

$$S/Cu = \frac{\log\left(\frac{T_{radiation}}{a}\right)}{b} \quad (4.4)$$

Al ocupar la ecuación 4.4 para estimar la S/Cu, así como ecuaciones obtenidas a través de funciones de radiación total con otras distribuciones, se calculó el error RMSE y GFC de la razón estimada respecto a la real, obteniendo los resultados de la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Error al estimar S/Cu, (Fuente: Elaboración propia).

	$a \cdot \exp(b \cdot S/Cu)$	$a \cdot S/Cu + b$	$a \cdot S/Cu^b$
RMSE	0.0352	0.1532	0.0924
GFC	0.9998	0.9642	0.9821

Para la función exponencial planteada en la ecuación 4.1, se obtienen los siguientes resultados de razón S/Cu mostrados en la Figura 4.8.

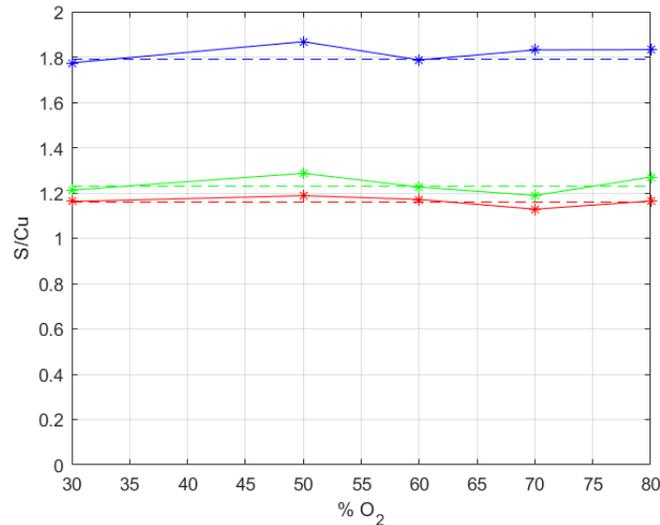


Fig. 4.8: Estimación S/Cu en diferentes condiciones de operación, (Fuente: Elaboración propia).

La estimación de esta variable a partir de los espectros medidos, permite al operador del horno tener en consideración aproximadamente el tipo de concentrado de cobre que está ingresando al horno, pudiendo así ajustar las condiciones de operación en función de salvaguardar el horno y/o obtener un producto de calidad.

4.2.3. Estimación en espectros de la industria

Se analizó un set de espectros medidos en la fundición Chagres, de los cuales se desconocen las condiciones de operación asociadas al proceso de combustión, mostrándose un ejemplo en la Figura 4.10, donde se observa que tiene la forma típica de espectro de emisión de Planck al igual que los espectros medidos en laboratorio.

Puesto que la intensidad de los espectros es mucho mayor que los ensayos de laboratorio, asumiremos que las paredes del horno no tienen mayor influencia en la radiación captada por el radiómetro, por lo que no es necesario separar espectros. Por otro lado, asumiremos que el operador del horno mantenía una atmósfera enriquecida en oxígeno al máximo ($\approx 40\%$).

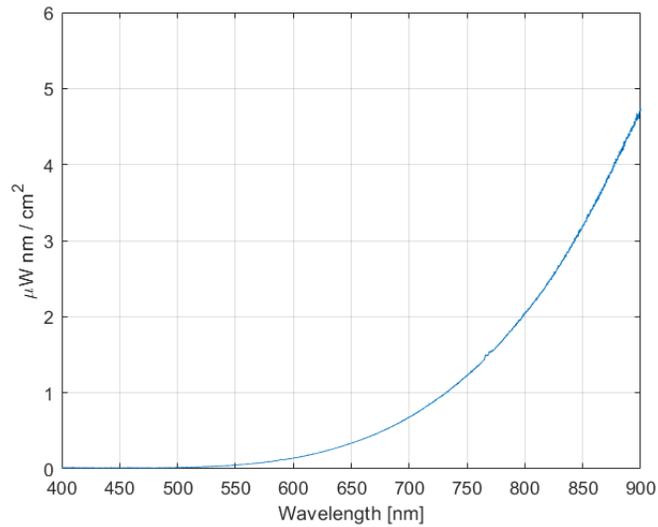


Fig. 4.9: Espectro medido en horno de fusión flash industrial, (Fuente: Elaboración propia).

En la Figura 4.10 se observa la razón S/Cu estimada a partir de los espectros de la industria medidos en Chagres, cuya media es de 1.63, además de una estimación de temperatura por el método de dos longitudes de onda de 1430°C. A pesar de que no se conoce una cifra real con la cual contrastar, el valor estimado es bastante cercano a la razón disponible en la realidad en la industria.

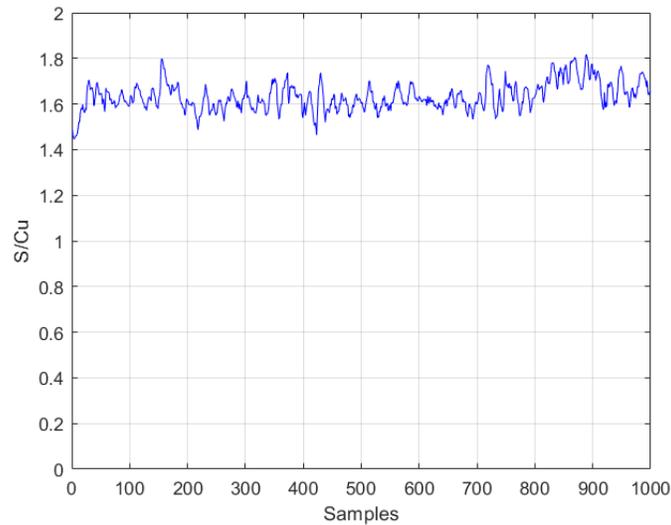


Fig. 4.10: Estimación S/Cu en espectros de la industria, (Fuente: Elaboración propia).

4.2.4. Emisividad para concentrado de cobre

Considerando el modelo de emisividad planteado para partículas de hollín [22], y que se muestra en la ecuación 4.5.

$$\varepsilon_\lambda = 1 - \exp\left(-\frac{6,2f_v L}{\lambda}\right) \quad (4.5)$$

Donde f_v se calcula de acuerdo a 2.15 y que considera un diámetro de partículas $D_m = 400\mu m$, una densidad de partículas por unidad de volumen $N_t = 300$ y un camino óptico $L = 15cm$, que son parámetros asociados al experimento realizado en este estudio en el horno de fusión flash del laboratorio.

De esta forma, se obtiene una emisividad en función de λ como la que se presenta en la Figura 4.11.

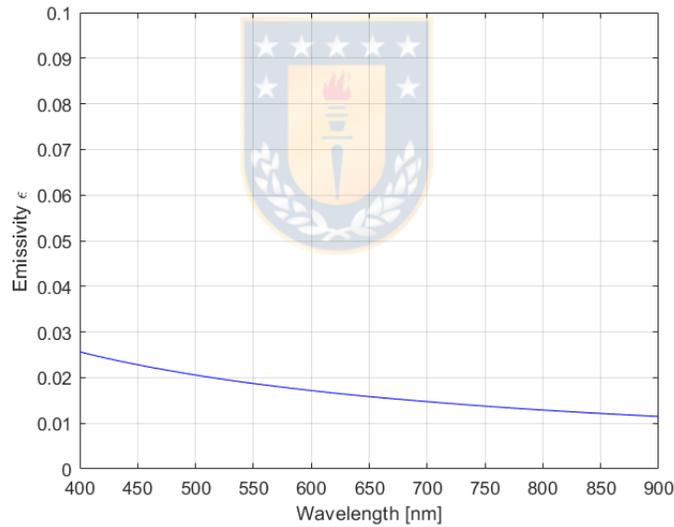


Fig. 4.11: Función de emisividad para el concentrado de cobre, (Fuente: Elaboración propia).

Para verificar si la función de emisividad planteada para la nube de partículas de concentrado de cobre es correcta, se compara respecto a la emisividad encontrada a partir de los datos medidos. Para esto, se aplica a los espectros medidos corrección de línea de base junto con eliminación de background, se estima temperatura a partir del espectro y luego se simula un espectro de cuerpo negro (E_{BB}) a partir de la Ley de Plank a esa temperatura.

Así, es posible estimar la emisividad para el rango de longitud de onda medido de acuerdo a la ecuación 4.6.

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{E_{medido}}{E_{BB}} \quad (4.6)$$

Al comparar la emisividad estimada respecto al modelo planteado en la ecuación 4.5 se observa que siguen una forma similar y están escaladas al mismo orden de magnitud para el rango de longitud de onda que comprende los 450-900 [nm].

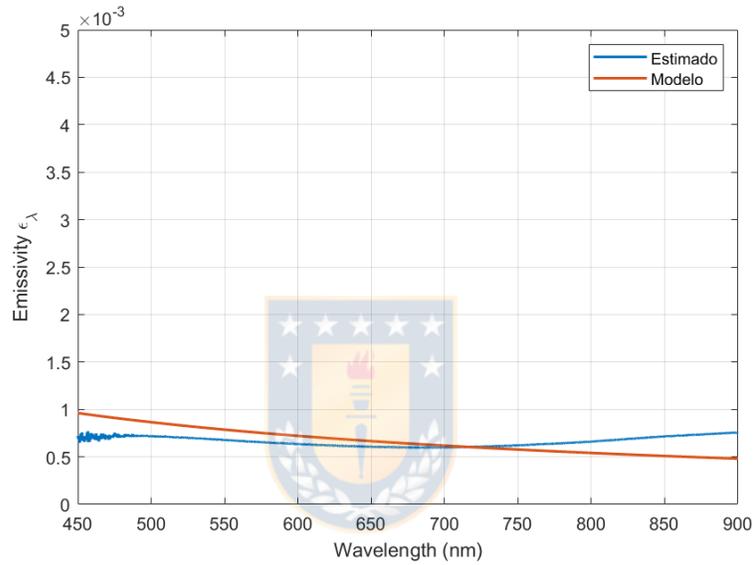


Fig. 4.12: Modelo de emisividad vs emisividad estimada, (Fuente: Elaboración propia).

De esta forma, se obtiene un primer modelo de emisividad que puede ser válido para la nube de partículas de concentrado de cobre en el proceso de combustión.

4.2.5. Modelo radiométrico

Al tener los espectros medidos asociados al proceso bajo diferentes condiciones de operación, se busca obtener una función matemática que busque describir dicho proceso.

$$E_{proceso} = \varepsilon \cdot E_{planck} \cdot f_{aux} \quad (4.7)$$

donde ε corresponde a la función de emisividad presentada recientemente, E_{planck} corresponde a una simulación generada con la ecuación de Planck en función de la temperatura estimada del proceso, y f_{aux} una función auxiliar a estimar de acuerdo a la ecuación

$$f_{aux} = \frac{E_{proceso}}{E_{planck} \cdot \varepsilon} \quad (4.8)$$

Realizando un ajuste de curva a partir de los datos de la función auxiliar, para diferentes condiciones de operación, se aproxima una función exponencial descrita como:

$$f_{aux} = (0,17 \cdot S/Cu \cdot 0,06317 * O_2) \cdot exp(0,005 \cdot \lambda) \quad (4.9)$$

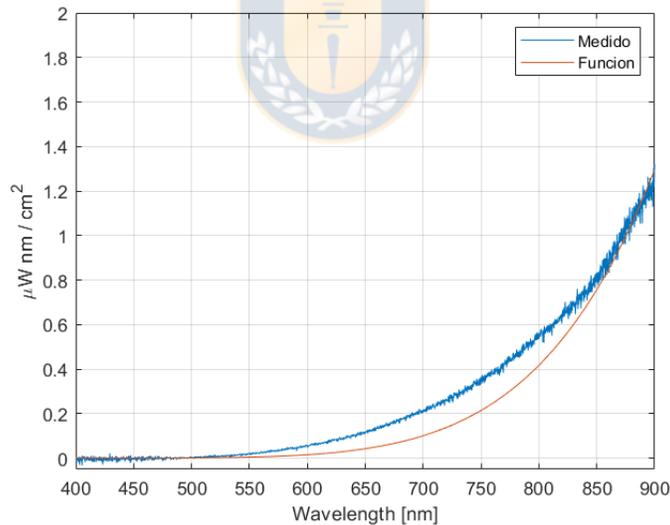


Fig. 4.13: Modelo radiométrico planteado vs medición real, (Fuente: Elaboración propia).

Al comparar los espectros reales medidos bajo diferentes condiciones de operación, respecto a los espectros generados con la función planteada, se obtiene un error GFC promedio de 0.9868 y un RMSE de 0.1924. Esta función auxiliar compensa la atenuación producida por la función de emisividad asociada al concentrado de cobre, como se ve en la Figura 4.13.

4.2.6. Análisis PCA

Al aplicar la proyección de componentes principales a los espectros medidos, y graficar los primeros 4 componentes principales como se muestra en la Figura 4.14, se observa que gran parte de la información está asociado al primer componente, el cual tiene una forma similar a la de Planck del espectro original.

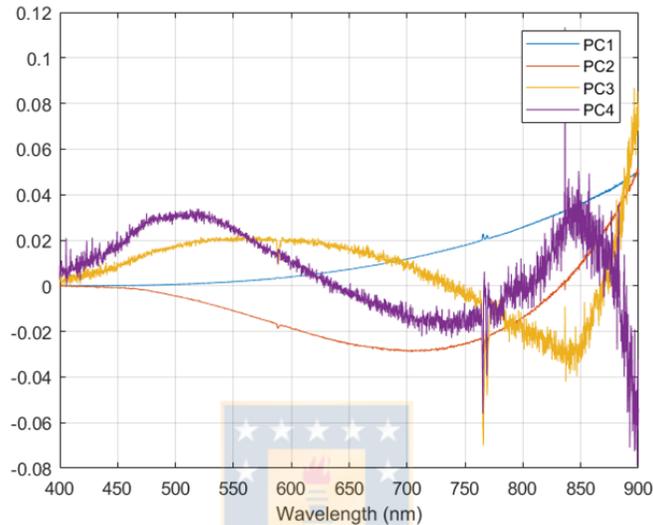
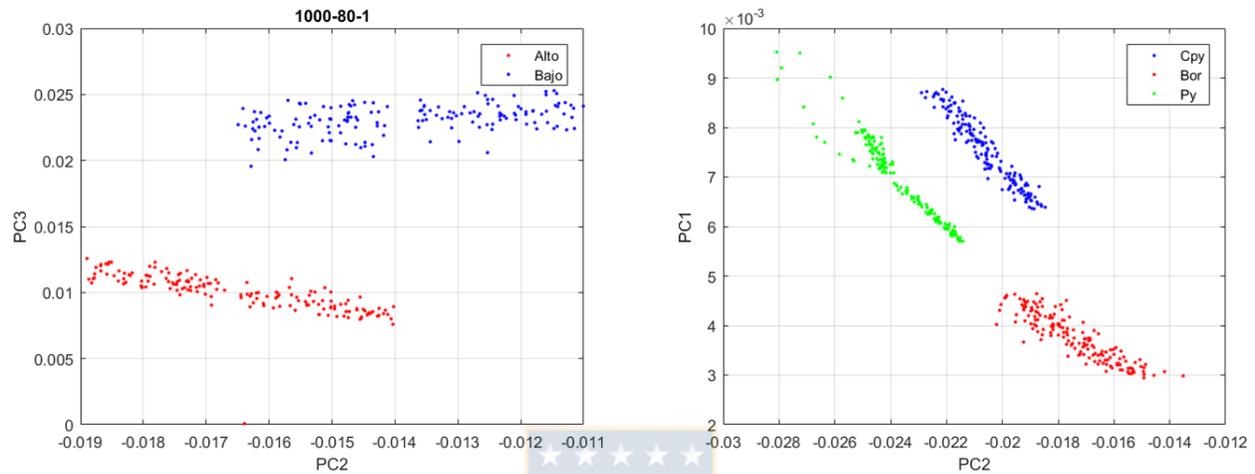


Fig. 4.14: Primeros 4 componentes principales, (Fuente: Elaboración propia).

Por otro lado, en los siguientes componentes se pueden observar las discontinuidades asociadas a los espectros medidos.

El análisis PCA es empleado usualmente como un método de clasificación a través de los espectros medidos en situaciones cuando los espectros son muy similares, incluso cuando las condiciones de operación o lo que está emitiendo tiene una composición diferente.

En la Figura 4.15 (a) se observa la clasificación generada al graficar PC2vsPC3 y que permite ver diferencias entre el concentrado de cobre S/Cu alto vs el bajo en un rango de longitud de onda determinado. Por otro lado, en la Figura 4.15 (b) se observa la clasificación generada al graficar dos componentes principales de diferentes especies puras encontradas en el proceso de fusión flash.



(a) PCA S/Cu alto y bajo.

(b) PCA especies puras.

Fig. 4.15: Clasificación de especies mineralógicas usando PCA, (Fuente: Elaboración propia).

Capítulo 5

Conclusiones

5.1. Sumario

Se realizaron mediciones espectrales en laboratorio para 3 tipos de concentrado de cobre bajo distintas condiciones de operación de un horno droptube, así como de especies mineralógicas puras y combinaciones binarias de ellas. Estas mediciones espectrales contribuyen a generar conocimiento y datos relevantes al proceso de fusión flash realizado en las fundiciones de cobre. Los datos son filtrados a modo de obtener datos representativos según las condiciones de operación del proceso, y luego se implementa un algoritmo que permite la estimación del espectro continuo, así como también estimar la intensidad del espectro del proceso sin presencia del background. Se utilizan técnicas de pirometría óptica para estimar temperatura, y se encontró una relación entre la radiación total de los espectros, el porcentaje de oxígeno en la zona de reacción y la razón S/Cu del concentrado de cobre, por lo que se obtiene una forma de estimación de la razón S/Cu en tiempo real para que sea de conocimiento del operador del horno flash. Finalmente, se plantea una función auxiliar, que combinado con un modelo de emisividad planteado para las partículas de concentrado de cobre, permite describir con un mínimo error el comportamiento radiométrico de las partículas de concentrado de cobre al momento de la combustión.

5.2. Conclusiones

La investigación realizada permitió corroborar que los espectros de emisión generados por las partículas de concentrado de cobre al momento de la combustión se comportan siguiendo la distribución de Planck, lo cual permite realizar estimación de temperatura mediante pirometría óptica. La temperatura promedio estimada depende de la razón S/Cu que tenga el concentrado, así como el nivel de oxígeno en la atmósfera donde la partícula entra en combustión, sin embargo no siguen una distribución conocida que pueda ser usada como modelo predictivo.

Para este tipo de espectros, es posible implementar un modelo lineal simple que permite realizar la separación del espectro de emisión del proceso respecto al background producido por las paredes del horno droptube, el cual es conocido y medido. Posterior a la estimación del real espectro atribuido al proceso, este es comparado y graficado respecto al porcentaje de oxígeno presente en la zona de combustión y la razón S/Cu del concentrado, encontrando una relación exponencial que define con un mínimo error la radiación total emitida por los espectros medidos. Esto da pie a implementar un predictor de la razón S/Cu, el cual puede ser puesto en funcionamiento en tiempo real, permitiendo así al operador del horno tomar decisiones con base tecnológica considerando una variable empírica atribuida al proceso instantáneo.

La función de emisividad planteada matemáticamente se aproxima de buena forma a la estimación extraída a partir de las mediciones de laboratorio, por lo que se concluye que es un aporte que puede permitir desarrollar más análisis futuros respecto a este proceso de combustión. Se plantea una función auxiliar que combinada con el modelo de emisividad planteado y la simulación por Ley de Planck permite modelar radiométricamente de buena forma los espectros de concentrado de cobre en el proceso de fusión flash. De esta forma, se tiene una función dependiente de la temperatura, Oxígeno en la zona de combustión, razón S/Cu del concentrado, que como ya se mostró, puede ser estimada en tiempo real, y la longitud de onda. Además, la función de emisividad planteada para este tipo de partículas permite dar dependencia al tamaño promedio de las partículas, así como también a la densidad de partículas por unidad de volumen y camino óptico, teniendo así un modelo radiométrico que involucra 6 variables independientes.

Finalmente, el área bajo la curva parece ser un buen indicador del brillo de la llama en la combustión de la partículas, y tiene relación directa con la razón S/Cu y el nivel de oxígeno

presente en la zona de combustión, siendo la función planteada una opción real a implementar en terreno para dar al operador la capacidad de tomar decisiones en base a parámetros de operación, confirmando así la hipótesis planteada en trabajo que precede esta Tesis.

5.3. Trabajo Futuro

Se listan las posibles líneas de investigación que se deducen directamente del presente trabajo.

1. Verificar los modelos planteados con mediciones industriales controlando las variables de operación.
2. Profundizar el análisis PCA de los concentrados de cobre, pudiendo así llegar a entregar una clasificación mineralógica en tiempo real.
3. Simular ambientes con una nube de partículas que tenga una densidad similar a las del reactor industrial.
4. Validar el modelo de emisividad planteado, implementando un setup que permita tomar una medición real de la temperatura generada por las partículas usando un método de contacto.

5.4. Publicación

Este trabajo ha dado pie a una publicación que a la fecha está en condición de Enviada a la revista Sensors.

- Milton Marín, Luis Arias, Eduardo Balladares and Carlos Toro, “Spectral emissivity and S/Cu estimation from emissions of flash smelting of copper concentrates”.

Bibliografía

- [1] Página web Consejo Chileno Minero. <http://www.consejominero.cl/chile-pais-minero/>.
- [2] Olaya Cambiaso T., Directora del Cluster Minero, “MAPA DE LOS DESAFÍOS DE LA MINERÍA EN CHILE”, Fundación Chile.
- [3] Página web OTC Semtech. <http://www.semtech.se/OPCTechnology.htm/>.
- [4] Página web Tecnología Integral. <http://www.tecintegral.cl/es/productos/pyro-cps/>.
- [5] Roberto A. Rebolledo, “Estudio Espectrométrico de una Llama de Concentrados de Cobre”, Informe de memoria de título de Ingeniería Civil Electrónica, Depto. Ing. Eléctrica, Universidad de Concepción, Chile, 2011.
- [6] Eder Piceros Fuentes, “Caracterización espectral de reacciones a alta temperatura de intereses en la pirometalurgia del cobre”, Tesis de magíster, Depto. Ing. Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile, 2016.
- [7] K. L. Maxwell and M. K. Hudson. “Spectral Study of Metallic Molecular Bands in a Hybrid Rocket Plumes”, *Journal of Pyrotechnics*, Issue 21, Summer 2005.
- [8] F. Jorgensen and P. Koh, Combustion in flash smelting furnaces, *JOM Comb. Pyrometall.*, 53, 16-20 (2001).
- [9] Sun Yipeng, Lou Chun, Zhou Huaichun, A simple judgment method of gray property of flames based on spectral analysis and the two-color method for measurements of temperatures and emissivity, *Proceedings of the Combustion Institute* 33 (2011) 735–741.
- [10] Coates, P.B. Multi-wavelength pyrometry. *Metrologia* 1981, 17, 103–109.

- [11] H.Watanabe, M. Susa and K. Nagata, Discontinuity in Normal Spectral Emissivity of Solid and Liquid Copper at the Melting Point, Metallurgical and materials transactions, Volume 28A (1997).
- [12] Joseph Kalman and Trevor Hedman, On the Origin and Use of the Emissivity Approximations for Alumina Particles, Propellants Explos. Pyrotech, (2016), 41, 793 – 797.
- [13] J.Stasiek, M.W. Collings, Experimental and theoretical study on the of gases containing dust particles,Warme- und Stoffubertragung 28 (1993), 185-193.
- [14] H.C. Schau, Spectral Background Subtraction Errors in Infrared Field Measurements Made with Fourier Transform Spectrometers, Raytheon Systems Company PO 11337, 1999.
- [15] Zhi-Min Zhang, Shan Chen and Yi-Zeng Liang, “Baseline correction using adaptive iteratively reweighted penalized least squares”, Analyst, 2010, 135, 1138–1146.
- [16] Milton Marín S, Análisis espectral de emisión de concentrado de cobre a altas temperaturas, Memoria de título para Ing. Civil en Telecomunicaciones, Universidad de Concepción, 2018.
- [17] Jussi Vaarno, Juha Jarvi, Tapio Ahokainen, Toni Laurila and Pekka Taskinen ,“Development of a mathematical model of flash smelting and converting processes”, 3 International Conference on CFD in Minerals and Process Industries, Melbourne, Australia, 2013.
- [18] William L. Wolfe, “Introduction to Radiometry”, Tutorial Texts in Optical Engineering.
- [19] Francisco Ramos Concha, “ Modelo matemático de Componentes Principales de Espectros de un Cuerpo Negro para el Estudio y Diseño de Canales Ópticos”, Tesis Magíster Ingeniería Eléctrica, Universidad de Concepción, 2016.
- [20] José Maza Sancho, Curso EH2802, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Septiembre 2015.
- [21] Luis Arias, Sergio Torres, Carlos Toro, Eduardo Balladares, Roberto Parra, Claudia Loeza, Camillo Villagrán and Pablo Coelho, “Flash Smelting Copper Concentrates Spectral Emission Measurements”, Sensors 2018, 18, 2009.

- [22] Oscar Farías, “Towards the development of an optimal combustion control in fuel-oil boilers from the flame emission spectrum”, These of doctorat 1997, Universite de Liege.
- [23] Siegel R. and Howell J.R., “Thermal radiation heat transfer”, Third Edition, Hemisphere Publishing Company, 1992.
- [24] Diermendjian, D. “Electromagnetic scattering of spherical polydispersions”. New York: American Elsevier Publishing 1969
- [25] Godridge A.M: and Hammont E.G, “Emissivity of a very large residual fuel oil flame”, 12 Symposium on Combustion, p. 1219-1227, The Combustion Institute, 1969.
- [26] Christopher M. Bishop, “Pattern Recognition and Machine Learning”, Ed. Springer, 2006.

