

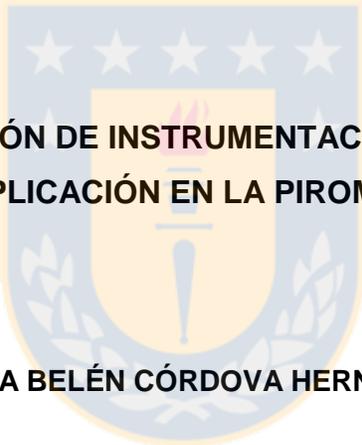
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Profesor Patrocinante:

Dr. Roberto Parra



**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN ESPECTRAL E
HIPERESPECTRAL PARA APLICACIÓN EN LA PIROMETALURGIA DEL COBRE**

VALENTINA BELÉN CÓRDOVA HERNÁNDEZ

Informe de Memoria de Título

para optar al título de

Ingeniero Civil Metalúrgico

Enero, 2019

RESUMEN

Actualmente en los procesos pirometalúrgicos no ferrosos, específicamente en fundiciones de cobre, se tiene un uso limitado de sistemas de monitoreo y control. Esto se debe principalmente a la carencia de instrumentación que permita el adecuado monitoreo operacional de diferentes variables de los reactores. Lo anterior es un tema de gran relevancia ya que es de suma importancia, para estas operaciones, contar con un monitoreo continuo que permita visualizar indicadores de variables críticas como: composición química de fases fundidas, potenciales químicos, potenciales de oxígeno/ SO_2 y temperatura. Una solución que ha tomado fuerza en este último tiempo en diferentes procesos, es el uso de técnicas espectrales mediante sensores optoelectrónicos, ya que cumplen con los requerimientos de ser no invasivos y de fácil manipulación, lo cual es ideal para los diferentes reactores del procesamiento de concentrados y minerales sulfurados a altas temperaturas. Este tipo de tecnología ya ha sido ampliamente utilizada en la industria siderúrgica, lo que hace prever una potencial transferencia hacia la pirometalurgia del cobre en particular y hacia la pirometalurgia no ferrosa en general.

En este documento se presentan dos aspectos relevantes de esta temática. El primero es una revisión bibliográfica de la tecnología optoelectrónica utilizada y en desarrollo para la industria del acero y, el segundo, un análisis del impacto que podría tener la transferencia de este tipo de tecnología a la pirometalurgia del cobre. Desde el punto de vista de la transferencia de tecnología, este documento propone instrumentos para el monitoreo del HFF, medición multiespectral de la composición química de la escoria y las imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases.

El uso de la tecnología optoelectrónica podría tener un importante impacto sobre la recuperación metalúrgica y producción en las fundiciones de cobre, donde un aumento del 1% en la recuperación metalúrgica, representaría una disminución en las pérdidas de cobre, lo que se podría reflejar como un incremento en los ingresos, cercano a los 6,5 millones de dólares anuales, considerando para una fundición que trata 340 kton/año de concentrado, con una media de 26,4 % de cobre en sus concentrados.

ABSTRACT

Currently in non-ferrous pyrometallurgical processes, specifically in copper smelters, there is limited use of monitoring and control systems. This is mainly due to the lack of instrumentation that allows the adequate operational monitoring of different variables of the reactors. The above is a subject of great relevance since it is very important for these operations to have a continuous monitoring that allows the visualization of indicators of critical variables such as: chemical composition of molten phases, chemical potentials, oxygen/ SO_2 potentials and temperature. One solution that has gained strength in different process in recent times is the use of spectral techniques using optoelectronic sensors, since they meet the requirements of being non-invasive and easy to handle, which is ideal for the different reactors of the processing of concentrates and sulphide minerals at high temperatures. This type of technology has already been widely used in the steel industry, which suggests a potential transfer to copper pyrometallurgy in particular and to non-ferrous pyrometallurgy in general.

This document presents two relevant aspects of this subject. The first is a bibliographic review of the optoelectronic technology used and in development for the steel industry; the second, an analysis of the impact that the transfer of this type of technology could have to copper pyrometallurgy. From the point of view of technology transfer, this document proposes instruments for HFF monitoring, multispectral measurement of the chemical composition of the slag and hyperspectral images for phase discrimination.

The use of optoelectronic technology could have an important impact on metallurgical recovery and production in copper smelters, where a 1% increase in metallurgical recovery, would represent a decrease in copper losses, which could be reflected as an increase in revenues, close to 6,5 million dollars per year, considering for a smelter that treats 340 kton/year of concentrate, with an average of 26,4 % copper in its concentrates.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 Trabajos previos..... | 3 |
| 2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA | 6 |
| 2.1 Objetivo general | 6 |
| 2.2 Objetivos específicos..... | 6 |
| 2.3 Metodología de búsqueda..... | 6 |
| 3. TECNOLOGÍA PIROMETALÚRGICA PARA EL PROCESAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE | 7 |
| 3.1 Pérdidas de cobre en la escoria | 11 |
| 3.2 Instrumentación aplicada en la pirometalurgia del cobre | 12 |
| 4. FUNDAMENTO DE LAS MEDICIONES ESPECTRALES | 15 |
| 4.1 Radiación y espectro electromagnético | 15 |
| 4.2 Cuerpos negros | 16 |
| 4.3 Emisividad | 17 |
| 4.4 Mediciones espectrales e hiperespectrales..... | 18 |
| 5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESARROLLO DE INSTRUMENTOS ESPECTRALES UTILIZADOS EN LA SIDERURGIA | 20 |
| 5.1 Introducción..... | 20 |
| 5.2 Sistema de instrumentos y sensores en la industria siderúrgica..... | 21 |
| 5.2.1 Sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria | 21 |
| 5.2.2 Monitoreo del estado de la mampostería de ollas en la producción de acero..... | 24 |
| 5.2.3 Monitoreo de carros torpedos con cámaras infrarrojas | 26 |
| 5.2.4 Control de procesos en la colada continua..... | 28 |
| 5.3 Estimación del contenido de FeO en la escoria de acero utilizando imágenes infrarrojas y redes neuronales | 29 |
| 5.3.1. Sistema de imágenes multiespectrales basado en imágenes infrarrojas | 31 |
| 5.3.2 Redes neuronales artificiales regresivas para la estimación del contenido de FeO | 32 |
| 5.3.3 Resultados de la investigación | 33 |
| 5.4 Técnicas que detectan el momento óptimo para detener el sangrado del BF | 34 |
| 5.4.1 Tratamiento digital de imágenes durante el sangrado del BF..... | 34 |
| 5.4.2 Resultados de la investigación | 35 |
| 6. POTENCIAL IMPACTO EN LA PIROMETALURGIA DEL COBRE | 36 |
| 6.1 Introducción..... | 36 |
| 6.2 Monitoreo en línea del HFF | 37 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3 Medición multiespectral de la composición química de la escoria | 41 |
| 6.4 Imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases..... | 46 |
| 6.5 Programa de investigación para el desarrollo de las propuestas..... | 49 |
| 6.6 Evaluación de beneficios para las fundiciones de cobre | 50 |
| 6.6.1 Estimación de beneficios cuantitativos | 51 |
| 6.6.2 Estimación de beneficios productivos | 55 |
| 7. CONCLUSIONES..... | 56 |
| BIBLIOGRAFÍA | 57 |
| ANEXOS | 60 |



ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 3.1. Representación esquemática del Convertidor El Teniente. ^[30] | 9 |
| Figura 3.2. Horno Flash Outokumpu. ^[32] | 10 |
| Figura 3.3. Esquema del Convertidor Peirce-Smith. ^[32] | 11 |
| Figura 3.4. Diseño esquemático del sistema Semtech OPC que supervisa el estado del proceso en cuatro convertidores Peirce- Smith. ^[20] | 13 |
| Figura 4.1. Espectro Electromagnético. ^[33] | 16 |
| Figura 4.2. Cuerpo Negro ^[14] | 17 |
| Figura 4.3. Esquema del funcionamiento de una cámara hiperespectral. ^[34] | 19 |
| Figura 5.1. Emisividad espectral del acero y la escoria ^[27] | 21 |
| Figura 5.2. Información del sangrado cuando el contenido de escoria es muy bajo y cuando excede el umbral, activando la alarma. ^[22] | 22 |
| Figura 5.3. Esquema del sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria. ^[22] | 23 |
| Figura 5.4. Esquema del monitoreo del estado de las ollas de acero. ^[22] | 25 |
| Figura 5.5. Colores que resaltan áreas problemáticas en las imágenes térmicas. ^[22] | 26 |
| Figura 5.6. Esquema del monitoreo de carros torpedos con cámaras infrarrojas. ^[22] | 27 |
| Figura 5.7. Esquema del control de procesos en la colada continua. ^[22] | 29 |
| Figura 5.8. La parte del soporte de medición (a) con el sistema de cámaras y la vista en el cucharón (b) durante el proceso de descarga de acero. ^[23] | 31 |
| Figura 5.9. Diseño esquemático de la ubicación del sistema durante las mediciones en la acería. ^[23] | 31 |
| Figura 6.1. Representación del quemador con respecto de la llama a diferentes distancias. | 38 |
| Figura 6.2. Diagrama de flujo para el monitoreo del HFF. ^[25] | 39 |
| Figura 6.3. Inestabilidades de los parámetros de llama para diferentes relaciones de equivalencia. ^[25] | 41 |
| Figura 6.4. Esquema del sistema para la estimación de cobre oxidado en la escoria. ^[3] | 44 |
| Figura 6.5. Diagrama de estabilidad para el sistema Cu-O-S a 1200°C. | 44 |
| Figura 6.6. Relación entre el contenido de Cu disuelto como óxido en la escoria y la presión parcial de oxígeno, a actividad del metal fija y 1300 °C. ^[9] | 45 |
| Figura 6.7. Esquema del sistema hiperespectral en un Convertidor Teniente. | 48 |
| Figura 6.8. Diagrama de flujo de la fundición Paipote ^[28] | 52 |
| Figura 6.9. Pérdida metalúrgica y cobre en la escoria del HE en función de la recuperación metalúrgica. | 53 |
| Figura 6.10. Ingreso anual de la fundición en función de la recuperación metalúrgica. | 54 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 5.1. Características de la cámara IRSX-I infrarroja industrial ^[22] | 23 |
| Tabla A.1. Composición de los concentrados secos (Paipote 2008-2009). | 60 |
| Tabla A.2. Parámetros de operación del CT (Paipote 2008). | 60 |
| Tabla A.3. Parámetros de operación del HE (Paipote, 2008). | 61 |
| Tabla A.4. Composición química de escoria y mata del HE (Comp. mensuales, 2008-2009)..... | 61 |

NOMENCLATURA

ε_0 : Permitividad eléctrica en el vacío

μ_0 : Permeabilidad eléctrica en el vacío

c : Velocidad de la luz en el vacío

T : Temperatura absoluta

ν : Frecuencia de una onda

λ : Longitud de onda

ε : Emisividad

σ : Constante de Stefan-Boltzmann

k : Constante de Boltzmann

C_1 : Primera constante de Planck

C_2 : Segunda constante de Planck

$^{\circ}\text{C}$: Grados Celsius



ABREVIACIONES

Mayúsculas:

IR: Infrarrojo.

NIR: Infrarrojo cercano.

CCD: Charge-Coupled Device.

LWIR: Long Wavelength Infrared.

MWIR: Medium Wavelength Infrared

RGB: Red, Green, Blue.

BOF: Basic oxygen furnace.

K: Grados Kelvin

HFF: Horno de fusión flash

HF: Horno eléctrico

CT: Convertidor Teniente



Minúsculas:

μm : Micrómetro

nm : Nanómetro

1. INTRODUCCIÓN

La pirometalurgia del cobre es un proceso dentro de la metalurgia química que ha sido empleado sistemáticamente y con una propuesta tecnológica precisa desde comienzos del siglo XX. Se encarga de la obtención y purificación del metal rojo por medio de la oxidación selectiva de concentrados sulfurados. La oxidación selectiva de hierro y azufre respecto del cobre representan las transformaciones químicas que ocurren en una fundición para la producción primaria de cobre.

Los procesos fundamentales de separación y producción a altas temperaturas de cobre se producen en los hornos de fusión, limpieza de escoria y conversión, siendo en este último donde se logra la producción final de cobre blíster. En todas las etapas, la separación de cobre del hierro, presente en los concentrados, se logra mediante una selectiva oxidación y retención de este último en la fase escoria, que va sucesivamente concentrando y separando el hierro en esta fase oxidada cuya descripción química en una primera aproximación se puede representar en el sistema $FeO_x - SiO_2$. En forma análoga, el azufre es oxidado a SO_2 y se canaliza en los gases.

En la actualidad existe una variedad de reactores para la fusión y conversión. A pesar de esta amplia diversidad tecnológica, que estaría dando cuenta de un profundo desarrollo y búsqueda de mejoras, se tiene un gran déficit en la capacidad del control automático de estos procesos. Hasta ahora solo existe una propuesta de un equipo para monitorear el proceso de conversión por medio de las emisiones de luz de los gases de salida del horno. En el caso de la fusión y la limpieza de escoria, no ha sido desarrollado ningún método de monitoreo ni mucho menos un control automático de forma exitosa.

El proceso industrial de producción de cobre primario a partir de concentrados sulfurados es un proceso que ocurre a altas temperaturas y en condiciones ambientales hostiles, cuyos fenómenos radiométricos de emisión, absorción y transmisión espectral pueden caracterizar las reacciones de oxidación. Las operaciones en el horno de fusión, de limpieza de escoria y de conversión son procesos dinámicos tanto espacial como temporalmente. Por estas razones, no es factible la utilización de instrumentos de medición con contacto físico al interior de los reactores para poder garantizar una apropiada y correcta operación. Una potencial solución sería utilizar instrumentación inalámbrica optoelectrónica que opere bajo los principios físicos de la radiometría. 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 radiación espectral de distintos procesos a altas temperaturas en la industria minera como fuente de información para identificar algunos parámetros del proceso. Como es en el caso de la industria

siderúrgica, que en la última década se ha estudiado el comportamiento espectral del arrabio y la escoria, describiendo fundamentalmente parámetros como las diferentes emisividades que tienen, permitiendo distinguir espacialmente la localización de estas fases, identificando además que la intensidad de radiación del arrabio se mantiene prácticamente constante durante el proceso, mientras que la intensidad de radiación de la escoria es fluctuante ^[27].

La falta de un monitoreo preciso de lo que ocurre en los hornos se ha convertido en un gran desafío tecnológico en la pirometalurgia del cobre, ya que no hay instrumentación que pueda permitir un control avanzado del proceso. La operación es muy dependiente del operador, siguiendo el criterio de lo que pueda visualizar, afectando directamente sobre diferentes parámetros, entre los cuales destaca principalmente la recuperación metalúrgica y la producción de los procesos.

No existen desarrollos validados de instrumentación optoelectrónica, ni menos comerciales, que permitan controlar las condiciones operacionales de los hornos de conversión, fusión y de limpieza de escoria. Del mismo modo, no hay instrumentos que aporten en la toma de decisión del operador para tener una operación estable, dejando variables importantes sin un control preciso y confiable.

En resumen, en los procesos pirometalúrgicos para la producción primaria de cobre sería de gran importancia poder contar con un sistema de monitoreo en línea que pueda capturar la información oportuna, permitiendo representar el estado de la operación, la cual soporte las condiciones de operación (material particulado y altas temperaturas) con que se trabaja en los hornos. Bajo la anterior premisa, las técnicas optoelectrónicas resultan estar especialmente adaptadas para este tipo de ambiente, ya que no requieren de interacción dentro del horno, tampoco estar en contacto con las fases fundidas, como ya se realiza en los procesos siderúrgicos.

En este contexto, se plantea la siguiente hipótesis:

Es posible utilizar un instrumento optoelectrónico que permita optimizar el monitoreo y control de los procesos de fundición, específicamente para la pirometalurgia del cobre, bajo los principios que han sido aplicados en la industria siderúrgica.

1.1 Trabajos previos

El proceso industrial de producción de cobre primario a partir de concentrados sulfurados es un proceso que ocurre a altas temperaturas, y en condiciones ambientales hostiles. Las operaciones de sangrado de escoria en el horno de fusión, de limpieza de escoria y de conversión es un proceso dinámico tanto espacial como temporal. Por estas razones, es muy compleja la utilización de instrumentos de medición con contacto físico para poder controlar el proceso. En la actualidad para los procesos pirometalúrgicos no ferrosos no existe en la industria una herramienta optoelectrónica capaz de monitorear y controlar este proceso. Los estudios relacionados a las emisiones espectrales son prácticamente inexistentes, no así en el área de la siderurgia.

En la industria del acero existe, desde hace un tiempo, estudios e instrumentos optoelectrónicos de diversos proveedores, por lo cual se revisarán algunos estudios y trabajos previos que se han hecho en este dominio de la metalurgia.

- **Thermal Imaging System to prevent Slag Carryover in Steel Making** ^[2]

Slag System Detection es un instrumento que sirve como una solución para mejorar la calidad del acero y reducir los costos de tratamiento, minimizando el remanente de escoria en la fase metálica durante el sangrado. Durante este proceso, una cámara infrarroja industrial IRSX-I, que tiene un rango espectral de 7,5 a 13 μm , monitorea la corriente y gracias a las diferentes propiedades de radiación entre el metal líquido y la escoria, la cámara térmica distingue con precisión estas dos fases. Este instrumento permite una determinación precisa del arrastre de escoria en el metal, evaluando la imagen térmica en tiempo real. El contenido aceptable de escoria puede preconfigurarse en el diseño del software. Tan pronto como se alcance este umbral, se enciende una alarma para detener el sangrado.

Todos los datos importantes se muestran continuamente en una interfaz de operación claramente organizada. Esto incluye la imagen térmica en vivo, en donde se puede apreciar el arrastre de escoria en función del tiempo de sangrado, el umbral de la alarma preestablecido para el contenido de escoria y el estado de la alarma.

- **Radiative parameters of steel slag for FeO content estimation using multispectral thermography system** ^[3]

El estudio desarrollado trata de la aplicación de imágenes multiespectrales para estimar la calidad del acero directamente después de que se produce en la acería. En particular, las cámaras

térmicas y visuales se utilizan para estimar el contenido de FeO en la escoria. Esto se hace mediante el análisis de las imágenes del sangrado de acero que se adquieren durante la descarga de un convertidor.

Los autores proponen un análisis estadístico multivariable utilizando los parámetros de radiación del acero y la escoria en diversos rangos espectrales. Para estimar el contenido de FeO en la escoria, se diseña un sistema multispectral. Este sistema consiste en cámaras térmicas de longitud de onda media (MWIR, 4-5 μm) y de longitud de onda larga (LWIR, 7,5-13 μm), una cámara de infrarrojo cercano (NIR, 0,7-1 μm) y una cámara RGB visible.

Por último, los parámetros de radiación correlacionados con el contenido de FeO en la escoria se utilizan como vectores para la estimación de la calidad del acero. Cabe recordar que para un determinado grado de acero, el contenido de FeO en la escoria permite estimar la actividad del FeO , consecuentemente también la presión de oxígeno y relacionarlo con el contenido de aleantes en el metal.

- **Thermal Imaging of Liquid Steel and Slag in a Pouring Stream** ^[4]

Este artículo presenta algunas teorías básicas de la termometría de radiación, junto con las propiedades que tiene el material que se procesa en la industria siderúrgica. Se aprecian considerables diferencias entre las bandas de identificación en longitud de onda para el acero y la escoria. La combinación de estas diferencias con la caracterización de imágenes, vida útil y costo de los dispositivos disponibles comercialmente permiten desarrollar la equivalencia necesaria entre la capacidad de discriminación de la calidad de imagen, la confiabilidad del equipo y los costos del sistema. El objetivo principal de este documento es proporcionar la teoría suficiente para comprender las capacidades de los equipos de imágenes térmicas.

El trabajo concluye que cualquier sistema de imagen térmica ayudará a mejorar la capacidad de un operador BOF para discernir la diferencia entre la escoria y el acero, por lo cual un análisis más detallado muestra que existe una solución técnica óptima.

- **Infrared steel slag detection method of converter** ^[5]

Se desarrolló un método para la detección de escoria producida en el BOF. La invención adopta el siguiente esquema técnico: en primer lugar, se necesita controlar la salida del acero en el proceso mediante un dispositivo de detección infrarrojo de la escoria. Si la señal no se detecta significa que el convertidor no ha comenzado a sangrar y queda a la espera hasta que se vierta el

acero. El segundo paso es obtener una imagen del sangrado de la escoria en tiempo real, segmentándola, usando tecnología de histograma para encontrar el umbral adecuado, separando así la escoria del acero fundido. En el tercer paso, el detector adopta un valor límite según el porcentaje de escoria. Si el contenido de escoria excede el valor límite, el detector manda una señal de salida tipo alarma y detiene el sangrado del BOF.

El dispositivo de detección infrarroja de escoria se compone de una cámara CCD IR, un transmisor óptico del terminal, un cable óptico, un receptor óptico del terminal y un tablero de control central.

- **New techniques to detect the suitable time to close the tap hole of a blast furnace** ^[8]

En el control operacional de un alto horno (BF), se debe tener especial atención en el control sobre el sangrado de escoria y arrabio. La presión interna de gas podría desequilibrarse y “salir por el orificio del sangrado” si no se controla adecuadamente esta operación. El clásico silbido que ocurre en esta situación es muy conocido por los operadores de la planta. Esta situación es muy compleja, ya que cerrar el orificio del sangrado bajo las condiciones en que se trabaja es muy complicado y algunas veces casi imposible.

En este artículo se describen dos métodos simultáneos para la detección temprana en el instante en el que la piqueta del BF debe cerrarse para evitar el silbido. Estos operan al mismo tiempo, para asesorar al operador de una planta con el fin de advertirle sobre cuándo debe cerrar el orificio del sangrado. Uno de ellos se basa en el procesamiento de las señales de sondas, que miden la fuerza electromotriz entre dos puntos de la coraza en el crisol. Estas sondas están soldadas a la carcasa del BF y se encuentran en la parte superior y debajo del orificio de sangrado correspondiente. El segundo sistema utiliza el tratamiento digital de imágenes (TI) de arrabio y escoria que sale del orificio del sangrado en este ambiente. Durante el proceso completo de sangrado con una cámara de video comercial de 10 megapíxeles, el metal fundido y la escoria, que se encuentran a diferentes temperaturas y tienen distintas emisividades, se pueden llegar a diferenciar a partir del color que emiten a la cámara. Este estudio se utilizó como un desarrollo específico para aplicar TI en el entorno industrial.

2. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

2.1 Objetivo general

Proyectar la transferencia de instrumentación espectral que se utiliza en los procesos siderúrgicos a la pirometalurgia no ferrosa, específicamente a la pirometalurgia del cobre.

2.2 Objetivos específicos

- Establecer opciones para la caracterización de fases fundidas de interés en la pirometalurgia del cobre.
- Realizar una evaluación preliminar de la aplicación de un equipo de apoyo a la operación de sangrado en el tratamiento de escorias.
- Identificar opciones para caracterizar reacciones químicas particularmente de oxidación.

2.3 Metodología de búsqueda

Esta investigación se ha efectuado mediante una profunda búsqueda a través de internet, contando con las siguientes páginas más visitadas:

- www.researchgate.net
- www.scopus.com
- www.sciencedirect.com
- patentscope.wipo.int
- [google patents](http://google.com/patents)

También la búsqueda en la literatura se llevó a cabo empleando las siguientes palabras claves: Spectral, Multiespectral, Steel industry, Optoelectronic y Thermal imaging.

Con toda la información y publicaciones disponibles se logró comprender el funcionamiento de la instrumentación espectral en la industria minera, tanto la que se utiliza en la actualidad como la que se está en desarrollo, considerando diferentes temáticas de investigación tanto fundamental como aplicada.

Posteriormente a esta recopilación y análisis del estado del arte, se rescató instrumentación que podría llegar a ser utilizada en la pirometalurgia del cobre, como por ejemplo las cámaras

térmicas, que permiten visualizar la energía o calor emitido por un objeto, que el ser humano no puede llegar a detectar a través de su visión. Por otro lado, también están las cámaras hiperspectrales que tienen varias bandas espectrales a través de todo el espectro electromagnético, identificando y distinguiendo radiación de diferentes materiales, característica que ha sido utilizada en la actualidad para la detección de campos de cultivo, minerales y otros.

Finalmente se consideraron tres instrumentos para estudiar el impacto que podría provocar en la industria del cobre, los cuales fueron la medición multiespectral de la composición química de la escoria, la utilización de imágenes hiperspectrales para la discriminación de fases y el monitoreo del HFF. Estos instrumentos fueron elegidos en base a que algunos ya son utilizados en la industria de procesos y particularmente en procesos metalúrgicos como son las mediciones espectrales en la siderurgia para diferenciar las fases fundidas y el monitoreo de la estabilidad de la llama que se utiliza en la combustión de hidrocarburos, principalmente del carbón.

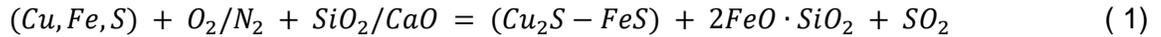
3. TECNOLOGÍA PIROMETALÚRGICA PARA EL PROCESAMIENTO DE CONCENTRADOS DE COBRE

Cuando se habla de la obtención de cobre metálico a través de la vía pirometalúrgica nos referimos a una técnica que ocurre en múltiples etapas para procesar los minerales sulfurados de cobre, que se consideran desde la extracción del mineral desde el yacimiento, hasta la obtención del metal para así obtener un producto de alta pureza. Dado lo anterior, los minerales sulfurados de cobre representan más de dos tercios de la producción chilena actual ^[11], lo que indica la gran importancia que tienen las fundiciones de cobre en Chile.

Las fundiciones de concentrados de cobre tienen por objetivo producir ánodos de alta pureza, por medio de reacciones químicas a altas temperaturas, en las siguientes etapas: fusión, conversión, refinación y limpieza de escoria. Las conexiones de estas etapas tienen como finalidad lograr una pureza de un 99,5 % de cobre, a partir de un concentrado con una ley inicial de 25 - 35 %. Las etapas de fusión y conversión son determinantes en el proceso, y por lo tanto su control operacional es vital para la obtención de un producto de calidad.

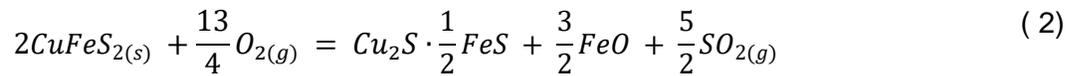
En los concentrados de cobre se encuentran principalmente calcopirita ($CuFeS_2$) y pirita (FeS_2), especies que en la etapa de fusión se oxidan y funden a 1250 °C. Gracias a la afinidad relativa que tiene el oxígeno por el hierro y el azufre se producen tres fases: una fase sulfurada fundida

enriquecida con cobre (mata) que contiene entre un 45 % a 75 % Cu , dependiendo del método de fusión, una fase fundida que contiene principalmente óxidos de hierro y sílice inmiscible en la fase sulfurada, y finalmente se forma una fase gaseosa rica en SO_2 . La fusión se lleva a cabo por el siguiente esquema reaccional:

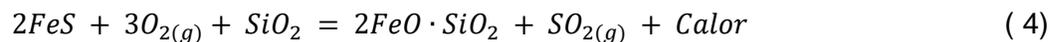


Concentrado *aire de proceso* *fundente* *mata* *escorias* *gas*

Donde las reacciones representativas globales de la calcopirita para la producción de mata y escoria son:



Una vez sangrada la mata, ésta es vertida en ollas o cucharas que son vaciadas en hornos de conversión, donde se continúa la oxidación con una corriente de aire o aire enriquecido. La etapa de conversión tiene por objetivo remover el hierro y el azufre contenidos en la mata, produciendo cobre blíster, con una pureza de aproximadamente 98,5 % en cobre, escoria fayalítica fundida y una corriente de gases rica en SO_2 . Las reacciones químicas involucradas para la formación de escoria y cobre blíster son:



Posteriormente el cobre blíster es enviado a una etapa de refinación a fuego para formar ánodos de cobre con aproximadamente un 99,8 % de pureza.

Las etapas de fusión y conversión tienen diferentes alternativas tecnológicas. En general, los procesos de fusión se pueden clasificar en:

- Fusión en baño (Bath Smelting)
- Fusión flash
- Fusión por calentamiento

En los procesos de fusión en baño están aquellos hornos donde el concentrado se funde agregándolo o inyectándolo a un baño fundido, aprovechando la energía producto de las reacciones de oxidación que ocurren dentro del reactor. El aire enriquecido es inyectado por toberas que se ubican al costado del horno, en el fondo o por una lanza sobre el baño. Entre las principales unidades utilizadas se encuentran la tecnología Teniente, Noranda, BBF (bottom-blow furnace), Isasmelt, Ausmelt y Mitsubishi.

En la Figura 3.1, se puede apreciar el horno de fusión en baño Convertidor Teniente, que fue creado como una alternativa intermedia entre la fusión convencional y autógena. El CT tiene la particularidad de inyectar aire enriquecido a través de toberas que tiene en la parte inferior del horno, produciendo un metal blanco con una ley entre un 72 – 75% de cobre.

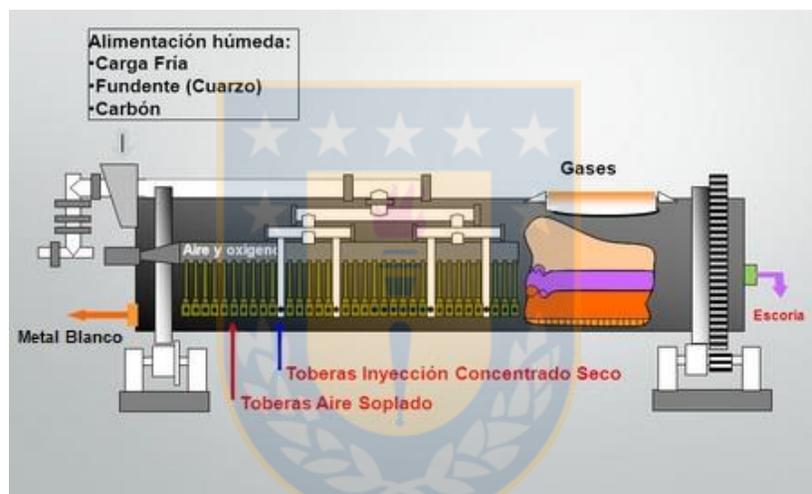


Figura 3.1. Representación esquemática del Convertidor El Teniente. ^[30]

En la fusión flash el concentrado se suspende en una corriente de gas oxidante, ocurriendo fusión y conversión parcial al mismo tiempo. Lo anterior ocurre al interior de una cámara cilíndrica vertical llamada torre de reacción, donde las partículas de concentrado se funden convirtiéndose en pequeñas gotas que luego se separan en dos fases, mata y escoria, en la zona llamada settler. Las principales tecnologías son las versiones Outokumpu (hoy Outotec, Figura 3.2) e INCO.

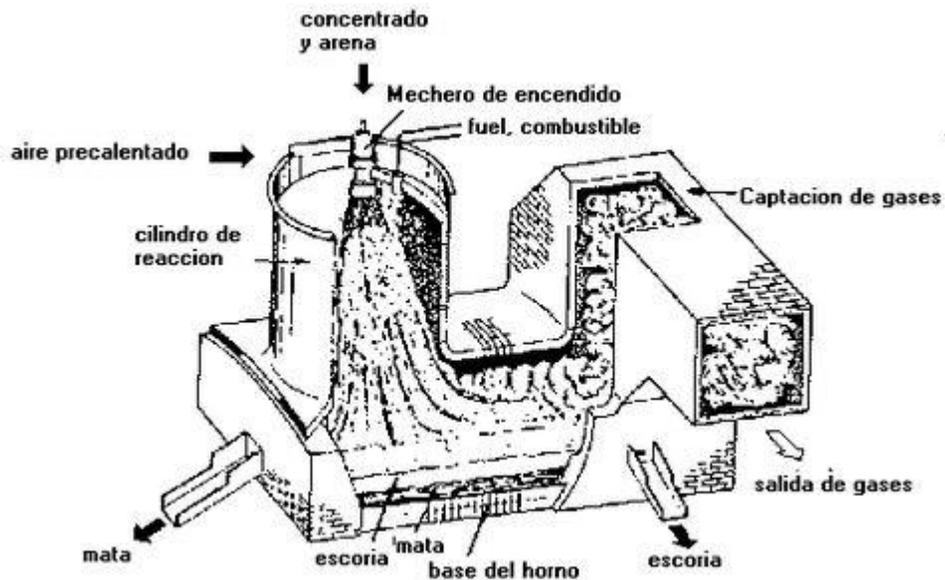


Figura 3.2. Horno Flash Outokumpu. [32]

Finalmente, se tiene la fusión por calentamiento de la carga en forma directa que utiliza un hidrocarburo como petróleo, para aportar el calor necesario para la fusión del concentrado. El más famoso es el horno reverbero, que casi ya no es utilizado por su ineficiencia térmica y gases muy diluidos.

Por otro lado, la conversión de cobre puede ser realizada de forma continua o discontinua:

- Conversión continua: el proceso se realiza sin interrupciones con una alimentación constante de la mata y un sangrado continuo de cobre blíster. Las tecnologías más utilizadas son la de conversión Flash y Mitsubishi, junto a los nuevos desarrollos de tecnología de conversión en la fundición Jinfeng, donde se destacan los hornos Ausmelt C3, que se caracterizan por incorporar el uso de una lanza sumergible en el baño para generar las reacciones deseadas, y los hornos de lecho empacado, que contienen un lecho refractario en un reactor vertical, en cuyo interior se desarrolla el transporte gravitacional continuo de mata líquida y fundentes, a través de la porosidad del lecho en contracorriente con el aire inyectado a través de toberas ubicadas en la parte inferior del reactor. Cabe destacar que esta última aún está en una escala de laboratorio y no ha sido aplicada industrialmente.
- Conversión discontinua: El proceso se basa en realizar distintas cargas, las cuales deben esperar el término de una para seguir consecutivamente con la otra. En este caso se destaca en tecnología principalmente el convertidor Peirce-Smith (Figura 3.3) que posee sobre el 90 %

de la capacidad de conversión instalada y en menor extensión los hornos de conversión Hoboken.

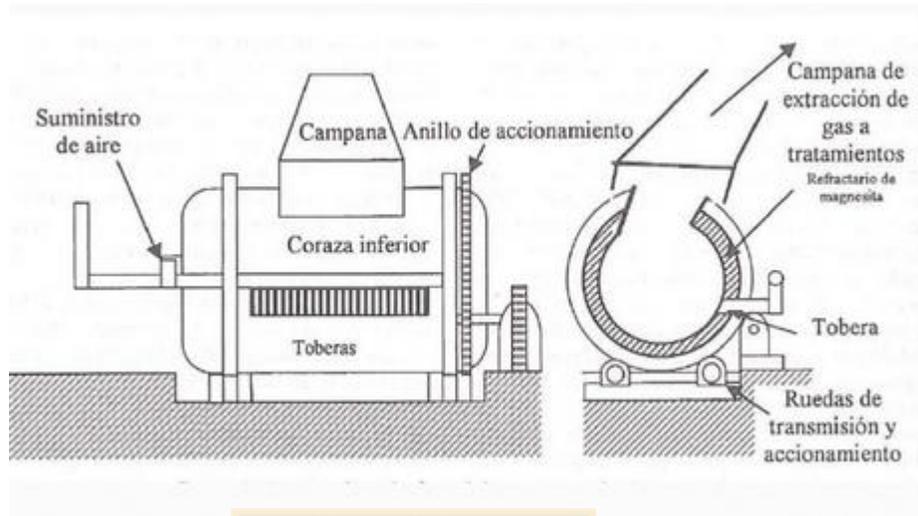


Figura 3.3. Esquema del Convertidor Peirce-Smith. [32]

3.1 Pérdidas de cobre en la escoria

En la actualidad, la producción industrial de cobre primario a partir concentrados sulfurados es un proceso con uso intensivo de oxígeno, a altas temperaturas, en condiciones ambientales exigentes. Las pérdidas de cobre que se producen en los procesos son de origen químico y físico. La predominancia de uno u otro mecanismo dependen de cada proceso. Por tal razón resulta muy importante tener herramientas que permitan cuantificar las pérdidas y establecer que mecanismos se favorecen según las condiciones de operación y diseño del horno. En la literatura se reportan diferentes estudios para caracterizar pérdidas de cobre en las escorias [9]. A continuación, se describen los aspectos más importantes relacionados a este tema.

Desde el punto de vista químico existe una disolución sulfídica y oxidica del cobre en la escoria. El cobre se disuelve en la escoria fundida en forma de iones monovalentes Cu^+ . Estos se pueden asociar a aniones de oxígeno (O^{2-}) disponibles en la escoria y también con los iones de azufre (S^{2-}), contenidos en la mata/escoria. La tendencia es formar un oxisulfuro homogéneo fundido producto de los cambios en la composición eje-escoria ante el aumento de la presión parcial de oxígeno, y dependiendo, además, del contenido de sílice en la escoria.

También físicamente existe un atrapamiento mecánico del cobre en la escoria. El cobre atrapado mecánicamente se encuentra formando una fase separada y dispersa en la escoria líquida. Dicha fase está constituida principalmente por gotas de mata y/o cobre blíster que no alcanzaron a

sedimentar hacia la fase mata o metal al interior del reactor y que depende de propiedades físicas tales como la densidad, tensión superficial y viscosidad de las fases presentes. Los mecanismos más importantes que inducen la pérdida mecánica del cobre en la escoria son: el transporte y flotación de mata mediante fase gas (SO_2 , O_2); suspensión de gotas de mata en flujo turbulento y en flujo viscoso; atrapamiento de mata debido a fases sólidas en suspensión o acumuladas en zonas “frías” [9].

Las escorias fayalíticas que contienen magnetita tienen una alta viscosidad debido a que la magnetita sólida precipita bajo diversas condiciones. Esto aumenta la cantidad de cobre atrapado ya que el tiempo de sedimentación es mayor debido a la alta viscosidad cuando hay magnetita precipitada y a que la magnetita sólida en sí misma tiende a atrapar partículas con cobre [10].

Un último aspecto a considerar relacionado a las pérdidas de cobre en la escoria es la operación de sangrado. En los hornos de fusión y de conversión el sangrado de escoria es un proceso dinámico que se realiza mediante un análisis visual del operador basado en su experiencia, de forma completamente manual. Este mecanismo es altamente dependiente del criterio del operador, lo que dificulta estandarizar la operación y poder dar la estabilidad de optimización al proceso, produciendo que parte de la mata o cobre blíster se vaya con la escoria. Por tal razón resulta muy importante tener herramientas que permitan cuantificar y controlar las pérdidas, para apoyar al operador en el proceso de toma de decisiones para la operación de sangrado.

3.2 Instrumentación aplicada en la pirometalurgia del cobre

La aplicación de algún tipo de instrumentación en la pirometalurgia del cobre es casi inexistente. Si bien en los últimos años se ha considerado a la instrumentación optoelectrónica y la información espectral que esta genera como una fuente de información para identificar parámetros del proceso, la aplicación en la industria de producción primaria de metales no ferrosos es muy escasa casi inexistente.

En la última década, algunos estudios han considerado la emisión de radiación espectral de distintos procesos a altas temperaturas en la industria pirometalúrgica como fuente de información para identificar algunos parámetros. Esto ha permitido poner en el mercado la aplicación comercial de instrumentos especialmente diseñados para el control de procesos en la industria pirometalúrgica. Durante aproximadamente 20 años Semtech [21] ha desarrollado e industrializado una tecnología de detección remota, basada en la óptica y espectroscopía, para el monitoreo continuo de procesos en línea y el control de la producción. Este sistema consiste en un telescopio óptico, que enfoca la luz emitida por los gases de salida del proceso de conversión a altas

temperaturas en una fibra óptica. Este último guía la luz hacia el servidor OPC, donde se analiza en un espectrómetro equipado con una cama CCD para ser registrado en un detector multicanal. La información espectroscópica se presenta en forma de curvas de tendencia que se pueden observar en una interfaz para los operadores, visualizando así la composición promedio de la fase gaseosa se puede deducir el estado promedio de la masa fundida. La radiación que emiten los gases se muestra en longitudes de onda bien definidas que son características para cada especie, con intensidades que dependen de la concentración de la fase gaseosa (por ejemplo, la presión de vapor) de los átomos y las moléculas que emiten luz ^[20].

Por lo tanto, al analizar espectroscópicamente la luz emitida por los gases residuales es posible obtener información sobre lo que está ocurriendo dentro del horno. Lo anterior permite inferir las condiciones de avance de las reacciones de oxidación de distintos elementos para establecer, a partir de una apropiada estimación, el término de la etapa de soplado de hierro y el término de ciclo de producción de cobre blíster. El esquema del sistema Semtech se puede observar en la Figura 3.4.

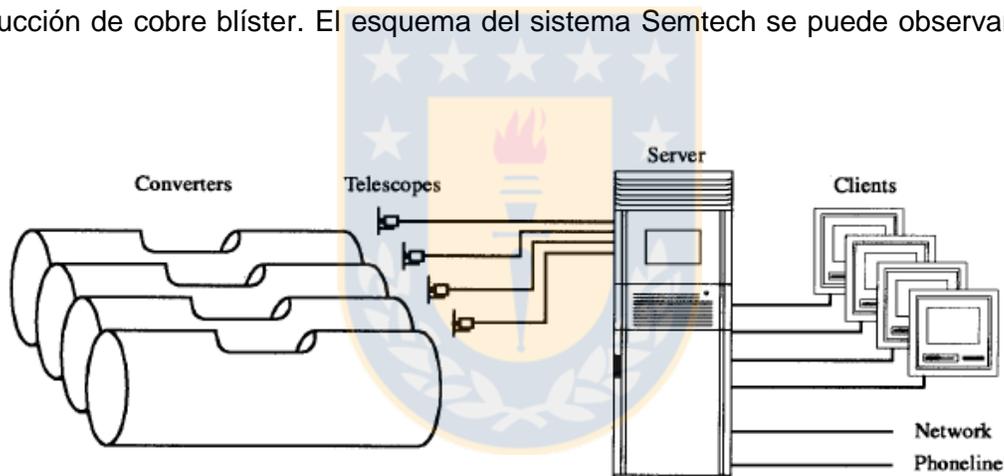


Figura 3.4. Diseño esquemático del sistema Semtech OPC que supervisa el estado del proceso en cuatro convertidores Peirce- Smith. ^[20]

Por otro lado, en la industria del cobre también se utilizan pirómetros que son dispositivos capaces de medir la temperatura de cuerpos en función de la energía que estos irradian. Detectan la radiación infrarroja emitida por la superficie de un objeto y la convierte en una lectura. Similar a una cámara fotográfica, la precisión de la óptica del pirómetro enfoca el objeto a medir e indica su posición exacta y tamaño. El pirómetro, por lo tanto, puede ser instalado a una distancia segura de la fuente de calor. Monitoreando la temperatura con precisión para mantener las propiedades metalúrgicas apropiadas logrando así productos de mejor calidad, niveles de productividad más altos y una mayor vida de los equipos.

Por ejemplo, en CODELCO División el Salvador, se cuenta con un pirómetro Noranda en el Horno de Fusión y en Conversión con un pirómetro óptico. En la fundición de cobre, principalmente en el Convertidor Teniente, es importante controlar la temperatura, en donde la escoria puede ser producida a la temperatura óptima y ahorrar en el consumo de combustible ^[29]. De igual forma resulta importante controlar este parámetro para evitar sobrecalentamientos nocivos en la mampostería del reactor o enfriamientos que perjudican el proceso por un deterioro de la calidad de la escoria.

Finalmente, y como ya se precisó, en el caso de la pirometalurgia del cobre existe en el mercado el OPC System que permite un seguimiento del avance del proceso de conversión de ejes y matas mediante el análisis espectral de los gases del proceso. Este sistema, entre otros tipos de pirómetros para la fase gas, es la mejor opción tecnológica conocida, y aún la única comercializada para entregar un monitoreo continuo en línea de la operación de los Convertidores Peirce Smith y de la refinación de cobre blíster en hornos basculantes.

El interés en los métodos espectroscópicos para controlar los procesos de fundición se desencadena por una serie de características atractivas inherentes a las mediciones ópticas:

- Se pueden realizar a distancia, sin introducir ningún sensor físico en el horno.
- Se pueden realizar en línea, el muestreo no es un requisito previo para la medición.
- Pueden proporcionar información continua en tiempo real.
- Son insensibles al ruido electrónico.

A continuación, se detallará los fundamentos físicos en los cuales se sustentan las mediciones espectrales.

4. FUNDAMENTO DE LAS MEDICIONES ESPECTRALES

En la pirometalurgia del cobre la oxidación de los concentrados involucra productos gaseosos y de especies intermedias a altas temperaturas, dando lugar a fenómenos radiométricos de emisión, transmisión y absorción espectral.

Para comprender de mejor manera la espectroscopía y como esta rama estudia las radiaciones espectrales emitidas de las distintas partículas, se revisarán algunos conceptos básicos.

4.1 Radiación y espectro electromagnético

Las cargas eléctricas en movimiento producen tanto campos eléctricos como magnéticos, esto da lugar a las radiaciones electromagnéticas que están formadas por la combinación de estos campos oscilantes, propagándose a través del espacio en forma de ondas portadoras de energía, sin la necesidad de un medio material para poder hacerlo. La radiación electromagnética es, por lo tanto, la emisión y transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas.

El físico escocés, James Clerk Maxwell analizó matemáticamente la teoría de los campos electromagnéticos, afirmando que la luz visible era una onda electromagnética. Estableció que la velocidad de propagación de la radiación electromagnética en el vacío c es la misma para cualquier onda, con un valor de $299.792.458 \left(\frac{m}{s}\right)$ [12]. La teoría electromagnética establece que:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (6)$$

donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica en el vacío $\left(\frac{C}{Nm^2}\right)$ y μ_0 es la permeabilidad magnética en el vacío (N/A^2) .

El comportamiento de las radiaciones electromagnéticas depende de su longitud de onda, la que se expresa comúnmente en nanómetros (nm) y está relacionada de acuerdo a la teoría básica de onda, o teoría ondulatoria con:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (7)$$

donde c es la velocidad de la luz en el vacío y ν es la frecuencia de una onda

El espectro electromagnético se usa para diferenciar los distintos rangos de todas las radiaciones electromagnéticas posibles de acuerdo a su longitud de onda, que tiene una frecuencia asociada y una energía fotónica (energía transportada por un único fotón). Así, el espectro

electromagnético se puede manifestar en términos de estas tres variables, que están relacionadas entre sí [13].

Dentro de sus clasificaciones el espectro electromagnético está compuesto por los rayos gamma, rayos X, ultravioleta, luz visible infrarrojo, microondas y las ondas de radio. Como se detalla en la siguiente Figura 4.1.

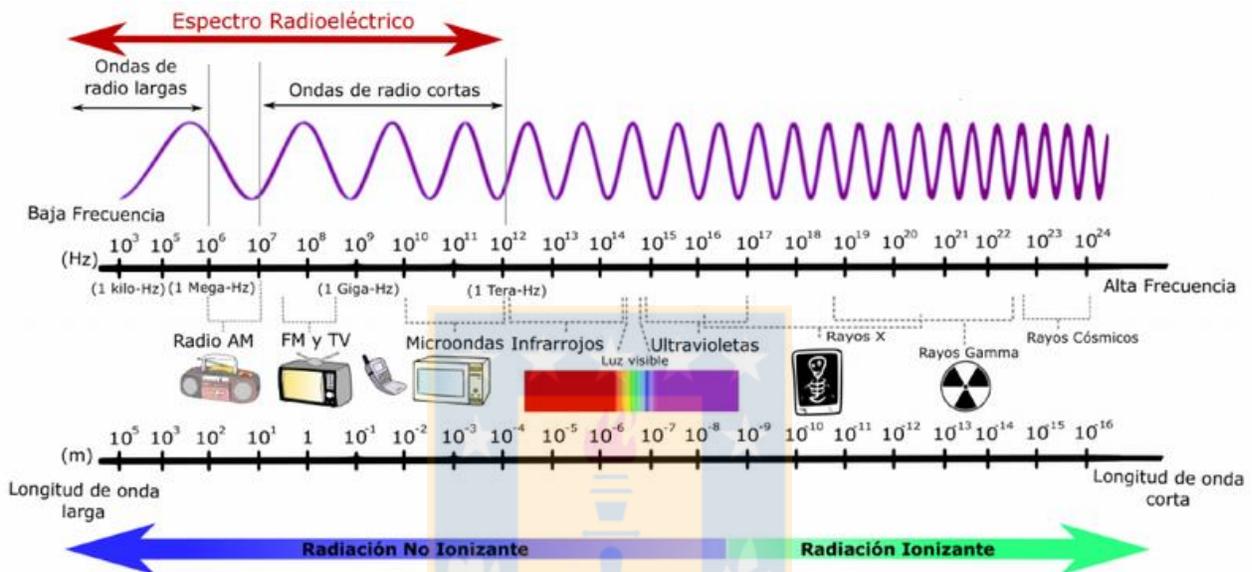


Figura 4.1. Espectro Electromagnético. [33]

4.2 Cuerpos negros

Se define como un cuerpo negro aquel que absorbe perfectamente toda la radiación que incide sobre él sin poder reflejarla, alcanzando el equilibrio térmico en su interior. En este proceso las paredes se calientan, emitiendo nuevas ondas electromagnéticas que, a su vez, rebotarán de nuevo en las paredes, teniendo una determinada energía electromagnética, emitiendo luz de manera uniforme con una temperatura constante [14].

La energía de radiación emitida por un cuerpo negro por unidad de tiempo y por unidad de área superficial, está dada por la ley de Stefan-Boltzmann [15]:

$$E(T) = \sigma T^4 \quad (8)$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de $5,670 \cdot 10^{-8} \left(\frac{W}{m^2 K^4}\right)$, E es la energía de radiación de un cuerpo negro en (W/m^2) y T es la temperatura absoluta.

La relación para el poder de emisión espectral de un cuerpo negro $E_\lambda(\lambda, T)$ fue desarrollada por Max Planck. Esta relación se conoce como la ley de Planck y se expresa como:

$$E_\lambda(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (9)$$

$$\text{Donde: } C_1 = 2\pi hc_0^2 = 3.74177 \cdot 10^8 \left(W \cdot \frac{\mu m^4}{m^2}\right)$$

$$C_2 = hc_0/k = 1.43878 \cdot 10^4 \left(\frac{\mu m}{K}\right)$$

$E_\lambda(\lambda, T)$ es la emisión espectral de un cuerpo negro en $(W/m^2 \mu m)$, la k es la constante de Boltzmann con un valor de $1.38065 \cdot 10^{-23} \left(\frac{J}{K}\right)$. Esta ecuación permite determinar la energía en una longitud de onda específica.

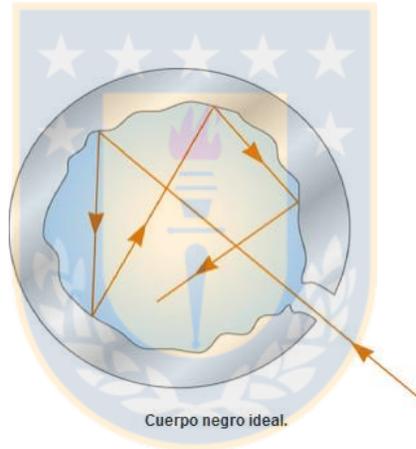


Figura 4.2. Cuerpo Negro ^[14].

4.3 Emisividad

La emisividad de una superficie es un número adimensional, y que representa la capacidad de un material de emitir energía radiante. Se puede representar como la razón entre la radiación emitida por la superficie a una temperatura dada y la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, valor que se encuentra entre un rango de 0 a 1. El valor más bajo de emisividad de un material determina el porcentaje más bajo de flujo de calor radiado de su superficie.

La emisividad de una superficie real no es constante, ya que varía con la temperatura de la superficie, así como la longitud de onda y la dirección de la radiación emitida. Es por ello que se pueden definir diferentes emisividades dependiendo de los efectos que se consideren para una superficie ^[6]. Las más destacables son:

Emisividad direccional espectral, es la principal definición de emisividad, se define como la razón entre la intensidad de la radiación emitida por la superficie a una longitud de onda específica, en una dirección específica, y la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura, a la misma longitud de onda.

$$\varepsilon(\lambda, \theta, \phi, T) = \frac{I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T)}{I_{b\lambda}(\lambda, T)} \quad (10)$$

donde toma los factores geométricos de la medida espectral representados por la dirección de la radiación (θ, ϕ) .

Emisividad de banda, indica la capacidad de la superficie de radiar energía bajo un cierto rango espectral, se define como la razón de la intensidad de radiación de la superficie radiante y de un cuerpo negro ideal a la misma temperatura y banda de longitudes de onda. Se calcula integrando la emisividad espectral direccional en dicha banda espectral y ponderado por la integral en el mismo rango de un cuerpo negro ideal.

$$\varepsilon(\lambda_1, \lambda_2, T) = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \phi, T) d\lambda}{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} I_{b\lambda}(\lambda, T) d\lambda} \quad (11)$$

4.4 Mediciones espectrales e hiperespectrales

Cada objeto refleja una combinación característica de radiaciones a distintas longitudes de onda, este comportamiento distintivo presenta respuestas espectrales que se pueden detectar usando sensores optoelectrónicos.

Las imágenes hiperespectrales o imágenes multiespectrales son adquiridas por un sensor que se compone de varios dispositivos interconectados permitiendo la adquisición de imágenes en el rango de frecuencias especificado por el hardware de adquisición. El principal módulo de una cámara hiperespectral se llama espectrómetro y en su interior tiene detectores que permiten la captura de radiación electromagnética en distintas bandas delgadas de frecuencia.

Las mediciones hiperespectrales obtienen imágenes en cientos o miles de bandas espectrales, lo que se refiere a la información que recopila y procesa, en un determinado rango del espectro electromagnético. El conjunto de estos datos forma un cubo hiperespectral que es tridimensional (x, y, λ) , visualizándose así una sección que es de dos dimensiones espaciales (x, y) y una dimensión espectral λ . Como resultado, cada píxel (considerado como un vector) recogido por un

sensor hiperespectral puede ser visto como una firma espectral o “huella digital” de los materiales subyacentes en el píxel.

En la Figura 4.3, se puede apreciar cómo opera una cámara espectral, en donde cada píxel captado por la cámara contiene un espectro continuo, que se utiliza para identificar los materiales presentes representándose como una firma espectral.

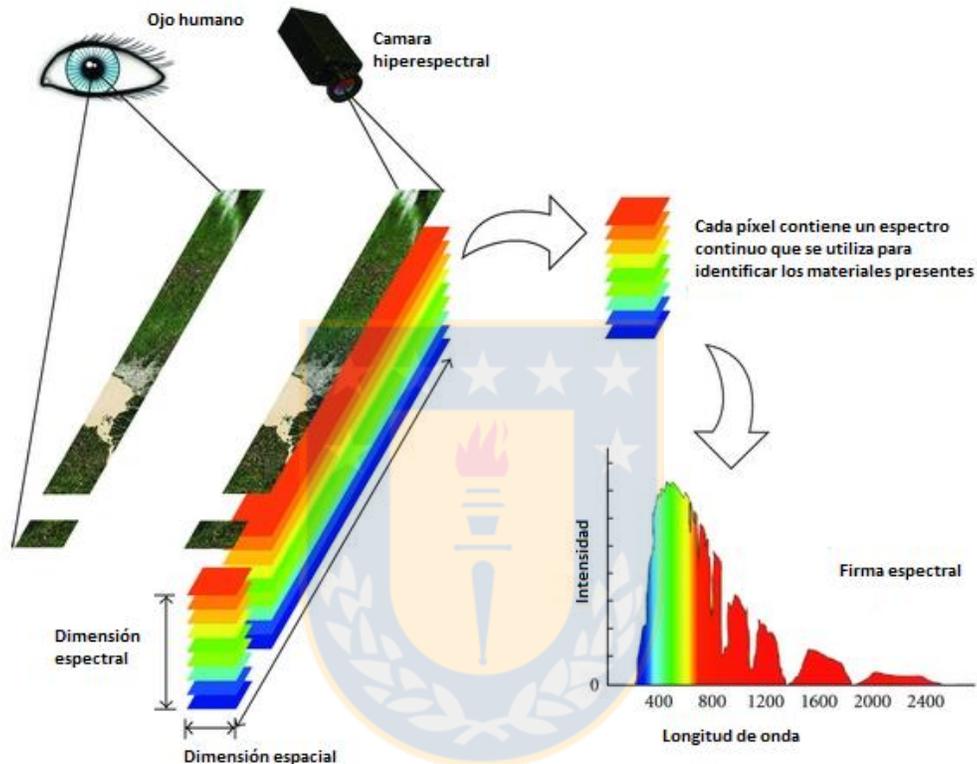


Figura 4.3. Esquema del funcionamiento de una cámara hiperespectral. [34]

Las imágenes espectrales pueden clasificarse según el número de bandas que contengan, las imágenes multiespectrales producen imágenes en unas pocas a cientos de bandas espectrales mientras que la imagen hiperespectral obtiene imágenes en cientos o incluso miles de bandas espectrales [19].

Estas imágenes están siendo utilizadas en una variedad de aplicaciones para detectar y mapear una amplia variedad de materiales, como es en la agricultura, la mineralogía, medicina, industria militar y arqueología, entre otros, abarcando un gran campo en el cual se pueden seguir observando avances tecnológicos, como se quieren obtener en la minería para el área de la pirometalurgia del cobre.

5. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y DESARROLLO DE INSTRUMENTOS ESPECTRALES UTILIZADOS EN LA SIDERURGIA

5.1 Introducción

Antiguamente en la industria con el fin de mejorar la calidad del acero un operador controlaba manualmente toda la práctica de vertido o sangrado, y los criterios sobre la escoria arrastrada en la corriente, siendo casi imposible para un observador ver directamente cualquier detalle, y mucho menos variaciones de brillo para la secuencia.

En la siderurgia se aplican muchas tecnologías para optimizar el costo de producción y mejorar la calidad del producto final. Hace aproximadamente unos 30 años se demostró que un sistema de imágenes térmicas por infrarrojos podía realizar esta medición fácilmente y proporcionar una imagen de contraste mucho más alta, a partir de la cual un observador podía tomar una decisión más certera, o sobre la cual se podía establecer un control automático de la operación. Sin embargo, el equipo de imágenes térmicas de hace 30 años no tenía la confiabilidad ni la robustez para un uso regular en las 24 horas del día y 7 días a la semana.

Actualmente es posible encontrar instrumentación comercial optoelectrónica para la detección en línea de escoria en la industria del acero, midiendo la radiación infrarroja con un filtro óptico, produciendo un video en el cual se discrimina claramente en la imagen el acero de la escoria. Asociado al equipo, existe un algoritmo especialmente diseñado para calcular el porcentaje de escoria en el acero con precisión y se genera por lo tanto la posibilidad establecer un lazo de control para poder detener el sangrado en el momento propicio, ya que el exceso de escoria impacta en la calidad del acero en la etapa de la metalurgia secundaria, acelera el desgaste de los refractarios y reduce la vida útil de los equipos. Por otro lado, la utilización de estos equipos produce un aumento en el rendimiento de producción, reduce los costos de tratamiento y el tiempo de procesamiento. La idea es extrapolar el éxito de esta tecnología optoelectrónica en la industria del acero a la pirometalurgia del cobre.

A continuación, se hará una revisión de los principales instrumentos optoelectrónicos que se ha desarrollado para la industria del acero. Se destaca la detección de hierro fundido con respecto de la escoria, así como también estudios que se han propuesto para mejorar la industria, entre otros instrumentos que ayudan también en el monitoreo y control de los estados del proceso.

5.2 Sistema de instrumentos y sensores en la industria siderúrgica

Automation Technology ^[22] es un fabricante internacionalmente conocido de sistemas de termografía y sensores 3D. Fundado, en 1998, la empresa cuenta con más de 15 años de experiencia en la entrega de componentes de visión de alta calidad y soluciones de aplicaciones, con una amplia gama de sistemas de termografía.

Para la industria siderúrgica ofrece varios productos para la automatización y monitoreo de plantas. Entre los cuales se destacan, un sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria, el monitoreo del estado de las ollas de acero, monitoreo de los carros torpedo con cámaras infrarrojas y el control de procesos en la colada continua.

5.2.1 Sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria

El sistema de detección de escoria se utiliza como una solución para evitar problemas que afecten la calidad del acero y para reducir los costos de tratamiento al minimizar el remanente de escoria durante el proceso de sangrado.

La temperatura real del acero y la escoria es relativamente alta, generalmente alrededor de 1650 °C, y están casi a la misma temperatura. Aun así, tienen diferente comportamiento radiométrico dado que sus emisividades tienen una gran diferencia en el rango de longitudes de onda entre los 8 a 14 micrones. La emisividad del acero fundido y la escoria se muestra en el gráfico de la Figura 5.1, donde se puede apreciar que la escoria tiene una emisividad más alta, incluso si están a la misma temperatura ^[27].

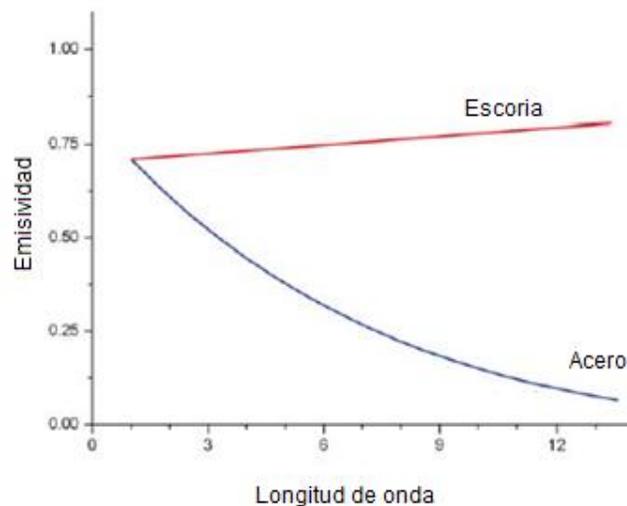


Figura 5.1. Emisividad espectral del acero y la escoria ^[27].

El sistema consta de una cámara térmica en un gabinete protector, un software de imágenes dedicado para la adquisición de datos, evaluación y control de sistemas, una base de datos para el almacenamiento de todos los datos relevantes para el proceso, una interfaz de operador fácil de usar en la web y dispositivos para indicar el estado del sistema.

Durante el proceso de sangrado, la cámara monitorea la corriente vertida. Debido a las diferentes propiedades de radiación del metal líquido y la escoria, la cámara puede distinguir con precisión entre estas dos fases, permitiendo un cálculo preciso de la transferencia de escoria evaluando la imagen térmica en tiempo real. El contenido aceptable de escoria puede preconfigurarse en el software. Tan pronto como se alcance este umbral, se activa una alarma para detener el sangrado, mostrándose todos los datos importantes continuamente en una interfaz organizada como se puede ver en la Figura 5.2. Esto incluye la imagen térmica en vivo, el arrastre de escoria frente al tiempo de sangrado, el umbral de alarma preestablecido para el contenido de escoria y el estado de la alarma, incluyendo también una potente base de datos para almacenar automáticamente las imágenes térmicas, el contenido de escoria medido en función del tiempo que alcanza a medir la cámara y los parámetros del proceso, permitiendo un extenso análisis posterior al sangrado.



Figura 5.2. Información del sangrado cuando el contenido de escoria es muy bajo y cuando excede el umbral, activando la alarma. [22]

Para un funcionamiento más confiable, la cámara térmica está protegida por una carcasa robusta. La carcasa se enfría con agua, mientras que la ventana de protección en la parte frontal de la caja se mantiene libre de contaminación mediante el uso de una barrera de aire. Las cámaras que se utilizan en este sistema están diseñadas para aplicaciones industriales, con funciones de

procesamiento inteligentes y una interfaz estándar para el intercambio de datos. Las características de la cámara se presentan en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1. Características de la cámara IRSX-I infrarroja industrial [22].

| Tipo | IRSX-I cámara infrarroja industrial | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|-----------|
| Rango de medición de temperatura | -40 a 2000 °C | |
| Exactitud de medición de temperatura | ±2°C a ±2% de lectura | |
| Rango espectral | 7,5 a 13 μm | |
| Resolución térmica | 0,1 °C | |
| Píxeles de imagen | 335 x 256 | 640 x 512 |

En la Figura 5.3 se puede apreciar el sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria, donde se destaca la cámara térmica en una caja protectora para el control del sangrado, una computadora con un software para el procesamiento en tiempo real de imágenes, administración de datos y visualización de datos de sangrado, el indicador del estado de la alarma y la señal de luz.

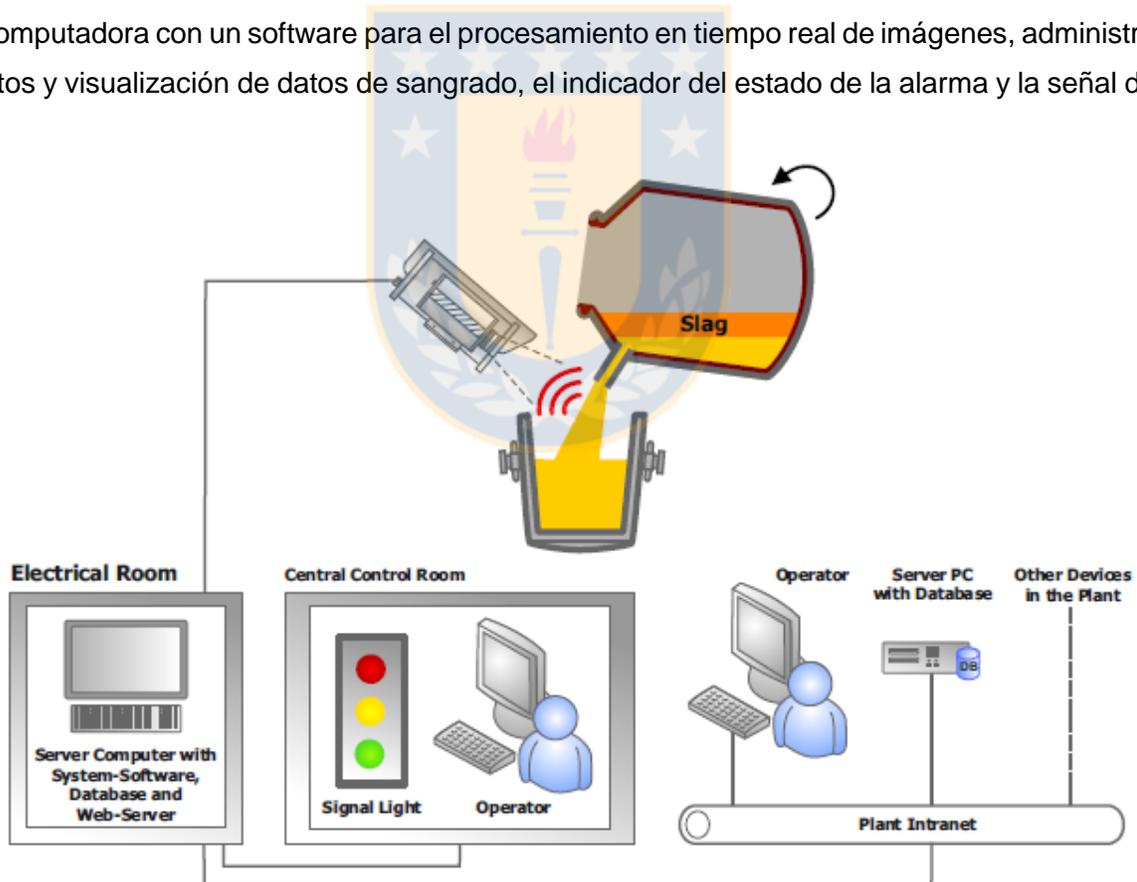


Figura 5.3. Esquema del sistema de imágenes térmicas para la detección de escoria. [22]

Las principales ventajas de este sistema para la siderurgia son:

- Evita problemas que impactan en la calidad del acero.
- Mayor rendimiento de producción.
- Reducción de los costos de tratamiento.
- Reducción del Tiempo de procesamiento.

5.2.2 Monitoreo del estado de la mampostería de ollas en la producción de acero

El sistema de monitoreo del refractario sirve como una solución clave para aumentar la seguridad en la fabricación de acero y para respaldar los cronogramas de mantenimiento de las ollas, esto minimiza el riesgo de rupturas del revestimiento con acero líquido al tiempo que maximiza la vida útil del refractario. Este sistema de monitoreo está diseñado para prevenir de manera efectiva las zonas calientes (hotspot), al monitorear continuamente las ollas durante la producción, las áreas con defectos o agotamientos en el revestimiento se detectan automáticamente mucho antes de que se vuelvan críticas.

También ayuda a reducir los costos de producción extendiendo la vida útil del refractario. Cada vez que entra en contacto con el metal líquido, su condición se deteriora hasta que finalmente se debe volver a revestir. En general, el cronograma de mantenimiento del refractario se determina con base en la experiencia y por razones de seguridad, los intervalos de tiempo suelen ser bastante moderados.

Este sistema funciona de manera que las ollas mientras son transportadas por la grúa aérea, varias cámaras termográficas miden automáticamente la distribución de temperatura en su superficie externa, como se puede ver en la Figura 5.4. Las mediciones se realizan en pleno movimiento sin necesidad de detener la grúa. Debido al concepto modular, una estación de inspección puede incluir un número variable de cámaras para cubrir la superficie exterior completa del cucharón, incluida también la parte inferior, requiriendo generalmente de 4 a 5 cámaras.

En la Figura 5.4 se puede apreciar un esquema del monitoreo de las ollas de acero que cuenta con 5 cámaras IR en recintos refrigerados por aire para controlar la superficie exterior completa de las ollas, servidor con base de datos y servidor web, luz de señal para indicar el estado de la olla al operador de la grúa y una computadora en la cabina de la grúa para la visualización de los detalles sobre la medición actual.

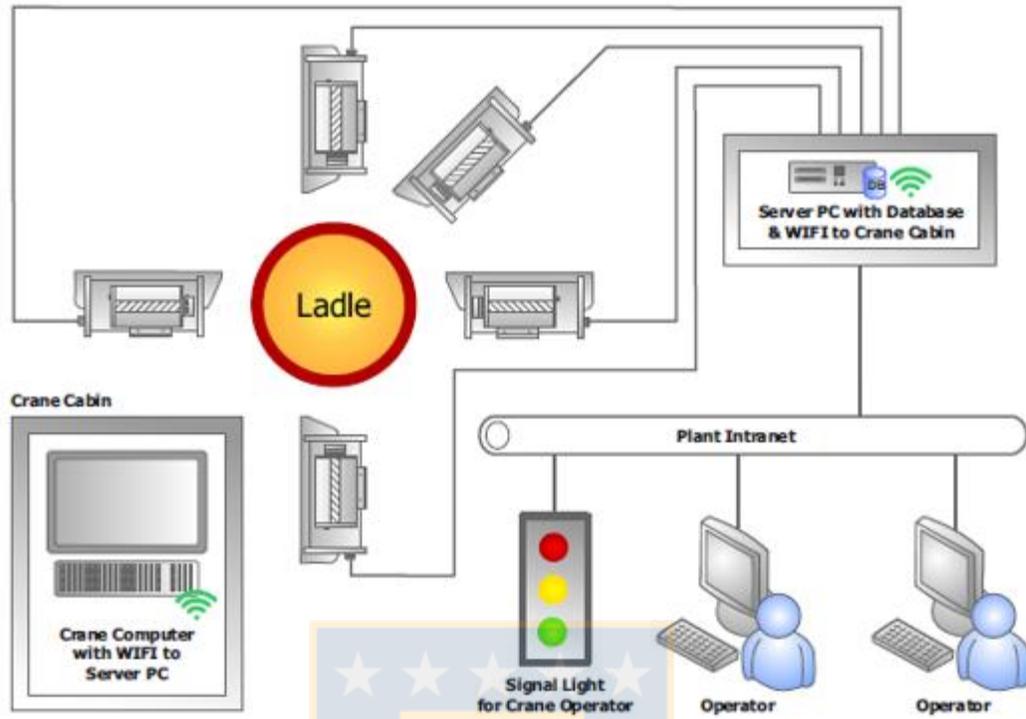


Figura 5.4. Esquema del monitoreo del estado de las ollas de acero. ^[22]

Una vez que se realiza una medición, los datos térmicos se analizan y el estado de la olla se indica al operador de la grúa. Todas las imágenes térmicas, los datos de temperatura y los datos relacionados con el proceso se almacenan en una base de datos que permite el análisis del estado del refractario.

Las principales ventajas de este sistema para la siderurgia son:

- La prevención de zonas calientes de acero líquido.
- Identificación temprana de áreas con mayor desgaste.
- Maximización de la vida útil del revestimiento refractario sin riesgos de seguridad y minimizando costos.
- Tiempos y estrategia de mantenimiento refractario optimizado.
- Mayor seguridad para la producción de acero.

Las zonas críticas se pueden observar en la Figura 5.5, distinguiéndose con un color rojizo las áreas más problemáticas del refractario, requiriendo ser reparadas posteriormente.



Figura 5.5. Colores que resaltan áreas problemáticas en las imágenes térmicas. [22]

A diferencia de las cámaras ocupadas en el sistema anterior (Tabla 5.1), la que se utiliza estos sistemas esta calibrada con un rango de hasta 600 °C (al igual que los siguientes sistemas).

Todo este sistema está diseñado para un funcionamiento confiable 24/7 en el agresivo entorno de una planta siderúrgica. Las funciones de autodiagnóstico integradas supervisan continuamente todos los componentes, cualquier posible deterioro funcional se detectará e indicará de inmediato. Todos los estados del sistema se muestran y almacenan en un archivo de registro en la base de datos que otorga un rastreo completo. Con sus funciones inteligentes de reconfiguración, el sistema puede eliminar la mayoría de los errores de funcionamiento sin intervención del usuario.

5.2.3 Monitoreo de carros torpedos con cámaras infrarrojas

Los desprendimientos de metal líquido desde un carro torpedo producto de un revestimiento defectuoso son un peligro común en la producción de acero. Las consecuencias son bien conocidas, entre las cuales destacan: los daños del equipo circundante, los altos costos de reparación y la pérdida de ingresos debido a los retrasos en la producción. Además de este impacto económico siempre existe un alto riesgo de lesiones en el personal o incluso la pérdida de vidas. Cada vez que la mampostería del carro torpedo entra en contacto con el metal líquido, su condición se deteriora hasta que finalmente el carro debe ser revestido.

El monitoreo de los carros torpedos está diseñado para prevenir de manera efectiva las explosiones en caliente al monitorear continuamente los carros durante la operación. De esta manera, las áreas con defectos o agotamientos en el refractario se detectan automáticamente

mucho antes de que se vuelvan críticas, ayudando también a reducir los costos de producción al extender la vida útil del refractario.

Este sistema consta de cámaras infrarrojas, de iguales características que las que utiliza el sistema anterior (IRSX-I cámara infrarroja industrial, ver apartado 5.2.2) para cubrir la superficie exterior completa de los carros, un software de imágenes IR para la adquisición de datos y un control del sistema, una base de datos para el almacenamiento de todos los datos medidos, una interfaz fácil de usar en la web y dispositivos para indicar el estado del torpedo inspeccionado.

En la Figura 5.6 se puede apreciar el esquema del monitoreo de los carros torpedos que cuenta con 2 cámaras infrarrojas en gabinetes protectores para monitorear la superficie externa completa, RFID (Radio Frequency Identification) o cámara visual para el reconocimiento automático del identificador del carro torpedo, el servidor con el software de monitoreo, base de datos y servidor web, indicador para mostrar el estado del torpedo y el módulo de salida digital con luz de señal.

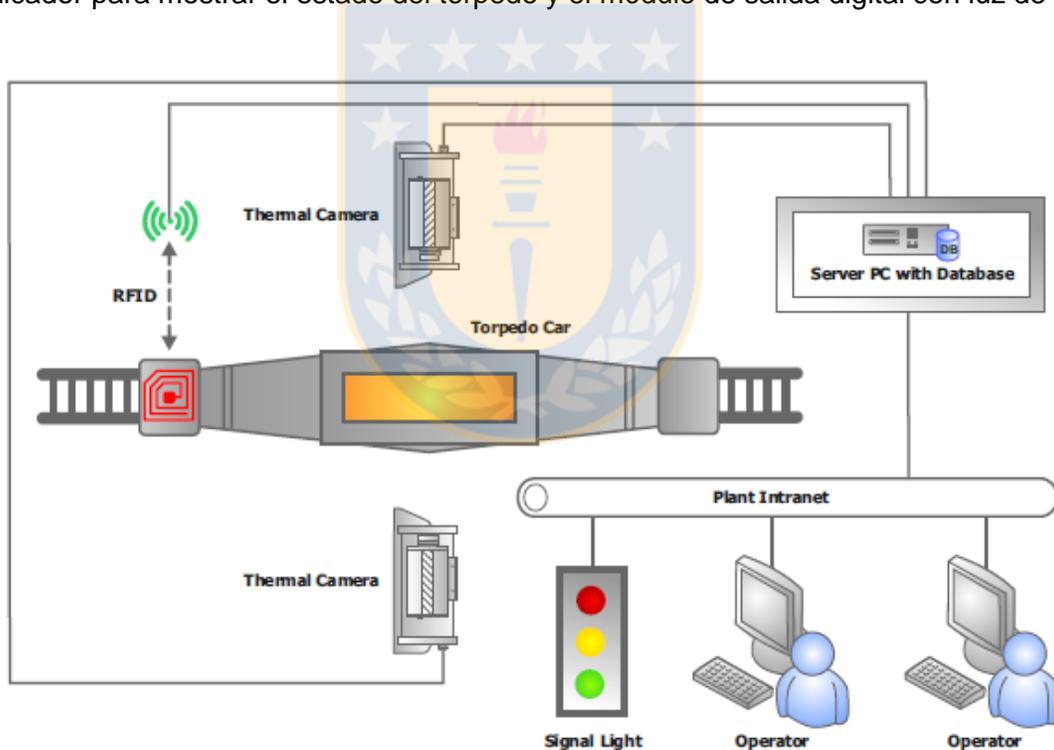


Figura 5.6. Esquema del monitoreo de carros torpedos con cámaras infrarrojas. ^[22]

La temperatura superficial externa del torpedo es un indicador confiable de la condición de su revestimiento, por lo tanto, las cámaras infrarrojas son la solución perfecta para un monitoreo sin contacto del material durante la operación.

Una vez que se realiza una medición de temperatura, se analizan los datos térmicos y se muestra el estado del carro a través de la interfaz web del sistema. Todas las imágenes térmicas, la información de temperatura y otros datos relacionados con el proceso se almacenan en una base de datos del sistema, lo que permite realizar análisis específicos sobre el estado del refractario.

Las principales ventajas de este sistema para la siderurgia son:

- Mayor seguridad en el transporte.
- Prevención de zonas calientes de metal líquido.
- Identificación temprana de áreas con mayor desgaste.
- Maximización de la vida útil del revestimiento refractario sin riesgos de seguridad y ahorro de costos.
- Planificación optimizada de mantenimiento refractario.

5.2.4 Control de procesos en la colada continua

Los sistemas de termografía para el control del proceso de colada continua optimizan no solo la calidad del producto, sino también el consumo de energía de la acería. Por lo tanto, las cámaras IR supervisan los procesos de conformado y enfriamiento de piezas fundidas continuas. Las imágenes térmicas capturadas se transmiten a un software de evaluación que analiza el flujo de calor mediante los datos de la imagen e inicia automáticamente cualquier ajuste que pueda ser necesario. Este sistema asegura de esa manera un enfriamiento uniforme que contribuye de manera clave a mejorar la calidad de los productos del acero. Este consta de cámaras IR, de iguales características que las que utilizan los sistemas presentados anteriormente (IRSX-I cámara infrarroja industrial).

En la Figura 5.7 se puede apreciar el esquema del monitoreo de la colada continua, que posee una cámara IR en una caja protectora, el servidor con el software de monitoreo, base de datos y servidor web, indicador para mostrar el estado y un controlador lógico programable (PLC) como señal de salida.

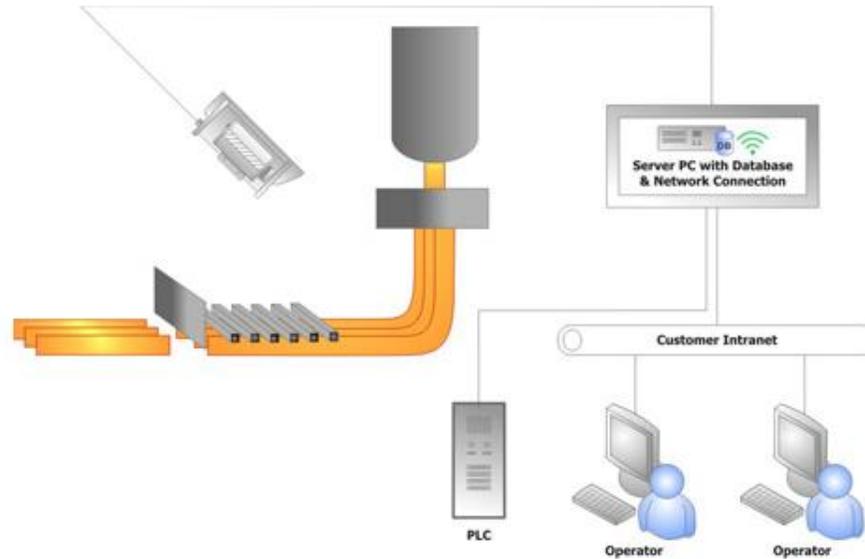


Figura 5.7. Esquema del control de procesos en la colada continua. [22]

Las principales ventajas de este sistema para la siderurgia son:

- Permite controlar la calidad del acero.
- Mayor rendimiento de producción.
- Reducción de los costos de tratamiento.

5.3 Estimación del contenido de FeO en la escoria de acero utilizando imágenes infrarrojas y redes neuronales

El contenido de FeO en la escoria es una de las variables a controlar en la producción de acero más importantes, ya que afecta a la sobreoxidación y la calidad del producto. A partir de esto, el conocimiento de su concentración en la escoria justo después del proceso de descarga hace posible ajustar el proceso tecnológico para alcanzar los parámetros objetivos del acero. Hoy en día, en la mayoría de los métodos de estimación del contenido de FeO se debe insertar una sonda en la olla para tomar una muestra de la escoria y analizarla. Además, la alta precisión se logra solo por análisis de laboratorio, el cual consume mucho tiempo.

R. Strąkowskia et al. propusieron utilizar las mediciones de radiación no sólo para detener el proceso de descarga, sino también para las mediciones cuantitativas de los parámetros de la escoria, principalmente la concentración de FeO [23]. Existen dos problemas asociados a las

mediciones de la concentración de FeO en la escoria. El primero es producto de la atmosfera alrededor de la colada que interviene con la radiación emitida por la escoria, lo cual puede producir una lectura errónea de las intensidades. El segundo es el flujo durante la descarga, que no es uniforme y tampoco estable. En consecuencia, el estudio presenta un nuevo método para la estimación rápida y sin contacto de la concentración de óxido de hierro en la escoria durante el proceso de descarga.

Las imágenes IR y la red neuronal artificial son las herramientas claves utilizadas en esta investigación, donde se diseñó un sistema multispectral y se propuso un análisis estadístico multivariable que utiliza los parámetros de radiación de acero y la escoria en diversos rangos espectrales. La red neuronal artificial se utilizó como una herramienta de regresión que estima el contenido de FeO en función de los parámetros de radiación calculados, permitiendo la medición sin contacto. Los resultados de la estimación podrían obtenerse inmediatamente después del final de la descarga. Esta información es de gran ayuda para el control del proceso, aportando una ventaja adicional en la fabricación del acero. La eficacia de la técnica propuesta fue verificada utilizando los resultados de análisis químicos.

Los óxidos más importantes que componen la escoria siderúrgica son CaO , SiO_2 , MgO , Al_2O_3 , FeO , MnO , P_2O_5 , Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , TiO_2 , Na_2O , K_2O y además compuestos no oxidados como CaF_2 , CaS , CaC_2 se consideran también importantes.

En general, de todos los compuestos de la escoria, el contenido de FeO es uno de los más trascendentes, por lo que el conocimiento de dicho parámetro facilita la aplicación de procedimientos tecnológicos adecuados y mejora del proceso de producción. El valor de este parámetro se modifica intencionalmente durante la fusión del acero, ya que en las diversas etapas de producción se persiguen varios objetivos, requiriendo una interacción diversa de la escoria y el acero. Por ejemplo, la presencia de FeO en la escoria facilita la desfosforización del acero, además, su contenido representa la cal disuelta en la escoria y, por lo tanto, acelera los procesos de su formación, logrando también una mayor basicidad.

Se asume generalmente que la escoria durante el tratamiento en olla no debe contener más de 1.5% - 2% de $(FeO + MnO)$ (el tratamiento en la olla por lo general se equilibra con MnO), y algunas veces los requisitos son aún más estrictos. El bajo contenido deseado de estos óxidos en la escoria proviene de las condiciones requeridas en la desoxidación y desulfuración del acero.

5.3.1. Sistema de imágenes multispectrales basado en imágenes infrarrojas

En la primera etapa de la investigación se elaboró la configuración de la posición para la medición, que tuvo en cuenta las condiciones específicas de la acería elegida. Durante la selección de la ubicación óptima del sistema, se tuvieron en cuenta muchas condiciones, primero una distancia segura del BOF y segundo una vista ininterrumpida de todo el proceso de descarga del material al cucharón. Considerando todos los aspectos técnicos, ubicaron el sistema en la plataforma de procesamiento posterior al horno. El sistema con las cámaras se colocó frente al convertidor, al nivel que proporciona una vista directa de la corriente de descarga, como se muestra en la Figura 5.8 y 5.9.

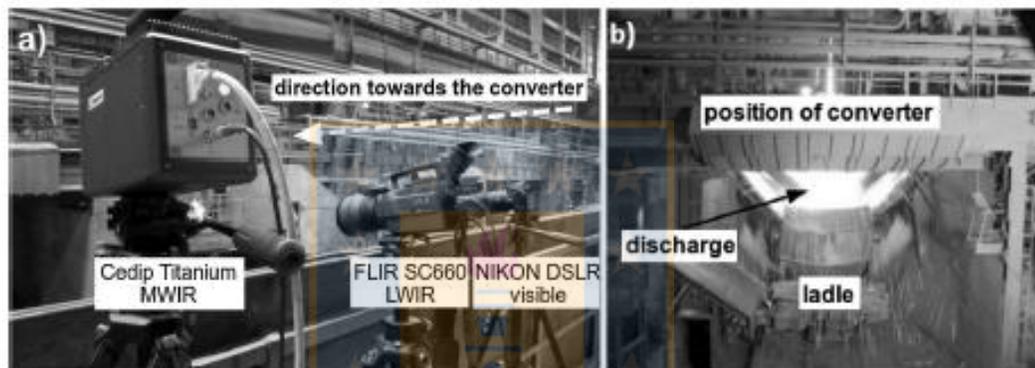


Figura 5.8. La parte del soporte de medición (a) con el sistema de cámaras y la vista en el cucharón (b) durante el proceso de descarga de acero. [23]

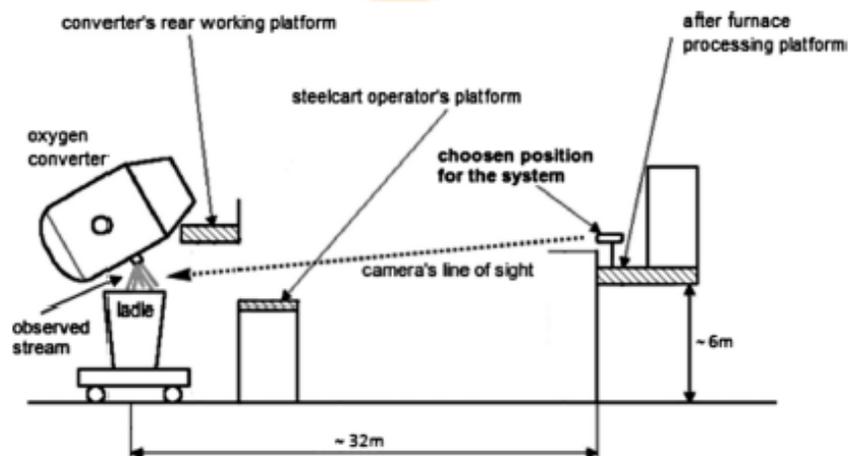


Figura 5.9. Diseño esquemático de la ubicación del sistema durante las mediciones en la acería. [23]

El sistema radiométrico para la estimación del contenido de FeO en la escoria de acero incluye tres cámaras:

- Cámara térmica sin enfriamiento, de longitud de onda larga FLIR® SC660 sensible al rango infrarrojo espectral $\Delta\lambda_1$ (7,5 – 13 μm , LWIR),
- Cámara térmica refrigerada de longitud media de onda CEDIP® Titanio sensible al rango infrarrojo espectral $\Delta\lambda_2$ (3 – 5 μm). Para la investigación, fue necesario utilizar un filtro adicional debido a la temperatura muy alta del acero y la escoria. Este filtro de paso de banda estrecho con una longitud de onda central $\lambda_c = 4 \mu m$ era para evitar la saturación del detector de la cámara.
- Cámara réflex digital de objetivo único (DSLR) Nikon D5100 con objetivo Nikkor de 55 - 330 mm , sensible al rango espectral de la luz visible $\Delta\lambda_3$ (380 - 740 nm). De hecho, la matriz CMOS de esta cámara contiene filtros rojos, verdes y azules separados formados en la matriz de Bayer. Por este hecho, fue posible adquirir tres imágenes independientes, por separado para cada componente de color.

Utilizando las cámaras mencionadas, los autores llevaron a cabo 43 mediciones radiométricas, donde una medición corresponde a una única descarga del convertidor. Las cámaras se voltearon hacia el convertidor para observar la descarga. Durante cada medición se registró la secuencia de imágenes, esto se hizo simultáneamente para todas las cámaras en diferentes canales espectrales. El objetivo de cada adquisición era registrar la fase final de la descarga cuando el flujo de acero cambia a escoria y el proceso se detiene. Finalmente, el flujo de estos dos componentes se registró en un período de tiempo de más de 12 segundos. Para cada descarga monitoreada, se tomó una muestra de escoria para realizar un análisis químico de referencia para el contenido de FeO .

5.3.2 Redes neuronales artificiales regresivas para la estimación del contenido de FeO

Para resolver el problema de la estimación del contenido de FeO en la escoria, es necesario aproximar la función de muchas variables. Esta función no lineal tiene la forma $x = f(Y)$, donde x es el contenido de FeO estimado e Y representa el conjunto (vector) de parámetros de radiación que describen la descarga. Para encontrar la solución a este problema, los autores decidieron aplicar y probar el enfoque de red neuronal de regresión.

Las redes neuronales artificiales se usan comúnmente en muchos dominios de la ciencia y la tecnología, por ejemplo: regulación de procesos tecnológicos, análisis bursátil, procesamiento de

señales e imágenes, criptografía, biomedicina, estimación de procesos complejos, sistemas integrados y circuitos integrados.

5.3.3 Resultados de la investigación

Los resultados finales presentados en el documento confirman la posibilidad de estimar los parámetros físicos del material medido mediante el análisis de la distribución de los parámetros de radiación, que se calculan a partir de los datos del espectro IR. Lo dicho anterior es el logro científico más importante descrito en el documento. El método presentado utiliza la medición de la radiación IR, en varios rangos espectrales, que es emitida por el material observado. Los cambios de intensidad de radiación y distribución en el tiempo se miden registrando la secuencia de imágenes del flujo de acero y escoria durante la descarga del convertidor, así los datos adquiridos se procesan para evaluar la concentración de FeO en la escoria de acero.

El algoritmo de procesamiento de datos desarrollado podría dividirse en dos fases principales:

- El cálculo de los parámetros de radiación del flujo de escoria, su selección y uso como datos de entrada para la estructura de redes neuronales artificiales.
- El uso de los conjuntos de redes neuronales artificiales para la estimación del contenido de FeO en la escoria.

Los autores de esta investigación presentaron una nueva metodología para el cálculo de los parámetros de radiación estadísticos a partir de la secuencia de imágenes adquiridas durante la descarga de acero desde el BOF a la olla, realizando un análisis de precisión para evaluar la utilidad de diferentes configuraciones de redes neuronales artificiales y parámetros relacionados con su entrenamiento. Los parámetros de radiación que más se correlacionan con la variable estimada y la estructura óptima de redes neuronales artificiales se determinaron para el conjunto de datos dado. Eventualmente, los autores confirmaron que la combinación de diferentes rangos espectrales (MWIR, LWIR) es útil para este propósito ^[23].

Como resultado, el sistema propuesto ha logrado la precisión de la estimación del contenido de FeO con el nivel de error promedio de 1,64 puntos porcentuales. Los resultados presentados poseen la precisión suficiente y confirman la capacidad del sistema numérico desarrollado y las posibilidades para su futura aplicación. Además, el esquema de medición presentado garantiza el método de estimación sin contacto y seguro mediante el uso de las redes neuronales artificiales,

funcionando en tiempo real dando los resultados finales justo después de que la medición haya finalizado. Los autores creen que el enfoque presentado para estimar los parámetros físicos del material a partir de los valores de los parámetros de radiación es consistente, por lo tanto, existe una gran posibilidad de que pueda ser adaptado y utilizado en diferentes áreas de la industria, no sólo en la metalurgia.

5.4 Técnicas que detectan el momento óptimo para detener el sangrado del BF

En este estudio ^[8] se describen dos sistemas que pueden actuar simultáneamente, para asesorar al operador de la planta con el fin de advertirle sobre cuándo se debe cerrar el orificio del sangrado del BF. Uno de ellos se basa en el procesamiento de las señales de la sonda EMF, que miden la fuerza electromotriz entre dos puntos de la coraza del alto horno. Estas sondas están soldadas a la carcasa del BF en estudio y se encuentran en la parte superior y debajo de la sangría. El segundo sistema utiliza el tratamiento de imágenes de arrabio y escoria que salen del orificio del sangrado pudiendo identificar y distinguir cada una de las fases. Este sistema se basa en el tratamiento de imágenes digitales obtenidas durante un proceso completo de sangrado con una cámara de video comercial de 10 megapíxeles, usándolo como un desarrollo específico para aplicarlo en el entorno industrial. La acción de estos sistemas es en paralelo en todo momento.

5.4.1 Tratamiento digital de imágenes durante el sangrado del BF

En una primera parte, el sangrado del BF fue grabado durante todo el tiempo que dura esta operación y se obtuvo un video en formato MPEG. La secuencia del video MPEG resultante se convirtió a una serie de imágenes en color con formato JPEG con 8 bits de profundidad, para evitar el humo y los vapores en la escena, estas imágenes fueron promediadas en el tiempo. El tiempo promediado más adecuado para estas condiciones fue de 10 segundos, es decir, 250 cuadros de video, este procedimiento actuó como un filtro de humo. La región de interés, que contiene el flujo de metal fundido y la escoria circundante, se seleccionó para realizar un adecuado algoritmo de procesamiento de imágenes.

Es importante señalar que para este tratamiento se ha considerado muy apropiado el tamaño de las imágenes seleccionadas (1200 x 1024 píxeles); no sólo las regiones más pequeñas se procesan con mayor rapidez, sino que la segmentación del histograma mejora, ya que se consideran menos áreas homogéneas de la imagen.

El arrabio, la escoria y el vapor circundantes tienen diferentes temperaturas y emisividades, por lo que se pueden identificar a partir de su color de temperatura. De las imágenes filtradas se

identifica la corriente de escoria fundida y el arrabio en cinco zonas, desde la más interna, que es correspondiente a arrabio a 1450 °C, la cual se identifica por un color casi blanco y la más externa, que posee un color rojo anaranjado que es el color que caracteriza a la escoria pura. Las regiones de escoria y metal fundido en la imagen se han segmentado utilizando un algoritmo en función del intervalo de las temperaturas umbrales, estas se calcularon utilizando un método no paramétrico basado en el histograma, lo cual hace que el algoritmo sea menos sensible a las configuraciones particulares de color de la cámara de video.

5.4.2 Resultados de la investigación

Ambos sistemas (basado en EMF y en análisis de video) deben detectar prácticamente lo mismo, que es identificar el momento en que se debe cerrar el orificio del sangrado. Como ambas señales se procesan por separado, no es necesario obtener el resultado al mismo tiempo para informar al operador de la planta. La utilización de ambos sistemas proporciona una garantía y una razón para tener dos sistemas en lugar de uno solo.

Durante el sangrado, se grafica con la información calculada y reportada para presentar la evolución del proceso, que es la base de un sistema de advertencia para el operador de la planta, indicando las diferentes fases de sangrado y cuando se debe finalizar.

6. POTENCIAL IMPACTO EN LA PIROMETALURGIA DEL COBRE

6.1 Introducción

La evolución de la investigación fundamental en torno a la caracterización espectral y el desarrollo de instrumentación para procesos de producción primaria en la pirometalurgia no ferrosa, específicamente en la del cobre, no ha tenido un cambio sustancial. El tema sigue siendo marginal en cuanto al interés y prioridad de investigación de aspectos fundamentales que permitirían el desarrollo de instrumentos que responden a los desafíos tecnológicos para la optimización, incluso modernización de las operaciones de esta industria.

En los procesos que involucran la combustión de partículas suspendidas en una corriente gaseosa o para las fases fundidas que participan en el proceso productivo (escoria, ejes, metal blanco y cobre blíster) a altas temperaturas, emiten radiación electromagnética por todo el rango del espectro tanto las partículas, como los compuestos presentes. Los instrumentos optoelectrónicos se basan en la detección de esta radiación electromagnética emitida por un objeto a distintas longitudes de onda contando con calibraciones basadas en modelos de radiación de cuerpos negros por la ley de Planck, relacionando la intensidad de emisión de un cuerpo negro a la temperatura absoluta para cada longitud de onda.

La oxidación de sulfuros como es un proceso complejo que involucra productos gaseosos y especies intermedias a altas temperaturas las cuales poseen espectros de emisión y absorción. Esta información espectral podría usarse para el monitoreo en línea de los reactores pirometalúrgicos si los sensores apropiados estuvieran disponibles. En forma específica, en este documento, se busca desarrollar conceptualmente instrumentos que identifiquen y discriminen en forma espacial y temporal las diferentes fases fundidas del proceso como también lo que ocurre dentro de los reactores a partir de mediciones optoelectrónicas. La medición en línea permitiría un mayor control del proceso, logrando tomar decisiones oportunas sobre las diferentes operaciones con el fin de estabilizarlas, disminuyendo su variabilidad. Este procedimiento tendría incluso el potencial de automatizar las diferentes etapas.

En este capítulo se verá el posible impacto que podría tener la aplicación de técnicas espectrales e hiperespectrales en la pirometalurgia del cobre, específicamente para tres casos. El primero de ellos estará relacionado al posible monitoreo del horno de fusión flash, el cual aún no se ha podido monitorear y medir la estabilidad de la llama, lo que provoca uno de los principales problemas de este tipo de tecnología, que es el arrastre de polvo o material particulado a través del shaft de gases, los cuales crean acreciones en la caldera recuperadora de calor.

Otro caso es la medición en línea de la composición química de las fases generadas, que podría ayudar a controlar automáticamente el coeficiente de oxígeno. En la actualidad no se tiene un control que ajuste este coeficiente, influyendo directamente en el proceso, ya que esta variable está relacionada a la ocurrencia de sobreoxidaciones o suboxidaciones al interior de los diferentes hornos. La etapa de conversión es la que se ve más afectada por esta condición, puesto que necesita mantener una mayor estabilidad en la inyección de oxígeno.

El último caso es poder monitorear el sangrado/basculado de las diferentes etapas, discriminando las distintas fases que se tienen dentro de los reactores mediante sistemas optoelectrónicos. Como se vio anteriormente (apartado 5.1) esta tecnología se utiliza bastante en el área de la siderurgia y considerando que el sangrado de fases líquidas es algo similar a lo que ocurre en las fundiciones de cobre, se puede inferir el gran impacto que podría tener el uso de tecnología en el control de esta operación. Para poder discriminar las fases se pueden ocupar cámaras hiperespectrales, que con un conjunto de imágenes recopiladas pueden obtener información a lo largo de un gran rango del espectro electromagnético y si resulta que las diferentes fases fundidas que se obtienen en los hornos pirometalúrgicos de cobre poseen diferentes espectros de emisión, la discriminación de fases podría ser efectiva.

Finalmente, para los tres casos se busca poder controlar y monitorear de manera más precisa las operaciones involucradas en una fundición de cobre, para las que hasta el día de hoy no existen aplicaciones industriales de sistemas optoelectrónicos capaces de aportar en el control de los procesos. Todo lo anterior podría tener un impacto directo en la recuperación metalúrgica como beneficio cuantitativo, ya que estaría directamente relacionado a disminuir las pérdidas de cobre en las fundiciones, como también beneficios cualitativos (“*operating time*”) en los hornos.

6.2 Monitoreo en línea del HFF

Los HFF se basan en la combustión de las partículas de concentrado en suspensión en altas torres de reacción, por sobre la zona de baño. No se emplean combustibles fósiles, pues todo el calor necesario para fundir proviene de la oxidación del Fe y S , contenidos en el concentrado, el cual se comporta como un combustible capaz de formar una llama cuando se mezcla con aire precalentado y/o enriquecido con oxígeno que actúa como comburente sin necesidad de energía externa adicional, convirtiendo el proceso en un sistema totalmente autógeno. En el desarrollo de esta llama, a medida que la suspensión sólido-gas sale del quemador de concentrados y fluye hacia abajo gravitacionalmente por la torre de reacción, las partículas sólidas se calientan hasta que alcanzan la temperatura de ignición y comienzan a reaccionar. Luego, éstas se oxidan,

convirtiéndose en pequeñas gotas fundidas las cuales están formadas principalmente por una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre, sulfuros y óxidos de hierro, sílice y ganga.

La llama es el corazón del HFF, su estabilidad es muy importante para el proceso y es algo que aún no se ha podido monitorear. Uno de los problemas que ocurren producto del poco control que se tiene sobre la llama es el arrastre de polvos. El gas de combustión del horno siempre contiene polvo arrastrado, que debe ser eliminado de los gases de salida antes de que ingrese a la planta de ácido sulfúrico, de lo contrario, ensuciará el catalizador de la planta de ácido y contaminará el ácido sulfúrico que se obtiene como producto. Además, el polvo posee un contenido de cobre considerable, entre un 25 – 30 %, que se puede volver a recuperar ^[10].

La formación de polvos es debido a múltiples factores, uno de ellos es debido a la distancia que se origina entre la llama que se forma en la zona de reacción y el quemador del horno como se puede apreciar en la Figura 6.1. A mayor distancia, se formará una mayor cantidad de polvos, produciéndose una fracción de concentrado que no combustiónará, como se puede apreciar a la derecha de la figura. Esto produce acreciones en el marco de la caldera, aumentando el tiempo de detención del proceso.

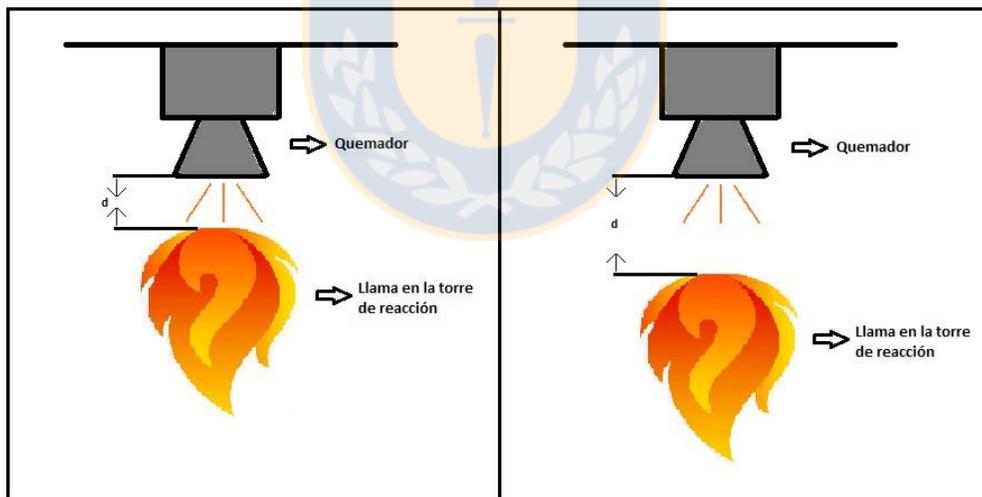


Figura 6.1. Representación del quemador con respecto de la llama a diferentes distancias.

Por otro lado, no todas las partículas se dispersan como partículas individuales en el quemador y, por lo tanto, los grupos o aglomerados de partículas entran a la zona de reacción. Estos tienen una proporción de volumen de superficie mucho más reducida en comparación con los granos más pequeños y tardan más en calentarse, provocando que algunos más grandes no tengan tiempo para alcanzar la ignición antes de entrar al baño fundido en la zona de reacción.

Desde el punto de vista operativo, existe pruebas que determinan que la cantidad de polvo que se desprende del HFF depende de la cantidad de gases de salida que se desprenden del horno. Esto indica que la evolución del polvo por tonelada de concentrado será mínima cuando la producción de gas residual por tonelada de concentrado sea mínima ^[24]. De lo anterior se desprende que una llama inestable puede dar lugar a un descontrol de la temperatura.

Los polvos generados en los HFF consisten principalmente de óxidos, por ejemplo: Cu_2O y Fe_3O_4 . Sin embargo, estos óxidos se sulfatan durante el enfriamiento en el sistema de gases de escape para formar, por ejemplo, $CuSO_4$ y $Fe_2(SO_4)_3$. Los polvos se recogen y se reciclan en esta forma sulfatada.

En la zona de reacción existe una cinética de combustión muy rápida, con una alta temperatura de llama. Consecuentemente, la inestabilidad de la llama difícilmente puede evitarse. El monitoreo de su estabilidad en línea y su temperatura, disminuiría un porcentaje de los polvos que se producen en el HFF por medio de instrumentación optoelectrónica. Existen estudios sobre el monitoreo de la estabilidad y caracterización de las llamas de combustión (carbón principalmente), que podrían resultar exitosos.

En la Figura 6.2 se puede ver un esquema de cómo podría ser el monitoreo en línea del HFF, por medio de un sistema que consta de una sonda óptica, una unidad de división de haz, un detector de fotos, una placa de procesamiento de señales, una cámara digital y una placa base con un software de aplicación asociado.

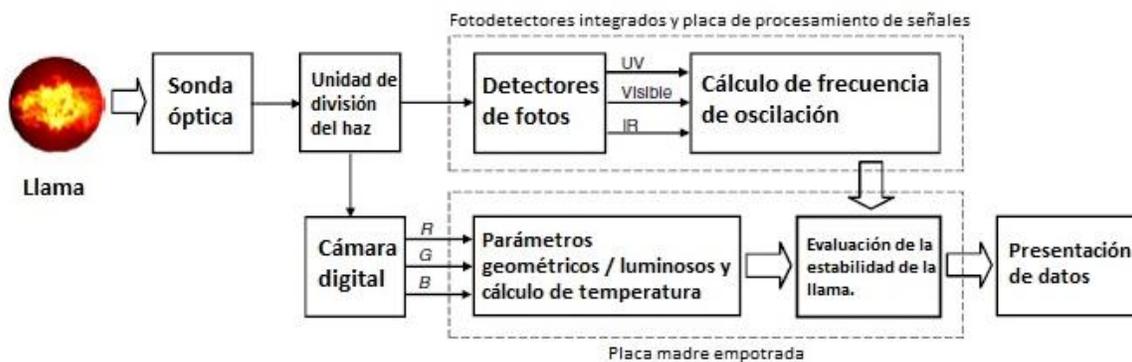


Figura 6.2. Diagrama de flujo para el monitoreo del HFF. ^[25]

La sonda óptica se utiliza para penetrar en el horno y transmitir la luz de la llama al sistema de imagen. Tiene un lente el cual debe ser protegido mediante un gas de refrigeración (principalmente nitrógeno), esto se realiza para evitar acreciones producido por los gases que se forman de las

reacciones químicas, además de proteger la fibra óptica. El divisor de haz divide la luz de la llama en dos haces. El primer haz es capturado por la cámara para la medición de parámetros geométricos y luminosos de la llama y la distribución de la temperatura. Mientras que el segundo haz es captado por fotodetectores ubicados en la placa de procesamiento de señales para medir la frecuencia de oscilación de la llama.

El sistema se puede utilizar como un pirómetro capaz de medir continuamente la distribución de temperatura. La cámara RGB en el sistema tiene tres canales separados correspondientes, cada imagen producida se puede descomponer en tres imágenes principales R, G y B. Las combinaciones de las imágenes con bandas de color se pueden usar para determinar la distribución de la temperatura de la llama

La frecuencia de oscilación de la llama es una de las propiedades más importantes relacionadas estrechamente con la estabilidad de la llama, ya que puede medir la longitud de onda y así también su intensidad, la cual debe ser constante con respecto al tiempo para que la llama sea estable.

La relación de equivalencia (ϕ) varía los parámetros geométricos y luminosos, que se determinan mediante el procesamiento de imágenes de la llama utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes. El número de parámetros que se miden puede variar, dependiendo de la naturaleza de la llama y el propósito de la medición. Como, por ejemplo, el punto de ignición máximo, la región luminosa, el brillo y la no uniformidad para diferentes relaciones de equivalencia, dándole características a la llama [25].

Esta relación se podría representar por medio de los flujos que entran al HFF, para este caso los más importantes son el flujo de la alimentación de concentrado y la tasa de entrada de oxígeno donde se puede definir el parámetro ϕ para cuantificar la desviación con respecto de una condición de referencia, este parámetro se expresa como:

$$\phi = \frac{\text{Relación tasa de alimentación/volumen de oxígeno}_{(Real)}}{\text{Relación tasa de alimentación/volumen de oxígeno}_{(Estequiométrico)}} \quad (12)$$

La relación propuesta puede variar, es por esto que se necesitará conocer la condición de referencia cuando se tiene una óptima carga para la combustión. Por ejemplo, si se supone que el número es 1, se podría decir que bajo esa condición la carga será deficiente, si es mayor, se acercará a un óptimo y si llega a ser muy alto ocurrirá una sobreoxidación de las partículas de concentrado, dando los gráficos de estabilidad como en la Figura 6.3, por ejemplo, en el gráfico (b),

para una razón de equivalencia de 0,8 se observa un elevado porcentaje de inestabilidad geométrica y luminosa con respecto a una razón de equivalencia de 1, lo que podría indicar que se tiene un exceso de alimentación con respecto al oxígeno inyectado. Los diferentes parámetros que se midan se pueden recoger para crear solo una curva con respecto a la relación equivalente, evaluando cuál sería el valor óptimo con respecto a éste para la estabilidad de la llama.

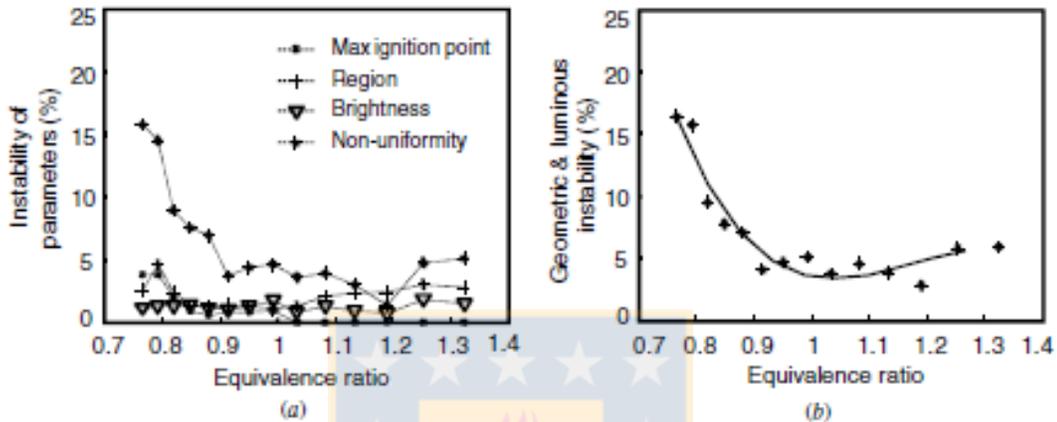


Figura 6.3. Inestabilidades de los parámetros de llama para diferentes relaciones de equivalencia. ^[25]

Finalmente, se puede llegar a desarrollar un sistema de instrumentación para el monitoreo y caracterización de la estabilidad de la llama en los HFF, basándose en imágenes digitales, análisis espectral y técnicas informáticas integradas, cuantificando la estabilidad de la llama a través de análisis estadísticos de los parámetros característicos.

Todo lo anterior podría ayudar a tener un mayor control en la estabilidad de la llama para disminuir la cantidad de polvos que se generan y evitar perder tiempo en detenciones por una mala combustión en el HFF, sugiriendo un medio eficaz para monitorear y controlar el quemador de concentrado.

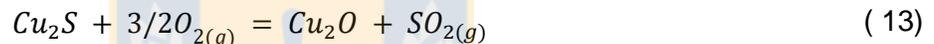
6.3 Medición multispectral de la composición química de la escoria

Los procesos de fundición pueden conceptualizarse en la separación de los elementos principales que ingresan en el concentrado de cobre, estos son: cobre, azufre y hierro. El agente que activa esta separación es el oxígeno, mediante la oxidación selectiva del hierro y el azufre que, termodinámicamente, presenta una mayor afinidad por estos elementos antes que el cobre.

Para la producción pirometalúrgica del cobre se habla de dos etapas principales claramente definidas, fusión y conversión. Si se produce el metal en un solo paso, parte muy importante del

cobre del concentrado pasaría a la escoria siendo su recuperación compleja pues estaría en bajos contenidos dado el gran volumen de escoria que se genera. Otro punto problemático sería la alta generación de calor dentro del horno, produciéndose sobreoxidaciones que conllevan a mayores pérdidas. Por lo tanto, en la primera etapa, tanto el hierro, el azufre y las impurezas nocivas (como el As) se eliminan en la escoria y en los gases de proceso, mientras que el mata o eje se separa y se trata en un paso posterior. Esto tiene que ver en gran parte por el potencial de oxígeno, ya que es esta variable la que afecta directamente a la química de la escoria (formación de magnetita, por ejemplo) y el comportamiento de las impurezas.

La escoria que se forma por la presencia de oxígeno es una solución de óxidos fundidos. Esta incluye óxidos de hierro, SiO_2 y óxidos de impurezas del concentrado. Los óxidos que se encuentran comúnmente en las escorias incluyen óxido ferroso (FeO), magnetita (Fe_3O_4), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), CaO y MgO . Lo más significativo en la estrategia de una fundición implicaría aumentar el grado de mata y la recuperación de cobre. La introducción de una gran cantidad de O_2 , oxidará más Fe en el concentrado, por lo que menos sulfuro de hierro termina en el mata, generando un grado de mata más alto. Por otro lado, usar demasiado oxígeno fomenta la oxidación de cobre, según la siguiente reacción:



El óxido de cobre generado se disuelve en la escoria, lo que es indeseable. Como conclusión de lo expuesto anteriormente, agregar la cantidad correcta de O_2 para producir un grado de mata/cobre aceptable, sin generar una escoria alta en Cu , es una parte clave para la estrategia de la fundición.

El control del contenido químico de la escoria producida en hornos de fusión y conversión es una variable clave y de suma importancia, ya que fundamentalmente afecta en la eficiencia y calidad del proceso. Normalmente, el contenido de cobre en la escoria se determina mediante un análisis químico, que requiere condiciones de medición muy estables y repetitivas. Este tipo de análisis consume mucho tiempo y su impacto inmediato en la operación es muy pobre. Incluso el conocimiento del análisis de una muestra de escoria puede tardar varios sangrados post-muestreo, lo que convierte a esta variable en una correctiva y no predictiva como se requiere que sea. La posibilidad de poder caracterizar Cu_2O en la escoria justo en el sangrado haría posible ajustar en línea el proceso y predecir las condiciones que se requieren para lograr un sistema eficiente.

El estudio mencionado anteriormente (ver apartado 5.4), sobre la técnica de radiación para la evaluación en línea y sin contacto mediante la termografía IR que se ha introducido en la siderurgia, que estima la cantidad de FeO que está contenido en la escoria, podría extenderse para la producción de cobre logrando estimar, en línea, el contenido de Cu_2O en la escoria, prediciéndose así el nivel de oxidación de esta fase. Lo anterior podría lograrse mediante el análisis de las imágenes visuales e infrarrojas durante el sangrado/basculado de los hornos, principalmente de los convertidores, ya que necesitan un mayor control en la cantidad de oxígeno que se inyecta para la obtención de cobre blíster. La aplicación de esta tecnología podría tener un impacto económico importante ya que ayudaría a disminuir las pérdidas de cobre en la escoria, afectando posiblemente en la recuperación metalúrgica de las fundiciones.

Dado lo anterior, se propone un análisis estadístico multivariante utilizando los parámetros de radiación de cobre y escoria en varios rangos espectrales. Para estimar el contenido de Cu_2O en la escoria, se propone un diseño de múltiples cámaras térmicas de longitud de onda media (MWIR, $4 - 5 \mu m$) y de longitud de onda larga (LWIR, $7.5 - 13 \mu m$), una cámara de infrarrojo cercano (NIR, $0.7 - 1 \mu m$) y una cámara visual RGB. Finalmente, los parámetros de radiación correlacionados con el contenido de Cu_2O en la escoria se utilizarían como vectores para una red neuronal para la estimación de Cu_2O , todo esto sujeto a cambios dependiendo de estudios previos en cual rango de longitudes de onda emita radiación la escoria y sus compuestos.

En el esquema de la Figura 6.4, se presenta un sistema multispectral dedicado al análisis del contenido químico de la escoria. Los termogramas y las imágenes visuales de cobre blíster y escoria (descargadas del convertidor) se registran para luego ser transferidos a la computadora, con el uso de un software dedicado dividido en dos bloques. El primero para determinar y seleccionar los parámetros radiativos, mientras que el segundo es la red neuronal de regresión para la estimación del contenido de Cu_2O en la escoria.

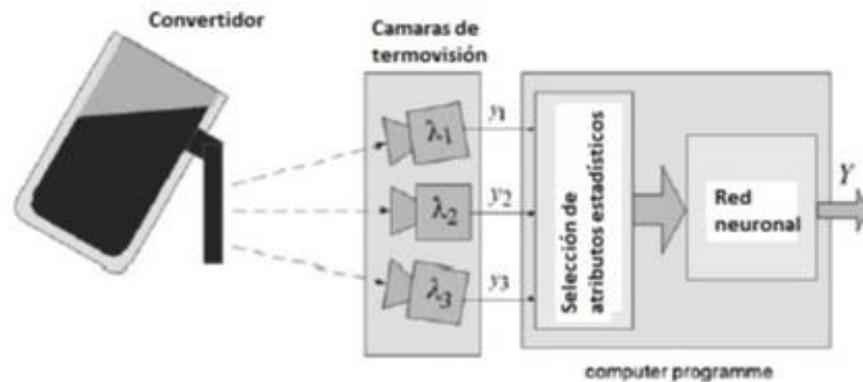


Figura 6.4. Esquema del sistema para la estimación de cobre oxidado en la escoria. [3]

Este sistema multispectral podría registrar en línea el contenido de cobre oxidado y con esto tener un control predictivo del proceso, ajustando el coeficiente de oxígeno de manera automática, disminuyendo las pérdidas de cobre. En el diagrama de estabilidad que se muestra en la Figura 6.5, se puede apreciar claramente que el Cu_2O se puede encontrar en equilibrio con $Cu - CuO$, por lo tanto a una presión alta de oxígeno y una baja presión de SO_2 se tiene una mayor posibilidad de formar Cu_2O incluso con un potencial de oxígeno excesivo se podría llegar a formar CuO .

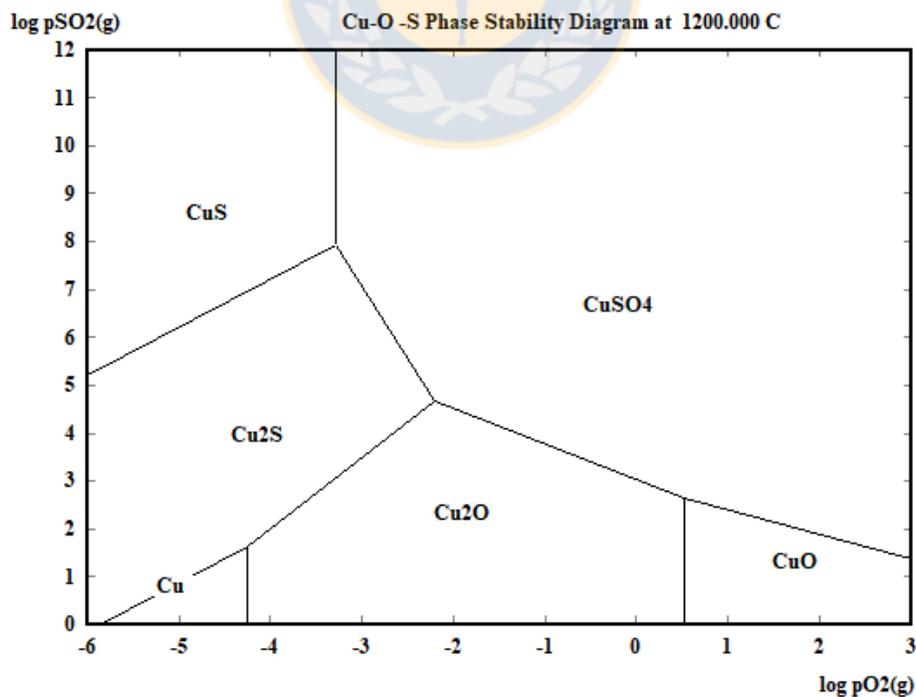


Figura 6.5. Diagrama de estabilidad para el sistema Cu-O-S a 1200°C.

Según estudios realizados ^[9], la solubilidad oxidica del cobre aumenta a medida que el potencial de oxígeno aumenta en el sistema. Esta condición se ilustra en la Figura 6.6. Altman, en 1978 desarrolló un modelo de solución regular donde se plantea la relación lineal que existe entre el potencial y la actividad del Cu_2O en base al equilibrio descrito en la siguiente ecuación:



La relación lineal que se plantea es:

$$a(Cu_2O)_{esc} = k * P_{O_2}^{1/2} * a(Cu)^2 \quad (15)$$

Donde $a(Cu_2O)_{esc}$ y $a(Cu)$ son las actividades del Cu_2O y Cu , respectivamente, P_{O_2} es la presión de oxígeno y k es la constante de proporcionalidad.

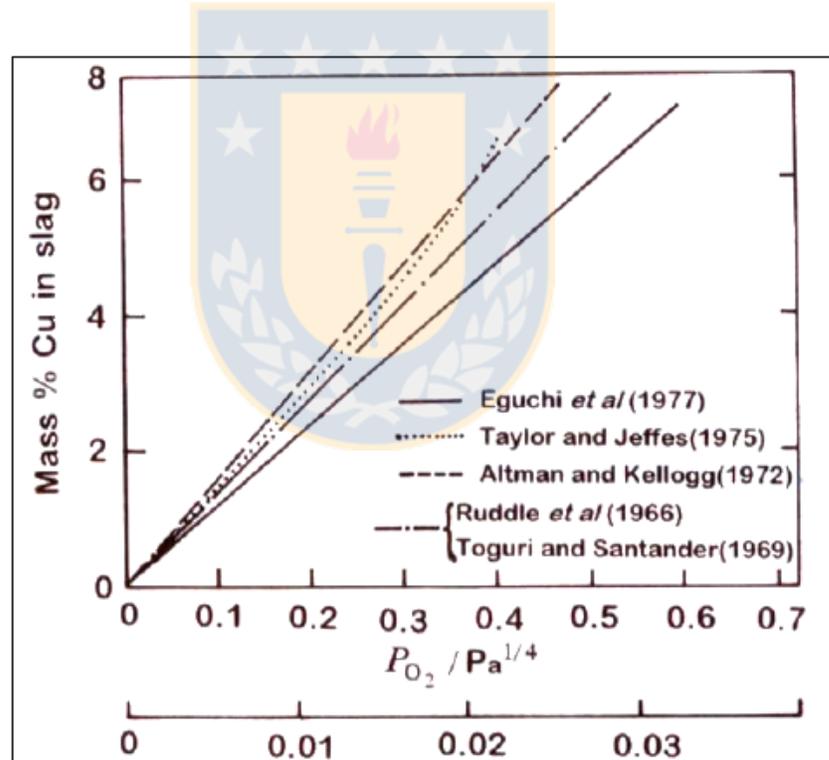
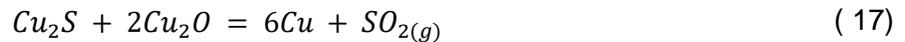
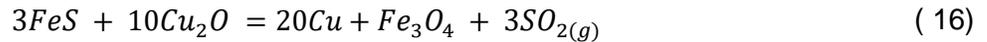


Figura 6.6. Relación entre el contenido de Cu disuelto como óxido en la escoria y la presión parcial de oxígeno, a actividad del metal fija y 1300 °C. ^[9]

También el control del potencial de oxígeno afecta al contenido de magnetita y las propiedades físicas de la escoria, con la presencia de magnetita aumentan las inclusiones atrapadas,

aumentando la viscosidad de la escoria, originando el arrastre de cantidades importantes de cobre blíster y mata.

En la etapa de conversión, la oxidación de cobre es aún más probable debido a la ausencia de hierro, ya que con la presencia de este elemento pueden ocurrir las siguientes reacciones:



recuperando parte del cobre oxidado, es por ello que un control automático del coeficiente de oxígeno podría darle mayor estabilidad y eficiencia a la operación, sobre todo en la etapa de conversión, gracias al uso sistemas multiespectrales para determinar el contenido de especies importantes.

6.4 Imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases

En la actualidad, el proceso de identificación de arrastre de fases fundidas a la salida de los hornos de fusión, conversión o limpieza de escorias, se realiza mediante un análisis visual del operador basado en su experiencia, de forma completamente manual. Este mecanismo es altamente dependiente del criterio del operador, lo que dificulta estandarizar la operación y poder dar estabilidad al proceso. Al mismo tiempo, la operación no deja de tener un cierto grado de riesgo, ya que se requiere del monitoreo presencial de un operador al momento del sangrado de los distintos hornos, lo que determina una utilización intensiva de horas en un ambiente peligroso para el trabajador dado que queda expuesto directamente a la radiación por la cercanía a la colada.

Una forma de medir el arrastre de una fase en otra, y cuantificar de esta manera los impactos que este problema genera, es realizando un análisis de calidad posterior al sangrado que las fundiciones hacen en forma estándar, considerando la toma de muestras y su posterior análisis en laboratorio, los cuales son generados mediante fluorescencia de rayos X, o bien, análisis químico vía húmeda. Ambas metodologías, tienen un gran desfase temporal con el proceso, por lo que sólo tienen fines informativos, sin poder realizarse variaciones en éste con base en dichas mediciones. Algunos de sus resultados suelen conocerse con una tardanza de 24 horas a contar de la toma de muestra.

El análisis de información hiperespectral (que emiten, absorben, y transmiten) de los procesos científicos e industriales se ha consolidado en la última década como una herramienta versátil, confiable y robusta para realizar el monitoreo, identificación, análisis, y control de diferentes

procesos. En el caso particular de la industria siderúrgica, como se precisó anteriormente, se encuentra el desarrollo de sistemas optoelectrónicos avanzados aplicados para el control de arrastre de escoria en la metalurgia secundaria y terciaria, el control de operación del BOF, el control de la calidad de productos durante la laminación y verificar la integridad de mampostería refractaria. Estas aplicaciones en la industria del acero, validan las posibilidades de éxito desde un enfoque de transferencia tecnológica para la pirometalurgia del cobre.

Las imágenes hiperespectrales consisten en un conjunto de imágenes donde cada una es representada en una banda de frecuencia determinada a lo largo del espectro electromagnético (bandas espectrales). Las características que contienen estas imágenes son como huellas únicas de la imagen que se le denominan firmas espectrales y son para identificar puntos específicos, ya sean materiales, minerales, cambios atmosféricos, entre otros, que permitan un mejor análisis de los elementos que a simple vista no pueden ser detectados y que pasan desapercibidos por el ojo humano.

Un sistema óptico inalámbrico multidimensional que opere bajo los principios físicos de la radiometría podría discriminar el arrastre de una fase en otra para los hornos de fusión (diferenciando la escoria del eje o metal blanco), hornos de conversión (diferenciando escoria de cobre blíster) y horno de limpieza de escoria (diferenciando la escoria del eje de alta ley), de manera constante y en línea.

En la Figura 6.7 se representa el posible esquema de monitoreo hiperespectral en el sangrado de fases. La cámara hiperespectral que estará midiendo mientras ocurra el sangrado del horno (en este caso un Convertidor Teniente), procesará por medio de técnicas de imágenes digitales la información obtenida y así representar la caracterización hiperespectral del proceso en computadores de los cuales se podrán guiar los operadores. La imagen obtenida del sangrado tendrá una componente espectral y espacial, esto significa que cada píxel de la imagen hiperespectral tendrá una composición química diferente. Por medio del procesamiento espacial, se pueden reconocer las características generales de un tipo particular de escoria, mata y cobre blíster. Lo anterior proporcionará una mejor identificación que sólo utilizando la información espectral ^[26], discriminando las distintas fases que se formen en el Convertidor Peirce-Smith, Horno de limpieza de escoria, HFF y Convertidor Teniente.

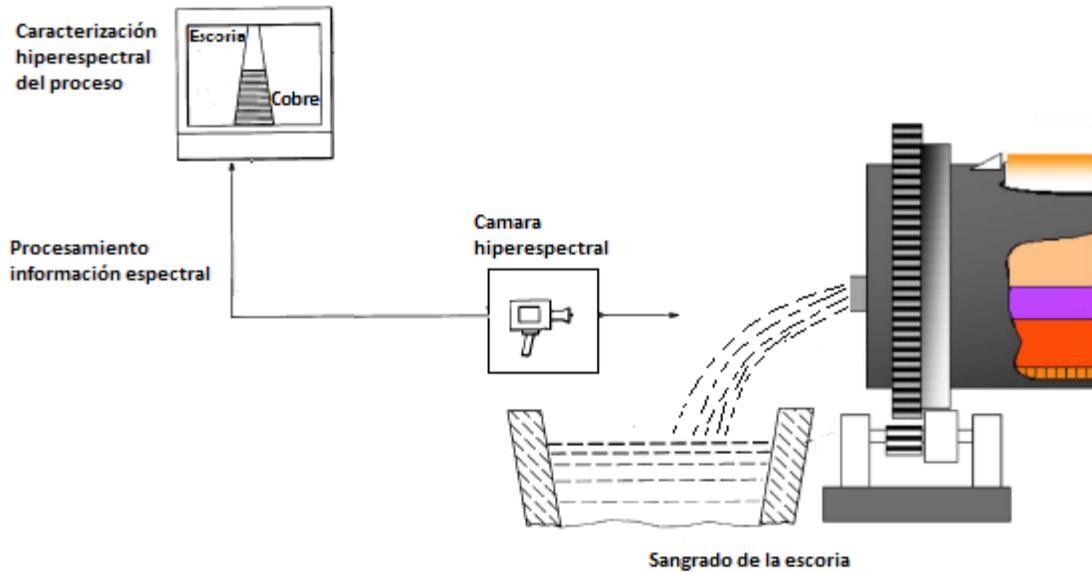


Figura 6.7. Esquema del sistema hiperespectral en un Convertidor Teniente.

El instrumento consistiría en una cámara hiperespectral que facilite la discriminación entre la escoria, el eje, el eje de alta ley y el cobre blíster. Como resultado de la medición se generará un video, el cual será visto en línea por los operadores, representando el arrastre relativo de una fase en otra, calculado mediante un algoritmo matemático. El algoritmo de diferenciación permitirá a la operación tomar acciones a partir de alarmas que el sistema incorpore como herramienta de control del proceso. El sistema se encontraría en una carcasa o housing diseñada especialmente para soportar las condiciones de temperatura y material particulado en suspensión que se generan alrededor de dichos hornos.

Mediante la caracterización hiperespectral se conocerá el comportamiento del sangrado de escoria, de metal blanco y matas en imágenes con alta resolución espectral. El aporte en esta caracterización del arrastre de matas o metal blanco, blíster y escoria en los diferentes sangrados que ocurren en los hornos de las fundiciones permitiría evitar acciones en las cuales un no acertado control de esta operación impacta directamente en la recuperación metalúrgica de la fundición, tanto en la operación directa de los hornos de limpieza de escoria, como en el apropiado control de la escoria enviada desde los hornos de fusión y conversión a esta etapa. Un segundo impacto positivo se podría observar en la recirculación de fases fundidas en torno a la conversión y en el envío de blíster sin rastros de escoria oxidada a la etapa de refinó.

Al tratarse de un proceso de medición en línea, mediante un dispositivo externo, no existe la necesidad de interacción de los operarios en el proceso de sangrado para evitar el problema de arrastre, disminuyendo globalmente los riesgos laborales, ya que se realizaría automáticamente

como se produce en los procesos siderúrgicos. Además, la medición en línea permitirá un mayor control del proceso, logrando tomar decisiones oportunas sobre éste con el fin de estabilizarlo, disminuyendo su variabilidad, procedimiento que incluso tendrá el potencial de ser automatizado debido al dispositivo desarrollado.

Finalmente, la gran contribución de la posible implementación de un dispositivo optoelectrónico en las fundiciones, será un aumento esperado de la recuperación metalúrgica, siendo éste el parámetro de impacto más directo para estimar un beneficio económico para la fundición que incorpore esta tecnología con el fin de monitorear y controlar en línea sus operaciones pirometalúrgicas.

6.5 Programa de investigación para el desarrollo de las propuestas

Toda la instrumentación optoelectrónica desarrollada anteriormente necesita emplear una metodología de investigación científica para ser aplicada, es por ello que la primera parte corresponde al estudio de laboratorio de cada una de ellas, donde lo esencial se llevaría a cabo en los siguientes hitos:

- ❖ Hito N°1: Encontrar una banda espectral para las radiaciones emitidas por la mata, cobre blíster, escoria y compuestos que se encuentran en las fases, formando una base de datos de espectros para cada fase o compuestos. Implementando un algoritmo de análisis de imágenes espectrales para determinar la banda que maximice la discriminación entre ellos.
 - Se necesita hacer estudios en un horno de laboratorio, con un ambiente no reaccionante para las fases, así como también los compuestos por separado, probando pequeñas cantidades de masa fundidas en crisoles, a altas temperaturas (~1300 °C), que serán medidas con cámaras.
 - Para las fases fundidas los estudios tendrían que ser con distintos porcentajes de cobre para cada uno de ellos, comparando sus comportamientos espectrales.
- ❖ Hito N°2: Encontrar tecnologías con una alta transmisión en la banda espectral en la cual las fases o compuestos emitan de manera diferente (Filtros Ópticos).
- ❖ Hito N°3: Encontrar cámaras con la detectabilidad requerida para generar un video en línea en la banda espectral descubierta en el primer hito.

- ❖ Hito N°4: Desarrollar un algoritmo de procesamiento estadístico de señales e imágenes que realice la discriminación en línea de las fases o compuestos utilizando modelos radiométricos en el contexto de teoría de detección.

Una vez identificada la o las bandas espectrales que maximicen la discriminación entre las fases o los compuestos, probándolo como tal en un sistema reaccionante a escala piloto, las soluciones propuestas tendrían que comprender:

- ❖ Un módulo de comunicaciones entre el sensor y la sala de control.
- ❖ Un algoritmo de calibración.
- ❖ Un algoritmo de cálculo de porcentaje de cada fase o elemento.
- ❖ Sistema de enfriamiento para la cámara (Housing).
- ❖ Carcasa para soporte del sistema óptico

Finalmente, probando esto en laboratorio, se podría llevar a escala industrial donde podría ser implementado en las fundiciones de cobre para verificar su reproducibilidad y robustez en condiciones industriales.

6.6 Evaluación de beneficios para las fundiciones de cobre

Las fundiciones de concentrados de cobre, al igual que cualquier otra actividad comercial, basan sus ganancias de manera general balanceando ingresos y costos de operación. En este caso en particular, el ingreso por venta se establece adicional al cobre, por la suma de los elementos de interés que contenga el concentrado, que son normalmente cobre, oro y plata.

El precio de compra para una fundición se establece utilizando como referencia los precios de LME (bolsa de metales de Londres), menos algunos cargos que son acordados entre el vendedor y el comprador y que reflejan los gastos que ha generado la fundición para convertir el concentrado de cobre a la forma refinada. Estos cargos son conocidos por sus siglas en inglés como TCRC, que corresponde a Treatment Charge, que son los cargos por tratamientos que emplea la fundición para plasmar los costos de fundir el concentrado obteniendo cobre anódico y Refining Charge que son los cargos de refinación que le aplicará la refinería electrolítica para pasar de cobre anódico a cátodos de cobre, lo que se convertirá en un costo para la fundición.

Por otro lado, se tienen también cargos producto de las pérdidas metalúrgicas de los elementos de interés, que está relacionado con la deducción metalúrgica. En el proceso de fundición

se forma una escoria final con contenidos de cobre que varían aproximadamente entre 0.6 % a 1.2 %, dependiendo de la tecnología utilizada en las etapas de limpieza de escorias, este material normalmente no tiene valor comercial, por tal razón el contenido de cobre en estas escorias es considerada una pérdida. De este modo la fundición puede reflejar esta pérdida que se produce durante su proceso como costo, ya que, al realizar el balance neto entre la deducción metalúrgica aplicada a la compra de concentrados y la real pérdida metalúrgica en su proceso, se puede manifestar la eficiencia de la producción, entonces si la pérdida metalúrgica real de la fundición es menor a la deducción metalúrgica aplicada a la compra de concentrados, se obtendrá una fracción de cobre en el producto final sin pagar al proveedor y representará un ingreso neto para la fundición. De manera similar, pero en sentido contrario, una recuperación metalúrgica por debajo del cobre pagado generará un costo para la fundición.

El desarrollo de los instrumentos optoelectrónicos propuestos anteriormente (ver apartado 6) podría contribuir en un aumento esperado de la recuperación metalúrgica como también de la productividad de cualquier fundición, siendo estos parámetros de impacto más directo para poder estimar un beneficio económico para la operación que incorpore estas tecnologías con el fin de monitorear sus operaciones.

6.6.1 Estimación de beneficios cuantitativos

Para determinar el posible impacto económico que podría generarse producto del uso de tecnología optoelectrónica en una fundición de cobre, se tomará como ejemplo la fundición Paipote, también conocida como Hernán Videla Lira, ubicada en la región de Atacama. Paipote cuenta con una capacidad para tratar 340 kton/año de concentrados secos y una capacidad de producción de hasta 100 kton /año de cobre anódico dependiendo de la ley de los concentrados^[9].

En la Figura 6.8 se presenta el diagrama de flujo del proceso productivo de la fundición. En el CT se lleva a cabo la fusión de concentrados en baño, obteniendo como productos finales escoria, metal blanco y gases. La escoria posteriormente es transportada al horno eléctrico (HE) para la recuperación adicional de cobre, produciendo finalmente escoria que es conducida en ollas hacia los botaderos. Esta escoria contiene parte de cobre que no se recupera y se considera como una pérdida para la fundición. Por otro lado, el metal blanco del CT es descargado en ollas y es transportado hacia los convertidores Peirce Smith (CPS) para generar cobre blíster, que será, por último, transportado en ollas hacia el horno de refino a fuego (RAF) para producir cobre anódico.

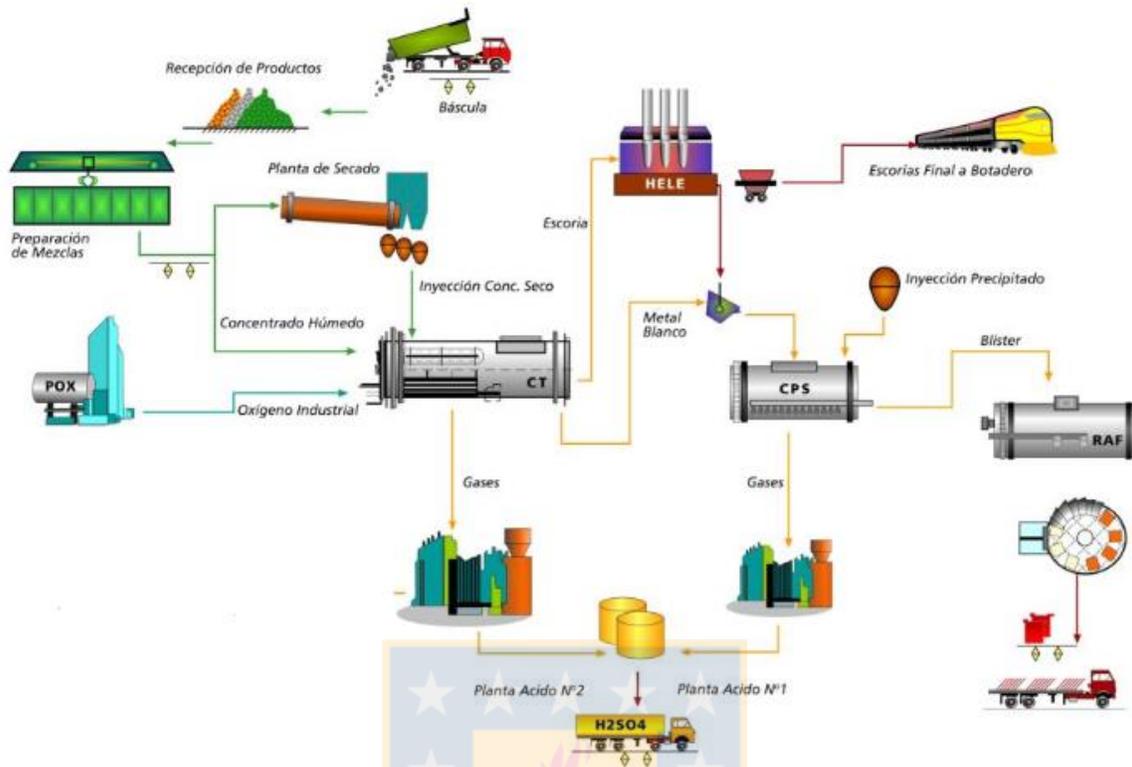


Figura 6.8. Diagrama de flujo de la fundición Paipote [28].

En el anexo A se presentan parámetros de operación de la fundición Paipote y el análisis químico, promedio diario, de corrientes globales para el concentrado y la escoria de botadero.

En la presente memoria se utilizaron los datos del anexo A para determinar diferentes parámetros como la recuperación metalúrgica, la pérdida metalúrgica y los ingresos anuales de cobre en la fundición en función de diferentes contenidos de cobre en la escoria que va a botadero. Los resultados están representados gráficamente en las Figuras 6.9 y 6.10.

En la Figura 6.9 se representa gráficamente en términos económicos la recuperación metalúrgica y la pérdida metalúrgica, para distintos contenidos de cobre en la escoria del HE. Se puede observar que para un 97,7 % de recuperación se tiene una pérdida aproximada de 6,5 ¢/lb de cobre, sin embargo, para un 98,9 % de recuperación la pérdida es de un 3,2 ¢/lb. El análisis anterior considera el precio de cobre actual, según la bolsa de metales de Londres, con el valor de 275,467 ¢/lb.

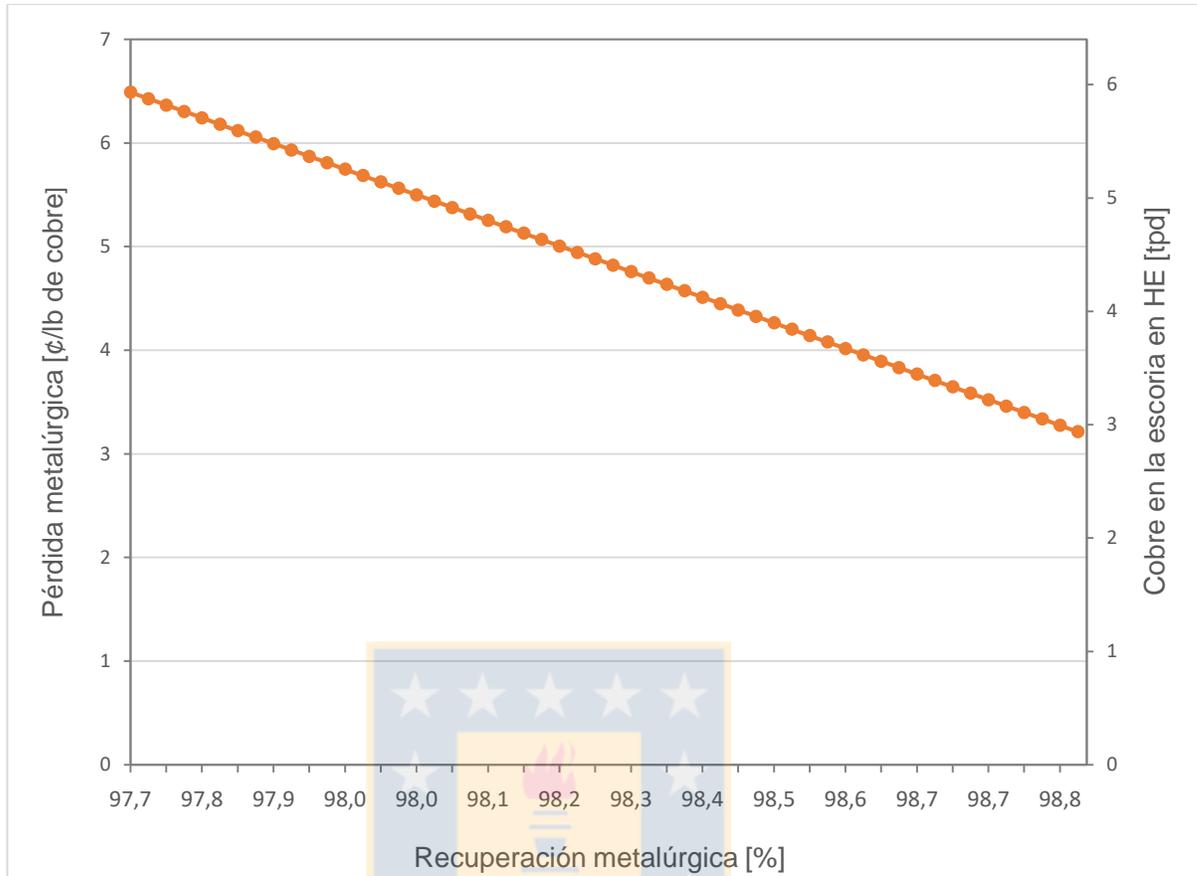


Figura 6.9. Pérdida metalúrgica y cobre en la escoria del HE en función de la recuperación metalúrgica.

También se representa la recuperación metalúrgica para diferentes contenidos de cobre en la escoria del HE. Se puede observar que, a menor recuperación, aproximadamente de un 97,7 %, se tienen 5,9 tpd de cobre que se pierden en los botaderos, a diferencia de un 98,9 % de recuperación que se traduce en 2,9 tpd de cobre en los botaderos. Esta diferencia porcentual de 1,2 %, que significan 3 tpd de cobre en botaderos posibles de recuperar, puede llegar a ser bastante significativa en términos económicos anuales para la fundición generando mayores ingresos si se pudiera recuperar.

En la Figura 6.10 se representa el ingreso anual en USD para la fundición con respecto a diferentes recuperaciones metalúrgicas. En el gráfico se puede apreciar que para una capacidad de 340 kton de concentrado anual con un promedio de 26,4 % de cobre, la recuperación metalúrgica de un 97,7 % representa un ingreso de USD 532.500.000.

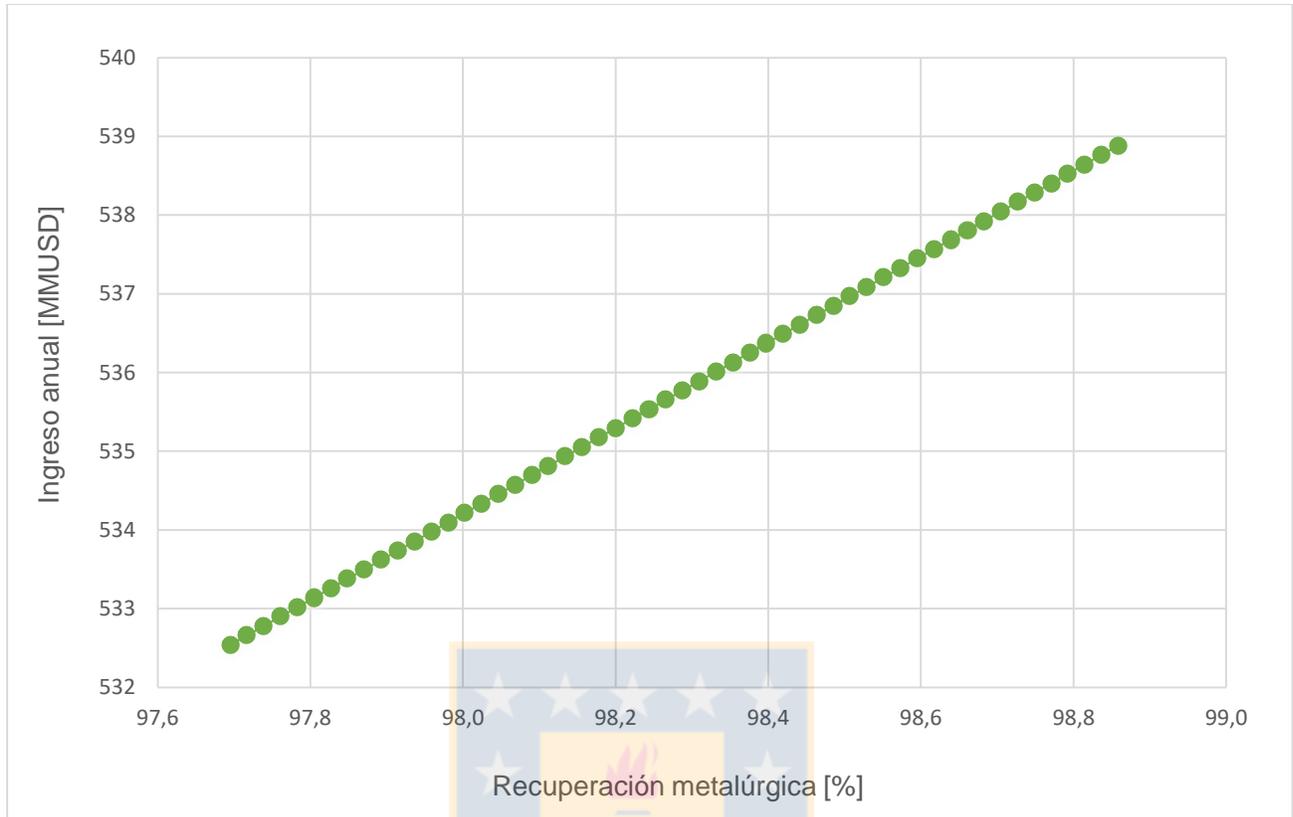


Figura 6.10. Ingreso anual de la fundición en función de la recuperación metalúrgica.

Un aumento de aproximadamente 1% en la recuperación metalúrgica a 98,9% se demuestra un incremento a USD 539.000.0000 anuales, aumentando los ingresos en USD 6.500.000, por lo que cualquier tecnología que aumente esta recuperación es relevante para el negocio de las fundiciones, equilibrando la parte de su negocio asociado a la recuperación de cobre y potencialmente aumentar su rendimiento, lo cual es un impacto importante que podría llegar a presentar la implementación de tecnología optoelectrónica.

Los posibles instrumentos capaces de aumentar directamente a la recuperación metalúrgica serían: la discriminación de fases con imágenes hiperespectrales y la medición multiespectral de la composición química de la escoria. El primer caso ayudaría que parte del cobre no fuera arrastrado con la escoria con un monitoreo automatizado del proceso de sangrado de los diferentes hornos, disminuyendo la recirculación de cobre en las escorias, especialmente para el porcentaje de cobre que va a botadero después de los hornos de limpieza de escoria. El segundo aporta al control del potencial de oxígeno, un parámetro crítico muy importante, ya que ayudaría a monitorear las sobreoxidaciones de los diferentes hornos, disminuyendo el cobre disuelto en la escoria, particularmente en la etapa de conversión donde sale una escoria rica en cobre (aproximadamente

un 15 % disuelto), que es recirculado como carga fría. Como va constantemente recirculando hay un contenido de cobre importante que nunca se logra vender, ya que siempre estará como carga fría o en la escoria en el proceso global. Reducir la generación de escoria oxidada disminuiría la recirculación de cobre en las distintas etapas de soplado, que podría repercutir en un aumento de la recuperación y eficiencia global del proceso, también impactando en el balance de carga fría.

6.6.2 Estimación de beneficios productivos

Otro análisis importante a evaluar es el que está relacionado al mantenimiento de equipos interconectados en la fundición. Por ejemplo, es natural que en las calderas recuperadoras de calor se formen acreciones producto del excesivo arrastre de polvos provenientes de HFF, esto provoca daños en las cañerías lo que se traduce en un mantenimiento constante por parte de los operadores que puede llegar a provocar una detención del horno incluso un día completo dependiendo del daño, reduciendo el *operating time* en la fundición.

En algunas fundiciones chilenas se ha llegado a realizar, como política de operación, la inspección y el mantenimiento una vez por semana, es decir que anualmente existe una detención completa de la planta durante 48 días al año impactando fuertemente en la producción, disminuyendo el *operating time*. Lo anterior se puede traducir en un costo económico importante para la operación. Dentro de las tareas que se realizan durante esta detención están:

- Inspección del alineamiento del quemador de concentrado.
- Estado de las calderas.
- Estado ducto de gases.
- Monitoreo acreciones.

Estos mantenimientos se podrían disminuir utilizando el instrumento optoelectrónico propuesto (ver apartado 6.2) para el HFF, extendiendo el *operating time* con un control automatizado de lo que ocurre dentro de la zona de reacción de este horno, disminuyendo la generación de polvos, incrementando directamente la producción, tratando un mayor tonelaje anual en la fundición y reduciendo los gastos de mantenimiento por cargos externos para poder operar de forma óptima el HFF.

7. CONCLUSIONES

Los instrumentos optoelectrónicos hoy en día son reconocidos como una herramienta cada vez más importante en diferentes procesos productivos, siendo utilizados para monitorear y controlar en línea distintas áreas. En la industria minero metalúrgica se destaca el gran uso de este tipo de dispositivos, para las fundiciones siderúrgicas, en diversos dominios y control de sus diferentes actividades.

Los diferentes sistemas optoelectrónicos propuestos en este documento se podrían llegar a transferir al proceso pirometalúrgico del cobre, creando un control avanzado por sobre diferentes condiciones de operaciones que se producen en los equipos utilizados. Siendo los instrumentos enunciados el monitoreo del HFF, la medición multiespectral de la composición química de la escoria y las imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases, con bastante éxito si se tienen estudios previos y son validados para una futura utilización.

El monitoreo del HFF entregaría una mayor eficiencia de fusión, disminuyendo las horas de mantención en el año, reduciendo los costos relacionados a la conservación del horno, provocando un aumento en la producción de la fundición, la eficiencia del proceso y los ingresos de la minera.

De igual manera la medición multiespectral de la composición química de la escoria y las imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases, producirían un aumento en los ingresos financieros de las fundiciones ya que están directamente relacionados a aumentar, posiblemente, la recuperación metalúrgica de la fundición, siendo este el impacto más significativo desde el punto de vista económico.

Por otro lado, como todos los instrumentos optoelectrónicos pueden ser utilizados de manera remota, los operadores podrían controlar diferentes procesos por medio de una computadora que los estaría guiando, lo que se traduce sin lugar a dudas en una mejor calidad de vida para ellos, evitando la exposición constante a un área que normalmente está a elevadas temperaturas y rodeada de material particulado en suspensión.

Finalmente, cualquiera de estos instrumentos podría llegar a impactar positivamente en los diferentes procesos, tanto en el rendimiento operacional, así como también del punto de vista económico relacionado a la recuperación global de cobre, considerando la poca modernización y control que se tiene actualmente en las fundiciones. Llegando a ser de gran impacto bajo una mirada económica y productiva del negocio.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wittchen, W., Borecki, M., Wiecek, B., Pacholski, K., Olbrycht R., & Strakowski, R. (2015). Multispectral Measuring System for Determination of Steel Slag Parameters During Steel Tapping from Metallurgical Furnace to Casting Ladle. *Prace IMŻ 2*, 168 – 174.
- [2] Peacock, “*Thermal Imaging System to prevent Slag Carryover in Steel Making*”.
- [3] Strąkowska, R., Pacholski, K., Więceka, B., Olbrycht, R., Wittchen, W., & Borecki, M. (2014). Radiative Parameters of Steel Slag for FeO Content Estimation Using Multispectral Thermography System. *Quantitative InfraRed Thermography*, 11(2), 222 – 232.
- [4] Peacock, G. (2000). Thermal Imaging of Liquid Steel and Slag in a Pouring Stream. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 4020, 50 – 60.
- [5] Anxiang, T. & Lifeng, S. (2014). Infrared Steel Slag Detection Method of Converter. CN103571994.
- [6] Villagrán, C. (2014). *Caracterización espectral de la combustión flash de partículas de concentrado de cobre*. Universidad de Concepción.
- [7] Qin, J., Chao, K., Kim, M. S., Lu, R., & Burks, T. F. (2013). Hyperspectral and Multispectral Imaging for Evaluating Food Safety and Quality. *Journal of Food Engineering*, 118(2), 157 – 171.
- [8] Ruiz-Bustanza, I., Antoranz, J. C., Mochón, J., Rodríguez, D., Parra, R., Verdeja, L. F., & Martín, R. (2012). New Techniques to Detect the Suitable Time to Close the Tap Hole of a Blast Furnace. *Steel Research International*, 83(8), 783–790.
- [9] Cardona Valencia, N. C. (2011). *Contribución al Análisis Físicoquímico de las Pérdidas de Cobre en Escorias* (Tesis de Doctorado). Universidad de Concepción.
- [10] Departamento de Ingeniería Metalúrgica, “*Pirometalurgia del cobre*”, Universidad de Santiago de Chile.
- [11] Comisión Chilena del Cobre. (2015). *Tecnologías en Fundiciones de Cobre*. Recuperado de https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tecnologias_fundiciones_v1.pdf
- [12] *Radiaciones electromagnéticas*. Recuperado de <https://astrojem.com/radiacionelectromagnetica.html>
- [13] Pérez, G. *Espectro electromagnético*. Recuperado de www.espectrometria.com/espectro_electromagnético.

- [14] Casanova, V. (12 de diciembre de 2016). *¿Qué es un cuerpo negro?*, Recuperado de <https://www.astrofisicayfisica.com/2016/12/que-es-un-cuerpo-negro.html>
- [15] *Ley de Planck*. Recuperado de www.astronomia.wikia.com/wiki/Ley_de_Planck.
- [16] Cengel, Y. & Ghajar, A. (Ed.). (2011). *Transferencia de Calor y Masa: Fundamentos y Aplicaciones* (4ª Edición). México: McGraw-Hill
- [17] Villagrán, C. (2014). *Caracterización Espectral de la Combustión Flash de Partículas de Concentrado de Cobre* (Tesis de Pregrado). Universidad de Concepción.
- [18] Loeza, C. (2017). *Caracterización Espectral de la Combustión Flash de Sulfuros de Cu* (Tesis de Magíster). Universidad de Concepción.
- [19] Mahajan, M.P., & Kamalapur, S.M. (2016). Hyperspectral Imaging. *Asian Journal of Computer Science Engineering*, 2(1), 06 – 10.
- [20] Prietl, T., Filzwieser, A., & Wallner, S. (2005). Productivity Increase in a Pierce-Smith Converter Using the COP KIN and OPC System. *Proceedings of the Symposium on Converter and Fire Refining Practices* (The Minerals, Metals & Materials Society Conference), 177 – 190.
- [21] SemTech. Recuperado de <http://www.semtech.se/products/opc-40534498>
- [22] AT- Automation Technology. Recuperado de <https://www.automationtechnology.de/cms/en/>.
- [23] Strąkowski, R., Pacholski, K., Więcek, B., Olbrycht, R., Wittchen, W., & Borecki, M. (2018). Estimation of FeO Content in the Steel Slag Using Infrared Imaging and Artificial Neural Network. *Measurement*, 117, 380 – 389.
- [24] Davenport W.G. & Partelpoeg E.H. (Ed.). (1987). *Flash Smelting - Analysis, Control and Optimization*. Pergamon Press.
- [25] Sun, D., Lu, G., Zhou, H., & Yan, Y. (2011). Flame Stability Monitoring and Characterization Through Digital Imaging and Spectral Analysis. *Measurement Science and Technology*, 22(11), 114007.
- [26] Gutiérrez, J.A., Picón, A., Rodríguez, S., & Girbau, I. (2010). The application of hyperspectral image processing to the steel foundry process. *Conference: International Surface Inspection Summit*.
- [27] Zhang, Z., Li, Q., & Yan, L. (2015). Slag Detection System Based on Infrared Thermography in Steelmaking Industry. *Recent Patents on Signal Processing*, 5, 16 – 23.

[28] Herrera Vergara, C. (2016). *Fusión de Concentrados en Fundición Hernán Videla Lira*. Recuperado de <http://www.sonami.cl/site/wp-content/uploads/2016/03/01.-Fusion-de-Concentrados-en-Fundicion-Hernan-Videla-Lira.pdf>.

[29] *Control automático: Sensores de temperatura* [diapositivas de PowerPoint]. Recuperado de <https://es.scribd.com/presentation/341094114/Control-Automatico-Sensores-de-Temperatura>

[30] Quezada, M. (2016). *Obtención del Cu*. [Figura]. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/11119879>.

[31] Cordero, F. (2016). *Metalurgia del cobre*. [Figura]. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/10615468>.

[32] Universidad Nacional de Tucumán. *Tecnologías y procesos de producción*. [Figura]. Recuperado de <http://composi.info/tema-n2-cobre-031110.html>.

[33] Esopo. *Espectro electromagnético*. Recuperado de <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/eem>.

[34] Aiazzi, B. (2011). *Spectral distortion in lossy compression of hyperspectral data*. [Figura]. Recuperado de <https://www.researchgate.net>.



ANEXOS

Anexos A: Tablas de composiciones y parámetros del CT y HE de Paipote ^[9]

Tabla A.1. Composición de los concentrados secos (Paipote 2008-2009).

| Óxido/elemento, % en peso | Rango | | Promedio |
|--------------------------------|-------|--------|----------|
| Cu | 25,50 | 27,30 | 26,40 |
| Fe total | 26,80 | 31,20 | 29,15 |
| Fe ₃ O ₄ | 0,90 | 1,40 | 1,11 |
| SiO ₂ total | 3,80 | 13,26 | 6,84 |
| SiO ₂ libre | 1,42 | 6,46 | 3,84 |
| Al ₂ O ₃ | 0,75 | 3,18 | 1,53 |
| CaO | 0,17 | 0,66 | 0,36 |
| MgO | 0,26 | 1,07 | 0,39 |
| S | 30,48 | 35,18 | 33,03 |
| Cl | 0,02 | 0,28 | 0,09 |
| Sb | 0,01 | 0,03 | 0,01 |
| As | 0,02 | 0,06 | 0,03 |
| Zn | 0,29 | 1,73 | 0,82 |
| Pb | 0,02 | 0,10 | 0,06 |
| Bi(ppm) | 1,00 | 114,00 | 28,12 |
| Ni(ppm) | 1,73 | 220,00 | 170,63 |
| Ag(ppm) | 1,00 | 12,00 | 5,47 |
| Au(ppm) | 5,07 | 7,60 | 6,05 |

Tabla A.2. Parámetros de operación del CT (Paipote 2008).

| Parámetros de operación | Rango |
|---|-----------------------|
| Tasa de alimentación, TPD | 850-1100 |
| Circulantes, TPD | 60-100 |
| Tasa de fusión, TPH | 35 - 55 |
| Enriquecimiento de oxígeno en aire de soplado, % | 36-39 |
| Tasa específica de soplado (Nm ³ aire/ton concentrado) | 275-290 |
| Producción de escoria, TPD | 530 – 640 |
| Temperatura de escoria, °C | 1180-1250 (prom.1220) |
| Producción de metal, TPD | 250 - 320 |
| Temperatura del metal, °C | 1080-1150 |

Tabla A.3. Parámetros de operación del HE (Paipote, 2008).

| Parámetros de operación | Rango |
|--|------------------------|
| Tonelaje de escoria, TPD | 700-1000 |
| Tonelaje de circulantes sólidos, TPD | 90-135 |
| Consumo de coque, kg/ton (escoria + circulantes) | 12-14 |
| Potencia nominal del transformador, MW | 11 |
| Potencia promedio de los electrodos, MW | 3.5 – 5 (prom. 4.6) |
| Corriente de electrodo, kA | 18.5 - 20.65 |
| Profundidad de inmersión de electrodos, m | 0.53 – 0.67 |
| Consumo específico de energía kWh/ton escoria + circulantes) | 134-175 |
| Consumo de pasta electrolítica kg/ton (escoria +circulantes) | 0.95 |
| Producción de escoria, TPD | 520 610 |
| Temperaturas de escoria, °C | 1180-1270 (prom. 1220) |
| Producción de metal, TPD | 90-120 |
| Temperatura del metal, °C | 1100-1180 (prom.1130) |

Tabla A.4. Composición química de escoria y mata del HE (Comp. mensuales, 2008-2009).

| | Óxido/elemento, % peso | Rango | Promedio |
|------------------|--------------------------------------|-------------|-------------|
| Escoria | Cu | 0.77-1.05 | 0,82 |
| | Fe | 44.80-48.80 | 46,47 |
| | S | 0.500-71 | 0,59 |
| | SiO ₂ | 23.50-31.32 | 27,99 |
| | Al ₂ O ₃ | 2.56-4.71 | 3,63 |
| | ZnO | 0.83-3.32 | 1,83 |
| | CaO | 0.36-1.94 | 0,89 |
| | MgO | 0.70-1.20 | 0,83 |
| | Cr ₂ O ₃ | 0.01-0.05 | 0,03 |
| | Others (As, Sb, Pb, Ag, Au) | 0.06-0.61 | 0,25 |
| | Fe/SiO ₂ | 1.4-2.1 | 1,6 |
| | Fe ₃ O ₄ (SAT) | 6.10-9.10 | 7,00 |
| | Metal blanco | Cu | 69.54-74.94 |
| Fe | | 5.20-9.40 | 7,07 |
| S | | 19.56-21.75 | 20,92 |
| SiO ₂ | | 0.02-2.55 | 1,29 |
| Sb | | 0.02-0.09 | 0,05 |
| As | | 0.07-0.19 | 0,13 |
| Pb | | 0.11-0.37 | 0,21 |
| Zn | | 0.09-0.41 | 0,25 |

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
 Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Diseño y evaluación de instrumentación espectral e hiperespectral para aplicación en la pirometalurgia del cobre

Nombre Memorista: Valentina Belén Córdova Hernández

| | | |
|---------------------------------------|--|-------------------------------------|
| Modalidad | | Profesor(es) Patrocinante(s) |
| Concepto | | |
| Calificación | | |
| Fecha | | |
| Prof. ^a Eugenia Araneda H. | | Prof. Roberto Parra F. |
| | | Ingeniero Supervisor: |
| | | Institución: |

Comisión (Nombre y Firma)

| | |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Prof. ^a Eugenia Araneda H. | Prof. Eduardo Balladares R. |
|---------------------------------------|-----------------------------|

Resumen

Actualmente en los procesos pirometalúrgicos no ferrosos, específicamente en fundiciones de cobre, se tiene un uso limitado de sistemas de monitoreo y control. Esto se debe principalmente a la carencia de instrumentación que permita el adecuado monitoreo operacional de diferentes variables de los reactores. Lo anterior es un tema de gran relevancia ya que es de suma importancia, para estas operaciones, contar con un monitoreo continuo que permita visualizar indicadores de variables críticas como: composición química de fases fundidas, potenciales químicos, potenciales de oxígeno/ SO_2 y temperatura. Una solución que ha tomado fuerza en este último tiempo en diferentes procesos, es el uso de técnicas espectrales mediante sensores optoelectrónicos, ya que cumplen con los requerimientos de ser no invasivos y de fácil manipulación, lo cual es ideal para los diferentes reactores del procesamiento de concentrados y minerales sulfurados a altas temperaturas. Este tipo de tecnología ya ha sido ampliamente utilizada en la industria siderúrgica, lo que hace prever una potencial transferencia hacia la pirometalurgia del cobre en particular y hacia la pirometalurgia no ferrosa en general.

En este documento se presentan dos aspectos relevantes de esta temática. El primero es una revisión bibliográfica de la tecnología optoelectrónica utilizada y en desarrollo para la industria del acero y, el segundo, un análisis del impacto que podría tener la transferencia de este tipo de tecnología a la pirometalurgia del cobre. Desde el punto de vista de la transferencia de tecnología, este documento propone instrumentos para el monitoreo del HFF, medición multiespectral de la composición química de la escoria y las imágenes hiperespectrales para la discriminación de fases.

El uso de la tecnología optoelectrónica podría tener un importante impacto sobre la recuperación metalúrgica y producción en las fundiciones de cobre, donde un aumento del 1% en la recuperación metalúrgica, representaría una disminución en las pérdidas de cobre, lo que se podría reflejar como un incremento en los ingresos, cercano a los 6,5 millones de dólares anuales, considerando para una fundición que trata 340 kton/año de concentrado, con una media de 26,4 % de cobre en sus concentrados.