

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PROYECTO PARA OPTAR A TÍTULO DE INGENIERO CIVIL  
QUÍMICO

**PROPUESTA PARA EL CONTROL DE IMPUREZAS  
DE ÁNODOS EN REFINACIÓN A FUEGO.  
DIVISIÓN SALVADOR – CODELCO CHILE.**

**Ignacio Torres Alucema**

Profesores Guías:

Alvaro Aracena Caipa  
Carlos Carlesi Jara

**2015**

---

## RESUMEN.

---

La gran cantidad de concentrados de cobre de diversos proveedores que procesa Fundición Potrerillos, perteneciente a CODELCO – Chile, División Salvador, crea diversos escenarios dentro de los cuales se encuentran los desfavorables que se caracterizan por un alto contenido As o Sb, afectando negativamente el producto final, el ánodo de cobre, llevándolo a no cumplir con las especificaciones exigidas para el posterior proceso de electro refinación de cobre.

Cumplir con los parámetros de concentración exigidos en los ánodos, logra disminuir la repercusión perjudicial de estas impurezas en el proceso de electro refinación, y es a lo que apunta este trabajo propuesto por la superintendencia de procesos de la Fundición Potrerillos va orientado a validar como controladores de las concentraciones de As y Sb, tanto al polvo metalúrgico para cumplir el requerimiento de una razón As/Sb de 4,5 o superior en un escenario de alto contenido de Sb y fundentes alcalinos para el requerimiento de una concentración máxima de As de 2500 ppm en ánodos de cobre, en un escenario de alta concentración de As. Esto a través de inyecciones al baño de cobre en hornos de ánodos, ya sea de polvo o fundente, por medio de un sistema de inyección neumática.

Se logró obtener resultados de aumento de la razón As/Sb de un 67,11% para la adición de polvo metalúrgico y resultados de abatimiento de As con eficiencias de 84% para  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , 58%  $\text{CaCO}_3$  y 68% para la mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  por adición de fundentes alcalinos.

Se validó la adición de fundentes alcalinos para el descenso en la concentración de As en el baño de cobre, y se concluyó de que el polvo metalúrgico puede utilizarse como controlador de la concentración de As en el baño de cobre.

Costando la ejecución de las propuestas de control de impurezas un valor no superior a 5000 USD mensual en comparación a los beneficios que pueda llegar a acceder que son evitar la pérdida de 100 USD mensual por tonelada de cobre anódico producido, cifra que puede alcanzar el valor de 1.200.000 USD convierte las propuestas de control de impurezas en muy ventajosas en el aspecto económico.

---

# ÍNDICE GENERAL.

---

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	12
1.1) Introducción.....	12
1.2) Objetivo General. ....	13
1.3) Objetivos específicos.....	14
1.4) Antecedentes generales CODELCO Chile. ....	14
1.5) División Salvador. ....	15
1.6) Fundición Potrerillos. ....	18
CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS.....	21
2.1) Polvo Metalúrgico.....	21
2.1.1) Caracterización del polvo de Fundición. ....	22
2.1.2) Recolección del polvo metalúrgico. ....	24
2.1.3) Descomposición del polvo metalúrgico. ....	25
2.2) Refinación a fuego de cobre. ....	26
2.2.1) Mecanismo de Refinación en horno basculante.....	30
2.3) Fundentes alcalinos.....	32
2.3.1) Eliminación de arsénico vía fundentes alcalinos. ....	35
2.4) Refinación electro química del cobre.....	36
2.4.1) Impurezas en el electro refinado de cobre. ....	37
2.4.2) Arsénico, antimonio y lama flotante.....	38
CAPÍTULO III: SISTEMA DE INYECCIÓN NEUMÁTICA.....	41
3.1) Condiciones de Diseño. ....	43
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	44
4.1) Metodología. ....	44
4.1.1) Recopilación de datos.....	44
4.1.2) Preparación de las pruebas de inyección.....	47
4.1.3) Inyección. ....	49
4.1.4) Seguridad.....	51

4.2. Desarrollo experimental. ....	53
4.2.1) Coeficiente de distribución. ....	55
4.2.2) Adición de polvos metalúrgicos. ....	56
4.2.3) Adición de fundente alcalino. ....	58
4.2.4) Plantilla de adición. ....	60
 CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....	 62
5.1) Resultados pruebas de adición de polvos metalúrgicos. ....	62
5.2) Resultados pruebas de adición de fundentes alcalinos. ....	70
5.3) Datos operacionales del sistema de inyección neumática. ....	84
 CAPÍTULO VI: CONSIDERACIONES ECONÓMICAS. ....	 85
6.1) Costos. ....	85
6.2) Beneficios. ....	88
 CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	 90
 BIBLIOGRAFÍA. ....	 92
 ANEXOS. ....	 94
 ANEXO A. ....	 94
A.1 Descripción partes de principales del sistema. ....	94
A.2 Catastro del sistema de inyección neumática. ....	97
A.3 Habilitación del sistema de inyección neumática. ....	100
A.4 Operación del sistema de inyección neumático. ....	106
A.5 Descripción de la pantalla de interfaz. ....	108
 ANEXO B. ....	 109
B.1 Para un moldeo con razón $As/Sb = 4,4$ . ....	109
 ANEXO C. ....	 110
C.1 Detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos. ....	110
C.2 Detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos. ....	112

---

## ÍNDICE FIGURAS.

---

FIGURA N°1: UBICACIÓN GENERAL DIVISIÓN SALVADOR.....	15
FIGURA N°2: DETALLE DE FIGURA N°1.....	15
FIGURA 3: DIAGRAMA GENERAL DEL PROCESO PRODUCTIVO.....	17
FIGURA 4: DISPOSICIÓN GENERAL DE EQUIPOS E INSTALACIONES EN LA FUNDICIÓN POTRERILLOS.....	20
FIGURA 5: RECOLECCIÓN DE POLVO METALÚRGICO.....	25
FIGURA 6: MECANISMO DE DISOLUCIÓN DEL OXÍGENO EN COBRE BLÍSTER LÍQUIDO Y OXIDACIÓN SELECTIVA DE IMPUREZAS.....	29
FIGURA 7: SECCIÓN TRANSVERSAL, PLANTA DE UN HORNO BASCULANTE Y DETALLE DE UNA TOBERA DEL HORNO BASCULANTE.....	31
FIGURA 8: CÁTODOS CON NÓDULOS.....	39
FIGURA 9: DIAGRAMA DE SISTEMA DE INYECCIÓN NEUMÁTICA.....	42
FIGURA 10: DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO FUNDICIÓN DE POTRERILLOS.....	45
FIGURA 11: MUESTREO DE POLVO METALÚRGICOS.....	47
FIGURA 12: TRANSPORTE VÍA HORQUILLA.....	47
FIGURA 13: VISTA GENERAL DE LOS SILOS.....	48
FIGURA 14: VISTA SUPERIOR DE LOS SILOS.....	48
FIGURA 15: VASO DE INYECCIÓN, VISTA SUPERIOR.....	94
FIGURA 16: VISTA LATERAL DEL VASO DE INYECCIÓN.....	95
FIGURA 17: FLUIDISADOR EN LA LÍNEA DE INYECCIÓN.....	95

FIGURA 18: ARMARIO NEUMÁTICO. ....	96
FIGURA 19: ESTADO DE COMUNICACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN. ....	97
FIGURA 21: LÍNEA DE DESCARGA.....	98
FIGURA 22: LÍNEA DE DESCARGA.....	99
FIGURA 23: CUADRO DE VÁLVULAS SOLENOIDES.....	99
FIGURA 24: ESTADO DE LIMPIEZA ANTES DE REALIZAR LA TAREA.....	101
FIGURA 25: ESTADO DE LIMPIEZA DESPUÉS DE REALIZAR LA TAREA.....	101
FIGURA 26: COMIENZO DE TAREA MANTENCIÓN MECÁNICA.....	102
FIGURA 27: TAREA FINALIZADA MANTENCIÓN MECÁNICA.....	102
FIGURA 28: ARMARIO PLC Y SWITCH K1222.....	103
FIGURA 29: DE CUADRO DE VÁLVULAS DE SOLENOIDES ANTES DE LA MANTENCIÓN.....	104
FIGURA 30: DE CUADRO DE VÁLVULAS DE SOLENOIDES DESPUÉS DE LA MANTENCIÓN.....	104
FIGURA 31: ESTADO ACTUAL DE COMUNICACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN.....	105
FIGURA 32: PANTALLA GENERAL DE SISTEMA DE INYECCIÓN.....	108

---

## ÍNDICE TABLAS.

---

TABLA 1: COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL POLVO METALÚRGICO DE FUNDICIÓN POTRERILLOS. ....	23
TABLA 2: PROPIEDADES FÍSICAS DEL POLVO METALÚRGICO. ....	23
TABLA 3: ESPECIFICACIÓN QUÍMICA DE REFINERÍA POTRERILLOS PARA ÁNODOS. ....	27
TABLA 4: DATOS TERMODINÁMICOS PARA LA ELIMINACIÓN DE IMPUREZAS DESDE EL COBRE A 1200°C. ....	33
TABLA 5: TABLA CRONOLÓGICA, IMPACTO DEL CONTENIDO DE SB EN LA EFICIENCIA DE CORRIENTE, REFINERÍA POTRERILLOS. ....	40
TABLA 6: EXTRACTO DE LA TABLA DE PETICIÓN DE ANÁLISIS QUÍMICOS. ....	45
TABLA 7: CONCENTRADOS DE FUNDICIÓN POTRERILLOS. ....	54
TABLA 8: COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN SB. ....	55
TABLA 9: COEFICIENTES DE DISTRIBUCIÓN AS. ....	56
TABLA 10: ADICIÓN DE FUNDENTES ALCALINOS PARA DISTINTAS ALIMENTACIONES CON EXCESOS DE ARSÉNICOS. ....	59
TABLA 11: PLANILLA DE ADICIÓN. ....	61
TABLA 12: RESULTADOS PRUEBAS DE ADICIÓN DE POLVO METALÚRGICO. ....	63
TABLA 13: CONCENTRACIONES PROMEDIOS COMUNES DEL RESTO DE LAS IMPUREZAS DEL ÁNODO VERSUS LAS CONCENTRACIONES PROMEDIOS DE LOS ÁNODOS ADICIONADOS CON POLVO. ....	67
TABLA 14: ANÁLISIS QUÍMICOS DE LA ESCORIA DE BAÑO DE COBRE ADICIONADO CON POLVO. ....	68
TABLA 15: ÍNDICES DE REFINERÍA. ....	69
TABLA 16: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA MEZCLA 100% $\text{CaCO}_3$ . ....	71

TABLA 17: ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE AS EN LA ESCORIA DE LOS BAÑOS DE COBRE INTERVENIDOS CON ADICIÓN DE FUNDENTE ALCALINO, MEZCLA 100% $\text{CaCO}_3$ .....	74
TABLA 18: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA MEZCLA 100% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	75
TABLA 19: ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE AS EN LA ESCORIA DE LOS BAÑOS DE COBRE INTERVENIDOS CON ADICIÓN DE FUNDENTE ALCALINO, MEZCLA 100% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	78
TABLA 20: RESULTADOS DE LAS PRUEBAS PARA MEZCLA 30% $\text{CaCO}_3$ – 70% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	79
TABLA 21: ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE AS EN LA ESCORIA DE LOS BAÑOS DE COBRE INTERVENIDOS CON ADICIÓN DE FUNDENTE ALCALINO, MEZCLA 30% $\text{CaCO}_3$ - 70% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	82
TABLA 22: RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE ADICIÓN DE LAS DIFERENTES MEZCLAS.....	83
TABLA 23: DATOS OPERACIONALES.....	84
TABLA 24: DETALLES COSTOS DE PERSONAL.....	86
TABLA 25: DETALLE COSTOS DE INSUMO.....	87
TABLA 26: COSTOS DE INYECCIONES.....	88
TABLA C.1: DETALLE DE LA INFORMACIÓN DE LAS PRUEBAS DE ADICIÓN DE POLVO METALÚRGICO.....	110
TABLA C.2: POLVO METALÚRGICO AGREGADO Y ANÁLISIS QUÍMICO DE ÁNODOS MODIFICADOS POR ADICIÓN.....	111
TABLA C.3: DETALLE DE PRUEBAS DE ADICIÓN DE FUNDENTES ALCALINOS, MEZCLA 100% $\text{CaCO}_3$ .....	112
TABLA C.4: DETALLE PRUEBAS DE ADICIÓN DE FUNDENTES ALCALINOS, MEZCLA 100% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	113
TABLA C.5: DETALLE PRUEBAS DE ADICIÓN DE FUNDENTES ALCALINOS, MEZCLA 30% $\text{CaCO}_3$ – 70% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .....	114

---

## ÍNDICE GRÁFICOS.

---

GRÁFICO 1: IMPACTO DEL CONTENIDO DE SB EN LA EFICIENCIA DE CORRIENTE, REFINERÍA POTRERILLOS .....	40
GRÁFICO 2: POLVO ADICIONADO Y PORCENTAJE DE ADICIÓN DEL POLVO AL BAÑO DE COBRE. ....	64
GRÁFICO 3: VARIACIÓN DE LA RAZÓN AS/SB PRODUCTO DE LA ADICIÓN DE POLVO METALÚRGICO. ....	66
GRÁFICO 4: KILOGRAMOS DE FUNDENTE INYECTADO Y EFICIENCIA DE ABATIMIENTO DEL FUNDENTE, MEZCLA 100% $\text{CaCO}_3$ . ....	72
GRÁFICO 5: CONCENTRACIONES EN PPM DE AS CON Y SIN INYECCIÓN DE FUNDENTE, MEZCLA 100% $\text{CaCO}_3$ . ....	73
GRÁFICO 6: KILOGRAMOS DE FUNDENTES INYECTADO Y EFICIENCIA DE ABATIMIENTO DEL FUNDENTE, MEZCLA 100% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . ....	76
GRÁFICO 7: CONCENTRACIONES EN PPM DE AS, CON Y SIN INYECCIÓN DE FUNDENTE, MEZCLA 100% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . ....	77
GRÁFICO 8: KILOGRAMOS DE FUNDENTE INYECTADO Y EFICIENCIA DEL FUNDENTE, MEZCLA 70% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ – 30% $\text{CaCO}_3$ . ....	80
GRÁFICO 9: CONCENTRACIONES EN PPM DE AS, CON Y SIN INYECCIONES DE FUNDENTE, MEZCLA 70% $\text{Na}_2\text{CO}_3$ – 30% $\text{CaCO}_3$ . ....	81

---

## **GLOSARIO.**

---

Ánodos: placas gruesas de cobre producto de la etapa de fundición, los cuales se someten a refinación mediante electrólisis, en la cual todo el cobre que los constituye se disuelve y se deposita en el cátodo de cobre puro y las impurezas que contiene quedan depositadas en el fondo de la celda en la forma de barro anódico.

Barro anódico: son los componentes del ánodo que no se disuelven y se depositan en el fondo de las celdas electrolíticas. El barro anódico está formado por metales como oro, plata, selenio, platino y paladio, por lo que constituye un subproducto valorizado.

Cátodos de cobre: placas de cobre de alta pureza que se obtienen en el proceso de electro refinación y electro obtención. Estos cátodos también se llaman cátodos de cobre electrolito de alta pureza y tienen un concentración de 99,99%.

Carga: cantidad de material procesado en alguna etapa del proceso, para el caso del convertidor teniente el concentrado seco.

Cobre blíster: cobre producido a partir de la fusión de la mata o eje en los hornos convertidores con una pureza de 99,5%. Este cobre es llevado a los hornos de refino y de moldeo desde donde se obtiene el cobre anódico que va a la electro refinación. Su nombre proviene del aspecto que tiene los productos moldeados en la superficie (blíster = ampolla).

CT: convertidor modificado teniente o convertidor teniente, Horno basculante, formado por un cilindro metálico de 5 m de diámetro por 22 m de largo, dispuesto en posición horizontal y revestido por ladrillos refractarios en su interior. Este horno está montado sobre un sistema de cremalleras que le permite oscilar.

CPS: Convertidores Peirce Smith, es un reactor cilíndrico de 4,5 m de diámetro por 11 m de largo, aproximadamente, donde se procesan separadamente el eje y el metal blanco proveniente del convertidor teniente.

Eje o mata: material en forma de una mezcla sulfurada, que contiene un 45 a 48% de cobre. Se obtiene del horno de basculante y se separa de la escoria por densidad.

Escoria: fase correspondiente a la parte más liviana del fundido, la cual se recircula en el proceso o se envía a los hornos de limpieza de escoria para recuperar el contenido de cobre que aún le queda.

Fundición: el proceso de fundición va desde la recepción y clasificación del concentrado de cobre, hasta la producción de ánodos de 99,6 a 99,7%. El principal objetivo de la fundición es separar en el concentrado de cobre otros minerales e impurezas. Para esto el concentrado de cobre funde en hornos basculante desde donde se obtiene la escoria y el eje (o mata) que contiene 45 a 48% de cobre. El eje o mata es llevado a los hornos convertidores donde se separa el azufre y el fierro obteniéndose metal blanco que contiene 70 a 75% de cobre. El metal blanco es llevado a un proceso de conversión desde donde se obtiene el cobre blíster que tiene un 96% de cobre. Este cobre es llevado al proceso de pirorrefinación donde se obtiene el cobre anódico que contiene 96,6 a 96,7% de cobre.

Hornos de ánodos: se trata de hornos pirometalúrgicos de refinación en los que se produce el cobre anódico que tiene un 99,6% de pureza.

Metal blanco: se refiere al metal que sale del convertidor teniente de un proceso de fusión conversión que contiene 70 a 75% de cobre. El cobre de metal blanco se encuentra en forma de sulfuro de cobre ( $\text{Cu}_2\text{S}$ ), lo que le da aspecto blanquecino.

Ollas de transporte: el material de fundición, como el eje o el metal blanco y también la escoria, son transportados desde los hornos a otros hornos o a los botaderos mediante ollas de transporte.

---

# CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.

---

## 1.1) Introducción.

La calidad química del ánodo de cobre está fuertemente influenciada por las materias primas procesadas, en el caso de la Fundición de Potrerillos son concentrados de cobre de diversos proveedores nacionales, por lo que la variabilidad de la composición química de la carga procesada es alta.

Entre las impurezas más relevantes en el ánodo, y que tienen mayor impacto en la calidad catódica, está el grupo de As, Sb y Bi, esto es porque en determinadas condiciones operacionales de la refinería, estos elementos se podrían comportar como el cobre, depositándose en los cátodos lo que redundaría en una mala calidad del producto.

Para minimizar el efecto nocivo de estas impurezas en Refinería, es necesario mantener ciertos niveles de concentración de impurezas en ánodos y en el electrolito utilizado para el proceso de electro refinación. Se sabe que hay una estrecha interdependencia entre As, Sb y Bi, y variaciones en concentración de alguno de ellos afecta la concentración de los otros, debido a reacciones de precipitación, formación de compuestos, etc.

Para el caso de Refinería de Potrerillos, el primer semestre del 2013 se ha visto un gran aumento de la concentración de Sb en electrolito, esto originado por el tratamiento de materias primas con altas concentraciones de este elemento, lo que ha llevado a deteriorar significativamente la calidad catódica.

La alta concentración de Sb bordeando su máximo posible en ánodos (500 ppm) se ha visto favorecida por la baja concentración de As entre 1500 a 1900 ppm, puesto que el As en el electrolito permite decantar el Sb <sup>[1]</sup>, según la reacción:



La baja concentración de As en el sistema, tiene origen en la baja concentración de As en concentrados o prácticas operacionales de descarte de electrolito.

Es por esto que la superintendencia de procesos, perteneciente a la Fundición Potrerillos, en su constante búsqueda de soluciones ha propuesto como solución para el escenario complejo donde la concentración de Sb es alta, inyectar Polvo metalúrgico en la etapa de refino a fuego, específicamente en hornos de ánodos, el cual tiene altas cantidades de As.

No obstante también se da un escenario en donde la concentración de As en el sistema es mayor al máximo solicitado por refinería 2500 ppm, debido al procesamiento de eje proveniente de la Fundición Codelco Norte. Este material contiene altos niveles de arsénicos 6000 a 8000 ppm de As, por lo que su procesamiento requiere un tratamiento, y la proposición de la Superintendencia de procesos de Fundición Potrerillos es que ese tratamiento sea el de inyectar fundentes alcalinos – a través del sistema de inyección de fundentes alcalino- para controlar el contenido de arsénico en los ánodos profundizado el cómo actúan estos en el capítulo 2, punto 3, que son enviados a Refinería, asegurando la calidad química para el proceso siguiente, por lo que es clave obtener sus parámetros operacionales y consolidar su operación, parametrizando el proceso en función de la entrada de As al sistema.

## **1.2) Objetivo General.**

**Validar la adición de polvo metalúrgico y fundentes alcalinos,** como controladores de las concentraciones de As y Sb en la producción de ánodos de cobre en etapa de refinación a fuego para el cumplimiento de requisitos de refinería siendo estos razón As/Sb de 4,5 y una concentración máxima de arsénico de 2500 ppm en ánodos de cobre obtenidos en proceso de fundición.

### **1.3) Objetivos específicos.**

- Habilitar sistema de inyección de neumática.
- Obtener parámetros operacionales del sistema de inyección neumática.
- Cuantificar adición de fundentes alcalinos y polvo metalúrgico, en función de la entrada de Arsénico, vía coeficientes de distribución.
- Verificar si la adición de polvo metalúrgico logra aumentar la cantidad de arsénico en el baño de cobre.
- Verificar si la adición de fundentes alcalinos logra disminuir la cantidad de arsénico en el baño de cobre.

### **1.4) Antecedentes generales CODELCO Chile <sup>[2]</sup>.**

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, Codelco, se formalizó por decreto el 1 de Abril de 1976. Fue constituida como una empresa del Estado que agrupaba los yacimientos existentes en una sola corporación minera, industrial y comercial, con personalidad jurídica y patrimonio propio, su primera misión fue profundizar la transformación administrativa dando continuidad a la explotación de los yacimientos nacionalizados, sus establecimientos, sus faenas y servicio anexos.

Su principal negocio es la exploración, desarrollo y explotación de recursos mineros de cobre, su procesamiento hasta convertirlos en cobre refinado y su posterior comercialización, además de subproductos de este, tales como molibdeno, ácido sulfúrico, entre otros.

La corporación está conformada por 8 divisiones mineras: Codelco Norte, en la segunda región, que opera los yacimientos de Chuquicamata, Radomiro Tomic, Gabriela Mistral y Ministro Hales; El Salvador, en la tercera región; Andina y el plantel industrial Ventanas, en la quinta región y El Teniente, en la sexta región, además, cuenta con el 49 % de participación en la producción de la minera El Abra, en sociedad con Freeport MacMoRan.

## 1.5) División Salvador.

La División Salvador se emplaza en la zona norte de Chile, aproximadamente a 1000 km de Santiago, en la III región de Atacama, provincia de Chañaral, comuna de Diego de Almagro. La Fig. N° 1 muestra la ubicación general de División Salvador.



Figura N°1: Ubicación General División Salvador.



Figura N°2: detalle de figura N°1.

La División Salvador de CODELCO desarrolla sus actividades y operaciones desde el puerto de Barquito, cercano a la ciudad de Chañaral, hasta el sector de captación de aguas industriales denominado La Ola, en la alta cordillera regional, siendo su principal actividad la explotación y tratamiento de minerales de cobre.

La actividad industrial de la División, entonces, se desarrolla en distintas áreas geográficas, las cuales corresponden, de este a oeste, a:

- Área de Potrerillos (Fundición y Refinería)
- El Salvador (Mina Subterránea, Planta Concentradora, Mina Rajo Abierto y Planta LIX-SX-EW)
- Llanta (Planta de Secado)
- Tranque de Relaves Pampa Austral
- Los Amarillos (Planta de Recuperación del Concentrado)
- Barquito (Puerto de Embarque)

El proceso productivo de la División Salvador se realiza, básicamente, a través de dos líneas de producción definidas por las características físico-químicas del mineral: Línea óxidos y Línea sulfuros, a partir de los cuales se producen alrededor de 75.000 toneladas métricas finas al año de cátodos de cobre, además de producir alrededor de 1.150 toneladas métricas de molibdenita al año. Adicionalmente produce anualmente alrededor de 500 toneladas de ácido sulfúrico, proveniente de la Planta de Ácido Sulfúrico localizada en Potrerillos y 150 toneladas de Barro Anódico.

En la Fig. 3 siguiente, se muestra un Diagrama General del Proceso Productivo.

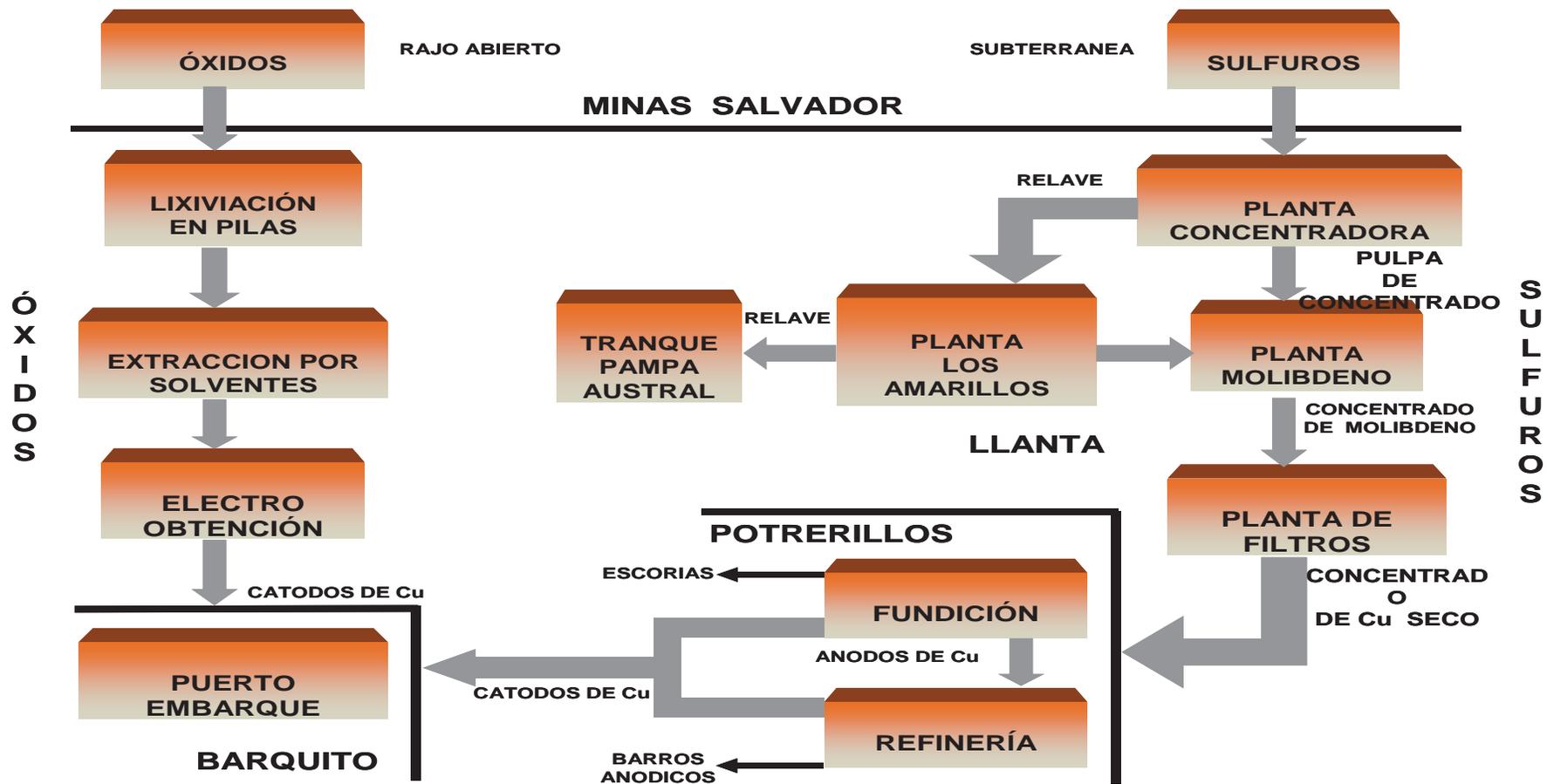


Figura 3: Diagrama General del Proceso Productivo.

## **1.6) Fundición Potrerillos.**

La Fundición Potrerillos de Codelco Chile, División Salvador, ubicada en la Comuna de Diego de Almagro, Tercera Región de Atacama, tiene una capacidad anual de procesamiento de concentrados establecida de 680.000 Ton, con una capacidad promedio nominal de fusión de concentrado de 2000 toneladas por día, con 340 días de operación al año.

Para su operación se funden concentrados divisionales y externos. Los primeros son transportados vía ferrocarril desde Llanta hasta la Fundición, en la cual se descargan y almacenan directamente en silos. Los concentrados externos son recepcionados y almacenados, de acuerdo a su procedencia. La ley de Cobre de estos concentrados varía entre 16% y 32% dependiendo de su procedencia.

Estos concentrados, una vez secos con 0,2% de humedad, son procesados en Convertidor Teniente, junto al fundente silíceo y los circulantes generados en la fundición, para obtener Metal Blanco de 70% a 75% contenido de Cobre, el cual es transportado hacia los Convertidores Peirce Smith para ser convertido en Cobre blíster y luego procesados en Hornos de Ánodos para ser refinados y moldeados como Ánodos para Electro refinación.

El cobre blíster, resultante del tratamiento del eje en los convertidores, contiene cerca de 0,05% de S disuelto y 0,5% de oxígeno disuelto. Con estos niveles de azufre y oxígeno se combinan durante la solidificación para formar ampollas de  $\text{SO}_2$  gaseoso dentro y sobre el metal recién fundido, lo cual impide el moldeo de ánodos resistentes, delgados y de superficie lisa. Además contiene pequeña cantidad de impurezas que impiden su uso en la industria elaboradora pues las piezas confeccionadas con cobre blíster acusarían fallas en: resistencia mecánica, ductilidad, maleabilidad y conductividad. De lo anterior se desprende la necesidad de refinar el cobre, con el objeto de eliminar o reducir a límites aceptables las distintas impurezas que lo acompañan.

## Principales equipos e instalaciones <sup>[3]</sup>.

Los principales equipos de proceso e instalaciones que comprende el Proyecto Cambio Tecnológico de la Fundición Potrerillos son los siguientes:

- 1 Secador de Lecho Fluidizado, que comprende además un sistema de transporte neumático de concentrado seco de 120 -150 Ton/h de capacidad máxima.
- 1 Convertidor Teniente (CT5) de 5 m diámetro x 22 m longitud.
- 3 Hornos de Limpieza de Escoria (HLE) (dos de 4,5 m diámetro x 12,7 m longitud y otro de 4,5 m diámetro x 10,7 m longitud).
- 3 Convertidores Pierce-Smith (CPS) de 4 m diámetro x 9,1 m longitud.
- 2 Hornos de Ánodos (HA) de 3,96 m diámetro x 9,1 m longitud.
- 1 Horno de Retención (HRE) de 4 m diámetro x 9,1 m longitud (Actual CPS N° 5).
- 1 Rueda de Moldeo (RM66) de 66 Ton/h de capacidad (Ruedas gemelas de 16 moldes cada una).
- 1 Turbo soplador dedicado para el CT5 de 60.000 Nm<sup>3</sup>/h.
- 1 Planta de Oxígeno (POX), con capacidad de 550 Ton/d de 95% O<sub>2</sub> en volumen.
- MALIGAS existente, con modificaciones al motor de VTI (ventilador de tiro inducido).

Adicionalmente, la Fundición Potrerillos dispone de las siguientes Plantas complementarias:

- ✓ 1 Planta de Chancado de Circulante y Carga Fría (PCCCF).
- ✓ 1 Planta de Recepción y Mezcla (PRM).
- ✓ 1 Planta de Inyección de Concentrado Seco, PICS, al CT5, con capacidad de diseño de 120 Ton/h.
- ✓ 1 Planta generadora de aire comprimido (aire de alta y baja presión), en la cual se empleará el nuevo turbo soplador dedicado para servicio del CT5.

En la Fig. 4 se muestra como están distribuidos los equipos y las instalaciones dentro de la Fundición Potrerillos.

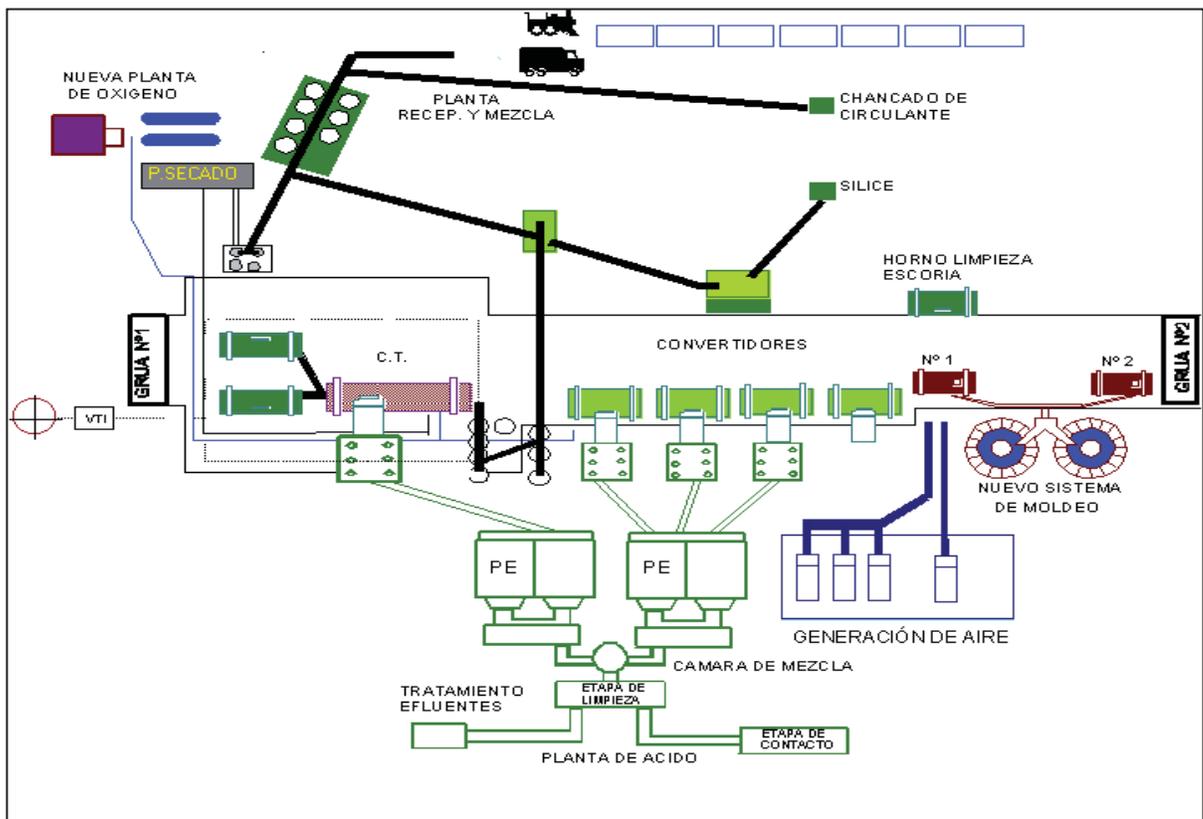


Figura 4: Disposición general de equipos e instalaciones en la Fundición Potrerillos.

## **CAPÍTULO II: ASPECTOS TEÓRICOS.**

### **2.1) Polvo Metalúrgico.**

Se entiende por polvo metalúrgico a todo material particulado de tamaño fino, que ha sido arrastrado por los diferentes flujos gaseosos del proceso pirometalúrgico de las menas sulfuradas de cobre o que se han formado durante dicho arrastre.

La génesis del polvo metalúrgico, están en los procesos de fusión y conversión de las fundiciones de cobre, siendo los gases de salida productos de sus reacciones de oxidación, que ocurren en los reactores (hornos), más el nitrógeno y el oxígeno de los gases comburentes alimentado a los hornos.

En la fusión, estos flujos de gases de salida arrastran partículas de concentrados y fundentes sin reaccionar, gotas de mata/escoria y elementos volatilizados, que se solidifican, tales como As, Sb, Bi y Pb; adicionalmente, tienen lugar reacciones entre dichos componentes y los gases de salida.

La concentración del polvo de la fusión de concentrados, en los gases de salida varía en un rango de 0,1 a 0,25 kg/Nm<sup>3</sup>.

En el caso del polvo metalúrgico en las fundiciones de cobre sus elementos constituyentes, y sus concentraciones, dependen de las características de las menas sulfuradas que se procesan, de las especies mineralógicas presentes y de sus concentraciones, de los tipos de reactores utilizados en las etapas y de las condiciones en que se han operado las distintas etapas del proceso. Todos estos factores, que influyen en las características químicas del polvo metalúrgico, explican la variabilidad de elementos, y concentraciones, presentes en estos flujos.

### 2.1.1) Caracterización del polvo de Fundición.

Varios autores se han orientado a determinar las características físico-químicas del polvo por diversas técnicas analíticas,

Samuelsson et Al.<sup>[4],[5]</sup>, caracterizaron polvos de tostación (etapa previa a la fusión en algunos procesos pirometalúrgicos), de fusión, de conversión y muestras de las calderas recuperadoras de calor de los gases de salida; las técnicas usadas fueron análisis químico, difracción de rayos X, microanálisis por energía dispersiva de rayos X y análisis por micro sonda electrónica. Sus resultados señalan que el polvo está compuesto de partículas pequeñas sólidas y/o líquidas transportadas; es la porción de arrastre mecánico (mata, escoria y  $\text{SiO}_2$ ), y por condensaciones de compuestos vaporizados; es la porción de formación química (compuestos de Pb, Zn, As y Bi); la proporción de una a otra depende de la etapa del proceso y el polvo químico tiene un tamaño menor al de la porción correspondiente al arrastre mecánico.

Markova et Al.<sup>[6]</sup>, analizaron polvos del horno de fusión instantánea y de las calderas recuperadoras de calor de los gases de salida; usaron las técnicas difracción de rayos X, análisis térmico-diferencial y análisis termogravimétrico. Los polvos presentan un alto grado de sulfatación, que tiene lugar principalmente en las calderas. La presencia  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  cataliza la oxidación del  $\text{SO}_2$  a  $\text{SO}_3$  y las fases predominantes son  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuSO}_4$  y  $\text{Cu}_2\text{S}$  entre los sulfuros.

Lastra-Quintero et Al.<sup>[7]</sup>, caracterizaron polvos de la fundición de cobre Kidd Creek determinando contenidos mayoritarios de Zn, Pb, Cu, As, Sn y Cd y minoritarios de Bi, Co e In, mientras que las fases predominantes fueron  $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{ZnO.Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{ZnS}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{CuO.Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Cu}_3\text{As}$ ; el polvo era 88% menor a  $8\ \mu\text{m}$ .

V. Montenegro, H. Sano y T. Fujisawa<sup>[8]</sup>, caracterizaron el polvo metalúrgico proveniente de un Convertidor Teniente, de una fundición de cobre de Chile, el resultado de esta caracterización, por XRD de los polvos muestran que los principales componentes son  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{PbSO}_4$ ,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{ZnO}$  y  $\text{As}_2\text{O}_3$ .

En la Tabla 1 que informa la composición química de las muestras tomadas a los polvos metalúrgicos de la fundición Potrerillos y los resultados de los análisis químicos.

**Tabla 1: Composición química del polvo metalúrgico de Fundición Potrerillos.**

Elemento.	Análisis Químico.
Cu	10,4%
Fe	0,8%
S	10,4%
As	19,4%
Sb	0,1%
Zn	15,6%
Pb	7,8%
Bi	3,5%

Propiedades físicas:

**Tabla 2: propiedades físicas del polvo metalúrgico.**

Parámetros	Unidad	Valor
Densidad Aparente.	g/cc	1,3
Densidad Real.	g/cc	3,5
Angulo de reposo.	----	35

## **2.1.2) Recolección del polvo metalúrgico.**

El material particulado presente en los gases se recupera en las etapas de enfriamiento y limpieza seca de los gases. La mayor parte de los polvos de arrastre se recuperan en las cámaras mata polvos y de enfriamiento (radiativo y/o evaporativo) donde, por una disminución de la velocidad de los gases por expansión de la sección de los ductos, se produce una sedimentación de las partículas más gruesas.

Para el enfriamiento de gases utilizan, tanto en el CT como en los CPS, cámaras con enfriadores radiantes que permiten el enfriamiento de los gases en alrededor de 400°C.

Para captar las partículas más finas, el equipo más difundido en la limpieza seca es el precipitador electrostático, que mediante la aplicación de un campo electromagnético, permite recuperar las partículas en función de su carga superficial, aun cuando son partículas de muy bajo tamaño (micrométricas). Los precipitadores electrostáticos poseen normalmente tres campos, donde se reciben los polvos. En el primero se obtienen los polvos con el mayor contenido de cobre y en los de los campos siguientes los altos en As.

Resultando, que en el CT el material particulado es recuperado en su mayor parte en la cámara de expansión, en el sistema de enfriamiento radiativo y precipitador electrostático seco, y en los CPS en la pantalla mata polvos de la cámara de expansión y en el sistema de enfriamiento radiativo (material más denso).

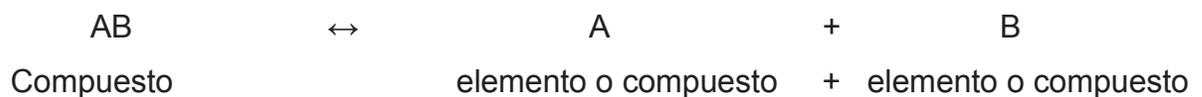
Como resultado de los procesos de enfriamiento y limpieza de gases, el polvo metalúrgico es extraído mediante bombonas, las que depositan el polvo en maxisacos, los que posteriormente son almacenados en forma transitoria y sobre pretilas, en los Patios de Acumulación Secundaria, como muestra la Fig. 5 permitiendo la recolección de dicho polvo.



Figura 5: Recolección de Polvo metalúrgico.

### 2.1.3) Descomposición del polvo metalúrgico.

En una reacción de descomposición, una sola sustancia se descompone o se rompe, produciendo dos o más sustancias distintas. A este tipo de reacciones se le puede considerar como el inverso de las reacciones de combinación. El material inicial debe ser un compuesto y los productos pueden ser elementos o compuestos. Generalmente se necesita calor para que ocurra la reacción. La forma general de estas ecuaciones es la siguiente:



Ya que, los principales compuestos del polvo metalúrgico son:

PbSO<sub>4</sub>, ZnSO<sub>4</sub>, CuSO<sub>4</sub>, ZnO, Cu<sub>2</sub>O, As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Los sulfatos se descomponen, cuando se añaden al baño a 1200°C, según las siguientes reacciones:



Mientras que los óxidos, (ZnO, Cu<sub>2</sub>O), no se descomponen y se añaden al baño como se encuentran en el polvo; As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> se descompone según la siguiente reacción:



## 2.2) Refinación a fuego de cobre <sup>[9]</sup>.

El refino a fuego, es una técnica que ha sido usada en el proceso del cobre durante mucho tiempo, casi sin sufrir variaciones. Es una operación batch que se realiza en hornos del tipo basculantes, o en hornos cilíndricos rotatorios llamados casting.

El objetivo de la Refinación a fuego, es generar un producto de calidad química y física bajo estándares establecidos, por:

- a) Refinería electrolítica, y
- b) Normas de comercialización.

La tabla 3, muestra las especificaciones químicas, solicitadas por la refinería de Potrerillos para los ánodos de cobre.

**Tabla 3: Especificación química de refinería Potrerillos para Ánodos.**

Normas Refinería	Rango contenido (ppm).
O <sub>2</sub>	< 2.000
Sb	< 500
As	< 2.500
As/Sb	> 4,5
O/As	1,5 – 0,8

El proceso de refinación a fuego para producir cobre anódico o RAF, involucra una serie de etapas y tratamientos para eliminar las impurezas presentes en el cobre blíster y obtener el producto final de calidad química que cumpla con las especificaciones exigidas por el mercado. Siendo un proceso discontinuo y como tal, se efectúa en hornos de tipo basculante en etapas secuenciales de proceso.

Las etapas de proceso propiamente tal son:

- Carguío.
- Escoriado.
- Oxidación
- Reducción

Consistiendo básicamente en una oxidación selectiva de las impurezas, su incorporación a una fase de escoria, su eliminación parcial durante el escoriado y una posterior desoxidación del baño del cobre. Distinguiendo dos etapas bien definidas:

### 1. Etapa de oxidación:

El método más común usado hoy en día, es insuflar aire a presión (90lb/pulg<sup>2</sup>) en el baño metálico, mediante cañerías de fierro, introducidas a través de aberturas laterales del horno, o bien mediante toberas. El oxígeno ataca las impurezas y las oxida. Algunas impurezas tales como el S, algo de As y Sb forman óxidos volátiles y salen con los gases del horno. Otros óxidos de cobre, suben a la superficie del baño metálico.

El aspecto y cantidad de escoria formada dependerá de la naturaleza y cantidad de las principales impurezas en el cobre. Esta operación de escoriado continúa hasta que no se forma más escoria y se comienza a formar Cu<sub>2</sub>O en el baño. Este líquido tiene un aspecto aceitoso característico y su presencia indica que el baño está saturado en oxígeno en la forma Cu<sub>2</sub>O, es decir, se ha alcanzado el estado de cobre set.

#### **Remoción de impurezas del cobre por oxidación.**

Una de las reacciones más importantes para la remoción de impurezas por oxidación es la reacción de disolución del oxígeno en el cobre líquido.



Así, el mecanismo de oxidación selectiva de impurezas estaría dado por la reacción:



Donde M representa la impureza disuelta en el cobre líquido y MO<sub>v</sub> es el producto de oxidación de la impureza, la que puede ser un gas, como por ejemplo SO<sub>2</sub>, un líquido o un sólido que eventualmente pasarían a formar parte de la escoria, la Fig. 6 muestra una burbuja de aire ascendiendo a través del seno del cobre líquido, produciéndose la reacción de disolución y la reacción de oxidación selectiva de impurezas.

Cuando las impurezas están diluidas en el cobre, es posible que haya una competencia por el oxígeno entre estas y el cobre mismo. En este caso, es válida la siguiente reacción:



La remoción de impurezas metálicas por oxidación puede estudiarse considerando la siguiente reacción metal – escoria:



Cuya constante de equilibrio es:

$$K = \frac{a_{\text{MO}_v}}{a_{\text{M}}} \left( \frac{a_{\text{Cu}}}{a_{\text{CuO}_{0,5}}} \right)^{2v} \quad (10)$$

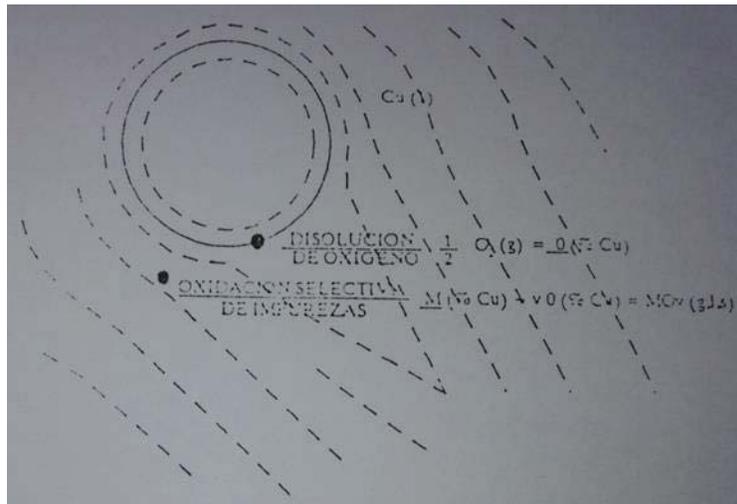


Figura 6: Mecanismo de disolución del oxígeno en cobre blíster líquido y oxidación selectiva de impurezas <sup>[9]</sup>.

## 2. Etapa de reducción:

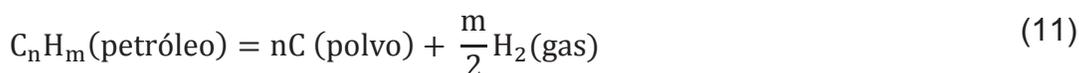
Esta etapa se realiza después del escoriado del cobre set y se efectúa insuflando petróleo con vapor a través de toberas sumergidas en el baño, o bien mediante la introducción de troncos de eucalipto en el baño, operación que recibe el nombre de poling.

La alta temperatura del baño provoca la destilación de la madera con gran producción de gases reductores que agitan y reducen el  $\text{Cu}_2\text{O}$  a cobre metálico.

Al final del proceso, se obtiene un producto llamado cobre refinado a fuego.

### **Reacciones involucradas en el proceso de reducción.**

Formación de humo negro.



### **Reacciones de reducción**



### **Reacciones de reformación**



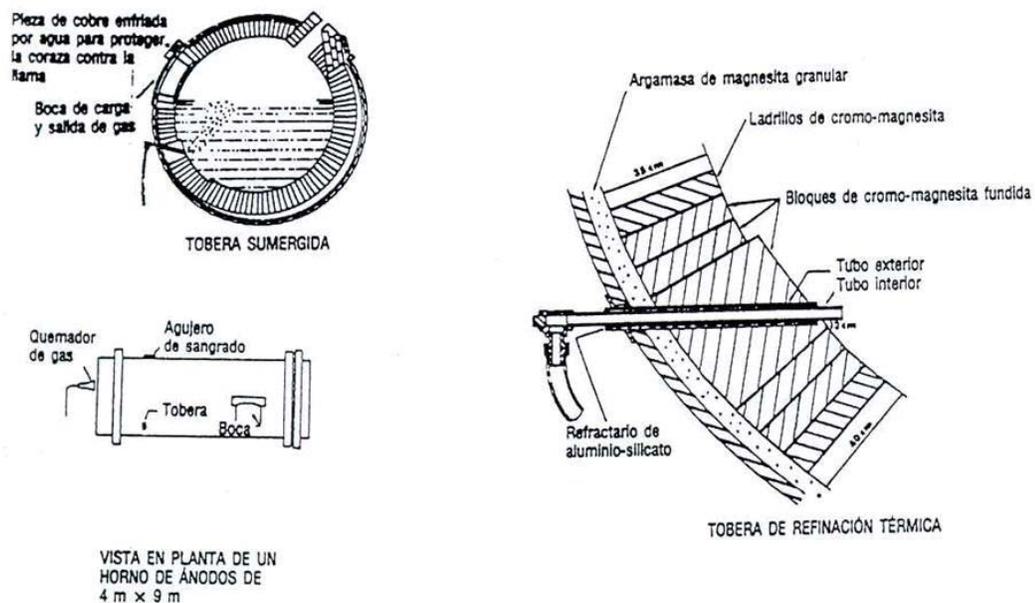
### **2.2.1) Mecanismo de Refinación en horno basculante.**

Este horno tiene una tobera para introducir combustible (ENAP-6, Fundición de Potrerillos) al metal fundido. Para el control preciso de la composición del metal, los caudales de gases son relativamente bajos de 5 -15  $\text{Nm}^3/\text{min}$ , de manera que necesita una o dos toberas. La refinación de una carga de 250 toneladas de cobre demora cerca de 3 - 5 horas; 1/2 a 1 hora para la oxidación y el resto para la reducción. La Fig. 7

muestra una tobera sumergida como es el caso de nuestras pruebas en una sección transversal, la disposición de la tobera en el horno y el detalle de una tobera.

Una secuencia típica de eventos en un horno basculante de refinación es la siguiente:

- 1) Se agrega el cobre blíster fundido al horno, a medida que se hace disponible en los convertidores, hasta acumular cerca de 150 - 300 ton en el horno.
- 2) La carga acumulada luego se oxida soplando aire a través de la tobera hasta que el contenido de azufre se baja a 0,001 – 0,003% al mismo tiempo se toma una muestra, que al enfriarse debe mostrar una ligera contracción o un pequeño hoyo en ese punto el nivel de oxígeno en el cobre es cerca de 0,6%.
- 3) Luego se elimina el oxígeno del cobre soplando Enap 6 a través de la tobera en donde se debe llegar a niveles de oxígeno de 0,05 a 0,2% después de esta operación, lo cual produce una superficie plana en el ánodo después del moldeo.



**Figura 7: Sección transversal tobera sumergida, disposición de la tobera en el horno y detalle de una tobera del horno basculante <sup>[9]</sup>.**

### 2.3) Fundentes alcalinos.

Durante la etapa de oxidación del cobre blíster es deseable acercarse a una condición cobre set, que es una saturación en oxígeno de cobre. En esta condición, es lícito suponer que las actividades tanto del cobre como de su óxido son unitarias, entonces, la ecuación (10) se transforma en:

$$K = \frac{a_{\text{MO}_v}}{a_M} = \frac{\gamma_{\text{MO}_v} \cdot X_{\text{MO}_v}}{\gamma_{\underline{M}}^{\circ} \cdot X_{\underline{M}}} \quad (16)$$

Donde  $\gamma^{\circ}$  es el coeficiente de actividad a dilución infinita de la impureza  $\underline{M}$  en el cobre líquido.

En la Tabla 4 se muestran valores de la constante de equilibrio para diversos metales. Los datos se han ordenado de acuerdo al sentido creciente de la constante de equilibrio. Los metales se dividen en tres grupos. El primer grupo de metales, desde Au a Te, posee pequeños valores de K, lo que sugiere que su remoción por oxidación es difícil. Sin embargo, los metales de este grupo son valiosos, por lo que su retención en el cobre es ventajosa desde una perspectiva económica. El tercer grupo de metales, desde Fe a Ca, deberían removerse fácilmente por oxidación. El segundo grupo de metales, desde Bi a Sn, debe inducirse su extracción.

En la Tabla 4 se muestran valores de  $\gamma_{\underline{M}}^{\circ}$  calculados a 1200°C. Considerando los valores de K y  $\gamma_{\underline{M}}^{\circ}$ , el segundo grupo se puede arreglar en orden creciente a su tendencia a oxidarse:

As → Sb → Bi → Pb → Cd → Sn → Ni → Zn → Fe.

Sin embargo, este orden es para iguales fracciones molares,  $X_{\underline{M}}$ , de los metales M en cobre fundido e iguales valores de  $a_{\text{MO}}$ . Es claro que As, Sb y Bi no se eliminan fácilmente por oxidación.

**Tabla 4: datos termodinámicos para la eliminación de impurezas desde el cobre a 1200°C [10].**

Elemento	K	$\gamma_M^\circ$	$P_M^\circ$
Au	$1,2 \times 10^{-7}$	0,34	$4,9 \times 10^{-7}$
Ag	$3,2 \times 10^{-5}$	4,80	$2,2 \times 10^{-4}$
Pt	$5,2 \times 10^{-5}$	0,03	$6,13 \times 10^{-13}$
Pd	$6,2 \times 10^{-4}$	0,06	$8,5 \times 10^{-7}$
Se	$5,6 \times 10^{-4}$	$\ll 1$	66
Te	$7,7 \times 10^{-2}$	0,01	3,9
Bi	0,64	2,70	$4,2 \times 10^{-2}$
Cu	-	1,00	$4,5 \times 10^{-6}$
Pb	3,80	5,70	$1,9 \times 10^{-2}$
Ni	25	2,80	$2,8 \times 10^{-8}$
Cd	31	0,73	32
Sb	50	0,013	$7,9 \times 10^{-2}$
As	50	0,0005	$5,0 \times 10^{-2}$
Sn	$4,4 \times 10^2$	0,11	$6,5 \times 10^{-6}$
Fe	$4,5 \times 10^3$	15	$7,8 \times 10^{-8}$
Zn	$4,7 \times 10^4$	0,11	10
Na	$1,1 \times 10^5$	-	8,7
Cr	$5,2 \times 10^6$	-	$3,2 \times 10^{-7}$
Si	$5,6 \times 10^8$	0,1	$1,0 \times 10^{-6}$
Al	$8,8 \times 10^{11}$	0,008	$1,3 \times 10^{-5}$
Mg	$1,4 \times 10^{13}$	0,067	2,1
Ca	$4,3 \times 10^{14}$	-	0,13

Por otra parte, en la Tabla 4 se muestra adicionalmente valores de la presión de vapor de las diversas impurezas metálicas a 1200°C. Esto permite efectuar un análisis de la remoción de impurezas mediante volatilización.

La presión de vapor de impurezas metálicas disueltas en cobre está dada por la siguiente ecuación:

$$p_M = p_M^\circ \cdot a_M = p_M^\circ \cdot \gamma_M^\circ \cdot X_M \quad (17)$$

Donde  $p_M$  es la presión de vapor del metal impureza pura.

A partir de los valores de  $p_M^\circ$  y  $\gamma_M^\circ$  en la Tabla 4, es evidente que Zn y Cd serían fácilmente removidos por volatilización, mientras que debido a sus valores extremadamente pequeños de  $\gamma_M^\circ$ , elementos tales como As, Se y Te serán difíciles de remover, pese a sus altos valores de  $p_M^\circ$ .

Para obtener buenos resultados en la remoción de impurezas metálicas, es deseable tener pequeños valores de  $\gamma_M^\circ$ , y grandes valores de  $\gamma_{MO_v}$ ,  $X_{MO_v}$  y K.

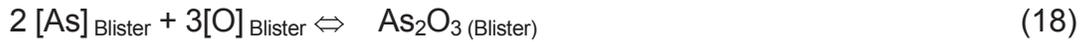
La formación y retiro de escoria hace decrecer el valor de  $X_{MO_v}$ .

Y la adición de ceniza de soda o cal, para remover As y Sb, hacen decrecer el valor de  $\gamma_M^\circ$ .

Y los fundentes para la remoción de As, son  $CaCO_3$  y  $Na_2CO_3$ , son fundentes básicos que generan la basicidad necesaria en la escoria.

### 2.3.1) Eliminación de arsénico vía fundentes alcalinos.

El arsénico disuelto en el blíster se oxida con el oxígeno atómico disuelto de acuerdo a la siguiente reacción.



El trióxido de arsénico formado, es soluble en el blíster y por lo tanto tiene poca tendencia a escapar del baño pasando a la fase gaseosa, como es el caso del  $\text{SO}_2$ .

Para lograr retirar el arsénico del baño, es necesario crear una escoria que sea capaz de reaccionar con el trióxido según la ecuación:



Los reactivos usados para formar esta escoria, son el carbonato de calcio y el carbonato de sodio. Las reacciones correspondientes son:

a) Carbonato de Calcio



b) Carbonato de Sodio



## 2.4) Refinación electro química del cobre.

Consiste en la disolución electroquímica del cobre desde ánodos impuros (99,6%Cu), y la electro deposición selectiva del cobre disuelto sobre cátodos de cobre puro, utilizándose como medio de transporte de iones una solución acuosa de sulfato de cobre y ácido sulfúrico. Se cumplen 3 objetivos:

1. Obtención de cobre de alta pureza.
2. Eliminación, y posterior recuperación de impurezas perjudiciales para las propiedades eléctricas y mecánicas del cobre.
3. Separación de impurezas valiosas (oro y plata) y recuperación a partir de barros anódicos.

Consiste básicamente en una oxidación electrolítica del ánodo y una reducción de la misma naturaleza en el cátodo. Industrialmente se lleva a cabo en celdas de concreto, poliméricas o plásticas. El electrolito se alimenta en una de las caras de la celda por su parte inferior, y la salida se ubica en la parte superior de la cara opuesta. Cuentan además con una perforación en el piso para la extracción del barro anódico.

La corriente eléctrica es entregada a cada celda y distribuida a los ánodos a través de una barra conductora aislada, apoyada sobre una de las paredes de la cuba y entregada por el cátodo de dicha celda a una barra conductora, ubicada en la parte opuesta de la celda. El electrolito es alimentado a las celdas desde un estanque elevado. Desde las celdas es enviado posteriormente a un estanque de almacenamiento, y luego a un intercambiador de calor para ajustar su temperatura, y posteriormente es conducido hasta el estanque elevado que cierra el circuito de circulación del electrolito a las celdas, el electrolito llega con una concentración en cobre que varía entre 40 y 50 g/l y a una temperatura entre 60 - 68°C, y sale con una temperatura de 60 - 65°C. Si llegase a aumentar la concentración de cobre en el electrolito, este es enviado a unas celdas de electro-obtención llamadas de descubrición, para bajar así su contenido en cobre (un aumento produce problemas operacionales y de calidad catódica).

### 2.4.1) Impurezas en el electro refinado de cobre.

La problemática de las impurezas presentes en el proceso de Electro refinación de cobre, se traduce en costos directos para la empresa debido a que se producen cátodos físicamente irregulares, los cuales son rechazados por no ser aptos para su comercialización, siendo estos recirculados a las operaciones previas de fundición. Esto implica una disminución en la capacidad productiva y un aumento en la carga circulante de impurezas en el sistema. Esta acción se denomina “rechazo catódico” y se evalúa como un porcentaje de la producción total de cátodos de cobre.

Se han publicado diversos estudios con respecto al comportamiento e influencia de impurezas en la calidad catódica <sup>[11-12]</sup>, pudiéndose resumir tales trabajos en lo siguiente:

- Los elementos menos nobles que el cobre, como cinc, níquel y hierro se disuelven fácilmente en el electrolito y permanecerán en él hasta que sean removidos por el electrolito de descarte.
- Los elementos más electropositivos que el cobre, como el selenio, telurio, plata, oro, paladio, platino y elementos que son insolubles en ácido sulfúrico, como el plomo, formarán compuestos sólidos insolubles que caerán del ánodo al fondo de las celdas formando el denominado “barro anódico” <sup>[13-14]</sup>.
- Un tercer grupo de elementos comprende las impurezas que tienen un potencial de disolución comparable al cobre, como el arsénico, antimonio y bismuto. Estos elementos se comportan de diferentes maneras, dependiendo de la composición del ánodo y de otros parámetros operacionales. De acuerdo a esto, es posible encontrar estos elementos en el electrolito, formando compuestos sólidos finos y/o densos, con un modelo fluctuante de distribución.

Estos elementos, dependiendo de su concentración en disolución, pueden formar un amplio rango de compuestos insolubles, denominados “laminas flotantes”. Se forman por la precipitación a partir del ánodo o del electrolito y pueden flotar en la superficie de éste contaminando el cátodo.

Las impurezas pueden provocar los siguientes problemas en el proceso de electro refinación:

- Producción de barras anódicas, los cuales se desplazan hacia el cátodo por convección, siendo ocluidos aquí mecánicamente.
- El electrolito contiene impurezas disueltas las cuales pueden ser atrapadas en micro espacios producidos entre los cristales de cobre en la superficie del cátodo.
- La presencia de algunas impurezas en disolución, las cuales pueden ser depositadas junto al cobre, contaminando el producto final.

Aunque el proceso de electro refinación de cobre está bien establecido y es altamente eficiente, no está libre de ciertos problemas operacionales. Uno de los problemas persistentes en operaciones de electrorrefino del cobre es el crecimiento de nódulos en los cátodos de cobre, causado principalmente, por partículas suspendidas en el electrolito, como es el caso del antimonio y lama flotante.

#### **2.4.2) Arsénico, antimonio y lama flotante <sup>[15]</sup>.**

Dado que no cabe esperar la presencia del Sb al cátodo por mecanismos electroquímicos, la mayor fuente de contaminación de esta impureza está dada por:

- a) Oclusión de electrolito que lo contiene al cátodo, o
- b) por adherencia de coloides flotantes sobre la superficie extrema del cátodo.

Siendo la segunda opción, sin duda, la principal fuente que explica la presencia del Sb al cátodo, fenomenología que se acrecienta si para una concentración determinada de Sb (III) al electrolito, menor es el contenido de As en éste. Esto mismo explica la razón por la cual en algunas Refinerías se adiciona Arsénico al sistema <sup>[16]</sup>. En efecto, no se cita en la literatura técnica ni ha sido comprobado experimentalmente, la formación de lamas flotantes asociadas a As y Sb.

Esta lama flotante, erróneamente llamados "barros flotantes", son compuestos del tipo



Más específicamente como,  $x\text{Sb}_2\text{O}_3 \cdot y\text{SO}_3$ .

Estos compuestos son no-estequiométricos y de composición variable. Al depositarse sobre los cátodos, causan la aparición de nódulos ("poroteo") como muestra la Fig. 8, que conducen a rechazo de cátodos por su calidad física.



Figura 8: Cátodos con nódulos <sup>[15]</sup>.

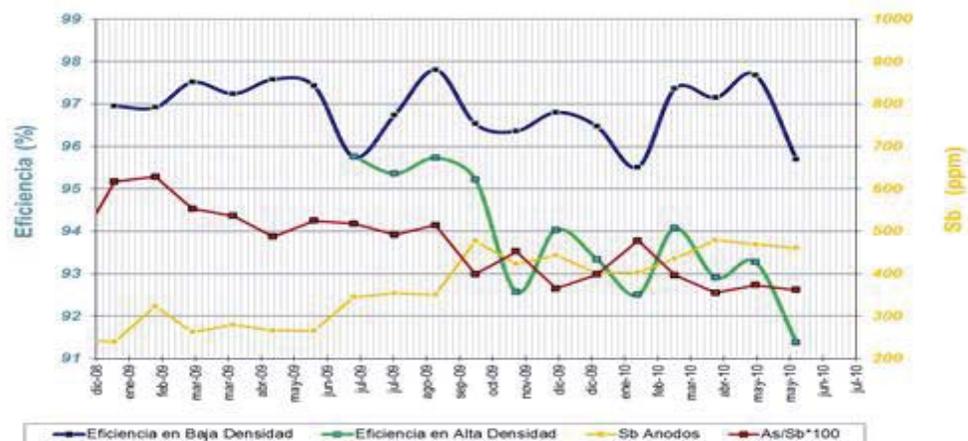
Por lo tanto, cuando el Sb se encuentra al estado trivalente, es más apropiado favorecer las condiciones de precipitación de dichas partículas sólidas o coloidales en el electrolito, según como se muestra en la reacción (1).

Ya que la formación de lamas de Sb (V) en las celdas, es más perjudicial que las de Sb (III), debido a la menor solubilidad de las primeras, lo que se produciría cuando el potencial del electrolito es relativamente mayor que el promedio por lo que hay que mantener una razón molar As/Sb, tal que favorezca la formación de compuestos que decanten al barro anódico, en desmedro de las lamas flotantes, en el caso de la fundición potrerillos mayor o igual a 4,5.

En la Tabla 5, y en el gráfico 1, se muestra el impacto de Sb en la eficiencia de la corriente en la refinería de potrerillos y la directa relación entre la razón As/Sb y la disminución de la eficiencia de corriente.

**Tabla 5: tabla cronológica, Impacto del contenido de Sb en la eficiencia de corriente, Refinería Potrerillos <sup>[17]</sup>.**

Periodo	Comportamiento Sb	Baja Densidad.	Alta Densidad.
Enero 2003 - Febrero 2008.	- Aumento de Sb en los ánodos. - Razón As/Sb sobre 5.	No se observó efecto negativo en la eficiencia de corriente; se alcanza 97,5%.	
Junio 2008 – Octubre 2009.	- Baja concentración de Sb en los ánodos. - Razón As/Sb sobre 5.	Eficiencias de corriente en estándar; promedio 97,5%.	Eficiencia de corriente cercana al estándar; promedio 95,6%.
Noviembre 2009 – Junio 2010.	- Aumento de Sb en los ánodos. - Razón As/Sb bajo 4.	Baja eficiencia de corriente; promedio 96,6%.	Fuerte disminución eficiencia corriente; promedio 93,3%.



**Gráfico 1: Impacto del contenido de Sb en la eficiencia de corriente, Refinería Potrerillos <sup>[17]</sup>**

---

## **CAPÍTULO III: SISTEMA DE INYECCIÓN NEUMÁTICA.**

---

### **Sistema de Inyección neumática.**

Cada planta de inyección neumática se basa en los fundamentos de la transportación neumática.

Se define la transportación neumática como el transporte de materiales a granel secos a través de una tubería usando una corriente del gas como medio del transporte. El aire se utiliza normalmente como el medio del transporte, no obstante diversos gases tales como nitrógeno,  $\text{CO}_2$  y argón se seleccionan a veces como seguridad.

Hay una presión diferencial en la tubería y el flujo es siempre de la región más alta de presión a una de baja presión.

Los sistemas de la transportación neumática y de inyección pueden transportar virtualmente cualquier sólido a granel seco, de flujo libre, de tamaños de partícula hasta cerca de 2 pulgadas de diámetro para las densidades típicas.

El sistema neumático de inyección que se encuentra en CODELCO División El Salvador, Fundición Potrerillos está diseñado para inyectar fundentes de dos tolvas de almacenamiento, una para  $\text{NaCO}_3$  y la otra para  $\text{Ca}_2\text{CO}_3$ , en dos hornos de ánodos.

El sistema de inyección se compone del vaso de inyección pre-instalado con válvulas y accesorios y de una estación de almacenamiento para el polvo, el diagrama general se muestra en la Fig. 9, con sus diferentes Tags (etiqueta para la instrumentación).

El estado del Sistema de Inyección, en el cual se encuentro, fue de desuso y deplorable, partiendo que se encuentra incomunicado a la red, lo cual se informa en el informe de mantención mayor 2010, CODELCO, Control y Automatización.

La descripción de las partes principales, el catastro completo del sistema de inyección antes de poder comenzar a realizar las pruebas, los trabajos realizados para su habilitación, y la descripción de La operación, tanto de la interfaz como de las secuencias del proceso; Se encuentran detallas en el anexo A.

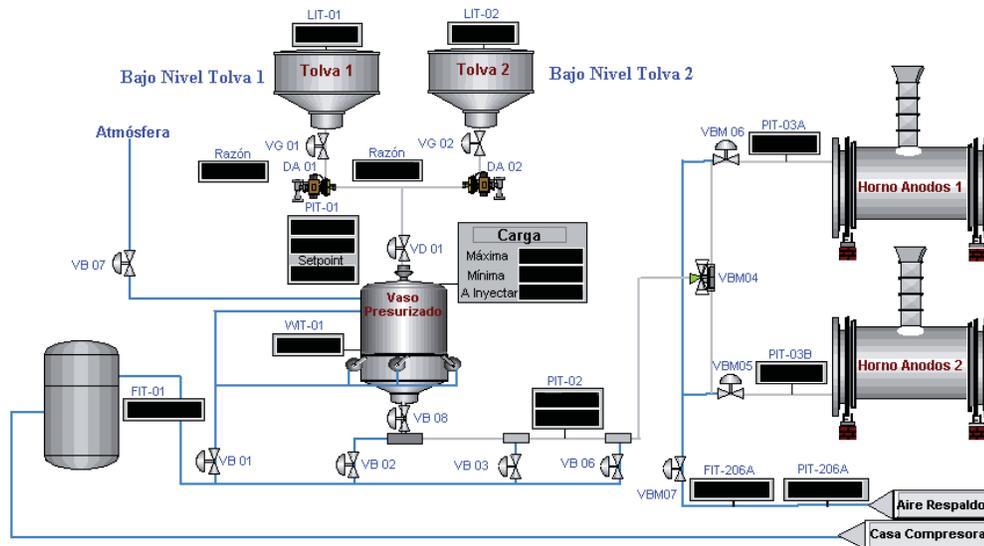


Figura 9: Diagrama de sistema de inyección neumática.

### 3.1) Condiciones de Diseño.

El sistema de inyección neumática se diseña para las condiciones de funcionamiento siguientes:

Capacidad de inyección:	10 t/h
Material:	Fundentes
Transportación de longitud de línea:	± 100 m
Tipo de transportación:	batch
Densidad a granel:	unos 1300 kg/m <sup>3</sup>
Temperatura del polvo:	< 50°C
Granulometría del polvo:	molido y seco, 100% <1000 µm
Humedad del polvo:	máximo 0,2% másico
Elevación del sitio:	3000 metros sobre nivel del mar
Temperatura ambiente:	-7 +30°C
Presión barométrica:	71 kPa
Humedad relativa:	8 - 70 %

---

## **CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL**

---

### **4.1) Metodología.**

Para realizar las inyecciones tanto de polvo metalúrgico como fundentes alcalinos en el baño de metal líquido de cobre en los hornos de ánodos, primero que todo hubo que realizar una recopilación de datos, esto para confeccionar los balances de masa necesarios para el cálculo de la adición y generar datos de aquellos que no se estaban disponibles.

Para la realización de las pruebas se requiere:

- Un sistema de inyección neumática, el cual describe en el capítulo III y en el anexo A su habilitación.
- Polvo metalúrgico y fundentes alcalinos los cuales se muestrean, se transportan y se cargan al sistema de inyección neumática.

Necesario para las pruebas es un procedimiento el cual describa los pasos a seguir para la inyección, teniendo como prioridad la seguridad y lo necesario para saber cuánto adicionar de polvo metalúrgico en cada prueba realizada al igual que para las pruebas de adición de fundentes alcalinos.

#### **4.1.1) Recopilación de datos.**

La recopilación de datos se llevó a cabo, guiándose por el diagrama de flujo del proceso de fundición, que se muestra en la Fig. 10, en el cual se pueden identificar los flujos de entradas y salidas, de Convertidor teniente, Convertidor Pierce Smith, horno de limpiezas de escoria y hornos de ánodos.

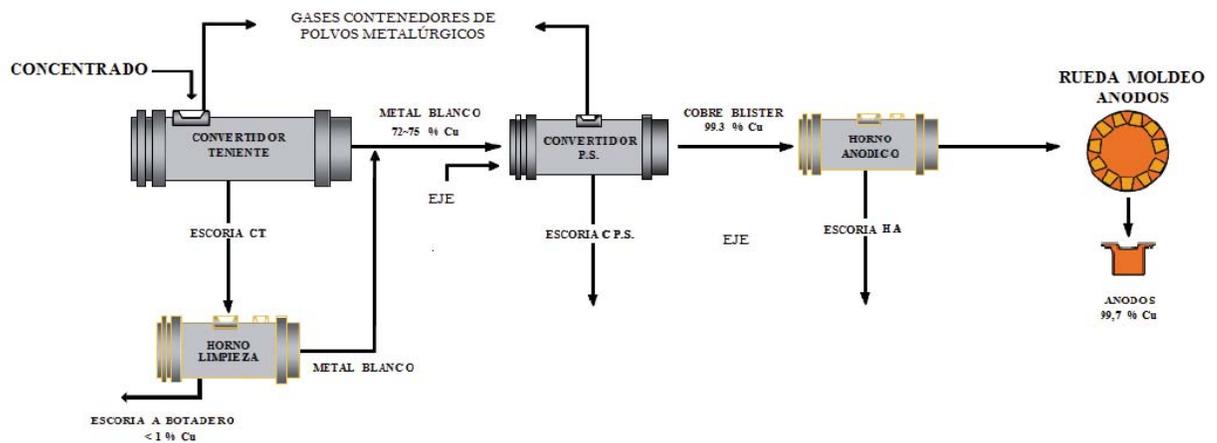


Figura 10: Diagrama de Flujo simplificado Fundición de Potrerillos, elaboración propia.

Registrándose en una tabla indicando si existían los análisis químicos requeridos y cuáles no, en la tabla 6 se muestra un extracto de la tabla de petición de análisis químicos.

Tabla 6: Extracto de la tabla de petición de análisis químicos.

FLUJO	ALIMENTACION/PRODUCTO	ANALISIS QUIMICO As, Sb
<b>Concentrado</b>	<b>Alimentación</b>	<b>Si</b>
<p><b>Comentario:</b> Este análisis es para el concentrado, sin embargo lo que entra al Convertidor Teniente es una mezcla, así que ponderar estos resultados con el aporte de cada concentrado a la mezcla que ingresa, y a la cantidad que aporte aplicar los análisis químicos.</p>		

Para los que no existía información de análisis químicos, se genera información, mediante toma de muestras y análisis químicos respectivos para cada tipo de muestra.

Los flujos los cuales no existía análisis químicos para las impurezas As y Sb, y que se tuvo que generar información y procedimientos para la generación de esta información son los siguientes:

- Escoria de Convertidor Pierce Smith.

Para este flujo no había ninguna información, debido a que ya no se muestreaba, por lo tanto la acción que se tomó fue basarse en el procedimiento de muestreo por churrin, que se usa para muestrear blíster, el cual básicamente consiste en introducir una varilla de metal “churrin” al chorro de escoria, retirarlo, enfriarlo y desprender la escoria adherida al churrin, para llevarlo a análisis.

- Escoria de Hornos de Ánodos.

La escoria de hornos de ánodos, tampoco era muestreada por lo tanto se tuvo que comenzar a realizar la acción de muestrearla, por muestreo de cono, para esto se utilizó una varilla con forma de cuchara la cual se introducía en el chorro de escoriado para luego el contenido verterlo en un recipiente en forma de cono la cual se dejaba enfriar y de ahí el nombre del muestreo ya que toma una forma de cono, el cual será transportado así, para su análisis.

- Cobre de salida de Convertidor Pierce Smith (cobre blíster).

Se pidió que al análisis de las muestras de cobre blíster, tomadas por muestreo de churrín, se añadieran As y Sb.

- Cobre en la salida de la etapa de Oxidación y Cobre en la salida de la etapa de Reducción (cobre anódico).

Para muestrear estas etapas, se utilizó el procedimiento de muestreo de cono, con la diferencia de que en vez de introducir la varilla al chorro como es en el caso del escoriado, se introdujo en el baño, que está contenido en el horno.

#### 4.1.2) Preparación de las pruebas de inyección.

- Muestreo:

Para el muestreo y posterior análisis solo del polvo metalúrgico, se utiliza una vara como se muestra en Fig. 11 con la cual se sustrae las muestras de diferentes sectores del maxisacos, para llevarlas al laboratorio donde las analizan.



Figura 11: Muestreo de polvo metalúrgicos.

- Transporte.

El transporte fue en maxisacos cargados con una grúa horquilla, como muestra la Fig. 12, a un camión el cual llevaba los sacos a donde se encuentra el sistema de inyección, que es en el área de taller de moldes de la Fundición Potrerillos



Figura 12: Transporte vía horquilla.

- Carguío a silos del sistema de inyección.

Ya sean los polvos o los fundentes, estos se cargan a los silos para ser almacenados ahí, para cuando sea el momento de la inyección, las figuras 13 y 14 muestran diferentes vistas de ellos. Esta tarea se realiza mediante grúas que poseen cadenas las cuales van unidas a lingas que sujetan los maxisacos, siendo estos subidos a los silos de almacenamientos, los que se colocan en posición vertical a la escotilla de entrada al silo y se procedió a realizar un corte con un cuchillo, haciendo caer por gravedad el polvo o fundente dentro del silo. Para esta tarea se necesitan:

1 operario riquet, quien maneja la grúa.

1 operador quien realiza el corte y vacía el contenido del maxisaco.



**Figura 13: Vista general de los silos.**



**Figura 14: Vista superior de los silos.**

### 4.1.3) Inyección.

La inyección se realizara dentro del baño, para esto se necesita que la tobera de inyección este sumergida en el baño, por lo tanto, se necesita nivel de líquido.

Por esto la inyección se realiza en la segunda carga alimentada al horno de ánodo seleccionado, descartando las opciones de inyectarlo en la primera carga por falta de nivel de líquido y en la tercera por la imposibilidad de acoplar el flexible a la tobera por el nivel del líquido en el horno.

La inyección consta de los siguientes pasos:

- Inspección del flexible.
- Girar el Horno de Ánodos seleccionado hasta que los tubos de soplado o toberas se encuentren fuera del baño de cobre.
- Cortar el suministro de aire de tubos y los suministros del quemador (aire, combustible y oxígeno). Esto último sólo si el operador lo estima necesario para ejecutar la maniobra siguiente.
- Desconectar el ducto flexible de aire y conectar el ducto flexible de inyección de tobera de inyección. Durante el período de inyección de polvo metalúrgico el Horno de Ánodos funcionará sólo con un tubo.
- Abrir la válvula de corte manual instalada en la conexión de la línea de inyección con el ducto flexible.
- Dar paso de aire de respaldo, (abriendo válvula de aire de respaldo).
- Percibir que pasa suficiente volumen de aire por la tobera de inyección. Si no se percibe flujo de aire se debe revisar el estado de las válvulas de corte manual y automática instaladas en la línea de aire de respaldo. Todas las válvulas deben estar abiertas.
- Habilitar el suministro de aire para el tubo de soplado y el quemador, si corresponde.
- Verificar y/o percibir que la tobera de soplado y la tobera de inyección conducen aire necesario y suficiente para sumergir las toberas en el baño.

- Girar el Horno de Ánodos hasta la posición de soplado (Etapa de Oxidación).
- Cuando las toberas se encuentren en el baño se debe ejecutar la secuencia de inyección.
- Verificar que haya concluido la secuencia de inyección. Debe estar encendida la señal "LISTO" en el Pupitre de Control y el indicador de peso debe mostrar el valor de peso mínimo configurado por el Programador de PLC. En condiciones normales de operación esta secuencia demora aproximadamente 35 minutos.
- Girar el Horno de Ánodos seleccionado hasta que la tobera de soplado y la tobera de inyección se encuentren fuera del baño de cobre.
- Cortar el aire del tubo de soplado y cerrar la válvula de corte manual instalada en la conexión de la línea de inyección con el ducto flexible.
- Extraer una muestra de cobre para realizar el análisis químico.

Para concluir el proceso de inyección de polvo o fundente proceda como se indica a continuación:

- Desconectar el ducto flexible de inyección y conectar el ducto flexible de aire en la tobera de inyección.
- Habilitar el suministro de aire de toberas o tubos y continuar con la operación normal del Horno de Ánodos.

#### **4.1.4) Seguridad.**

La seguridad cumple un rol fundamental y es prioridad en todas las actividades que se realice con respecto a la inyección, toma de muestras, transporte y carguío de polvos o fundentes.

Con respecto a la toma de muestras, el operario debe tener claro el procedimiento, haber realizado la hoja de planificación de tareas, norma exigida por CODELCO, para cualquier tarea, en la cual se identifican los riesgos asociados a la tarea y se identifican los peligros de la tarea a realizar, y ver la factibilidad de realizarla o no.

El uso de equipo de protección personal adecuado al área en la cual se realiza la tarea, es obligatorio,

En la toma de muestras, transporte y carguío:

- Casco de seguridad.
- Buzo Tivek (polvo metalúrgico).
- Chaqueta y pantalón de lanilla (cobre).
- Respirador con filtro (gas y polvo).
- Zapatos de seguridad.
- Gafas de seguridad.
- Guantes largos o cortos.
- Protectores auditivos.

Consideraciones especiales para el transporte de insumos, tener siempre presente en la línea de visión, la grúa horquilla, para evitar colocarse en el tránsito de ella, y así no realizar interacción hombre-máquina.

Con respecto a la tarea de carguío de insumos atención especial con lo que respecta a cargas en suspensión, ya que los insumos serán suspendidos a una altura de aproximadamente 5 metros. Y en todo momento estar con sus implementos de seguridad debido a la emanación de polvo debido al carguío.

En la inyección tener presente que los componentes del sistema de inyección neumática pueden contener aire comprimido hasta presiones de 600 kpa en

cualquier momento. El aire comprimido es explosivo en naturaleza y se debe tratar como peligro de seguridad.

Además de las emisiones de polvo alrededor del sistema de la inyección neumática, que pudiesen ocurrir.

Con respecto al ambiente arsenical que provocara la adición de polvo metalúrgico se trabajara con **DECRETO SUPREMO N° 594**, quien decreta reglamento sobre condiciones sanitarias y básicas en los lugares de trabajo.

En el cual se especifica en el artículo N°66 los límites permisibles, en el N° 63 el factor que adecua estos límites a las condiciones de trabajo en el lugar que se desea realizar la inyección, que en nuestro caso es el área de hornos de ánodos de la Fundición Potrerillos.

## **4.2. Desarrollo experimental.**

Para la adición de polvos metalúrgicos, es necesario predecir la cantidad de arsénico y antimonio a la salida de la etapa de refinación a fuego en el baño de cobre, y para la adición de fundentes alcalinos la cantidad de arsénico que entra a la etapa de refinación a fuego en el baño de cobre.

Para lograr conocer estas cantidades se necesita conocer la alimentación de concentrado a la fundición, la cual es una mezcla de concentrados secos compuesta tanto de concentrado propio como de proveedores exteriores y a su vez conocer cómo se distribuye esta por la fundición, dado que tanto la salida como la entrada del baño del cobre son funciones de esta alimentación.

Con respecto a su distribución, se calculan por medio de los coeficientes de distribución que están contruidos en base a balances de masas, y estos diseñados a partir de las muestras tomadas de los flujos del proceso y analizadas en los laboratorios químicos pertenecientes a la fundición.

Con la información recopilada se crea una planilla la cual indica la razón As/Sb con la que se prevé en base a coeficientes que saldrá el baño y si su valor es inferior a 4,5 los kilogramos de polvo que se deben adicionar para que esta salga con dicho valor.

Indica además el contenido de arsénico en la alimentación a la etapa de refino a fuego y si está en exceso, cuanto sobre el valor permitido de 2500 ppm esta, para con la ayuda de la tabla de adición de fundentes alcalinos confeccionada, inyectar la cantidad de fundente, esto para normalizar el escenario de exceso de arsénico en el sistema.

### 4.2.1) Cálculo de alimentación.

La alimentación de concentrado es una mezcla, si bien puede crearse de todos los concentrados, o solo algunos. La tabla 7 muestra los concentrados y su procedencia, que maneja la Fundación Potrerillos para formar la mezcla.

Tabla 7: Concentrados de Fundación Potrerillos.

Concentrado	Procedencia
El salvador	Propia
Los amarillos	Externa
Teniente	Externa
Andina	Externa
Chuquicamata	Externa
Escondida	Externa
Collahuasi	Externa
Punta de cobre	Externa
Fortuna	Externa
San Geronimo	Externa
Covelina	Externa
Cormin “Candelaria”	Externa

Entonces la alimentación a la fundición está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Mezcla} = \sum_i^N \text{toneladas de concentrados seco de cobre}_i$$

- Alimentación de As.

$$\text{Alimentación As} = \sum_i^N \text{concentrados seco de cobre}_i \cdot \%As_i$$

$\%As$  = porcentaje de As en el concentrado.

- Alimentación de Sb.

$$\text{Alimentación Sb} = \sum_i^N \text{concentrados seco de cobre}_i \cdot \%Sb_i$$

$\%Sb$  = porcentaje de Sb en el concentrado.

- Alimentación de eje.

Alimentación que se integra en un paso intermedio del proceso de fundición, específicamente en los convertidores Pierce Smith, y al igual que las otras alimentaciones es la cantidad de eje ingresado por su porcentaje de impureza en él.

#### 4.2.1) Coeficiente de distribución.

Los Coeficientes de distribución del As y el Sb en las distintas etapas de la Fundición, se muestran en la tabla 8 para el antimonio y 9 para el arsénico.

Esto permite predecir la cantidad de entrada y salida de las impurezas As y Sb en los hornos de ánodos.

**Tabla 8: Coeficientes de Distribución Sb.**

Coef. de distribución de Sb	Unidad	Metal	Escoria	Gas
Convertidor Teniente	%	26	59	15
Soplado a escoria CPS	%	30	60	10
Soplado a cobre CPS	%	60	30	10
Horno de Ánodo	%	91	5	4

**Tabla 9: Coeficientes de Distribución As.**

Coef. de distribución de As.	Unidad	Metal	Escoria	Gas
Convertidor Teniente	%	11	22	67
Soplado a escoria CPS	%	60	20	20
Soplado a cobre CPS	%	70	20	10
Horno de Ánodo	%	98	1	1

Por lo tanto, la cantidad de arsénico y antimonio a la entrada y a la salida de la etapa de refinación a fuego en el baño de cobre es:

$$\text{Cantidad de entrada de As a HA} = (\text{Alimentación de As} \cdot 0,11 + \text{eje} \cdot \% \text{As}) \cdot 0,6 \cdot 0,7$$

$$\text{Cantidad de entrada de Sb a HA} = (\text{Alimentación de Sb} \cdot 0,26 + \text{eje} \cdot \% \text{Sb}) \cdot 0,3 \cdot 0,6$$

$$\text{Cantidad de salida de As de HA} = (\text{Alimentación de As} \cdot 0,11 + \text{eje} \cdot \% \text{As}) \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,98$$

$$\text{Cantidad de salida de Sb de HA} = (\text{Alimentación de Sb} \cdot 0,26 + \text{eje} \cdot \% \text{Sb}) \cdot 0,3 \cdot 0,6 \cdot 0,91$$

#### **4.2.2) Adición de polvos metalúrgicos.**

La adición de polvo metalúrgicos está sujeta a la predicción de la razón As/Sb a la salida de la etapa de refino y está dada por

$$\frac{\text{As}}{\text{Sb}} = \frac{(\text{Alimentación de As} \cdot 0,11 + \text{eje} \cdot \% \text{As}) \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,98}{(\text{Alimentación de Sb} \cdot 0,26 + \text{eje} \cdot \% \text{Sb}) \cdot 0,3 \cdot 0,6 \cdot 0,91}$$

Si esta razón es menor a 4,5 se postula en este trabajo adicionar polvo metalúrgico, para asegurar ese valor, la cantidad de arsénico contenido en los polvos metalúrgicos a adicionar necesarios para mantener la razón sería

$$\text{As}_{\text{Polvo metalúrgico}} = \text{Salida As}' - \text{Salida As}$$

Donde

Salida As', es el arsénico de salida necesario para que la razón tome valor 4,5 y se calcula multiplicando por 4,5 con el valor del contenido de antimonio

$$\frac{\text{As}}{\text{Sb}} < 4,5 \rightarrow \frac{\text{As}'}{\text{Sb}} = 4,5 \rightarrow \text{As}' = 4,5 \cdot \text{Sb}$$

Y el valor de Salida As es el contenido de arsénico en el baño de cobre.

#### Cálculo de kilogramos de polvo metalúrgico a adicionar.

El arsénico no está en forma elemental en los polvos metalúrgicos, sino como  $\text{As}_2\text{O}_3$ , por lo tanto lo que se agrega es  $\text{As}_2\text{O}_3$ , y para saber lo que se necesita se divide por su composición porcentual en masa del As en el compuesto  $\text{As}_2\text{O}_3$ .

$$\text{As}_2\text{O}_3 \text{ Polvo metalúrgico} = \frac{\text{As}'}{0,75}$$

Y sabiendo que el contenido promedio de As del polvo metalúrgico es de 19,4%, entonces los kilogramos a adicionar de polvo metalúrgico son:

$$\text{Kg}_{\text{Polvo metalúrgicos}} = \frac{\text{As}_2\text{O}_3 \text{ Polvo metalúrgico} \cdot 100}{19,4}$$

Ejemplo de cálculo se encuentra en anexo B.

### 4.2.3) Adición de fundente alcalino.

Si se predice una entrada en el cobre blíster con un contenido de As mayor a 2500 ppm, es necesario adicionar fundentes alcalinos.

$(\text{Alimentación de As} \cdot 0,11 + \text{eje} \cdot \% \text{As}) \cdot 0,6 \cdot 0,7 > 2500 \text{ ppm.}$

A partir de los coeficientes estequiométricos se calculó la cantidad de fundentes necesarios para abatir el exceso de arsénico.

Las reacciones involucradas en el abatimiento de arsénico son, (20) – (23).

Calculando la razón teórica de eliminación de impurezas para cada fundente utilizado se obtiene que

Para eliminar 1 kg de As, se necesitan 2,0 kg de  $\text{CaCO}_3$ .

Para eliminar 1 kg de As, se necesitan 2,12 kg de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Fijando como objetivo máximo de 2500 ppm de As en ánodos y tomando como base de cálculo moldeos de 15 rack (rack=13,4 ton), 100% eficiencia de los fundentes alcalinos y la información calculada se construyó la tabla 10 de adición de fundentes para alimentaciones con exceso de arsénico desde 2600 ppm a 5000 ppm, para abatimiento de arsénico solo con  $\text{CaCO}_3$ , para solo con  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , y una mezcla de fundentes 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – 30%  $\text{CaCO}_3$ .

**Tabla 10: Adición de fundentes alcalinos para distintas alimentaciones con excesos de arsénicos.**

As inicial ppm	Adicionar kg CaCO <sub>3</sub>	Adicionar Kg Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Adicionar mezcla Kg 30% CaCO <sub>3</sub> - 70%NaCO <sub>3</sub>	
2600	40	43	5	30
2700	81	85	10	60
2800	121	128	16	90
2900	161	171	21	120
3000	201	213	26	151
3100	242	256	31	181
3200	282	298	36	211
3300	322	341	42	241
3400	362	384	47	271
3500	403	426	52	301
3600	443	469	57	331
3700	483	512	62	361
3800	524	554	68	391
3900	564	597	73	421
4000	604	640	78	452
4100	644	682	83	482
4200	685	725	88	512
4300	725	768	94	542
4400	765	810	99	572
4500	806	853	104	602
4600	846	895	109	632
4700	886	938	114	662
4800	926	981	119	692
4900	967	1023	124	722

La tabla muestra que para una alimentación de 4000 ppm de arsénico en el cobre blíster, cobre que ingresa a la etapa de refino a fuego se debe agregar si sólo se utiliza CaCO<sub>3</sub> una cantidad de 604 kg, y si solo se utilizara Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> tendría que añadirse una cantidad de 640 kg y 530 kg se utilizara la mezcla de 30% CaCO<sub>3</sub> – 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, para fijar la cantidad de arsénico en 2500 ppm.

#### **4.2.4) Plantilla de adición.**

La Tabla 11 muestra la plantilla de adición, la cual contiene las formulas calculadas anteriormente en este capítulo, y está diseñada para entregar la razón de As/Sb que se predice sin adición de polvo metalúrgico, los kilogramos de polvo metalúrgicos a adicionar si está es menor a 4,5 y los ppm de As que contiene la alimentación o cobre blíster, indicando cuanto de exceso de As hay si existe.

Para utilizar la planilla se debe ingresar

- La cantidad de concentrado seco que se fundió para producir la carga al horno de ánodo, y la cantidad de eje ingresado en la etapa de convertidores si es que se alimentó a ella con este.
  
- Análisis químico, tanto de los concentrados secos que conforman la mezcla de alimentación a la fundición y del eje que en ocasiones se ingresa a convertidores.
  
- Número de ollas de cobre blíster alimentadas a Horno de ánodos.

Consideraciones:

Las ollas de blíster tienen un peso fijo de 39,09 Ton.

Para un moldeo son necesarias tres cargas (o carreras), por lo que la planilla consta de columnas para cada carga y diferentes filas para identificar la procedencia del concentrado seco, ya que es una mezcla la alimentación.

**Tabla 11: Planilla de Adición.**

	TONELADAS DE CONCENTRADO SECO			ANALISIS QUIMICO CONCENTRADOS SECOS					
				CARGA 1		CARGA 2		CARGA 3	
	CARGA 1	CARGA 2	CARGA 3	As%	Sb%	As%	Sb%	As%	Sb%
el salvador									
los amarillos									
teniente									
andina									
chuquicamata									
escondida									
collahuasi									
punta de cobre									
fortuna									
san geronimo									
covelina									
candelaria									
eje									
concentrado fundido	0,00	0,00	0,00						
concentrado + eje	0,00	0,00	0,00						

Alimentación As		Entrada As HA	
Carga 1	0,00	Carga 1	0,00
Carga 2	0,00	Carga 2	0,00
Carga 3	0,00	Carga 3	0,00

Alimentación Sb		Entrada Sb HA	
Carga 1	0,00	Carga 1	0,00
Carga 2	0,00	Carga 2	0,00
Carga 3	0,00	Carga 3	0,00

Salida As HA	0,00
Salida Sb HA	0,00

Razon As/Sb	<b>0,00</b>
-------------	-------------

Kg Polvo	<b>0,00</b>
----------	-------------

Ollas de blister	
Carga 1	0,00
Carga 2	0,00
Carga 3	0,00

Exceso de As	<b>0,00</b>
--------------	-------------

---

## CAPÍTULO V: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

---

### 5.1) Resultados pruebas de adición de polvos metalúrgicos.

Las pruebas fueron realizadas en un lapso de tiempo de dos meses donde se monitoreaba el proceso, esperando el escenario propicio para realizarlas el cual era de tener una razón de As/Sb bajo el valor de 4,5 y concentración menor a 2500 ppm de arsénico, el cual se dió en 16 oportunidades, que fue el número total de pruebas.

Los resultados de estas pruebas de adición de polvo metalúrgico al baño de cobre, se informa en la tabla 12 y el detalle de estas pruebas se muestran en el anexo C, en las tablas C.1 y C.2, donde se informa el tonelaje de concentrado seco fundido, metal blanco, cobre blíster, utilizados en la pruebas, exceptuando el tonelaje de cobre anódico el cual es un supuesto tomado desde la experiencia de la fundición que es el tonelaje del cobre blíster menos tres cuarto de olla de escoria de horno de ánodos (26,742 toneladas), que es lo común de escoria que se retira en esta parte del proceso.

En la tabla C.1, se encuentra la cantidad de toneladas de arsénico y antimonio de cada flujo partiendo como base del análisis químico que se le realiza al concentrado seco antes de ingresar al convertidor teniendo informándose como porcentaje de la mezcla, para posteriormente ir calculando su cantidad en los diferentes flujos por medio de los coeficientes de distribución; Además de encontrarse la razón As/Sb deficiente al valor necesario, si no se añadiera polvo metalúrgico.

La tabla C.2 contiene la cantidad de polvo metalúrgico añadida en cada prueba, la cual es para que el baño de cobre abandone esta etapa del proceso con un valor en la razón de 4,5 y el análisis químico de los ánodos de cobre modificados por esta adición señalando su contenido de arsénico y antimonio en partes por millón, y la razón As/Sb con la cual termino el baño de cobre, está tomada desde los ánodos formados por este baño.

En la tabla 12, podemos encontrar la razón de As/Sb prevista mediante coeficientes de distribución, y la razón con la cual queda en el baño una vez realizada la adición de polvo metalúrgico, la cual se denomina razón de salida, en esta tabla de resultados se muestra el aumento de ésta por motivo de la inyección de polvo metalúrgico, el que se esperaba denominándolo teórico y el real que fue el que se logró con la inyección de polvo al baño, se informa de los kilogramos de polvo inyectados, el porcentaje de aumento que produce esta adición de polvo, y el porcentaje de aumento de arsénico en el baño de cobre.

**Tabla 12: resultados pruebas de adición de polvo metalúrgico.**

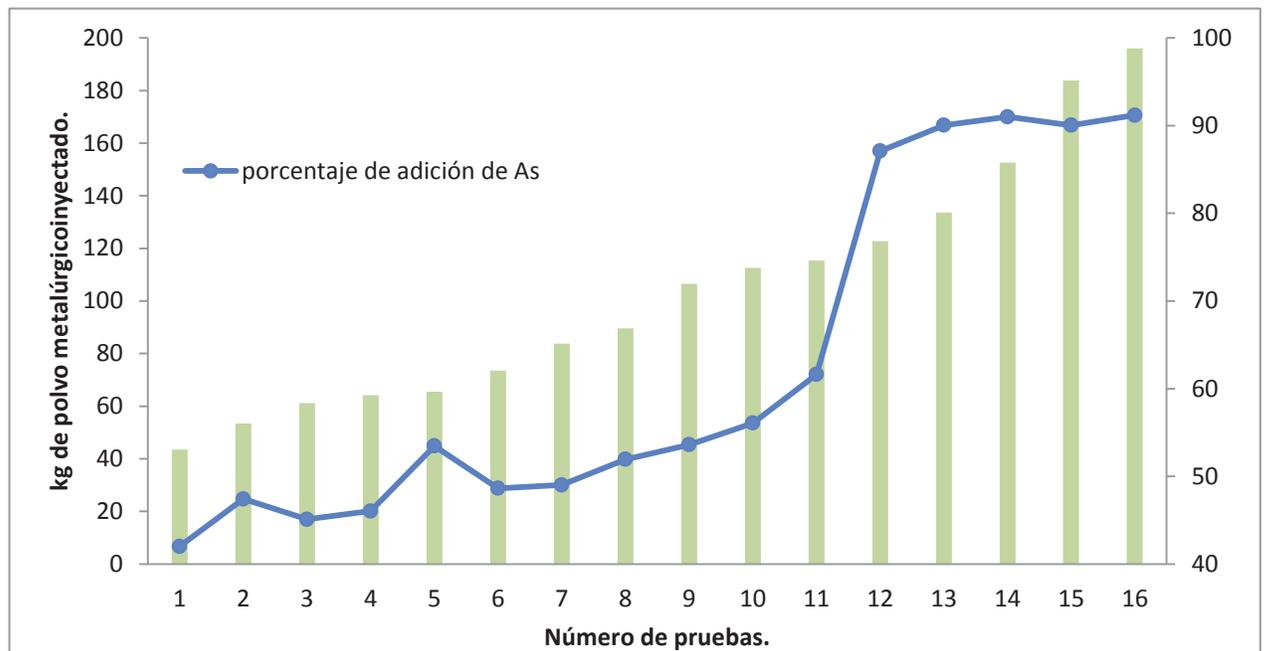
Razón As/Sb		Aumento de la Razón As/Sb		polvo metalúrgico agregado	aumento de la razón	Adición de As
Prevista	Salida	Teorico	Real	Kg	%	%
4,40	4,47	0,10	0,07	64	65,46	46,04
4,38	4,43	0,12	0,05	74	39,91	48,73
4,41	4,47	0,09	0,06	53	69,91	47,52
4,20	4,46	0,30	0,26	196	87,88	92,38
4,35	4,43	0,15	0,08	90	51,94	51,95
4,29	4,47	0,21	0,18	134	85,20	90,05
4,30	4,42	0,20	0,12	115	61,63	64,63
4,31	4,42	0,19	0,11	113	56,07	56,04
4,22	4,45	0,28	0,23	184	83,02	92,04
4,29	4,47	0,21	0,18	123	87,11	87,11
4,33	4,42	0,17	0,09	107	53,61	53,92
4,40	4,46	0,10	0,06	66	63,33	46,56
4,39	4,45	0,11	0,06	61	54,48	45,19
4,36	4,44	0,14	0,08	84	56,70	49,02
4,43	4,48	0,07	0,05	43	70,77	42,01
4,27	4,47	0,23	0,20	153	86,77	91,01
					67,11	62,76

Los resultados muestran que para todas las pruebas realizadas hubo una adición de arsénico, con esto se puede verificar que la adición de polvo metalúrgico logra aumentar la cantidad de arsénico en el baño de cobre pudiendo cumplir la función de controlador de concentración de As en la producción de ánodos de cobre.

Estos resultados también demuestran que cuando no se realiza adición de fundentes, que es la práctica que se realiza en la Fundición Potrerillos, esta acción da las condiciones para que el As de  $As_2O_3$  contenido en el polvo metalúrgico quede disuelto en el cobre líquido como lo muestra la reacción (5).

Lo que origina un aumento en la concentración de As, logrando la modificación química, buscada.

El aumento de la concentración del As en el baño promedio por adición de polvo metalúrgico para todas las pruebas fue de 62,76%, como muestra el gráfico 2.



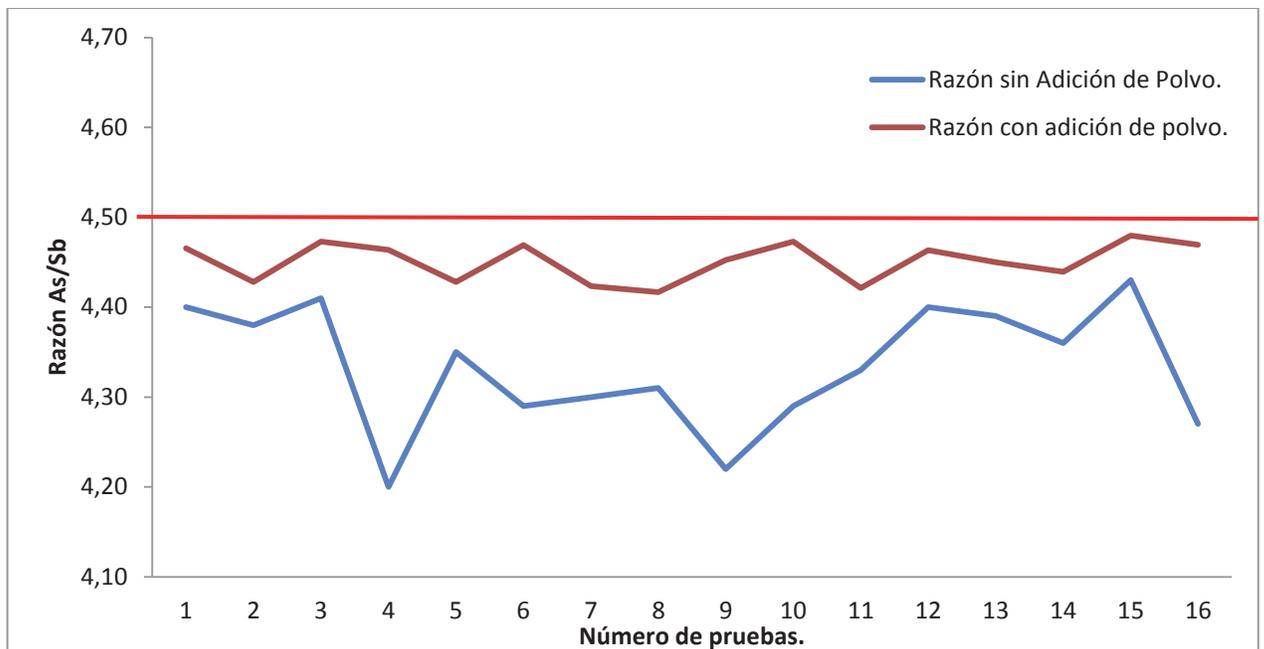
**Gráfico 2: Polvo adicionado y porcentaje de adición del polvo al baño de cobre.**

Lográndose mayores porcentajes de adición para cuando la cantidad de polvo metalúrgico es sobre 100 kilogramos, con un rango amplio de porcentaje de 50 – 90 % de adición de arsénico, en el caso contrario para menores adiciones se obtuvo un menor porcentaje de adición, pero sin grandes variaciones de porcentaje teniendo un rango de 40 – 50 % más acotado que para inyecciones de polvo por sobre los 100 kg.

Estos resultados se deben más bien a lo que respecta a la realización de las inyecciones y las deficiencias del sistema de inyección neumática cuando a pequeñas cantidades de material se trata, siendo pequeñas cantidades inferior a 100 kg, ya que al realizar las pruebas se pudo visualizar que parte del material queda en las líneas de descarga, que si los indicadores de presiones no se encuentran limpios el registro que lleva con respecto a la presión necesaria para la inyección 200kpa, entonces entorpece el normal funcionamiento de la inyección dando paso al aire de respaldo, afectando en mayor medida a las pequeñas inyecciones, por su menor contenido de material y así lo muestran los resultados. Por otra parte se ven porcentajes de adicionamiento mayores para menores cantidades de polvo inyectado, el caso de la inyección de 53 kg y un 47,52% y la de 61 kg y 45,19% de adicionamiento, este es un claro ejemplo de cómo afectó las condiciones físicas del sistema a estas pequeñas inyecciones.

Se ve en los resultados que una vez sorteado el inconveniente físico del sistema, y para inyecciones considerables sobre 120 kg, el porcentaje de adicción se mantiene estable en torno al 90%.

La variación de la razón el cual es el motivo de las inyecciones de polvo se analiza en el gráfico 3 donde se aprecia el valor al cual se apuntaba en todas las inyecciones 4,5, y los valores de las razones en base al calculó por medio de los coeficientes de distribución a las cuales saldría el baño de cobre sin que hubiera adición de polvo metalúrgico, y los valores de las razones con las cuales salieron una vez inyectados los polvos.



**Gráfico 3: variación de la razón As/Sb producto de la adición de polvo metalúrgico.**

Se obtuvieron muy buenos resultados lográndose un aumento promedio de la razón de As/Sb de 67,11%, coincidiendo la mayor variación 87,88% con la mayor adición de arsénico 91,18% a pesar de no llegar al valor deseado 4,5, sin embargo, en todas las pruebas se registran valores con diferencias dentro de un rango de 0,02 - 0,08 lo que los hace resultados satisfactorios y aceptables industrialmente.

El no alcanzar el valor de 4,5 en las pruebas, se debe al no tener registros bibliográficos de recirculación de polvo metalúrgico en forma de inyección directa al baño de cobre, y a las suposiciones que se deben hacer al no tenerlas, como, el asumir 100% de rendimiento de la reacción (5) pero la generación de estos datos ya es un buen resultado y crea un antecedente de que esta práctica puede utilizarse como controlador de concentración. También están los inconvenientes físicos al realizar las pruebas de inyección, caída de presión, obstrucción de indicador de presión, etc.

En la tabla 13 se muestra los resultados promedios de todos los compuestos que se le analizan al ánodo de cobre, estos resultados se informan con el fin de ver el impacto que genera la inyección con respecto a las otras impurezas que son de cuidado, ya sea Sb, Pb, etc. en la segunda columna de la tabla se encuentran las concentraciones comunes promedios en partes por millón de los componentes antes de que se hicieran las pruebas de adición de polvo metalúrgico, y en la tercera columna los valores promedios de los ánodos modificados por adición de polvo.

**Tabla 13: Concentraciones promedios comunes del resto de las impurezas del ánodo versus las concentraciones promedios de los ánodos adicionados con polvo.**

Elemento	Concentración Común.	Concentración con adición de polvo.
Ag	286,56	284,52
Al	0,93	0,90
Au	7,59	7,32
Bi	5,03	4,93
Ca	2,26	1,90
Cu	99,52	99,46
Fe	15,75	15,10
Mn	0,90	0,90
Ni	144,29	143,99
O	2042,75	2053,00
Pb	39,09	38,00
S	36,78	28,00
Se	216,75	201,34
Sn	1,69	1,39

Si bien las características químicas del ánodo fueron modificadas debido a la adición de polvo metalúrgico, esta adición de polvo no genera mayor impacto en la composición química de los ánodos, con respecto a las otras impurezas, como lo muestran los resultados esto puesto que, sus principales componentes  $\text{CuSO}_4$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{PbSO}_4$ , se dirigen a la escoria y las otras que conforman los polvos compuestos de zinc,  $\text{ZnSO}_4$ ,  $\text{ZnO}$ , que como se hace referencia en el capítulo de aspectos teóricos abandonan el baño vía volatilización por sus altos valores de presión de vapor  $p_M^\circ$  y coeficiente de dilución infinita  $\gamma_M^\circ$ .

Para asegurarse que el Pb (7,8% de polvo metalúrgico) abandona el baño de cobre por la escoria es que también a ella se le realizan análisis químicos los cuales se muestran en la tabla 14.

**Tabla 14: análisis químicos de la escoria de baño de cobre adicionado con polvo.**

polvo metalúrgico agregado (kg)	As (ppm)	Pb (ppm)	Sb (ppm)
64	12	2	-
74	14	2	-
53	10	2	-
196	70	6	-
90	18	3	-
134	47	4	-
115	28	3	-
113	25	3	-
184	65	5	-
123	42	4	-
107	22	3	-
66	14	2	-
61	11	2	-
84	16	2	-
43	7	1	-
153	55	4	-

El resultado del análisis de la escoria, muestran valores de arsénico que fluctuaban según la cantidad de polvo añadida estos no puede ser comparables con valores comunes de escoria anteriores a las pruebas ya que estos arrojaban valores nulos como es para nuestro caso el antimonio, es por eso que se supone que el arsénico que no abandona el baño por la escoria ni añadido lo hace por volatilización y sería alrededor de un 35% del As.

Lo que se desprende de estos resultados de escorias es que tanto el arsénico ( $As_2O_3$ ) que no se añade al baño de cobre como el plomo (PbO) que se añade por la inyección de polvo, se retiran del baño de cobre por medio de la escoria, esto pues a que ahora los análisis marcan concentraciones de estas impurezas en ella lo que era esperable que ocurriese por causa de la adición.

En la tabla C.2 (ver anexo C) se da a conocer los resultados de los ánodos modificados y se puede apreciar el alto contenido de antimonio que hay en ellos un promedio de 439 ppm muy cercano al límite permitido por refinería 500 ppm como máximo y muy lejano al valor común que es en promedio de 240 ppm, estos valores de concentración cercanos al máximo permitido sumado a un valor inferior a 4,5 de la razón As/Sb conllevan a fuertes disminuciones de eficiencia de alta densidad en refinería y por ende a aumentar el rechazo catódico, como se muestran en el gráfico 1, del capítulo II; Si bien no se pudo cuantificar la modificación química en los ánodos en refinería, que era lo óptimo, puesto que por problemas internos u otras decisiones (paralización de un mes por negociación colectiva, venta de ánodos), los suministros en este caso ánodos, eran utilizados a medida que surgían urgencias alejados del protocolo de monitoreo proporcionado a estos ánodos especiales, no obstante se sabe el valor promedio del rechazo catódico del mes posterior al igual que las eficiencias de corrientes para las diferentes densidades alta y baja, y la concentración en el electrolito tanto de antimonio como de arsénico, en el cual debieron haber participado de la cosecha de cátodos los ánodos adicionados con polvo metalúrgico. La tabla 15 muestra dicha información.

**Tabla 15: Índices de refinería.**

rechazo catodico	concentracion electrolito		eficiencia de densidad de corriente	
1,93%	As	11,89 g/l	Alta	95,30%
	Sb	0,093 g/l	Baja	97,50%

Comparando la información con datos habituales de refinería, la concentración de As es habitual ya que se espera que este alrededor de 12 g/l y 0,09 g/l para Sb, la cual registra un pequeño incremento lo que era predecible por la alta concentración de Sb en ánodos lo que no ocasionó mayores dificultades en el rechazo catódico que está dentro del rango habitual de 2%, sin embargo, la eficiencia de la alta densidad de corriente no cumpliría con el estándar ya que fue 95,3% cercano a 96% que es lo solicitado, mientras que la baja densidad de corriente si la cumpliría justo con su 97,5%.

## 5.2) Resultados pruebas de adición de fundentes alcalinos.

Las pruebas realizadas para la adición de fundentes alcalinos fueron un total de sesenta y tres, dividiéndose en tres, cada división correspondiendo a cada mezcla utilizada, 100% CaCO<sub>3</sub>, 100% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, y 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 30% CaCO<sub>3</sub>, contando estas divisiones con veintiún pruebas.

No fue necesario monitorear el proceso en la espera de que se diera el escenario propicio para la adición de fundentes alcalinos, el cual es de una concentración en el cobre blíster mayor a 2500 ppm, debido al procesamiento de eje proveniente de Fundición de Chuquicamata. Este es alto en contenido de arsénico (6000 – 8000 ppm su contenido de As), y es agregado en la etapa de conversión – cantidad de 2 ollas al 3/4 de su capacidad por moldeo teniendo como peso de la olla  $\frac{3}{4} = 30,857$  toneladas – específicamente en los convertidores Pierce Smith.

Las pruebas tuvieron una duración total de 21 días, tomando siete días para cada mezcla y tres pruebas por día, igual número de moldeos diarios.

El detalle de las pruebas de adición de las mezclas, se muestran en las tablas C.3, C.4, y C.5 (ver anexo C), en la cual se encuentran los datos de las toneladas de concentrado seco fundido, metal blanco generado por el convertidor teniendo para cada prueba, eje adicionado en la etapa de conversión, cobre blíster producido, cobre anódico bajo la suposición tomada, toneladas de arsénico para cada uno de ellos y su concentración en ppm. En la última columna se indica la concentración de As en ppm del cobre anódico que se predice mediante coeficientes de distribución sino se le agregasen fundentes alcalinos.

Las consideraciones tomadas son las mismas que para las pruebas de inyección de polvos metalúrgicos, en lo que respecta al tonelaje de cobre anódico, es el tonelaje del cobre blíster menos tres cuarto de olla de escoria de horno de ánodos (26,742 toneladas) y la cantidad de arsénico parte con el análisis químico a la mezcla de concentrados, para luego calcularla vía coeficientes de distribución.

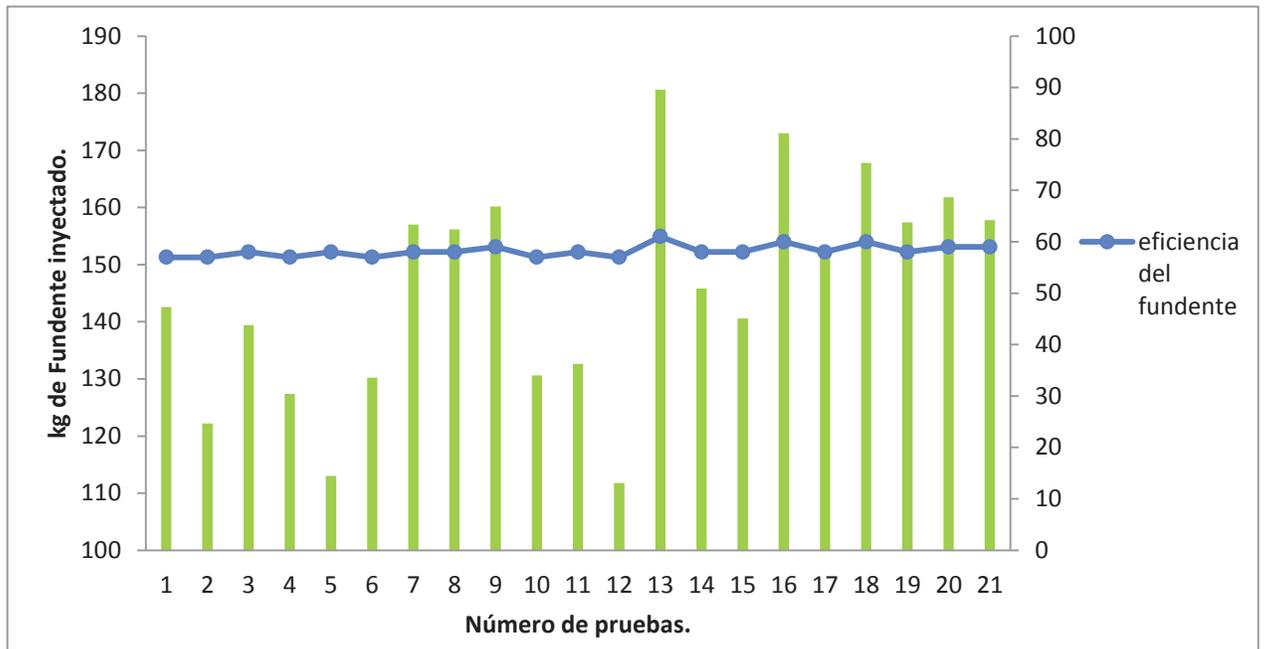
La primera mezcla que se utilizó para comenzar las pruebas fue la mezcla de 100%  $\text{CaCO}_3$  cuyos resultados se muestran en la tabla 16 donde se encuentran los datos del cobre anódico que se esperan sin la adición de fundentes, su concentración de As tanto en cantidad como en partes por millón, el fundente inyectado que era necesario para que el baño llegase a una concentración de 2500 ppm de As, y en su última columna el análisis realizado a los ánodos por refinera, que es finalmente la concentración con la cual quedo el baño de cobre con la inyección de fundente.

**Tabla 16: Resultados de las pruebas para mezcla 100%  $\text{CaCO}_3$ .**

toneladas	Cobre anodico		fundente $\text{CaCO}_3$	Análisis Qco. Ánodos. As
	As (ton)	As(ppm)	agregado (kg)	(ppm)
207,80	0,59	2854	143	2652
198,03	0,56	2803	122	2630
207,80	0,59	2846	139	2645
198,03	0,56	2816	127	2636
207,80	0,58	2780	113	2617
198,03	0,56	2823	130	2639
198,03	0,57	2890	157	2664
207,80	0,60	2888	156	2663
207,80	0,60	2898	160	2663
198,03	0,56	2824	131	2639
198,03	0,56	2829	133	2638
207,80	0,58	2777	112	2619
198,03	0,58	2949	181	2675
207,80	0,59	2862	146	2652
207,80	0,60	2870	141	2656
198,03	0,58	2930	173	2672
207,80	0,60	2877	152	2658
198,03	0,58	2917	168	2667
207,80	0,60	2891	157	2664
198,03	0,57	2902	162	2665
198,03	0,57	2892	158	2661

En los resultados mostrados por la tabla 16 se puede apreciar que al comparar las concentraciones del cobre anódico que se previeron por medio de los coeficientes de distribución iban a salir y la de análisis químicos de los ánodos, que son las de las pruebas de inyección de fundente, se ve que para todas las pruebas existe un abatimiento promedio de arsénico de 212 ppm.

En el gráfico 4 se muestra la cantidad de polvo inyectado y la eficiencia que tuvo cada inyección.



**Gráfico 4: kilogramos de fundente inyectado y eficiencia de abatimiento del fundente, mezcla 100% CaCO<sub>3</sub>.**

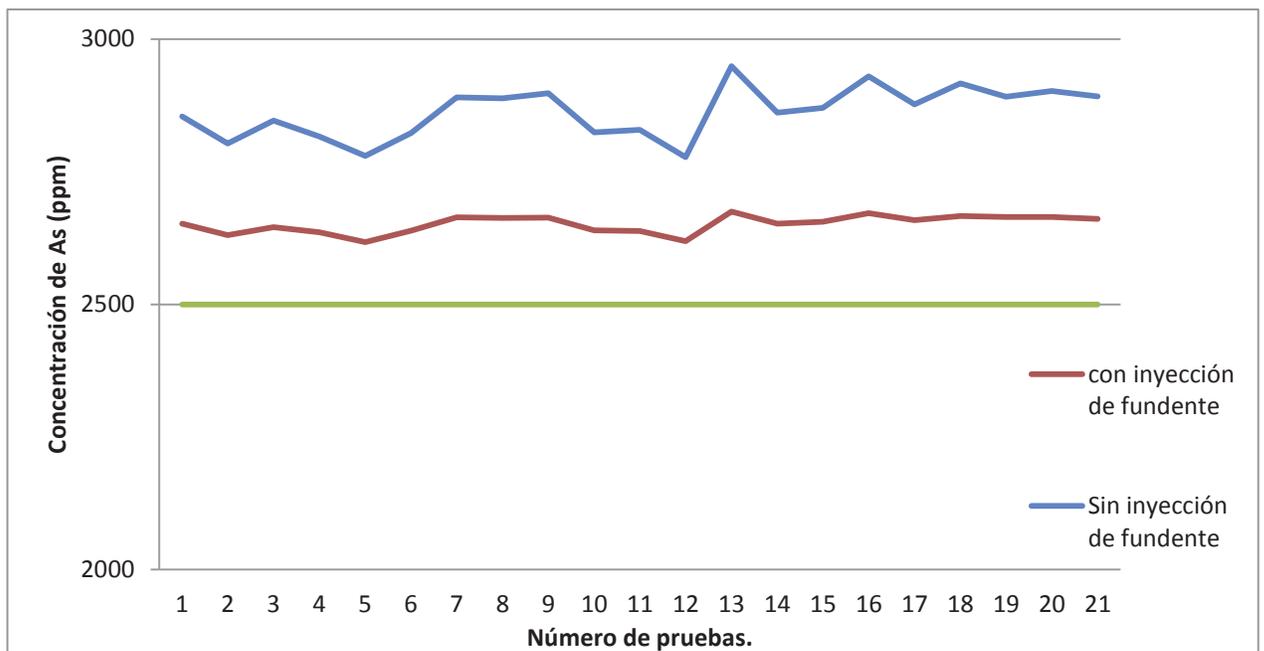
Se puede apreciar que en el gráfico de kilogramos de fundente inyectado y eficiencia de este, que la eficiencia del fundente fluctúa en un rango de 57 – 61 % independiente de la cantidad de fundente que se inyectó, ya que se puede ver que para las pruebas 5 y 12 donde la cantidad de fundente inyectado era bastante menor en comparación con las otras inyecciones no obstante su eficiencia no decreció.

Para el total de las pruebas el promedio de la eficiencia del fundente fue de 58,19% alcanzándose un máximo de 61% para la prueba 13, donde se inyectó una cantidad de fundente de 181 kg y un mínimo de 57% valor que se registró en varias pruebas.

El cálculo de la eficiencia del fundente se calculó en función de la demanda teórica por fundente necesaria para el abatimiento de arsénico.

Esta demanda se calcula por medio de los coeficientes estequiométricos de la reacción (21) y asumiendo un rendimiento del 100% de ella.

Los resultados de cuanto se modificó la concentración de arsénico en el baño de cobre por la adición de fundente y el escenario en el cual no se hayan inyectado, o sea que el cobre haya salido en las condiciones de concentración de arsénico en la que se calculó por medio de coeficientes de distribución comparándolas con el parámetro de 2500 ppm que solicita refinería, se muestran en el gráfico 5 de concentraciones de As en ppm del baño de cobre, en azul cómo habría salido sin la inyección de fundente, calcula en base a las coeficientes estequiométricos, en rojo como salió gracias a la inyección de fundente y en verde parámetro de 2500 ppm.



**Gráfico 5: Concentraciones en ppm de As con y sin inyección de fundente, Mezcla 100% CaCO<sub>3</sub>.**

Los resultados muestran buenos abatimientos de arsénicos ya que si bien no se alcanzó el parámetro de 2500 ppm de arsénico en el baño de cobre, la diferencia de la concentración con la que quedó es mínima, promediando en el total de las pruebas un valor de 151 ppm.

Con respecto a la escoria del baño de cobre la cual es removida luego de realizar las inyecciones se esperan que estas tengan altos contenidos de As, coincidentes con los valores de abatimiento del arsénico, para así corroborar que el As abandona el baño por medio de la escoria siendo el vehículo para esto el fundente, como se argumenta en el capítulo de aspectos teóricos en la reacción (19).

Los resultados de los análisis de la escoria para prueba de inyección se muestran en la tabla 17, en donde están los kilos de fundente inyectado y la concentración en ppm de As en la escoria. Y en ellos se corrobora por los valores que entrega el análisis a la escoria de dichas pruebas que el arsénico abandona el baño de cobre mediante esta vía y no otra, ya que las magnitudes de la concentración de As en la escoria son aproximadamente igual a los valores de abatimiento de arsénico arrojados por las pruebas.

**Tabla 17: análisis de la concentración de As en la escoria de los baños de cobre intervenidos con adición de fundente alcalino, mezcla 100% CaCO<sub>3</sub>.**

fundente CaCO <sub>3</sub> agregado (kg)	Escoria	As (ppm).
143		147
122		127
139		143
127		135
113		115
130		135
157		163
156		160
160		158
131		138
133		136
112		114
181		170
146		151
141		153
173		167
152		153
168		162
157		160
162		163
158		160

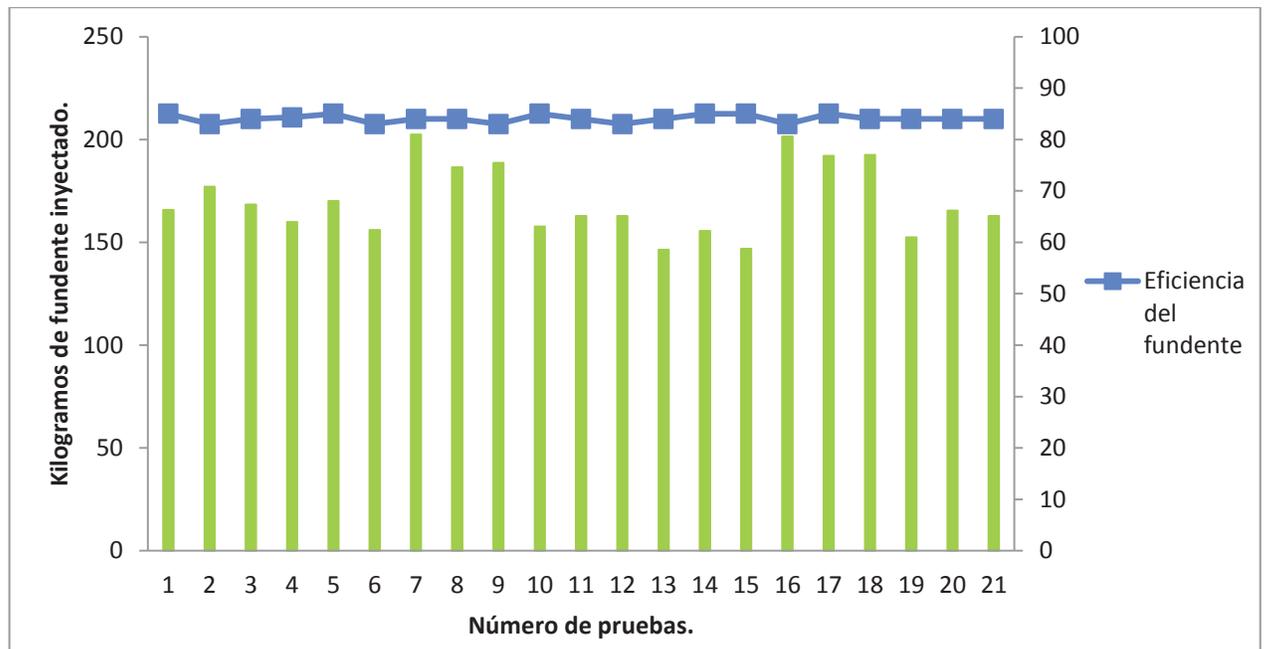
La segunda mezcla utilizada para las pruebas fue la de 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  los resultados de las pruebas de inyección se informan en la tabla 18, que al igual que para la primera mezcla se encuentra la información de cómo saldría el cobre anódico si no hubiese inyección, su cantidad de As y su concentración en ppm, las cantidades de fundente que se inyectaron para revertir esta situación y llevarla a una concentración de 2500 ppm de As en el baño de cobre y como resultado esta adición de fundente en lo que respecta a la concentración de As, en donde se informa de la concentración final de As en ppm.

**Tabla 18: Resultados de las pruebas para mezcla 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

toneladas	Cobre anodico		Mezcla (kg)		Análisis Qco. Ánodos.
	As (ton)	As(ppm)	CaCO3	Na2CO3	As (ppm)
207,80	0,61	2940	124	56	2574
198,03	0,59	2962	130	59	2562
207,80	0,61	2958	129	59	2563
188,25	0,55	2936	123	56	2564
178,48	0,53	2974	134	61	2564
178,48	0,53	2980	135	61	2558
198,03	0,58	2949	127	57	2590
207,80	0,61	2928	121	55	2570
207,80	0,61	2939	124	56	2575
198,03	0,58	2904	114	52	2555
198,03	0,58	2923	119	54	2565
188,25	0,55	2932	122	55	2561
198,03	0,59	2972	133	60	2551
207,80	0,61	2951	127	58	2558
207,80	0,61	2948	126	57	2558
198,03	0,57	2890	110	50	2575
207,80	0,60	2876	106	48	2572
198,03	0,57	2903	114	51	2572
207,80	0,61	2914	117	53	2554
198,03	0,58	2947	126	57	2558
198,03	0,58	2939	124	56	2565

Los resultados de las pruebas de inyección de fundente alcalino  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , muestran que si bien no se logra llegar a lo deseado que es una concentración de 2500 ppm en ánodos se revierte considerablemente la situación en la cual se encontraba el baño, varios de ellos bordeando una concentración de 3000 ppm de As, con un promedio para la totalidad de las pruebas de abatimiento de As de 333 ppm, registrándose su mayor abatimiento en la prueba en la que se inyectó 202 kg de fundente y se pasó de un escenario de 2890 ppm a 2575 ppm sustrayéndose 78,35 kg de As.

La eficiencia del fundente alcalino  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  según la cantidad de fundente inyectado se muestra en el gráfico 6.

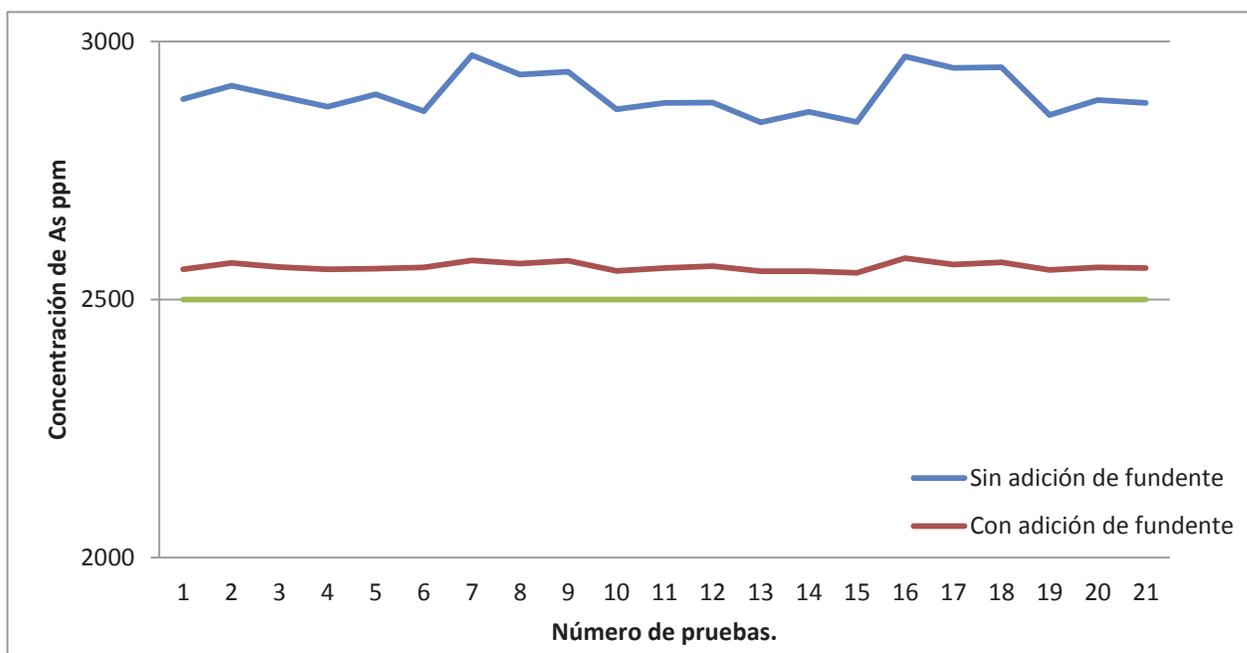


**Gráfico 6: Kilogramos de fundentes inyectado y eficiencia de abatimiento del fundente, mezcla 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

La eficiencia del fundente según las cantidades de fundente inyectado se encuentra en un rango de 83 – 85 % a excepción de algunas pruebas las cuales registran una efectividad de 81% que son las pruebas 1 y 7, las cuales debido a problemas con el procedimiento con la inyección es que se obtiene este valor, lo sucedido fue, que casi finalizando la inyección el indicador de presión se obstruyó con material decayendo su lectura y accionando el funcionamiento de seguridad que es dejar pasar el aire de respaldo, lo que llevo a que no se finalizara una parte pequeña de la inyección.

El cálculo de la eficiencia del fundente se calculó en función de la demanda teórica por fundente necesaria para el abatimiento de arsénico, al igual que para la primera mezcla a excepción de la reacción utilizada que para el caso del fundente alcalino  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  es la reacción (23) del capítulo de aspectos teóricos

La comparación de los resultados de la adición mediante inyección por medio de un sistema de neumático de esta mezcla de fundente alcalino, 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , con el parámetro deseado en ánodos que es de 2500ppm concentración de As y el escenario en el cual no se inyectara fundente alcalino que es establecido mediante coeficientes de distribución, se refleja en el gráfico 7 de concentraciones de As, sin la adición de fundente calculado con coeficientes estequiométricos (azul) y resultados con la adición de fundente alcalino (rojo).



**Gráfico 7: Concentraciones en ppm de As, con y sin inyección de fundente, mezcla 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

Se puede apreciar en el gráfico la disminución considerable de la concentración de As en el baño de cobre, no así suficiente por estar encima de 2500 ppm haciendo de estos aceptables resultados al visualizar en el escenario en que se encontraba sin una inyección de fundente debido a la concentración de As con la cual contaba.

Estos resultados gracias a la adición de fundente no son críticos ya que si bien no son el parámetro tampoco se alejan considerablemente alrededor de 2% del límite, y al igual que para la primera mezcla se consideran tolerables industrialmente, con la diferencia que para esta muestra 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  la eficiencia promedio de abatimiento es de 84%.

Asimismo como se realizó con la primera mezcla, se hizo para la mezcla 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  el analizar la escoria del baño de cobre intervenido con fundente alcalino, para cada prueba realizada, esto con el mismo fin de la primera mezcla el de comprobar que el arsénico abatido abandona el baño de cobre por medio de la escoria, estos resultados también ayudan brindándonos una herramienta para supervisar los análisis tomados en ánodos ya que por ejemplo si no se registrase valor alguno de concentración en la escoria implicaría esto que el arsénico o abandona por volatilización, caso que es muy difícil para el arsénico debido a sus valores extremadamente pequeños de  $\gamma_M^\circ$  aun teniendo un alto valor de  $p_M^\circ$  como se explica en el capítulo de aspectos teóricos, o que no abandona el baño de cobre implicando esto que no hubo efecto alguno de la adición de fundente alcalino, de ahí la importancia de estos resultados que se muestran en la tabla 19, donde se informa de los kilos de fundente inyectado y la concentración en ppm de As en la escoria y se corrobora que el arsénico abandona por la escoria.

**Tabla 19: análisis de la concentración de As en la escoria de los baños de cobre intervenidos con adición de fundente alcalino, mezcla 100%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

fundente $\text{Na}_2\text{CO}_3$ agregado (kg)	Escoria As (ppm).
166	309
177	349
168	329
160	309
170	332
156	302
202	382
186	363
189	361
158	312
163	314
163	315
146	287
156	305
147	282
202	391
192	372
193	373
153	300
165	327
163	315

La última mezcla de fundentes alcalinos utilizada para las pruebas de adición mediante un sistema de inyección neumático para el abatimiento de As con el fin de controlar la cantidad de este en el baño de cobre fue la de 30% de  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , tabla 20 informa de los resultados de dichas pruebas en la columna de análisis químicos a ánodos, y como para las anteriores mezclas, se informa de cómo habría salido el baño de cobre si no hubiese existido adición de mezcla de fundentes alcalinos estos valores calculados por medio de los coeficientes de distribución y los kilogramos necesarios para llevar el baño de cobre a una concentración de 2500 ppm de As en él, con la particularidad de que ahora es una mezcla de los dos fundentes.

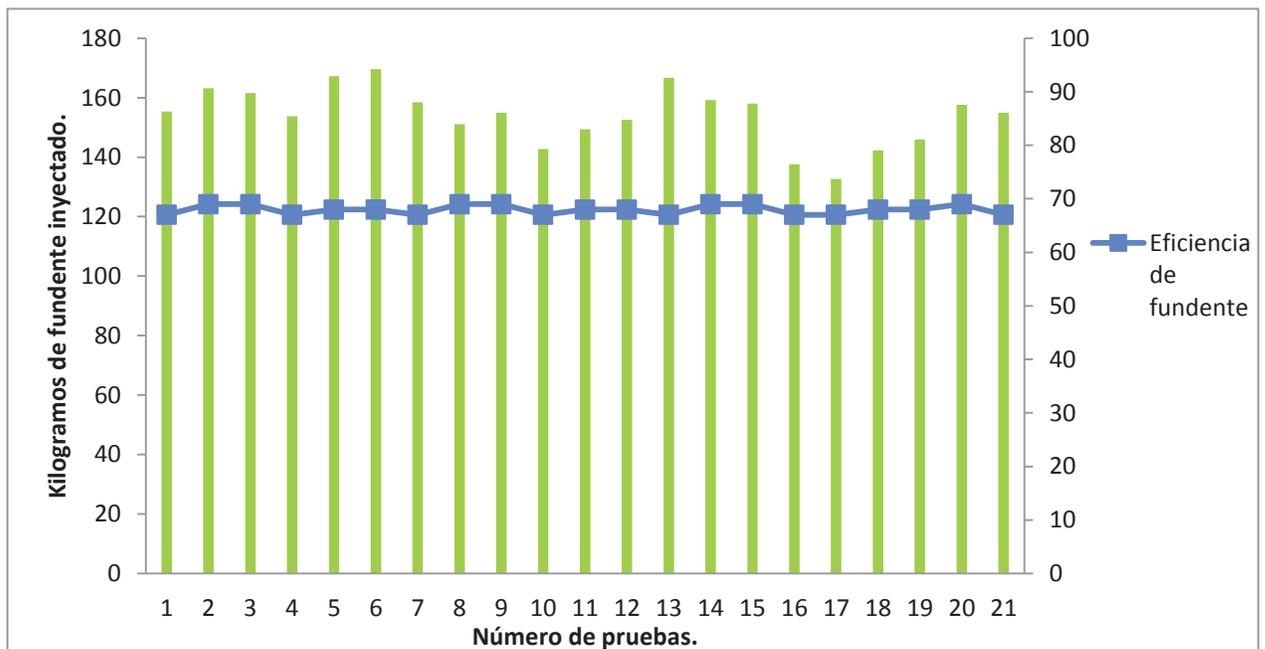
**Tabla 20: Resultados de las pruebas para mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

toneladas	Cobre anódico		Mezcla (kg)		Análisis Qco. Ánodos.
	As (ton)	As(ppm)	$\text{CaCO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$	As (ppm)
207,80	0,61	2940	23	132	2645
198,03	0,59	2962	24	139	2643
207,80	0,61	2958	24	138	2642
188,25	0,55	2936	23	131	2644
178,48	0,53	2974	25	143	2652
178,48	0,53	2980	25	145	2654
198,03	0,58	2949	23	135	2648
207,80	0,61	2928	22	129	2633
207,80	0,61	2939	23	132	2636
198,03	0,58	2904	21	122	2633
198,03	0,58	2923	22	127	2635
188,25	0,55	2932	22	130	2638
198,03	0,59	2972	25	142	2656
207,80	0,61	2951	23	136	2640
207,80	0,61	2948	23	135	2639
198,03	0,57	2890	20	117	2629
207,80	0,60	2876	20	113	2624
198,03	0,57	2903	21	121	2629
207,80	0,61	2914	22	124	2632
198,03	0,58	2947	23	134	2638
198,03	0,58	2939	23	132	2645

Los resultados muestran el abatimiento que se logra de arsénico con respecto a cómo hubiese salido si es que no se habría realizado inyección de fundentes y esta se puede cuantificar en un abatimiento de la concentración de un 297 ppm promedio para todas las pruebas, alcanzando su máximo en un valor de 326 ppm en la sexta

prueba realizada con esta mezcla, teniendo la particularidad que fue la prueba con más kilos de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  inyectado 145 kg.

Del mismo modo que para las anteriores mezclas se analiza la eficiencia de abatimiento del fundente con respecto a los kilogramos de fundente inyectados en un gráfico para la mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  el gráfico 8, el cual muestra los valores obtenidos de la eficiencia de las respectivas inyecciones realizadas de total de kilos de fundentes alcalinos.

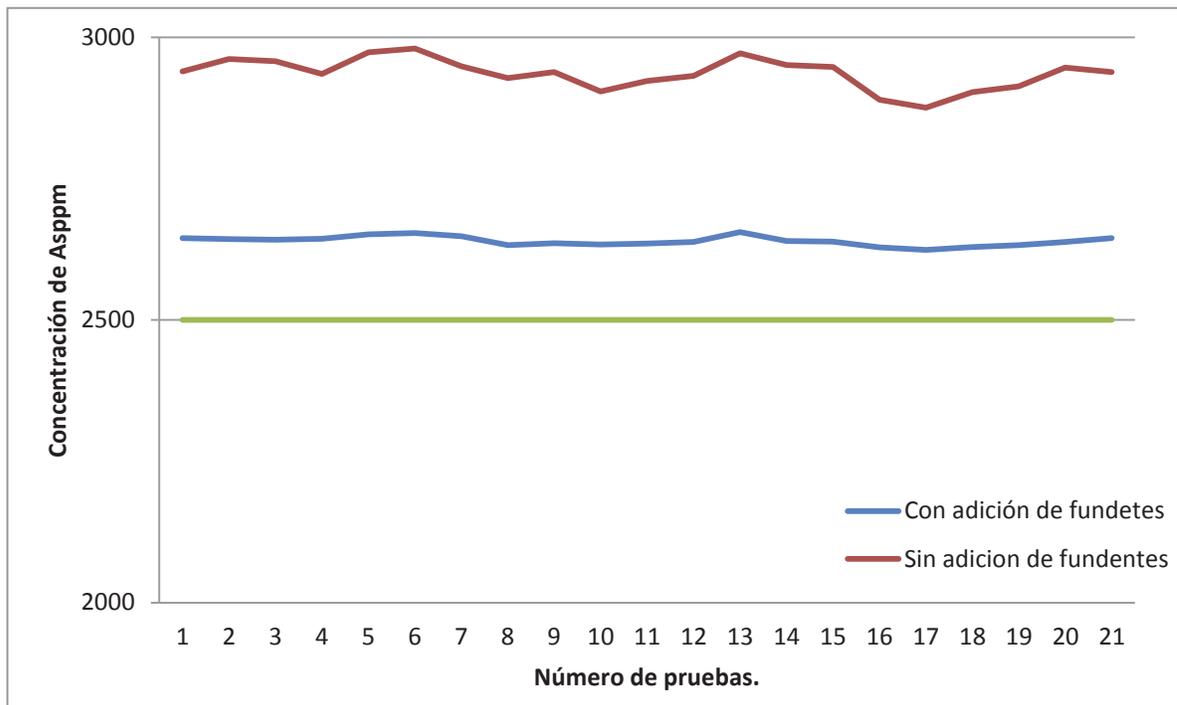


**Gráfico 8: Kilogramos de fundente inyectado y eficiencia del fundente, mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .**

Los resultados de la eficiencia de la mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  – 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  se comportan de la misma manera que lo han hecho las anteriores mezclas, esto es, estando dentro de un rango establecido no muy grande, siendo para esta mezcla un rango de 2% el que lo conforman los valores de 67 – 69 % no se registraron variaciones que se alejaran de esta tendencia por lo no creo alguna diferencia extremista, esto gracias a que todas las pruebas se realizaron con normalidad no habiendo inconvenientes.

El valor promedio de la eficiencia de la mezcla de fundentes alcalinos obtenida para para todas las pruebas fue de 68% valor que indica cuanto As se abatió del baño de cobre debido al fundente que logró adicionarse.

En el gráfico 9, se puede visualizar de mejor manera la acción del fundente ya que al igual que en las anteriores mezclas y anteriores gráficos, muestra lo alejada que estaba la concentración de As con la cual se encuentra, esto en base a los valores proporcionados por los coeficientes de distribución mostrándonos como saldría el baño de cobre sin la acción de la mezcla de fundentes alcalinos siendo 19 de ellas mayores a 400 ppm del parámetro exigido que es de 2500 ppm, y como con la adición el fundente logra acercar esa concentración al parámetro, no obstante no llegando a él, pero si mejorando sustancialmente el escenario en el cual se encontraba el baño antes de la adición y con la cual saldría, reduciendo esa diferencia de más de 400 ppm promedio por encima del parámetro a una de 140 ppm promedio.



**Gráfico 9: Concentraciones en ppm de As, con y sin inyecciones de fundente, mezcla 30% CaCO<sub>3</sub> - 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.**

Para el caso de las escorias de los baños de cobre intervenidos con mezcla de fundentes alcalinos 30% CaCO<sub>3</sub> – 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> los resultados de la concentración de As que contuvieron ellas debido a las diferentes adiciones de mezcla de fundente alcalino se informan en la tabla 21.

**Tabla 21: análisis de la concentración de As en la escoria de los baños de cobre intervenidos con adición de fundente alcalino, mezcla 30% CaCO<sub>3</sub> - 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.**

Fundente agregado CaCO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Escoria	As (ppm).
23	132		140
24	139		140
24	138		140
23	131		143
25	143		150
25	145		150
23	135		147
22	129		130
23	132		131
21	122		132
22	127		133
22	130		133
25	142		151
23	136		139
23	135		136
20	117		124
20	113		119
21	121		124
22	124		128
23	134		136
23	132		144

De los resultados podemos concluir que más del 98% del As extraído del baño abandona este por medio de la escoria, esto gracias a la acción de la mezcla de fundentes alcalinos.

Los resultados de las pruebas de adición de fundentes alcalinos de las diferentes mezclas, se resumen en la tabla 22 donde se muestran el total de fundente inyectado, los promedios de abatimiento de As y las eficiencias de cada una de ellas.

**Tabla 22: resumen de los resultados de las pruebas de adición de las diferentes mezclas.**

Mezclas		N° de pruebas	Fundente inyectado	Abatimiento de As (ppm)	Eficiencia Fundente %
CaCO <sub>3</sub> %	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> %				
100	0	21	3060	212	58
0	100	21	3574	333	84
30	70	21	3235	297	68
Total		63	10392		

Se observa los ppm promedios de abatimiento de As de cada una de las mezclas que se usaron para las pruebas, y se ve que hay una relación proporcional con la eficiencia, no siempre es así y más bien depende del escenario tratado.

Comparando las eficiencias de las diferentes mezclas es evidente que las escorias ricas en Na<sub>2</sub>O son más efectivas para eliminar As desde el cobre. Esto se explica por la fuerte atracción electrostática entre un óxido fuertemente básico (Na<sub>2</sub>O) y otro fuertemente ácido (As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).

Dado los resultados se observa que, aparentemente, sería ventajoso agregar infinita cantidad de fundente; sin embargo, dependiendo del contenido de oxígeno en el cobre, es la cantidad de Cu<sub>2</sub>O que se forma, el exceso de Cu<sub>2</sub>O hace que la transferencia de As a la escoria disminuya considerablemente debido a que diluye el efecto de los fundentes básicos, es por esto que el contenido final de oxígeno en el cobre no debe ser mayor a 2000 ppm esto para que no se forme excesiva cantidad de Cu<sub>2</sub>O ya que hace que la escoria se vaya saturando de este componente, haciendo de esta manera cada vez menos efectiva las reacciones (20) y (22) para eliminar As, para el caso de las pruebas realizadas el contenido de oxígeno no sobrepasó el valor límite.

En algunos casos para niveles muy altos de  $\text{Cu}_2\text{O}$  en la escoria es posible la reversión del As desde la escoria al metal, caso que no ocurrió en nuestras pruebas corroborado esto con los análisis a la escoria, donde el resultado de este análisis arrojaba más de un 98% del arsénico abatido por acción del fundente.

En base a los resultados la proyección de consumo de fundentes es de entre 150 a 170 kg/moldeo, lo que significa 4,6 t/mes de  $\text{CaCO}_3$  y 10,71 Ton/mes de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , para la combinación de ellos, y para el caso de uso exclusivo de  $\text{CaCO}_3$ , se proyecta un consumo aproximado de 153 kg/moldeo, es decir 16,3 Ton/mes, y de uso exclusivo de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , de 175 kg/moldeo, es decir 18,3 Ton/mes.

### 5.3) Datos operacionales del sistema de inyección neumática.

Las pruebas realizadas además aportaron datos operacionales mostrados en la tabla 23 de la tasa de llenado del vaso de presurización, tasa de inyección de fundente, y de presión del vaso de presurización, siendo la búsqueda de estos datos un objetivo específico para este trabajo.

**Tabla 23: Datos operacionales.**

	Valor	Unidad
<b>Tasa de llenado del vaso de presurización.</b>	27,4	kg/min
<b>Tasa de inyección de Fundente.</b>	40,8	kg/min
<b>Presión del vaso de presurización.</b>	580	Kpa

---

## **CAPÍTULO VI: CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.**

---

Cualquier implementación, cambio, mejora, adaptación que se desee realizar a un proceso productivo sea del tamaño que sea conlleva consigo un impacto económico el que está asociado a costos y a beneficios.

### **6.1) Costos.**

Para el trabajo realizado, el cual apunta a producir propuestas válidas para el control de impurezas especialmente controlar las impurezas de arsénico y antimonio en ánodos de cobre, se tiene como gasto principal el costo que produce el inyectar los insumos (polvo metalúrgico o fundente alcalino) que son los que realizan el control de estas impurezas.

Dentro de estos costos de estas inyecciones están:

- Costos de personal, donde se incluyen los costos asociados a ejecución (inyección, transporte y carguío del insumo realizado por el personal) y capacitación del personal.
  
- Costo de insumo, donde se incluye el costo del insumo y costo del análisis químico.

Las dos propuestas para el control de impurezas se realizan en la misma área, hornos de ánodos, por lo que su metodología es similar para ambos casos diferenciándose únicamente en el insumo que cada propuesta utilice, ya sea polvo metalúrgico o fundente alcalino, por lo que sus costos asociados a la realización de las inyecciones se diferencian únicamente en el costo del insumo.

Detallándose los costos del personal en la tabla 24 y costo de insumo en la tabla 25.

Tabla 24: detalles costos de personal.

Costos de personal.	Costo
<u>Capacitación</u>	
Curso por operador	52 USD
Creación de protocolos de seguridad	no genera costo asociado
<u>Ejecución</u>	
Bono calorías (costo por una inyección)	18 USD
Carguío de insumo	no genera costo asociado
Trasporte de insumo	no genera costo asociado

El que *no genere gastos asociados* no implica que la acción no realice un gasto sino que el costo de esa acción ya está cubierto como en el caso de la creación de protocolos de seguridad, esta acción, no genera nuevos gastos ya que es parte de las funciones del prevencionista de riesgo, así como el carguío del insumo es parte de las funciones de los trabajadores del área cuadrilla de patio, y el transporte del insumo ya que se aprovecha el transporte interno.

El costo del curso es por operador, siendo cuatro turnos y 2 operadores por turno los que operan los hornos de ánodos, dando un total de 8 operadores.

El bono calorías que se detalla en la tabla 25, se refiere a la gratificación extra que se le da al funcionario que conecta y desconecta el flexible a las toberas del horno, cuando el horno se encuentra con líquido de cobre caliente en su interior.

Tabla 25: detalle costos de insumo.

Costos de Insumo.	Costos.
<u>Insumos.</u>	
Polvo metalúrgico.	140 USD/Ton.
CaCO <sub>3</sub>	160 USD/Ton.
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	180 USD/Ton.
<u>Análisis químico.</u>	
Polvo metalúrgico.	30 USD
Fundentes alcalinos.	Costo incluido en el costo del insumo.

Los valores que se detallan en la tabla 25 para los fundentes alcalinos, son precios del producto en planta, mientras que el valor que se muestra para el polvo metalúrgico es el precio al cual se vende este insumo ya que es de elaboración propia, pero al utilizarlo se dejaría de recibir ese beneficio por lo tanto pasa hacer un costo.

El costo del análisis químico del polvo metalúrgico es por saco.

Teniendo los costos de los insumos y la proyección de consumo de estos que se da a conocer en el capítulo de Resultados y Discusión que es de 830 kg/mes de polvo metalúrgico, 16,3 Ton/mes uso exclusivo de CaCO<sub>3</sub>, 18,3 Ton/mes uso exclusivo de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, y para la mezcla 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> – 30% CaCO<sub>3</sub> 10,71 Ton/mes y 4,6 Ton/mes respectivamente.

Por lo tanto el costo mensual de la implementación de las propuestas incluyendo costos personales y costos insumo, se muestra en los totales a continuación en la tabla 26.

Tabla 24: costos de inyecciones.

<b>(1) Costos del personal</b>		<b>Costo</b>
<i>Ejecución</i>		
Bono calorías fundente	90 inyecciones/mes	1620 USD
Bono calorías polvo metalúrgico	8 inyecciones/mes	144 USD
<b>(2) Costos mensual de Insumos</b>		<b>Costo</b>
Polvo metalúrgico		116 USD
Mezcla 100% CaCO <sub>3</sub>		2608 USD
Mezcla 100% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		3294 USD
Mezcla 30% CaCO <sub>3</sub> – 70% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		2663 USD
<b>Total costo de inyección.</b>		<b>(1) + (2)</b>
Polvo metalúrgico		260 USD
Mezcla 100% CaCO <sub>3</sub>		4228 USD
Mezcla 100% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		4914 USD
Mezcla 30% CaCO <sub>3</sub> – 70% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		4284 USD

## 6.2) Beneficios.

Los beneficios de estas propuestas apuntan al proceso productivo posterior al de fundición el proceso de electro refinación de cobre el cual produce cátodos de alta pureza de cobre y a disminuir o mantener su porcentaje de rechazo catódico que alcanza un valor industrialmente aceptable de 2%.

No obstante, es difícil cuantificar el beneficio de las propuestas, ya que el rechazo catódico depende de muchas variables, ya sea eficiencia de corriente, temperatura, y otras.

Es por esto que lo que buscan estas propuestas, es al menos que la variable de control de refinería que tiene referencia a la concentración de impurezas no sea causal de rechazo catódico, y para esto el ánodo de cobre que regula esta variable debe cumplir con las exigencias solicitadas.

Logrando esto se podría evitar generar una pérdida mensual de 100 USD por tonelada de cátodo producido, que es lo que generalmente se pierde por cátodo rechazado químicamente (caso alto en Sb en ánodos o en As). Y a la vez mantener o disminuir el porcentaje de rechazo evita pérdidas considerables ya que el aumento de 1% en el rechazo catódico genera mensualmente pérdidas de 116 USD por tonelada de cátodo producido.

Siendo así el beneficio para el proceso de producción de cátodos de cobre es enorme, ya que una producción mensual promedio de 12000 toneladas de cobre de alta pureza en forma de cátodos con un precio de venta de 7000 USD/Ton se tiene una generación de 84 millones de dólares por producción, convirtiendo así el rechazo normal de 2% en 1.680.000 USD.

Lo que hace que las propuestas aspiren a lograr evitar en dinero una pérdida por causa del rechazo químico de 1.200.000 USD o evitar que haya un aumento del porcentaje de rechazo lo que podría llegar a significar evitar una pérdida de 1.392.000 USD.

Es por esto que comparando los beneficios que pueden lograr las propuestas o evitar las pérdidas manteniendo los parámetros comunes de rechazo con los costos para su realización se puede concluir que los costos son marginales, y que las propuestas son ampliamente ventajosas en lo económico.

---

## **CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

---

### **Conclusiones.**

El trabajo realizado en la tesis, orientado a ver la validación del polvo como controlador de la concentración del baño en Hornos de ánodos, arroja resultados aceptables, concluyéndose que el polvo metalúrgico puede ser usado como controlador, debido a que las características químicas del ánodo que se deseaban modificar, fueron modificadas.

La adición de As contenido en el polvo metalúrgico como  $As_2O_3$  al baño como lo muestra la reacción (5), se logra a una temperatura promedio de  $1200^{\circ}C$ , he ingresado el polvo sumergido en el baño, con mejores resultados se obtienen en inyecciones superiores a 120 kg de polvo metalúrgico, debido a que es muy baja su granulometría.

La adición de polvo logro un aumento de la razón As/Sb 67,11% esto dado por que el As que se adhiere al baño contenido en los polvos es de 62,76% del As que ingresa en forma de  $As_2O_3$  contenido en el polvo metalúrgico.

El porcentaje de volatilización del arsénico contenido en el polvo metalúrgico que inyectado al baño de cobre es de un 35%.

La adición de los polvos no genera mayor impacto en la composición química de los ánodos, con respecto a las otras impurezas que se encuentran en menor porcentaje en el polvo como, por ejemplo, el Pb.

Los resultados de las pruebas hechas en el trabajo realizado en la tesis validan a los fundentes alcalinos como una forma eficaz para abatir la concentración de As en el baño de cobre ya que en todas las pruebas de las mezclas se logró abatimientos considerables, no obstante no se puede concluir con este trabajo la repercusión al proceso en sí, específicamente al baño de cobre, la adición de estos.

La mezcla más eficaz para el abatimiento de As fue 100% de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  con 84% de eficiencia, seguido de la mezcla 30%  $\text{CaCO}_3$  - 70%  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  con un 68% de eficiencia para finalizar con 100%  $\text{CaCO}_3$  con un 58% de eficiencia.

Las propuestas de control de impurezas son muy ventajosas en el aspecto económico al comparar el gasto que se debe realizar para ejecutarlas con los beneficios económicos que pueden llegar a lograr, convirtiendo así a los costos en cifras marginales.

### **Recomendaciones.**

Se recomiendan dos tareas inmediatas y perduraderas en el tiempo para el normal funcionamiento del sistema de inyección neumática

- Un programa de mantenimiento periódico al sistema de inyección de fundentes a fin de evitar los problemas de inhabilitación del sistema caso que se presentó al comienzo del proyecto.
- Cambiar o mejorar la posición de los indicadores de presión a la llegada de los hornos, debido a que sufren permanente obstrucción por el fundente lo que provoca registros de presión muy bajas, habilitando así el aire de respaldo que impide la inyección.

---

## BIBLIOGRAFÍA.

---

- [1] Dirección Metalurgia de procesos, “Comportamiento del Sb en refineras”, documento de origen interno Codelco – Chile, Codelco Norte, 2005, pág. 7–10.
- [2] Codelco, Corporación Nacional del Cobre, Chile; Página Web, [www.codelco.com/la\\_corporacion/historia.asp](http://www.codelco.com/la_corporacion/historia.asp); acceso octubre 2014.
- [3] Minmetal., “Manual de Operación Cambio Tecnológico Fundición Potrerillos”, documento de origen interno Codelco – Chile, 2003, texto completo.
- [4] Samuelsson, C.; Carlsson, G., Characterization of copper smelter dusts, CIM Bulletin, 2001, Vol. 94, pp. 111-115.
- [5] Samuelsson, Caisa; Bjoerkman, Bo. , Dust forming mechanisms in the gas cleaning system after the copper converting process. Part 1, Sampling and characterization, Scandinavian Journal of Metallurgy, 1998, Vol. 27(2), pp. 54-63.
- [6] Markova, Ts.; Boyanov, B.; Pironkov, S.; Shopov, N., Investigation of dusts from waste – heat boiler and electrostatic precipitators after flash smelting furnace for copper concentrates, Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy, 2000, Vol. 36(3 -4), pp. 195 – 208.
- [7] Lastra – Quintero, R.; Rowlands, N.; Rao, S. R.; Finch, J. A., Characterization and separation of a copper smelter dust residue, Canadian Metallurgical Quarterly, 1987, Vol. 26(2), pp. 85 – 90.
- [8] V. Montenegro; H.Sano; T. Fujisawa, Efecto de la recirculación de polvo de fundición de cobre de Chile con altos contenidos de impurezas en la distribución de impurezas durante el proceso de fusión, revista de metalurgia, 2010, Vol. 46(1), pp. 69 – 77.
- [9] Manuel Delvia Pérez, ingeniero jefe especialista de procesos, “curso de capacitación a la supervisión, Refinación a Fuego de Cobre Blíster”, documento de origen interno Codelco – Chile, División Salvador, 2005, pág. 28 -60.

- [10] A. Yazawa and T. Azakami: "thermodynamics of removing Impurities during copper Smelting". Canadian Metallurgical Quarterly, Vol. 8, Nr 3, pp. 257 - 261.
- [11] J. D. Scott, "Metallurgy Materials Transportation" B 21 pp. 629 - 635.
- [12] E. N. Petkova, "Hydrometallurgy" 34 (1994) pp. 343 - 358.
- [13] Z. H. Gu, J. Chen y T.Z. Fahidy, "Hydrometallurgy" 37 (1995) 149 – 167.
- [14] G. Cifuentes Et Al., EPD Congress, TMS Annual Meeting, San Diego, EE.UU. Marzo, 1999, pp. 645 – 647.
- [15] Dirección Metalurgia de procesos, "Comportamiento del Sb en refineries", documento de origen interno Codelco – Chile, Codelco Norte, 2005, pág.11- 22.
- [16] Kamath B.P., Mitra A.K., Radhakrishnan S. and Shetty K.P, "Electrolyte impurity control at the Chinchpada Refinery of Sterlite Industries India Limited", Vol. V, Copper Electrorefining and Electrowining, Copper 2003, pp. 137-150.
- [17] Superintendencia de Ingeniería de Procesos, "Impacto del contenido Sb en eficiencia de corriente", documento de origen interno Codelco – Chile, División Salvador, 2010, completo.

---

# ANEXOS.

---

## ANEXO A.

### Sistema de inyección neumática.

#### A.1 Descripción partes de principales del sistema.

**Vaso de Inyección:** Hay un tanque de inyección instalado con un volumen de 5 m<sup>3</sup> aproximadamente. El tanque de inyección, ubicado debajo de las dos tolvas de fundentes, está diseñado como tanques a presión de acuerdo a las normas DIN/EN – Código europeo para Tanques a Presión. Detalle de él en la Fig. 15 y en la Fig. 16.

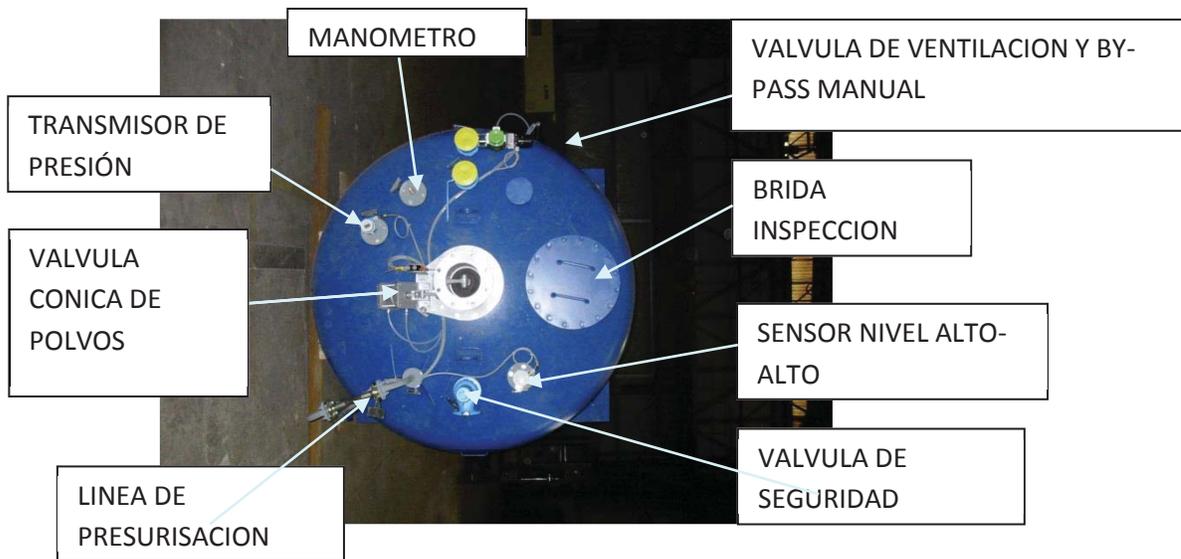


Figura 15: Vaso de inyección, vista superior.



Figura 16: vista lateral del vaso de inyección.

**Línea de Inyección:** El tanque de inyección, ubicado debajo de las dos tolvas de almacenamiento, alimenta la línea de inyección en fase densa/semi-densa. La relación se mantiene a través de fluidización en la línea de inyección. Detalle Fig. 17.

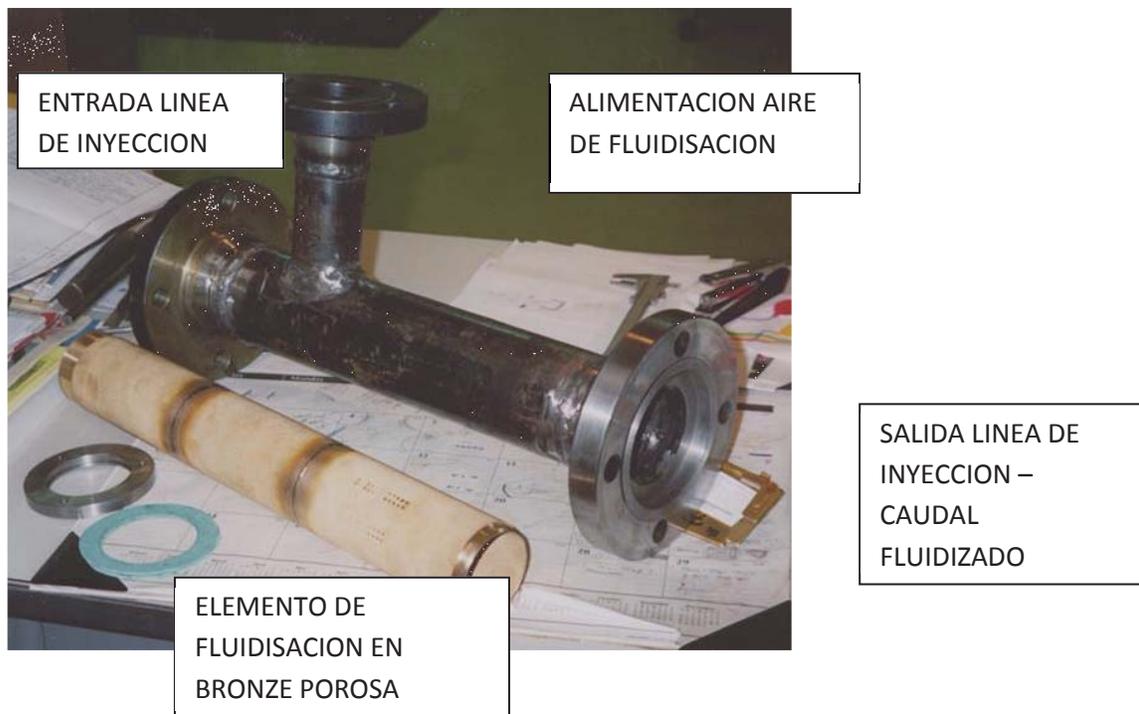


Figura 17: Fluidizador en la línea de inyección (típico).

## Armario neumático.

En el armario neumático hay un filtro fino de aire comprimido en la entrada. El filtro debe ser controlado después de la puesta en marcha y después una vez por año.

Además hay un lubricador que viene sin aceite porque por el momento no hay válvulas instaladas que requieren aire lubricado. En caso de necesidad se debe llenar el lubricador con aceite; El armario neumático tiene una alimentación de 120 VAC. Antes de trabajar en el armario se debe cortar la alimentación eléctrica. Detalle en Fig. 18.

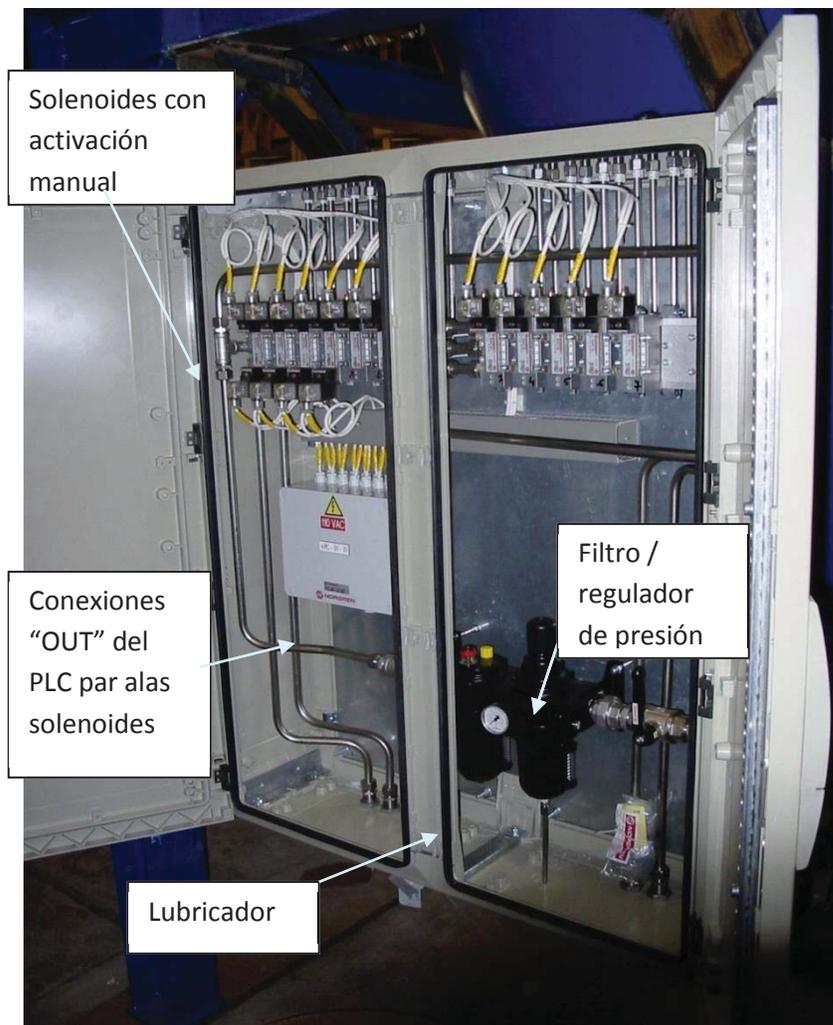
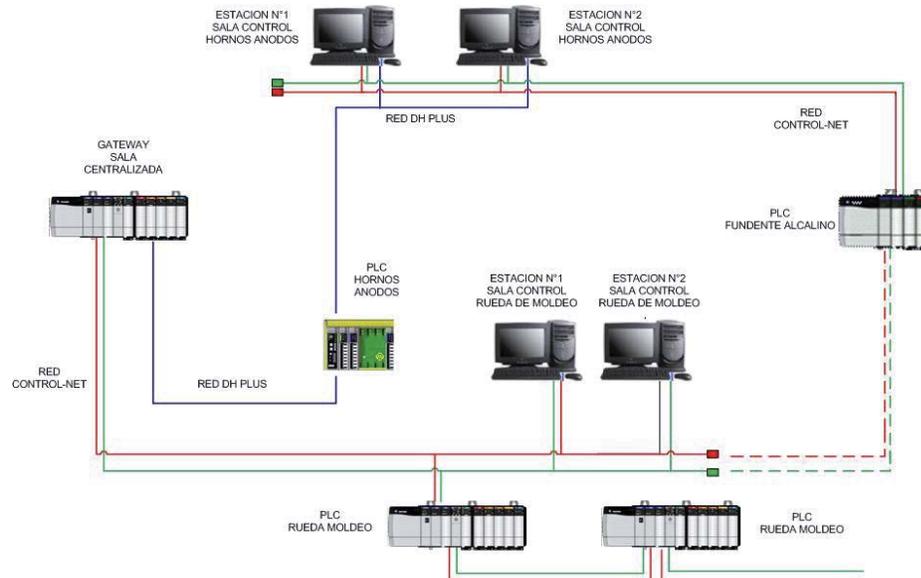


Figura 18: Armario neumático.

## A.2 Catastro del sistema de inyección neumática.

El estado del Sistema de Inyección, en el cual se encuentra, es de deshabilitación y deplorable, partiendo que se encuentra incomunicado a la red como se muestra en l Fig. 19, estando fuera el tramo que va desde la sala de control de la rueda de moldeo hasta el PLC de fundente alcalino por entrar en falla la red.



**Figura 19: estado de comunicación del sistema de inyección.**

Siguiendo con el catastro, revisando acontecimientos anteriores se pudo indagar que el sistema sufrió, una inundación, llegando el nivel de agua a 3 metros del suelo, destruyéndose la instrumentación en la planta baja, refiriéndose específicamente al panel de control de válvulas solenoides, cañerías de descarga, como se muestra en la Fig. 20, 21, 22 y 23.

Se observó retiro de instrumentación las cuales no fueron repuestas, falta de mantenimiento lo cual llevo a que se agriparan válvulas divergentes, ensuciaran piping de líneas de transporte.

El sistema presentaba fallas en su parada de emergencia debido a un switch, por eso el sistema no puede operar automáticamente, lo cual hace imposible realizar inyecciones por motivos de seguridad.



**Figura 20: Falta de instrumentación.**



**Figura 21: Línea de descarga.**



**Figura 22: Línea de descarga, fluidizador.**



**Figura 23: Cuadro de válvulas solenoides.**

### **A.3 Habilitación del sistema de inyección neumática.**

Para la habilitación del sistema de inyección, y lograr su normal y correcto funcionamiento, se planifican múltiples tareas, enmarcadas en 4 grupos

- Limpieza
- Mantenimiento y/o habilitación mecánica.
- Mantenimiento y/o habilitación eléctrica.
- Mantenimiento y/o habilitación instrumentista.

#### **Limpieza**

Parte fundamental dentro de la habilitación es lo que respecta a la limpieza ya que simplifica tareas posteriores convirtiéndose en la partida de ellas.

Específicamente las tareas realizadas fueron:

- Aspirado de barro en subnivel del sistema, lo cual facilito el desmontaje de válvulas.
- Soplado de válvulas en subnivel y niveles superiores.
- Remoción de escombros dejándose área despejada, atacando varios peligros potenciales con lo que respecta a caídas en mismo nivel y diferente nivel.

En la Fig. 24 se muestra el estado del sistema antes de las tareas y la Fig. 25 muestra el estado después de realizar la tarea.



**Figura 24: Estado de limpieza antes de realizar la tarea.**



**Figura 25: Estado de limpieza después de realizar la tarea.**

### **Mantenimiento Mecánica:**

Consistió principalmente en el desmonte de válvula de descarga, para su revisión, limpieza, reparación de piezas o cambio de las que están obsoletas, en la Fig. 26 y la Fig. 27 se muestra el cambio de válvula en la línea de descarga.

A su vez se realizó inspección y limpieza de cañerías, gracias al desmonte de las válvulas que lo permite.



**Figura 26: Comienzo de tarea Mantenimiento Mecánica.**



**Figura 27: Tarea finalizada mantención Mecánica.**

## Mantenimiento Eléctrica

Se centra especialmente en el switch K1222 ubicado en el armario de PLC, no funciona normalmente, debido a esto no permite el accionar remoto de la válvula rotatoria orientación cordillera Tag DA02.

Se encontró la alimentación a este switch y se normalizo su funcionamiento.

Dejando así en correcto estado el funcionamiento eléctrico del sistema.

En Fig. 28 se muestra armario PLC, y switch K1222.

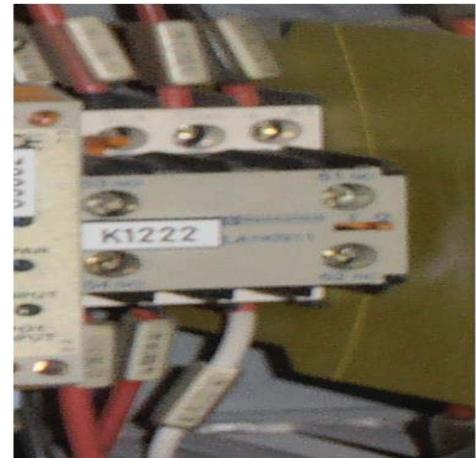


Figura 28: Armario PLC y switch K1222.

## Mantenimiento Instrumentista.

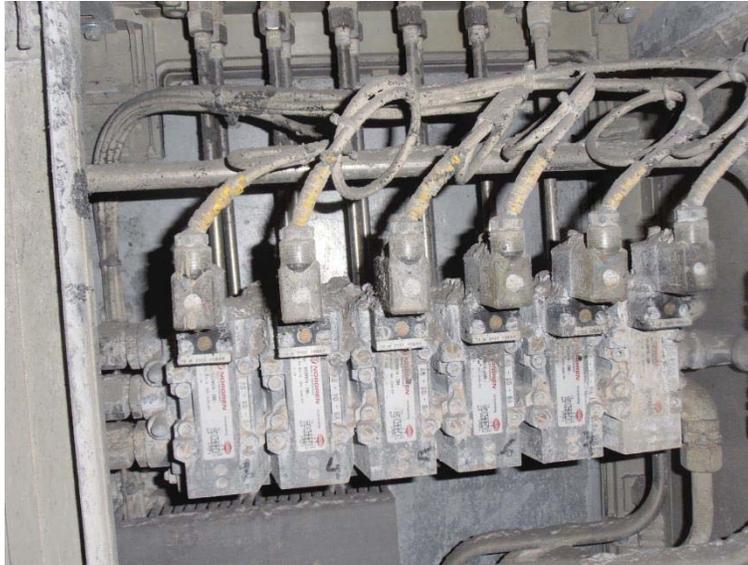
Primeramente se realizó una inspección a todas las válvulas e instrumentación del sistema, para luego realizar tareas específicas que requieran cada elemento.

Así las tareas que se ejecutaron son

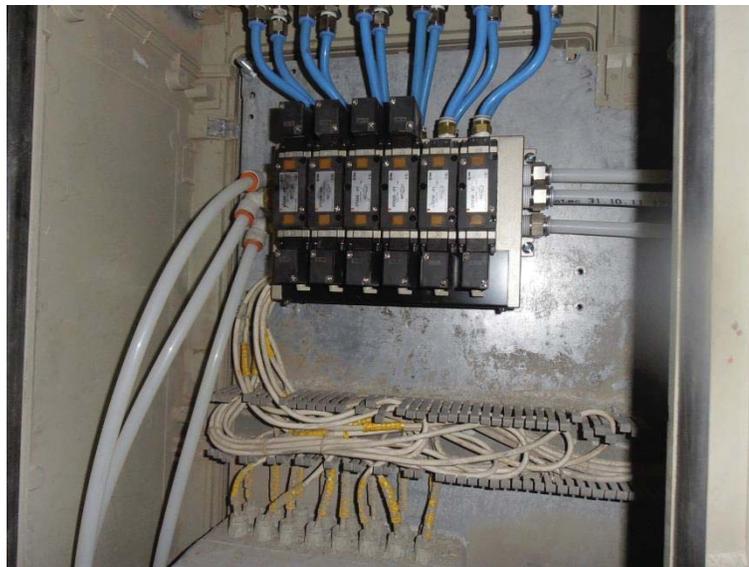
- Desmonte de válvulas.
- Limpieza de válvulas.
- Inspección de actuadores, especialmente buscando humedad, (grupo de válvulas VB)
- Limpieza y secado de contactos.

- Chequeo de status.
- Retiró y cambio del cuadro de válvulas solenoides.
- Retiro y estandarización de válvulas solenoides de válvulas TAG VBM.

La Fig. 29 muestra el cuadro de válvulas solenoides antes de la mantención y la Fig. 30 después de la mantención.



**Figura 29: de cuadro de válvulas de solenoides antes de la mantención.**



**Figura 30: de cuadro de válvulas de solenoides después de la mantención.**

## Comunicación

Se inspecciono la red ControlNet, lográndose encontrar los dos canales de comunicación, chequeándose su estatus, concluyéndose que ambos canales se encontraban en un buen estado, con esto el sistema queda comunicado a red. Como se muestra en la Fig. 31.

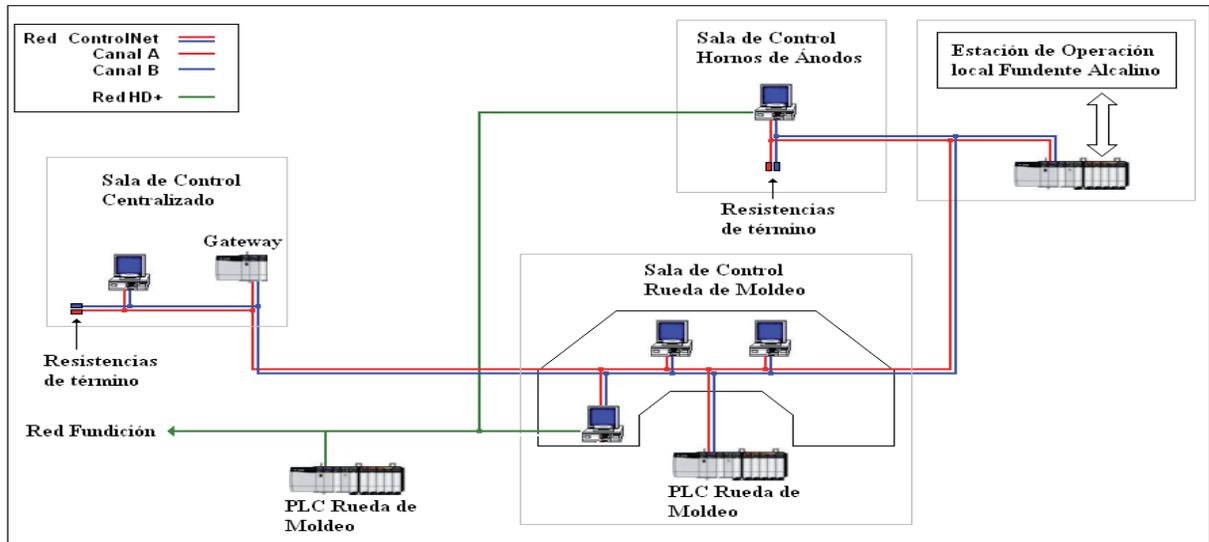


Figura 31: estado actual de comunicación del sistema de inyección.

#### **A.4 Operación del sistema de inyección neumático.**

La operación del sistema de inyección, se divide en 4 pasos continuos, estos son llenado del vaso, presurización del vaso, inyección y despresurización del vaso.

- Secuencia de llenado

El vaso de inyección consigue ser llenado por los silos de almacenamiento, que se encuentran arriba de él. El relleno ocurre por gravedad hasta que indique su nivel de altura, el cual es indicado por las celdas de carga.

Durante el llenado la válvula que despresuriza sigue estando abierta y ventilan el aire desplazado, entrando el polvo al vaso de inyección, este llenado es controlado por las válvulas rotatorias

Una vez alcanzado el nivel de altura, la secuencia de llenado comienza a terminar, cerrando las válvulas guillotinas en la salida de las tolvas de almacenamiento, deteniendo las válvulas rotatorias y finalmente cerrando la válvula cónica en la entrada al vaso de presurización.

- Secuencia de presurización

El vaso de inyección es presurizada a la presión de funcionamiento con el aire comprimido que viene de la fuente comprimida común del aire para el sistema de la transportación neumática y de inyección. La presurización ocurre de todos los lados para asegurar no solamente la presurización rápida, pero también de la fluidificación homogénea del material contenido en el recipiente de inyección. El presurizar solamente comprimiría el material a granel y conduciría a tender un puente sobre el recipiente de la inyección, tapando la salida en la línea transportadora.

- Secuencia de inyección.

La secuencia de inyección empieza cuando la presión de inyección está lograda y el operador confirme iniciar la secuencia de inyección.

Cuando se confirma el inicio los indicadores de presión que están en las líneas de transporte, se cercioran de que la presión sea la adecuada para la inyección, la válvula de seguridad que da el aire de respaldo hacia las toberas de inyección se corta dando paso a la inyección.

Al momento en que baje el nivel del vaso de presurización en operación es detectado por las celdas de carga, el PLC termina la secuencia de inyección. El vaso está construido lo bastante grande para inyectar un batch de polvos metalúrgicos sin recargar.

- Secuencia de despresurización.

La secuencia de inyección alcanza su extremo cuando el sistema de la célula de carga del recipiente de la inyección alcanza su nivel bajo. Esto no significa que el vaso este vacío. De hecho todavía habrá más de 10 a 15 % de material en el vaso.

Y es ahí cuando comienza la secuencia de despresurización, en la cual se abre la válvula de despresurización, teniendo en cuenta que durante la secuencia que despresuriza solamente se abre la válvula que despresuriza. El resto de las válvulas asociadas al recipiente siguen estando cerradas, con excepción de la válvula de seguridad que se encuentra en la línea de transporte, que una vez terminada la secuencia de inyección, se abre automáticamente para dar paso al aire de respaldo.

Tiempos de Secuencias (aproximadamente):

Llenar el vaso con fundentes: 10 minutos

Presurizar el vaso: 1 minuto

Inyectar: 20 minutos

Despresurizar y purgar: 4 minutos

---

Batch: 35 minutos

Polvo Metalúrgico inyectados/batch: 4000 kg

## A.5 Descripción de la pantalla de interfaz.

Los hornos de ánodos y el sistema de inyección son controlados mediante un controlador lógico programable o PLC. La operación de este sistema se realiza mediante una interfaz hombre maquina o HMI (Human Machine Interface), que tiene como objetivo comunicar las instrucciones del operador al PLC e informar el estado del sistema al operador mediante una interfaz gráfica.

El software RSView se encarga de desplegar la interfaz gráfica de monitoreo y control al operador. Las instrucciones del operador y las variables de monitoreo de interés son gestionadas desde y hacia el PLC mediante el software RSLinx.

Con ambos softwares y utilizando una arquitectura de red adecuada, se puede monitorear y controlar el sistema desde uno o más puntos remotos.

En la Fig. 32, se muestra el diagrama general de la pantalla principal con todos sus campos activos. El estado del sistema y los requerimientos de operación del operador controlan en forma dinámica el estado o comportamiento de dicha pantalla.

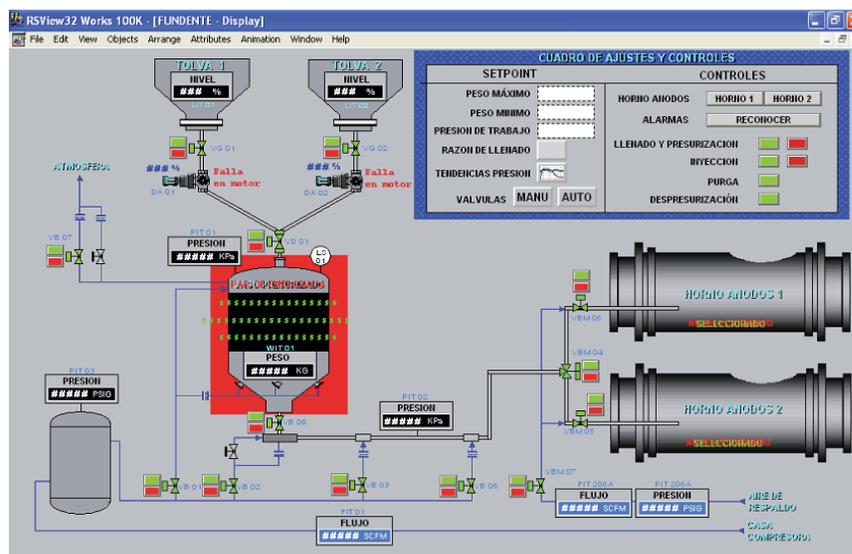


Figura 32: Pantalla general de sistema de inyección.

## ANEXO B.

### Calculo de kilogramos de polvo metalúrgico a adicionar.

#### B.1 Para un moldeo con razón As/Sb =4,4.

Tomando valores de contenidos de arsénico y antimonio para un moldeo común, con una salida de baño de 15 rack o sea 201 toneladas de cobre con una composición de

As: 1496 ppm, Sb: 340 ppm.

Entonces

Salida As: 300,70 kg

Salida Sb: 68,34 kg.

As/Sb = 4,4

Arsénico necesario para que la razón tome un valor 4,5

Salida As' = 68,34 · 4,5 = 307,53 kg.

As Polvo metalúrgico = 307,53 – 300,70 = 6,83 kg.

As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Polvo metalúrgico = 6,83kg / 0,75 = 9,11 kg.

kg Polvo metalúrgico = 9,11 · 100 / 19,4 = 46,97 kg.

Por lo tanto se necesitan 46,97 kg de polvo metalúrgico para que la razón As/Sb quede con un valor 4,5.

## ANEXO C.

### C.1 Detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos.

Tabla C.1: detalle de la información de las pruebas de adición de polvo metalúrgico.

mezcla concentrado seco			metal blanco			cobre blister			cobre anodico			
toneladas	As (ton)	Sb (ton)	toneladas	As (ton)	Sb (ton)	toneladas	As (ton)	Sb (ton)	toneladas	As (ton)	Sb (ton)	As/Sb
680,34	9,08	2,59	270,00	1,00	0,57	229,89	0,42	0,10	203,14	0,41	0,09	4,40
670,22	8,63	2,48	277,71	0,95	0,54	237,60	0,40	0,10	210,86	0,39	0,09	4,38
690,89	8,41	2,40	262,28	0,93	0,53	222,17	0,39	0,09	195,43	0,38	0,09	4,41
651,78	8,82	2,64	277,71	0,97	0,58	237,60	0,41	0,10	210,86	0,40	0,10	4,20
667,43	8,35	2,41	277,71	0,92	0,53	237,60	0,39	0,10	210,86	0,38	0,09	4,35
676,49	8,77	2,57	277,71	0,96	0,57	237,60	0,41	0,10	210,86	0,40	0,09	4,29
635,88	7,97	2,33	267,22	0,88	0,51	227,11	0,37	0,09	200,37	0,36	0,08	4,30
688,66	8,20	2,39	262,28	0,90	0,53	222,17	0,38	0,09	195,43	0,37	0,09	4,31
672,01	8,90	2,65	277,71	0,98	0,58	237,60	0,41	0,10	210,86	0,40	0,10	4,22
635,76	8,06	2,36	262,28	0,89	0,52	222,17	0,37	0,09	195,43	0,36	0,09	4,29
659,55	8,72	2,53	270,00	0,96	0,56	229,89	0,40	0,10	203,14	0,39	0,09	4,33
682,49	9,26	2,64	277,71	1,02	0,58	237,60	0,43	0,10	210,86	0,42	0,10	4,40
656,13	7,84	2,25	254,57	0,86	0,49	214,46	0,36	0,09	187,72	0,36	0,08	4,39
683,93	8,39	2,42	277,71	0,92	0,53	237,60	0,39	0,10	210,86	0,38	0,09	4,36
667,72	8,85	2,51	270,00	0,97	0,55	229,89	0,41	0,10	203,14	0,40	0,09	4,43
665,72	9,11	2,68	277,71	1,00	0,59	237,60	0,42	0,11	210,86	0,41	0,10	4,27

**Tabla C.2: Polvo metalúrgico agregado y análisis químico de ánodos modificados por adición.**

polvo metalúrgico agregado (kg)	análisis de ánodos		
	As (ppm)	Sb (ppm)	As/Sb
64	2045	458	4,47
74	1877	424	4,43
53	1968	440	4,47
196	2018	452	4,46
90	1824	412	4,43
134	1966	440	4,47
115	1853	419	4,42
113	1948	441	4,42
184	2026	455	4,45
123	1946	435	4,47
107	1985	449	4,42
66	2013	451	4,46
61	1913	430	4,45
84	1829	412	4,44
43	1984	443	4,48
153	2052	459	4,47

## C.2 Detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos.

Tabla C.3: Detalle de pruebas de adición de fundentes alcalinos, mezcla 100% CaCO<sub>3</sub>.

mezcla concentrado seco		metal blanco			Eje			Cobre Blíster			Cobre anodico		
toneladas	As %	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As(ton)	As(ppm)	toneladas	As (ton)	As(ppm)
677	0,20	270,00	0,15	542	82,28	0,56	6800	234,54	0,61	2580	207,80	0,59	2854
651	0,20	277,71	0,14	513	82,28	0,52	6300	224,77	0,57	2520	198,03	0,56	2803
672	0,20	262,28	0,14	551	82,28	0,56	6800	234,54	0,60	2573	207,80	0,59	2846
672	0,23	277,71	0,17	613	82,28	0,49	6000	224,77	0,57	2532	198,03	0,56	2816
640	0,31	277,71	0,22	787	82,28	0,47	5700	234,54	0,59	2513	207,80	0,58	2780
681	0,26	270,00	0,20	728	82,28	0,47	5700	224,77	0,57	2538	198,03	0,56	2823
694	0,20	262,28	0,15	590	82,28	0,53	6400	224,77	0,58	2598	198,03	0,57	2890
656	0,20	270,00	0,15	543	82,28	0,57	6900	234,54	0,61	2611	207,80	0,60	2888
655	0,20	270,00	0,14	522	82,28	0,58	7000	234,54	0,61	2620	207,80	0,60	2898
698	0,22	277,71	0,17	620	82,28	0,49	6000	224,77	0,57	2539	198,03	0,56	2824
677	0,22	267,22	0,16	617	82,28	0,50	6100	224,77	0,57	2543	198,03	0,56	2829
663	0,30	270,00	0,22	808	82,28	0,47	5700	234,54	0,59	2511	207,80	0,58	2777
684	0,21	262,28	0,16	611	82,28	0,53	6500	224,77	0,60	2651	198,03	0,58	2949
658	0,21	277,71	0,15	549	82,28	0,56	6750	234,54	0,61	2587	207,80	0,59	2862
649	0,21	262,28	0,15	574	82,28	0,56	6800	234,54	0,61	2595	207,80	0,60	2870
617	0,19	270,00	0,13	486	82,28	0,56	6800	224,77	0,59	2634	198,03	0,58	2930
671	0,19	277,71	0,14	504	82,28	0,57	6950	234,54	0,61	2601	207,80	0,60	2877
657	0,19	254,57	0,14	535	82,28	0,55	6700	224,77	0,59	2622	198,03	0,58	2917
676	0,20	277,71	0,15	531	82,28	0,57	6900	234,54	0,61	2614	207,80	0,60	2891
660	0,20	270,00	0,15	538	82,28	0,54	6550	224,77	0,59	2609	198,03	0,57	2902
680	0,20	277,71	0,15	529	82,28	0,53	6500	224,77	0,58	2600	198,03	0,57	2892

**Tabla C.4: detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos, mezcla 100% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.**

mezcla concentrado seco		metal blanco			Eje			Cobre Blíster			Cobre anodico		
toneladas	As %	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As(ton)	As(ppm)	toneladas	As (ton)	As(ppm)
mezcla concentrado seco		metal blanco			Eje			Cobre Blíster			Cobre anodico		
toneladas	As %	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As(ton)	As(ppm)	toneladas	As (ton)	As(ppm)
679	0,19	270,00	0,14	513	82,284	0,58	7000	234,54	0,61	2611	207,80	0,60	2888
673	0,19	277,71	0,14	518	82,284	0,54	6600	224,77	0,59	2620	198,03	0,58	2914
686	0,19	262,28	0,14	533	82,284	0,58	7000	234,54	0,61	2616	207,80	0,60	2894
682	0,20	277,71	0,15	545	82,284	0,56	6800	234,54	0,61	2598	207,80	0,60	2874
687	0,20	277,71	0,15	534	82,284	0,53	6500	224,77	0,59	2605	198,03	0,57	2898
715	0,20	270,00	0,16	583	82,284	0,55	6700	234,54	0,61	2590	207,80	0,60	2865
634	0,19	262,28	0,13	508	82,284	0,57	6900	224,77	0,60	2673	198,03	0,59	2973
657	0,19	270,00	0,13	495	82,284	0,59	7200	234,54	0,62	2654	207,80	0,61	2936
644	0,19	270,00	0,14	501	82,284	0,59	7200	234,54	0,62	2659	207,80	0,61	2941
633	0,18	277,71	0,12	450	82,284	0,55	6700	224,77	0,58	2579	198,03	0,57	2869
635	0,18	267,22	0,13	479	82,284	0,55	6700	224,77	0,58	2590	198,03	0,57	2881
615	0,18	270,00	0,12	446	82,284	0,59	7200	234,54	0,61	2605	207,80	0,60	2881
650	0,20	262,28	0,14	548	82,284	0,53	6400	224,77	0,57	2556	198,03	0,56	2843
638	0,20	277,71	0,14	507	82,284	0,57	6900	234,54	0,61	2589	207,80	0,60	2864
626	0,20	262,28	0,14	518	82,284	0,57	6900	234,54	0,60	2571	207,80	0,59	2844
617	0,20	270,00	0,13	491	82,284	0,57	6900	224,77	0,60	2671	198,03	0,59	2971
618	0,20	277,71	0,14	494	82,284	0,59	7200	234,54	0,63	2666	207,80	0,61	2949
736	0,20	254,57	0,16	631	82,284	0,53	6500	224,77	0,60	2652	198,03	0,58	2950
653	0,21	277,71	0,15	530	82,284	0,56	6800	234,54	0,61	2583	207,80	0,59	2857
698	0,21	270,00	0,16	600	82,284	0,52	6300	224,77	0,58	2595	198,03	0,57	2887
649	0,21	277,71	0,15	549	82,284	0,53	6400	224,77	0,58	2590	198,03	0,57	2881

**Tabla C.5: detalle pruebas de adición de fundentes alcalinos, mezcla 30% CaCO<sub>3</sub> – 70% Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>.**

mezcla concentrado seco		metal blanco			Eje			Cobre Blíster			Cobre anodico		
toneladas	As %	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As (ton)	As (ppm)	toneladas	As(ton)	As(ppm)	toneladas	As (ton)	As(ppm)
680	0,20	270,00	0,15	560	82,284	0,58	7000	234,54	0,62	2658	207,80	0,61	2940
677	0,20	277,71	0,15	529	82,284	0,55	6700	224,77	0,60	2663	198,03	0,59	2962
665	0,20	262,28	0,15	562	82,284	0,58	7100	234,54	0,63	2674	207,80	0,61	2958
650	0,21	277,71	0,15	532	82,284	0,51	6200	215,00	0,56	2623	188,25	0,55	2936
671	0,21	277,71	0,15	557	82,284	0,48	5800	205,22	0,54	2639	178,48	0,53	2974
665	0,21	270,00	0,16	578	82,284	0,48	5800	205,22	0,54	2645	178,48	0,53	2980
652	0,20	262,28	0,14	549	82,284	0,55	6700	224,77	0,60	2651	198,03	0,58	2949
676	0,20	270,00	0,15	549	82,284	0,58	7000	234,54	0,62	2647	207,80	0,61	2928
649	0,20	270,00	0,14	529	82,284	0,58	7100	234,54	0,62	2657	207,80	0,61	2939
635	0,21	277,71	0,15	540	82,284	0,53	6500	224,77	0,59	2611	198,03	0,58	2904
654	0,21	267,22	0,15	577	82,284	0,53	6500	224,77	0,59	2628	198,03	0,58	2923
622	0,21	270,00	0,15	544	82,284	0,51	6200	215,00	0,56	2620	188,25	0,55	2932
634	0,21	262,28	0,15	570	82,284	0,55	6700	224,77	0,60	2672	198,03	0,59	2972
655	0,21	277,71	0,15	555	82,284	0,58	7000	234,54	0,63	2668	207,80	0,61	2951
638	0,21	262,28	0,15	553	82,284	0,58	7100	234,54	0,63	2665	207,80	0,61	2948
661	0,20	270,00	0,15	542	82,284	0,53	6500	224,77	0,58	2598	198,03	0,57	2890
622	0,20	277,71	0,14	488	82,284	0,58	7000	234,54	0,61	2600	207,80	0,60	2876
673	0,20	254,57	0,15	588	82,284	0,53	6500	224,77	0,59	2610	198,03	0,57	2903
640	0,21	277,71	0,14	521	82,284	0,58	7000	234,54	0,62	2634	207,80	0,61	2914
645	0,21	270,00	0,15	561	82,284	0,54	6600	224,77	0,60	2649	198,03	0,58	2947
696	0,21	277,71	0,16	569	82,284	0,53	6500	224,77	0,59	2642	198,03	0,58	2939