



Universidad de Concepción  
Dirección de Postgrado  
Facultad de Ingeniería -Programa de Magíster en Ingeniería Metalúrgica



## **Caracterización espectral de la combustión flash de sulfuros de Cu**

Tesis para optar al grado de Magíster en Ingeniería Metalúrgica

CLAUDIA ALEJANDRA LOEZA ARQUEROS  
CONCEPCIÓN-CHILE  
2017

Profesor Guía: Roberto Parra Figueroa  
Dpto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería  
Universidad de Concepción

**Autor:**

\_\_\_\_\_  
Claudia Loeza A. y Firma del alumno

**Profesor Guía:**

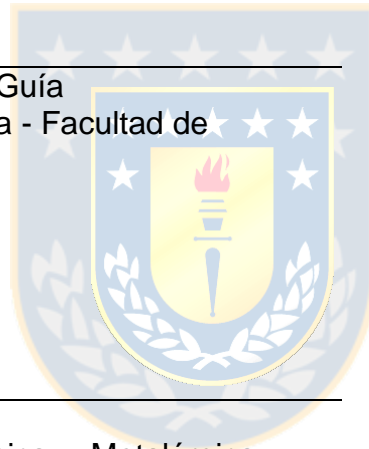
\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Parra F.,

**Director Programa:**

\_\_\_\_\_  
Dr. Eduardo Balladares V.,

**Esta tesis ha sido revisada por los señores:**

\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Parra F. Profesor Guía  
Dpto. de Ingeniería Metalúrgica - Facultad de  
Ingeniería  
Universidad de Concepción



\_\_\_\_\_  
Dr. Manuel Pérez Tello,  
Departamento Ingeniería Química y Metalúrgica  
Universidad de Sonora

\_\_\_\_\_  
Dr. Roberto Parada  
Gerente de proyecto de Fundición Chagres  
Angloamerican

y ha sido

\_\_\_\_\_

## Resumen

De manera general los procesos pirometalúrgicos de producción primaria de metales no ferrosos tienen limitado uso de sistemas de monitoreo y control. En particular el proceso de fusión de concentrados de cobre en hornos de fusión flash carece de instrumentación que permita el monitoreo de la calidad de combustión, específicamente y entre otras opciones, a través de la medición de la temperatura de llama. Una solución es la caracterización espectral de la combustión de los sulfuros de minerales por medio de técnicas de espectroscopía, permitiendo estimar la temperatura de llama con dispositivos optoelectrónicos no invasivos. En este trabajo se realizaron mediciones radiométricas a nivel de laboratorio de una llama de combustión de concentrado de cobre para obtener información espectral. Se utilizó la plataforma LabView, y espectrofotometro USB4000.

Los resultados muestran que los espectros de los concentrados tiene un comportamiento de un cuerpo gris por lo tanto se puede estimar la temperatura, estas fueron entre el rango 1550 a 2100 K. Las características espectral de los concentrados tienen emisiones discontinuas, que son dos picos en las longitudes 589 y 767 [nm].

Por otro lado la combustión de minerales puros sugieren que existe una relación entre descomposición de la pirita generando  $S_2$  disponible para ser oxidado con la intensidad de los picos de emisión.



A mis padres, mis amigos, profesores.

## Agradecimientos

A mis padres por apoyarme en todo lo que necesito. A mis hermanos que siempre me animaron en estudiar algo difícil.

A mi novio que siempre en los momentos más difícil estuvo ahí.



# Tabla de Contenido

RESUMEN.....	III
LISTADO DE FIGURAS.....	VII
LISTADO DE GRAFICOS.....	VIII
LISTADO DE TABLAS.....	VIII
NOMENCLATURA.....	IX
ABREVIACIONES.....	X
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 3. TEORÍA.....</b>	<b>7</b>
3.1. Radiación electromagnética.....	7
3.2. Espectro electromagnético.....	8
3.3. Cuerpo Negro.....	8
3.4. Ley de desplazamiento de Wien.....	10
3.5. Estimación de Temperatura Mediante dos Longitudes de Onda.....	11
<b>CAPÍTULO 4. FUSIÓN FLASH.....</b>	<b>13</b>
4.1. Fusión Flash.....	13
<b>CAPÍTULO 5. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>17</b>
5.1. Montaje y equipamiento.....	17
5.2. Lanza.....	18
5.3. Sonda.....	20
5.4. Captura de datos.....	20
5.5. Procedimiento experimental.....	21
5.6. Combustión de especies minerales en laboratorio.....	23
5.7. Combustión de especies minerales en planta industrial.....	24
<b>CAPÍTULO 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS.....</b>	<b>25</b>
6.1. Introducción.....	25
6.2. Temperatura de reacción de concentrado de Cobre.....	28
6.3. Temperaturas de la nube de partículas estimadas mediante técnicas ópticas.....	30
6.4. Análisis espectral de la combustión de los concentrados de cobre.....	31
6.5. Medición de la reacción del FeS.....	34
6.6. Análisis de Azufre.....	36
6.7. Mediciones de S + especies.....	39
6.8. Medición de la Reacción de Calcopirita.....	42
6.9. Medición de la Reacción de Pirita.....	44
6.10. Mediciones en planta.....	45
<b>CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO A. PLANOS DE LA LANZA .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO B. DETALLE TÉCNICO DE LA SONDA Y LANZA .....</b>	<b>59</b>
LANZA.....	59
SONDA.....	59
<b>ANEXO C. DETALLES TÉCNICOS DE ESPECTROFOTÓMETROS.....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXO D. CALIBRACIÓN DE ESPECTROS .....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO E. CAPTURA RADIOMÉTRICA A TRAVÉS DE LABVIEW.....</b>	<b>65</b>
<b>ANEXO F. LÍNEAS DE EMISIÓN .....</b>	<b>68</b>

## Listado de Figuras

Fig.3. 1 Espectro electromagnético (NASA, 2007) .....	8
Fig.3. 2 Poder de emisión de un cuerpo negro (J. Lienhard, 2000) .....	9
Fig.4. 1 Esquema horno Flash Outokumpu (R. Parada, 2014).....	13
Fig.4. 2 Lanza inyectora de concentrado. (R. Parada, 2014).....	15
Fig.5. 1 Esquema General del Set-Up .....	17
Fig.5. 2 lanza inyectora de concentrado .....	19
Fig.5. 3 Vista superior lanza.....	19
Fig.5. 4 Sonda instalada en HFF de fundición Chagres. ....	24
Fig.6. 1 espectros calibrados para la estimación de temperatura. ....	28
Fig.6. 2 Temperatura de Concentrado A a distintos porcentajes de oxígeno.....	29
Fig.6. 3 Temperatura de Concentrado B a distintos porcentajes de oxígeno .....	29
Fig.6. 4 Temperatura de Concentrado C a distintos porcentajes de oxígeno .....	29
Fig.6. 5 Espectros concentrado A.....	31
Fig.6. 6 Espectros concentrado B.....	32
Fig.6. 7 Espectros concentrado C.....	32
Fig.6. 8 Oxidación de FeS (80% O <sub>2</sub> ).....	34
Fig.6. 9 Comparación de FeS vs C3.....	35
Fig.6. 10 Espectro de combustión de S, 30% O <sub>2</sub> .....	36
Fig.6. 11 Espectro de combustión de S, 45% O <sub>2</sub> .....	37
Fig.6. 12 Espectro de combustión de S, 60% O <sub>2</sub> .....	37
Fig.6. 13 Espectro de combustión de S, 80% O <sub>2</sub> .....	38
Fig.6. 14 Espectro de combustión de FeS+S.....	39
Fig.6. 15 Comparación C3 vs FeS.....	40
Fig.6. 16 Espectro de combustión de Cu <sub>2</sub> S+S.....	41
Fig.6. 17 Comparación de Cu <sub>2</sub> S + S vs C3 .....	41
Fig.6. 18 Espectro de calcopirita.....	42
Fig.6. 19 Comparación de espectro de concentrado vs calcopirita .....	43
Fig.6. 20 Espectro FeS <sub>2</sub> .....	44
Fig.6. 21 Comparación de C3 vs pirita.....	44
Fig.6. 22 Espectro de operación normal (Temperatura aproximada de 1398K).....	46
Fig.6. 23 Espectro en aumento de tasa de aire (Temperatura aproximada de 1410K).....	46
Fig.6. 24 Espectro en aumento en tasa de alimentación (temperatura aproximada de 1717K) .....	47
Fig.6. 25 Espectros obtenidos en medición en la industria. ....	47
Fig.6. 26 Comparación espectros planta y laboratorio.....	48
Fig.A. 1 Planos lanza Transversal A.....	55
Fig.A. 2 Plano lanza Longitudinal A.....	56
Fig.A. 3 Plano lanza Longitudinal B.....	57
Fig.A. 4 Planos lanza Transversal B .....	58
Fig.B. 1 Sonda Alta Temperatura (Avantes, 2014) .....	60
Fig.B. 2 Transmisión de la sonda de alta temperatura (Avantes, 2014) .....	60
Fig.C. 1 Espectrofotómetro USB4000 (OceanOptics, 2012) .....	61
Fig.D. 1 Lámpara de calibración.....	63
Fig.D. 2 Energía de la lámpara.....	63
Fig.D. 3 Vector de calibración .....	64

Fig.E. 1 Captura radiométrica (LabView, 2015).....	66
Fig.E. 2 Build XY Graph (LabView, 2015) .....	66
Fig.E. 3 Icono <i>Build Array Function</i> (LabView, 2015).....	67
Fig.E. 4 Icono <i>Convert to Dynamic Data</i> (LabView, 2015).....	67
Fig.E. 5 Captura de datos con USB4000 (LabView,2015).....	67

## Listado de Gráficos

Grafico 6. 1 Estimación de remoción de azufre .....	27
---	----

## Listado de Tablas

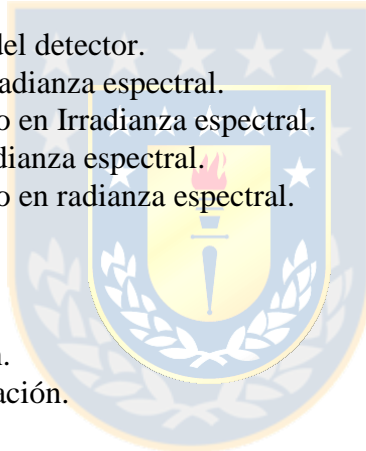
Tabla 5. 1. Resumen condiciones experimentales.....	22
Tabla 5. 2 Detalle de los concentrados (Análisis químico, DIMET, 2015). .....	22
Tabla 5. 3 Composición mineralógica de concentrados (QEMSCAN, GEA, 2015). .....	22
Tabla 5. 4 Especies mineralógicas presentes en los concentrados.....	23
Tabla 6. 1 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado A (QEMSCAN, GEA, 2015).....	25
Tabla 6. 2 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado B (QEMSCAN, GEA, 2015).....	26
Tabla 6. 3 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado C (QEMSCAN, GEA, 2015).....	26
Tabla 6. 4 Reacciones.....	27
Tabla 6. 5 Temperaturas estimadas .....	30
Tabla B. 1 Detalles sonda Avantes (Avantes, 2014).....	59
Tabla C. 1 Detalle técnico del espectrofotómetro (OceanOptics, 2012).....	61
Tabla F. 1 Líneas de emisión espectral del S (NIST, 2005).....	68



# Nomenclatura

## Vectores

$\lambda$	: Longitud de onda.
$\tau$	: Transmisividad.
$\alpha$	: Absortividad.
$\rho$	: Reflectividad.
$\varepsilon$	: Emisividad.
$B_e$	: Energía radiante.
$I_e$	: Irradianza espectral.
$L_e$	: Radianza espectral (Planck).
$L_w$	: Radianza espectral (Wien).
$C_\lambda$	: Calibración USB4000.
$E_{lamp}$	: Energía de HL-2000-CAL.
$S_{lamp}$	: Espectro de HL-2000-CAL.
$S_\lambda$	: Espectro medido.
$dL_\lambda$	: Ancho de banda del detector.
$H_\lambda$	: Calibración de irradianza espectral.
$I_\lambda$	: Espectro calibrado en Irradianza espectral.
$H_\lambda$	: Calibración de radianza espectral.
$L_\lambda$	: Espectro calibrado en radianza espectral.



## Escalares

$A$	: Área de colección.
$T_i$	: Tiempo de integración.
$\Omega$	: Ángulo sólido.
$h$	: Constante de Planck.
$k$	: Constante de Boltzmann.
$c_0$	: Velocidad de la luz.
$c_1$	: Primera constante ley de Planck.
$c_2$	: Segunda constante ley de Planck.
$T$	: Temperatura.
$T_a$	: Temperatura aparente.

# Abreviaciones

## Mayúsculas

VIS : visible.  
NIR : infrarrojo cercano.  
K : Kelvin.

## Minúsculas

nm : nanómetros  
sr : estereorradianes  
 $\mu\text{m}$  : micrómetros



## Capítulo 1. Introducción

---

La industria de producción primaria para metales y aleaciones se ha dividido históricamente en dos grandes grupos reconociéndose los procesos ferrosos, asociados a la industria siderúrgica y procesos no ferrosos, que abarca la producción de una gran diversidad de metales base, siendo los que mayor identificación le dan a este grupo el Cu, Ni, Zn, Al y Pb. Para ambos grupos la producción está esencialmente determinada por procesos pirometalúrgicos, en los cuales las transformaciones químicas tienen lugar a altas temperaturas y son extremadamente exotérmicas.

En la industria siderúrgica la tecnología para el monitoreo del avance del proceso es muy importante, ya que permite tener una operación altamente controlada y muy poco dependiente del factor humano. Esta industria ha invertido de manera considerable en el desarrollo de instrumentación para controlar sus procesos. La ausencia de la instrumentación para el monitoreo y control de los procesos pirometalúrgicos no ferrosos genera una serie de problemas operacionales, y es limitada debido que no se ha invertido lo suficiente en el desarrollo del conocimiento fundamental que permite traducirlo en avances tecnológicos para monitorizar de forma eficaz los procesos productivos, lo que se traduce en una escasa disponibilidad de herramientas para el apoyo a la toma de decisiones a partir de información en línea y/o en tiempo real. En general la aplicación en estos procesos de las posibilidades modernas de monitoreo y control choca con la no disponibilidad en el mercado de instrumentación y sensores especialmente diseñados para ellos. Esto resulta especialmente relevante en el caso de Chile, país que posee la mayor producción de cobre en el mundo, y una de las mayores capacidades de fusión.

En forma específica, para la fusión flash, a la fecha se han aplicado estrategias operacionales pero no garantizan un buen control del proceso de combustión de los sulfuros minerales, principalmente por una falta de instrumentos que permitan el adecuado monitoreo operacional del proceso. Es de relevancia para estas operaciones el contar con un sistema de monitoreo en línea y en tiempo real que permita visualizar indicadores del estado del proceso, para lograr un adecuado control de la operación. Una solución es utilizar técnicas que permitan cuantificar el proceso de manera no invasiva y lo más importante que permitan el trabajo en ambientes hostiles en alto contenido de polvo y altas

temperaturas. Una solución global propuesta para la pirometalurgia no ferrosa es la utilización de técnicas de espectroscopia, mediante sensores optoelectrónicos ya que cumplen con los requerimientos de ser no invasivo y de fácil manipulación lo cual es ideal para los diferentes reactores del proceso productivo.

En la presente tesis se propone caracterizar la combustión flash de sulfuros de cobre mediante la implementación en un reactor Drop-Tube de un sistema de mediciones espectrales de la llama de combustión de concentrados de cobre que consiste de un espectrofotómetro de rango visible e infrarrojo (VIS-NIR) que captura la luz emitida por la llama a través de una fibra óptica, permitiendo la determinación de la temperatura de reacción y el reconocimiento de características espectrales de la combustión de sulfuros de Cu.

En este contexto y a partir de la definición de la investigación

Se plantea la siguiente hipótesis:

“Las emisiones espectrales de la llama de combustión de concentrados de sulfuros de cobre están relacionados con los procesos fisicoquímicos”

de la hipótesis se plantea el siguiente objetivo general

Correlacionar las mediciones espectrales y sus características con los procesos fisicoquímicos de la combustión de concentrados de sulfuros de cobre.

#### *\*Objetivos específicos*

- Realizar mediciones espectrales, rango visible y NIR, en la combustión de concentrados de cobre.
- Determinar temperatura de la llama en la combustión por el método de pirometría.
- Identificar características espectrales de la combustión de concentrados de cobre

## Capítulo 2. Revisión Bibliográfica

---

En la década de los 80 comenzaron los esfuerzos sistemáticos tendientes a dilucidar los fenómenos fisicoquímicos que tienen lugar durante la combustión de sulfuros en los reactores de fusión instantánea.

F.R.A. Jorgensen, F.J. Moyle estudiaron la variación térmica en la oxidación de partículas de pirita [1]. Los mismos autores analizaron la composición de fases obtenidas después de la oxidación de pirita en aire a temperaturas intermedias mediante análisis térmico diferencial [2]. Estimaron además la temperatura de ignición de partículas a partir de mediciones del contenido residual de azufre en las muestras.

Con estos trabajos se impulsó la experimentación más detallada, describiendo la cinética de la fusión flash de calcopirita [3,4] en un reactor a escala laboratorio en condiciones de fusión instantánea.

Posteriormente algunos investigadores desarrollaron modelos matemáticos de la combustión de calcosina [5]

En los modelos desarrollados un valor relevante es la temperatura alcanzada en la reacción flash de calcopirita y pirita, por lo que se utilizan pirómetros de doble longitud de onda para estimar la temperatura en base a la emisión de luz generada en la reacción [6]. Con la aplicación de estos instrumentos se obtuvieron temperaturas instantáneas entre 1473 y 2773K [5,6].

Sohn y **Chabual** [7] estudió la cinética y transferencia de calor y masa de la reacción de calcopirita en un reactor de flujo laminar utilizando como variable la temperatura de los gases al interior del reactor, y determinó que a temperaturas, cercanas a los 2000K existe volatilización de cobre.

Tuffrey et al. [8] utilizaron reactores Drop-Tube para combustionar partículas de galena, se utilizaron el número y tamaño de partículas, además el porcentaje de oxígeno en el reactor como variables experimentales, con lo que se obtuvieron resultados similares a experimentos con calcopirita y pirita, se establecieron mecanismos de reacción, y midieron la temperatura variable de las partículas entre 1400 a 2750K mediante el uso de pirómetros de doble longitud de onda en 710-810[nm].

Laurila [9] utiliza un pirómetro de doble longitud de onda en 997.5 y 1608[nm], obteniendo temperaturas de entre 1300 a 2600K, en la reacción de calcopirita en horno flash a escala laboratorio, lo que se ha comparado con resultado de simulaciones CFD del mismo autor [10].

Utilizando un reactor de flujo laminar Wilkomirsky [11] estudia la cinética de la oxidación en aire de molibdenita, las temperaturas alcanzan hasta los 2600K. Los experimentos muestran que a 21% de oxígeno la temperatura apenas alcanza los 1300K mientras que en oxígeno puro las temperaturas se aproximan a los 3000K.

Sohn et al [12] genera un modelo matemático de la combustión de concentrados calcopiríticos que incluyen la cinética con lo cual intenta predecir el comportamiento del proceso en cuanto a generación de SO<sub>2</sub>. El mismo autor en [13] modela de forma diferencial la transferencia de calor, concluyendo que la principal forma de transferencia de calor es la radiativa entre las partículas y paredes del horno, además propone que la radiación de la fase gas es menos importante que la radiación entre las partículas y el ambiente.

Jorgensen [14] ha modelado la cámara de reacción del horno de fusión flash de OlympicDam empleando un paquete CFD comercial. Los autores determinaron distribuciones de temperatura, composición de la fase gas, patrones de flujo, tiempos de residencia y grado de remoción de azufre. Trabajos similares han sido desarrollados por investigadores de Outokumpu [10], sin embargo la modelación ha sido parcialmente validada. En este aspecto Parada [15] obtuvo resultados de simulación de temperatura del sistema de combustión en torno a los 1650°C.

La descripción fisicoquímica del proceso flash se ha centrado solo en la combustión de partículas, por lo que Caffery [16] aplicó la teoría del grupo de combustión a la combustión de sulfuros de cobre desarrollado por Du et al [17]. Este método, ampliamente utilizado en combustión de carbones, permite establecer cuantitativamente el efecto que tienen las interacciones partícula-partícula y gas-partícula en la transferencia de masa y calor. De este modo, a partir de parámetros tales como la densidad en número de partículas, el diámetro de las partículas y el radio de la nube, es posible determinar el valor del número de combustión en grupo, el que caracteriza los efectos sobre los fenómenos de transporte de las interacciones de las partículas al interior de la nube [15].

Por otra parte, la oxidación flash de concentrados sulfurados es un proceso complejo que involucra productos gaseosos y de especies intermedias dando lugar a emisión y absorción de bandas espectrales que llevan información importante sobre el proceso de reacción. Por esto, si se dispusiera de esta información a partir de mediciones de los espectros emitidos se contaría con información muy útil tanto para la investigación de los factores limitantes que afectan el proceso de fusión flash como para el monitoreo y control de la operación.

No obstante esto, el uso de la información espectral en la industria de producción primaria de metales no ferrosos es casi inexistente. Sólo en la última década, algunos estudios han considerado la emisión de luz de la llama del convertidor Peirce-Smith como fuente de información para identificar algunos parámetros del proceso como el punto final del proceso de producción de escoria, el control en línea del contenido de hierro en el metal blanco y el control de calidad de la escoria [18].

El estudio directo de la información espectral producido por las reacciones de combustión puede llevar a tener una visión más profunda en el proceso por la determinación no invasiva de temperaturas de reacción y la observación de la especie principal de la reacción y sus concentraciones. Este concepto ha sido aplicado con éxito a la combustión de líquidos o gases [19] y mezclas pirotécnicas [19-22]. En estas aplicaciones, la información proporcionada por los espectros en una velocidad de barrido de varios cientos de espectros por segundo ha sido suficiente para investigar: la estructura de la llama, los procesos de reacción en la mayor parte de mezclas pirotécnicas, el movimiento y combustión de partículas individuales, los procesos de ignición de pólvoras, propagación de las explosiones de gas y de las observaciones in situ de las reacciones en las cámaras de combustión cerrada a través de fibra óptica [22].

La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha consideran el diseño del pirómetro óptico de dos colores para medir la temperatura de las partículas que reaccionan, pero no se han actualizado las investigaciones al uso de instrumental optoelectrónico que permite obtener espectros de radiación en un amplio rango de longitudes de onda, consistente en detectores semiconductores que transforman la radiación incidente en una corriente eléctrica proporcional. En el caso de los espectrómetros la radiación incidente es difractada

hacia una agrupación lineal de detectores, donde cada uno de ellos está asociado a una longitud de onda específica. Esto solo está siendo parcialmente usado en combustibles fósiles y pirotecnia [23]. Con mediciones espectrales de amplio rango hay más facilidades de ajustar los métodos de medición de temperatura, Eagar describe algunos en [24],[25], siendo uno de los métodos más certeros el de doble longitud de onda.

Se ha constatado una carencia importante en el conocimiento fundamental de la combustión de partículas de sulfuros de cobre/hierro en la oxidación flash, en la que no hay reportes sobre mediciones de radiación espectral completa emitida por las partículas en combustión, esto lleva a desarrollar una investigación básica sobre la modelación fenomenológica fisicoquímica de la combustión flash de las partículas de sulfuro asociado a una caracterización espectral de los sistemas reactivos complejos involucrados en el proceso.





## Capítulo 3. Teoría

---

### 3.1. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética corresponde a las cargas aceleradas o las corrientes eléctricas cambiantes dan lugar a campos eléctricos y magnéticos, es decir que la radiación electromagnética está formada por campos eléctricos y magnéticos, y se propagan en el espacio a través de ondas portadoras de energía. El fundamento teórico de la radiación fue descrito por el físico James Clerk Maxwell quien estableció que la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en el vacío  $c$  está relacionada con la permitividad y permeabilidad del medio como:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

Donde  $\epsilon_0$ : Permitividad eléctrica en el vacío, y  $\mu_0$ : Permeabilidad magnética en el vacío. esta velocidad es la misma para cualquier onda electromagnética que se propaga en el vacío.

Estos campos que se mueven con rapidez se llaman ondas electromagnéticas o radiación electromagnética y representan la energía emitida por la materia como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas.

Todas estas formas de energía radian de acuerdo a la teoría básica de onda, o teoría ondulatoria.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (2)$$

$c$  la velocidad de propagación, la frecuencia  $\nu$  (el número de oscilaciones por segundo) de una onda electromagnética puede variar, dependiendo de la fuente.

La radiación difiere con respecto a los otros mecanismos de transferencia de calor (convección, conducción) en que no requiere la presencia de un medio material para llevarse a efecto. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío.

### 3.2. Espectro electromagnético

Es un término que se usa para diferenciar los distintos tipos de radiación electromagnética, de acuerdo a su longitud de onda. El espectro electromagnético no tiene división, sin embargo se emplea de esta manera para diferenciar los diferentes métodos utilizados para su detección o medición.

El espectro electromagnético está compuesto de rayos gamma, rayos x, ultravioleta, luz visible, infrarrojo, microondas, y las ondas de radio.

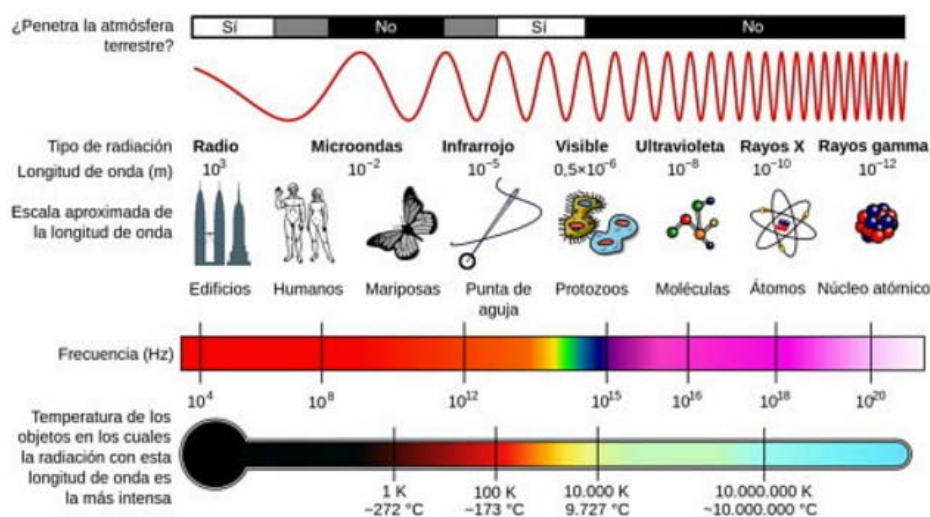


Fig.3. 1 Espectro electromagnético (NASA, 2007)

### 3.3. Cuerpo Negro

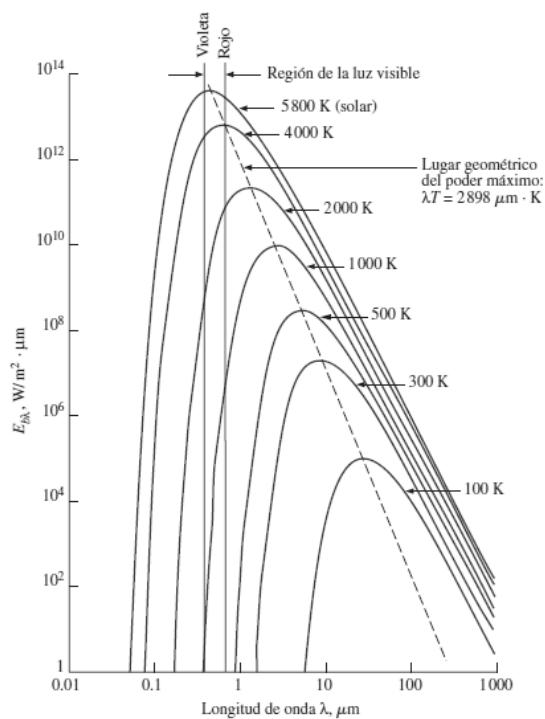
Un cuerpo negro se define como un emisor y absorbedor perfecto de la radiación. Un cuerpo negro absorbe toda la radiación incidente, sin importar la longitud de onda ni la radiación. Asimismo, emite energía de radiación de manera uniforme en todas direcciones, por unidad de área a la dirección de emisión. Es decir, un cuerpo negro es un emisor difuso, lo que significa que es “independiente de la dirección”. La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial la cual se expresa por la Ley de Stefan Boltzmann

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (4)$$

donde  $E_b$  se llama poder de emisión de un cuerpo negro y esta ecuación nos infiere que la radiación térmica es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta. Esta ecuación nos determina la radiación térmica en todo el espectro de un cuerpo negro la potencia radiativa en todas las longitudes de onda en una temperatura absoluta.

Para determinar la energía en una longitud de onda específica se emplea la ley de Planck

$$E_{b\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(\frac{C_2}{\lambda T}) - 1]} \quad (5)$$



**Fig.3. 2 Poder de emisión de un cuerpo negro (J. Lienhard, 2000)**

### 3.4. Ley de desplazamiento de Wien

La longitud de onda para la cual es máxima la emisión del cuerpo negro es inversamente proporcional a su temperatura absoluta:

$$\lambda_{m\acute{a}x}(\mu m) = 0.2014 \frac{hc}{kT} = \frac{2898(\mu mK)}{T(K)} \quad (6)$$

El lugar geométrico de estos valores se representa por la línea punteada en la Figura 3.2.

#### *Espectro de emisión continuo y discontinuo en Combustión*

La energía emitida por la reacción de combustión, y en particular la combustión de concentrados minerales con alto contenido en azufre puede ser medida mediante sensores ópticos, los cuales permiten capturar la radiación espectral en base al flujo de luz incidente en el sensor.

Mediante la ley de Planck se puede modelar la energía radiada por un cuerpo a una determinada temperatura. Cada cuerpo emite energía como una fracción menor a la energía de un cuerpo negro a la misma temperatura, así la emisividad  $\varepsilon$  representa la capacidad de emitir energía de cada cuerpo no ideal.

$$I(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda^5 \left( \exp \frac{c_2}{\lambda T} - 1 \right)} \quad (7)$$

La intensidad espectral descrita en la ecuación (7) representa la radiación continua emitida. Sin embargo la radiación total o simplemente espectro de combustión está dada por la suma de la radiación continua más la radiación discontinua.

$$I(\lambda, T)_{\text{total}} = I(\lambda, T)_{\text{cont}} + I(\lambda, T)_{\text{disc}} \quad (8)$$

La radiación discontinua puede tener origen en algún componente químico del cuerpo que presente una gran transición entre niveles de energía. La intensidad discontinua es capaz de reflejar ciertas características de reactivos y/o comburentes y por ende de la combustión de estos reactivos.

### 3.5. Estimación de Temperatura Mediante dos Longitudes de Onda

El método de dos longitudes de onda o también llamada pirometría de dos colores es una técnica que tiene por objetivo obtener la temperatura del cuerpo emisor sin tener que conocer el valor de su emisividad y operacionalmente en procesos de altas temperaturas aprovechar la capacidad de medición a distancia. Sin embargo para que el método entregue un resultado preciso es necesario que el cuerpo emisor se comporte como un cuerpo “gris”, es decir que la emisividad sea constante en el rango de longitudes de onda trabajado ya que de lo contrario la temperatura obtenida diferirá de la temperatura real del objeto.

Entonces la pirometría de dos colores sólo entrega resultados confiables cuando el cuerpo emisor se comporta como un cuerpo gris y también cuando las longitudes de onda seleccionadas no presentan radiación no equilibrada como por ejemplo las líneas de emisión correspondiente a radiación discontinua (picos de emisión) o absorción atómicas.

Para obtener la expresión que entrega la temperatura del cuerpo emisor se parte utilizando la expresión para la emisión de un cuerpo real dada por (7)

Se hace supuesto que el cuerpo se comporta como un cuerpo gris, las longitudes de onda que se toman para hacer el cálculo no tienen líneas de emisión ni de absorción y se puede simplificar la ecuación de Planck con la siguiente:

$$I_{\lambda} = c_1 \lambda^{-5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} \right)^{-1} \quad (9)$$

Esta se cumplirá solo para longitudes de onda inferiores a  $\lambda_{\max}$ , dada por el desplazamiento de Wien

$$\lambda < \lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (10)$$

realizando el cociente entre dos intensidades espectrales cada una a una longitud de onda distinta del mismo espectro de emisión, se tiene

$$\frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{\lambda_1, T} \lambda_2^5 e^{c_2/\lambda_2 T}}{\varepsilon_{\lambda_2, T} \lambda_1^5 e^{c_2/\lambda_1 T}} \quad (11)$$

asumiendo que la emisividad es igual para las dos intensidades debido al supuesto de que es un cuerpo gris, la temperatura es calculada como sigue

$$T = \frac{c_2 \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right)}{\ln \left[ \left( \frac{I_{\lambda_1}}{I_{\lambda_2}} \right) \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right]} \quad (12)$$

Esta última expresión es ampliamente utilizada, debido a la gran cantidad de materiales que presentan un comportamiento similar a un cuerpo gris en rangos específicos de longitudes de onda, por lo que no es necesario conocer el valor de la emisividad para obtener un valor temperatura con alta precisión.



## Capítulo 4. Fusión Flash

---

### 4.1. Fusión Flash

La fusión flash es un proceso pirometalúrgico utilizado para fundir concentrados sulfurados de metales, principalmente de cobre y níquel.

El tratamiento para el cobre utilizando esta vía, consiste en soplar aire enriquecido con oxígeno a un concentrado de sulfuros de cobre y hierro, previamente secado proveniente de flotación.

En la siguiente figura Fig.4.1 se muestra un esquema de horno flash, donde se observa la entrada de sulfuros y sílice a alta temperatura contactándose rápidamente con el oxígeno inyectado. Generando con esto la fusión de sólidos, gran desprendimiento de calor y la oxidación de Fe y S.

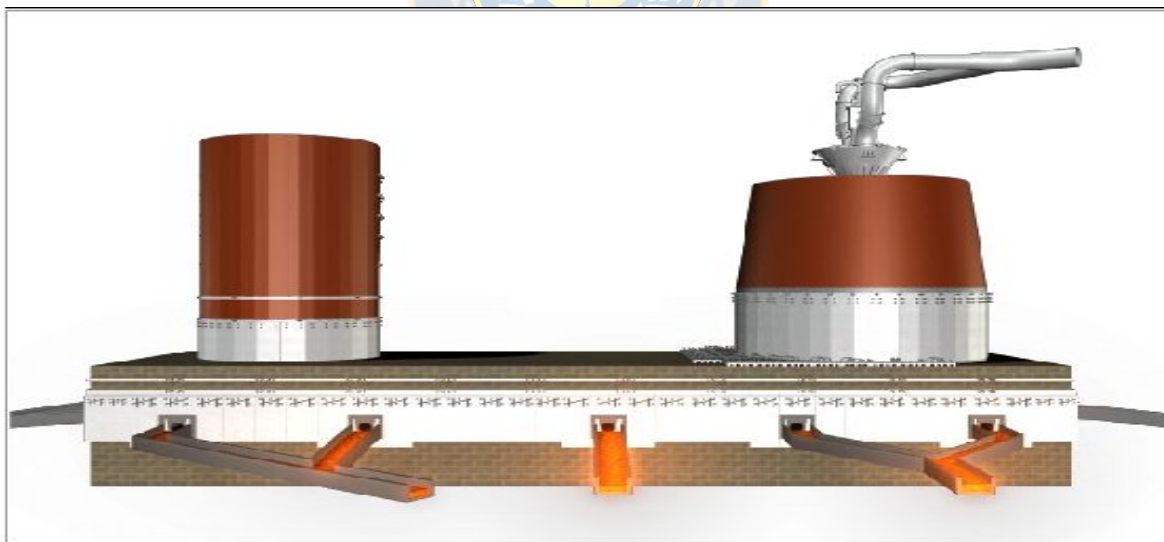


Fig.4. 1 Esquema horno Flash Outokumpu (R. Parada, 2014)

Los productos de la fusión Flash son 2 fases fundidas y el gas concentrado en SO<sub>2</sub>. La primera fase fundida (mata) recolecta el Cu (58-66% en Cu<sub>2</sub>S-FeS) proveniente del concentrado. La segunda fase fundida es la escoria que contiene oxido de hierro formado a partir de la reacción de éste con el oxígeno, incluyendo óxidos de diversos minerales a partir del contenido del concentrado. Finalmente en los gases, se recupera SO<sub>2</sub> de la oxidación del azufre, el N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> de la combustión de combustibles fósiles usados como apoyo térmico.

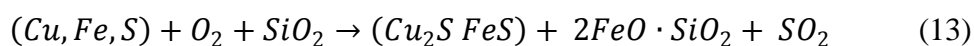
La escoria en el horno contiene entre 1-2% de Cu, ésta se envía normalmente a algún proceso de tratamiento de recuperación de Cu. La escoria final que contiene Cu empobrecido se descarta o puede ser vendido como arena, balasto de ferrocarril o relleno de caminos. Respecto al gran volumen obtenido de SO<sub>2</sub>, este generalmente es sometido a tratamiento térmico con el fin de purificar y obtener subproductos como ácido sulfúrico, SO<sub>2</sub> líquido o azufre elemental.

Los concentrados provenientes de flotación tienen tamaños que fluctúan entre son sometidos al proceso de secado antes de ser utilizados en la fusión Flash. Las especies mineralógicas más comunes en el concentrado son la calcopirita, pirita, bornita, calcosina, covelina y cuarzo.

Junto con el concentrado se alimenta sílice (SiO<sub>2</sub>), donde su función principal es reaccionar con los óxidos de hierro formados durante la fusión, formando una escoria inmisible con la mata, y de baja solubilidad de Cu. Las escorias contienen entre 28-32% de SiO<sub>2</sub>.

El gas utilizado en fusión Flash es aire enriquecido que contiene entre 50-80% de O<sub>2</sub> siendo el resto N<sub>2</sub> y/o Ar.

Las reacciones químicas que ocurren en el horno Flash son principalmente las reacciones de la calcopirita y pirita, que son fuertemente exotérmicas, ellas proporcionan la mayor parte de energía para calentar, fundir y sobrecalentar los productos del horno. De hecho, cuando se usa oxígeno industrial, altamente enriquecido con oxígeno para proporcionar O<sub>2</sub> para las reacciones ya mencionadas, no se necesita ningún combustible fósil para mantener el régimen térmico del horno.





Reacción entre los óxidos de hierro y la sílice componen gran parte de la escoria obtenida en la fusión.

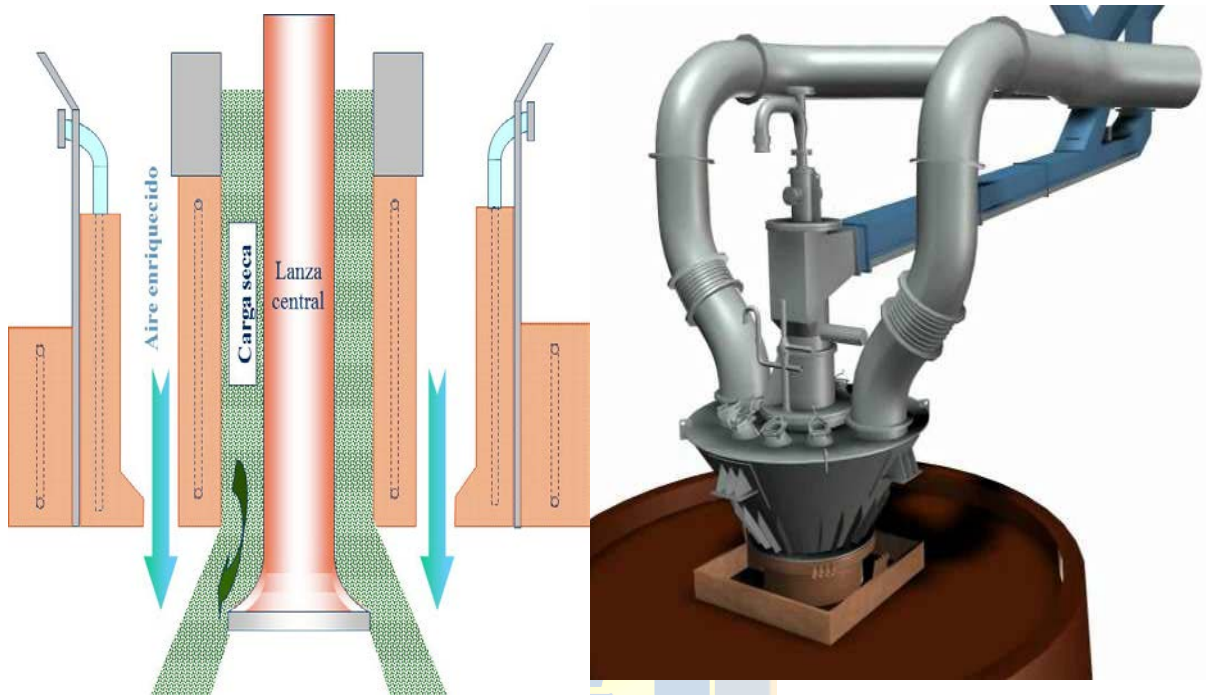


Fig.4 2 Lanza inyectora de concentrado. (R. Parada, 2014)

En cuanto al sistema de alimentación, el concentrado y el aire con diferentes contenidos de oxígeno se introducen en el horno flash a través de quemadores de concentrado en la parte superior del reactor.

La principal tarea de los quemadores es la formación de una suspensión de partículas en la fase gaseosa uniformemente distribuida en el reactor, para que las reacciones de oxidación puedan ser llevadas a cabo de forma rápida, efectiva y eficiente aprovechando el volumen total del reactor. La suspensión de partículas en los gases y un buen mantenimiento de un flujo constante en los materiales alimentados son solo posibles si están secos. Esto se explica por qué la alimentación del horno flash siempre se seca antes de ser alimentado hacia al horno.

Los quemadores consisten en dos tubos concéntricos, el tubo central de alimentación sólida y el anillo de inserción de los gases que componen la atmosfera oxidante. Los quemadores modernos están equipados con un cono central para distribuir uniformemente

el flujo gaseoso (Fig.4.2). El aire es soplado hacia el interior a través de agujeros alrededor del perímetro del cono para distribuir el concentrado ampliamente en la zona de reacción.

Las principales variables objetivo del horno de fusión flash son producir una mata (típicamente 60% a 65% Cu), con estándares de temperatura de 1240°C para la mata y 1260°C para la escoria.

La estrategia convencional de operación del horno de fusión flash que se utiliza para controlar las variables objetivos, actúa básicamente sobre los siguientes parámetros, denominados parámetros de operación:

Tasa de fusión (ton/h): Es la carga seca alimentada por unidad de tiempo al quemador de concentrados, necesaria para producir una determinada cantidad de mata por unidad de tiempo.

Coefficiente de Oxígeno (Nm<sup>3</sup>/ton): Es el Oxígeno necesario, calculado por el balance de masa, que es requerido para producir, a partir de un concentrado de características dadas, la extracción del Hierro y Azufre, para la producción de una mata a un determinado contenido de Cobre (ley de mata).

Enriquecimiento de Oxígeno (% O<sub>2</sub>): Es el Nitrógeno necesario en el aire enriquecido, calculado por el balance de energía, para obtener una determinada temperatura de mata y escoria. Purgando el calor en exceso en el volumen del Nitrógeno ingresado, que se extrae en la fase gaseosa.

Tasa de adición de fundente, que tiene por objetivo dosificar la SiO<sub>2</sub>, controlando su contenido objetivo en la escoria final, el que dependerá de la razón Fe/SiO<sub>2</sub>.

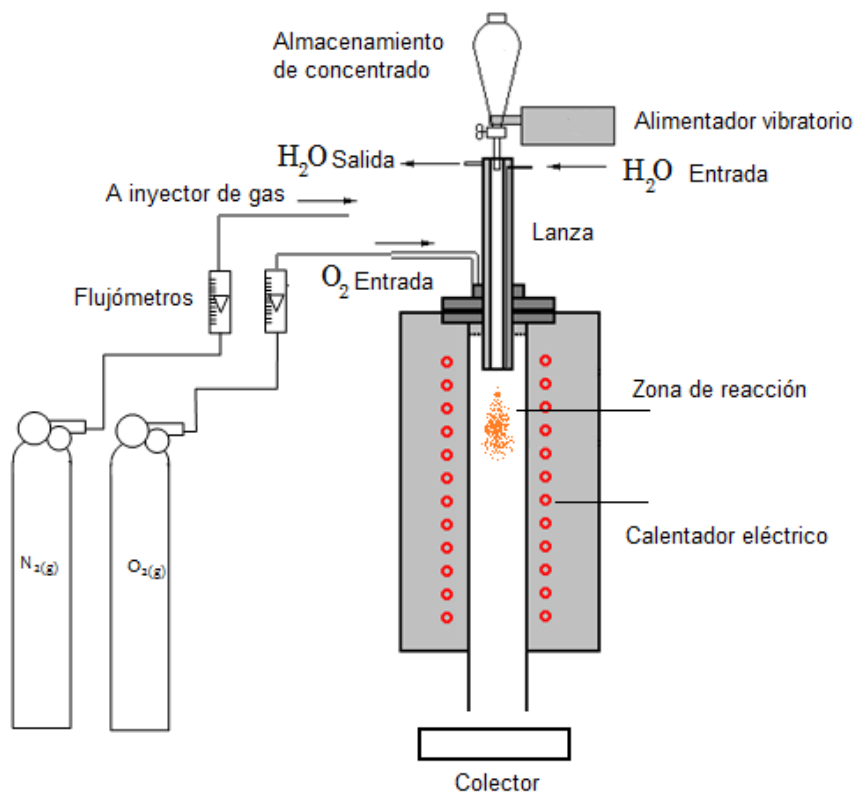
Tasa de adición de hidrocarburos, el que se calcula para cerrar el balance térmico. Sin embargo operacionalmente, siempre se mantiene un nivel mínimo para mantención térmica de lugares geométricos.

En resumen, la operación del HFF se controla primero para permitir un proceso de fusión estable a la tasa de fusión máxima técnicamente recomendada, que suele ser la más rentable, y segundo, para producir mata, escoria y gases a composiciones y temperaturas constantes. Para ello la tecnología HFF recurre a cinco parámetros de control: la tasa de alimentación de concentrado, la tasa de alimentación de fundente, el flujo volumétrico de aire de soplado, el nivel de enriquecimiento de Oxígeno del aire y la tasa de combustión de hidrocarburos.

## Capítulo 5. Desarrollo Experimental

### 5.1. Montaje y equipamiento

El montaje experimental para las pruebas y la captura espectros de la combustión de concentrado de cobre está conformado por un horno Drop-tube, que es calentado a 773 K, un sistema de alimentación del concentrado de cobre a combustionar, una lanza para el ingreso del concentrado, un sistema de control de comburentes (oxígeno y nitrógeno), ver Fig. 5.1



**Fig.5. 1 Esquema General del Set-Up**  
(Elaboración propia)

El horno drop-tube es un horno de flujo laminar, calentado eléctricamente, permite alcanzar una temperatura de 783 K. La temperatura al interior de este es monitoreado mediante una termocupla tipo K que está acoplada en la parte superior del reactor.

En la parte superior consta de una lanza refrigerada con agua, donde se alimentan los reactivos. Esta misma lanza permite la inyección de los gases requeridos para el proceso. El suministro de los gases fue obtenido mediante bombonas de nitrógeno y oxígeno de grado técnico.

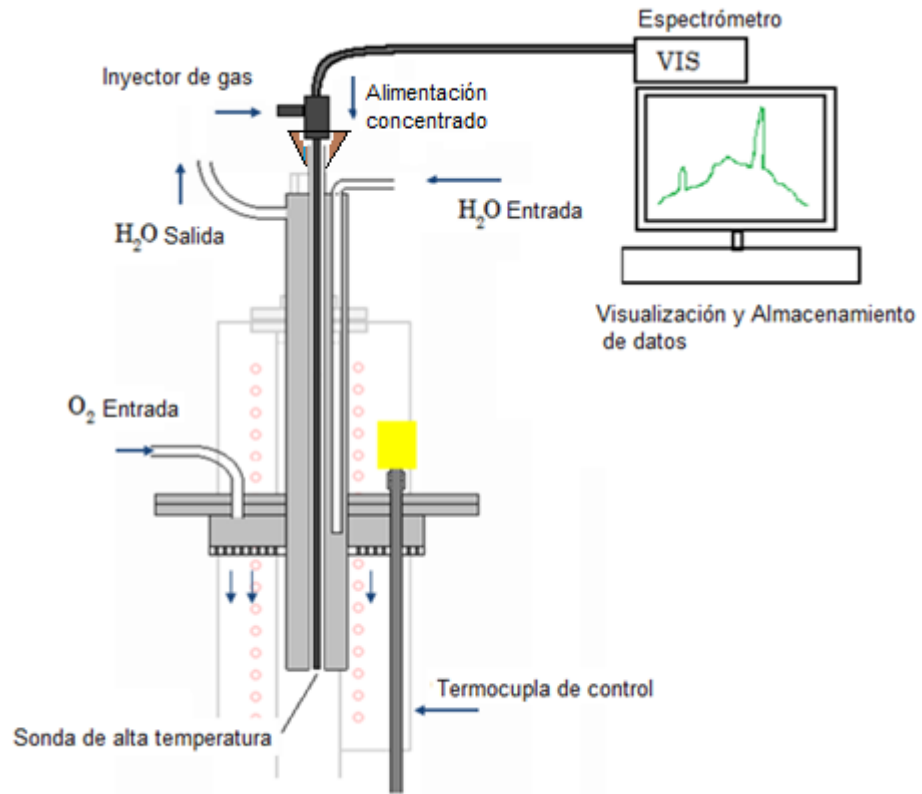
La reacción ocurre en la parte vertical del horno ver Fig.5.1 donde el concentrado se mezcla con los gases para producción de la reacción de partículas de la nube.

Finalmente los productos que son la reacción de la combustión de concentrado de Cu se depositaban en un recipiente en la parte inferior del horno.

Las condiciones de los experimentos están dadas por el contenido de S respecto al Cu (razón S/Cu) y el porcentaje de oxígeno dentro de la atmósfera.

## 5.2. Lanza

La lanza es un arreglo de manera concéntrica de diferentes canalizaciones para permitir la alimentación del concentrado y mantener la sonda en el centro, con el objetivo de garantizar las capturas radiométricas de la combustión del concentrado de cobre, en la Fig.5.2 se muestra el esquema general de lanza donde el tubo central permite el ingreso de la sonda de medición espectral y de esta forma tener un ángulo de visión directo sobre la reacción de las partículas.. Además cuenta con un sistema de refrigeración para resguardar la sonda y un distribuidor de aire enriquecido comburente del proceso.



**Fig.5. 2 lanza inyectora de concentrado**  
(Elaboración propia)



**Fig.5. 3 Vista superior lanza.**  
(Elaboración propia)

### 5.3. Sonda

La sonda correspondiente a esta experiencia se trata de una fibra óptica recubierta y con capacidad de refrigeración, diseñada para soportar temperaturas hasta 873 K, fue fabricada por la empresa AVANTES, en la Fig.B.1 se aprecia su característica principal es blindado de acero inoxidable, y con una entrada de gases para proteger de altas temperaturas.

### 5.4. Captura de datos

La toma de datos es a través de la plataforma LabVIEW, un sistema de programación gráfica diseñada para aplicaciones orientadas a la adquisición, análisis, control y visualización de datos.

La programación se desarrolla creando instrumentos virtuales (VIs), que simulan a un instrumento real mediante un panel frontal y un diagrama de bloques. Cada bloque está creado mediante lenguajes de programación tradicionales, pero LabVIEW proporciona todas las herramientas básicas, por lo que es posible crear nuevos instrumentos virtuales a partir de bloques sin necesidad de programar en otro lenguaje. LabVIEW en particular permite el acoplamiento y sincronización con espectrofotómetros Ocean Optics, mediante los drivers creados por National Instrument y también por los drivers creados por Ocean Optics. En este trabajo se ha utilizado el espectrofotómetro USB4000, con capacidad para medir intensidades de hasta 65,000 cuentas digitales, en el rango espectral efectivo de 350-1000 [nm]. El USB4000 consta de 3648 sensores de silicio en línea con resolución 0.02 [nm].

## 5.5. Procedimiento experimental

### *Combustión de concentrados en laboratorio*

Para realizar la medición espectral de cobre se calentó el reactor a 773 K, mientras la lanza inyectora es refrigerada con agua, para evitar que la combustión ocurra en el trayecto del concentrado dentro de la lanza y también como protección del sistema óptico. Una vez que alcanzada la temperatura del horno, se inyecta oxígeno y se introduce la sonda de alta temperatura con nitrógeno al interior de lanza inyectora. Tanto el oxígeno como el nitrógeno son inyectados independientemente, mezclándose dentro del horno según el porcentaje de oxígeno requerido para la prueba experimental. Las partículas de concentrado, fueron incorporadas al reactor mediante un alimentador mecánico con vibración. Se procedió a la captura de datos espectrales generados por la reacción del concentrado de cobre en el reactor de flujo laminar. Las partículas combustionadas salen del reactor, y se depositaron en un recipiente, para ser analizado químicamente, y mediante mineralogía automatizada QEMSCAN™. El procedimiento anterior se repitió en variadas ocasiones para distintas condiciones operacionales, que son mencionadas posteriormente.

Durante el desarrollo del experimento se utilizaron los siguientes materiales, cuyas cantidades se detallan en la Tabla 5.1. Los concentrados de cobre tipo Tórtolas, fueron provistas de la fundición Chagres (Anglo American), ubicada en Catemu, 5ta región, Chile. Estos fueron secado por 24 horas, tamizado por malla #100 (abertura 149 micrones) y el concentrado remanente bajo malla #100 se puso en horno de secado hasta las realizaciones de los experimentos.

**Tabla 5. 1. Resumen condiciones experimentales.**

Parámetro	Valor
Temperatura de reactor, K	773
Concentración de O2 en N2, %- vol.	30, 45, 60, 80
Tipo de concentrado (razón S/Cu)	A(1.07),B (1.27),C(1.85)

(Elaboración propia)

**Tabla 5. 2 Detalle de los concentrados (Análisis químico, DIMET, 2015).**

Tipo concentrado	S, % p/p	Cu, % p/p	Fe, %p/p	S/Cu
A	32.25	30.27	27.55	1.07
B	34.86	27.47	26.51	1.27
C	38.74	20.89	32.28	1.85

La composición mineralógica de los 3 concentrados utilizados en este estudio se muestra en la Tabla 5.3. También se encontró cantidades menores de sulfuros de plomo y zinc, además de óxidos de aluminio y calcio.

**Tabla 5. 3 Composición mineralógica de concentrados (QEMSCAN, GEA, 2015).**

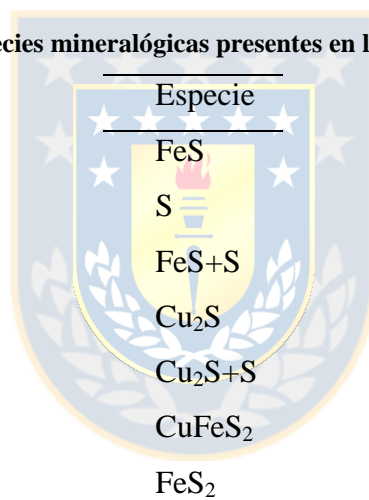
Concentrado	A	B	C
	% peso	% peso	% peso
CuFeS <sub>2</sub>	89.17	67.44	61.26
Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	0.89	2.13	1.24
FeS <sub>2</sub>	5.08	17.71	31.24
CuS	2.00	7.02	3.26
FeO	0.46	0.44	0.61
Cu <sub>2</sub> O	0.02	0.06	0.05
MoS <sub>2</sub>	0.28	0.41	0.06
SiO <sub>2</sub>	1.90	2.05	2.03
Total	99.8	97.6	99.75



## 5.6. Combustión de especies minerales en laboratorio

Para el análisis espectral de los concentrados de Cu, es necesario hacer un set de experimentos, con las especies mineralógicas, por sí solas, para observar la contribución de la emisión del espectro que se observa en el concentrado. Para esto se eligió los minerales que están en mayor proporción en los concentrado, se procedió a combustionar en el horno drop-tube, para ver su comportamiento espectral a altas temperaturas.

**Tabla 5. 4 Especies mineralógicas presentes en los concentrados.**



Espece
FeS
S
FeS+S
Cu <sub>2</sub> S
Cu <sub>2</sub> S+S
CuFeS <sub>2</sub>
FeS <sub>2</sub>

(Elaboración propia)

## 5.7. Combustión de especies minerales en planta industrial

Gracias al apoyo del proyecto FONDEF, se realizaron de campañas de mediciones a nivel industrial las que se realizaron en la fundición de Chagres. Se utilizó el software y hardware de la misma sonda utilizada a nivel de laboratorio, ubicándola en el techo del horno lo que permitió establecer un ángulo de visión sobre el quemador enfocado a la llama bajo éste.



**Fig.5. 4 Sonda instalada en HFF de fundición Chagres.**

(Elaboración propia)

## Capítulo 6. Análisis y Resultados

### 6.1. Introducción

A continuación se presentan los resultados obtenidos luego de realizar experimentos de combustión de concentrados de cobre en un horno Drop-Tube en condiciones flash. Se analizará la temperatura de la nube de reacción alcanzada en la combustión y características espectrales de la combustión.

Cada experiencia consideró la recuperación de las calcinas producto de la combustión, las que fueron analizadas mediante QEMSCAN®, con lo que tenemos la composición mineralógica resumida en las siguientes tablas:

**Tabla 6. 1 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado A (QEMSCAN, GEA, 2015).**

(S/Cu=1.07)	A-30	A-45	A-60	A-80
Compuesto	30% O <sub>2</sub>	45% O <sub>2</sub>	60% O <sub>2</sub>	80% O <sub>2</sub>
CuFeS <sub>2</sub>	31.16	24.83	19.40	14.29
Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	4.87	5.54	7.85	9.32
FeS <sub>2</sub>	1.39	1.32	1.15	1.00
CuS	0.36	0.32	0.25	0.18
FeO	19.99	21.17	21.84	22.50
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	2.46	3.71	5.04	6.54
Cu <sub>2</sub> S	20.83	22.48	22.54	23.21
Cu <sub>2</sub> O	14.9	16.73	18.22	19.44
FeS	1.61	1.47	1.24	0.99
CuFeO <sub>2</sub>	2.42	2.44	2.47	2.54
Total	99.99	100.00	100.00	100.00

**Tabla 6. 2 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado B (QEMSCAN, GEA, 2015).**

(S/Cu=1.27)	B-30	B-45	B-60	B-80
Compuesto	30% O2	45% O2	60% O2	80% O2
CuFeS <sub>2</sub>	21.23	18.49	13.69	10.53
Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	9.03	9.81	11.23	12.70
FeS <sub>2</sub>	6.23	5.51	3.75	2.61
CuS	1.30	1.15	0.43	0.61
FeO	8.49	7.81	7.57	7.18
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	18.07	21.50	25.04	27.52
Cu <sub>2</sub> S	14.16	14.73	14.20	13.91
Cu <sub>2</sub> O	11.75	11.97	14.80	16.09
FeS	1.50	0.71	0.17	0.19
CuFeO <sub>2</sub>	8.23	8.33	9.12	8.67
Total	99.99	100.00	100.00	100.00

**Tabla 6. 3 Composición mineralógica obtenida en QEMSCAN® de calcinas producto de la combustión del concentrado C (QEMSCAN, GEA, 2015).**

(S/Cu=1.59)	C-30	C-45	C-60	C-80
Compuesto	30% O2	45% O2	60% O2	80% O2
CuFeS <sub>2</sub>	23.97	24.87	8.39	5.36
Cu <sub>5</sub> FeS <sub>4</sub>	7.48	3.41	4.41	3.58
FeS <sub>2</sub>	9.01	2.36	3.91	1.75
CuS	0.63	0.32	0.34	0.34
FeO	10.16	20.94	25.79	26.69
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	21.62	3.30	0.37	1.99
Cu <sub>2</sub> S	12.23	23.79	26.56	28.81
Cu <sub>2</sub> O	10.15	17.12	26.55	26.93
FeS	1.76	1.46	1.50	2.39
CuFeO <sub>2</sub>	3.98	2.44	2.17	2.18
Total	100.00	100.00	99.99	100.00

Los análisis obtenidos en QEMSCAN® muestran que el proceso de fusión flash se obtuvo una descomposición parcial de los minerales presentes en el concentrado como la calcopirita, bornita y piritita debido a que la temperatura interior del horno no fue lo suficientemente alta como para lograr una descomposición mayor. Según estos datos también se verifica el aumento de la especies oxidadas de cobre y hierro.

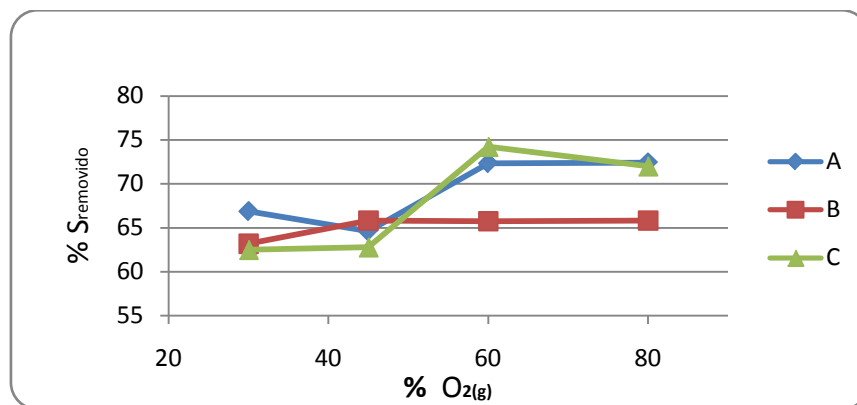
En base a estos análisis podemos proponer que las reacciones que mas probablemente ocurrieron son

**Tabla 6. 4 Reacciones**

	Reacción	$\Delta H$ kcal/mol (@25°C)
1	$\text{CuFeS}_2 = 0.5\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS} + 0.25\text{S}_2(\text{g})$	21.5
2	$\text{Cu}_5\text{FeS}_4 = 2.5\text{Cu}_2\text{S} + \text{FeS} + 0.25\text{S}_2(\text{g})$	29.0
3	$\text{FeS}_2 = \text{FeS} + 0.5\text{S}_2(\text{g})$	33.4
4	$\text{FeS} + 1.5\text{O}_2(\text{g}) = \text{FeO} + \text{SO}_2(\text{g})$	-112.2
5	$\text{CuS} + 1.25\text{O}_2(\text{g}) = 0.5\text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2(\text{g})$	-78.6
6	$\text{Cu}_2\text{S} + 1.5\text{O}_2(\text{g}) = \text{Cu}_2\text{O} + \text{SO}_2(\text{g})$	-95.6
7	$\text{S}_2(\text{g}) + 2\text{O}_2(\text{g}) = 2\text{SO}_2(\text{g})$	-173.0

(Elaboración propia)

La estimación de remoción de azufre de los concentrado está dado por el siguiente grafico, valores que se han calculado en base a los resultados de los análisis QEMSCAN.



**Grafico 6. 1 Estimación de remoción de azufre**

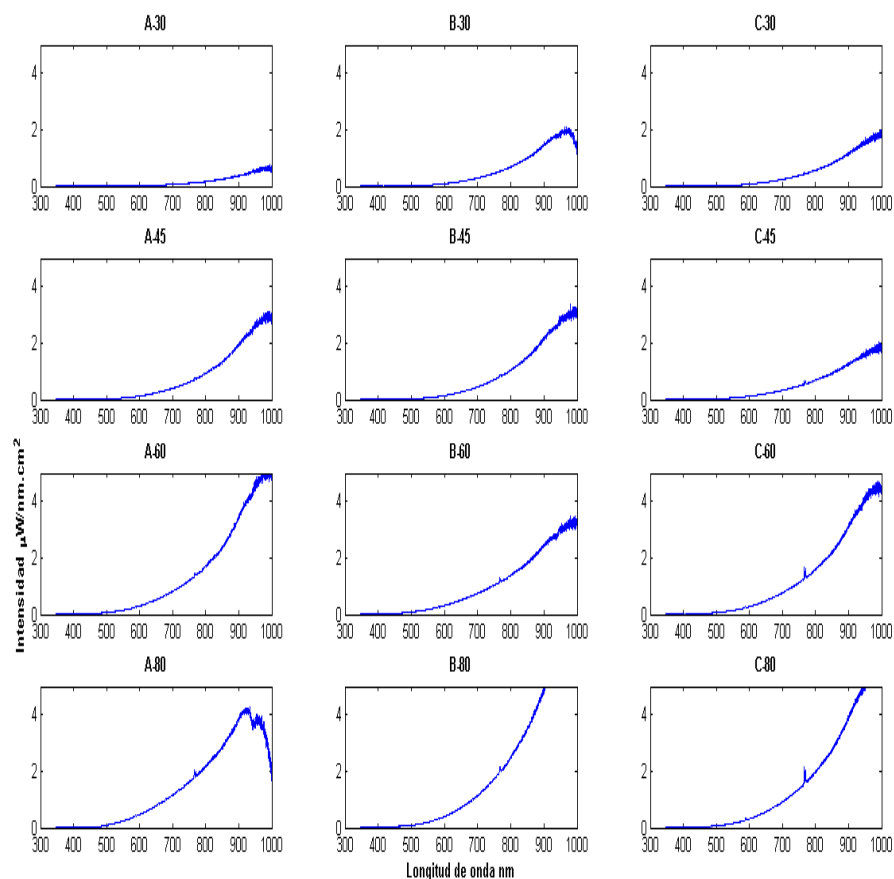
(Elaboración propia)

## 6.2. Temperatura de reacción de concentrado de Cobre

Se determinó la temperatura de la nube de partículas de concentrado de cobre en combustión en el interior del horno, utilizando el método de 2 longitudes de onda descrito en detalle en el capítulo 3, para este análisis fueron utilizadas las longitudes de onda 650 [nm] y 850 [nm], las cuales han sido utilizadas en estudios similares de combustión de sulfuros de Cu [26],[27].

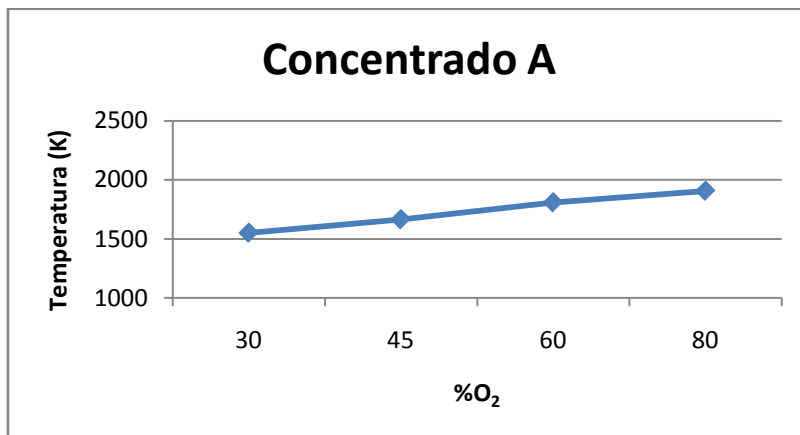
La temperatura calculada en base a mediciones espectrales fue obtenida aplicando el método de 2 longitudes de onda (12), utilizando las longitudes particulares 650 y 850 [nm].

Las graficas usadas para en los cálculos fueron las siguientes

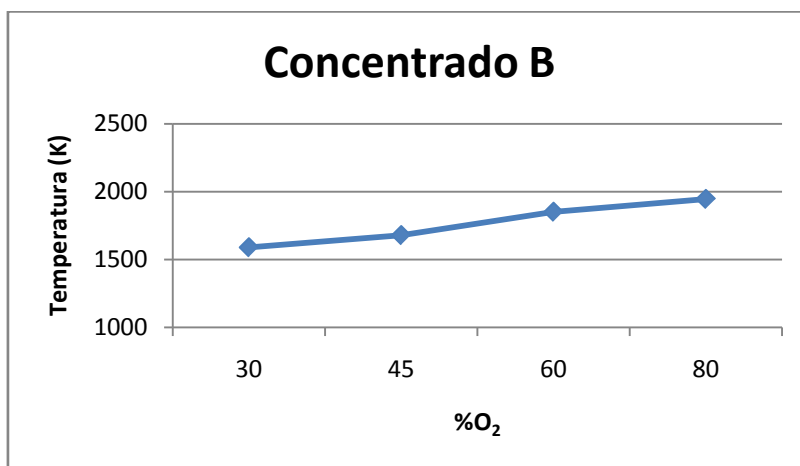


**Fig. 6. 1 espectros calibrados para la estimación de temperatura.**

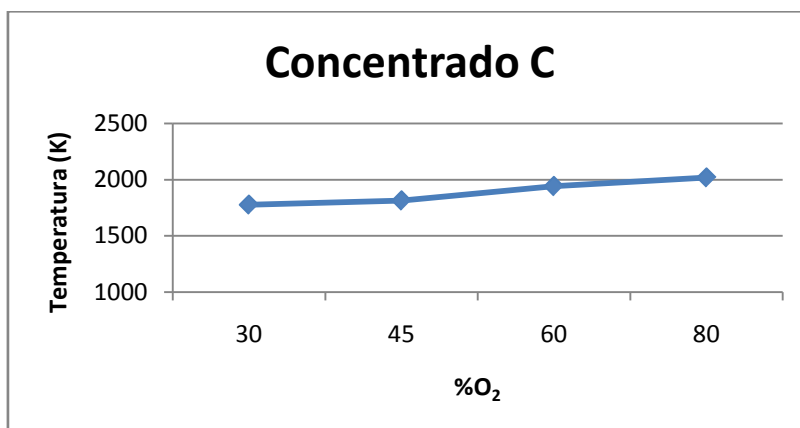
(Elaboración propia)



**Fig.6. 2 Temperatura de Concentrado A a distintos porcentajes de oxígeno**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 3 Temperatura de Concentrado B a distintos porcentajes de oxígeno**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 4 Temperatura de Concentrado C a distintos porcentajes de oxígeno**  
(Elaboración propia)

**Tabla 6. 5 Temperaturas estimadas**

Prueba	Temperatura, K
A-30	1550
A-45	1665
A-60	1809
A-80	1906
B-30	1590
B-45	1680
B-60	1852
B-80	1946
C-30	1776
C-45	1812
C-60	1940
C-80	2018

(Elaboración propia)

### **6.3. Temperaturas de la nube de partículas estimadas mediante técnicas ópticas**

La aplicación de estos métodos es debido a que los espectros obtenidos durante la reacción de los concentrados en el horno Drop-Tube se comportan siguiendo la Ley de Planck. Además se asume que la emisividad espectral en el rango de longitudes de onda utilizado es constante, cuya suposición está basada en estudios anteriores [26], [27] en la cual se realizan pruebas experimentales en combustión de concentrados de cobre en las cuales la emisividad resulta ser constante entre los 600 y 930 [nm]. Los espectros mostrados a continuación pueden ser descritos matemáticamente como la suma del espectro continuo dado por la Ley de Planck dependiente de la temperatura y un espectro discontinuo dependientes de la componentes de la reacción, nótese que las en las longitudes de onda seleccionadas no existe espectro discontinuo.



#### 6.4. Análisis espectral de la combustión de los concentrados de cobre

A escala de laboratorio se implementó la combustión de concentrados de cobre industriales de tal modo de analizar, para posteriormente implementar estas mediciones a nivel industrial, con el fin de contrastar estas experiencias, en búsqueda de alguna característica común, considerando de antemano que existen diferencias entre los procesos como por ejemplo el Drop-Tube opera en flujo laminar mientras que un horno flash lo hace en flujo turbulento.

Se consideraron tres muestras con diferentes razón S/Cu como se muestra en la Tabla 6.2, con el fin de medir el comportamiento espectral de la combustión de los concentrados.

Cada experiencia fue diseñada para llevarse a cabo con un exceso de oxígeno.

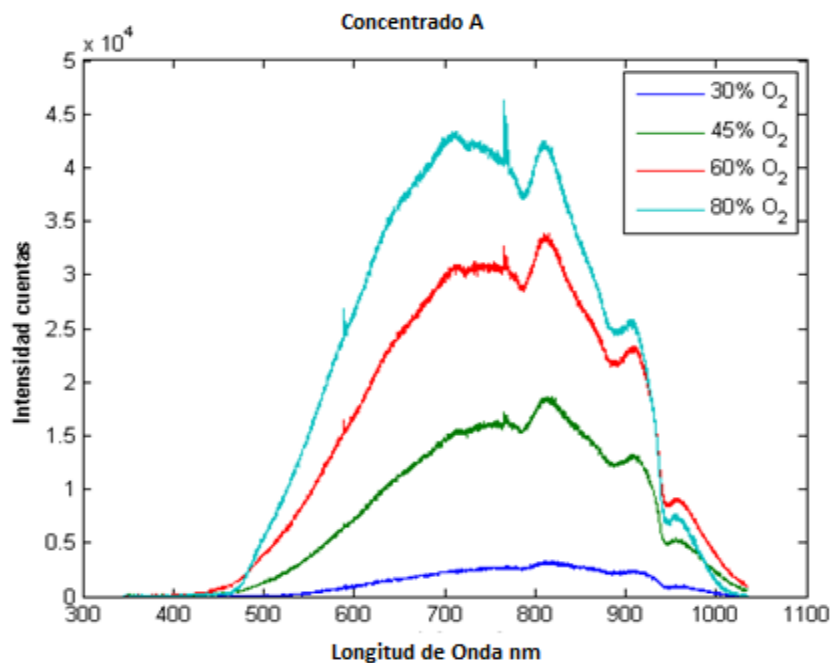
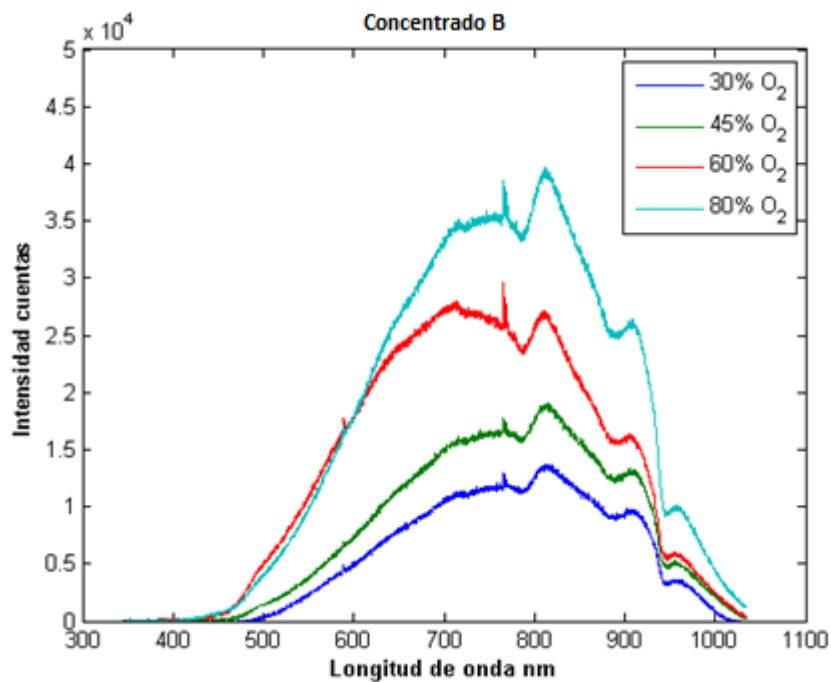
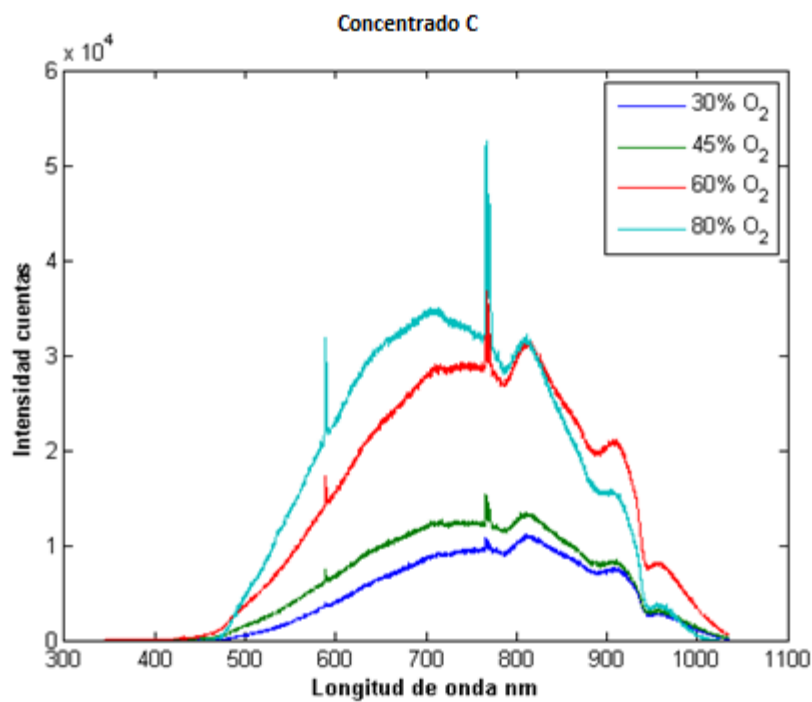


Fig.6. 5 Espectros concentrado A  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 6 Espectros concentrado B**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 7 Espectros concentrado C**  
(Elaboración propia)

En las figuras Fig.6.5, 6.6 y 6.7, se puede apreciar los espectros obtenidos en cada set de experiencias de los concentrados A, B y C respectivamente. Se observa que a medida que aumenta el porcentaje de oxígeno en la atmósfera dentro del horno Drop-Tube la intensidad (en cuentas) de los espectros aumenta, aumenta la temperatura, ya que la combustión de los sulfuros es un proceso altamente exotérmico, las reacciones principales involucradas son:



Estas reacciones, especialmente de la descomposición térmica de la pirita es altamente exotérmica por lo tanto al reaccionar, genera mucho calor, contribuyendo al interior del reactor.

Este patrón espectral característico se repite para cada concentrado, aunque cada uno con temperaturas distintas dependiendo de su composición mineralógica.

Una de las particularidades de los espectros obtenidos para cada uno de los concentrados combustionados en el horno Drop-Tube, es la presencia de picos (espectro discontinuo) de magnitudes considerables en las longitudes de onda 589 [nm] y 767 [nm]. Estos picos a medida que aumenta el porcentaje de oxígeno aumentan también considerablemente, lo que indica una correlación entre el contenido de oxígeno y la intensidad de los picos, como se aprecia en las figuras Fig. 6.5, 6.6 y 6.7. Además la intensidad de estos picos aumenta junto con la razón S/Cu.

La presencia de estos picos se puede deber a la descomposición de una mineral y/o especie que "produce" un pico en la longitud de onda determinada, o puede ser una transición de un electrón de un elemento. Sin embargo a ciencia cierta no existe registro de procesos con minerales sulfurados que nos pueda ayudar a identificar estos picos.

Estas características espectrales es común a para todos los concentrados, por lo que podemos concluir que es una propiedad espectral de los concentrados, las especies mineralógicas que contienen 3 concentrados.

Para clarificar a que corresponden realmente estos picos y también la parte continua del espectro, se analizaron mediciones espectrales de minerales puros y sintéticos que se encuentra presentes mayoritariamente en el concentrado de cobre.

## 6.5. Medición de la reacción del FeS

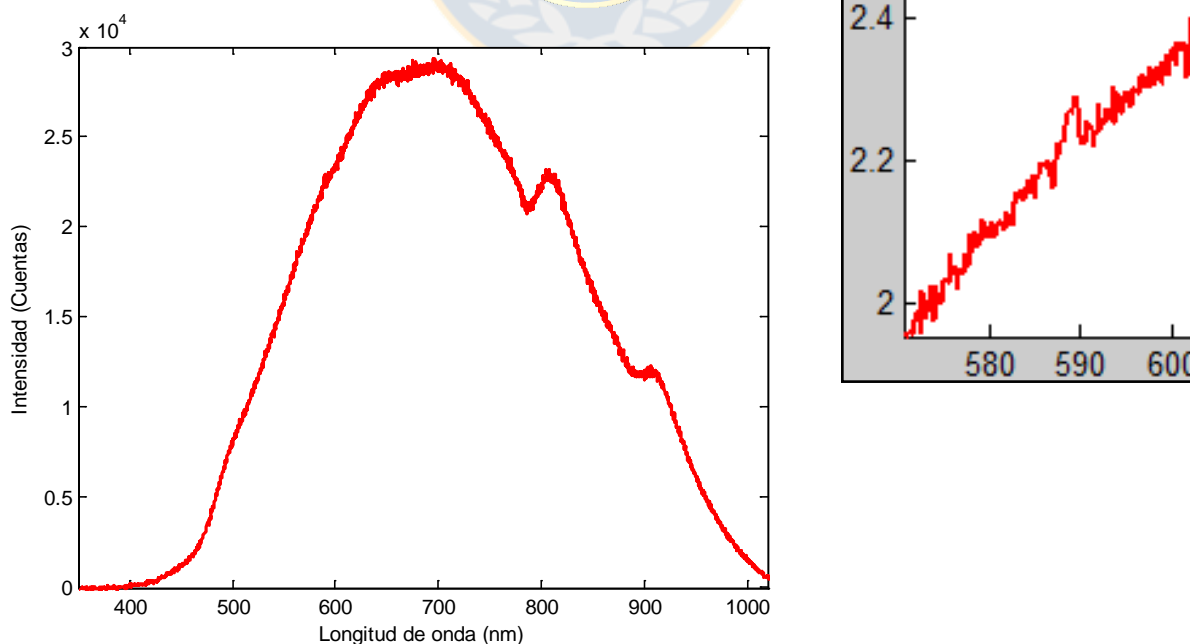
El FeS no está presente en los concentrados de Cu o sólo una fracción, pero la descomposición de la calcopirita, bornita, y piritita forman FeS, luego este reacciona para formar FeO. Como los concentrados estudiados tienen un gran presencia de calcopirita

Este FeS puede ser oxidado de la forma:

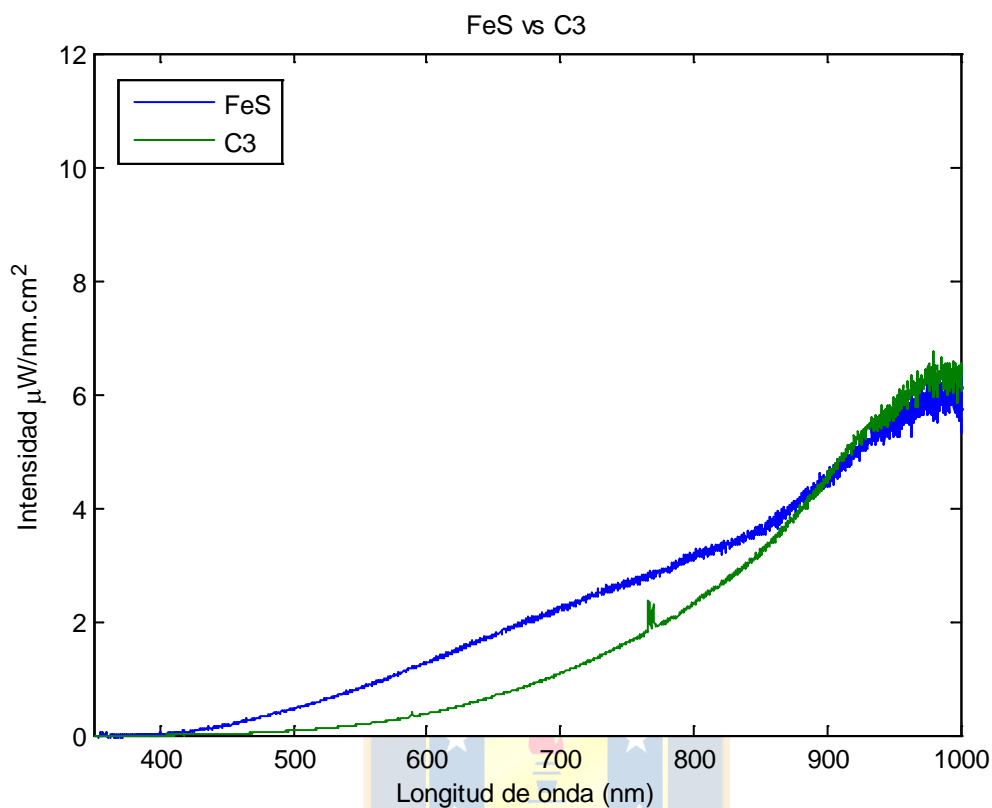


En la literatura es posible encontrar estudios sobre la atmosfera [28] en que la generación de FeO, tiene un pico en la longitud de onda 589 [nm], Además es ampliamente conocido el pico de emisión de Na en 589 [nm], sin embargo este elemento está presente en cantidades casi despreciables en la ganga.

La temperatura alcanzada por la combustión de FeS es aproximadamente de 2517K.



**Fig.6. 8 Oxidación de FeS (80% O<sub>2</sub>)**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 9 Comparación de FeS vs C3**  
(Elaboración propia)

Si bien existe un pico en la longitud de onda de 589 [nm] al realizar la oxidación de FeS en condiciones flash, es muy pequeño en comparación de los concentrados de Cu analizados, siendo que las condiciones de operación realizadas son iguales. Para poder visualizar este pico es necesario aplicar un zoom a la gráfica. El pico debido a la formación de FeO puede que no haya aparecido con la misma intensidad que en los concentrados, pudiese ser que no hubo suficiente temperatura para que se logre combustionar completamente. En comparación con los concentrados que tienen más componentes que aportan calor al sistema, esto ayuda y favorece a las reacciones que necesitan más temperatura para que puedan combustionarse.

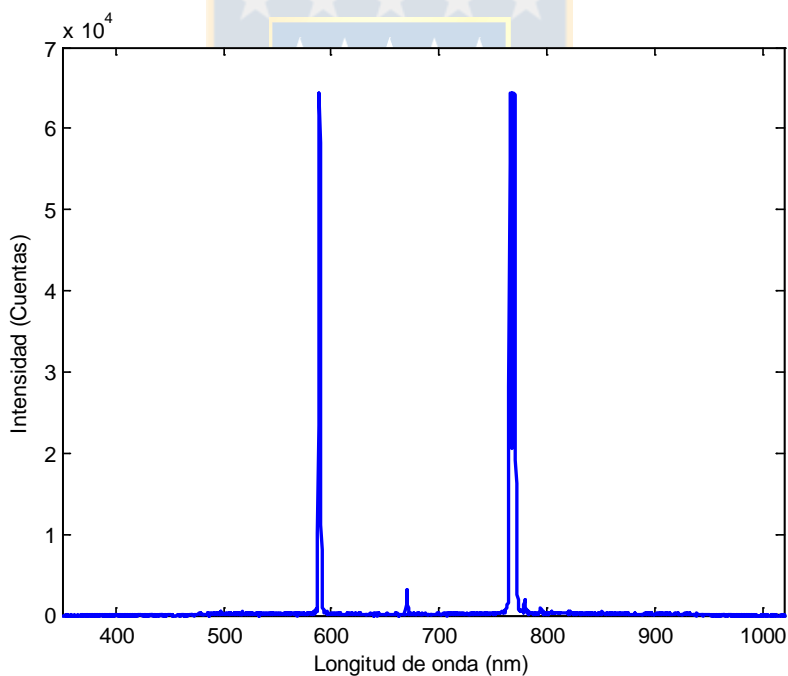
Al comparar con uno de los espectros de concentrado de cobre, se puede apreciar que en la parte continua de los espectros son diferentes ya que el comportamiento del FeS no es de un cuerpo gris a diferencia del concentrado, además tiende a ser plano de los 300 a 800 [nm] y después tiene a parecerse a la curva de la oxidación del concentrado. Se puede

concluir que la parte continua del espectro de la oxidación de FeS a FeO no influye directamente en la forma del espectro de la combustión de los concentrados.

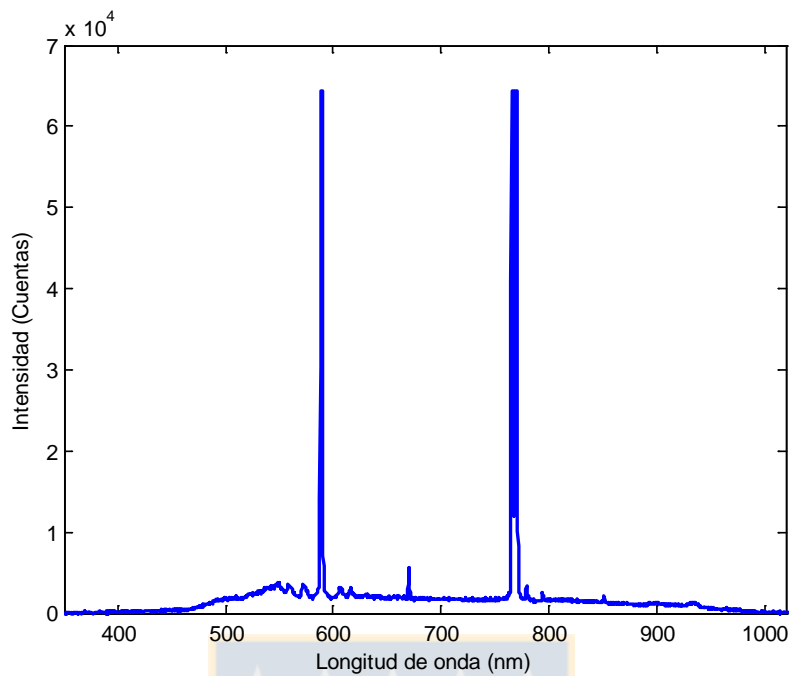
## 6.6. Análisis de Azufre.

El azufre S está presente en los concentrados de Cu en una gran cantidad, el porcentaje de S presente en los concentrados es elevado debido que los minerales son sulfuros metálicos de cobre y hierro, como lo indican lo respalda los análisis QEMSCAN.

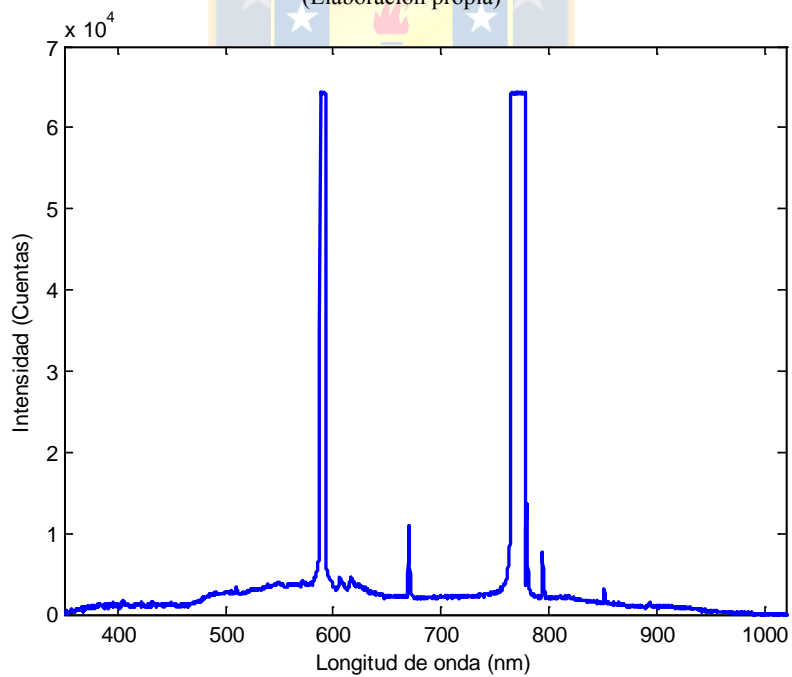
Se realizó en el horno drop-tube la combustión de S elemental, considerando las mismas condiciones que en los concentrados fueron combustionados, es decir cambiando el potencial de oxígeno en las pruebas de laboratorio.



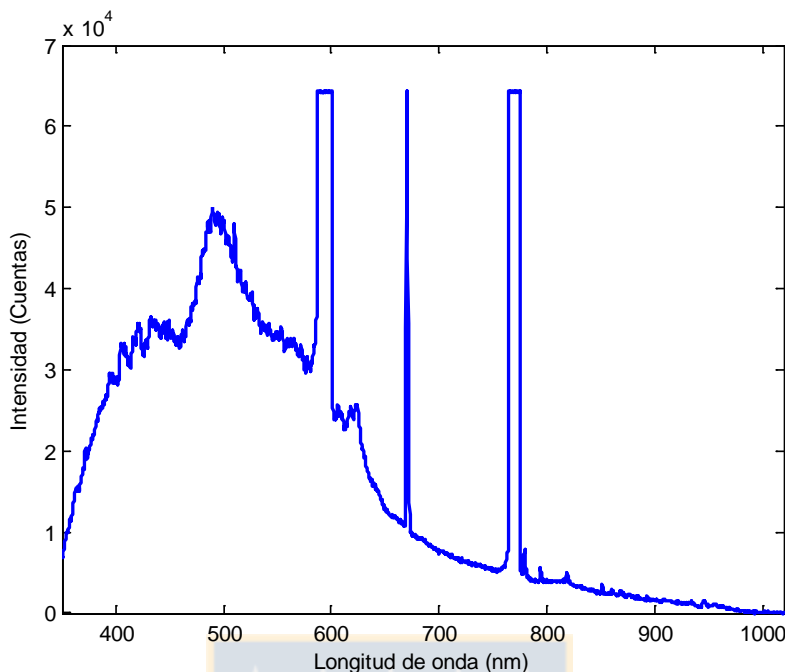
**Fig.6. 10 Espectro de combustión de S, 30% O<sub>2</sub>**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 11 Espectro de combustión de S, 45% O<sub>2</sub>**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 12 Espectro de combustión de S, 60% O<sub>2</sub>**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 13 Espectro de combustión de S, 80% O<sub>2</sub>**  
(Elaboración propia)

La reacción involucrada es la siguiente:



La cual ocurre en exceso de O<sub>2(g)</sub>, y se asumen que la reacción es completa debido a la alta afinidad del S con el O<sub>2</sub>, lo cual garantiza una alta reactividad de este elemento para reaccionar formando SO<sub>2</sub>.

En la combustión de azufre al interior del horno drop-tube se puede apreciar que los espectros que se muestran en las Fig.6.10,6.11,6.12 y 6.13 no tienen un comportamiento de cuerpo gris, es más, no parecen seguir la ley de Planck, en el rango de medición que estamos visualizando, Todas las mediciones espectrales presentan tres picos significativos en 589, 676, 767 [nm].

El comportamiento espectral del S no permite determinar la temperatura en el rango espectral en que se realizaron las mediciones, debido que el comportamiento no es de un cuerpo gris a estas longitudes de onda, por lo tanto la temperatura alcanzada por la

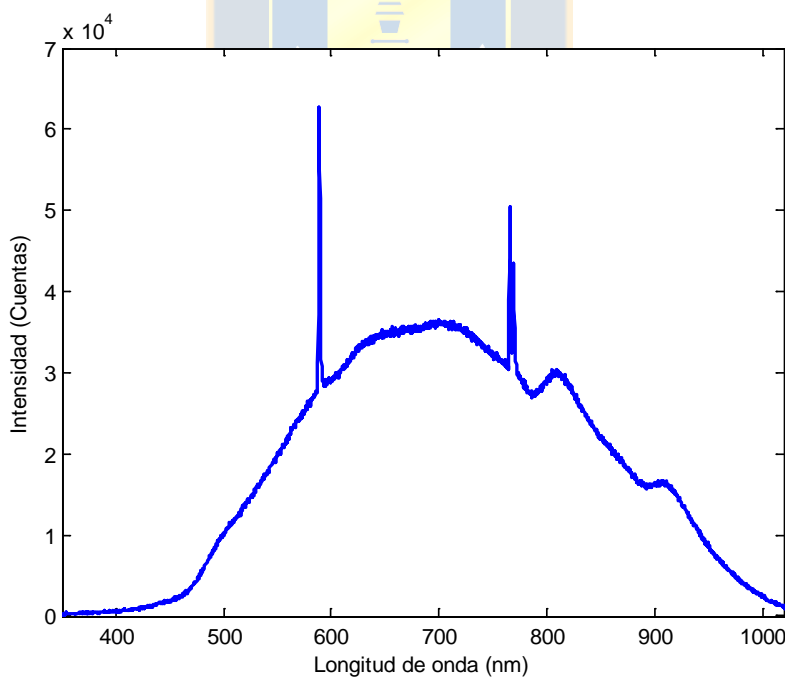


combustión del S no se puede medir con los métodos utilizados en este trabajo, por lo tanto no se puede utilizar el método de dos longitudes de onda para estimar temperatura.

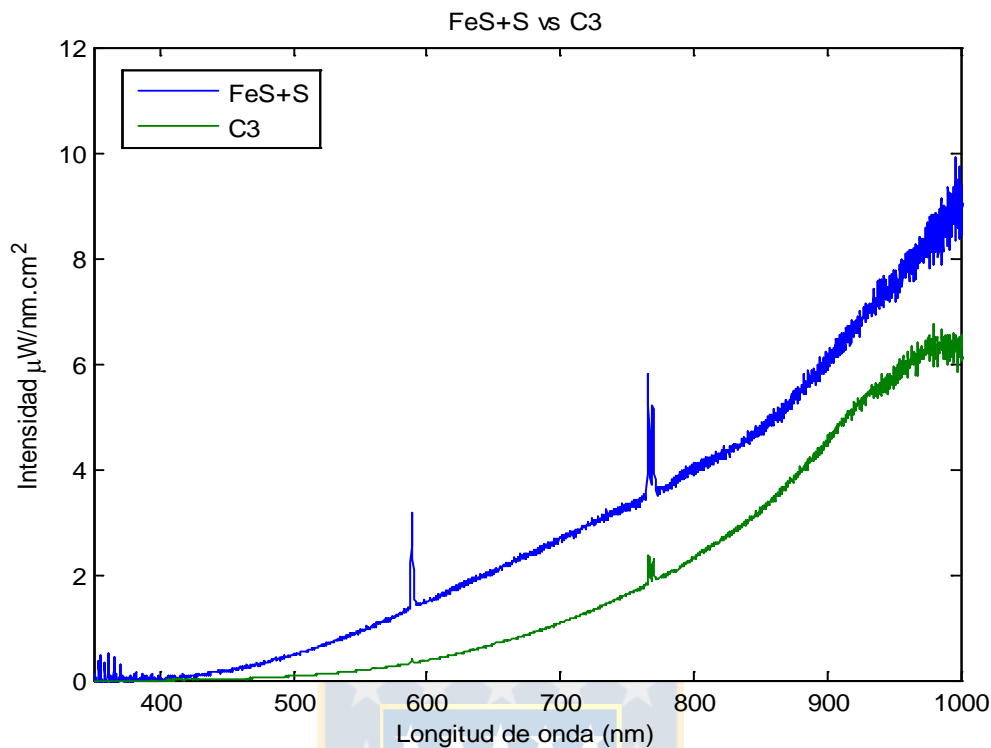
La generación de picos presentes en la combustión de azufre puede tener origen en la formación de  $\text{SO}_{2(g)}$  u otros fenómenos de emisión energética (radical, transición electrónica, etc). Según datos del NIST [Anexo F] se puede apreciar picos de intensidad relativa pequeña de azufre II (ver anexo F), no tenemos más información de la forma espectral del azufre a alta temperatura porque la literatura se refiere a la absorción en el rango infrarrojo lejano.

A continuación revisaremos los demás componentes del concentrado, Calcocita, calcopirita y pirita, pero además se analizarán los casos en que se combustione una mezcla de estos con azufre elemental, con la finalidad analizar la contribución individual de los constituyentes y sus mezclas sobre el origen de los picos en las mediciones espectrales.

## 6.7. Mediciones de S + especies.



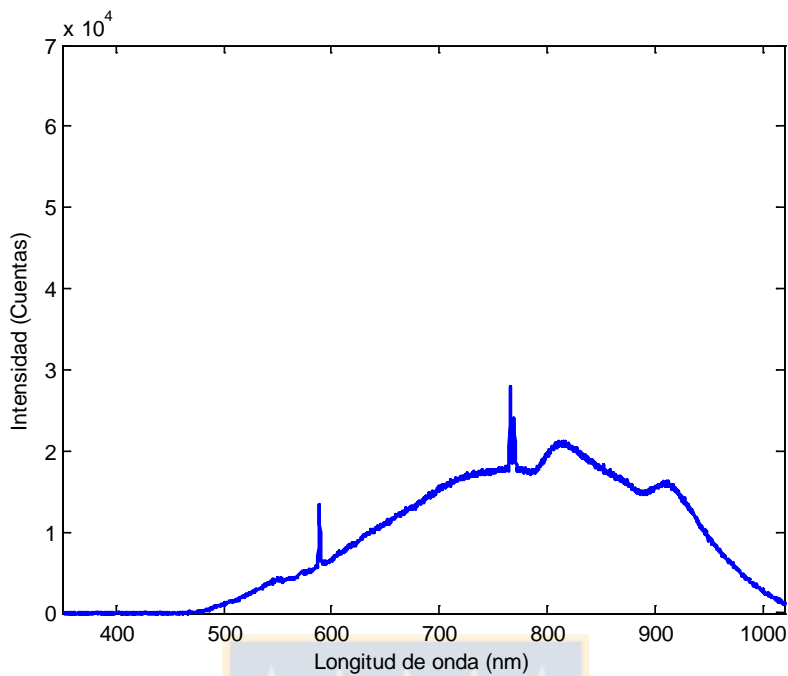
**Fig.6. 14 Espectro de combustión de FeS+S**  
(Elaboración propia)



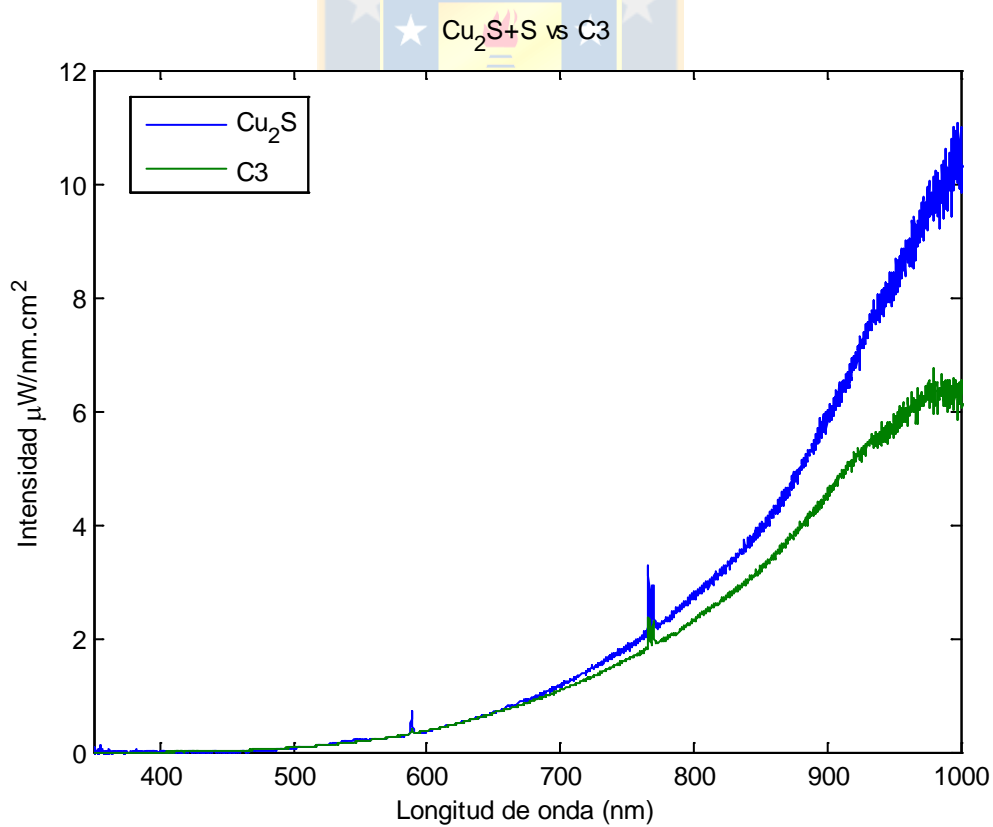
**Fig. 6. 15 Comparación C3 vs FeS**  
(Elaboración propia)

Para apreciar el efecto del azufre en la oxidación del FeS, se realizó la combustión de FeS+S (en proporción 50% peso), lo que entregó como resultado un espectro con la misma forma del espectro continuo de la combustión del FeS pero con la presencia de los dos picos (589 y 767 [nm]). Esto no representa exactamente la combustión del concentrado, simplemente debido a que la intensidad del pico 589[nm] es mayor a la del pico 767 [nm] (ambos picos del espectros FeS+S), caso opuesto a lo obtenido con los 3 concentrados, donde la intensidad del pico de 767[nm] es mayor a las de 589[nm].

La temperatura alcanzada por la combustión de FeS + S es aproximadamente de 2422 K.



**Fig.6. 16 Espectro de combustión de  $\text{Cu}_2\text{S}+\text{S}$**   
(Elaboración propia)



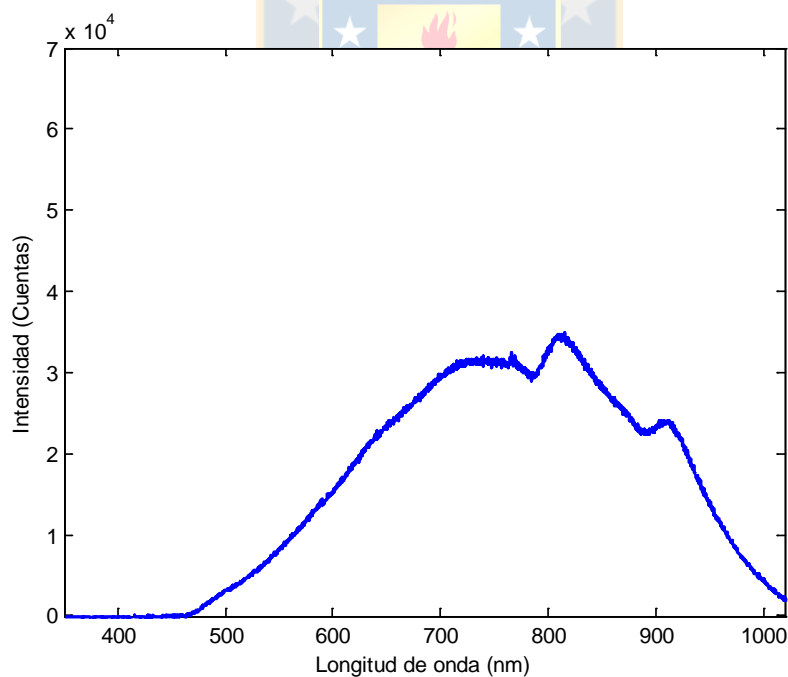
**Fig.6. 17 Comparación de  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{S}$  vs C3**  
(Elaboración propia)

La reacción de la calcosina en el horno Drop-Tube, no se aprecia con la instrumental que se mide en estas experiencias de laboratorio, el espectrofotómetro no detecta la radiación generada en el rango visible, sin embargo al agregar azufre ( $\text{Cu}_2\text{S}+\text{S}$ ), se logra capturar una medición espectral, en donde se obtienen nuevamente los picos en 589 y 767 [nm], de forma similar a lo obtenido en los concentrados.

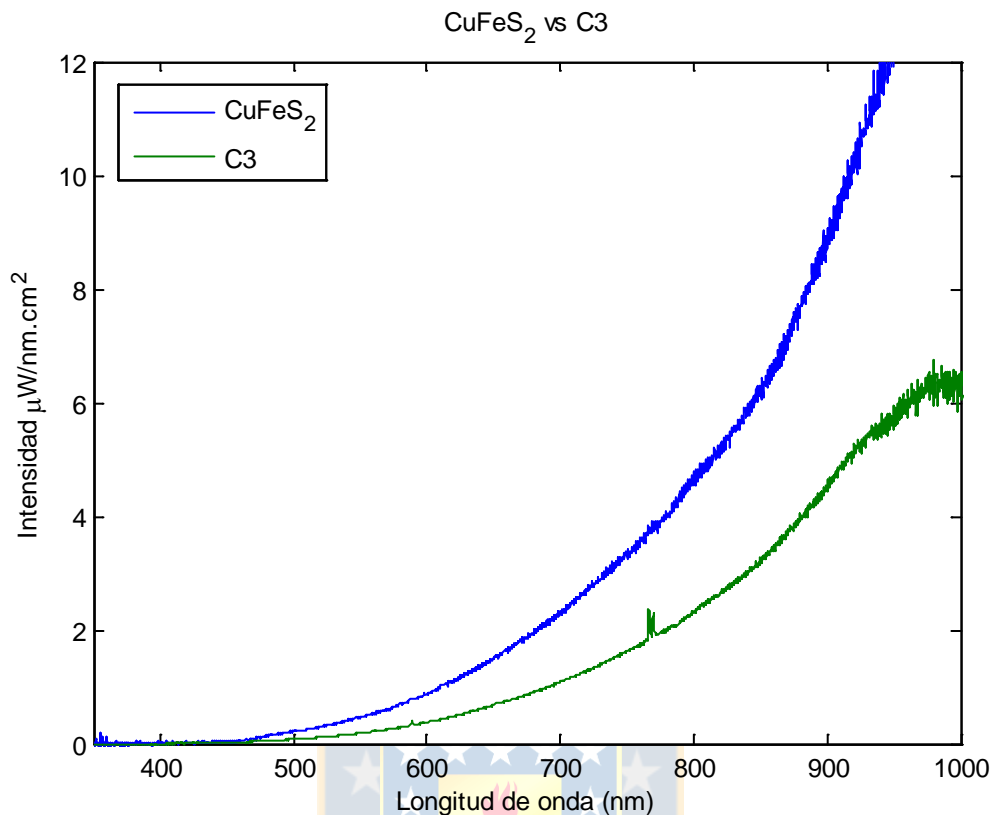
Al comparar con una medición espectral de los concentrados de Cu se puede apreciar que hay una gran similitud tanto como la parte continua y los picos de emisión de los espectros, debido a que la reacción del azufre en estas condiciones es muy exotérmica y proporciona calor y/o energía al sistema con lo que el  $\text{Cu}_2\text{S}$  logra la ignición, la parte continua es debido mayoritariamente a la reacción del  $\text{Cu}_2\text{S}$

La temperatura alcanzada por la combustión de  $\text{Cu}_2\text{S} + \text{S}$  es aproximadamente de 1687 K.

## 6.8. Medición de la Reacción de Calcopirita



**Fig.6. 18 Espectro de calcopirita**  
(Elaboración propia)

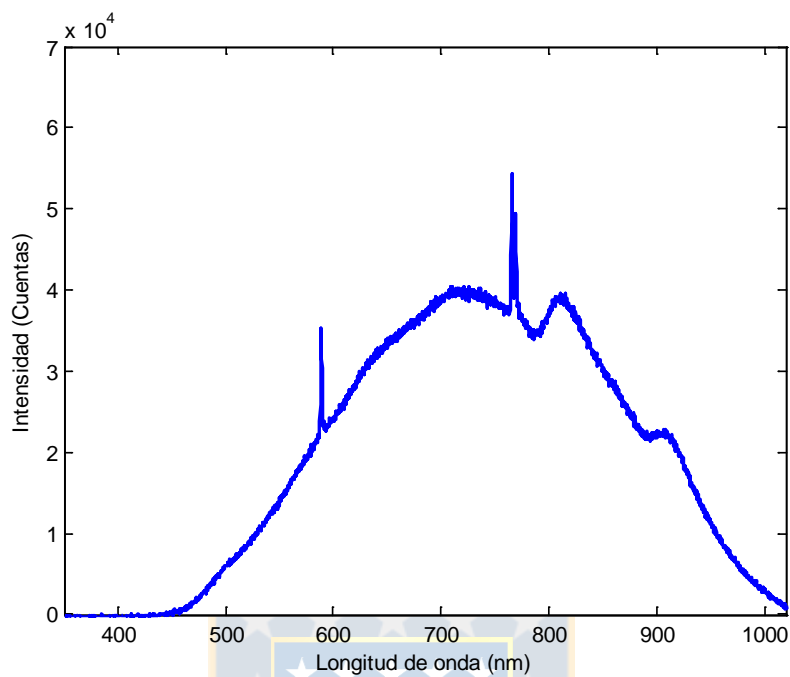


**Fig.6. 19 Comparación de espectro de concentrado vs calcopirita**  
(Elaboración propia)

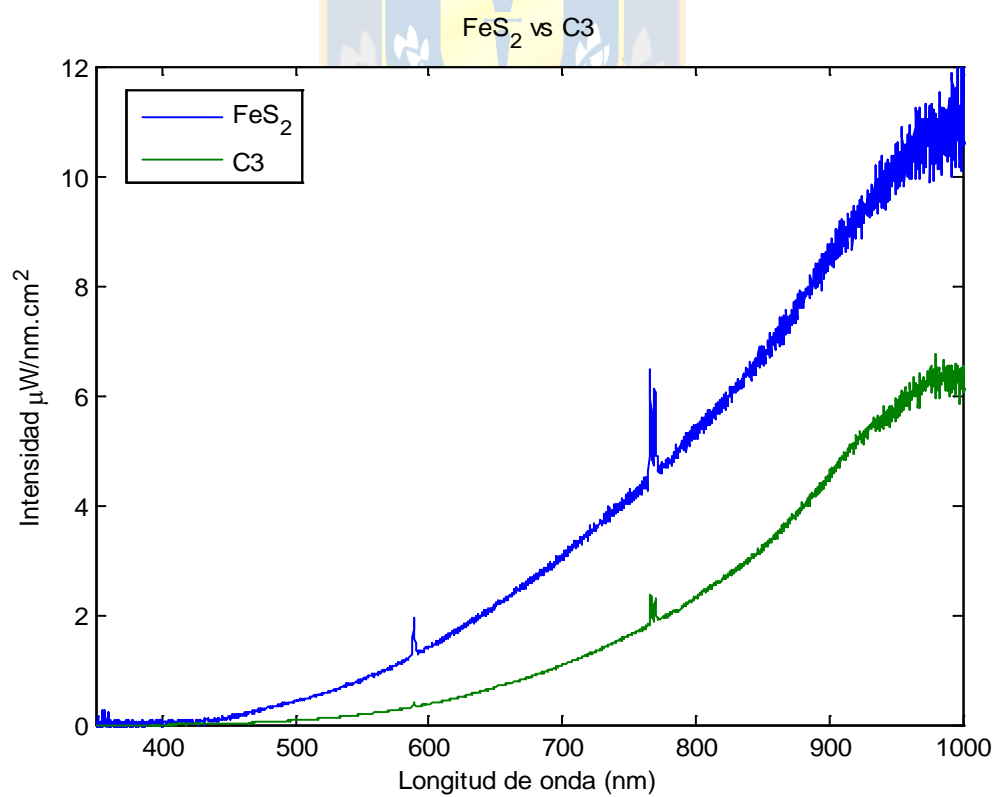
El espectro de la combustión de calcopirita (Fig.6.18) tiene un comportamiento muy similar a los espectros de combustión de los concentrados pero sin la presencia de los picos. El contenido de calcopirita en los concentrados es considerable, sumado a lo anterior se puede deducir que la parte continua de los espectros de la combustión de concentrado de Cu se debe a la reacción de la calcopirita, sin embargo no se puede asegurar con toda certeza que esto sea así, debido a que compara la combustión de un mineral puro con la combustión de un concentrado que contiene a este mineral entre otros, estos otros agregan incertidumbre a la comparación, que se basa principalmente en la búsqueda de patrones.

La temperatura alcanzada por la combustión de CuFeS<sub>2</sub> es aproximadamente de 1868 K.

## 6.9. Medición de la Reacción de Pirita



**Fig.6. 20 Espectro FeS<sub>2</sub>**  
(Elaboración propia)



**Fig.6. 21 Comparación de C3 vs pirita**  
(Elaboración propia)

Como se puede apreciar en la Fig.6.21 la pirita tiene un comportamiento muy parecido al concentrado de cobre, se pueden observar exactamente los mismos picos.

En base a estas mediciones se puede suponer que unos de las causales de los picos está asociada a la descomposición y oxidación de la pirita.

La temperatura alcanzada por la combustión de  $\text{FeS}_2$  es aproximadamente de 2079K, lo que es consistente con los trabajos previos de Jorgensen, [29] la combustión de pirita está entre los intervalos 1473- 2773 K, lo que cual la estimación mediante el método perimétrico es consistente.

Además se puede deducir que la parte continua del espectro es debida principalmente a la pirita y/o calcopirita y los picos es debido a la descomposición del azufre de la pirita. Se puede deducir que entre mayor es el grado de descomposición de la pirita mayor es la intensidad de los picos.

Entonces podemos resumir los resultados de los estudios de combustión de los componentes mineralógicos de los concentrados de cobre en:

\* La emisión espectral continua de la combustión de concentrado de cobre está compuesta principalmente por la emisión de la combustión de pirita y calcopirita.

\* La emisión espectral discontinua (picos) se debe a la descomposición y oxidación de la pirita.

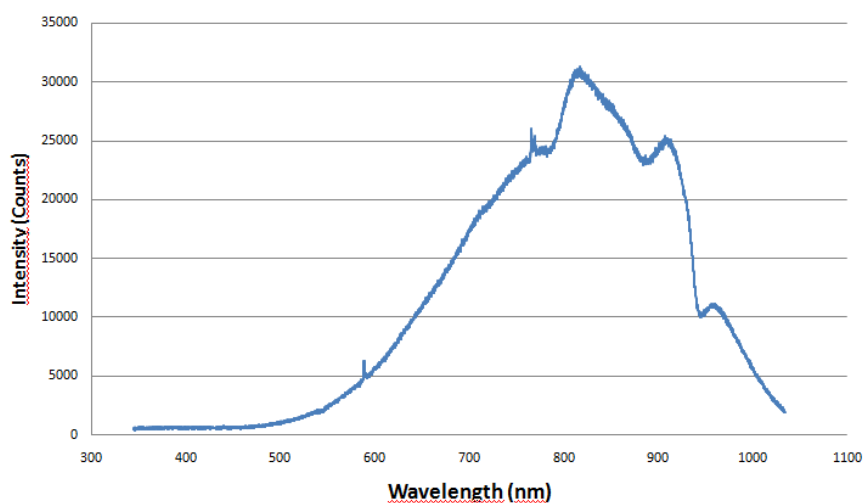
## 6.10. Mediciones en planta

En el contexto de experiencias en laboratorio, se ha encontrado que existen características espectrales relativas a cada tipo de concentrado de cobre. Bajo la premisa que los fenómenos fisicoquímicos que se analizaron a escala laboratorio son los mismo que ocurren a escala industrial, es necesario comprobarlo, por esta razón se realizó una breve campaña de mediciones a escala industrial para comparar ambos resultados

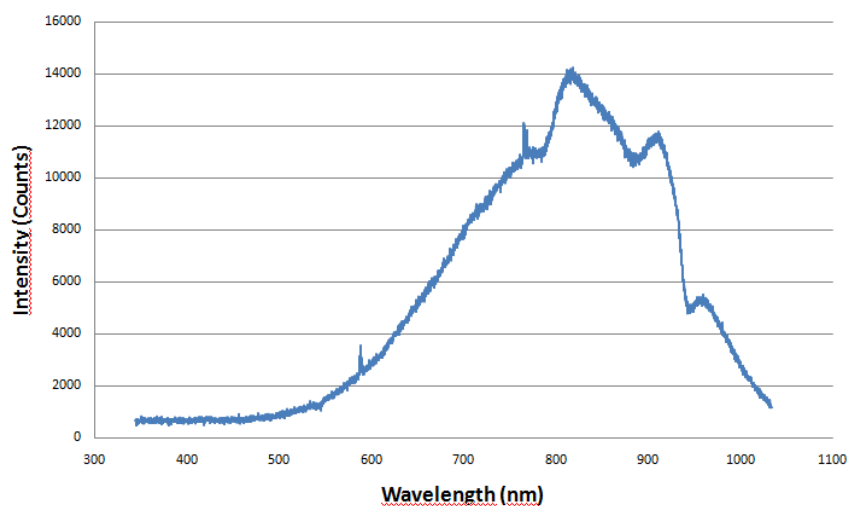
La campaña de medición fue realizada en el reactor Flash de la fundición Chagres de Angloamerican (V región, Chile), utilizando la misma sonda de alta temperatura y espectrofotómetro de los experimentos de laboratorio. La campaña de mediciones en el

reactor flash de la fundición Chagres entregaron como resultado los espectros mostrados en las figuras Fig. 6.22, 6.23 y 6.24, 6.25. Hay que recalcar que las mediciones industriales están en una fase muy preliminar, por lo que solo observaremos cambios operacionales generales.

Durante la campaña de mediciones industriales, se tomo como referencia una condición operacional y se modificaron 2 parámetros de operación: Coeficiente de oxígeno (masa de  $O_2$  / masa de concentrado) y tasa de alimentación.

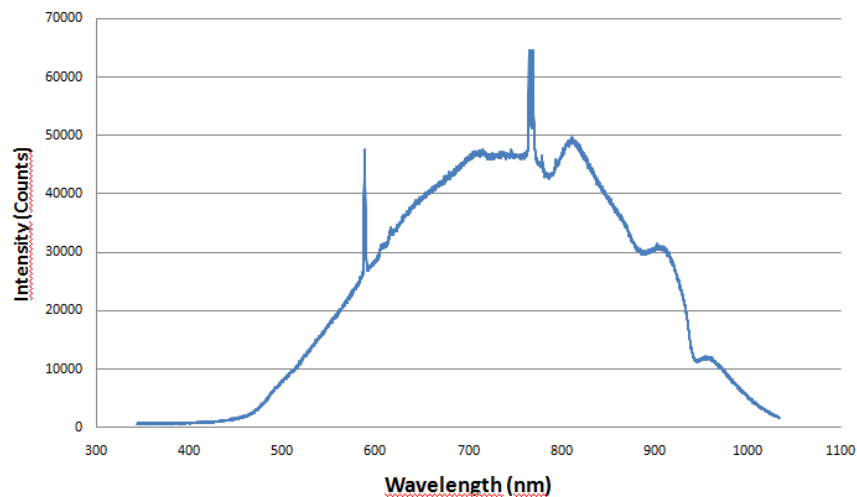


**Fig. 6. 22 Espectro de operación normal (Temperatura aproximada de 1398K)**  
(Elaboración propia)

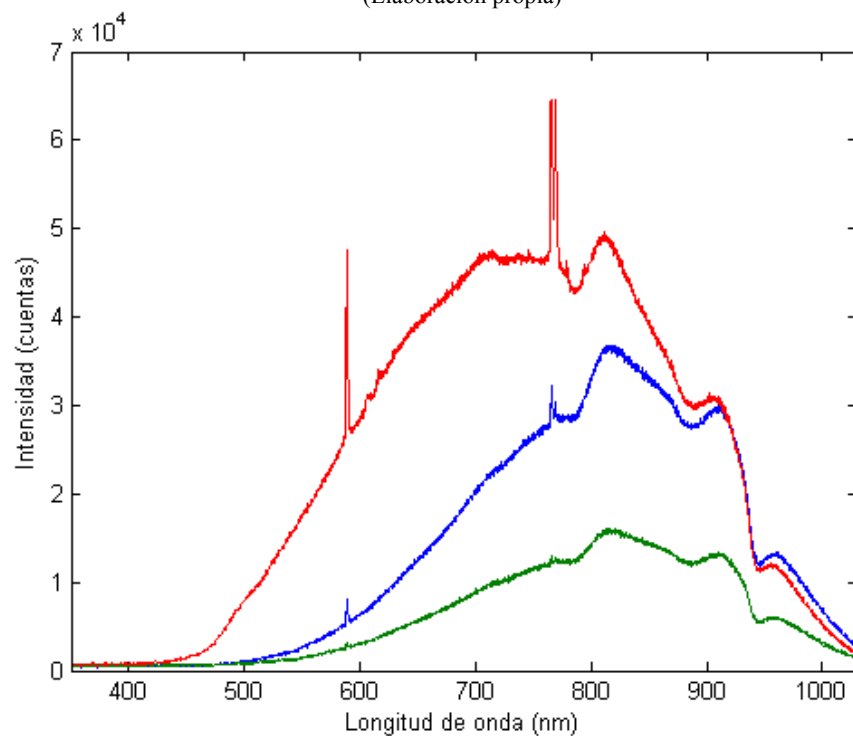


**Fig.6. 23 Espectro en aumento de tasa de aire (Temperatura aproximada de 1410K)**  
(Elaboración propia)





**Fig.6. 24** Espectro en aumento en tasa de alimentación (temperatura aproximada de 1717 K)  
(Elaboración propia)



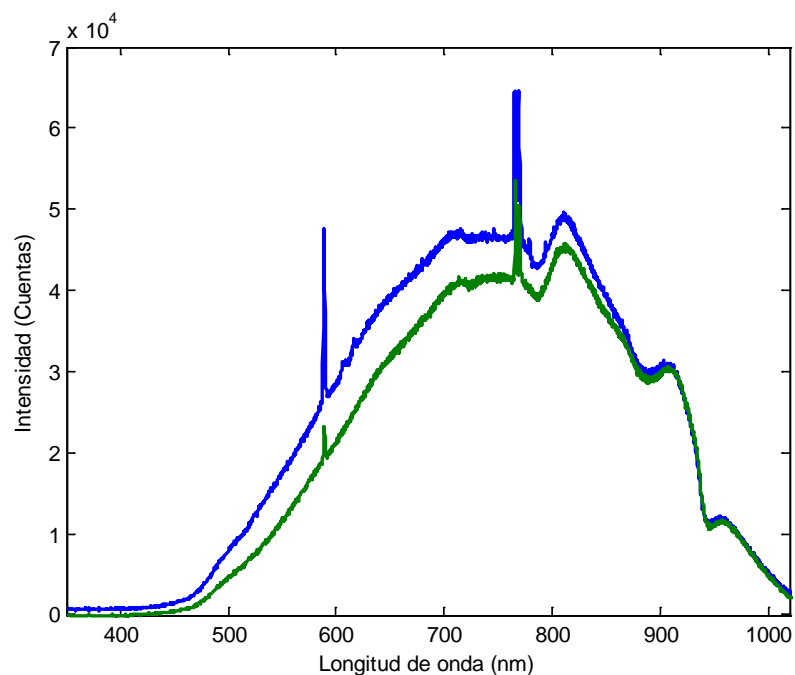
**Fig.6. 25** Espectros obtenidos en medición en la industria.  
(Elaboración propia)

Podemos observar en cada una de estas mediciones aparecen los mismos dos picos obtenidos en el laboratorio, esto nos indica a priori que la posibilidad de realizar correlaciones entre las especies presentes en el concentrado y el espectro de estos

concentrados es alta, lo que se puede traducir en el mediano plazo a tener un sistema de monitoreo basado en mediciones espectrales, que por lo demás no invaden el proceso.

Si comparamos uno de los espectros de la combustión de concentrado a 80% O<sub>2</sub> del laboratorio con el espectro medido en planta Fig. 6.25 podemos observar que la similitud es altísima, si bien alcanzan diferentes temperaturas (sobre 1500°C), presentan la misma forma espectral y aun mejor, la emisión discontinua tiene las misma características, en las mismas longitudes de onda.

Esto reafirma que los procedimientos realizados en el laboratorio y la caracterización obtenida puede simular en forma directa el proceso industrial.



**Fig.6. 26 Comparación espectros planta y laboratorio**  
(Elaboración propia)

## Capítulo 7. Conclusiones

---

Se realizó la combustión de concentrado de cobre de distinta razón azufre-cobre (S/Cu) en un horno Drop-tube, en atmosfera oxidante a una temperatura de 773 K. Las temperaturas obtenidas de las reacciones variaron entre 1565 a 2006 K.

Por cada uno de los 3 concentrados (S/Cu 1.07, 1.27 y 1.85) se realizaron 4 pruebas a distinta concentración de oxígeno en nitrógeno (30, 40, 60 y 80%), generando el ambiente oxidante.

Los espectros medidos de la combustión de concentrado de Cu se comportan siguiendo la Ley de Planck, es decir como un cuerpo gris, en el rango 620 a 920 [nm]. Por lo tanto se puede estimar la temperatura mediante el método de pirometría, se utilizó las longitudes de onda 650 y 850[ nm]. Las máximas temperaturas fueron alcanzadas durante la experiencias a 80% de O<sub>2</sub> en la atmosfera al interior del Drop-tube.

El análisis espectral de los concentrados de Cu mostró una particularidad espectral, los cuales presentan picos de emisión en los 589 y 767 [nm].

Se pudo visualizar que la oxidación de azufre elemental a altas temperaturas y a las mismas condiciones experimentales abarcadas en este trabajo, tienen los mismos picos de emisión que los concentrados de Cu analizados.

Como el S no está de manera elemental en el concentrado, es decir se encuentra contenido en un mineral, se procedió a medir los espectros de combustión de las especies compuestos que contenían S en sus composiciones. Se realizó un set de experimentos con los principales compuestos minerales del concentrado de Cu por separado, esto para medir las emisiones espectrales y comparar con los obtenidos de la combustión de concentrados de Cu.

La combustión de la calcopirita tiene un comportamiento espectral similar a los concentrados, pero sólo la parte continua, porque no se visualizan picos de emisión en las mediciones.

la calcosina y el FeS no representan el comportamiento espectral de los concentrados debido que el primero no se visualiza con la instrumental, y el segundo no tiene la forma ni los picos de emisión.

La combustión de pirita, representa de mejor manera a los concentrados de Cu, a las mismas condiciones experimentales, presenta un espectro continuo similar y tiene los picos de emisión en las longitudes de onda 589 y 767[nm].

Finalmente en la campaña de mediciones en planta se obtuvieron espectros en 3 condiciones operacionales; normal, aumento en tasa de aire y aumento en tasa de alimentación, donde se pudo medir de la emisión espectral con la misma instrumentación optoelectrónica que en el laboratorio. Además la forma espectral es consistente con los espectros de combustión de concentrados obtenidos en laboratorio, presentando además las mismas características de emisión discontinua, con lo que se podría simular en forma directa el proceso industrial en base a las mediciones de laboratorio.



## Bibliografía

---

- [1] Met. Mater. Trans. B, vol. 12, N°4 (1981) 769–770.
- [2] J. Thermal Anal., 25 (1982) 473-485.
- [3] Pignolet-Brandom, S., Hagni, R.D., Munroe, N.D.H. “Reflected light microscope and electron probe analysis of flash smelting products of a copper sulfide concentrate”, Process Metallurgy VI SME-AIME Annual Meeting, New York, New York, 1985, 579–595]
- [4] Met. Mater. Trans. B, vol. 17B (1986) 51–60.
- [5] Met. Mater. Trans. B, vol. 26B (1995) 719–729.
- [6] F. R. A. Jorgensen and M. Zuiderwyk “Two-Colour Pyrometer Measurement of the Temperature of Individual Combusting particles” Journal of Physics E: Scientific Instrument, Volume 18, number 6, 1985
- [7] H.Y. Sohn, P.C. Chaubal. “The ignition and Combustion of Chalcopyrite Concentrate Particles under Suspension-Smelting Conditions” Metallurgical and Material Transactions B, Volume 24B February 1993, 1993
- [8] N. Tuffrey, G Richards, J. Brimacombe “Two-Wavelength Pyrometry Study of the Combustion of Sulfide Minerals: Part II. Galena and Commercial Lead Concentrates” Metallurgical and Materials Transactions B, Volume 26B, October 1995.
- [9] T. Laurila, R. Oikari, T. Joutsenoja, P. Mikkola, T. Ranki-Kilpinen, P. Taskinen, and R. Hernberg. “Pyrometric Temperature and Size Measurements of Chalcopyrite

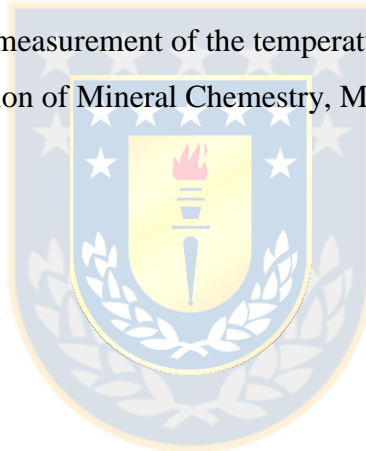
- Particles during Flash Oxidation in a Laminar Flow Reactor". Metallurgical and materials Transactions B, Abril 2005, Volume 36, Issue 2, pp 201-208
- [10] Jussi Vaarno, Juha Järvi, Tapio Ahokaimen, Toni Laurila and Pekka Taskinen "Development of a Mathematical Model of Flash Smelting and Converting Process"
- [11] I. Wilkomirsky, A. Otero, E. Balladares. "Kinetics and Reactions Mechanisms of High-Temperature Flash Oxidation of Molybdenite" Metallurgical and Material Transactions B, Volume 41B February 63, 2010
- [12] Y.B. Hahn, H.Y. Sohn, Modeling of sulfide flash smelting process, part I, Metallurgical transaction B, volume 21B
- [13] Y.B. Hahn, H.Y. Sohn, Modeling of sulfide flash smelting process, part II, Metallurgical transaction B, volume 21B
- [14] Metallurgical Controlling Method, United States Patent 5,125,963
- [15] Roberto Parada Araya, TESIS DOCTORAL, " Combustión de Concentrados de Cobre en Hornos de Fusión Flash", Programa de Doctorado de Ciencia y Tecnología de Materiales UNIVERSIDAD DE OVIEDO, España Julio 2015
- [16] Caffery, G., Ph.D. Thesis, Analysis of transport phenomena in a combusting sulfide particle cloud: With implications to the Flash Smelting of High-Grade copper concentrates, The University of British Columbia, 2002
- [17] Du X, Annamalai K. "Group ignition and combustion of a cylindrical cloud of coal particles". ASME-ISHMT heat and mass transfer conference. Jan 5-7, 1994
- [18] T. Prietl, A. Filzwieser and S. Wallner, Productivity increase in a Peirce-Smith converter using the COPKIN and OPC system, EPD Congress 2004, Edited by M.E.

Schlesinger, TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2004.

- [19] C. Romero, X. Li , S. Keyvan , R. Rossow, Spectrometer-based combustion monitoring for flame stoichiometry and temperature control, *Applied Thermal Engineering* 25 (2005) 659–676.
- [20] P. Gillard, M. Roux, Study of the Radiation Emitted During the Combustion of Pyrotechnic Charges. Part I: Non Stationary Measurement of the Temperature by Means of a Two Color Pyrometer, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 27, 72–79 (2002a).
- [21] P. Gillard, Ch. de Izarra, M. Roux, Study of the Radiation Emitted During the Combustion of Pyrotechnic Charges. Part II: Characterization by Fast Visualization and Spectroscopic Measurements, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 27, 80–87 (2002b).
- [22] V. Weiser , N. Eisenreich, Fast Emission Spectroscopy for a Better Understanding Pyrotechnic Combustion Behavior, *Propellants, Explosives, Pyrotechnics* 30 (2005), No. 1.
- [23] Y. Levendis, K Estradas. "Development of multicolor pyrometers to monitor the transient response of burning carbonaceous particles" *Review of Scientific Instrument* 63, American Institute of Physics 1992.
- [24] Mansoor A. Khan,a Charly Allemand, and Thomas W. Eagar "Noncontact temperature measurement. II. Least squares based techniques", Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts 02139
- [25] Mansoor A. Khan,a Charly Allemand, and Thomas W. Eagar" Non contact temperature measurement. I. Interpolation based techniques"Massachusetts Institute

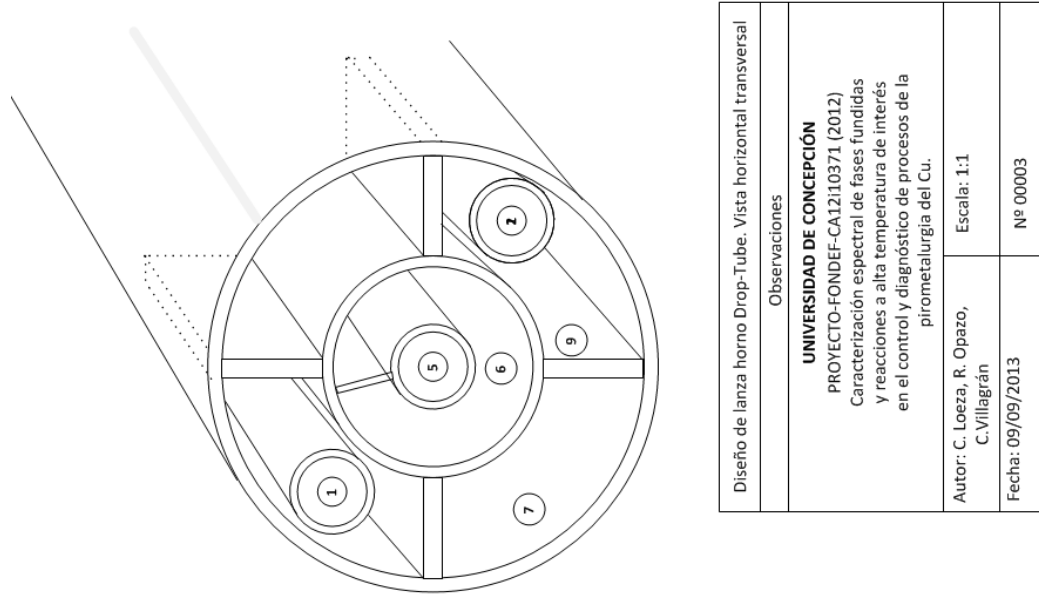
of Technology. Cambridge. Massachusetts 02139.

- [26] C. Villagrán Tesis de pregrado " Caracterización espectral de la combustión flash de partículas de concentrado de cobre" Universidad de Concepción, Abril 2014
  
- [27] C. Loeza Tesis de pregrado " Caracterización espectral de la combustión de concentrado de cobre en un horno "Drop-Tube", Universidad de Concepción, Abril 2014
  
- [28] P. Jenniskens and M. Lacey, "FeO "ORANGE ARC" Emission Detected in Optical Spectrum of Leonid Persistent Train", SETI Institute, NASA ARC, 31 July 2000
  
- [29] Two-colour pyrometer measurement of the temperature of individual combusting particles , CSIRO Division of Mineral Chemistry, Melbourne, Australia, 3 December 1984.

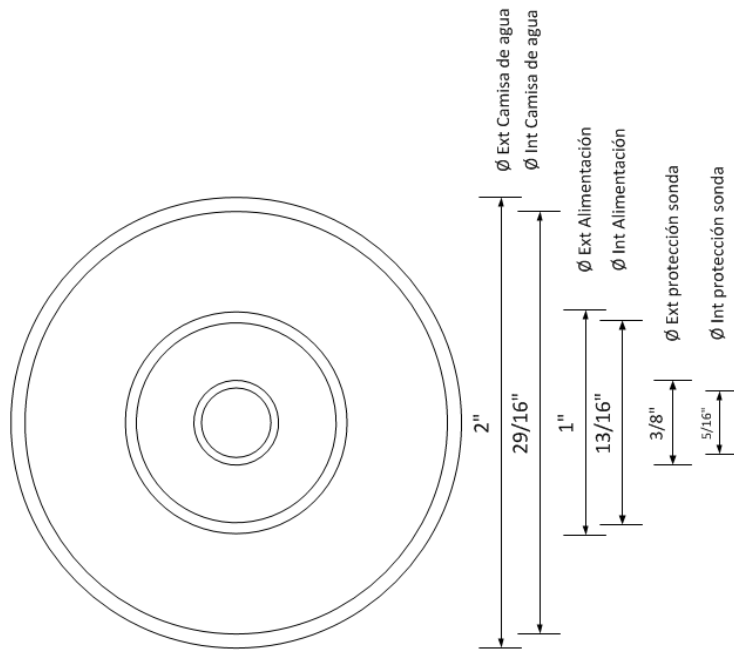




# Anexo A. Planos de la lanza

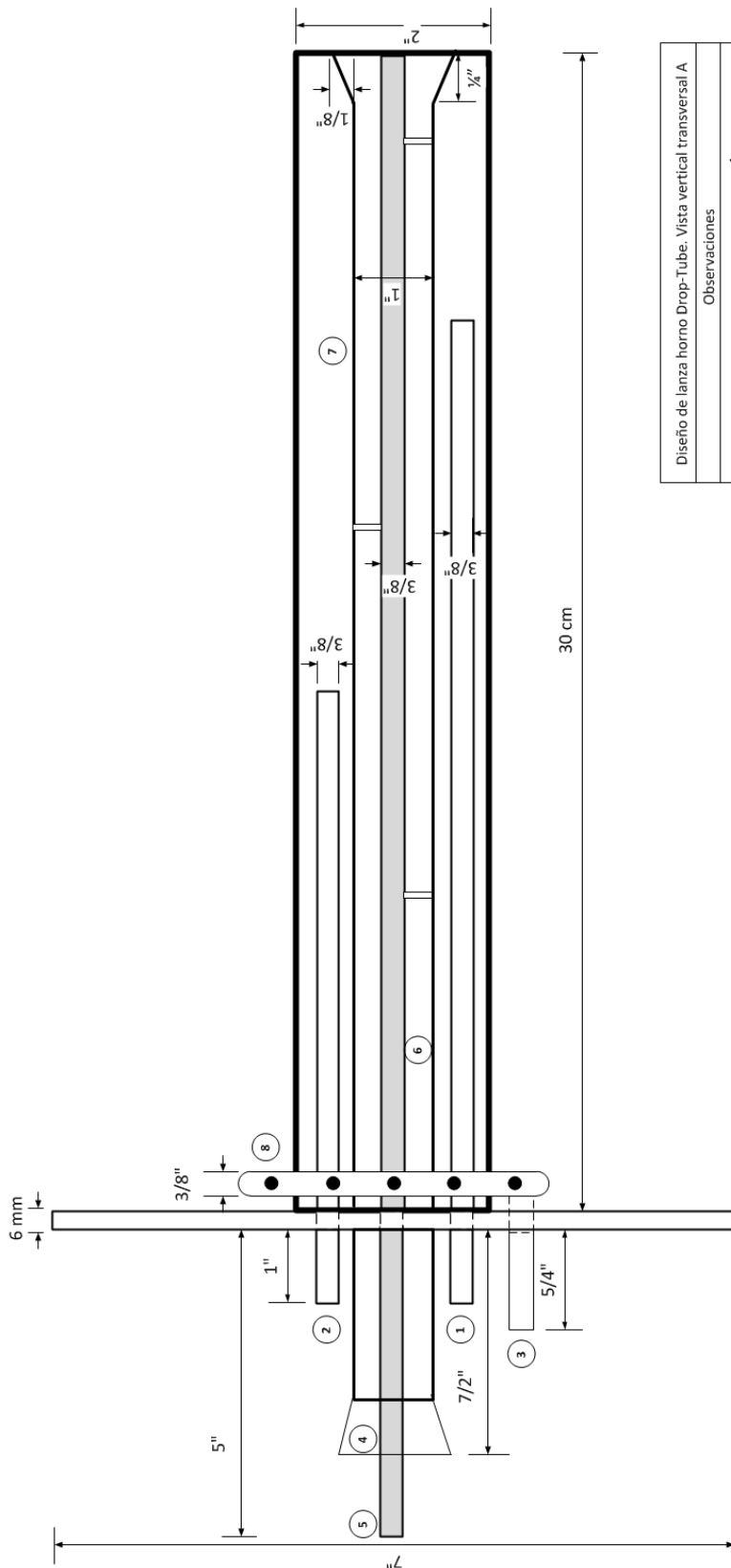


Diseño de lanza horno Drop-Tube. Vista horizontal transversal	
Observaciones	
<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> PROYECTO-FONDEF-CA12110371 (2012) Caracterización espectral de fases fundidas y reacciones a alta temperatura de interés en el control y diagnóstico de procesos de la pirometalurgia del Cu.	
Autor: C. Loeza, R. Opazo, C. Villagrán	Escala: 1:1
Fecha: 09/09/2013	Nº 00003



LEYENDA					
1	Entrada de agua	5	Protección sonda	9	SopORTE tubo alimentación
2	Salida de agua	6	Tubo de alimentación		
3	Entrada de gases	7	Camisa de agua		
4	Boquilla de alimentación	8	Salida de gases		

**Fig.A. 1 Planos lanza Transversal A**  
(Elaboración propia)

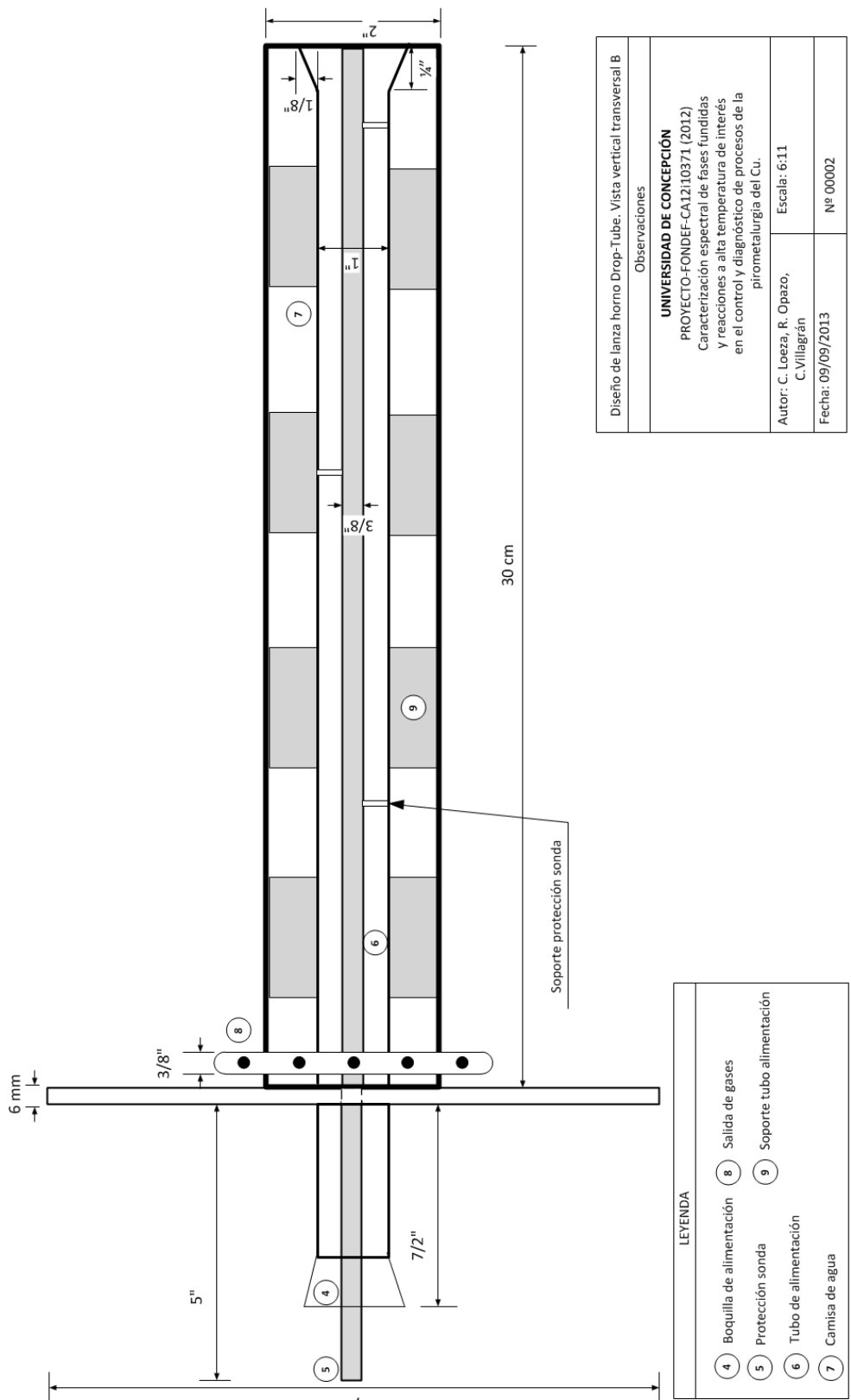


LEYENDA

1	Entrada de agua	5	Protección sonda
2	Salida de agua	6	Tubo de alimentación
3	Entrada de gases	7	Camisa de agua
4	Boquilla de alimentación	8	Salida de gases

Diseño de lanza horno Drop-Tube. Vista vertical transversal A	
Observaciones	
<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> PROYECTO-FONDEF-CA12110371 (2012) Caracterización espectral de fases fundidas y reacciones a alta temperatura de interés en el control y diagnóstico de procesos de la pirometalurgia del Cu.	
Autor: C. Loeza, R. Opazo, C. Villagrán	Escala: 6:11
Fecha: 09/09/2013	Nº 00001

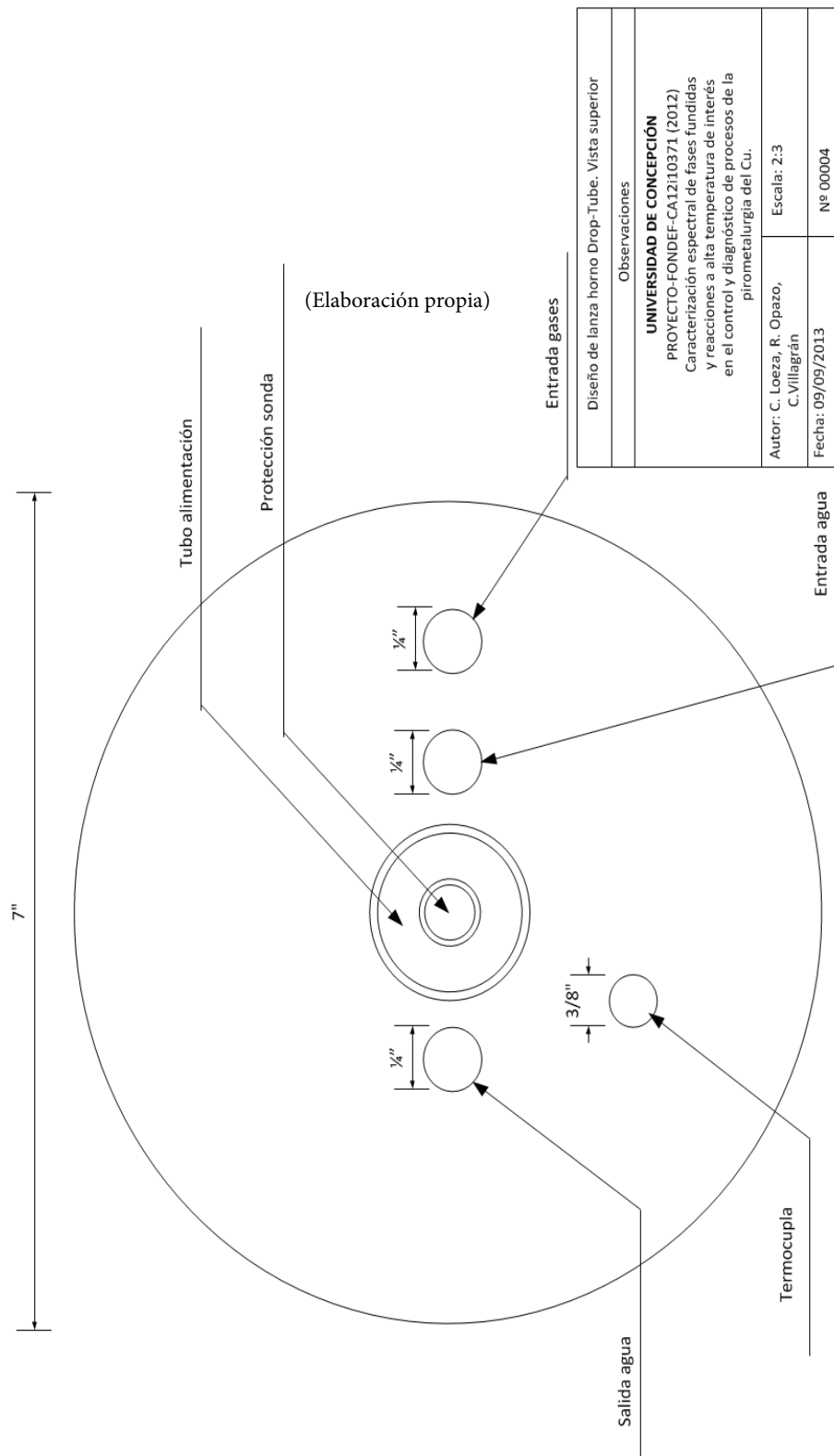
**Fig.A. 2 Plano lanza Longitudinal A**  
(Elaboración propia)



**Fig.A. 3 Plano lanza Longitudinal B**  
(Elaboración propia)

LEYENDA	
4	Boquilla de alimentación
5	Protección sonda
6	Tubo de alimentación
7	Camisa de agua
8	Salida de gases
9	Soporte tubo alimentación

Observaciones	
<b>UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN</b> PROYECTO-FONDEF-CA1210371 (2012) Caracterización espectral de fases fundidas y reacciones a alta temperatura de interés en el control y diagnóstico de procesos de la pirometalurgia del Cu.	
Autor: C. Loeza, R. Opazo, C. Villagrán	Escala: 6:11
Fecha: 09/09/2013	Nº 00002



**Fig.A. 4 Planos lanza Transversal B**

(Elaboración propia)

## Anexo B. Detalle técnico de la sonda y lanza

---

### Lanza

La lanza fue construida en acero inoxidable considerando la concetricidad entre la sonda óptica y la caída de concentrado hacia el horno. Tiene una longitud de 40 cm, 17.8 cm la circunferencia mayor (zona superior), 2.5 cm la entrada de concentrado y sonda, las especificaciones físicas están descritas con mayor detalle en el Anexo A

### Sonda

La empresa tecnológica Avantes ha desarrollado una punta de prueba óptica blindada resistente a altas temperaturas (hasta 700 °C) con inserción de gases para refrigeración. Este tipo de fibra óptica ha sido probado en condiciones de entre 550-600 °C durante 150 horas continuas sin sufrir daños ni alteraciones en la calidad de medición.

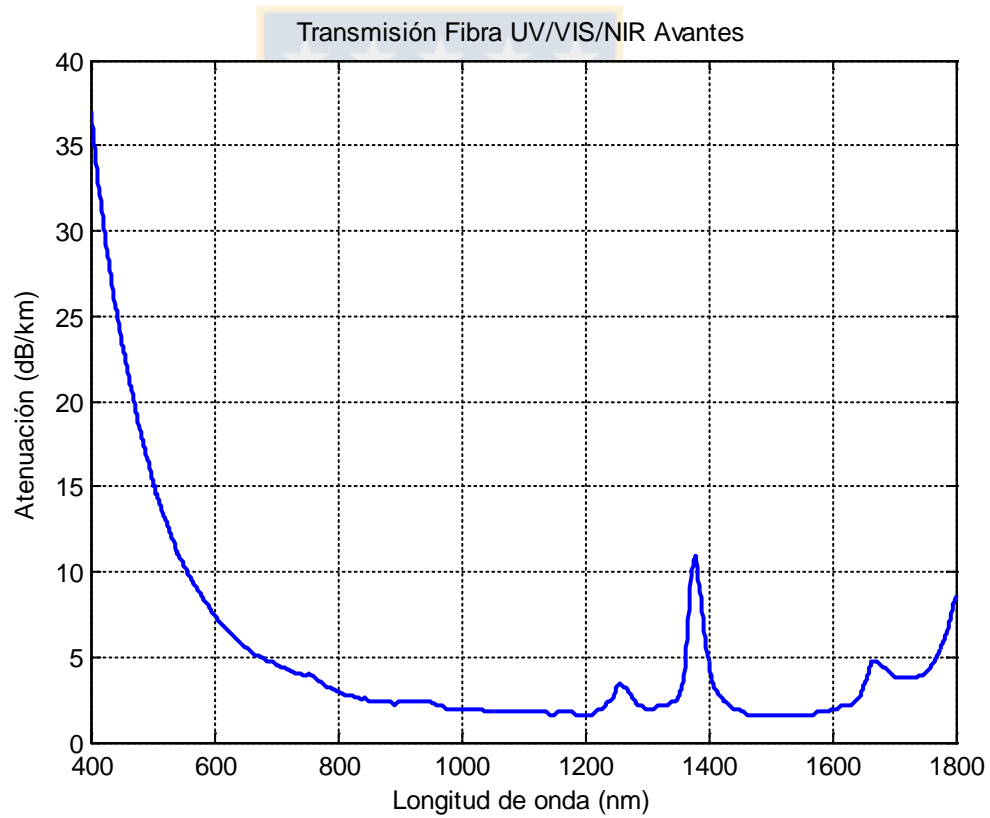
El ángulo sólido de la fibra es 0.159 Sr y el ángulo de vision es de 25.69 °.

**Tabla B. 1 Detalles sonda Avantes (Avantes, 2014)**

<b>Elemento</b>	<b>Detalle</b>
Fibras	7 fibras de 400 $\mu$ m, N.A. 0.22, longitud estándar 2 metros.
Rango	250-2500 [nm] (UV/VIS/NIR)
Conectores	SMA-905 (x2)
Cobertura	Flexible acero inoxidable
Sonda	50 cm, envoltura silicona y acero inoxidable (versión HTX hasta 700°C)



**Fig.B. 1 Sonda Alta Temperatura (Avantes, 2014)**



**Fig.B. 2 Transmisión de la sonda de alta temperatura (Avantes, 2014)**

## Anexo C. Detalles técnicos de espectrofotómetros



Fig.C. 1 Espectrofotómetro USB4000 (OceanOptics, 2012)

Tabla C. 1 Detalle técnico del espectrofotómetro (OceanOptics, 2012)

Specifications	Criteria
Absolute Maximum Ratings: V <sub>cc</sub> Voltage on any pin	+ 5.5 VDC V <sub>cc</sub>
Physical Specifications: Physical Dimensions Weight	89.1 mm x 63.3 mm x 34.4 mm 190 g
Power: Power requirement (master) Supply voltage Power-up time	230 mA at +5 VDC 4.5 – 5.5 V ~5s depending on code size
Spectrometer: Design Focal length (input) Focal length (output) Input Fiber Connector Gratings Entrance Slit  Detector Filters	Asymmetric crossed Czerny-Turner 42mm 68mm (75, 83, and 90mm focal lengths are also available) SMA 905 14 different gratings 5, 10, 25, 50, 100, or 200 $\mu$ m slits. (Slits are optional. In the absence of a slit, the fiber acts as the entrance slit.)  Toshiba TCD1304AP linear CCD array 2 <sup>nd</sup> and 3 <sup>rd</sup> order rejection, long pass (optional)
Spectroscopic: Integration Time Dynamic Range Signal-to-Noise Dark Noise Resolution (FWHM) Stray Light Spectrometer Channels	10 $\mu$ s – 10 seconds 3.4 x 10 <sup>6</sup> (system); 1300:1 for a single acquisition 300:1 (at full signal) 50 counts RMS ~1.5 nm <0.05% at 600 nm; <0.10% at 435 nm One
Environmental Conditions: Temperature Humidity	-30° to +70° C Storage & -10° to +50° C Operation 0% - 90% noncondensing
Interfaces: USB RS-232	USB 2.0, 480 Mbps 2-wire RS-232

## Anexo D. Calibración de espectros

---

La calibración de espectrofotómetros se logra mediante la utilización de una lámpara con distribución de energía conocida, en el rango de operación del equipo.

Los valores de energía  $E_{lamp}$  en  $\mu$ Joules por cada longitud de onda es parte de la documentación de cada lámpara de calibración.

### Procedimiento-1 Vector de Calibración

Establecer tiempo de integración  $T_i$  adecuado, debe medirse el espectro de la lámpara  $S_{lamp}$  en cuentas a través de la fibra óptica que se utilizara durante los experimentos. La calibración no es universal respecto a la fibra, por lo que varía según la fibra óptica utilizada.

De esta forma se obtiene el vector de calibración  $C_\lambda$

$$C_\lambda = \frac{E_{lamp}}{S_{lamp}} \left[ \frac{\mu\text{Joules}}{\text{count}} \right] \quad (\text{D.1})$$

### Procedimiento-2 Calibración de Irradianza

Utilizar diámetro  $d$  de la fibra utilizada para calcular el área de colección, si  $d$  esta en  $\mu\text{m}$  (unidad estándar) se debe utilizar la siguiente fórmula para obtener el área de colección en  $\text{cm}^2$

$$A = \pi \frac{d^2}{4 \cdot 10^8} \text{ [cm}^2\text{]} \quad (\text{D.2})$$

(se usa área en  $\text{cm}^2$  ya que por lo general las superficies de medición y colección son pequeñas).

Se calcula entonces la Calibración de Irradianza como

$$H_\lambda = \frac{C_\lambda}{T_i \cdot A \cdot dL_\lambda} \left[ \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2 \text{nm} \cdot \text{count}} \right] \quad (\text{D.3})$$

Donde  $dL_\lambda$  en nanómetros es la extensión de cada longitud de onda central  $\lambda$  respecto a cada pixel (sensores del espectrofotómetro).

De esta forma el espectro calibrado en Irradianza espectral es de la forma

$$I_\lambda = S_\lambda \cdot H_\lambda \left[ \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2 \text{nm}} \right] \quad (\text{D.4})$$

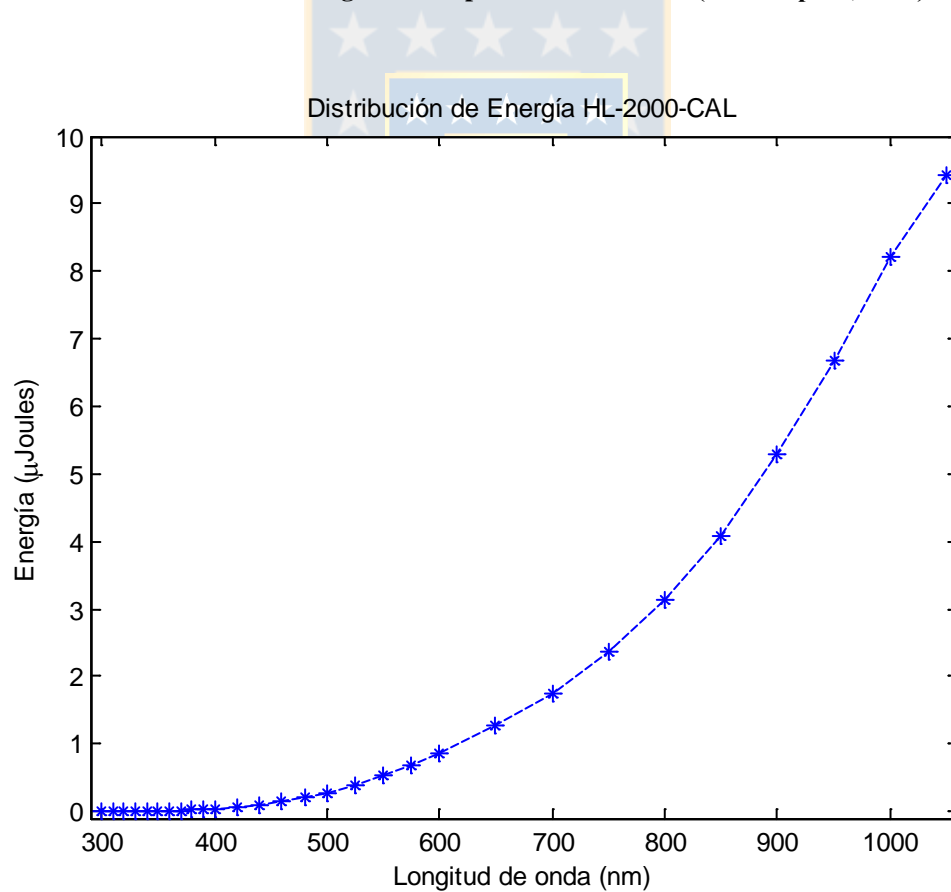
Con  $S_\lambda$  espectro en unidad de cuentas (no calibrado).

$$H_{L,\lambda} = \frac{C_\lambda}{T_i \cdot A \cdot dL_\lambda \cdot \Omega} \left[ \frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^2 \text{nm} \cdot \text{count} \cdot \text{sr}} \right] \quad (\text{D.5})$$





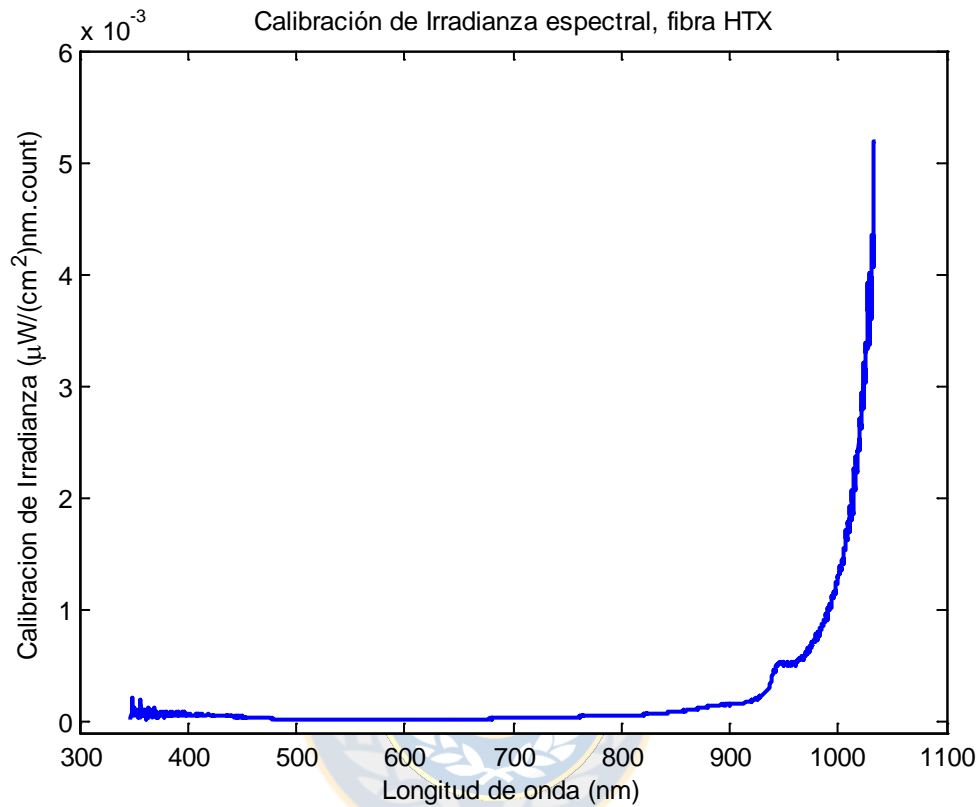
**Fig.D. 1 Lámpara de calibración. (OceanOptics, 2012)**



**Fig.D. 2 Energía de la lámpara**  
(Elaboración propia)

En la Fig. D.2 se define  $E_{lamp}$  los valores de energía de la lámpara por longitud de onda, los

cuales permiten el cálculo del vector de calibración



**Fig.D. 3 Vector de calibración**  
(Elaboración propia)

En la Fig D.3 se obtiene el vector de calibración para la tener el espectro en las medidas correspondientes.

## **Anexo E. Captura radiométrica a través de LabVIEW**

---

En la siguiente figura se muestra un esquema general de la adquisición de datos a partir de dos radiómetros conectados vía USB utilizando los componentes (drivers) creados por Ocean Optics

Los componentes utilizados son los siguientes:

Wrapper\_Create(1) es el encargado de la realización del paso de Create Wrapper mediante una llamada a función a la librería dinámica (dll, dynamic link library) OmniDriver32.dll. No posee entrada y su salida es “wrapper” entero sin signo de 32 bits.

Nótese que todos los componentes para utilización del radiómetro constan de llamadas a librerías dinámicas las cuales contienen códigos generados en .C.

Wrapper\_openAllSpectrometers(2) permite activar la conexión con los radiómetros. Su entrada es un wrapper y como salida entrega otro wrapper y el número de radiómetros conectados.

Wrapper\_getWavelengths(3) obtiene las longitudes de onda que se utilizaron en la medición. Su entrada es un wrapper y el índice del radiómetro. Su salida es un vector de longitudes de onda y la longitud del vector.

Wrapper\_setIntegrationTime(4) permite el ajuste del tiempo de integración en milisegundos. Su entrada es un wrapper, tiempo de integración y un índice correspondiente a la selección del radiómetro.

Wrapper\_getSpectrum(5) obtiene los valores de intensidad de radiación. Su entrada es un wrapper y el índice del radiómetro. Su salida es un vector de intensidades (unidades de cuentas) y la longitud del vector.

Wrapper\_closeAllSpectrometers(6) permite desactivar la conexión con los radiómetros. Su entrada es un wrapper y como salida entrega otro wrapper.

Wrapper\_Destroy(7) elimina los recursos asignados para la conexión de los radiómetros. Su entrada es un wrapper y no posee salida.

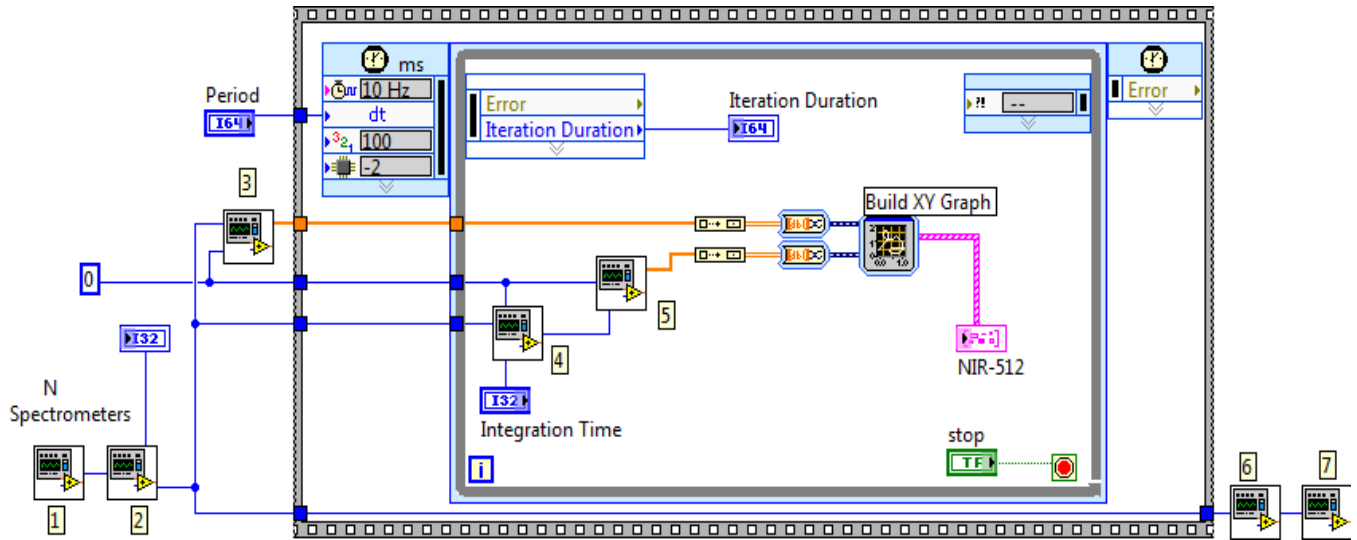


Fig.E. 1 Captura radiométrica (LabView, 2015)

Para la captura y visualización de los datos con retrasos menores a 100 milisegundos (o menores según el tiempo de integración ) Fig. E.1 se ha incluido una estructura de tiempo que permita mantener los procesos realizándose constantemente sin tener que reiniciar el proceso de conexión y desconexión de los radiómetros. La estructura de tiempo que incluye el ajuste del tiempo de integración, obtención de las mediciones espectrales y visualización está dentro de una estructura secuencial para evitar que ciertos procesos se realicen de forma paralela y así prevenir fallos de ejecución y reinicios de conexión. Por lo tanto el proceso de conexión esta antes de la estructura secuencial y el proceso de desconexión después.

La visualización como grafico se realiza mediante Build XY Graph el cual recibe como entrada los valores para los ejes X e Y en formato de datos dinámicos. Su salida es un cluster de dos vectores con las coordenadas. Fig. E.2

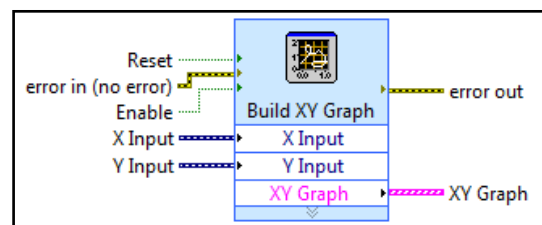
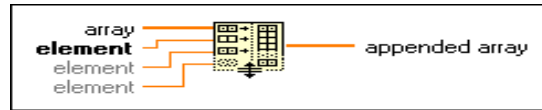
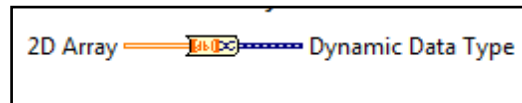


Fig.E. 2 Build XY Graph (LabView, 2015)

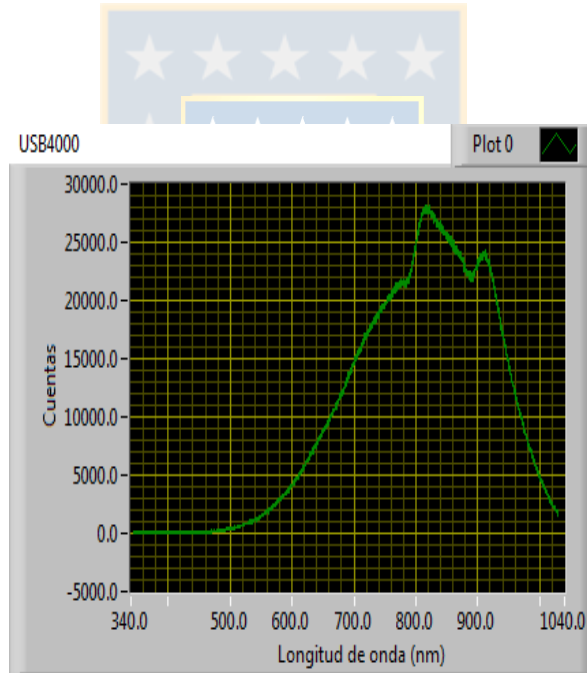
Para tener los vectores de coordenadas en formato de datos dinámicos es necesario hacer las siguientes transformaciones: los vectores de 1 dimensión (vector simple) debe ser convertido en un vector de dos dimensiones mediante Build Array Function y luego a datos dinámicos mediante Convert to Dynamic Data. Fig. E.3 y Fig. E.4 respectivamente



**Fig.E. 3** Icono *Build Array Function* (LabView, 2015)



**Fig.E. 4** Icono *Convert to Dynamic Data* (LabView, 2015)



**Fig.E. 5** Captura de datos con USB4000 (LabView, 2015)

## Anexo F. Líneas de Emisión

Tabla F. 1 Líneas de emisión espectral del S (NIST, 2005)

Observed Wavelength Air (nm)	Ritz Wavelength Air (nm)	Rel. Int. (?)	$A_{ki}$ (s <sup>-1</sup> )	Acc.	$E_j$ (cm <sup>-1</sup> )	$E_k$ (cm <sup>-1</sup> )	Lower Level Conf., Term, J	Upper Level Conf., Term, J	Type	TP Ref.	Line Ref.
750.9066	750.9077	7	1.78e+05	D+	115 285.61 - 128 599.16	128 599.16	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ 2F \ 7/2$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4p \ 4D^\circ \ 7/2$		T3186c85	L5883
	757.82+		4.31e+05	D+	127 127.10 - 140 319.23	140 319.23	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 3d \ 2G \ 7/2$	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 4p \ 2F^\circ \ 7/2$		T3186c85	
757.8909	757.8909	19	1.74e+07	C+	127 128.35 - 140 319.23	140 319.23	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 3d \ 2G \ 9/2$	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 4p \ 2F^\circ \ 7/2$		T3186c85	L5883
	758.98+		2.33e+04	D	114 804.37 - 127 976.34	127 976.34	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ 2F \ 5/2$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4p \ 4D^\circ \ 3/2$		T3186c85	
762.9740	762.9740	17	1.75e+07	C+	127 127.10 - 140 230.10	140 230.10	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 3d \ 2G \ 7/2$	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 4p \ 2F^\circ \ 5/2$		T3186c85	L5883
	772.13+		2.26e+04	D	115 285.61 - 128 233.20	128 233.20	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ 2F \ 7/2$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4p \ 4D^\circ \ 5/2$		T3186c85	
	778.06+		2.70e-03	C	114 279.33 - 127 128.35	127 128.35	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 3d \ 4D \ 7/2$	$3s^2 3p^2 ({}^1D) 3d \ 2G \ 9/2$	E2	T3186c85	
792.8656	792.8675	10	1.23e+07	C	133 268.68 - 145 877.66	145 877.66	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4p \ 2P^\circ \ 1/2$	$3s 3p^4 \ 2P \ 1/2$		T3186c85	L5883
795.4268	795.4281	9			148 886.57 - 161 454.96	161 454.96	$3s^2 3p^2 ({}^1S) 3d \ 2D \ 5/2$	$3s^2 3p^2 ({}^3P_2) 4f \ 2[3]^\circ \ 7/2$			L5883
796.7371	796.7384	17	1.03e+07	C	112 937.57 - 125 485.29	125 485.29	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4s \ 2P \ 1/2$	$3s^2 3p^2 ({}^3P) 4p \ 2S^\circ \ 1/2$		T3186c85	L5883