

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA



**APLICACIÓN DE MÉTODOS RESISTIVOS PARA DISCRIMINAR
ENTRE METAL BLANCO Y ESCORIA EN UN REACTOR
PIROMETALÚRGICO.**

Para la Fundición Chuquicamata, Codelco.

SEBASTIÁN ENRIQUE ORDENES BOZO

Profesor Guía: Dr. Francisco Vivanco.

Tesis para optar al título profesional de
Ingeniero Físico.

Santiago – Chile

2013

© Sebastián Ordenes.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra en cualquier forma, medio o procedimiento sin permiso por escrito del o los autores.

APLICACIÓN DE MÉTODOS RESISTIVOS PARA DISCRIMINAR ENTRE METAL BLANCO Y ESCORIA EN UN REACTOR PIROMETALÚRGICO.

Sebastián Enrique Ordenes Bozo

Este trabajo de Graduación fue preparado bajo la supervisión del profesor guía Dr. Francisco Vivanco del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile y ha sido aprobado por los miembros de la comisión calificadora del candidato.

.....

Dr. Francisco Vivanco

.....

Dr. Álvaro San Martín Ulloa

.....

Dr. Daniel Serafini

.....

Dra. Yolanda Vargas Hernández

Directora del Departamento de Física

**NATURE DOES NOT HURRY,
YET EVERYTHING IS ACCOMPLISHED.
(LAO TZU)**

ÍNDICE GENERAL

Índice General.....	iv
Índice de figuras.....	vi
Resumen	1
1. Introducción.....	2
Objetivos.....	9
Objetivo general	9
Objetivos específicos.....	9
2. Instrumento Sensor de Nivel de Fases	10
2.1. Componentes del sistema	11
2.2. Instalación en el CT-2.....	13
2.3. Configuración del instrumento	14
3. Metodología Experimental.....	15
3.1. Pruebas preliminares.....	16
3.2. Selección de secuencias de medición	20
3.3. Mediciones de nivel por el método de barra corroída	22
4. Metodología de Análisis	25
4.1. Transformada Wavelet.....	27
4.2. Comportamiento de señal según rangos de nivel.....	32
5. Análisis y resultados.....	35
6. Conclusiones.....	38
7. Referencias	40

Anexo A	41
1. Estudio de Factibilidad ERT	41
1.1. Adquisición de datos.....	42
1.1.1. Algunos ejemplos	43
1.1.2. Usando la configuración actual del Sensor de Nivel de Fases	45
1.1.3. Usando una configuración de conexión directa.....	47
1.1.4. Posible problema por oleaje interno	48
1.2. Interpretación de los datos.....	49
2. Referencias del Anexo A.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Esquema del Horno Convertidor Teniente 2</i>	2
Figura 2. <i>Diagrama de flujos de La Fundición Chuquicamata</i>	3
Figura 3. <i>Espumado de escoria</i>	5
Figura 4. <i>Nivel de MB muy alto</i>	6
Figura 5. <i>Mejoras en operación debido al control</i>	7
Figura 6. <i>Componentes principales del Sistema Sensor de Nivel de Fases</i>	10
Figura 7. <i>Sistema de control</i>	11
Figura 8. <i>Culata de sangrado de escoria del horno CT-2</i>	13
Figura 9. <i>Prueba en P1-2</i>	17
Figura 10. <i>Prueba en P5-6</i>	17
Figura 11. <i>Prueba en P9-10</i>	18
Figura 12. <i>Prueba en P19-20</i>	18
Figura 13. <i>Prueba en pares horizontales del lado izquierdo de la culata</i>	19
Figura 14. <i>Prueba con 4 puntas</i>	20
Figura 15. <i>Esquema de interfaz MB /escoria y líneas de corriente</i>	21
Figura 16. <i>Patrones de medición y columnas de electrodos utilizados</i>	22
Figura 17. <i>Nivel de MB por el método de la barra corroída</i>	23
Figura 18. <i>Señales pivote en superposición con niveles de MB</i>	25
Figura 19. <i>Tiempo de medición no es constante</i>	26
Figura 20. <i>Esquema de una DWT</i>	29
Figura 21. <i>Árbol de descomposición wavelet</i>	30
Figura 22. <i>Ejemplo de señal original y descomposición wavelet</i>	31
Figura 23. <i>Señal original P3-15 y señal sintetizada</i>	32
Figura 24. <i>Grupos de señales y electrodos</i>	33
Figura 25. <i>Índice basado en comportamiento por rangos</i>	34
Figura 26. <i>Rangos de nivel de MB según grupos activados</i>	34

Figura 27. <i>Comportamiento de señal original y nivel de MB con barra</i>	35
Figura 28. <i>Señal original, señal sintetizada e índice</i>	36
Figura 29. <i>Mediciones con algoritmo v/s método barra corroída</i>	37
Figura A.1. <i>EIT usando un phantom cerrado</i>	44
Figura A.2. <i>Secuencia con patrón cruzado</i>	45
Figura A.3. <i>Máxima variación de nivel de MB durante validación</i>	46
Figura A.4. <i>Propuesta de secuencia de medición</i>	47

RESUMEN

El horno Convertidor Teniente n°2 se encuentra en el inicio de la línea de procesos de La Fundición Chuquicamata, fundiendo el concentrado seco de cobre para producir principalmente dos fases: Metal Blanco y escoria fayalítica. Por diferencias de densidad de estas dos fases y su baja solubilidad, el Metal Blanco se va al fondo del horno y la escoria fayalítica queda encima. Sin embargo, para los operarios no resulta fácil conocer el nivel en que se encuentra la fase de Metal Blanco. Actualmente el operario introduce una barra de acero dentro del horno, la que una vez retirada viene deformada por corrosión, luego los bordes de esta deformación son interpretados por el operario de manera que obtiene una estimación del nivel de Metal Blanco.

El presente trabajo trata sobre el estudio de las señales provenientes del instrumento Sensor de Nivel de Fases, diseñado e implementado por el IM2. Se ha encontrado que se puede discriminar entre las fases de Metal Blanco y escoria fayalítica a través del análisis de la estructura de algunas señales con el uso de wavelets, determinando rangos discretos de altura de nivel de Metal Blanco prácticamente a tiempo real.

El control sobre la operación del horno tiene beneficios en la seguridad de los trabajadores y del entorno laboral, en el cuidado del medio ambiente, debido a la disminución en la emanación de gases, y una mejora en la productividad del horno y de toda La Fundición.

1. INTRODUCCIÓN

Chuquicamata es una mina de cobre y oro a cielo abierto, con proyecciones de minería subterránea, ubicada en la Región de Antofagasta, Chile. Es considerada la mina más grande del mundo en su tipo, pertenece a la División Codelco Norte, la cual es la segunda mina mayor en capacidad de producción de cobre en el mundo (Schlesinger, King, Kathryn, & Davenport, 2010). La mina posee una superficie de 800 [ha] y unos 1.250 [m] de profundidad. Su administración está en manos de Codelco, empresa estatal.

Durante el año 2011, la producción de cobre fino en Chuquicamata fue de 443.000 toneladas, equivalente a un 8% de la producción nacional durante el mismo año (Comisión Chilena del Cobre, 2013). La División Chuquicamata cuenta actualmente con minería a cielo abierto, fundición y refinería.

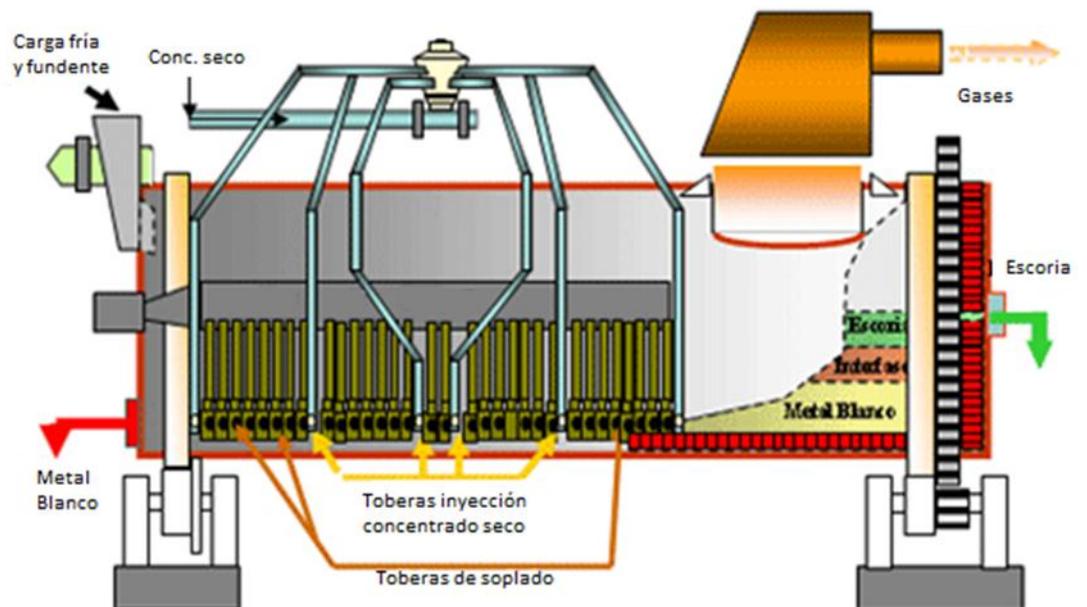


Figura 1. Esquema del Horno Convertidor Teniente 2 de la Fundición Chuquicamata.

Dentro de la Fundición Chuquicamata de Codelco, el horno Convertidor Teniente 2 (CT-2) se encuentra en el inicio de la línea de procesos (ver Figura 2), fundiendo y convirtiendo en parte el concentrado de cobre para producir Metal Blanco (~75% Cu) y escoria fayalítica (~8% Cu), además de la emanación de gases sulfúricos, nitrógeno, oxígeno, vapor de agua, CO₂ y CO que son atrapados, en parte, por una campana recolectora (ver Figura 1) y llevados a la planta de limpieza de gases, donde se tratan para fijar el azufre en forma de ácido sulfúrico. Este proceso es idealmente continuo, a excepción de eventos de reparación o la espera de disponibilidad en las siguientes etapas de la línea de procesos. El Metal Blanco se transporta mediante tazas hacia los convertidores Peirce Smith, donde continúa el proceso de producción con la etapa de conversión (CIMM E&G, 2003).

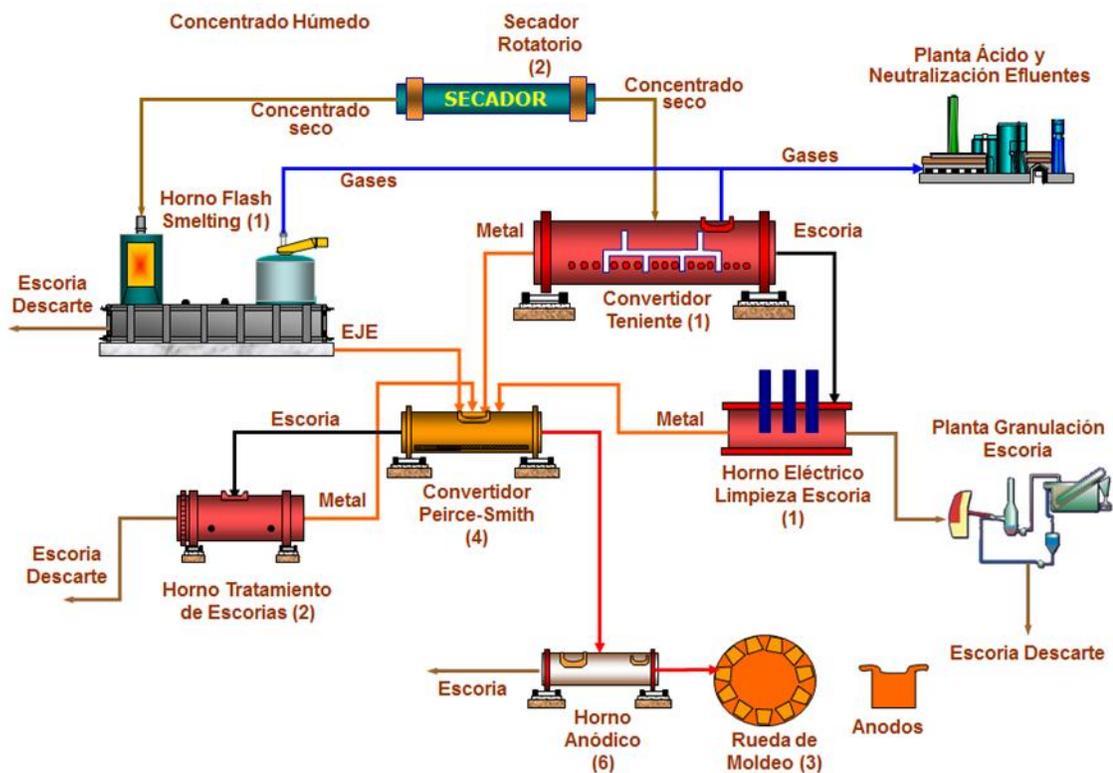
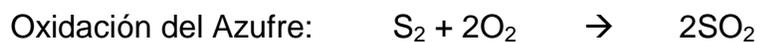


Figura 2. Diagrama de flujos de La Fundición Chuquicamata.

El proceso alternativo al del CT, dentro de la línea de procesos de La Fundición, es el que ejecuta el horno Flash, el cual produce EJE (~60% Cu) y escoria de descarte; los hornos Flash son excelentes desde el punto de vista ambiental porque producen gases ricos en SO₂, el cual puede recuperarse eficientemente como ácido sulfúrico, sin embargo el proceso del horno Flash es por lotes (no continuo), por lo que es menos productivo que el CT.

La tecnología del CT se aplica exitosamente en Chile desde 1977, año en que fue desarrollada.

Las principales reacciones de oxidación que ocurren a consecuencia del soplado del baño fundido son:



El oxígeno inyectado oxida el azufre pirítico y el FeS mientras que el calor generado por estas oxidaciones funde una nueva carga (Comisión Chilena del Cobre, 2004).

En la operación del CT, a través de la inyección de oxígeno al fundido (1.240°C) se produce oxidación, formando principalmente dos fases: Metal Blanco (MB) y escoria fayalítica, además de una supuesta tercera fase llamada interfase, en donde existirían componentes de materiales de las dos fases previas y donde sería ideal realizar la inyección del oxígeno (CIMM E&G, 2003).

La baja solubilidad del MB en la escoria y sus diferencias relativas de densidad provocan que el MB decante al fondo del horno.

$$\text{Densidad de MB} = 4,8 \text{ \{FeS\} a } 5,6 \text{ \{Cu}_2\text{S\} [g/cm}^3\text{]}$$

$$\text{Densidad de escoria} = 2,8 \text{ a } 3,8 \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

Si se inyecta oxígeno en la fase escoria, ésta se espuma atrapando el oxígeno en burbujas prontas a explotar. Es un evento no deseable en la operación pues implica inseguridad para los trabajadores, deterioro del ambiente de trabajo y de los equipos, y una disminución en la productividad; se pierde MB arrastrado en la escoria que se desparrama por la boca del horno.

Cuando el nivel de MB está muy bajo, la escoria alcanza la zona de reacción y atrapa el aire de soplado, provocando la formación de burbujas. Este evento es conocido como espumado de escoria. Es muy peligroso debido a que estas burbujas ocupan mayor volumen y pueden salir por la boca del horno, rebalsando con material muy caliente. El espumado de escoria puede suceder también cuando la escoria se encuentra muy viscosa.

Se resumen los efectos de los dos casos no deseados observados (CIMM E&G, 2003):

a. Fase de Escoria llega a la zona de reacción (nivel de MB muy bajo)

- Espumado de escoria.
- Escoria rebosa por la boca del convertidor, gran cantidad de material a cancha con alto contenido de cobre, incrementando la generación de materiales a recirculación.
- Evento de alto riesgo para la seguridad de las personas.
- Evento de alto riesgo para los equipos del entorno.

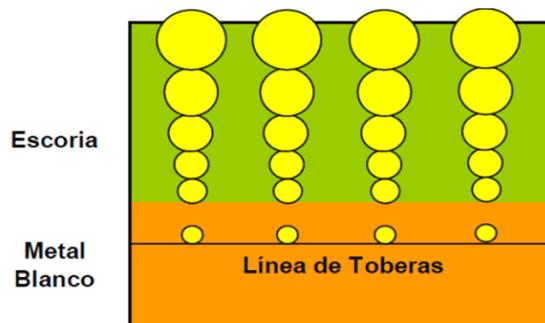


Figura 3. *Espumado de escoria, el aire oxigenado es atrapado por la escoria.*

Por otro lado, si se inyecta oxígeno a una profundidad muy baja en el MB, el oxígeno se asocia con el sulfuro, el cual escapa en forma de SO_2 , provocando la formación de cobre metálico al fondo del horno y aumentando las emanaciones de gas por la boca del horno, el cual deteriora las condiciones laborales y contamina el aire de la zona. Como todo caso extremo, es un evento no deseado.

b. Fase de MB sobrepasa los límites (nivel de MB muy alto)

- MB en zona de reacción genera cobre metálico.
- Acumulación de cobre metálico en el piso y recubrimiento refractario, perjudicando la operación normal del equipo.
- Problemas con el pasaje de sangría de MB.
- Mayor arrastre de Cu en las escorias.

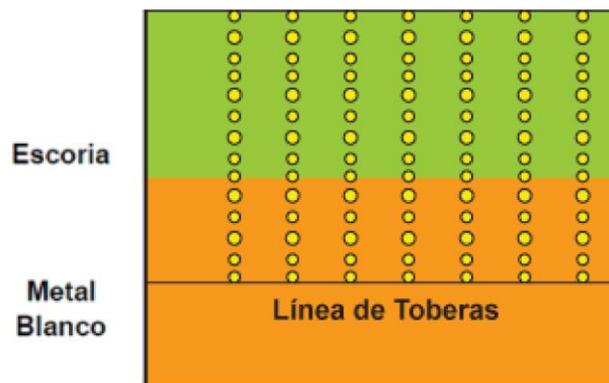


Figura 4. Nivel de MB muy alto, el aire oxigenado reacciona con Cu_2S .

Utilizar el nivel adecuado de MB durante la operación significa una mejora en la productividad y en la calidad de los productos, además de una seguridad para la continuidad de los procesos que le siguen en la cadena de procesos de la Fundición. También significa seguridad en el ambiente laboral, disminuyendo los riesgos de derrame, y la cantidad de gases emanados, lo que mejora la operación en el sentido ambiental. La Figura 5 agrupa estas mejoras según un enfoque de desarrollo sostenible.



Figura 5. *Mejoras en operación debido al control, desde un enfoque sostenible.*

Conocer la altura de la fase de MB permite además estimar el volumen y por ende, tener una estimación del inventario. El nivel ideal de MB en la operación del CT se encuentra entre los 25 a 45 [cm] por sobre la línea de toberas (CIMM E&G, 2003).

Sin embargo, lo que ocurre dentro de un horno de fundición no queda expuesto a la simple vista, saber hasta donde alcanza el nivel del MB depositado en la parte inferior no es fácil, principalmente debido a la gran cantidad de energía que involucra el proceso, i.e. alta temperatura de operación (1.200°C).

Actualmente y hasta la fecha, la medición del nivel de MB se ha llevado a cabo introduciendo una barra de acero dentro del horno y luego, al ser retirada, un operario interpreta la corrosión y adherencia de escorias en la barra, de manera que obtiene una estimación del nivel de MB. Esta medición se realiza generalmente cada un plazo de una hora y a veces no entrega información válida.

Una optimización en la operación del CT-2 tendría impactos en toda la línea de producción de la Fundición, tanto en reducción de tiempo y costos de operación como en la seguridad de los trabajadores que operan en este horno.

En este trabajo se intenta obtener un método para determinar la altura aproximada del MB a través del análisis de los datos provenientes desde el instrumento, aprovechando las diferentes resistividades (o conductividades) de los medios materiales presentes en el baño interior del CT.

El método de inyección de corriente y medición de voltaje para determinar la presencia de medios de distinta resistividad (o conductividad) en un espacio de sondeo se utiliza en varias áreas de la ingeniería: en geofísica para la prospección de minerales y búsqueda de acuíferos, monitoreo de derrames y proyectos de restauración, entre otros; en medicina para tomografía no invasiva de los pacientes; y en control de calidad para dispositivos electrónicos; entre otros (Reynolds, 2011).

En este caso existe una diferencia importante respecto de las aplicaciones mencionadas. La temperatura del medio a explorar es mucho mayor, en torno a los 1.200 - 1.270 °C durante la operación normal del CT, en comparación a los casos convencionales que operan a temperatura ambiente 20 – 40 °C. Por lo que este trabajo es innovador al respecto y es de gran interés, en particular para la industria minera.

El presente trabajo de investigación se enmarca dentro del proyecto de investigación P68-11 que lleva a cabo el Instituto de Innovación en Minería y Metalurgia (IM2), filial de Codelco.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo es el estudio de las señales eléctricas resistivas provenientes de las mediciones del instrumento Sensor de Nivel de Fases y encontrar rangos de altura de nivel de Metal Blanco en la operación normal del Horno Convertidor Teniente 2 de la Fundición Chuquicamata, Codelco.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabajo incluye los siguientes objetivos específicos:

1. Definir los parámetros de operación para medir nivel de Metal Blanco en reactor Convertidor Teniente.
2. Analizar y obtener secuencia de medición óptima para determinar el nivel de la fase Metal Blanco.
3. Aplicar métodos resistivos en reactores pirometalúrgicos de manera de discriminar sus fases líquidas.
4. Desarrollo de algoritmo en MatLab para determinar nivel de la fase Metal Blanco y mostrar alarmas para niveles dados en una GUI.
5. Investigar la factibilidad de aplicar tomografía de resistividad eléctrica para un baño fundido de cobre entre 1.200°C y 1.270°C.

2. INSTRUMENTO SENSOR DE NIVEL DE FASES

El instrumento Sensor de Nivel de Fases fue implementado para el CT-2 de la Fundición Chuquicamata. El funcionamiento de este sensor consiste en realizar inyección de corriente eléctrica mientras mide simultáneamente potencial eléctrico entre diferentes pares de electrodos, los cuales están fijos a la culata del horno. El sistema almacena la información obtenida desde los electrodos, junto a la fecha en que fueron realizadas las mediciones, en un archivo binario.

En el esquema de la Figura 6 se muestra el instrumento, compuesto por 20 electrodos de acero inoxidable, cables y su canalización, y el sistema de control del instrumento. Luego los datos son procesados por un computador externo.

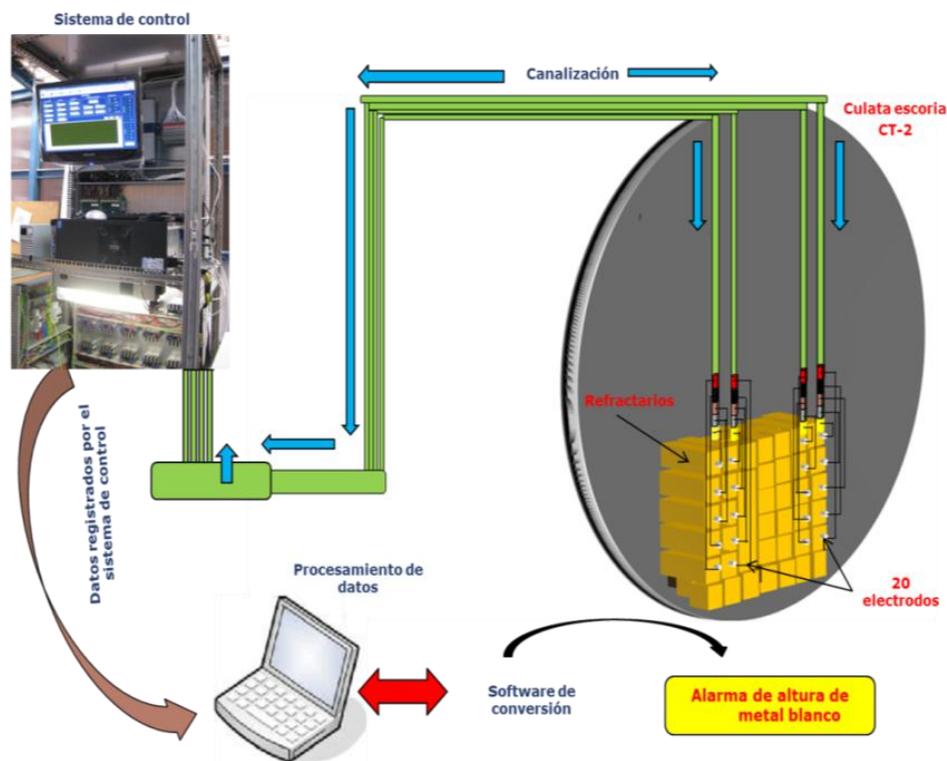


Figura 6. Esquema de las componentes principales del Sistema Sensor de Nivel de Fases actual.

2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA

El sistema de control se compone de un armario con espacio para sus componentes, una pantalla y procesador, relés, entre otros. También se tiene un subsistema de climatización que mantiene una temperatura baja dentro del armario.

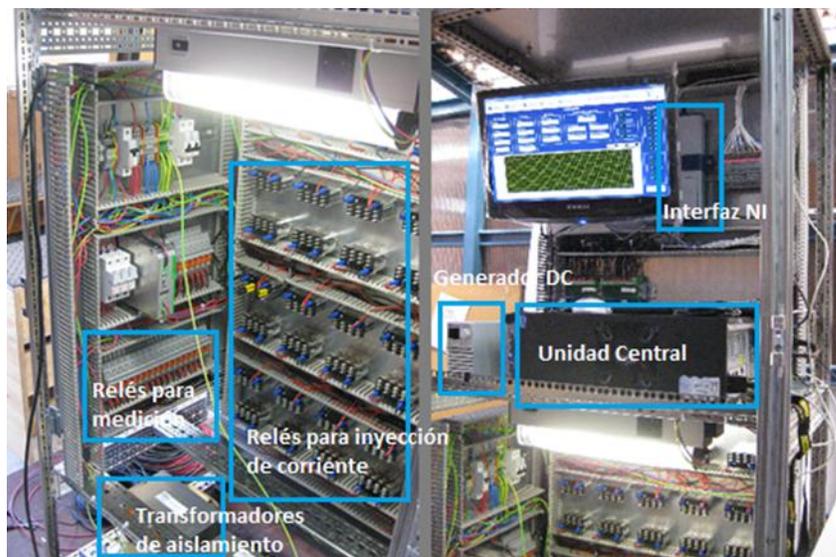


Figura 7. Sistema de control.

Para activar los diferentes relés que se utilizan para la selección de electrodos en los procesos de inyección de corriente y medición de voltaje, se cuenta con 2 tarjetas de la *National Instruments* (NI): una para la inyección de corriente y otra para la medición de voltaje.

La administración de la rutina de adquisición de datos se basa en un computador de alto rendimiento con Windows 7 profesional de 32 bits, llamado la *Unidad Central*. Desde la Unidad Central se ajusta la amplitud de corriente y el voltaje a aplicar entre electrodos, la elección entre DC o AC, y la secuencia o rutina de selección de electrodos a utilizar.

Se tiene una fuente programable de voltaje de 400 [W], 0-20 [V] y 0-20 [A], la cual puede ser controlada a través de un puerto RS232. Posee 2 modos de operación, a voltaje constante, o corriente constante.

Para el sistema de medición de corriente, se cuenta con dos transductores de corriente de marca LEM con un ancho de banda de 300 [Hz] y una capacidad de corriente nominal de 25 [Arms].

La inyección de corriente de alta intensidad AC se realiza a través de un amplificador que tiene la capacidad de generar una señal de alta corriente y bajo voltaje (HCLV). Este amplificador permite la variación de la amplitud de corriente, con un valor máximo de 20 [A] continua y 25 [A] pulsante.

Se tienen dos grupos de relés. El primero es para la inyección de corriente o alimentación de los electrodos, que cuenta con 40 relés electromecánicos. Cuentan con una rápida respuesta a la desconexión y conexión. El segundo grupo es para la medición y seguridad, cuenta con 45 relés de estado sólido, de rápida respuesta a la desconexión y conexión.

Un armario de acero inoxidable, de dimensiones 2 x 0,8 x 0,6 [m³]. Cumple con la norma NEMA 4X, esto es, impermeable y resistente a la corrosión, a vientos de polvo, a chorros dirigidos de agua y a la formación externa de hielo. Este armario almacena al PC, la fuente DC, los relés y demás componentes del sistema.

Los electrodos a utilizar en el instrumento Sensor de Nivel de Fases son de acero inoxidable austenítico AISI 310. El largo de los electrodos es de 1 [m], el diámetro es de 22 [mm]; considerando experiencias pasadas los electrodos deberían durar todo el período de una campaña (aprox. 1 año).

2.2. INSTALACIÓN EN EL CT-2

La localización de los electrodos se muestra en la Figura 8, que corresponde a la culata de sangrado de escoria. Se cuenta con 4 columnas con 5 electrodos cada una, los cuales están enumerados por filas desde el borde inferior izquierdo hasta el borde superior derecho. La ubicación e instalación de los electrodos están restringidas por la estructura y operación del CT-2.

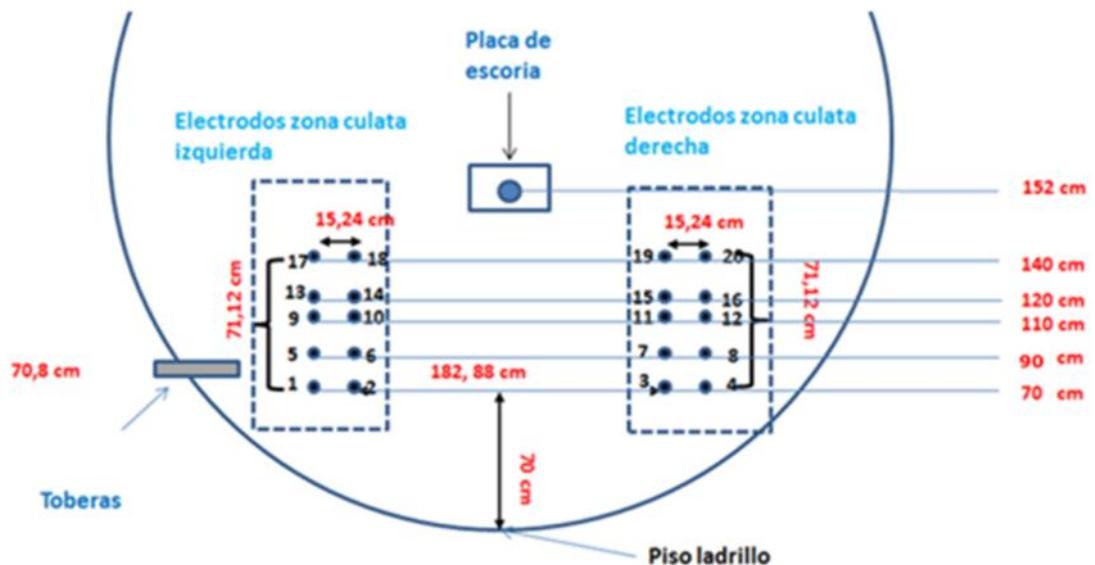


Figura 8. Culata de sangrado de escoria del horno CT-2, los electrodos están marcados en azul y enumerados 1-20.

Si bien este es el plano original de instalación, se debe considerar que en la práctica los agujeros perforados en la capa refractaria pueden estar ligeramente desplazados, en el orden de los centímetros. La enumeración de los electrodos aquí indicada es utilizada durante todo el documento.

2.3. CONFIGURACIÓN DEL INSTRUMENTO

La adquisición de datos se configura directamente en el Sistema de Control, en un software diseñado en LabView por la empresa ETT, el cual permite realizar 4 secuencias de medición sucesivas, siendo cada secuencia independiente con hasta 10 combinaciones de electrodos.

Es posible indicar si se desea utilizar 2 o 4 puntas para realizar una secuencia, además de indicar un voltaje de referencia de hasta 5 [V] para la inyección de corriente, seleccionar DC o AC y su frecuencia, e indicar cuales electrodos se utilizan en cada combinación.

La medición de una combinación de electrodos requiere un tiempo de entre 2.160 a 2.200 [ms], esto incluye el tiempo de respuesta de los relés y un tiempo de medición de 1 [s] para registrar el voltaje a una razón de 3.000 [muestras/s].

El registro de cada medición se realiza en un único archivo binario, e incluye la corriente de inyección de entrada I_1 , la corriente de inyección de retorno I_2 , el voltaje de medición V , la medición indirecta de resistencia $R = V / I_1$, la frecuencia de la corriente, la fecha y hora, un índice de combinación asociado a la medición iC , y otros índices para la detección de posibles errores en el funcionamiento de algunas componentes del Sistema de Control.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología utilizada consiste en la inyección de corriente a través de 2 electrodos, mientras que simultáneamente se mide el voltaje entre los mismos 2 electrodos (técnica de 2 puntas) o entre otros 2 electrodos (técnica de 4 puntas). Cada dato incluye la medición de la corriente inyectada y el voltaje, además de la fecha; el tiempo de medición entre un dato y otro toma aproximadamente 2,2 [s], lo que incluye 1[s] de medición de corriente y voltaje, más el tiempo asociado a los relés para cambiar de combinación de electrodos.

En primer lugar, se comprobó la reproducibilidad de las mediciones, es decir, que las señales muestren un patrón similar para un mismo estado de medio interno del horno. Para esto, se ejecutan diferentes combinaciones de electrodos en las mediciones, con inyección de corriente entre pares verticales de electrodos, horizontales y diagonales; utilizando 2 y 4 puntas.

Se encuentra que ciertos patrones de medición son adecuados para la detección del nivel de MB, por lo que se selecciona una configuración de secuencias de medición entre pares verticales de electrodos para un posterior análisis.

Por otro lado, la información asociada a la operación del CT (sangrados de MB, sangrados de escoria, giros, reparaciones) se obtiene a través del sistema PI de información, propia y perteneciente a Codelco.

Con el fin de comparar las mediciones realizadas por el instrumento y calibrar el mismo, se registran las mediciones realizadas por el método de la barra corroída durante una semana en horario diurno, en que un operador introduce una barra de acero dentro del horno durante 5 minutos y luego al retirar se lee e interpreta la deformación de la misma para obtener un nivel de MB.

3.1. PRUEBAS PRELIMINARES

Para realizar las pruebas preliminares, se configuró el instrumento de tal forma que midiera sucesivamente sobre una misma secuencia de una o pocas combinaciones de electrodos, esto se realizó para cada secuencia durante a lo menos 3 horas consecutivas.

Se realizaron mediciones primero entre electrodos horizontales: P1-2 (para ver la notación utilizada y la ubicación de los electrodos ver Figura 8), P3-4, P5-6, P7-8, P9-10, P11-12, P13-14, P15-16, P17-18 y P19-20; luego mediciones secuenciales entre pares horizontales dentro de una columna doble (electrodos en el lado izquierdo y en el lado derecho de la culata): P1-2, P5-6, P9-10, P13-14 y P17-18; P3-4, P7-8, P11-12, P15-16 y P19-20; P2-3, P6-7, P10-11, P14-15 y P18-19; seguido de mediciones secuenciales entre pares verticales: P1-5, P5-9, P9-13 y P13-17; P2-10, P6-14 y P10-18; P3-19, P7-15, P5-11 y P11-15; luego se continuó con mediciones utilizando 4 puntas: I1-4 y V2-3; I5-8 y V6-7; I9-12 y V10-11; I13-16 y V14-15; I17-20 y V18-19; I1-20 y V en pares horizontales centrales; I1-4 y V en pares horizontales centrales; I9-12 y V en pares horizontales centrales; I17-20 y V en pares horizontales centrales; I1-17 y V en pares verticales izquierda; I4-20 y V en pares verticales derecha; dipolo-dipolo en cuartetos horizontales.

Se muestra a continuación las curvas típicas obtenidas durante la operación del instrumento:

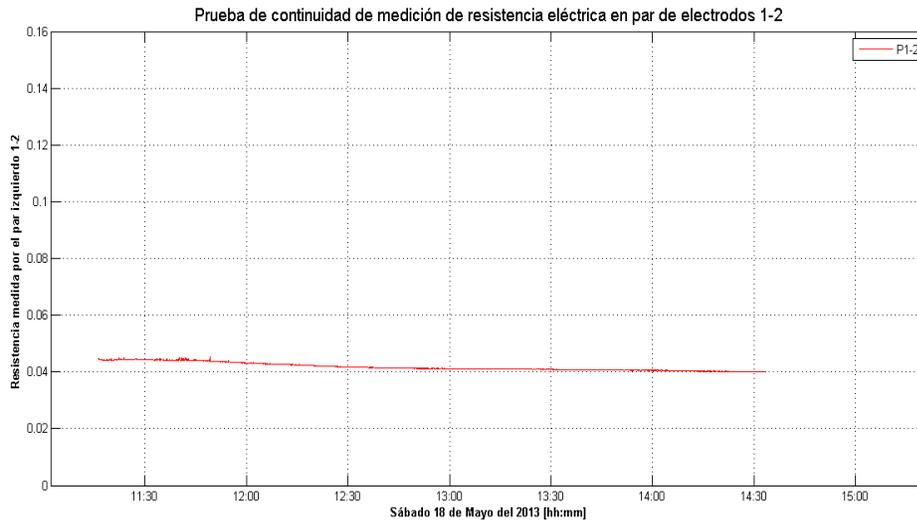


Figura 9. Prueba en P1-2.

Los pares horizontales más bajos P1-2 y P3-4 muestran una curva de medición suave, sin grandes distorsiones. Esto se entiende como una medición con los electrodos completamente sumergidos en MB, un medio homogéneo que no presenta fluctuaciones en la señal de medición.

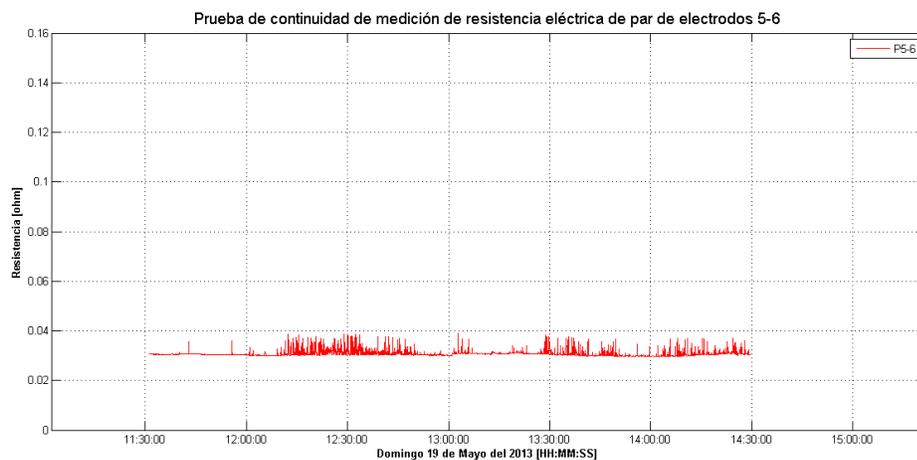


Figura 10. Prueba en P5-6.

En los pares siguientes hacia arriba (Figura 10) comienza a exhibirse cierta fluctuación en la señal, con incrementos en el valor de la resistencia medida,

durante algunos instantes, lo que se asocia a un nivel bajo de MB, cercano a la posición de los pares en cuestión, de modo que la fase de escoria se encuentra cerca, provocando subidas en la resistencia medida.

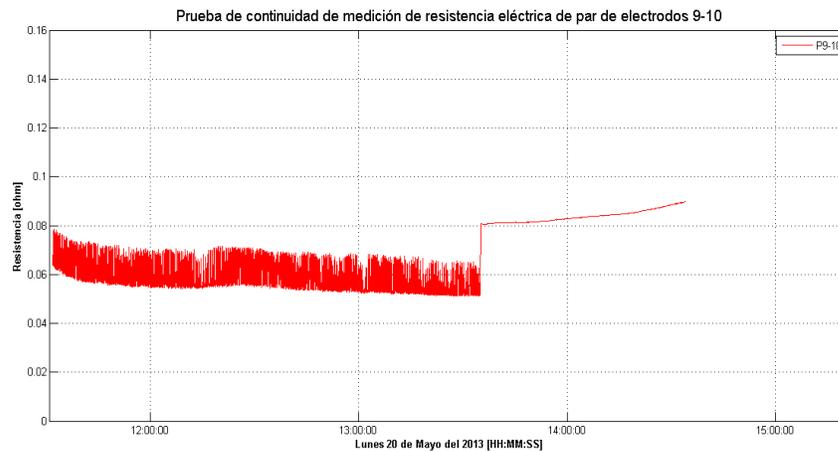


Figura 11. Prueba en P9-10.

Puede notarse en la Figura 11, que en la medición de P9-10 se observa una gran fluctuación. Además se observa en el mismo par un giro del horno, el cual provocó que los electrodos 9 y 10, situados a la izquierda, se eleven y toquen la zona de plena escoria o la zona de gas.

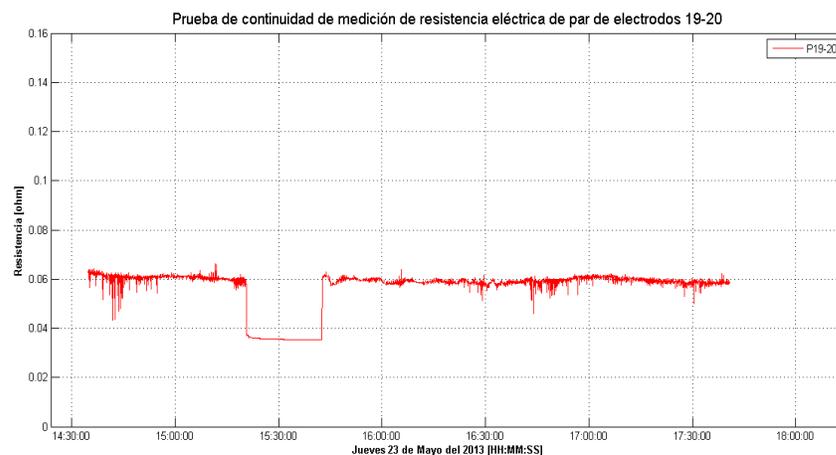


Figura 12. Prueba en P19-20.

En la medición del par P19-20 (Figura 12) se observa nuevamente un giro del horno que, en este caso, sumerge los electrodos en MB, reduciendo de manera muy marcada la resistencia medida y dejando la señal suave (sin fluctuación). El giro tuvo una corta duración, de unos 20 minutos. Luego del giro, transcurre un tiempo de unos 10 minutos hasta que la señal vuelve a registrar las variaciones típicas.

La siguiente medición (Figura 13) muestra una secuencia de 5 combinaciones, en donde se observa que el par más bajo P1-2 presenta una magnitud más alta que el par que le sigue P5-6. Sin embargo el comportamiento de P1-2 es siempre suave, mientras que P5-6 presenta tramos con fluctuación. A eso de las 9:30 AM, P5-6 muestra fluctuación justo cuando P13-14 y P9-10 cambian también su comportamiento. Esto muestra que el instrumento es muy sensible a los cambios de medio.

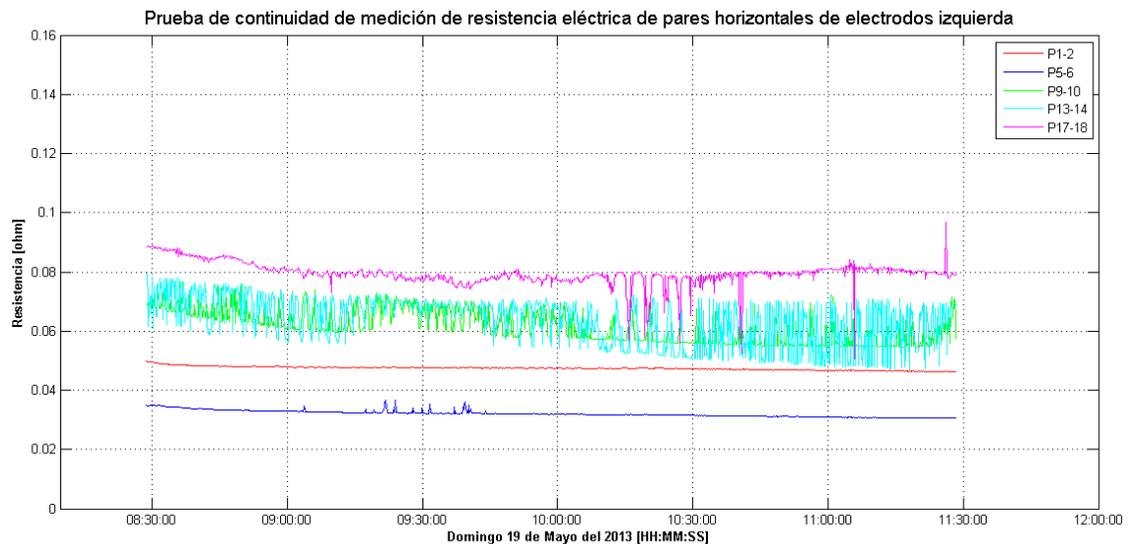


Figura 13. Prueba en pares horizontales del lado izquierdo de la culata.

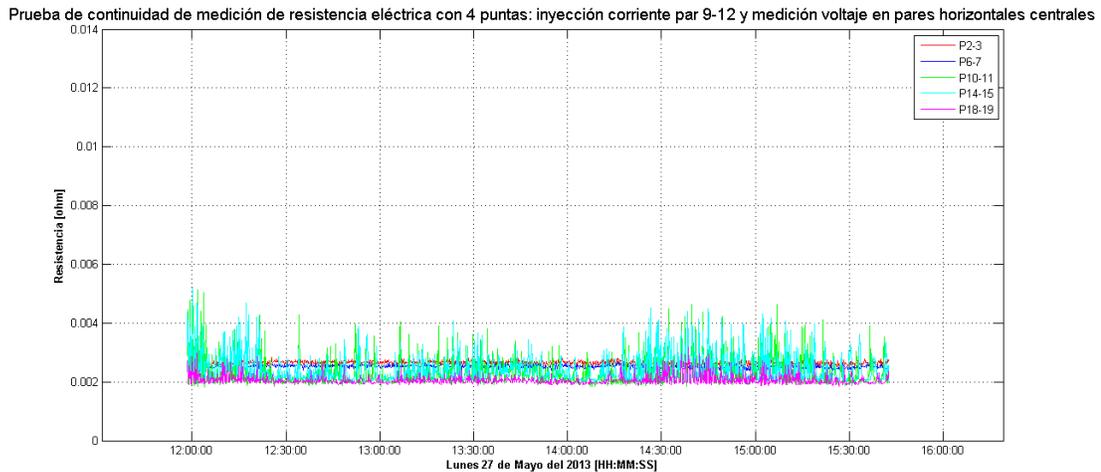


Figura 14. Prueba con 4 puntas: I9-12 y V en pares horizontales centrales.

Se realizaron pruebas con el método de 4 puntas, las que no arrojaron mayor diferencia con respecto de los resultados obtenidos con el método de 2 puntas, por lo tanto, se consideró utilizar el método de 2 puntas.

3.2. SELECCIÓN DE SECUENCIAS DE MEDICIÓN

La versatilidad del instrumento permite seleccionar pares de electrodos orientados en diversas direcciones. Sin embargo, luego de realizar algunas pruebas preliminares se optó por utilizar configuraciones con los pares de electrodos dispuestos de forma vertical. Esta configuración permite tener una mayor precisión en la determinación del cambio de rango de nivel del MB.

Se realizan mediciones entre pares verticales con dos patrones: *pares con pivote*, esto es, por ejemplo: P1-5, P1-9, P1-13 y P1-17 en una secuencia; y *pares cortos*, esto es, por ejemplo, P1-5, P5-9, P9-13 y P13-17 en una secuencia.

Se decidió utilizar pares de electrodos verticales ya que la orientación de la interfaz MB/escoria es horizontal, por lo que un mayor número de líneas de corriente serían afectadas, aumentando la sensibilidad a los cambios en la altura de la interfaz (ver Figura 15).

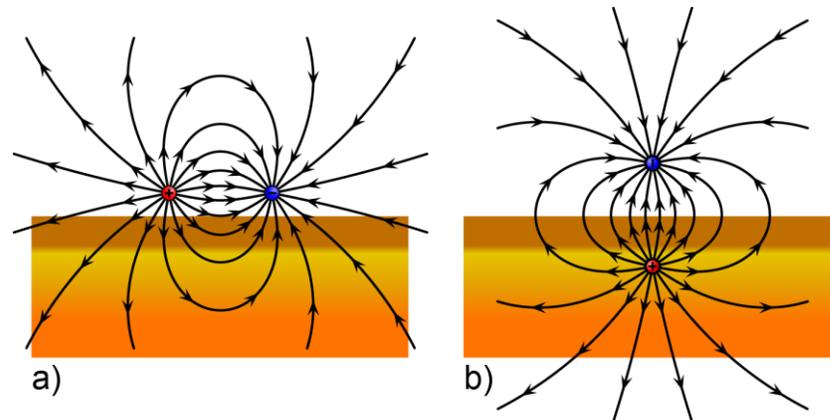


Figura 15. Esquema de interfaz de MB/escoria y líneas de corriente para pares de electrodos horizontal (a) y vertical (b).

Por lo tanto, es de esperar que el instrumento tenga mejor respuesta, mayor sensibilidad y confiabilidad en mediciones con pares verticales que con pares horizontales. En la Figura 15 se omite el efecto de refracción que causaría un cambio de medio sobre las líneas de corriente.

Las mediciones con pivote y de pares cortos se realizan primero para las 4 columnas de electrodos; de donde se encuentra rápidamente que las 2 columnas de la derecha son más adecuadas para la toma de datos, esto es, los electrodos que se muestran en Figura 16. Esto se debe a que las columnas de la derecha, en general, se sumergen en el baño interno cuando el horno es girado, mientras que las columnas de la izquierda se elevan sobre el baño, lo que provoca que el material en las cercanías de los electrodos y los electrodos mismos pierdan temperatura y cambien sus propiedades, además de la posible adherencia de material escoria en las zonas en cuestión.

Se observó que la barra se deforma debido a la corrosión del medio interno del CT y luego este evento es interpretado por el operario en turno. Extraordinariamente y debido a la validación llevada a cabo, se solicitó a los operarios ejecutar la forma de medir como se ve en Figura 17, para poder así fotografiar y registrar las mediciones lo más claro posible.

En la parte inferior de la barra (en presencia de MB) hay mayor corrosión que en la parte superior (en presencia de escoria), dejando una zona de transición entre medio.



Figura 17. Operario observando nivel de MB por el método de la barra corroída.

Es importante señalar que cada operario interpreta la medición de distinta manera: algunos interpretan el nivel como el borde superior de la transición (e.g. 125 [cm] en Figura 17 izquierda); otros, como el borde inferior (e.g. 115

[cm] en Figura 17 izquierda); y otros, como la parte media (e.g. 120 [cm] en Figura 17 izquierda).

Además, el tamaño de la zona corroída varía en cada medición, siendo a veces muy notoria, de unos 3 a 5 [cm], hasta 15 [cm] en otras ocasiones. Incluso, a veces la lectura no logra entregar información válida.

Para efectos de la validación industrial, el equipo del IM2 decidió considerar el error en la medición de los operarios como ± 2 [cm], basándose en todas las mediciones registradas y en la existencia de distintos operarios.

4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

Inicialmente el análisis se abordó desde dos perspectivas: magnitud de la resistencia (o conductancia), y las fluctuaciones observadas en las señales de resistencia. Se observó que la magnitud de la resistencia varía con el tiempo cuando se consideran mediciones en el rango de semanas. Por otro lado, la magnitud de la resistencia demora un lapso de tiempo considerable en recuperar su valor luego de cambiar debido a un giro del horno (aproximadamente 6 minutos).

En la Figura 18 se observa las señales pivote de la columna 3 (bajo filtro pasa media: eliminando *spikes* de alta frecuencia además de efectos a muy largo plazo) en superposición con niveles de MB medidos por el método de la barra corroída durante una semana. Nótese que si bien las señales siguen al nivel de MB, esto es sólo por tramos, ya que al mediano y largo plazo existen efectos acumulativos que no tienen relación con el nivel de MB.

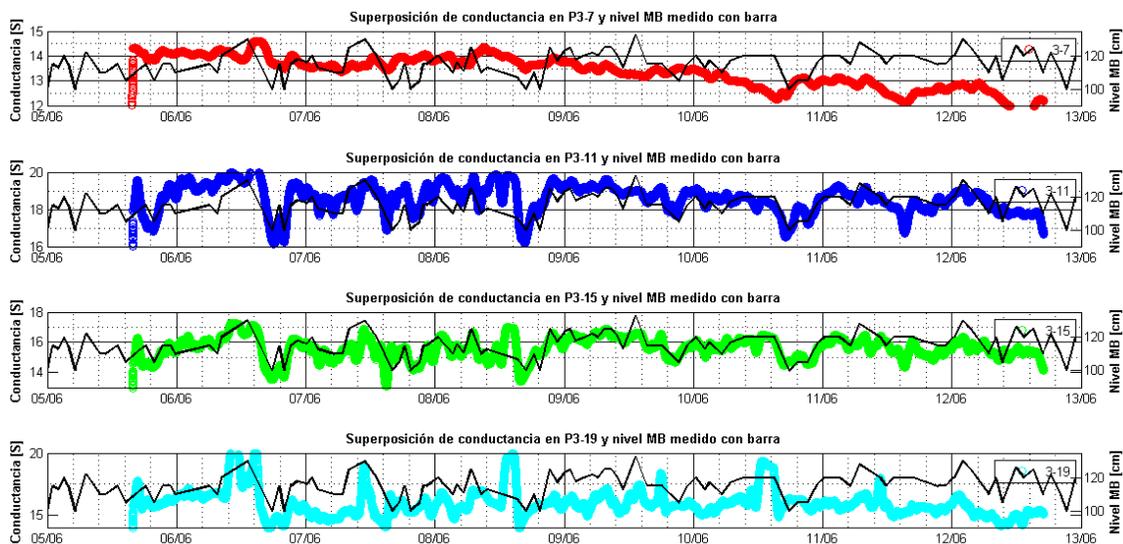


Figura 18. Señales columna 3 pivote en superposición con niveles de MB.

Otro inconveniente y un factor crítico con este método es que la frecuencia de muestreo del instrumento no es constante, sino que varía levemente en cada medición, variando el tiempo de medición en aproximadamente 12 a 25 [ms] (ver Figura 19).

La Figura 19 muestra el tiempo de medición durante aproximadamente 6 semanas de muestreo con una secuencia fija. Puede notarse que el tiempo ronda los 2.200 [ms] pero no es constante sino que fluctúa. Además, hubo un instante en que el tiempo de medición aumentó de manera extraordinaria de 2.160 a 2.200 [ms], donde aún se desconoce la razón de esta variación. Debido a estos motivos, es poco confiable utilizar análisis de frecuencia estándar, como la transformada de Fourier rápida, para analizar los datos en el mediano y largo plazo. Razón por la cual se consideró un análisis mediante la transformada wavelet que contempla distintas escalas de tiempo en forma simultánea.

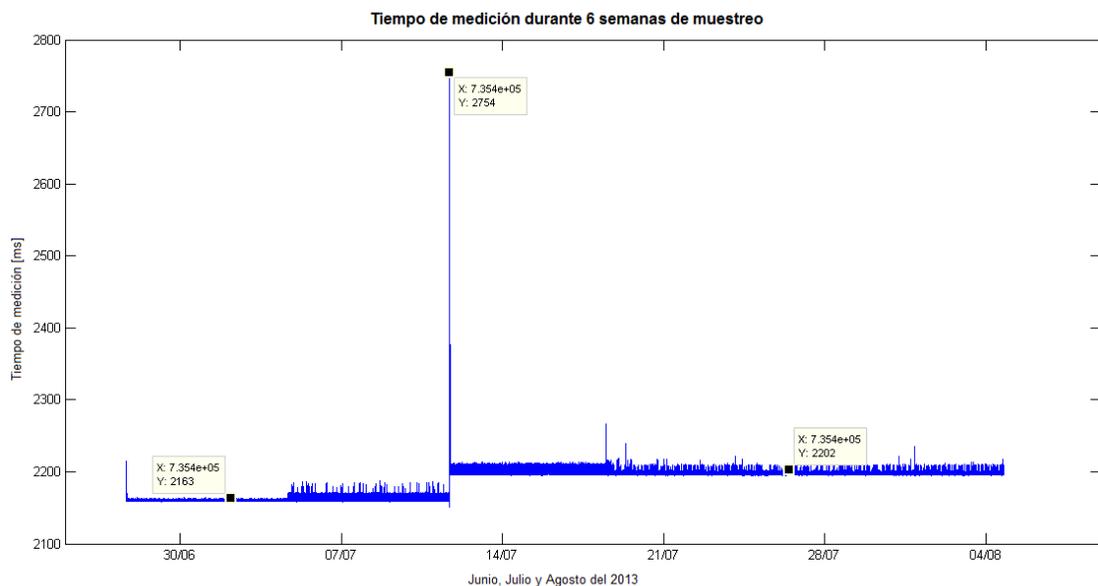


Figura 19. *Tiempo de medición del instrumento no es constante y tiene fluctuación.*

Además, la magnitud de la resistencia en un par de electrodos varía debido a factores que no se deben al nivel de MB cuando se analiza en el rango temporal de semanas. Por ejemplo, ver curva roja P3-7 en Figura 18, en donde a niveles similares de MB en los días 06/06 y 12/06 se tiene una magnitud diferente. Por este motivo se descarta la magnitud como un elemento de criterio para determinar en nivel de MB.

La segunda manera de analizar los datos es a través del comportamiento estructural de las señales, es decir, observando los niveles de variación de las señales. Se observó en las mediciones realizadas durante las pruebas de secuencias, que las señales poseen un comportamiento distinto en su estructura cuando el nivel de MB se encuentra en distintos niveles. Si un par de electrodos se encuentra sumergido en MB, la señal tiene un comportamiento plano (como se vio en la sección 3.1); pero si la interfaz se encuentra entre los electrodos, o en su cercanía, provocará variaciones rápidas en la magnitud de la señal detectada. De este modo es posible detectar sub-rangos de nivel de MB utilizando distintos pares de electrodos y la transformada wavelet para obtener un índice que indica si es que la señal posee variaciones rápidas o no.

Este índice se activa cuando la señal presenta variaciones rápidas y se desactiva cuando la señal es plana.

4.1. TRANSFORMADA WAVELET

A través de la transformada Fourier es posible expresar una señal como la suma de un conjunto de senos y cosenos, como se muestra en (4.1). Sin embargo, sólo posee resolución de frecuencias y no así temporal, por lo que es posible identificar las componentes de las frecuencias en una señal, pero no se sabe cuándo están presentes. Ya que el instrumento no mantiene una

frecuencia de muestreo fija, se propone la transformada wavelet para superar este problema.

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \quad (4.1)$$

La transformada wavelet representa cualquier función como una superposición de un conjunto de wavelets o funciones base (Mallat, 2009), las cuales se escalan y trasladan. Una wavelet es una función con media nula, que se puede representar por (4.2).

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (4.2)$$

Una familia de wavelets se obtiene al escalar ψ por s (ancho de una función base en particular) y al trasladar por u :

$$\psi_{s,u}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-u}{s}\right) \quad (4.3)$$

En donde $u \in \mathbb{R}$ y $s \in \mathbb{R}^+$. La transformada wavelet continua (CWT) es:

$$\mathcal{W}f(s, u) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \psi^*\left(\frac{t-u}{s}\right) dt \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) mide la variación de f en una vecindad de u proporcional a s (Mallat, 2009).

La desventaja de la CWT yace en su complejidad computacional. Para solucionar este problema, se introduce la transformada wavelet discreta (DWT). A diferencia de la CWT, la DWT descompone la señal en un set de wavelets mutuamente ortogonales (Tan, 2009). La wavelet discreta se define como:

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{s_0^j}} \psi\left(\frac{t-k\tau_0 s_0^j}{s_0^j}\right) \quad (4.5)$$

En donde $j, k \in \mathbb{Z}$, j , y $s_0 > 1$ es un paso de escala fijo.

En la Figura 20 se muestra en a) la descomposición de una señal x_0 a través de 2 filtros H_0 y H_1 , pasa-baja y pasa-alta, respectivamente. Esto produce una baja en la frecuencia de muestreo en un factor de 2 y los resultados son llamados coeficientes de aproximación A y coeficientes de detalles D ; luego en b) se muestra una reconstrucción de señal a partir de A y D , lo cual es el proceso inverso de la descomposición.

Para un banco de filtros perfectos, se tendría que $x_0 = \hat{x}_0$.

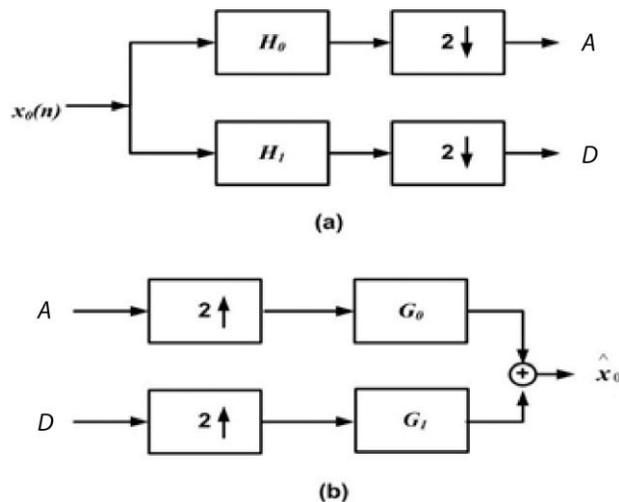


Figura 20. Esquema de una DWT a) descomposición; y b) reconstrucción.

La descomposición se puede repetir en cascada a los coeficientes de aproximación, cómo indica la Figura 21, obteniendo aproximaciones y detalles en cada nivel de descomposición.

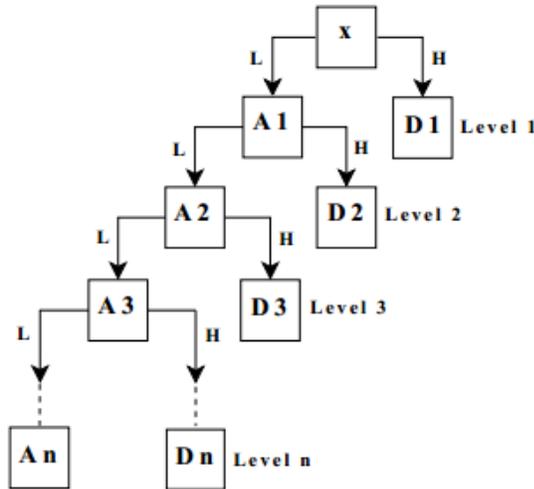


Figura 21. *Árbol de descomposición wavelet.*

La Figura 22 muestra un ejemplo de descomposición wavelet utilizando DWT hasta nivel 4, en donde se tiene una señal original (*Original Exchange Rate*) y la reconstrucción de señales sintetizadas que contienen separadamente aproximaciones y detalles en cada nivel correspondiente.

Una señal sintetizada puede desechar la información que no se desea integrar y así poder analizar sólo lo que es de interés. En este trabajo se reconstruyen señales sintetizadas que incluyen únicamente las componentes de detalle a niveles 1, 2 y 3.

Existe una gran cantidad de tipos de wavelet, entre ellos: Beylkin wavelet, BNC wavelets, Coiflet wavelet, Daubechies wavelet, Haar wavelet, Legendre wavelet. Si bien se utilizaron diferentes tipos de wavelet para analizar las señales, no se notaron grandes cambios en el resultado a través del procedimiento, por lo que finalmente se usó exclusivamente la Haar wavelet para el análisis de datos, ya que es la más simple.

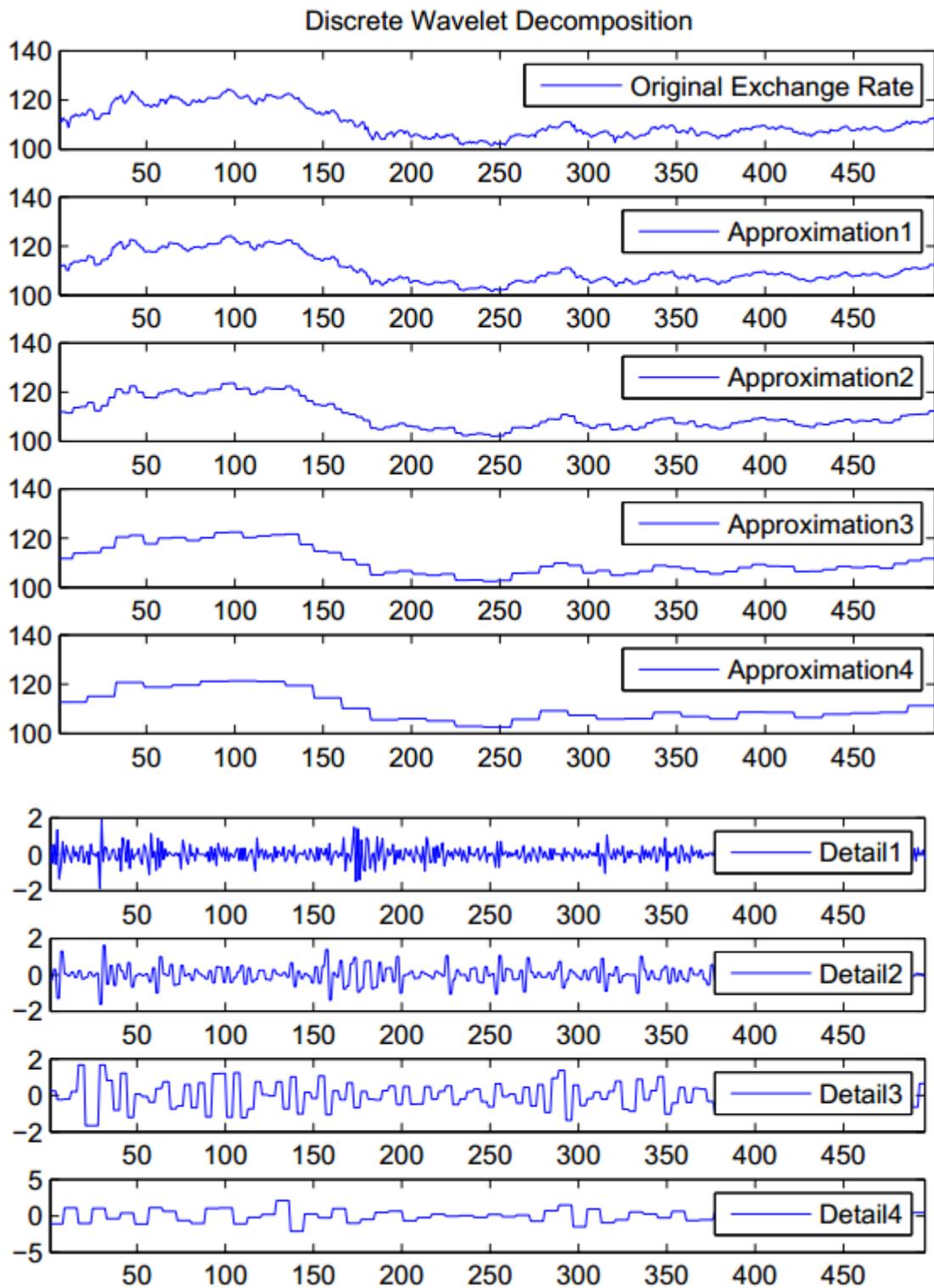


Figura 22. Ejemplo de señal original y descomposición wavelet.

4.2. COMPORTAMIENTO DE SEÑAL SEGÚN RANGOS DE NIVEL

Como se observa en la Figura 23, la señal original (azul) presenta a lo menos dos comportamientos: el primero viene a ser una señal suave, con gran continuidad respecto a un punto anterior; y el segundo comportamiento es la presencia de fluctuación.

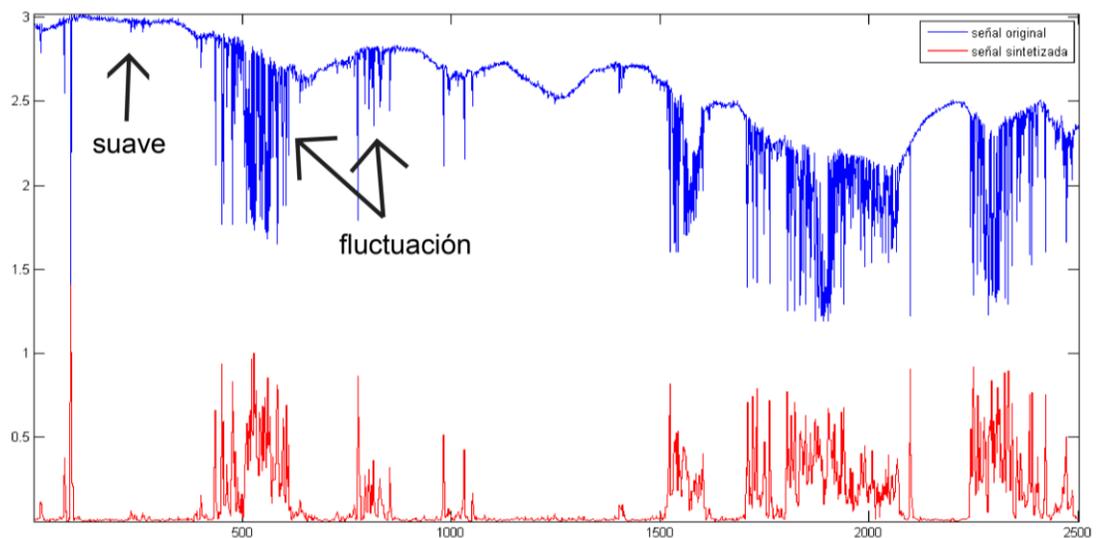


Figura 23. Señal original P3-15 y señal sintetizada.

Con la transformada wavelet discreta es posible obtener una señal sintetizada (rojo), en que se ha removido las aproximaciones y se ha dejado algunos detalles de la señal original. En particular, se ha descompuesto la señal original utilizando wavelets del tipo *haar* nivel 5 y se ha sintetizado una señal con la suma de los valores absolutos de las componentes de detalle a niveles 1, 2 y 3.

Luego de un análisis de las señales de la secuencia de medición durante 1 mes de muestreo, en conjunto a las mediciones de nivel de MB por el método de la barra, se encontró que algunas señales son confiables en diferenciar ciertos rangos de nivel de MB.

Los pares P3-11 y P4-12 (Grupo A) presentan fluctuación cuando el rango de nivel de MB está entre 90 y 110 [cm]; los pares P3-15 y P4-16 (Grupo B) presentan fluctuación cuando el rango de nivel de MB está entre 100 y 120 [cm]; los pares P7-11 y P8-12 (Grupo C) presentan fluctuación cuando el rango de nivel de MB está entre 95 y 115 [cm]; y los pares P11-15 y P12-16 (Grupo D) presentan fluctuación cuando el rango de nivel de MB está entre 90 y 120 [cm].

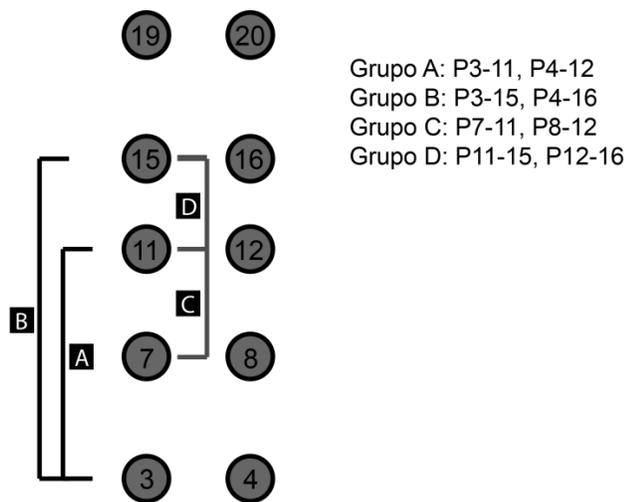


Figura 24. Grupos de señales y electrodos.

Estos rangos son aproximados, ya que se basan en comparar el comportamiento de las señales con los niveles medidos por el método de la barra corroída.

De cada señal se obtiene un índice, como se indica en Figura 25, donde se ha definido un umbral para otorgar un valor 0 o 1 (activado o desactivado) a partir de la señal sintetizada vía wavelets. Este umbral se ha definido basándose en el análisis realizado en que se observó el comportamiento de las señales y los niveles de MB.

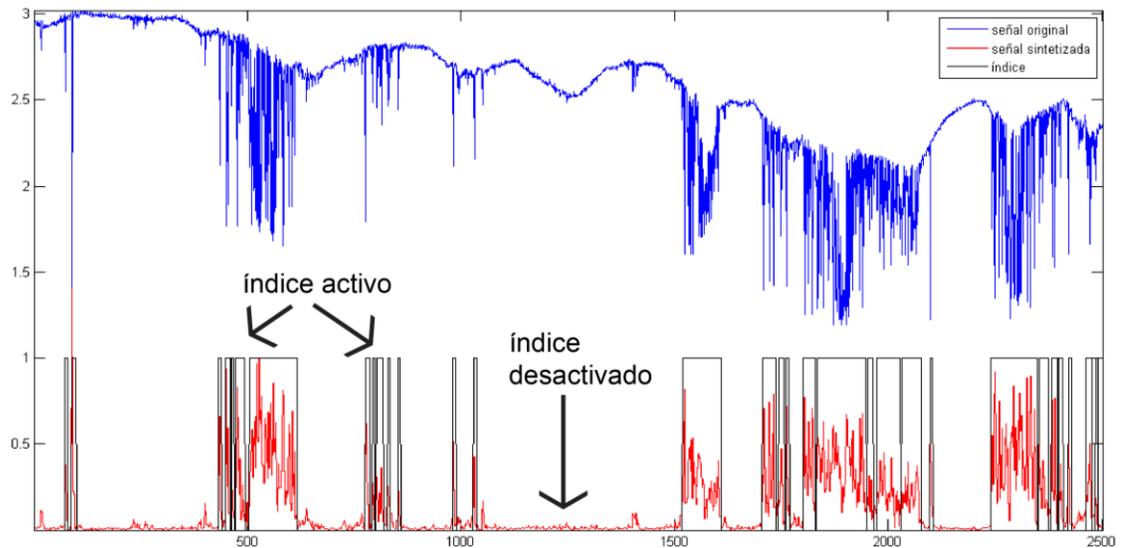


Figura 25. Índice basado en comportamiento por rangos para señal P3-15.

Luego se obtiene un índice grupal por disyunción para cada grupo A, B, C y D, e.g. índice grupal A estará activo (valor 1) si es que el índice de la señal P3-11 o si es que el índice de la señal P4-12 o si ambos estén activos. Finalmente, con estos 4 índices grupales se obtienen 3 rangos de nivel de MB basados en las permutaciones de los índices grupales (Figura 26), e.g. si los índices grupales A, C y D están activos entonces el nivel de MB está entre 90 y 100 [cm].

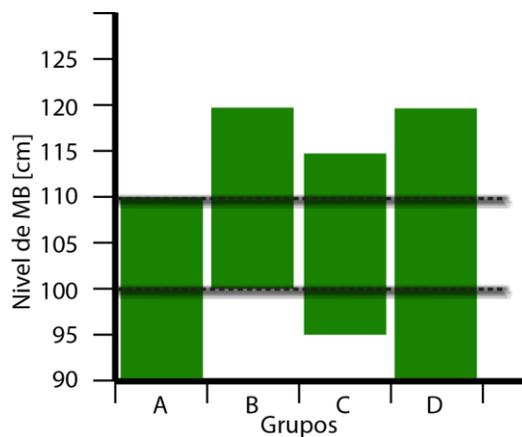


Figura 26. 3 Rangos de nivel de MB según grupos activados.

5. ANÁLISIS Y RESULTADOS

A partir de los datos originales, esto es, las señales de cada par de electrodos mencionados en la sección 4.2, se obtiene un índice tipo *switch* (con valor 0-1) que indica si detecta o no un sub-rango de nivel de MB. Posteriormente estos índices se utilizan para determinar un rango de nivel de MB.

La Figura 27 muestra el comportamiento de la señal original del par de electrodos P3-11 en superposición con las mediciones realizadas con el método de la barra. Se observa que cuando el nivel medido de MB está bajo los 110 [cm] aproximadamente, la señal muestra un comportamiento con fluctuación, en cambio, cuando el nivel de MB es superior, la señal es plana o suave.

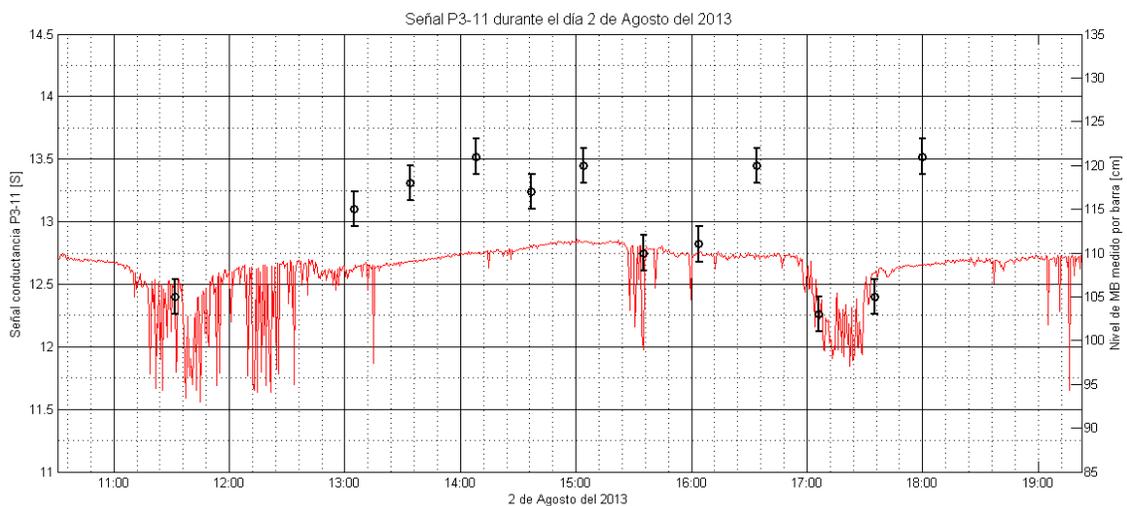


Figura 27. Comportamiento de señal original P3-11 (rojo) y nivel de MB medido con método de la barra corroída (puntos negros).

En Figura 28 se muestra la misma señal P3-11 (rojo) que en Figura 27, además de la reconstrucción de su señal sintetizada (azul, adimensional) y el índice obtenido (negro, adimensional) para la señal P3-11 durante el día 2 de agosto del 2013.

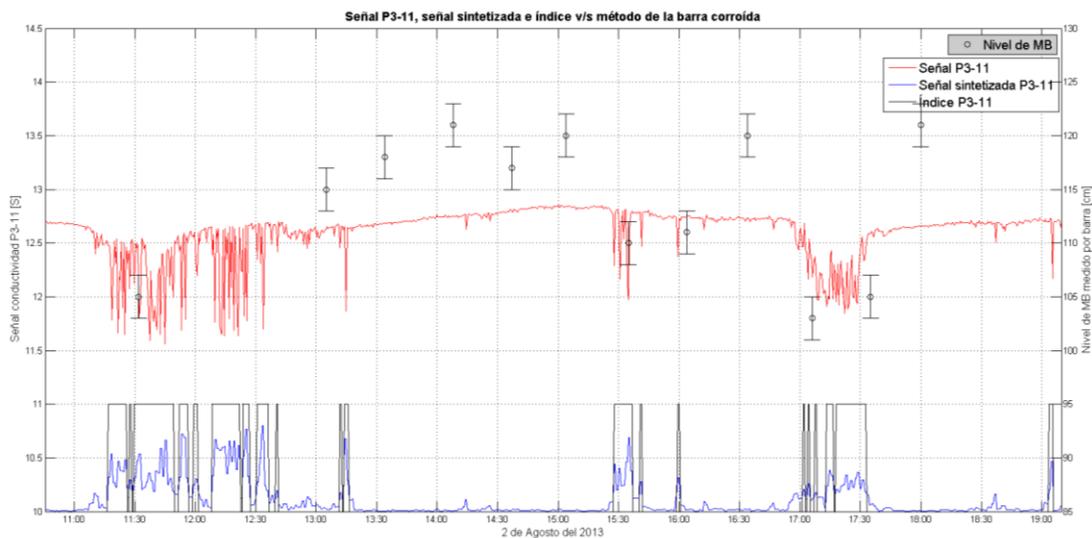


Figura 28. Señal original P3-11(rojo), su señal sintetizada (azul) e índice (negro) comparado con nivel de MB medido con método de la barra corroída (puntos negros).

Una vez obtenido el índice para P3-11 y el índice para P4-12 se obtiene entonces el índice grupal A, como ya se mencionó en la sección 4.2.

De esta manera se detecta un sub-rango por cada grupo de señales, que corresponde a aquel intervalo de altura de MB en que la señal muestra fluctuación. Se encontró que los pares a la misma altura (e.g. P3-11 y P4-12) muestran fluctuación a niveles similares, por lo que se define un índice grupal para pares de electrodos a la misma altura, tal como se mencionó en la sección 4.2, de modo que si una de las dos señales muestra fluctuación, entonces el índice grupal estará activo (con valor 1).

Luego de obtener los índices de cada señal y así mismo los índices grupales, se permutan los índices grupales para obtener finalmente el rango de nivel de MB (para más detalles ver sección 4.2).

La Figura 29 presenta una comparación entre las mediciones obtenidas a partir del algoritmo mencionado y las mediciones realizadas por el método de la barra

corroída. Se muestran los rangos de nivel calculados por el algoritmo (en rojo) y las mediciones realizadas por un operario (en negro), con el error asociado a las mediciones determinado por el equipo del IM2. Se puede observar que sólo una medición de barra se escapa de aquellas realizadas por el algoritmo, a eso de las 13:00 horas, sin embargo, las mediciones siguientes (alrededor de 5 minutos posteriores a la medición con barra) ya mostrarían un rango superior.

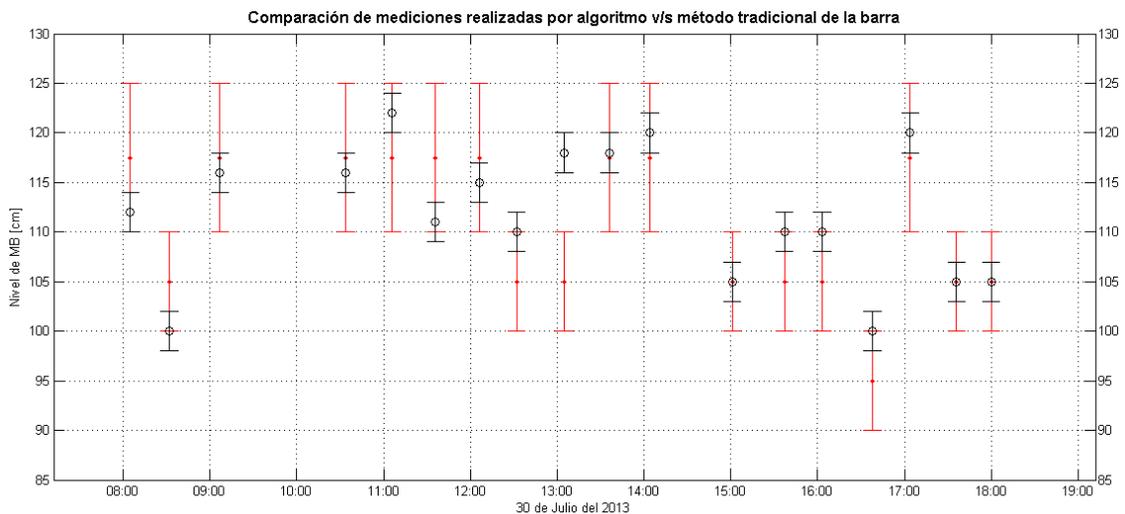


Figura 29. Mediciones realizadas por Sensor de Nivel de Fases con algoritmo (rojo) v/s mediciones por el método de la barra corroída (negro).

Cabe mencionar además, que las mediciones realizadas por el Sensor de Nivel de Fases con este método son continuas: cada nuevo dato puede volver a calcular el rango actual, mientras que las mediciones por barra se efectúan normalmente cada una hora y, extraordinariamente durante el periodo de validación cada media hora, por lo que en la Figura 29 sólo se han mostrado las mediciones realizadas por el instrumento en el instante en que se realizaron las mediciones a través del método de la barra corroída.

Durante todo el período de Validación Industrial del Sensor de Nivel de Fases, se efectuaron 105 mediciones por el método de la barra corroída, de las cuales éste método de análisis alcanzó 96 aciertos (91%).

6. CONCLUSIONES

Los datos muestran que es posible diferenciar la fase de MB de la fase escoria. Siendo una configuración vertical de electrodos del lado derecho de la culata del horno CT-2 (aquel lado que se sumerge en MB cuando se efectúa un giro) la que resultó ser la más apropiada para la determinación de rangos de nivel de MB.

En el proceso de datos, el uso de wavelets otorga buenos resultados, ya que el análisis utiliza la estructura fina de la señal y no su magnitud. Se logró determinar rangos de nivel de MB con una precisión de un 91% en relación al método de la barra corroída.

Se ha mostrado que este método para determinar rangos tiene la ventaja de medir con mayor frecuencia que el método de la barra corroída, permitiendo al operador del CT tomar decisiones en forma anticipada.

Entre otras ventajas adicionales se tiene un aumento en la seguridad laboral, debido a que no se requiere a un operario expuesto a gases por estar sujetando una barra en la cercanía a la boca del horno; además se debería tener una reducción de gases, producto de que es más fácil mantener el nivel ideal en el nivel de MB.

Todo esto permite mejorar la productividad de La Fundición Chuquicamata, considerando que el CT-2 está en el inicio de la línea de procesos y ésta depende principalmente de la operación de este horno.

Como sugerencia para futuras instalaciones se puede mencionar la redistribución de electrodos en sólo una columna, exclusivamente en el lado derecho de la culata, con menor separación entre los mismos.

Otra observación sugerida para optimizar la medición actual, es ver la señal directa que obtiene el instrumento, pues actualmente está configurado a captar datos durante 1 [s] y luego obtener el valor RMS, que es el dato que se utiliza en el proceso de la señal; sin embargo, considerando la gran cantidad de combinaciones que se realizan por cada secuencia, es oportuno disminuir el tiempo de medición.

Considerando el estudio de factibilidad de ERT del Anexo A, se concluye que a primeras instancias es factible realizar una tomografía de resistividad eléctrica (ERT) del medio interno del CT utilizando el instrumento Sensor de Nivel de Fases en su configuración actual pero que, sin embargo, el efecto del oleaje podría interferir de manera importante en las mediciones, lo que haría impracticable la utilización de este método.

Se hace necesario realizar pruebas experimentales para comprobar la existencia y efectos del oleaje sobre las mediciones de voltaje, y en caso de existir, analizar la posibilidad de reducir los efectos de éste en las señales.

Por otro lado, incorporando algunas modificaciones en el instrumento, sería posible aprovechar las capacidades (8 canales diferenciales) de la tarjeta de adquisición de datos del Sistema de Control para realizar una mayor cantidad de mediciones de voltaje simultáneamente, disminuyendo el tiempo de medición de los set de datos y, por ende, mejorar la resolución temporal del método.

Otra opción es realizar una ERT modificada, basada en la detección de interfaz a través del análisis de la estructura de las señales en vez de la magnitud de las mismas. Finalmente, se concluye también que existe una amplia cantidad de algoritmos para el análisis de datos de ERT en modo monitoreo (time-lapse monitoring) así como también publicaciones en donde basar una futura investigación.

7. REFERENCIAS

CIMM E&G. (2003). *Manual de Operaciones Convertidor Teniente*.

Comisión Chilena del Cobre. (2004). *Resumen descriptivo de las teconologías y operaciones de las fundiciones primarias de concentrados de cobre de Chile*.

Comisión Chilena del Cobre. (2013). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales*.

Mallat, S. (2009). *A Wavelet Tour of Signal Processing, the sparse way*.

Reynolds, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, 2nd Edition*.

Schlesinger, M., King, M., Kathryn, S., & Davenport, W. (2010). *Extractive Metallurgy of Copper, Fifth Edition*.

Tan, C. (2009). Financial time series forecasting using improved wavelet neural network. 17-23.

ANEXO A

1. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ERT

El método de tomografía de resistividad eléctrica, conocido por las siglas ERT, tiene aplicaciones tanto en exploraciones geofísicas como en diagnósticos de cáncer en el área biomédica, además de chequeo de piezas y componentes de circuitos electrónicos. Las mediciones de voltaje se utilizan en algún algoritmo de reconstrucción para obtener el perfil resistivo dentro del medio bajo pruebas [1, 2, 3].

Las posibles aplicaciones del método siguen siendo un asunto de investigación activa, con el propósito de estudiar características y procesos sobre un rango espacial y temporal de una muestra dada. Ya que la resistividad depende de propiedades como la concentración de algún material en el medio, humedad, temperatura, entre otros, la ERT puede ser utilizada para monitorear procesos que cambien estas propiedades, tales como infiltración [4, 5], intrusión salina [6, 7], recirculación de lixiviados [8], y remediación de tierras contaminadas [9, 10, 11, 12, 13].

En el área médica se han desarrollado diversas técnicas de impedancia eléctrica [14, 15], esto es, utilizando corriente alterna en vez de continua, que es lo habitual en métodos geofísicos. El procedimiento y análisis es básicamente el mismo: adquisición de datos, definición de malla para simulación, y un algoritmo de inversión de datos.

El procedimiento para realizar una ERT es primero instalar el equipo de medición (básicamente un generador de corriente, voltímetro, electrodos y el

cableado) y definir una secuencia de medición apropiada para el caso específico a tratar; luego analizar los datos con software de inversión de datos teniendo en cuenta conocimientos sobre el tipo de medio a tratar para obtener una interpretación coherente de los resultados.

Actualmente se cuenta con el Sensor de Nivel de Fases utilizando una secuencia de adquisición de datos y algoritmo para discriminar las fases piro metalúrgicas (i.e. metal blanco y escoria fayalítica).

Lo que se expone a continuación es una investigación de factibilidad para realizar una ERT con el sistema Sensor de Nivel de Fases, ya sea en su estado actual o realizando modificaciones menores.

1.1. ADQUISICIÓN DE DATOS

Es posible aplicar corriente en un patrón de vecindad, en un patrón de opuestos, en un patrón cruzado y en un patrón adaptativo [16, 17]. Brown y Segar (1987) [18] sugieren un método en donde se inyecta corriente entre un par de electrodos y se mide voltaje con otro par, distinto al que inyecta corriente.

Para la detección de cambios en el medio se suele utilizar a lo menos dos sets de datos, uno que se usará como base y otro como estado actual [19]. Cuando se desea monitorear en el largo plazo, cada nuevo set de datos funciona como el estado actual, teniendo como base a los estados anteriores. Sin embargo, cuando se tiene bajos niveles de ruido, es posible realizar inversión de datos directamente en cada set de datos por separado en vez de utilizar diferencias entre sets subsiguientes; en estas circunstancias no es necesario tener un set de datos base [20].

También debe considerarse las escalas de tiempo de los procesos que se monitorean. Cuando se monitorea utilizando métodos resistivos, se asume implícitamente (en el análisis) que todos los datos son recolectados simultáneamente. Esta suposición es razonable si las escalas de tiempo características del proceso que se monitorea son significativamente mayores que el tiempo requerido para recolectar el set de datos. Pero si los procesos son más rápidos, de modo que puede haber cambios significativos durante la recolección de datos, entonces la imagen puede resultar borrosa y puede existir poca convergencia con las mediciones [21].

A continuación se exponen unos ejemplos de adquisición de datos para luego continuar con una propuesta de medición para el caso del CT-2. Se ve además un posible problema para el método de ERT debido al oleaje del medio interno del CT-2.

1.1.1. ALGUNOS EJEMPLOS

EIDORS (*Electrical Impedance and Diffused Optical Reconstruction Software*) es un software *open source* utilizado para la reconstrucción de EIT y DOT (*Diffused Optical Tomography*). Es utilizado en gran parte por investigadores del área médica. La Figura A.1.A [19] muestra una secuencia de adquisición de datos en patrón de vecindad, en donde se inyecta corriente en un par de electrodos (1 y 2) mientras se mide voltaje en el resto de los electrodos, luego se inyecta corriente en el par siguiente (2 y 3) mientras se mide voltaje en el resto de los electrodos, etc. En total se cuenta con 208 mediciones de voltaje por set de datos.

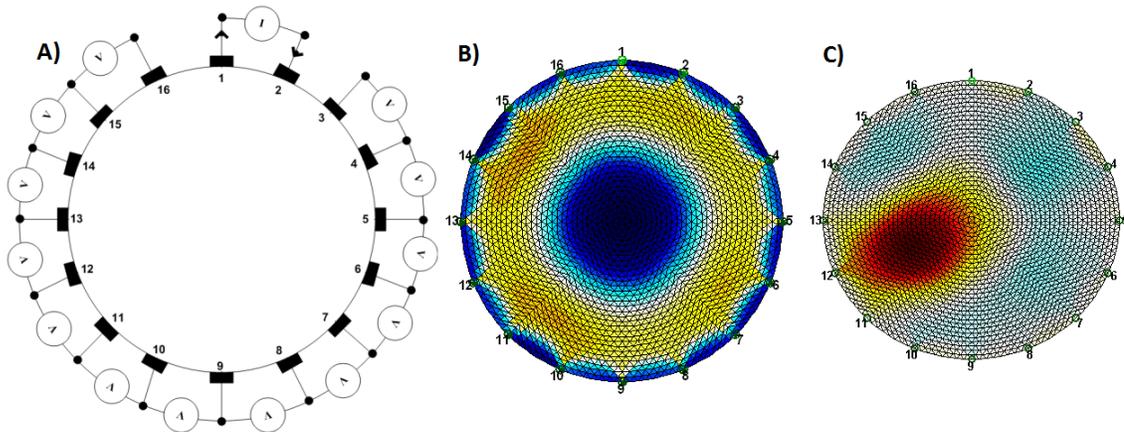


Figura A.1. EIT usando un phantom cerrado [19]. A) Arreglo de electrodos e ilustración de secuencias; B) Reconstrucción de solución salina; C) Reconstrucción de una bola de madera cercana a los electrodos 11, 12 y 13.

En 1.B se muestra la reconstrucción vía EIDORS del data set para una muestra de solución salina, la cual se utiliza como base para C) la reconstrucción vía EIDORS del data set en que se ha agregado una bola de madera a la solución salina, en las cercanías a los electrodos 11, 12 y 13. Luego de insertar la impureza (bola de madera) se vuelven a realizar las mismas mediciones, por lo que el total de mediciones de voltaje para detectar el cambio es de 416 (208x2).

Otro ejemplo se presenta en Figura A.2 [21], trabajo en el cual se instalaron 14 pozos de 16 electrodos cada uno. En situaciones como esta se suele utilizar secuencias de medición con patrón cruzado entre los pozos adyacentes.

En este caso se realizó un monitoreo a lo largo de un plazo de tiempo de un año, obteniendo un set de datos y tomografía cada 4 horas a través del sistema ALERT [22], el cual permite la medición simultanea de 10 voltajes diferenciales y transmite información inalámbrica desde el terreno a la oficina.

El lugar en donde se realizó el monitoreo solía usarse como estación de gasolina, luego se convirtió en estacionamiento. Debido a la contaminación del suelo, se implementaron medidas de reparación, con el objetivo de evitar que

los contaminantes llegasen a un río cercano. El monitoreo serviría como prueba de las medidas de reparación.

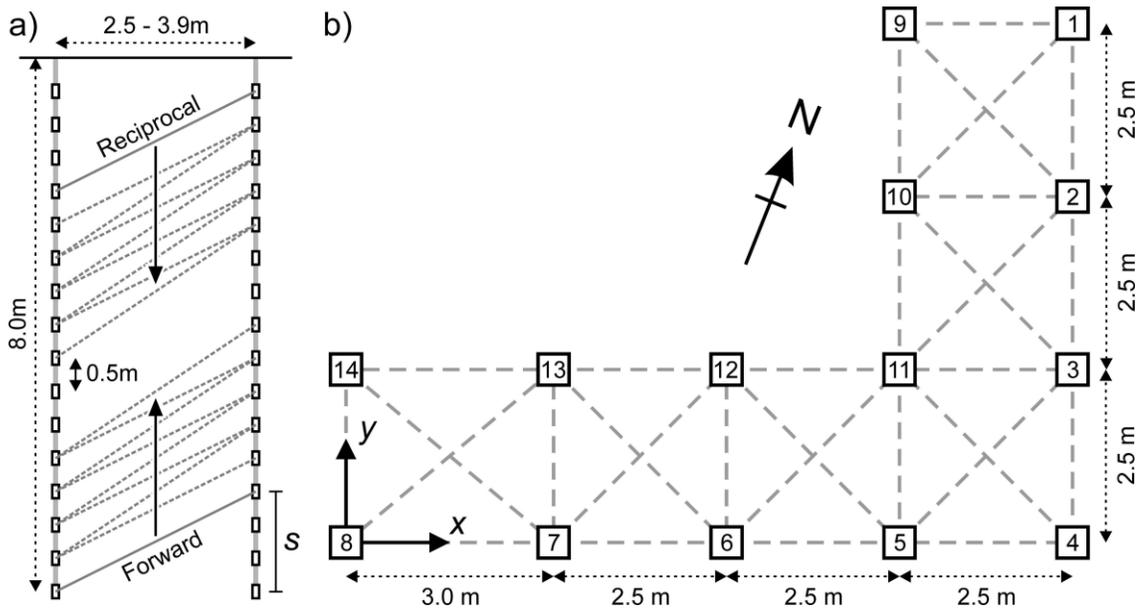


Figura A.2. A) 2 pozos con 16 electrodos cada uno, con secuencia de medición de patrón cruzado, la línea sólida indica donde se inyecta corriente y la línea punteada indica donde se mide voltaje; B) 14 pozos de 16 electrodos cada uno, las líneas punteadas indican la interacción con otro pozo de electrodos.

1.1.2. USANDO LA CONFIGURACIÓN ACTUAL DEL SENSOR DE NIVEL DE FASES

Actualmente el sistema de control del Sensor de Nivel de Fases está configurado para inyectar corriente a través de un par de electrodos y medir voltaje de dos posibles maneras: la primera es medir voltaje utilizando el mismo par de electrodos que inyectan corriente y; la segunda, es medir voltaje utilizando otro par de electrodos diferente a los que inyectan corriente.

Sin embargo, no está configurado para medir voltaje en más de un par de electrodos a la vez, lo que supone desde ya un impedimento en el tiempo de

demora que tardaría el sistema en medir un set de datos. Esto, considerando que el medio interno es dinámico en plazos de tiempo de alrededor de 10 minutos.

Durante la etapa de validación del prototipo industrial Sensor de Nivel de Fases, donde se realizaron turnos extraordinarios de medición de nivel de MB con el método de la barra corroída cada media hora, la máxima variación en nivel fue de 100 a 126 [cm] (ver Figura A.3).

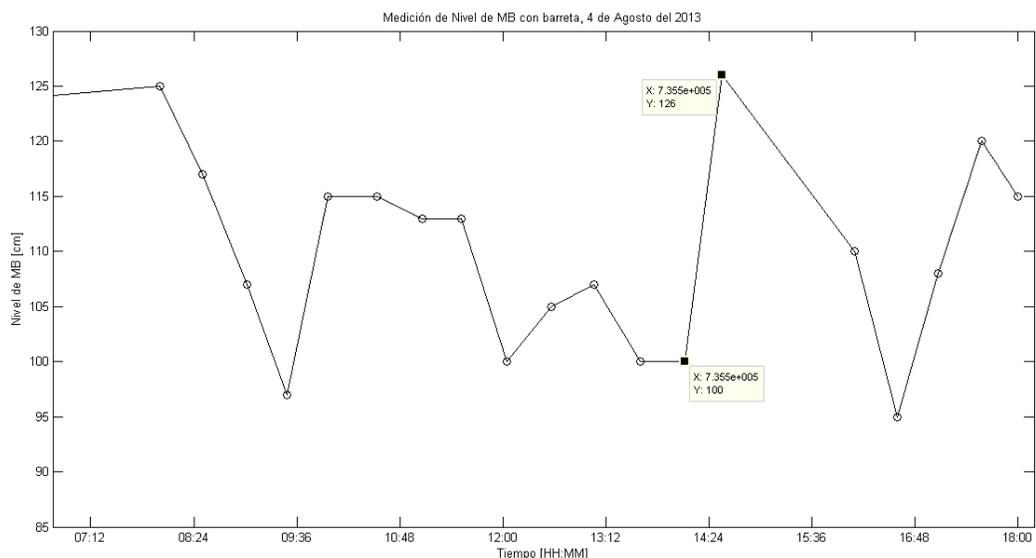


Figura A.3. Mediciones de nivel de MB con barreta durante la validación del prototipo industrial, el día Domingo 4 de Agosto del 2013.

Considerando las secuencias de medición ejemplificadas en la sección 2.1, además de la ya existente instalación de electrodos y los análisis de datos realizado previo y durante la validación del prototipo industrial; se propone la secuencia de medición que se muestra en Figura A.4. Son 13 sub secuencias de entre 4 y 6 mediciones de voltaje cada una, con un orden de A, B, C,... L, M. Los 10 electrodos utilizados son los que se encuentran en el lado derecho de la culata (visto desde fuera del CT).

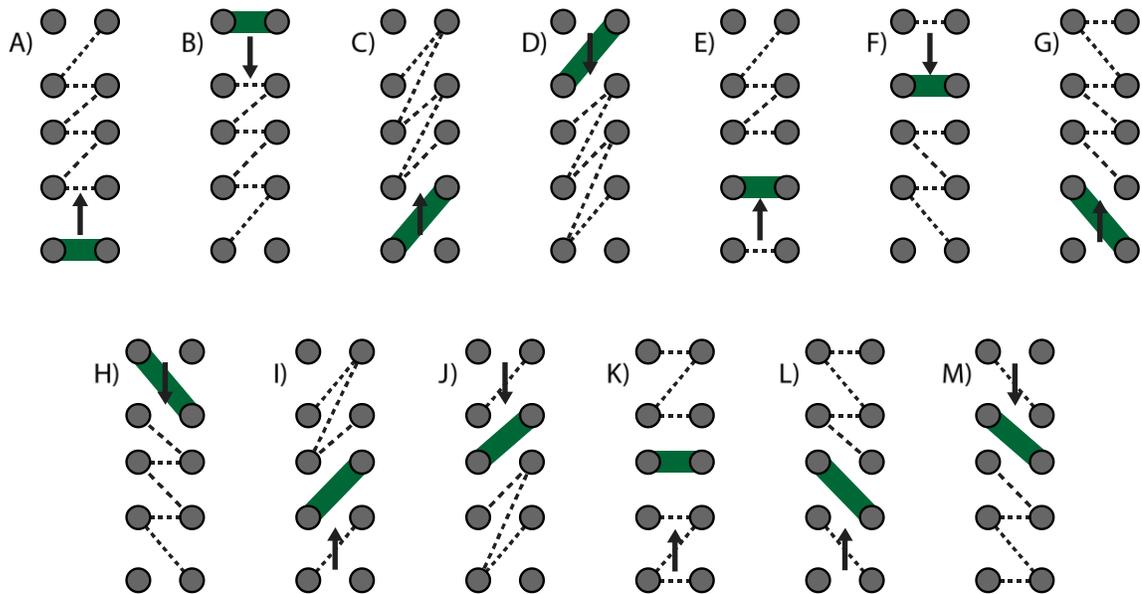


Figura A.4. *Propuesta de secuencia de medición. Las líneas verdes indican el par donde se inyecta corriente; las líneas punteadas indican los pares donde se mide voltaje; el sentido de las flechas indica el orden de las sub secuencias de medición de voltaje (si es que no se mide simultáneamente).*

En total, son 67 mediciones de voltaje. Por lo que la obtención de un set de datos con un tiempo de medición de aproximadamente 2,2 [s] (configuración actual) tomaría aproximadamente 147 [s] \approx 2,5 [min].

1.1.3. USANDO UNA CONFIGURACIÓN DE CONEXIÓN DIRECTA

El sistema de control del instrumento cuenta con una tarjeta de adquisición de datos NI USB-6366, que posee 8 entradas analógicas simultáneas con capacidad de muestreo de hasta 2MS/s por cada canal con resolución de 16 bits.

Si se realizan modificaciones en el sistema de control, de manera que la tarjeta de adquisición de datos quede conectada directamente con sus 8 canales, sería posible reducir considerablemente el tiempo de medición de cada set de datos.

De esta manera, la obtención de un set de datos se reduce a 13 mediciones de 2,2 [s], aproximadamente 28,6 [s] en total por set. Esto es, un 19% del tiempo que tomaría con la configuración actual.

1.1.4. POSIBLE PROBLEMA POR OLEAJE INTERNO

El medio interno del CT está bastante lejos de ser un sistema estático. Las constantes entradas de material y de soplado de aire oxigenado, provocan no sólo que la composición del medio esté en constante cambio sino que además mantienen al medio en movimiento. Los investigadores especializados en fluidos dentro del IM2 han comentado sobre la muy posible existencia de un oleaje en el medio interno, el cual se debería principalmente al soplado de aire oxigenado.

Debido a este oleaje, el cual impactaría directamente sobre los electrodos, es posible que la tomografía no pueda ser llevada a cabo correctamente.

Una prueba preliminar para indagar sobre este problema, sería medir durante unos 10 segundos una misma sub secuencia (si es que se cuenta con conexión directa) o una medición de voltaje cualquiera (4 puntas, si la configuración física actual no se cambia) y analizar la señal. Actualmente, configurado por software, las mediciones arrojan el valor RMS de una medición de 1 [s], por lo que debería modificarse para obtener la señal directamente. Si se observa una medición constante, entonces se puede concluir que el oleaje no afecta en la adquisición de datos; si, por el contrario, se observa que la medición fluctúa dentro de los 10 [s], entonces el oleaje sí afecta.

Considerando que el oleaje afectase las mediciones de voltaje, habría que ver qué tanto fluctúa la medición con respecto a su magnitud dentro de los 10 [s] de prueba y determinar si el efecto puede ser despreciado y considerar el valor RMS, o bien si es posible filtrar la señal para reducir el efecto del oleaje o bien desechar este método.

1.2. INTERPRETACIÓN DE LOS DATOS

Una vez adquiridos los datos es necesario procesarlos con software de inversión de datos. El método de elementos finitos (FEM) es la base para todos los software utilizados para la reconstrucción de imágenes en ERT [19]. También, algunos software utilizan métodos similares, como el método de las diferencias finitas (FDM) o el método de los volúmenes finitos (FVM).

Por lo que se debe realizar un trabajo de mallado adecuado para ser utilizado en el cálculo, considerando, por ejemplo, qué tan profundo (hacia dentro del horno CT) se desea calcular. Esta malla será utilizada en cada cálculo del software que involucre las mediciones realizadas. Dependiendo del propósito de la investigación, es posible utilizar una malla 2D o 3D.

Por otro lado, el algoritmo consiste en dos pasos: modelamiento numérico o forward modelling y luego inversión. El modelamiento numérico es una simulación en donde se ponen los parámetros correspondientes (posición de los electrodos, voltaje y corriente, resistividad del medio) en la malla previamente construida para obtener un resultado, también conocido como modelo sintético, que se compara con el segundo paso, la inversión. La inversión utiliza las mediciones realizadas (voltaje y posición de los electrodos) y ajusta, en función de los resultados del modelamiento numérico, para obtener una imagen

resistiva actualizada y dar cuenta de las impurezas en el medio, en relación a la resistividad originalmente ingresada.

Con el propósito de monitorear (time-lapse monitoring) procesos que impliquen cambios en el medio a estudiar, se han realizado algoritmos que trabajan en función de resultados previos, aprovechando la sensibilidad del método a cambios en la resistividad del medio [23].

El monitoreo (time-lapse monitoring) es una herramienta poderosa para observar cambios dinámicos. En particular ofrece el potencial de obtener resultados de inversión con fidelidad en aumento a través de la inclusión de información complementaria proveniente de múltiples etapas de medición. Algunos métodos comúnmente utilizados en monitoreo ERT son: ratio method, cascade time-lapse inversion, difference inversion, differencing independent inversions [24]. Dependiendo del caso en estudio, puede resultar mejor un método u otro. Averiguar qué método se ajusta mejor al caso del CT es algo que se escapa del propósito de este informe, se recomienda revisar informes que comparen resultados para casos puntuales (e.g. Comparison of algorithms of Time-lapse ERT inversion [25]).

Cuando hay cambios significativos en variables que afecten la resistividad del medio y que puedan medirse a través de otros métodos, como por ejemplo la temperatura del sistema, puede resultar útil filtrar estos efectos para obtener resultados apropiados con el método ERT [26].

2. REFERENCIAS DEL ANEXO A

[1] Erwati M. T, and Farrukh N., “Applications of electrical impedance tomography for imaging in biomedical and material technology”, Proceedings of 2009 IEEE Students Conference on research and development. (SCOReD 2009), 16-18 Nov '09, UPM Serdang, Malaysia.

[2] Kumar S., Anand S. and Sengupta A., ”Impedence based image reconstruction of the field distribution inside the closed phantom using finite element method”, (IJCNS) International Journal of Computer and Network Security. Vol. 2, No 7, July 2010.

[3] Zou Y. and Guo Z., “A review of electrical impedance techniques for breast cancer detection”, Elsevier Medical Engineering and Physics 25, (2003).

[4] Daily, W., Ramirez, A., Labrecque, D., Nitao, J., 1992. Electrical-Resistivity Tomography of Vadose Water-Movement. Water Resources Research 28, 1429-1442.

[5] Looms, M.C., Jensen, K.H., Binley, A., Nielsen, L., 2008. Monitoring unsaturated flow and transport using cross-borehole geophysical methods. Vadose Zone Journal 7, 227-237.

[6] Slater, L., Sandberg, S., 2000. Resistivity and induced polarization monitoring of salt transport under natural hydraulic gradients. Geophysics 65, 408-420.

[7] Ogilvy, R.D., Kuras, O., Meldrum, P.I., Wilkinson, P.B., Gisbert, J., Jorreto, S., Pulido-Bosch, A., Kemna, A., Nguyen, F., Tsourlos, P.,2007. Automated monitoring of coastal aquifers with electrical resistivity tomography. In: A. Pulido Bosch, J.A. López-Geta, G. Ramos González (Eds.), Coastal

Aquifers:Challenges and Solutions, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, 333-342.

[8] Guerin, R., Munoz, M.L., Aran, C., Laperrelle, C., Hidra, M., Drouart, E., Grellier, S., 2004. Leachate recirculation: moisture content assessment by means of a geophysical technique. *Waste Management* 24, 785-794.

[9] Daily, W., Ramirez, A., 1995. Electrical resistance tomography during in-situ trichloroethylene remediation at the Savannah River Site. *Journal of Applied Geophysics* 33, 239- 249.

[10] LaBrecque, D.J., Ramirez, A.I., Daily, W.D., Binley, A.M., Schima, S.A., 1996. ERT monitoring of environmental remediation processes. *Measurement Science and Technology* 7, 375-383.

[11] Slater, L., Binley, A., 2003. Evaluation of permeable reactive barrier (PRB) integrity using electrical imaging methods. *Geophysics* 68, 911-921.

[12] Halihan, T., Paxton, S., Graham, I., Fenstermakerb, T., Riley, M., 2005. Post- remediation evaluation of a LNAPL site using electrical resistivity imaging. *Journal of Environmental Monitoring* 7, 283-287.

[13] Wilkinson, P.B., Chambers, J.E., Lelliot, M., Wealthall, G.P., Ogilvy, R.D., 2008. Extreme sensitivity of crosshole electrical resistivity tomography measurements to geometric errors. *Geophysical Journal International* 173, 49-62.

[14] Sarode V., Chimurkar P. M. and Cheeran A. N., "Electrical Impedance Tomography (EIT) based Medical Imaging using Finite Element Method (FEM)", *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies* Feb 2012 Vol. 1, Issue 2, pp 83-89 (IJESET).

- [15] Soleimani M., "Electrical impedance tomography system: an open access circuit design" Biomedical Engineering Online, 03 May 2006.
- [16] Bera T. K and Nagaraju J., "Studying the resistivity imaging of chicken tissue phantoms with different current patterns in Electrical Impedance Tomography (EIT)", Measurement(2012), doi:10.1016/j.measurement.2012.01.002
- [17] Manage P., Sarode V. and Dr Cheeran A., "Electrical Impedance Tomography And Its Applications" i-COST Electronics & Communication Conference proceedings 13-15 January 2011 S.S.V.P.S.,s B.S. Deore College of Engineering & Polytechnic, Dhule pp 2.22. 1
- [18] Brown B. H and Seagar A. D, "The Sheffield data collection system", Clin. Phys. Physiol. Meas., 1987, Vol. 8, Suppl. A, 91-97.
- [19] Vidya Sarode, Priya M Chimurkar and Alice N Cheeran. "Electrical Impedance Tomography using EIDORS in a Closed Phantom", International Journal of Computer Applications 48(19): 48-52, June 2012. Published by Foundation of Computer Science, New York, USA
- [20] Miller, C.R., Routh, P.S., Brosten, T.R., McNamare,J.P., 2008. Application of timelapse ERT imaging to watershed characterization. Geophysics 73, G7-G17.
- [21] P.B Wilkinson, P.I. Meldrum, O. Kuras, J.E. Chambers, S.J. Holyoake, R.D Ogilvy. "High-resolution Electrical Resistivity Tomography monitoring of a tracer test in a confined aquifer", Journal of Applied Geophysics, Volume 70, Issue 4, April 2010, Pages 268-276.
- [22] <http://www.bgs.ac.uk/research/tomography/ALERT.html>

- [23] Descloitres, M., Ribolzi, O., Le Troquer, Y., Thiébaux, J.P., 2008. Study of water tension differences in heterogeneous sandy soils using surface ERT. *Journal of Applied Geophysics* 64, 83-98.
- [24] Hayley K., Bentley L.R. and Pidlisecky A. (2011). "Simultaneous Time-lapse Electrical Resistivity Inversion", *Journal of Applied Geophysics*.
- [25] Karaoulis M., Tsourlos P., Kim J-H., "Comparison of algorithms of Time-lapse ERT inversion", *Geoelectric Monitoring*.
- [26] Coscia I., Niklas L., Greenhalgh S., Günther T., Green A., "A filtering method to correct time-lapse 3D ERT data and improve imaging of natural aquifer dynamics", *Journal of Applied Geophysics*, Volume 80, May 2012, Pages 12-24.