



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MINAS

**DESARROLLO DE MODELO DE COSTOS DE OPERACIÓN DE LA
LÍNEA DE PROCESAMIENTO FUNDICIÓN Y REFINERÍA DEL COBRE
PARA EVALUACIÓN ECONÓMICA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL DE MINAS

SEBASTIÁN ALEJANDRO CERÓN AMIGO

PROFESORA GUÍA:

MELISSA CÁRDENAS BÁEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

LEANDRO VOISIN ARAVENA

JULIO OSSANDÓN GONZÁLEZ

SANTIAGO DE CHILE

2019

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil de Minas.

POR: Sebastián Alejandro Cerón Amigo.

FECHA: 22 de mayo del 2019.

PROFESORA GUÍA: Melissa Cárdenas Báez.

**DESARROLLO DE MODELO DE COSTOS DE OPERACIÓN DE LA LÍNEA DE
PROCESAMIENTO FUNDICIÓN Y REFINERÍA DEL COBRE PARA EVALUACIÓN
ECONÓMICA**

La Vicepresidencia de Proyectos de Codelco está elaborando un modelo completo de evaluación de proyectos para estudios de factibilidad, el que responde a la imperiosa necesidad de estandarizar los protocolos de planificación ya que, debido al carácter público de la empresa, los presupuestos de inversión deben ser aprobados por organismos estatales, lo que se dificulta cuando se solicitan servicios a empresas consultoras privadas, las que utilizan softwares de confusa o compleja trazabilidad de datos y algoritmos, por lo que los proyectos realizados bajo esta metodología han tenido dificultades en la obtención del financiamiento, lo que intrínsecamente retrasa los proyectos.

En esta línea, se requiere completar el modelo de evaluación económica diseñando los modelos de costos de fundición y de refinería del cobre, de tal manera de que sean un único estándar de planificación a largo plazo.

Se toman como base dos proyectos referentes a la División Chuquicamata: API N15FP15 “Desarrollo Fundición Chuquicamata” y API N14MS03 “Explotación Chuquicamata Subterránea”, los que cuentan con la información suficiente para modelar. Se seleccionan los insumos sustanciales y se elaboran los dos modelos OPEX, los que poseen cinco hojas Excel: hoja Inicio, hoja Parámetros, con precios, I/P’s y tarifas de todos los insumos, hoja Balance de masa FURE actualizado, hoja OPEX base, con los consumos, dotaciones y costos por operación unitaria y por elemento de gasto y, finalmente, la hoja OPEX calculado, que actualiza los gastos según la corrección monetaria y muestra el indicador final buscado: el costo unitario promedio.

El Mantenimiento de la fundición ocupa un cuarto de los costos totales, siendo la energía eléctrica, las remuneraciones y el agua industrial los costos principales. En la refinería, la ER ocupa el 60% de los gastos de la planta, en la que las remuneraciones y la energía eléctrica son los gastos primordiales. El costo unitario promedio de la Fundición Chuquicamata es de 207,95 USD/tms y el de la Refinería es de 9,48 ¢/lb, valores que se encuentran dentro de los valores históricos y proyectados.

Se concluye que ambas herramientas logran conformar dos modelos estándar de estimación de costos de operación, ya que contienen un listado de los insumos más importantes, con tarifas, precios e I/P’s visibles, y con métodos de cálculo debidamente parametrizados, relacionando factores técnicos y económicos, lo que reduce los inconvenientes a la hora de evaluar los proyectos.

Agradecimientos

A mi familia, que han sido un constante apoyo durante toda mi vida académica, y que me han dado la fuerza para continuar con mis metas a pesar de los inconvenientes.

A mi madre, a la que admiro por su entereza y la que me ha dado todo.

A mi jefa Melissa, por entregarme su confianza y por ser gran apoyo en la realización de este trabajo. A Leandro y Beatriz, por su aporte en la confección del Balance FURE.

Al profesor Leandro y a Julio, por su aporte en este trabajo.

A mis queridísimos abuelos, que me aportan día a día su sabiduría y su experiencia siempre que es necesario. Por todas las pilsen viendo los partidos de Chile, y por todas las delicias que cocinas tan cariñosamente.

A mis tres sobrinos, Martín, Agustín y Benjamín, que me devolvieron a mi infancia cuando más estaba madurando.

Al Pipe, porque es mi parner, un incondicional, y porque es lo más grande que existe. Al Pedrito, mi amigo geólogo, por todos los carretes y viajes soportándonos. A los civiles, antes de que fueran civiles. Al Mack, por prestar la casa de Pichilemu, y por lo que no se puede contar. Al Ivo, por ser el mejor proveedor.

A mis compañeros y compañeras de carrera, por toda la pera compartida.

Karlita corazón, por darme la oportunidad de ser tu profe de física. Ivanita, por los sushis que me debes.

Sofita, por apoyarme tiernamente en mi última etapa, y por dejarme ser tu cable a tierra en tu primer año.

Tabla de Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	La empresa ^[1]	3
1.3	Objetivos	4
1.3.1	Objetivo Principal	4
1.3.2	Objetivos Secundarios	4
1.4	Alcances	5
1.5	Metodología	5
2	ANTECEDENTES: PROCESOS DEL COBRE	7
2.1	PROCESOS DE LA FUNDICIÓN DE COBRE	8
2.1.1	Secado/Tostación ^[3]	10
2.1.2	Fusión	11
2.1.3	Conversión	12
2.1.4	Refino y Moldeo	12
2.1.5	Limpieza de escorias	15
2.1.6	Tratamiento de gases	16
2.1.7	Producción de aire enriquecido con oxígeno	20
2.2	Descripción de equipos utilizados por las fundiciones de Codelco (excepto Ventanas)	21
2.2.1	Secado	21
2.2.2	Hornos de Fusión	23
2.2.3	Conversión: Convertidor Peirce – Smith	26
2.2.4	Horno de Refino (Horno de Ánodos)	27
2.2.5	Tratamiento de gases	28
2.2.6	Resumen de equipos utilizados	30
2.3	PROCESOS DE LA REFINERÍA ELECTROLÍTICA DE COBRE	30
2.3.1	Electrorrefinación de cobre	31
2.3.2	Planta de Intercambio Iónico (IX)	33

2.3.3	Tratamiento del Barro Anódico.....	33
2.4	DESCRIPCIÓN DE LAS FUNDICIONES Y REFINERÍAS DE CODELCO	34
2.4.1	Chuquicamata.....	34
2.4.2	Potrerillos	35
2.4.3	Caletones	37
3	MODELAMIENTO DEL <i>OPERATIONAL EXPENDITURE</i>	39
3.1	Bases de datos	40
3.2	BALANCE DE MASA FURE	43
3.2.1	Diagrama de flujos FURE detallado de la División Chuquicamata.....	45
3.2.2	Balance de masa FURE estandarizado	46
3.3	MODELO OPEX DE FUNDICIÓN.....	62
3.3.1	Pre – modelo de Fundición N°1	62
3.3.2	Pre – modelo de Fundición N°2	64
3.3.3	Pre – modelo de Fundición N°3	65
3.3.4	Pre – modelo de Fundición N°4	66
3.3.5	Pre – modelo de Fundición N°5	68
3.3.6	Pre – modelo Final de Fundición.....	71
3.3.7	Modelo OPEX generalizado de las Fundiciones de Cobre de Codelco	74
3.4	MODELO OPEX DE REFINERÍA.....	93
3.4.1	Pre – modelo de Refinería N°1.....	93
3.4.2	Pre – modelo de Refinería N°2.....	94
3.4.3	Pre – modelo de Refinería N°3.....	96
3.4.4	Pre – modelo Final de Refinería.....	97
3.4.5	Modelo OPEX generalizado de las Refinerías de Codelco	100
4	ANÁLISIS	113
4.1	Balance FURE	113
4.2	Modelo OPEX de Fundición.....	115
4.3	Modelo OPEX de Refinería.....	118
4.4	Análisis de Riesgo	119
5	CONCLUSIONES.....	122

6	TRABAJO FUTURO	124
7	GLOSARIO	125
8	BIBLIOGRAFÍA	127
9	ANEXO A: INSUMOS RELEVANTES.....	130
10	ANEXO B: DESGLOSE DE GASTOS OPEX BASE	131
10.1	Desglose de cada Operación Unitaria de la Fundición DCH.....	131
10.2	Desglose de cada Operación Unitaria de la Refinería DCH.....	134
11	ANEXO C: DESGLOSE GASTOS OPEX CALCULADO	137

Índice de tablas

Tabla 1: Comparación de fundiciones internacionales con las chilenas, 2015 ^[2]	2
Tabla 2: Proyectos de inversión en las fundiciones de Codelco ^[1]	3
Tabla 3: Proyectos Estructurales de Codelco ^[1]	4
Tabla 4: Composición química en peso de concentrados de Codelco ^[3]	8
Tabla 5: Especificaciones químicas de cobre anódico ^[3]	12
Tabla 6: Reductores en refinación ^[3]	14
Tabla 7: Calidad química de los ánodos ^[3]	15
Tabla 8: Composición general de escorias fayalíticas de fusión y conversión de cobre ^[3]	16
Tabla 9: Características de los gases provenientes de los equipos en fundiciones de cobre ^[3]	17
Tabla 10: Ventajas y desventajas de los tipos de secadores utilizados ^[3]	23
Tabla 11: Distribución de impurezas en hornos de fusión ^[3] , modificado.	25
Tabla 12: Distribución de impurezas en la etapa de conversión ^[3]	27
Tabla 13: Características del Convertidor PS ^[3]	27
Tabla 14: Resumen de equipos utilizados por las fundiciones (excepto Ventanas) ^{[3], [6], [12]}	30
Tabla 15: Composición típica de un ánodo enviado a ER ^[14]	31
Tabla 16: Composición química de cátodos, electrolito y barro anódico ^{[13], [17]}	32
Tabla 17: Definición del circuito productivo ^[21]	39
Tabla 18: Operaciones unitarias relacionadas a la fundición y a la refinería del cobre ^[21]	39
Tabla 19: Elementos de Gasto.	40
Tabla 20: Ejemplo de la caracterización realizada a cada insumo de la fusión.	41
Tabla 21: Factores de corrección monetaria según proyección media de TC y precio del cobre.	43
Tabla 22: Descripción de flujos requeridos para cálculo de consumos y gastos.	44
Tabla 23: Caracterización de los tipos de concentrado/calcina adicionadas a la fusión.	47
Tabla 24: Leyes de cobre de los flujos de salida de los reactores presentes en la fundición.	48
Tabla 25: Factores de distribución de cobre por equipo y proceso.	48
Tabla 26: Tonelaje húmedo total procesado (concentrado y calcinas totales procesadas).	49
Tabla 27: Balance másico de la etapa de Fusión.	50
Tabla 28: Balance de cobre en Fusión por equipo.	51

Tabla 29: Balance de cobre en Conversión Soplado a Escoria.	51
Tabla 30: Balance de cobre en Conversión Soplado a Cobre.....	52
Tabla 31: Balance de cobre en Refino y Moldeo.	54
Tabla 32: Límites máximos de emisiones de SO ₂ y As para fuentes existentes.....	54
Tabla 33: Producción de ácido sulfúrico comercial.	55
Tabla 34: Cálculo del Oxígeno requerido por la fundición.	55
Tabla 35: Producción de Concentrado de Escoria.....	56
Tabla 36: Balance de masa y cobre de polvos metalúrgicos.	57
Tabla 37: Balance de masa y cobre en la Electrorrefinería.	58
Tabla 38: Balance de masa en la PTBA.	59
Tabla 39: Indicadores de gestión FURE.....	61
Tabla 40: Desglose de procesos de cada operación unitaria de la Fundición DCH, según planilla base.	62
Tabla 41: Detalle de los insumos presentes en los elementos de gasto de la fundición.	63
Tabla 42: Ajustes realizados en el Pre – modelo de Fundición N°2.	64
Tabla 43: Ajustes realizados en el Pre – modelo de Fundición N°3.	65
Tabla 44: Distribución de los costos de cada insumo de la fundición (incluye remuneración del personal).	67
Tabla 45: Distribución de los costos de cada insumo de la fundición (incluye remuneraciones) después del primer filtro.	69
Tabla 46: Análisis de la segunda condición del Segundo Criterio.	70
Tabla 47: Desglose de la proyección dotacional Rol B de la Fundición Chuquicamata.....	72
Tabla 48: Desglose de la proyección dotacional Rol A de la Fundición Chuquicamata.	73
Tabla 49: Insumos considerados en el modelo definitivo de fundición.	73
Tabla 50: Proyección de precios de combustible, energía eléctrica y agua industrial.	75
Tabla 51: Proyecciones de precios de materiales relevantes para la operación.	76
Tabla 52: Precios de Reactivos para operación y mantención en el Largo Plazo.	76
Tabla 53: Precios de Lubricantes para mantención en el Largo Plazo.	77
Tabla 54: Precios de Acero Estructural para operación y mantención en el Largo Plazo.....	77
Tabla 55: Precios de Tuberías, válvulas y accesorios para operación y mantención en el Largo Plazo.	78

Tabla 56: Precios de Otros materiales fundición para mantención en el Largo Plazo.	78
Tabla 57: Precios de Material eléctrico y Herramientas para operación y mantención en el Largo Plazo.	79
Tabla 58: Precios de Materiales generales Bodega para operación y mantención en el Largo Plazo.	80
Tabla 59: Precios de Repuestos para operación y mantención en el Largo Plazo.....	81
Tabla 60: Precios de Suministros secundarios en el Largo Plazo.	81
Tabla 61: Tarifas de distintos tipos de Servicios para la fundición en los primeros años.....	82
Tabla 62: Tarifas de Otros servicios para la fundición en los primeros años.....	83
Tabla 63: Tarifas de insumos referentes a la Administración.	83
Tabla 64: I/P de Materiales en el Largo Plazo.....	83
Tabla 65: I/P de Combustibles a Largo Plazo.	84
Tabla 66: I/P de Suministros a Largo Plazo.	84
Tabla 67: I/P de la Energía Eléctrica a Largo Plazo.....	85
Tabla 68: I/P de insumos desagrupados en el Largo Plazo (excepto CT).	85
Tabla 69: Detalle de sistema de turnos rol A y rol B.	86
Tabla 70: Remuneraciones de los distintos tipos de trabajadores, por persona.	87
Tabla 71: Separación de los gastos en las operaciones unitarias.....	88
Tabla 72: Distribución porcentual promedio de los gastos de la fundición por operación unitaria y por elemento de gasto.	89
Tabla 73: Indicadores de consumos principales de la fundición.	90
Tabla 74: Dotación de la fundición por turno.	90
Tabla 75: Dotación total de la fundición.	91
Tabla 76: Factores de corrección monetaria, seis primeros años.	91
Tabla 77: OPEX calculado por operación unitaria y por elemento de gasto.....	92
Tabla 78: Desglose de los procesos de cada operación unitaria de la refinería de cobre.	93
Tabla 79: Detalle de los insumos presentes en los elementos de gasto de la refinería.....	94
Tabla 80: Ajustes realizados en el Pre – modelo N°2 de Refinería.....	95
Tabla 81: Distribución de los costos de cada insumo de la refinería (incluye Administración). ..	97
Tabla 82: Desglose de la proyección dotacional Rol B de la Refinería Chuquicamata.	99
Tabla 83: Desglose de la proyección dotacional Rol A de la Refinería Chuquicamata.	100

Tabla 84: Insumos considerados en el modelo definitivo de refinería.	100
Tabla 85: Proyección de precios de ácidos, energía eléctrica y agua industrial.....	102
Tabla 86: Proyecciones de precios de materiales relevantes para la operación.	102
Tabla 87: Precios de Reactivos para operación y mantención en el Largo Plazo.	102
Tabla 88: Precios de Envases para operación en el Largo Plazo.....	103
Tabla 89: Precios de Mat. Eléctrico y Herramientas para operación y mantención en el LP.	103
Tabla 90: Precios de Mat. Generales de Bodega para operación y mantención en el LP.	103
Tabla 91: Precios de Repuestos para operación y mantención en el Largo Plazo.....	104
Tabla 92: Precio de Suministros secundarios en el Largo Plazo.....	104
Tabla 93: Tarifas de distintos tipos de Servicios para la refinería en los primeros años.....	105
Tabla 94: Tarifas de Otros servicios para la fundición en los primeros años.....	105
Tabla 95: Tarifas de insumos referentes a la Administración.	105
Tabla 96: I/P de Materiales en el Largo Plazo.....	106
Tabla 97: I/P de la Energía Eléctrica en el Largo Plazo.....	106
Tabla 98: I/P de los Suministros en el Largo Plazo.....	106
Tabla 99: I/P de insumos desagrupados en el Largo Plazo.	106
Tabla 100: Detalle de sistema de turnos rol A y rol B.	107
Tabla 101: Remuneraciones de los distintos tipos de trabajadores, por persona.	108
Tabla 102: Desglose de gastos en las operaciones unitarias.	109
Tabla 103: Desglose de gastos de la refinería por operación unitaria y por elemento de gasto..	109
Tabla 104: Indicadores de consumos principales de la refinería.....	111
Tabla 105: Dotación por turno de la refinería.	111
Tabla 106: Dotación total refinería.....	111
Tabla 107: OPEX calculado por operación unitaria y por elemento de gasto.....	112
Tabla 108: Insumos relevantes de la fundición y la electrorrefinería.....	130
Tabla 109: Gastos OPEX calculados de la fundición.....	137
Tabla 110: Gastos OPEX calculados de la fundición.....	138
Tabla 111: Gastos OPEX calculados de la refinería.....	139

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Química global de la fusión de concentrados.....	9
Ecuación 2: Reacciones químicas que involucran el soplado a mata o eje ^[3]	12
Ecuación 3: Reacción principal involucrada en el soplado a cobre ^[3]	12
Ecuación 4: Remoción de azufre disuelto presente en el cobre blíster ^[3]	13
Ecuación 5: Reacción química de eliminación de impurezas del cobre mediante oxidación ^[3] ...	13
Ecuación 6: Formación de negros de humo y reacciones de reducción ^[3]	13
Ecuación 7: Reacción de oxidación del SO ₂	18
Ecuación 8: Formación de ácido sulfúrico.....	19
Ecuación 9: Formación de arseniato férrico insoluble a partir de arseniato y arsenito, respectivamente ^[8]	20
Ecuación 10: Reacciones principales que ocurren dentro de la celda de ER ^[13]	31
Ecuación 11: Lixiviación de cobre contenido en los Barros anódicos crudos ^[18]	33
Ecuación 12: Fórmula para determinar los factores de corrección monetaria ^[21]	43
Ecuación 13: Cálculo de la ley del elemento “X” en el concentrado mezclado, según los concentrados parciales “y”.	47
Ecuación 14: Cálculo de las toneladas métricas húmedas alimentadas a la fundición.....	49
Ecuación 15: Cálculo de las tms y tmf según leyes y Factores de distribución.....	49
Ecuación 16: <i>Scrap</i> recirculado a la etapa de Refino y Moldeo.....	53
Ecuación 17: Condición de reproceso y de venta de chatarra de cobre en la Refinación.....	53
Ecuación 18: Fórmula corporativa de cálculo de las toneladas de Ácido Sulfúrico producidas...	55
Ecuación 19: Concentrado de Escorias retornado a la fundición.....	55
Ecuación 20: Cálculo del Cu despachado (cátodos).....	59
Ecuación 21: Fórmula para determinar la Recuperación de la fundición.....	60
Ecuación 22: Fórmula para determinar el Factor de Cobre Nuevo.....	60
Ecuación 23: Fórmula para determinar el Factor de Cobre Moldeado.....	60
Ecuación 24: Fórmula para determinar el Factor de generación de Ácido.....	60
Ecuación 25: Primer Criterio de descarte de insumos según costos.....	66
Ecuación 26: Segundo Criterio de descarte de insumos según costos.....	69

Ecuación 27: Cálculo del factor de contrturno y reemplazo.....	86
Ecuación 28: Cálculo de la dotación total, considerando contrturnos y reemplazos.....	87
Ecuación 29: Factor de corrección monetaria ponderado por tipo de moneda utilizada.....	91
Ecuación 30: Cálculo de Gasto Calculado y de Remuneración calculada con escalamiento de costo laboral.	91
Ecuación 31: Criterio de descarte de insumos refiniería según costos.....	96

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Esquema de Evaluación Económica para el estudio de factibilidad de proyectos. ...	1
Ilustración 2: Comparación de costos operacionales de fundiciones, año 2015 ^[2]	2
Ilustración 3: Participación de las fundiciones de Codelco en Chile, año 2015 ^[3]	5
Ilustración 4: Diagrama de flujos del procesamiento de minerales de cobre.	7
Ilustración 5: Esquema representativo de la fusión de concentrado de cobre.	10
Ilustración 6: <i>Flowsheet</i> estándar de las fundiciones de cobre de Codelco (excepto Ventanas)...	10
Ilustración 7: Esquema general de rueda de moldeo ^[3]	14
Ilustración 8: Holguras en las dimensiones de un ánodo de cobre estándar ^[3]	15
Ilustración 9: Etapas del tratamiento de gases ^[3]	17
Ilustración 10: Rango de tamaños de partícula de varios procesos y rangos de trabajo de equipos de limpieza de gases ^[3]	18
Ilustración 11: <i>Flowsheet</i> del tratamiento de efluentes ^[8]	19
Ilustración 12: Diagrama del proceso de separación de aire ^[11]	21
Ilustración 13: Planta de oxígeno estándar ^[10]	21
Ilustración 14: Secador rotatorio de calor indirecto o de vapor ^[3]	22
Ilustración 15: Esquema representativo del funcionamiento de un secador de lecho fluidizado. .	23
Ilustración 16: Figura esquemática del Convertidor Teniente ^[3]	24
Ilustración 17: Esquema de Horno Flash Outokumpu ^[3]	25
Ilustración 18: Esquema de Convertidor Peirce – Smith ^[3]	26
Ilustración 19: Posiciones del convertidor Peirce – Smith ^[3]	26
Ilustración 20: Esquema de un horno basculante de refino ^[3]	27
Ilustración 21: Esquema operacional de Cámara de Enfriamiento Evaporativo ^[9]	28
Ilustración 22: Esquema de Cámara de Enfriamiento Radiativo ^[9]	28
Ilustración 23: Principios de funcionamiento del Precipitador Electrostático ^[9]	29
Ilustración 24: <i>Flowsheet</i> de la producción de ácido sulfúrico ^[3]	29
Ilustración 25: Esquema de una celda de ER ^[15]	31
Ilustración 26: <i>Flowsheet</i> de Fundición Chuquicamata, año 2019.	35
Ilustración 27: <i>Flowsheet</i> de Fundición Potrerillos, año 2019.	36

Ilustración 28: <i>Flowsheet</i> Fundición Caletones, año 2019.....	37
Ilustración 29: Titulares de prensa sobre las detenciones de la Fundición DCH ^{[23], [22]}	41
Ilustración 30: Representación esquemática del modelo para calcular el Costo Operacional ^[21] . 42	
Ilustración 31: Diagrama de flujos FURE de la DCH detallado.	46
Ilustración 32: Evolución dotacional rol A y rol B nuevo y antiguo de la Fundición DCH.	71
Ilustración 33: Detalle de la dotación Rol B de la Fundición DCH por operación unitaria.	72
Ilustración 34: Esquema de Evaluación Económica para proyectos de fundiciones.....	74
Ilustración 35: Desglose de gastos de la fundición por operación unitaria.	89
Ilustración 36: Desglose de gastos de la fundición por elemento de gasto.	90
Ilustración 37: Proyección de costo unitario y alimentación de la Fundición Chuquicamata.....	92
Ilustración 38: Evolución dotacional rol A y rol B nuevo y antiguo de la Refinería DCH.....	98
Ilustración 39: Detalle de la dotación Rol B de la Refinería DCH por operación unitaria.	99
Ilustración 40: Esquema de Evaluación Económica para proyectos en refinerías.	101
Ilustración 41: Desglose de gastos de la refinería por operación unitaria.	110
Ilustración 42: Desglose de gastos de la refinería por elemento de gasto.	110
Ilustración 43: Proyección de costo unitario y producción de la Refinería Chuquicamata.....	112
Ilustración 44: Análisis de sensibilidad de Costos unitarios vs Rechazo de Ánodos.....	114
Ilustración 45: Análisis de sensibilidad de Costos unitarios vs Factor de generación de <i>Scrap</i> . 114	
Ilustración 46: Proyección de costo unitario y tonelaje de BAC procesado en la PTBA.....	120
Ilustración 47: Desglose de gastos de Recepción y Mezcla.	131
Ilustración 48: Desglose de gastos de Fusión.	131
Ilustración 49: Desglose de gastos de Conversión.	132
Ilustración 50: Desglose de gastos de Refino y Moldeo.	132
Ilustración 51: Desglose de gastos de Limpieza de Gases.	133
Ilustración 52: Desglose de gastos de Mantenimiento.	133
Ilustración 53: Desglose de gastos de Administración.....	134
Ilustración 54: Desglose de gastos de Electrorrefinación.....	134
Ilustración 55: Desglose de gastos de la Planta de Tratamiento de Barro Anódico.....	135
Ilustración 56: Desglose de gasto del Mantenimiento.....	135
Ilustración 57: Desglose de gastos de la Administración.	136

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las fundiciones y refineras de Codelco producen cerca del 9% del mercado mundial de cátodos pero, a pesar de esta participación, viven un complejo escenario que ha llevado a la empresa a una necesaria modernización de su tecnología para lograr los estándares ambientales exigidos por la regulación chilena y para tratar de aumentar su competitividad en el mercado internacional, ya que las plantas extranjeras presentan costos operacionales ostensiblemente menores que los registrados por Codelco, debido a diferencias en relación al gasto en remuneraciones y al precio de energía eléctrica. En consecuencia, se generan sucesivas pérdidas en los estados financieros de Codelco, por lo que existe el desafío latente de disminuir los costos y mantener o aumentar los niveles de producción actual cumpliendo con las exigencias de sustentabilidad.

En este marco, Codelco inicia en esta década un fuerte plan de inversiones para modernizar y optimizar las fundiciones y refineras que posee, con cerca de MUSD 1.930 (para las fundiciones), para poder cumplir con el nuevo estándar ambiental (DS N°28, que exige que la captura de azufre y arsénico sea del 95% mínimo) ^[1]. Por lo tanto, se requieren optimizar los estándares de planificación a través de modelos técnico – económicos que contribuyan a evaluar la factibilidad de los futuros proyectos de inversión.

Es por esto que la Vicepresidencia de Proyectos de Codelco está elaborando un modelo completo de evaluación de proyectos para estudios de factibilidad, el que se divide en tres módulos: Ingresos, Inversiones y Costos.

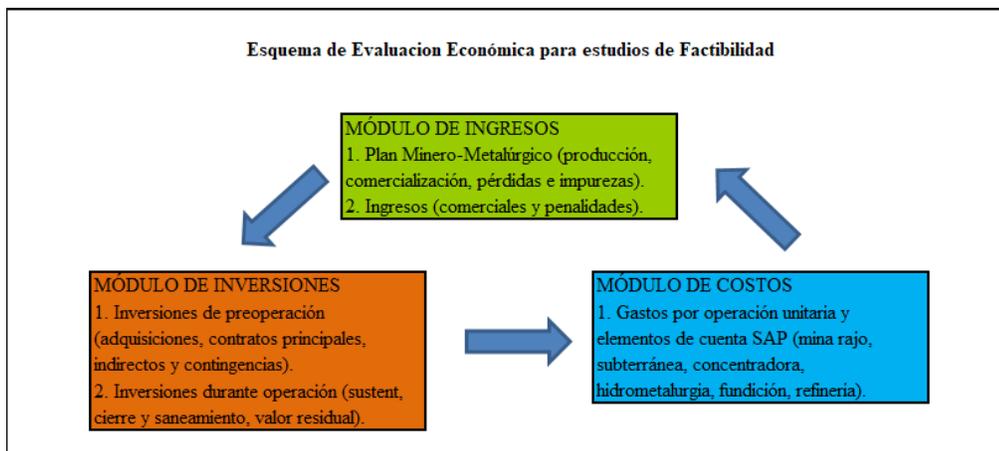


Ilustración 1: Esquema de Evaluación Económica para el estudio de factibilidad de proyectos.

Estos módulos responden a la imperiosa necesidad de estandarizar los protocolos de planificación ya que, debido al carácter público de la empresa, los presupuestos de inversión deben ser aprobados

por organismos estatales (Ministerio de Minería, Desarrollo Social, Hacienda, entre otros). Por consiguiente, las estimaciones de costos deben contar con una estructura y orden verificable, lo que muchas veces no ocurre cuando se solicitan los servicios de empresas consultoras privadas, las cuales utilizan softwares de confusa o compleja trazabilidad en el uso de datos y algoritmos, por lo que los proyectos realizados bajo esta metodología han tenido dificultades en la obtención de financiamiento, deteniendo su avance. Ciertamente, los modelos generados por las consultoras no aportan información confiable.

En esta línea, es importante destacar que la Vicepresidencia de Proyectos ya ha estandarizado estructuras de estimación para mina rajo, mina subterránea, planta concentradora y planta hidrometalurgia, mientras que para las fundiciones y refinерías no se cuenta con modelo técnico-económico alguno: está en estado cero. En definitiva, los modelos por generar mediante este trabajo de titulación serán la base para tramitar solicitudes de financiamiento asociados a proyectos de inversión (de monto superior a MUSD 1.000) en Codelco.

Tabla 1: Comparación de fundiciones internacionales con las chilenas, 2015 ^[2].

Parámetro	Unidad	Fundiciones chinas	Fundiciones japonesas	Fundiciones alemanas	Fundiciones chilenas
Capacidad fusión/equipo	ktms/año	1.000 – 1.500	1.200	1.200	320 – 1.000
Captura de azufre	%	98	99	98,5	95
Costo Unitario	¢/lb	13	18	19	22 – 40
Recuperación de Cu	%	98 – 98,5	98 – 99,5	98	95 – 97,4
Recuperación de energía	Si/No	Si	Si	Si	No
Recuperación de otros metales	Si/No	Si	Si	Si	No

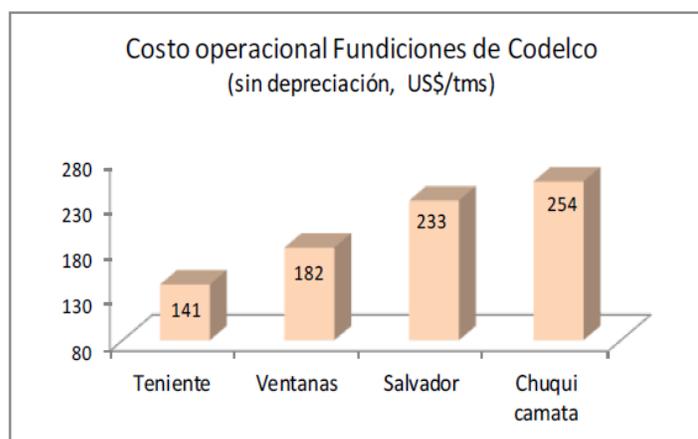


Ilustración 2: Comparación de costos operacionales de fundiciones, año 2015 ^[2].

1.2 La empresa ^[1]

Codelco, la Corporación del Cobre de Chile, es la principal productora de cobre de mina a nivel mundial y posee cerca del 9% de las reservas mundiales de este elemento. Es una de las principales empresas estatales de nuestro país y un gran motor de desarrollo desde su creación el primero de abril de 1976 (mediante el decreto ley 1.350), cuando el Estado de Chile asume el control total de los yacimientos de la gran minería previamente nacionalizados el 11 de julio de 1971.

La empresa tiene como misión “desplegar en forma responsable y con excelencia, toda nuestra capacidad de negocios mineros y relacionados en Chile y en el mundo, con el propósito de maximizar en el largo plazo nuestro valor económico y los respectivos aportes al Estado”. Este ideal implica tácitamente un convenio con todos los chilenos y chilenas, ya que las inversiones que Codelco tiene planeadas se financian con dineros de todo el país.

La exploración, explotación y comercialización de los recursos mineros del cobre refinado y sus subproductos se realiza a través de las siete divisiones: Andina, Chuquicamata, El Teniente, Gabriela Mistral, Ministro Hales, Radomiro Tomic y Salvador, a la que se debe agregar la fundición y refinería Ventanas (todas ubicadas en la zona centro-norte del país). La estrategia corporativa es gestionada y encabezada por Casa Matriz, ubicada en Santiago de Chile, y por el directorio formado por nueve integrantes escogidos por el presidente de la República, quienes eligen a su vez al presidente ejecutivo.

El principal producto que Codelco vende a los fabricantes de semielaborados son los cátodos de cobre de alta pureza; además comercializa concentrado de cobre, calcina de cobre, molibdeno, plata, barras anódicas, y ácido sulfúrico. El metal rojizo se transa en los mercados internacionales: la Bolsa de Metales de Londres, el Comex de la Bolsa Mercantil de Nueva York y la Bolsa de Metales de Shanghai.

Los ejes de la gestión actual de la compañía se entienden en el momento de reconversión histórico por el que se está pasando, implicando una inversión de US\$ 39.000 millones para el decenio 2018 – 2027, con proyectos que extenderán la vida de la empresa y elevarán su productividad.

Tabla 2: Proyectos de inversión en las fundiciones de Codelco ^[1].

Puesta en marcha	Proyecto	División	Descripción	Inversión Estimada [MMUSD]
2018	Construcción PTE y reducción emisiones de PLG.	El Teniente (Caletones)	Reducción de emisiones para cumplir con DS N°28.	602
2018	Mejoramiento integral, Captación y Proce. de gases.	Salvador (Potrerillos)	Reducción de emisiones para cumplir con DS N°28.	428
2018	Transformación Planta de Ácido.	Chuquicamata	Reducción de emisiones para cumplir con DS N°28.	997

Tabla 3: Proyectos Estructurales de Codelco ^[1].

Puesta en marcha	Proyecto	División	Descripción	Inversión Estimada [MMUSD]
2019	Chuquicamata Subterráneo	Chuquicamata	Transformación de rajo abierto a subterránea, con producción de 140 ktpd de mineral y vida útil de 40 años.	5.550
2021	Rajo Inca	Salvador	Extender vida útil de la mina mediante un rajo de los recursos remanentes del yacimiento Indio Muerto. Se espera tratar 37 ktpd con una vida útil de 40 años.	1.000
2023	Nuevo nivel mina.	El Teniente	Mantener la continuidad operacional, a un nivel de producción de 137.000 tpd.	5.000
2025	Desarrollo Futuro Andina	Andina	Ampliar la capacidad de tratamiento, llegando a procesar 150 ktpd de mineral con una vida útil de 27 años.	2.700
Nd	Radomiro Tomic Fase II	Radomiro Tomic	Producción de 200 ktpd, agregando fases de extracción. Construcción de una nueva concentradora, infraestructura de tratamiento e impulsión de agua de mar desalada.	En revisión

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Principal

Se requiere contribuir en completar el modelo de evaluación económica diseñando los modelos de costos de fundición y de refinación del cobre, con los cuales se medirá la rentabilidad de los proyectos gestionados por la VP, constituyendo así un único estándar de planificación a largo plazo.

1.3.2 Objetivos Secundarios

- a. Estandarizar los parámetros y cálculos de planificación metalúrgica para la estimación de la cartera comercial.
- b. Estandarizar los parámetros y cálculos para la estimación de costos de operación en el proceso de fundición de cobre.
- c. Estandarizar los parámetros y cálculos para la estimación de costos de operación en el proceso de refinación del cobre.

1.4 Alcances

Se requiere generar una herramienta de cálculo focalizada en los procesos de fundición y refinación del cobre, a fin de que los proyectos de inversión sean técnica y económicamente evaluados sujetos a estos estándares. En el análisis, no se considera la posibilidad de construir una planta de metales nobles o una planta recuperadora de metales, por lo que los barros anódicos descubrizados son un flujo de salida del modelo y no se toma en cuenta su procesamiento (se envían a la PRM). Los procesos de fundición y refinación se integrarán al esquema general de evaluación de proyectos de la Vicepresidencia de Proyectos.

Se excluye del estudio a la Fundición y Refinería Ventanas, ya que ésta no está ligada a un yacimiento minero, por lo que sus características y parámetros son distintos a la de las otras tres fundiciones. Igualmente, el proceso de tostación está adjuntado al módulo de la Planta Concentradora y no al de la Fundición, por lo que sus costos no son parte del modelo de fundición.

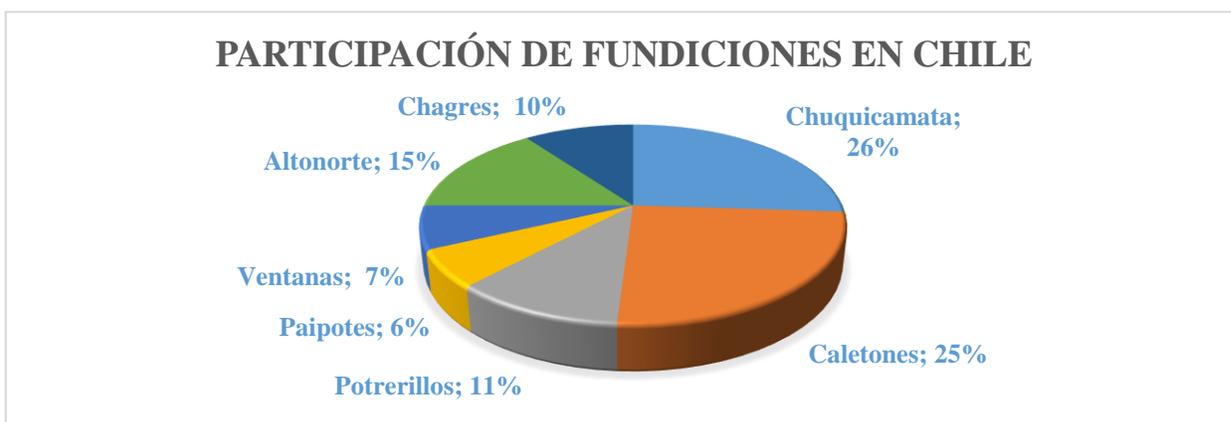


Ilustración 3: Participación de las fundiciones de Codelco en Chile, año 2015 ^[3].

1.5 Metodología

Se cuenta con planillas de datos técnico – económicos históricos de las fundiciones y refinación de la División Salvador (Potrerillos), El Teniente (Caletones) y Chuquicamata.

Información normativa:

- Estructura de Informes de Gestión Operacional de Codelco: Se utilizan datos reales contenidos en estos informes para comparar y validar los resultados parciales obtenidos, por lo que son el benchmarking principal.
- Estructura de Orientaciones Comerciales Venta de Cobre y Subproductos: En este informe se detallan las proyecciones de precios de cobre y de la equivalencia entre dólar norteamericano y peso chileno, utilizadas para la actualización de los gastos.
- Estructura de Normas para la presentación de Antecedentes API – Cochilco – MDS: Este informe detalla genéricamente el cómo presentar a los ministerios los API y, en particular,

resalta la necesidad de corregir monetariamente los gastos calculados, según el IPC, IPM y el tipo de cambio entre dólar norteamericano y peso chileno publicados por MDS – Cochilco y los planificados por Codelco.

- Estructura de SGP – GASP – EV – INS – 001 (Instructivo para la Estimación de Costos Operacionales): Presenta la base técnica para elaborar los modelos OPEX, es decir, incluye definición de procesos operativos, operaciones unitarias, gastos directos, elementos de gasto, insumos, corrección monetaria y la base de cálculo (algoritmos) de los gastos en base a precios, tarifas, Insumo/Productos y planificaciones minero – metalúrgicas.
- Guía para la Trazabilidad de Costos – GCEI 2010: Detalla los insumos más relevantes para el proceso, por operación unitaria, y que deben estar contenidos en el modelo final independientemente si son o no un gasto relevante para la planta en cuestión.
- Alcance según SIC – P – 005 (Base de Estimación de Costos de Capital y Operación): Especifica el nivel de detalle requerido según la etapa del proyecto y, en particular, describe el nivel de precisión de la estimación de los gastos necesario para la factibilidad de proyectos.

Ejemplo de los estándares ya desarrollados a la fecha (minería a rajo abierto, minería subterránea, planta hidrometalúrgica y planta concentradora, inversiones e ingresos), los que incluyen flujos de caja, datos de faena, cargos y penalidades, estimaciones de precio del cobre, impurezas, balances y planificaciones, necesidades de inversión, costos operativos, entre otros.

2 ANTECEDENTES: PROCESOS DEL COBRE

Cuando las especies mineralógicas de interés se concentran en una zona de la corteza terrestre y se ha probado su viabilidad de extracción se conforma un yacimiento mineral, que intrínsecamente tiene asociado mineral de ganga, especies sin valor económico que deben ser selectivamente separadas del proceso minero mediante una serie de operaciones unitarias. Luego de extraer la roca fracturada desde la mina, se envía a la etapa de conminución, donde el objetivo principal es disminuir el tamaño del material mediante procesos de chancado y/o molienda, para lograr tamaños de órdenes de magnitud de micrones (producto de molienda para flotar) o de milímetros (producto de chancado para lixiviar). El mineral oxidado proveniente del chancado se lixivía y se manda al proceso de extracción por solvente, para luego ser enviado a electro – obtención, para producir un cátodo comercial. Por otro lado, los minerales sulfurados proveniente de la molienda se envían a flotación, donde se obtiene un concentrado mineral con alrededor de 25 – 32% de Cu contenido junto a otros subproductos (Mo, Re, Au, Ag, Platinos, entre otros), el que se comercializa o se procesa en las fundiciones para producir ánodos mediante reacciones químicas controladas en hornos de gran tamaño y a alta temperatura (800 – 1.300°C), los que luego se procesan en las electrorrefinerías para generar cátodos comerciales mediante reacciones rédox inducidas por el paso de una corriente eléctrica en fase acuosa.

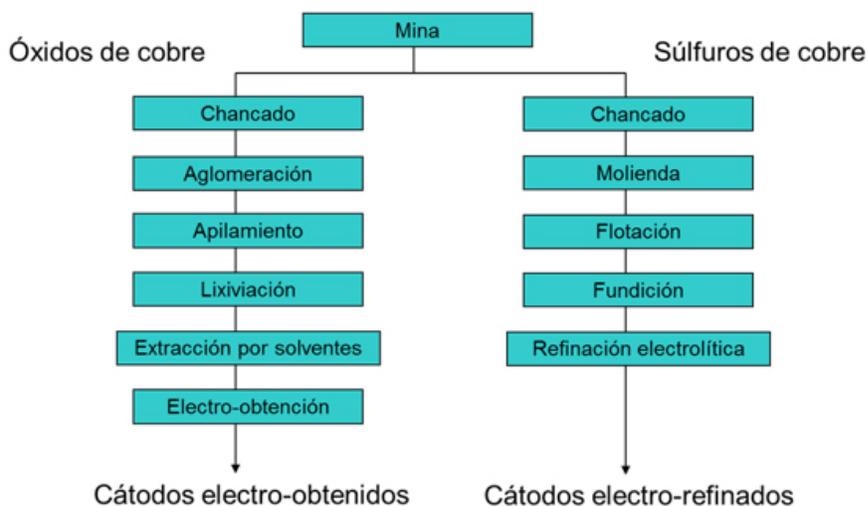


Ilustración 4: Diagrama de flujos del procesamiento de minerales de cobre.

Tabla 4: Composición química en peso de concentrados de Codelco ^[3].

Elemento	Salvador [%]	Chuquicamata Rajo [%]	RT (Fase I) [%]	MH (calcina) [%]	El Teniente [%]
Cu	30,48	32,90	32,43	37,63	27,61
Fe	20,15	22,42	23,72	25,19	26,42
S	33,11	33,45	34,56	22,81	33,78
As	0,40	0,44	0,11	0,24	0,12
Sb	0,04	0,03	0,01	0,12	0,15
Zn	0,21	1,43	0,45	-	0,20
Pb	0,01	0,11	0,01	-	-
Bi	0,01	0,01	0,002	-	-
Mo	0,17	0,77	0,59	-	0,06
Se	0,01	-	-	-	-
Ni	0,01	0,01	-	-	-
O	-	0,08	-	1,96	0,06
Au [ppm]	1,80	0,50	0,40	1,10	0,40
Ag [ppm]	43,40	110,00	145,00	520,00	40,00
Ganga	15,40	8,35	8,11	12,01	11,60

Si se observa la composición química de los concentrados, se puede notar que estos poseen cantidades relevantes de impurezas (S, As, Sb, Zn, Pb, Bi, Ni, O), que deben ser separadas del metal de interés, y de subproductos (Se, Mo, Au y Ag), que pueden ser aprovechados para aumentar la rentabilidad del negocio, como es el caso del concentrado selectivo de molibdeno y del barro anódico. Se destaca la alta cantidad de plata en la División MH, junto con la menor cantidad de azufre y arsénico presentes en la calcina, debido a la tostación.

2.1 PROCESOS DE LA FUNDICIÓN DE COBRE

La pirometalurgia es el estudio de los procesos fenomenológicos y fisicoquímicos que ocurren a una alta temperatura y que buscan la obtención o el refinado de una especie metálica (en este caso cobre) a partir de una o varias especies minerales. Es el método de extracción más antiguo e importante en la historia de la humanidad, y está enfocado principalmente a minerales sulfurados (calcopirita, pirita, covelina, calcosina, bornita, digenita, entre otros).

Las características generales de la pirometalurgia de minerales son básicamente ^[3]:

- Alta tasa de reacción: altas velocidades de reacción sujetas a altas temperaturas, de entre 800°C y 1.300°C, aproximadamente. El control del equilibrio químico se basa en la temperatura. Cinética controlada por transferencia de masa (difusión y convección).
- Reacciones exotérmicas (procesos auto o semi – autógenos): la mayoría de las materias primas de los metales no ferrosos son los sulfuros metálicos (CuFeS₂, PbS, ZnS, FeS₂, entre muchos otros), que al oxidarlos en los hornos emiten calor, lo que colabora a disminuir el requerimiento energético de hidrocarburos.
- Inmiscibilidad de las fases, lo que implica bajo costo para separarlas, ya que se produce naturalmente.
- Recuperación de metales preciosos: inherentemente en los sistemas de alta temperatura existe una solubilidad preferencial de los metales preciosos en los metales bases (Cu, Pb, Ni) comparada con la solubilidad en mata o escoria. Esta solubilidad preferencial no tiene comparación alguna con los procesos hidrometalúrgicos.
- Subproductos gaseosos: gases de combustión, gases de descarte con polvo, humo y elementos tóxicos.
- Estabilidad de fases de escoria, mata, *scraps* y otros: estos desechos sólidos poseen una composición muy similar a las rocas naturales y relativamente resistentes a la lixiviación provocada por el medioambiente.

Los hornos de la fundición suelen tener un revestimiento interior compuesto de ladrillo refractario, formado por Cr₂O₃·MgO, encargados de proteger la cubierta del horno al poder resistir, sin deformación o dilatación, las altas temperaturas de operación de estos equipos. Para el caso del cobre, el proceso general se esquematiza en la siguiente figura, donde se ingresa el concentrado más fundente (usualmente sílice, SiO₂, que ayuda a mantener la inmiscibilidad de las fases y, además, reacciona con los óxidos para mantener una escoria fluida) e hidrocarburos según el balance de calor, que depende fuertemente de la composición mineralógica y la cantidad de oxígeno en el aire enriquecido suministrado. En algunos casos también se recirculan polvos metalúrgicos recolectados desde los gases de salida.

En general, la composición de las fases generadas dentro de los hornos es la siguiente ^[3]:

1. **Escoria:** FeO y SiO₂ (escoria fayalítica), Fe₃O₄, Al₂O₃, CaO, MgO, Cu₂O.
2. **Mata o Eje:** Cu₂S, FeS, Fe₃O₄.
3. **Gases:** O₂, SO₂, N₂, CO, CO₂, H₂O y polvos metalúrgicos.

Concentrado + Fundentes + Energía + Aire Enriquecido → Mata + Escoria + Gas

Ecuación 1: Química global de la fusión de concentrados.

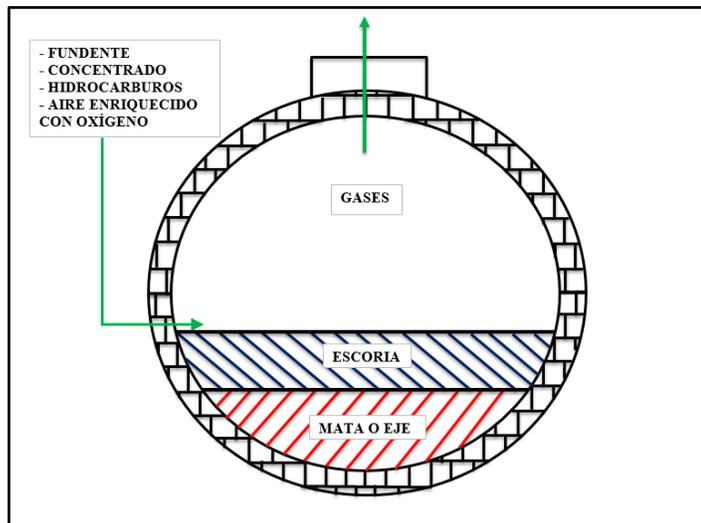


Ilustración 5: Esquema representativo de la fusión de concentrado de cobre.

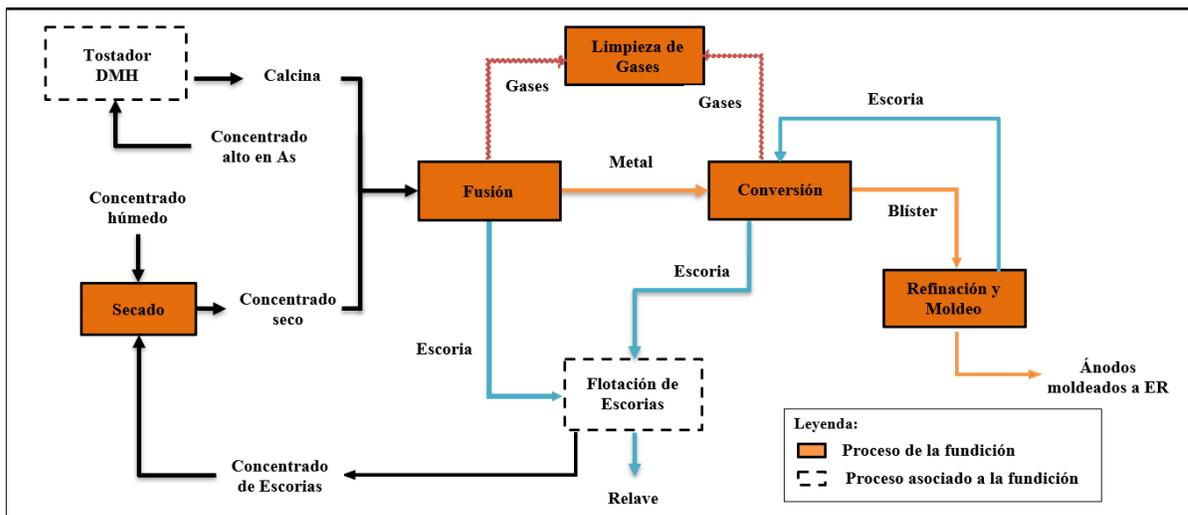


Ilustración 6: Flowsheet estándar de las fundiciones de cobre de Codelco (excepto Ventanas).

2.1.1 Secado/Tostación [3]

2.1.1.1 Secado

El secado de concentrado no es una operación unitaria pirometalúrgica propiamente tal, ya que no busca la transformación química del concentrado, sino que persigue la des – humidificación de éste mediante evaporación, ya sea parcial (contenido en peso de agua del 7 – 10% [4]) o total (humedad del 0,1 – 0,3%), también llamada secado a muerte.

Las razones principales que justifican el uso de los secadores de concentrado son la reducción de costos en transporte y las mejoras operacionales, como el carguío del mineral seco en las tolvas y la mejora en el balance térmico en los hornos de fusión y conversión. La elección del secador depende en gran medida de las características del concentrado a secar (características en húmedo

y en seco, toxicidad, inflamabilidad, tamaño de partícula, abrasividad, densidad, temperatura deseada) y del procesamiento previo y posterior.

2.1.1.2 Tostación

La tostación es una etapa metalúrgica opcional que ha tomado fuerza en el último tiempo debido al uso de la tecnología de lecho fluidizado, que permite aumentar la capacidad de fusión y acondicionar eficientemente la carga en las etapas posteriores del proceso.

Se basa en el calentamiento de un mineral o concentrado hasta una temperatura y condiciones tales que, sin producir la fusión de los constituyentes, provoca una transformación química de los componentes en línea con los tratamientos posteriores. La tostación oxidante se utiliza para remover el azufre y el arsénico ligado a los minerales sulfurados y reemplazarlos total o parcialmente por oxígeno, lo que conlleva la emisión de SO_2 y As, el que es abatido y estabilizado. El producto de esta etapa es la **calcina** y, para efectos de la investigación, es un *input* de la fundición, ya que este proceso no se considera como una operación unitaria de la Gerencia de Fundición, sino que como una operación opcional de la Gerencia de la Planta Concentradora.

2.1.2 Fusión

El objetivo del proceso es concentrar el cobre (metal de interés) formando un fluido de sulfuros, llamado mata o eje (con ley de Cu de 62 – 75%), que debe contener la mayor cantidad de cobre posible, y otra fase líquida oxidada denominada escoria, con la menor cantidad de cobre posible.

La fusión del concentrado ocurre en órdenes de temperatura de 1.200 – 1.300°C, ya sea por calentamiento directo, en suspensión en una torre de reacción o por inyección en un baño líquido. Una vez inyectado el concentrado seco, se le adiciona sílice y aire enriquecido con oxígeno (alrededor de un 33 – 36% de O_2 ^[4]), los que reaccionan con los sulfuros metálicos en reacciones exotérmicas y generan mata, escoria y un flujo de gases de descarte.

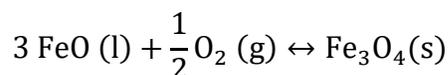
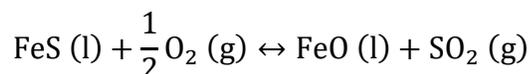
Para el caso de la formación de la mata, la fusión del concentrado forma una solución pseudo ideal conformada principalmente por FeS y Cu_2S , con pequeñas cantidades de otros sulfuros como Ni_3S_2 , PbS, ZnS y Co_3S_2 y una cierta cantidad de oxígeno (hasta 3%) en magnetita. También contiene metales preciosos e impurezas como As y Sb.

Para el caso de la escoria, a medida que el porcentaje de fundente sube, se incrementa el grado de separación de las fases, hasta contenidos de sílice de 30 – 40% ^[3], de tal manera de formar escoria fayalítica, la que se genera a concentraciones menores a 15% de magnetita y entre 70 – 80% de FeO ^[3]. La presencia de magnetita en los hornos debe estar controlada ya que, por un lado, tiende a acumularse en el piso del reactor (dada su alta densidad), formar una fase separada que reduce la eficiencia volumétrica del horno y generar pérdidas de cobre por atrapamiento mecánico (cobre capturado en moléculas de magnetita) aunque, por otro lado, suele formar compuestos con el refractario, lo que protege al ladrillo del excesivo desgaste.

2.1.3 Conversión

La conversión tiene por objetivo eliminar el hierro, el azufre y otras impurezas desde la mata proveniente de fusión mediante oxidación, para producir cobre metálico “blíster” de 98,5 – 99,5% de cobre. Se realiza en dos etapas física y químicamente distintas que involucran el soplado de aire a la fase de sulfuro fundido.

1. **Soplado a eje:** Esta etapa termina cuando la mata contiene menos de 1% de Fe y se ha formado escoria fayalítica con 10 – 20% de magnetita sólida y hasta 15% de Cu disuelto y atrapado ^[3].



Ecuación 2: Reacciones químicas que involucran el soplado a mata o eje ^[3].

2. **Soplado a cobre:** El proceso se efectúa hasta que aparezcan las primeras trazas de Cu₂O. El cobre blíster contiene alrededor de 0,02% de azufre y 0,5% de oxígeno ^[3].



Ecuación 3: Reacción principal involucrada en el soplado a cobre ^[3].

2.1.4 Refino y Moldeo

El cobre blíster proveniente de los convertidores contiene alrededor de 0,02% de azufre y 0,5% de oxígeno disueltos y, a pesar del bajo porcentaje, estos elementos reaccionarían durante el moldeo y formarían ampollas de SO₂ sobre y dentro del metal, afectando la calidad de los ánodos ^[3].

Por lo tanto, el objetivo de la refinación es generar un producto con calidad química y física bajo estándares establecidos, ya sea para la refinación electrolítica o para la directa comercialización.

Tabla 5: Especificaciones químicas de cobre anódico ^[3].

Normas refinería	Rango [ppm]	Normas refinería	Rango [ppm]
O	1.200 – 1.800	As	800 – 1.500
S	12 – 30	As/Sb	> 2,5

Las etapas específicas del refino son: carguío del blíster, refinación por oxidación, vaciado de escoria y reducción, para luego pasar al moldeo de ánodos.

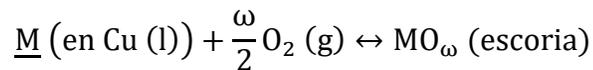
2.1.4.1 Oxidación

Utilizada para remover el azufre y otras especies metálicas desde un baño fundido. Para el caso del azufre disuelto (simbolizado como \underline{S}), su remoción se suscribe a la siguiente reacción:



Ecuación 4: Remoción de azufre disuelto presente en el cobre blíster ^[3].

Por otro lado, la eliminación de otras impurezas metálicas sigue la siguiente reacción global:



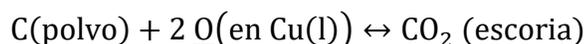
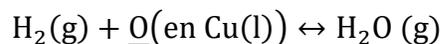
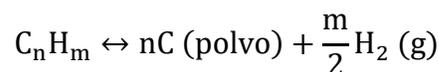
Ecuación 5: Reacción química de eliminación de impurezas del cobre mediante oxidación ^[3].

Según cada metal, el equilibrio de la ecuación anterior varía y, en consecuencia, elementos como el Fe, Zn, Na, Cr, Mn, Si, Ti, Al, Ba, Mg, Be y Ca son fácilmente eliminados en la escoria, el Bi, Cu, Pb, Ni, Cd, Sb, As, Co, Ge, Sn e In requieren la inyección mediante toberas de alguna clase de fundente (soda, caliza, sílice, fosfato, entre otros) para su eliminación parcial y, en cambio, existen otros elementos que son prácticamente imposibles de eliminar mediante oxidación, como el Au, Hg, Ag, Pt, Pd, Se y Te, los que usualmente reaparecen formando el barro anódico.

Se recomienda que la cantidad de oxígeno esté entre el 0,7 y 1% ^[5], para evitar saturar el Cu con Cu₂O, ya que esta especie genera problemas en los tanques de ER. Además, el exceso de oxígeno provoca la pasivación del ánodo, impidiendo la reacción química que se busca en la celda.

2.1.4.2 Reducción

Al término de la etapa de oxidación el contenido de azufre en el obre fluctúa entre 15 a 30 ppm, mientras que para el oxígeno depende de si requiere o no adicionar fundente: si se agrega, el contenido oscila entre 8.500 y 10.000 ppm, y si no se agrega varía entre 7.500 y 8.500 ppm ^[3]. Luego, se hace necesaria esta etapa para eliminar el oxígeno según requerimientos del moldeo, donde se requiere el uso de hidrocarburos como reductores.



Ecuación 6: Formación de negros de humo y reacciones de reducción ^[3].

Tabla 6: Reductores en refinación ^[3].

Estado	Reductor	Eficiencia [%]
Sólido	Madera	20
	Carbón mineral, Coque	70
	Negros de humo	45
Líquido	Petróleo Bunker C. (ENAP 6) o Petróleo diésel + vapor/aire	52
	Kerosene + vapor/aire	50
Gas	LPG	75
	NH ₃ , Gas Natural	85
	CO/H ₂	95

2.1.4.3 Moldeo de ánodos

El proceso de moldeo comienza con el sangrado de cobre anódico desde los Hornos de Ánodos a través de canaletas y cucharas, para luego ser vaciados en los moldes de la rueda rotatoria. El cobre líquido fluye a una temperatura de 1.150 – 1.200 °C, donde el molde mismo absorbe gran cantidad de calor lo que, sumado a duchas de agua fría, retira el calor restante necesario para solidificar la placa anódica. La evaporación intensiva de gases hace necesaria la presencia de campanas para su extracción. En el lado opuesto de la rueda de moldeo, la placa de cobre es levantada y removida del molde a una temperatura de 700 – 800 °C e inmersa en un estanque de agua, donde es enfriada hasta una temperatura de 70 °C. Sobre el molde se agrega una delgada película de pintura de ceniza de hueso, barita, negros de humo o lavaza de sílice para prevenir la sinterización y pegado del ánodo moldeado al molde, los que están hechos de cobre, con una vida útil de 1.000 – 1.500 toneladas de ánodos vaciados. El peso de los ánodos dependerá de la fundición y varía entre 220 – 400 kg ^[3].

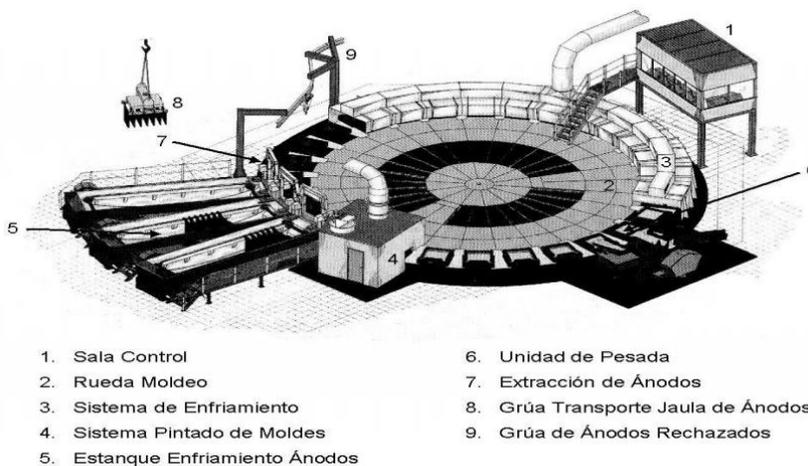


Ilustración 7: Esquema general de rueda de moldeo ^[3].

La velocidad de moldeo y el porcentaje de ánodos rechazados son dos factores que permiten evaluar la eficiencia de la operación del moldeo. El moldeo de ánodos normalmente oscila entre las 50 a 70 tph de cobre anódico.

La eficiencia de la ER depende en gran medida de la calidad química y física de los ánodos.

Tabla 7: Calidad química de los ánodos ^[3].

Elemento	Rango	Elemento	Rango
Cu + Ag + Au	> 99%	Sb	< 350 ppm
O	< 1.850 ppm	Fe	< 10 ppm
S	< 30 ppm	Ni	< 100 ppm
As	< 2.000 ppm	Se	< 200 ppm

Para cumplir los requerimientos de la calidad física, la operación debe ser controlada para producir ánodos con superficies suaves, peso y espesor uniformes, y mínimos efectos de cantos o bordes (la cantidad esperada de ánodos rechazados no debe ser mayor al 1%).

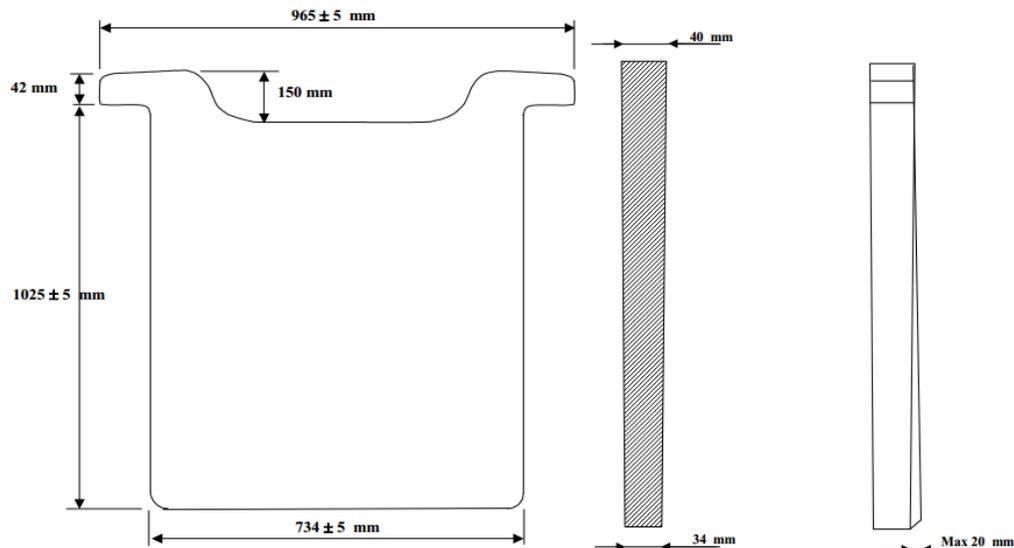


Ilustración 8: Holguras en las dimensiones de un ánodo de cobre estándar ^[3].

2.1.5 Limpieza de escorias

Las mayores pérdidas de cobre en las escorias se producen en las escorias de descarte, en las que el cobre se encuentra fundamentalmente en dos formas: inclusiones de mata y cobre atrapado mecánicamente debido a la alta presencia de magnetita y como cobre disuelto ^[3].

Tabla 8: Composición general de escorias fayalíticas de fusión y conversión de cobre [3].

Contenido [%]	Convertidor Teniente	Horno Flash	Convertidor Peirce – Smith
Cu	6 – 10	2 – 3	8 – 12
Fe	27 – 45	42 – 44	48 – 52
Fe ₃ O ₄	15 – 18	12 – 14	8 – 22
SiO ₂	24 – 33	28 – 30	23 – 26

Existen distintas formas para limpiar la escoria y lograr obtener una alta recuperación de cobre (la escoria de descarte no debiera contener más allá de 0,5 – 0,7% de Cu) [3]:

- 1. Mineralúrgico:** Enfriamiento – chancado – molienda – flotación.
- 2. Hidrometalúrgico:** Enfriamiento – chancado – molienda – lixiviación – extracción.
- 3. Pirometalúrgico:** Reducción – sedimentación.

En la actualidad, y debido a la implementación del Decreto Supremo N°28, las fundiciones Chuquicamata, Potrerillos y Caletones no utilizarán más el procesamiento pirometalúrgico de las escorias (el que se realizaba mediante Hornos de Limpieza de Escorias y/o Hornos Eléctricos de Limpieza de Escoria), sino que optarán por el procesamiento mineralúrgico, de tal manera de evitar las emisiones de elementos contaminantes los que, de esta manera, quedan atrapados en los relaves generados [6].

El enfriamiento puede ser de tres tipos: en olla, en piso (fosos) o en pozo, para lo que se utiliza agua como medio de enfriamiento, lo que genera vapor y evita que cualquier otro elemento presente en el agua (que generalmente es recirculada desde otros procesos) se emita al ambiente, ya que estos quedan ocluidos en la matriz vítrea que forma la escoria al enfriarse [7]. Luego de la solidificación de la escoria, ésta se chanca mediante equipos Bulldozer, tractores, chancadores o martillos picadores, para luego pasar a un circuito de molienda y flotación estándar.

2.1.6 Tratamiento de gases

Debido a la composición misma de los concentrados, que son agregados de múltiples sulfuros, se genera SO₂ gaseoso en la mayoría de los procesos (particularmente en la fusión y la conversión), el que es perjudicial para la salud de las personas y para todo el medioambiente en general. En los últimos años se ha endurecido el reglamento de la captura de los gases de salida, tal como lo dicta el DS N°28, el que exige una captura mínima de As y S de 95%, y que entrará en vigor para las fundiciones de Codelco el año 2019 [6].

Los gases de salida se recolectan mediante grandes campanas y, previo enfriamiento mediante el uso de aire de dilución y paneles de enfriamiento, se envían a la Planta de Limpieza (Tratamiento) de Gases. Los procesos que se suscitan en ésta se pueden separar en tres operaciones globales que

permiten obtener así ácido sulfúrico comercial de alta pureza: separación de los polvos metalúrgicos del gas, envío del gas a la Planta de Ácido y el tratamiento de los efluentes generados.

Tabla 9: Características de los gases provenientes de los equipos en fundiciones de cobre ^[3].

Equipo	Flujo gas $\left[\frac{\text{KNm}^3}{\text{h}}\right]$	Temp. [°C]	SO ₂ [%]	Carga polvo $\left[\frac{\text{g}}{\text{Nm}^3}\right]$	Tipo proceso
CT	50 – 135	600 – 900	12 – 20	10 – 20	Continuo
HF Outokumpu	20 – 60	1.200 – 1.400	35 – 80	95 – 250	Continuo
Peirce – Smith	40 – 90	550 – 700	4 – 8	-	Batch
Horno de Ánodos	5 – 10	1.100 – 1.200	< 0,1	-	Batch

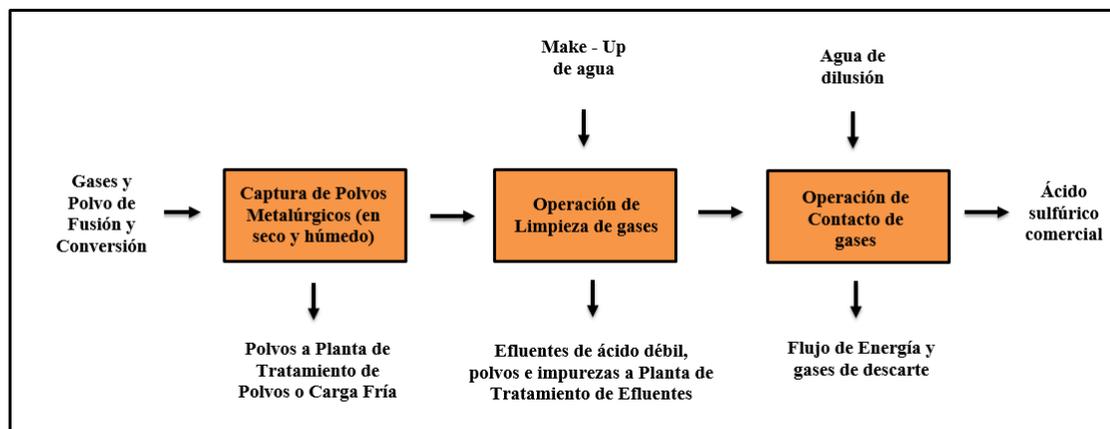


Ilustración 9: Etapas del tratamiento de gases ^[3].

2.1.6.1 Separación de polvos metalúrgicos y su tratamiento

Mediante el sistema de manejo de gases se recolecta el gas y los polvos metalúrgicos arrastrados desde la fundición y se envían a cámaras de enfriamiento radiativo o evaporativo las que, mediante la disminución de la temperatura hasta valores aproximados de 350°C, permiten la eliminación de la fracción gruesa de los polvos. La fracción restante de gas se envía a un precipitador electrostático, el que se encarga de capturar la fracción más fina de los polvos, con lo que queda gas prácticamente sin polvos y fundamentalmente compuestos de SO₂ y As, a una temperatura cercana de 60°C ^[8].

En general, la mayoría de los polvos son óxidos de cobre – hierro, junto con un amplio rango de impurezas volátiles. Este polvo se oxida (se produce FeO y CuFeS₂) y sulfata (se produce CuSO₄ y Fe₂(SO₄)₃) en presencia de oxígeno y de SO₂ mediante reacciones que se espera que ocurran, ya que los polvos no reactivos ocasionan problemas operacionales por su adherencia y reacción en las paredes y tubos de las calderas ^[3].

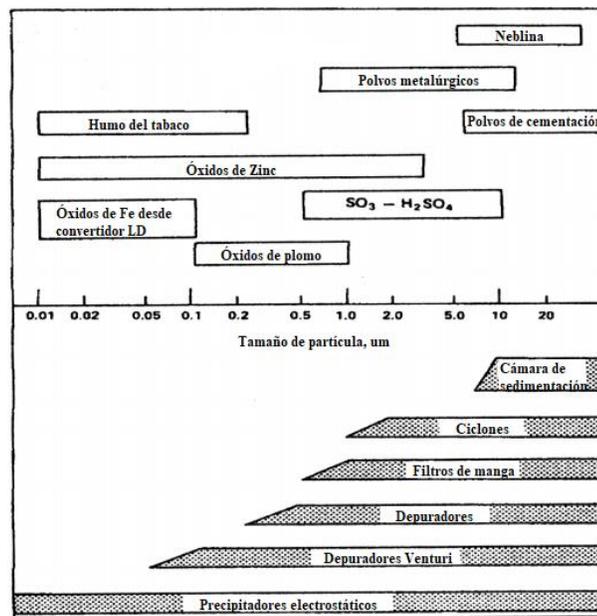


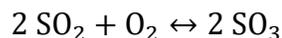
Ilustración 10: Rango de tamaños de partícula de varios procesos y rangos de trabajo de equipos de limpieza de gases [3].

Una vez separados los polvos, se pueden reintegrar a la planta de fundición como carga fría (usualmente con la fracción gruesa de los polvos, la que se reintegra a los hornos junto con rechazos y fondos de olla) [9] o enviarse a una Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición (PTPF) en la que, mediante métodos hidrometalúrgicos, se produce una solución rica en cobre (PLS), que es enviada a la Planta de Abatimiento de Arsénico y Antimonio (PAAA) en donde, mediante oxidación, se concentran y separan los elementos tóxicos como el arsénico, antimonio y bismuto (entre otros), los que son abatidos y dispuestos en vertederos establecidos legalmente, mientras que el PLS purificado es retornado a la división para producir cátodos.

2.1.6.2 Producción de ácido sulfúrico comercial

Los gases purificados se envían a una Planta de Ácido sulfúrico para producir ácido comercial. El procedimiento consta de dos etapas:

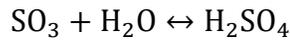
1. **Conversión de SO₂ a SO₃:** Se utiliza un catalizador, pentóxido de vanadio V₂O₅, y se aumenta la temperatura del gas desde los 425 °C a los 625 °C. Luego, ocurre la oxidación del anhídrido sulfuroso, con una tasa de conversión mayor al 97% [3].



Ecuación 7: Reacción de oxidación del SO₂.

2. **Absorción:** el SO₃ se absorbe en una solución de ácido sulfúrico al 98% según la reacción de éste con el agua, la que circula constantemente por la torre de absorción. La temperatura

del proceso varía entre los 260 y 300 °C. Los gases de descarte cuentan con 0,16% de SO₂ (contacto simple) y 0,05% cuando es de doble contacto [3].



Ecuación 8: Formación de ácido sulfúrico.

2.1.6.3 Tratamiento de efluentes

El lavado del gas genera un efluente de ácido débil con alrededor de 8 – 15% de H₂SO₄ [8], el que se trata en una Planta de Tratamiento de Efluentes o Planta de Tratamiento de Arsénico, debido a la alta concentración de As en estos flujos. En esta planta se busca producir un residuo arsenical sólido estable, el que se dispone en lugares autorizados por la autoridad competente. Esta planta consta de las siguientes etapas:

- 1. Neutralización y Precipitación:** Mediante la adición de lechada de cal (Ca(OH)₂) se neutraliza el efluente ácido, dando lugar a cristales de yeso (sulfato de calcio), los que sirven como matriz encapsuladora para el arsenito y arseniato de calcio. El pH se aumenta desde 3 hasta aproximadamente 11,5, con más lechada de cal, para promover la precipitación de gran parte de los iones metálicos de arsénico, los que se envían a un espesador desde donde se obtienen dos corrientes: una sólida con el precipitado de arsénico, metales y sulfato, y otra líquida con un efluente neutro con As disuelto [8].

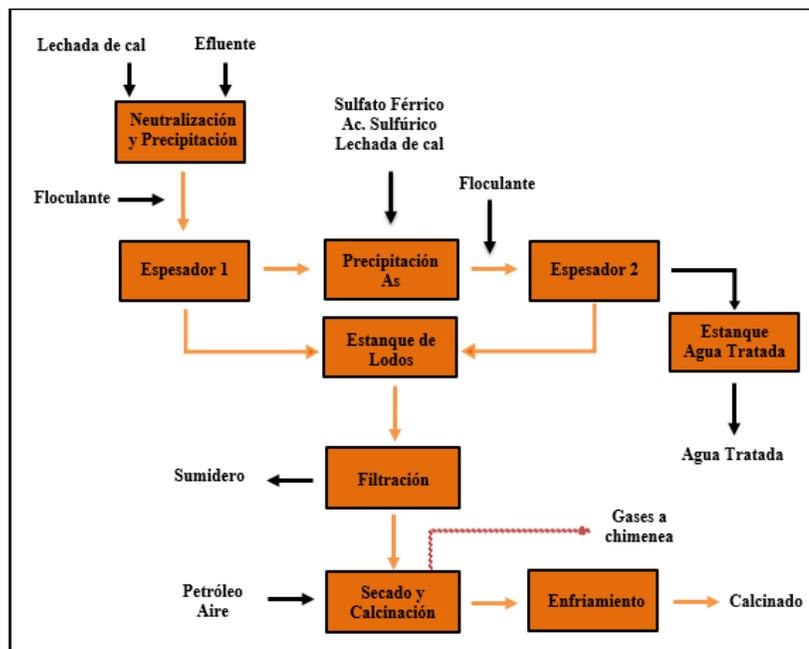
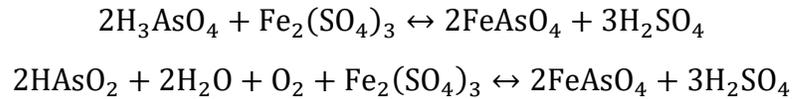


Ilustración 11: Flowsheet del tratamiento de efluentes [8].

- 2. Precipitación final de arsénico:** La solución con arsénico disuelto se pone en contacto con sulfato férrico de tal manera de que el As remanente precipite, formando un arseniato férrico, la forma más estable de este elemento. Este proceso genera un efluente neutralizado con baja cantidad de arsénico, menor a 1 ppm ^[8].



Ecuación 9: Formación de arseniato férrico insoluble a partir de arseniato y arsenito, respectivamente ^[8].

- 3. Secado y Calcinación:** El flujo de sólido se bombea hacia un estanque receptor de borras (Estanque de Lodos), el que pasa por una etapa de filtrado de sólido, mientras que la parte líquida fluye hacia un estanque de filtrado. La torta de sólidos con alrededor de 40% de humedad es transportada a la etapa de secado y calcinación, donde se obtiene el producto final: arseniato de calcio encapsulado en una matriz de sulfato de calcio ($\text{Ca}_2(\text{AsO}_4)_2 \cdot \text{CaSO}_4$), con contenido de no más de 5 ppm de As y una humedad del 0,2%. Este producto es enfriado y almacenado en un silo para su posterior embolsado y disposición en sitios establecidos ^[8].

2.1.7 Producción de aire enriquecido con oxígeno

La fusión y la conversión requieren la inyección de aire enriquecido con oxígeno, es decir, aire con más de 21% en peso de este elemento, que es la cantidad promedio natural del aire. Los procesos para obtener aire con mayor contenido de O_2 no son un proceso pirometalúrgico propiamente tal, sin embargo, son necesarios para generar las reacciones químicas requeridas con un cierto nivel de eficiencia, lo que justifica que todas las fundiciones cuenten con una o más Plantas de Oxígeno.

El proceso consta de las siguientes etapas sucesivas:

- 1. Filtración:** Se busca eliminar los polvos de hasta $0,3 \mu\text{m}$ e impurezas del aire captado desde el exterior, como el SO_2 ^[10].
- 2. Compresión:** Busca comprimir el aire desde 0,8 Bar iniciales hasta aproximadamente 5 – 6 Bar. Se completa el esquema con un enfriador para compensar el alza de temperatura dado al aumento de la presión ^[10].
- 3. Adsorción o Purificación:** Se adsorben principalmente CO_2 , agua, hidrocarburos y otras impurezas gaseosas, mediante el paso del gas por sendos tamices.
- 4. Enfriamiento:** El aire purificado es enfriado en un intercambiador de calor principal, donde el balance de frío se logra gracias a la expansión del nitrógeno inyectado ^[11].

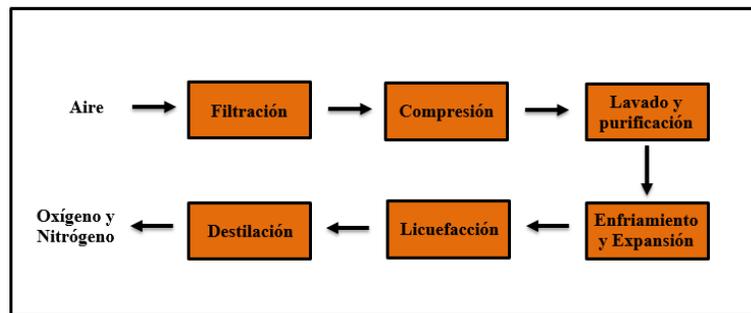


Ilustración 12: Diagrama del proceso de separación de aire ^[11].

5. Licuefacción y destilación: Es el corazón de la Planta de Oxígeno, ya que en esta etapa se produce el enriquecimiento del aire mediante un proceso de destilación fraccionada en columnas ^[11]. En éste, se combinan sucesivas vaporizaciones y condensaciones parciales de flujos en contracorriente en las fases líquida (oxígeno) y gas (nitrógeno), lo que requiere disminuir enormemente las temperaturas (lo que se logra con un intercambiador de calor) hasta lograr la condensación del aire, ya que la separación se realiza en la fase líquida (el punto de ebullición del oxígeno es de -183°C y el del nitrógeno es $-195,8^{\circ}\text{C}$). El resultado final es la producción de oxígeno y nitrógeno líquido, donde el primero es calentado y diluido para producir aire enriquecido, el que es inyectado en los hornos de fusión y conversión, mientras que el segundo se utiliza en esta misma planta, como enfriador y aislante, en los secadores de lecho fluidizado (soplado) y también en la fundición.

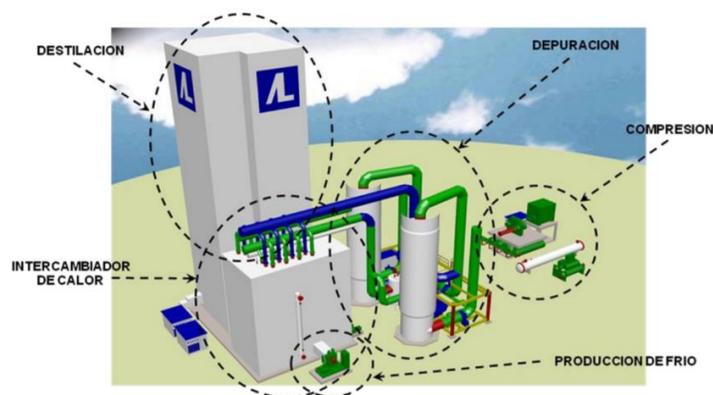


Ilustración 13: Planta de oxígeno estándar ^[10].

2.2 Descripción de equipos utilizados por las fundiciones de Codelco (excepto Ventanas)

2.2.1 Secado

2.2.1.1 Secadores rotatorios ^[3]

Son estructuras cilíndricas ligeramente inclinadas y sostenidas por dos anillos de rodadura. Se utilizan generalmente para procesar altos tonelajes, debido a su capacidad de manejar concentrados

de alta variación en composición y tamaño. La razón entre el largo y el diámetro de las caras basales del secador varían de 4 – 10 m, con un volumen de llenado de 10 – 15%.

- a. A **calor directo**: Aplicables a materiales granulares no susceptibles ni al calor ni a los gases propios de la combustión. Actualmente solo lo utiliza la Fundición Ventanas.
- b. A **calor indirecto o de vapor**: Al contrario del caso anterior, este método es aplicable para materiales sensibles al calor y que son afectados por el contacto con los gases de combustión. La diferencia radica en que el mineral entra en contacto solo con la superficie caliente del cilindro, la que es calentada externamente con vapor o gases de combustión. La transferencia de calor se realiza principalmente por conducción. Utilizado por la Fundición Chuquicamata.

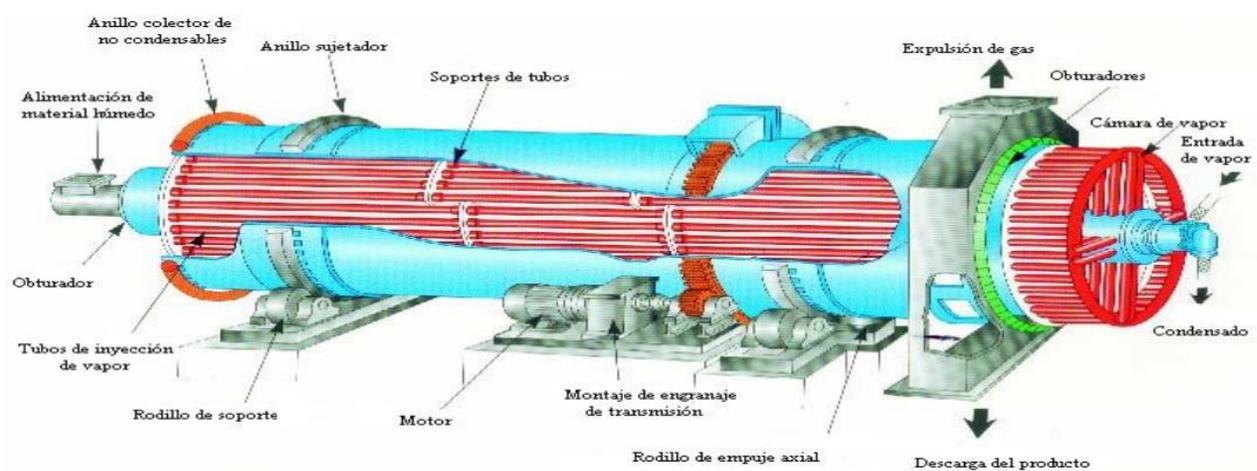


Ilustración 14: Secador rotatorio de calor indirecto o de vapor ^[3].

2.2.1.2 Secador de lecho fluidizado ^[3]

Fluidizar implica transformar un lecho de partículas sólidas en una masa suspendida y expandida que comparte muchas de las propiedades de los líquidos. Las velocidades ascendentes del aire varían entre 0,15 a 6 m/s, mientras que la altura del equipo oscila entre 0,3 m y 15 m.

El aire de fluidización es generado por la mezcla entre aire fresco con gases de combustión (el combustible para el secador es el gas natural, que se quema con el aire de combustión introducido por el ventilador correspondiente), con el objetivo de transferir calor al concentrado a través de la fluidización de un lecho compuesto por gravilla (material de 0,25 – 0,5 pulgadas redondeado). Una vez extraído el concentrado seco, éste se transporta neumáticamente o a través de vasos presurizados a los buzones de almacenamiento.

Es utilizado por la Fundición Potrerillos y la Fundición Caletones.

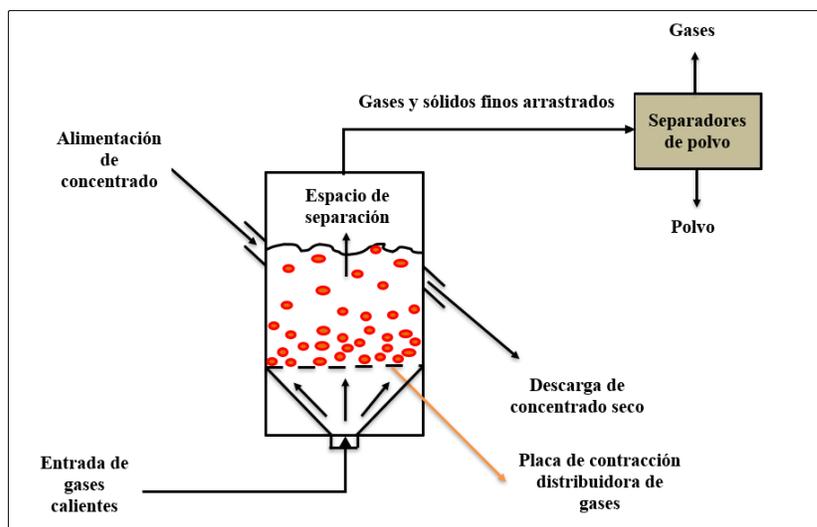


Ilustración 15: Esquema representativo del funcionamiento de un secador de lecho fluidizado.

Tabla 10: Ventajas y desventajas de los tipos de secadores utilizados [3].

	Calor Indirecto o a Vapor	Lecho fluidizado
Ventajas	<p>Menor volumen de gases generados.</p> <p>Menor posibilidad de combustionar el azufre, debido a la menor temperatura.</p> <p>Nivel de mantención reducido.</p> <p>Costo operacional menos significativo al existir vapor.</p>	<p>Menor requerimiento de espacio físico.</p> <p>Menor consumo de combustible que el secador de calor directo.</p> <p>Ningún equipo en movimiento.</p> <p>Buena agitación y mezclado del lecho, lo que permite mantener la temperatura.</p>
Desventajas	<p>Mayor corrosión de acero inoxidable en el primer tercio del tubo.</p> <p>Personal de mantención más calificado para trabajar con sistemas de vapor.</p>	<p>Frecuentes incendios en mangas.</p> <p>Mayor volumen de gases con mayor dificultad de control.</p>

2.2.2 Hornos de Fusión

2.2.2.1 Convertidor Teniente [3]

Creado en la Fundición Caletones entre los años 1974 y 1976 como una alternativa intermedia entre la fusión convencional y la autógena. La idea principal fue usar el calor de conversión de mata para fundir concentrado en un convertidor convencional modificado (fusión en baño), por lo que se aumentó su largo, se reposicionó la boca de salida de gases y se ubicaron las toberas en forma opuesta a dicha boca. Este horno utiliza grandes cantidades de oxígeno para lograr la autonomía, con una gran capacidad de conversión y una estable concentración de SO₂ que varía entre 21,3 – 23,4% (lo que favorece su tratamiento posterior en la planta de ácido) con bajo arrastre de material particulado, menor a 1%. Se utiliza concentrado seco.

Como producto se obtiene metal blanco de ley 72 – 75% de cobre, escoria cercana a la saturación con magnetita (18%) con contenidos de cobre entre 6 y 8%. Este metal blanco se envía a convertidores convencionales y la escoria a hornos de limpieza o a flotación de escorias.

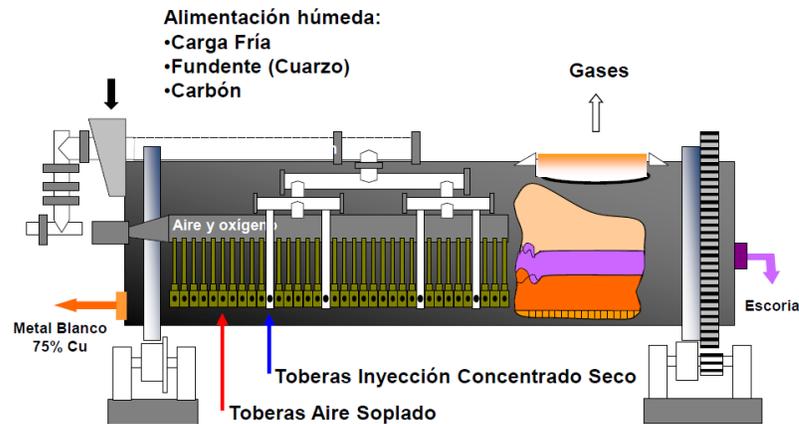


Ilustración 16: Figura esquemática del Convertidor Teniente [3].

El CT es un reactor cilíndrico de 5 m de diámetro por 22 m de largo revestido con refractario, con una boca de salida de gases ubicada cerca de una de las culatas de la nave, mientras que en la culata opuesta se encuentra la boca de alimentación de concentrado y fundente.

Una particularidad del Convertidor Teniente es la fusión sumergida de concentrados, la que consiste en la instalación de toberas de inyección de concentrado entre las toberas de inyección de aire, para evitar las pérdidas de polvo arrastrados por los gases y así optimizar la operación, lo que le permite aumentar su capacidad específica de fusión dadas las altas velocidades de las reacciones.

2.2.2.2 Horno Flash Outokumpu [3]

Fue desarrollado en la Fundición Harvajalta de Outokumpu en Finlandia, entre los años 1946 y 1950. Este proceso combina las etapas de tostación, fusión y parcialmente la conversión en un solo reactor. Se fundamenta en que el calor generado por las reacciones exotérmicas proporciona la energía del proceso, lo que implica un bajo consumo de combustible, logrando ser autógeno con el uso de aire enriquecido, mientras que la concentración de SO₂ es alta y pareja (10 – 30%). La oxidación del concentrado seco ocurre en una cámara cilíndrica vertical, llamada torre de reacción, donde el mineral y el aire enriquecido son inyectados por un quemador vertical situado en la parte superior de ésta, lo que genera una mezcla heterogénea de sulfuros de cobre, hierro, magnetita, sílice y ganga, los que se separan en mata, escoria y gases. Sus principales características son:

- Compuesto por tres cámaras: reacción, sedimentación y la de gases de salida. La primera y la última están refrigeradas (chaquetas térmicas o cascadas de agua) para prevenir el sobrecalentamiento. Requiere un suministro elevado y constante de concentrado.

- El contenido de cobre en la mata varía de 60 – 70%, dependiendo del oxígeno del aire. La escoria contiene 2 – 3% de Cu, y se puede tratar en un HELE o en flotación de escorias. Los gases, que salen a 1.300°C, van a calderas recuperadoras de calor, en donde se decantan y enfrían los polvos contenidos (5 – 12% de la carga), que pueden ser recirculados.

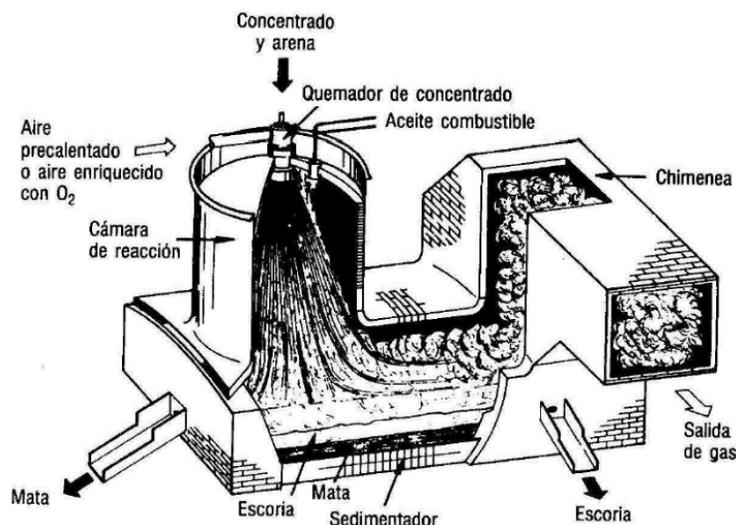


Ilustración 17: Esquema de Horno Flash Outokumpu ^[3].

Este horno tiene típicamente 7 m de ancho y 20 m de largo, con una altura de 3 m en la región del crisol, mientras que la torre de reacción y la salida de los gases tienen una altura promedio de entre 5 – 10 m y 3,5 m de diámetro. Este horno procesa de entre 1.000 – 2.500 tpd y posee una cubierta exterior de 1 cm de acero, exceptuando el techo del sedimentador y de la torre de reacción, compuestos de ladrillo refractario al igual que el resto del interior del reactor ^[5].

Tabla 11: Distribución de impurezas en hornos de fusión ^[3], modificado.

Elementos	Convertidor Teniente [%]			Horno Flash Outokumpu [%]		
	Mata	Escoria	Gases y Polvos	Mata	Escoria	Gases y Polvos
As	10	15	75	30	13	57
Sb	20	50	30	63	22	15
Bi	23	40	37	15	5	80
S	30	6	64	41	1	58
Pb	22	25	53	20	10	70
Au – Ag	91	8	1	88	5	7
Se	58	39	1	75	5	20

2.2.3 Conversión: Convertidor Peirce – Smith

Es el convertidor más usado en la actualidad y está presente en todas las fundiciones de Codelco. Tiene una forma de tambor acostado provisto de un mecanismo de rotación para las operaciones de carga, soplado y vaciado. Al igual que en la fusión, las reacciones son exotérmicas, por lo que no se requieren combustibles fósiles adicionales. Las características principales del CPS son ^[3]:

- Típicamente están contruidos con una plancha de acero de 4 – 5 cm de espesor, recubiertos con refractario de 25 – 75 cm. Procesan alrededor de 300 – 500 tpd de mata, que producen 100 a 200 tpd de cobre blíster a una temperatura de 1.200 – 1.250 °C.
- Una fundición puede tener de 3 a 6 convertidores, con uno en espera, los que producen blíster en forma discontinua en un periodo de 8 a 12 horas. Los convertidores operan en dos etapas del ciclo (soplado a escoria y a cobre), aprovechando el calor de la conversión para refundir chatarra y así evitar las altas temperaturas y el excesivo desgaste de los refractarios.
- La discontinuidad del proceso hace necesario que el traspaso del material líquido se haga en grandes ollas transportadas por grúas. Existen enormes campanas que capturan los gases de salida, para su tratamiento en una Planta de Ácido.

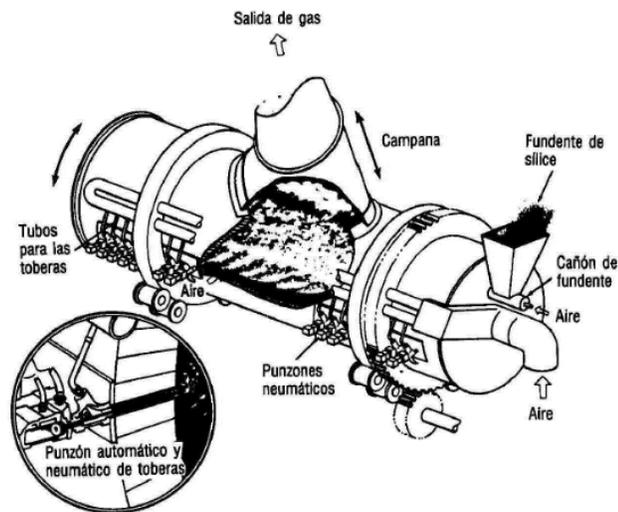


Ilustración 18: Esquema de Convertidor Peirce – Smith ^[3].

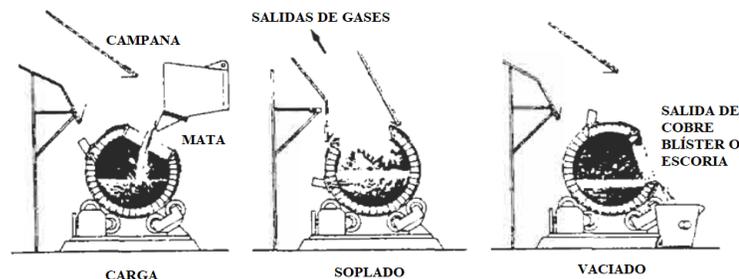


Ilustración 19: Posiciones del convertidor Peirce – Smith ^[3].

Tabla 12: Distribución de impurezas en la etapa de conversión ^[3].

Elemento	Mata con 54% de Cu [%]			Mata con 70% de Cu [%]		
	A blíster	A escoria	A gases	A blíster	A escoria	A gases
As	28	13	58	50	32	18
Bi	13	17	67	55	23	22
Pb	4	48	46	5	49	46
Sb	29	7	64	59	26	15
Se	72	6	21	70	5	25

Tabla 13: Características del Convertidor PS ^[3].

Característica	Convertidor Peirce – Smith
Modo de operación	Batch
Cu en escoria [%]	8 – 12
S en blíster [%]	0,001 – 0,03
Fijación de azufre en gases [%]	75 – 90
Duración de refractario	3 – 6 meses
Sistema de escoria	Fayalítica
Fases de operación	Escoria / Metal blanco

2.2.4 Horno de Refino (Horno de Ánodos)

La refinación de cobre es un proceso discontinuo y se realiza en hornos basculantes conocidos como Hornos de Refino o de Ánodos. Son hornos cilíndricos de 4 – 10 m de largo y 4 – 5 m de diámetro, con una capacidad que varía de entre 200 – 400 toneladas ^[5]. Posee toberas para introducir el combustible (Petróleo Búnker) y el oxígeno en el metal fundido que se encuentra dentro del horno, el que está cubierto en su interior con ladrillo refractario.

Debido al DS N°28, se agrega un sistema de captación y tratamiento húmedo de gases, para reducir la opacidad y alcanzar la captura establecida, para evitar las emisiones de ultrafinos de hollín ^[12].

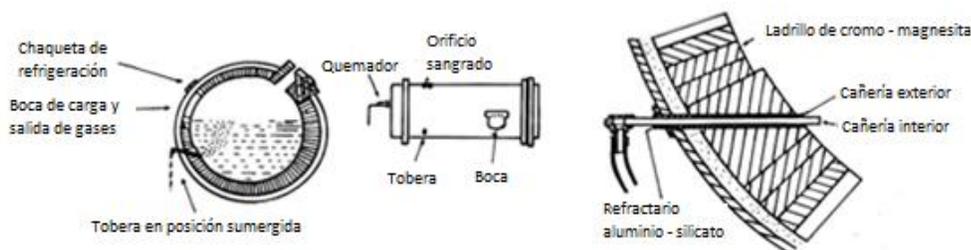


Ilustración 20: Esquema de un horno basculante de refino ^[3].

2.2.5 Tratamiento de gases

2.2.5.1 Separación de polvos metalúrgicos

Los polvos recolectados son enviados a cámaras de enfriamiento evaporativo (CT) o radiativo (CPS), para luego pasar a un proceso de purificación en un precipitador electrostático (para finos).

- a. **Cámara de enfriamiento Evaporativo:** Dentro de estas cámaras existen lanzas que inyectan agua y aire frío al flujo de gases (gotitas de agua), lo que produce un descenso de la temperatura hasta aproximadamente 350°C y la captación de la fracción gruesa de los polvos metalúrgicos ^[9].

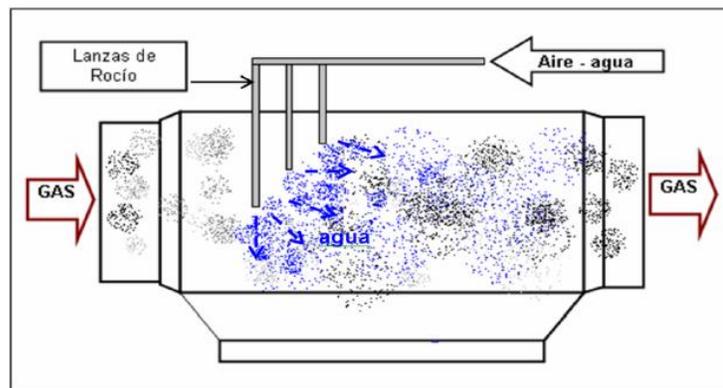


Ilustración 21: Esquema operacional de Cámara de Enfriamiento Evaporativo ^[9].

- b. **Cámara de enfriamiento Radiativo:** El enfriamiento se basa en la pérdida de calor por radiación y convección sin uso de agua (no aumenta el volumen del gas), ya que solo se basa en la circulación del gas por una serie de tubos radiantes, que poseen una forma de U invertida, en los que se pierde calor. Existe una pantalla matapolvos previa refrigerada con agua, en la que chocan las partículas más gruesas de los polvos y los extrae del proceso ^[9].

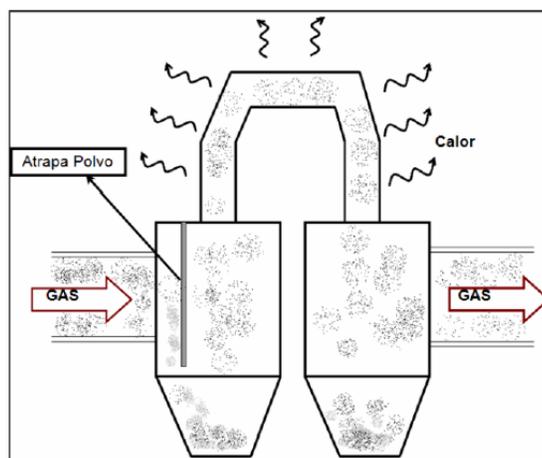


Ilustración 22: Esquema de Cámara de Enfriamiento Radiativo ^[9].

- c. **Precipitadores Electrostáticos:** Mediante la presencia de un campo magnético se captan las partículas finas cargadas eléctricamente (mediante ionización), que son tan pequeñas que no son afectadas por la gravedad y flotan en el aire por largo tiempo. Este equipo utiliza un voltaje extremadamente alto para lograr capturar el fino ^[9], y opera tanto en seco como en húmedo.

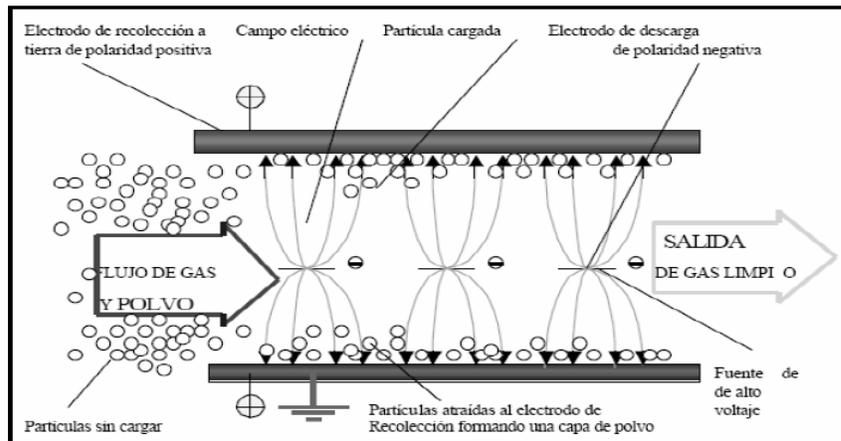


Ilustración 23: Principios de funcionamiento del Precipitador Electrostático ^[9].

2.2.5.2 Planta de Ácido

Consta de una torre de secado para extraer la humedad remanente presente en el gas proveniente de la etapa anterior. Luego, se produce la oxidación del SO_2 en SO_3 , lo que requiere que la temperatura se aumente a 400°C , por lo que existen una serie de lechos intercambiadores de calor que permiten mantener esta temperatura. Finalmente, existe una torre de absorción en la que el gas SO_3 formado es absorbido por una solución de ácido al 98% de pureza que recircula constantemente por esta torre mediante la acción de bombas.

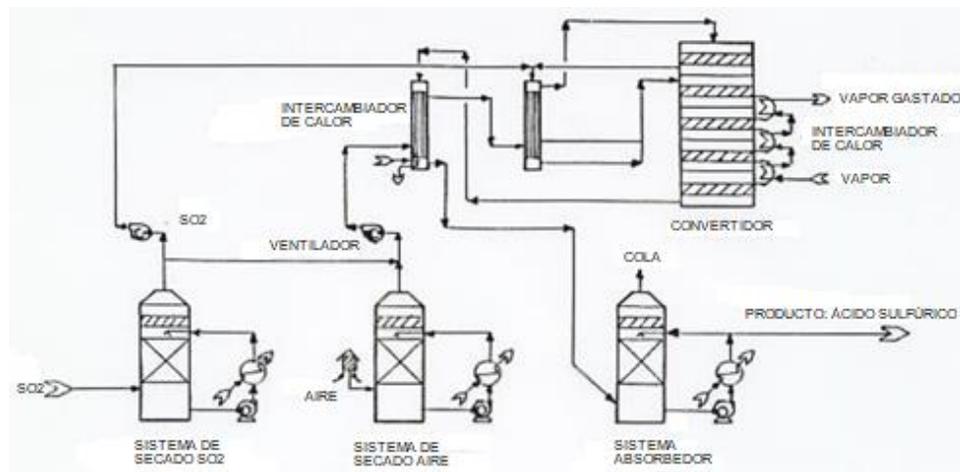


Ilustración 24: Flowsheet de la producción de ácido sulfúrico ^[3].

2.2.6 Resumen de equipos utilizados

Para este análisis no se considera la fundición y refinación Ventanas debido a que, al no estar relacionada a un yacimiento minero, sus parámetros no son comparables con los de las otras tres fundiciones de la corporación. Se consideran los cambios producto del DS N°28.

Tabla 14: Resumen de equipos utilizados por las fundiciones (excepto Ventanas) ^{[3], [6], [12]}.

	Chuquicamata (1952)	Potrerosillos (1927)	Caletones (1922)
SECADO	1 secador rotatorio a vapor	1 secador lecho fluidizado	3 secadores de lecho fluidizado
Capacidad [tph]	150	120 – 150	130 c/u
FUSIÓN	1 HF	1 CT	2 CT
Tamaño (LxD) [m]	---	22 x 5	22 x 5
Capacidad [ktms/a]	1.170	700	1.400 en total
CONVERSIÓN	5 Peirce – Smith	3 Peirce – Smith	4 Peirce – Smith
Tamaño (LxD) [m]	13,2 x 4,5	9,1 x 4	12,4 x 3 – 4 y 10,7 x 1 – 4,6
REFINO	6 hornos anódicos	2 hornos anódicos	4 hornos anódicos
Tamaño (LxD) [m]	9 x 4 (4,6)	9,1 x 4	10,7 x 4
LIMPIEZA DE ESCORIAS	Enfriamiento en piso. Flotación.	Enfriamiento en ollas. Flotación.	Enfriamiento en pozo. Flotación.
RUEDA DE MOLDEO	2 Outotec y 1 Twin.	2 Demag.	1 Outotec y 2 Twin
Producción [kg]	Ánodo 400 kg	Ánodo 223 kg	Ánodo 275 – 400 kg
PLANTAS DE ÁCIDO	2 de doble contacto	1 de doble contacto	1 de contacto simple
PLANTAS DE OXÍGENO	1 Air Liquide, 1 Kobe, 1 BOC	1 Air Liquide	2 Air Liquide
Capacidad [tpd]	400 c/u	550	400 y 800

2.3 PROCESOS DE LA REFINERÍA ELECTROLÍTICA DE COBRE

La etapa de refinación electrolítica recibe los ánodos de la refinación para procesarlos en celdas electrolíticas y así obtener cátodos comerciales de alta pureza (99,99% de Cu).

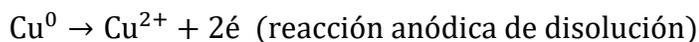
Tabla 15: Composición típica de un ánodo enviado a ER [14].

Elemento	[%]	Elemento	[%]	Elemento	[%]
Cu	98,50 – 99,50	Se	0,01 – 0,20	Pb	Traza – 0,30
Ag + Ag	0,005 – 0,50	Te	Traza – 0,04	As, Bi	Traza – 0,02
Platinos	Traza	Sb, Fe	Traza – 0,08	S	Traza – 0,02
Sn, Zn	Traza	Ni	0,02 – 0,20	Si	0,30 – 4,00

2.3.1 Electrorrefinación de cobre

La ER de cobre tiene como objetivo remover las impurezas presentes en los ánodos para producir un cátodo comercial de alta calidad, para lo que se lleva a cabo un proceso de electrólisis en el que los electrodos, el ánodo de cobre y la placa madre de acero inoxidable, se sumergen en una solución ácida a la que se le aplica una densidad de corriente, que puede variar entre 250 y 360 A/m² (y un voltaje de 0,3 – 0,5 V) [13], lo que gatilla la disolución paulatina del ánodo, iniciándose así la migración selectiva de los iones metálicos de cobre, los que se depositan en ambas superficies de la placa madre durante aproximadamente 8 días [13] hasta lograr la masa deseada, formando así el cátodo. Para lograr la correcta deposición de cobre se requiere adicionar inhibidores: thiourea (regulador del tamaño de grano del metal), cola animal (para generar una deposición pareja) y sulfonato de sodio (facilita el tránsito entre solución y metal y la formación del barro anódico) [14].

Una vez concluido el proceso, el cátodo es extraído mecánicamente de la placa madre, para luego ser muestreado, pesado, enzunchado y enviado al cliente final.



Ecuación 10: Reacciones principales que ocurren dentro de la celda de ER [13].

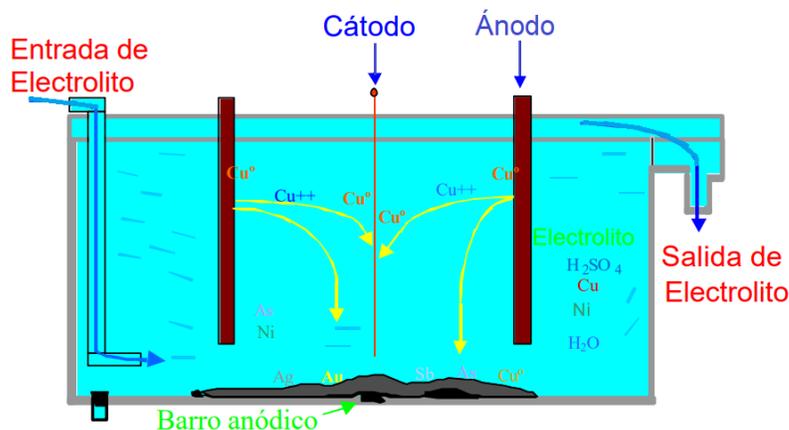


Ilustración 25: Esquema de una celda de ER [15].

El remanente del ánodo (llamado *scrap* o chatarra) es retirado de las celdas, lavado y refundido en la fundición. A su vez, en la celda ER se disuelven otros componentes no deseables, como el As (10 g/L), Sb (0,3 g/L), Bi, entre otros ^[13], cuyas concentraciones van en aumento a medida que el electrolito (CuSO₄ – H₂SO₄, con 40 g/L de cobre y 190 g/L de ácido ^[13]) es recirculado en las celdas. Esto genera a la larga la deposición gradual de estos elementos en la placa madre, intercambiadores y cañerías, lo que contamina el cátodo, por lo que se hace necesario tratar el electrolito en una Planta de Intercambio Iónico, para remover las impurezas hasta obtener una concentración estimada de 0,08 g/L de Sb en el electrolito ^[16].

De la misma manera, se genera un precipitado que se acumula en el piso de la celda y que es retirado diariamente del fondo de ésta, al que se le denomina **barro anódico**. Éste contiene especies valiosas como Cu, Au, Ag, Se, Te y platinos, los que pueden ser recuperados en una Planta de Tratamiento de Barros Anódicos y/o en una Planta de Metales Nobles.

Las celdas de electrorrefinación de cobre son paralelepípedos rectos que llevan en su interior n cátodos (típicamente 60 por celda) y n+1 ánodos, y están construidas de concreto polimérico. El volumen típico de la celda es de 8 m³, el área de los electrodos presentes en las celdas es de 1 x 1 m y la recirculación típica del electrolito es de 1 m³/h ^[13].

La calidad de los cátodos tiene que cumplirse en tres aspectos fundamentales ^[13]:

- a. **Calidad química:** La pureza química del cátodo debe ser de 99,99% de Cu y debe cumplir cotas superiores para las impurezas.
- b. **Calidad física:** La deposición tiene que ser continua y lisa, es decir, no deben existir grietas, huecos, porosidades y protuberancias.
- c. **Calidad mecánica:** Se realizan test de resistencia mecánica, como el test del resorte.

Tabla 16: Composición química de cátodos, electrolito y barro anódico ^{[13],[17]}.

Cátodos	[ppm]	Imp. en electrolito	[g/L]	Barro anódico	[%]
Cu	99,99%	Ni	1,50 – 21,10	Cu	0,40 – 8,87
Ag	2,00 – 30,0	As	0,50 – 12,00	Ag	16,32 – 35,00
Au	0,10 – 0,80	Sb	0,30 – 0,80	Au	0,20 – 0,72
Se	2,00 – 10,0	Fe	0,20 – 6,00	Se	8,82 – 18,00
Te	2,00 – 6,00	Zn	0,10 – 0,30	Te	0,50 – 3,00
Bi	Traza – 2,0	Pb	0,00	As	0,70 – 10,00
Pb	5,00 – 10,0	Ag – Au	0,00	Sb	4,00 – 16,00
As	4,00 – 11,0	Se – Te	0,00	Bi	0,23 – 2,00
Sb	5,00 – 14,0	-	-	Pb	1,00 – 8,00

2.3.2 Planta de Intercambio Iónico (IX)

El objetivo de esta planta es controlar la presencia de antimonio en el electrolito presente en las celdas de ER, de tal manera de que su concentración no supere los 0,3 g/L, para lo que se utiliza resina de intercambio iónico. La reacción química que se busca es intercambiar un ion de la misma carga desde el electrolito con otro de la resina (usualmente hidrógeno o hidroxilo) que no sea dañino para el proceso y los resultados buscados. En el caso de la planta, se intercambia H^+ presente en la resina con cationes de Sb, Bi, etc ^[16].

La Planta IX operará cuando el electrolito de la refinería alcance una concentración de antimonio de 0,3 g/L, recirculándolo a las celdas con un valor de 0,08 g/L de Sb, y consta de tres módulos capaces de remover 130 tpa de Sb en los casos en que exista una alta concentración de este metal. Sin embargo, usualmente la planta funciona con solo un módulo ^[16].

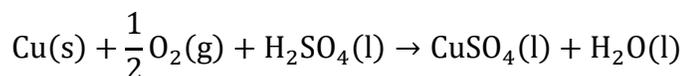
El proceso global consta de dos etapas: adsorción y elusión ^[16].

1. **Adsorción:** El electrolito se envía a las columnas para producir la remoción de Sb utilizando el lecho de resina contenida en cada una de éstas, retenida en la columna gracias a mallas de entrada y salida y distribuidores de flujo regenerativo.
2. **Elusión:** Una vez cargada la resina, se debe proceder a su regeneración, para lo que se utiliza un eluente (ácido tartárico, $C_4H_6O_6$) y un eluato (bitartrato de potasio, $KC_4H_5O_6$) que acomplejan el ion Sb, separándolo de la resina (el proceso está dividido en 7 subetapas). Los sistemas son prácticamente cerrados y con un alto grado de automatización.

2.3.3 Tratamiento del Barro Anódico

La PTBA recibe el precipitado de refinería generado en las celdas de electrorrefinación y lo procesa con tal de extraer la mayor cantidad de cobre presente en estos lodos, para así producir barro anódico descubrizado.

El proceso de descubrización de los barros anódicos crudos se realiza mediante lixiviación a presión en un equipo autoclave, en donde se separa el cobre gracias a la inyección de oxígeno en un medio ácido que, sumado al progresivo aumento de la temperatura y presión, mediante la acción conjunta de vapor y oxígeno, produce sulfato de cobre en solución (PLS), el que es enviado a la división para su posterior tratamiento ^[18].



Ecuación 11: Lixiviación de cobre contenido en los barros anódicos crudos ^[18].

Los barros descubrizados son enviados a la Planta Recuperadora de Metales (PRM), filial de Codelco, que es la encargada de procesar el precipitado de refinería rico en cobre y el barro anódico generado en las refinерías de la División Potrerillos y Chuquicamata, respectivamente. Este proceso

se compone de etapas sucesivas en las que se van recuperando secuencialmente los metales preciosos presentes en los precipitados generados.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LAS FUNDICIONES Y REFINERÍAS DE CODELCO

2.4.1 Chuquicamata

La Fundición Chuquicamata se ubica dentro del complejo minero – metalúrgico del mismo nombre, el que se localiza en la provincia de El Loa en la región de Antofagasta, distante a 223 km de la ciudad del mismo nombre y a 1.225 km de Santiago, a una altura aproximada de 2.770 m.s.n.m.^[19]. El concentrado llega con un contenido aproximado de cobre de 28 – 32% y una humedad del 9%, con mineral de Chuquicamata y de Radomiro Tomic, además de la calcina proveniente de la División Ministro Hales. Luego, el concentrado húmedo se envía hacia un secador rotatorio a vapor para obtener un concentrado seco al 0,2% de humedad^[19], el que es enviado hacia el equipo de fusión: el Horno Flash Outokumpu potenciado para procesar mayor tonelaje, 1.170.000 tms al año.

El Horno Flash genera un eje o mata con contenido de cobre promedio de 62%^[19], el cual se envía posteriormente a conversión en los reactores Peirce – Smith, junto con alrededor de 106 tpd de chatarra de cobre (*scrap*) y carga fría variable. Alrededor del 30% de los polvos metalúrgicos son recirculados en este mismo horno.

Del proceso de conversión se obtiene cobre blíster de 98,3% Cu, 300 ppm de azufre y 6.000 ppm de oxígeno promedio^[19], que junto a aproximadamente 167 tpd de *scrap* de la refinería electrolítica, se transportan en ollas hacia los seis Hornos de Ánodos, en los cuales se produce cobre anódico de 99,6% de cobre. Finalmente, los ánodos de 400 kg cada uno se cargan en carros de tren y se envían a la electrorrefinación, que se ubica a 6 km de distancia, para producir cátodos de alta pureza (99,99% de cobre contenido) y barro anódico crudo (también conocido como precipitado de refinería rico en cobre, PRRC) como subproducto^[19], el que se descubrizo para su posterior venta a la Planta Recuperadora de Metales, ubicada en Mejillones, el que trata los barros anódicos descubrizados para producir oro, plata, platino, paladio, selenio y telurio.

Por otro lado, la escoria que antes se trataba en HLE se trata en una planta de chancado – molienda – flotación, previo proceso de enfriamiento en piso, a la que se dirigen las escorias del HF (con contenido de 2,5 – 10% de cobre) y de los CPS (con ley de cobre del 10% promedio), mientras que la escoria de los HA se recircula a la conversión. Esta planta de flotación produce un concentrado de escorias que es nuevamente inyectado al circuito clásico de la fundición.

Los gases que se generan en la fusión y la conversión se mandan a una cámara de mezcla de gases que lo distribuye a las unidades de limpieza de gases, en las cuales se recolectan los polvos metalúrgicos mediante enfriadores radiativos y precipitadores electrostáticos húmedos, los que tienen dos destinos posibles: Ecometales, filial de Codelco (en ésta, los polvos se someten a un proceso de lixiviación para producir un PLS al que se le abate el arsénico mediante sintetización de escorodita ($\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), para luego reintegrar el PLS limpio a la DCH^[20]) o el Tostador DMH, para producir calcina de polvos. El gas purificado se envía a las dos plantas de doble

contacto que están planificadas, para producir ácido sulfúrico de alta pureza. También se cuenta con una planta ATP (Planta de Tratamiento de Arsénico o Planta de Tratamiento de Efluentes) para tratar los efluentes líquidos desprendidos del tratamiento de gases, en la que se abate y estabiliza (con lechada de cal) el arsénico, mediante producción de arsenito de calcio.

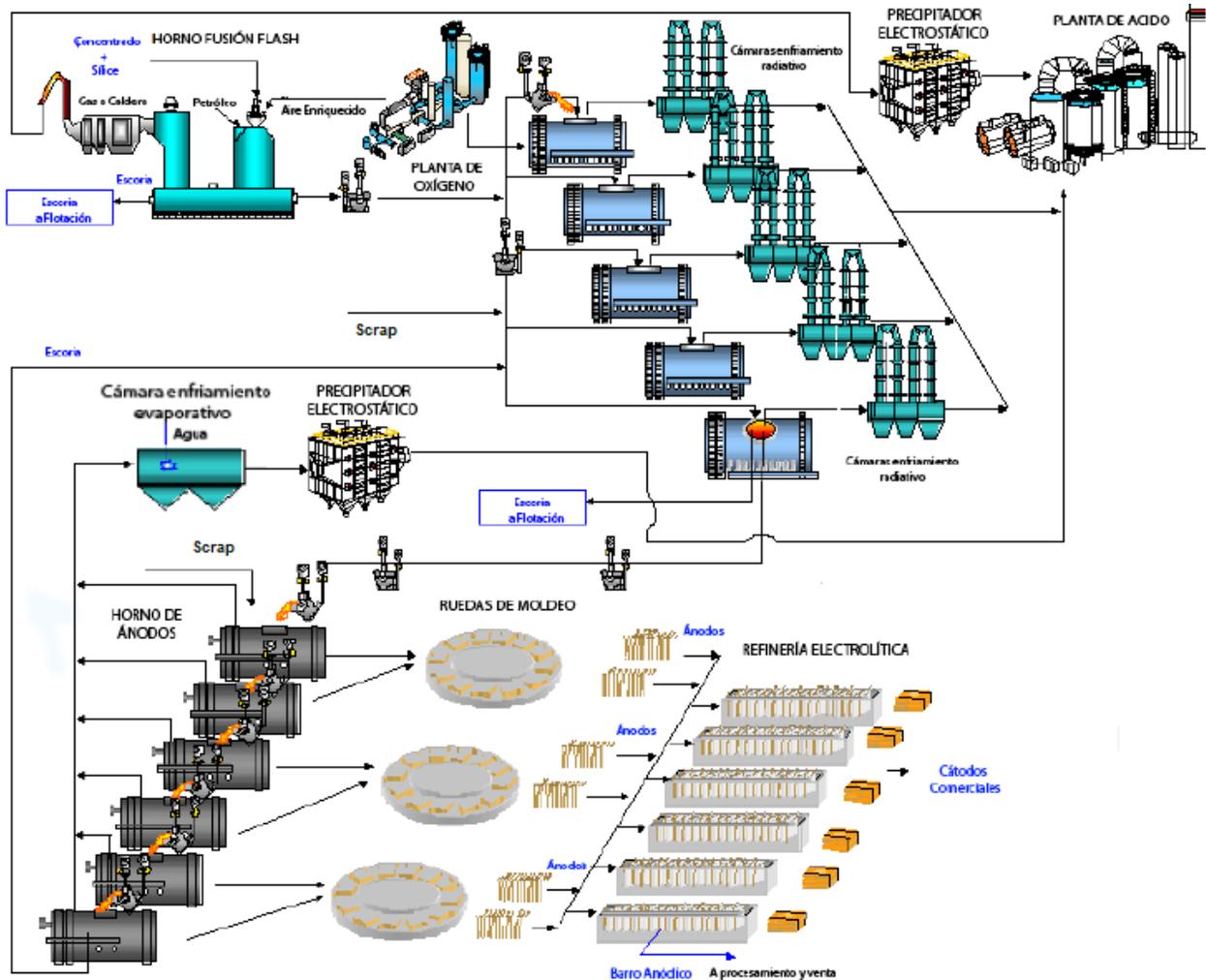


Ilustración 26: Flowsheet de Fundición Chuquicamata, año 2019.

2.4.2 Potrerillos

Esta fundición está integrada a la División Salvador, y está ubicada en la comuna de Diego de Almagro en la tercera región de Atacama. Procesa los concentrados propios de esta división, además de cantidades variables de calcina de MH, concentrados provenientes de Andina y Chuquicamata y concentrados externos de Escondida, de BHP Billiton.

El concentrado llega con un contenido de cobre aproximado de 26 – 32% y una humedad estimada del 9%. Luego de pasar por un proceso de secado fluosólido (humedad remanente del 0,2%), se envía el concentrado seco al proceso de fusión, el que consta de un Convertidor Teniente, donde

se obtiene metal blanco con un 73% de cobre y escoria con ley de cobre promedio de 10%. La mata se alimenta a tres convertidores Peirce – Smith, desde donde se obtiene cobre blíster de 98,5% de pureza y escoria de bajo contenido de cobre. El blíster se envía a dos hornos de ánodos para producir cobre anódico de 99,5% de cobre contenido, el que se envía a la refinería electrolítica para producir cátodos comerciales de alta pureza y barro anódico crudo (PRRC) como subproducto, el que es enviado a la Planta Recuperadora de Metales de Mejillones, donde se separan los metales preciosos contenidos en estos barros (Au, Ag, Pt, Pa, Se, Te).

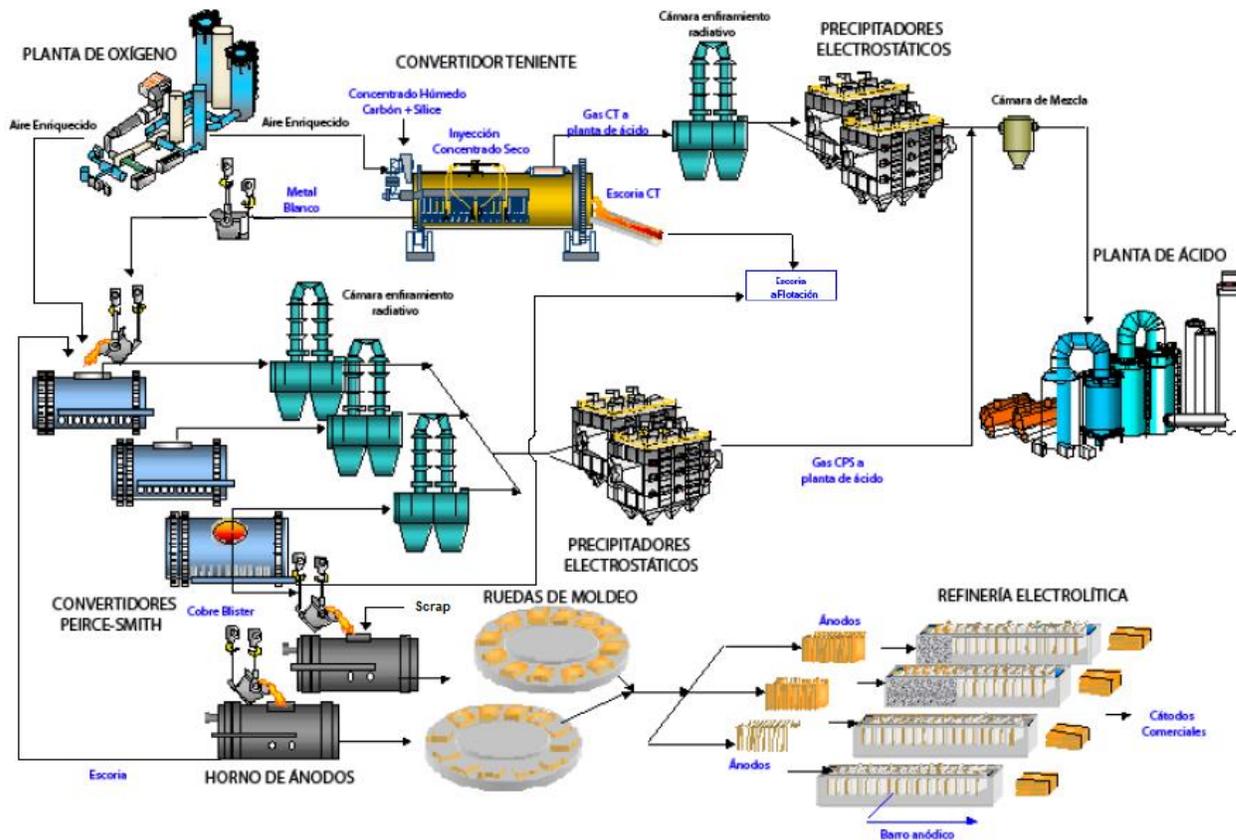


Ilustración 27: Flowsheet de Fundición Potrerillos, año 2019.

La escoria del Convertidor Teniente y de los CPS se envía a un tratamiento mineralúrgico (flotación), desde donde se produce un concentrado de escorias que es reintegrado al proceso de fusión. Para el transporte de los materiales calientes, se opera con grúas puente y ollas. Existe un sistema de captura de gases fugitivos, de tal manera de mejorar el ambiente de trabajo.

El sistema de manejo de gases trata los gases del CT y de los convertidores PS mediante enfriadores radiativos que disminuyen la temperatura de estos hasta los 400°C y eliminan parte de los polvos, para luego capturar el resto de los polvos metalúrgicos en precipitadores electrostáticos secos (2 para el CT y 2 para los CPS). El gas libre de polvos se trata en la Planta de Ácido de doble contacto (una vez concluida la transformación de la planta antigua de contacto simple) para producir ácido

sulfúrico de alta pureza, y el efluente de ácido débil impuro producido en este proceso se trata en una planta de Tratamiento de Efluentes, generando un residuo de carácter arsenical estable.

2.4.3 Caletones

Esta fundición está integrada a la División El Teniente y está ubicada a 44 km de Rancagua y a 1.560 m.s.n.m., datada del año 1922 [8]. La fundición procesa los concentrados propios de esta división y posiblemente procesará parte de los concentrados de la división Andina y de Minera Valle Central (que reprocesa los relaves de El Teniente), según planificaciones hacia el año 2022. El producto final es cobre anódico, ya que hace unos años la fundición dejó de producir el clásico producto de cobre RAF.

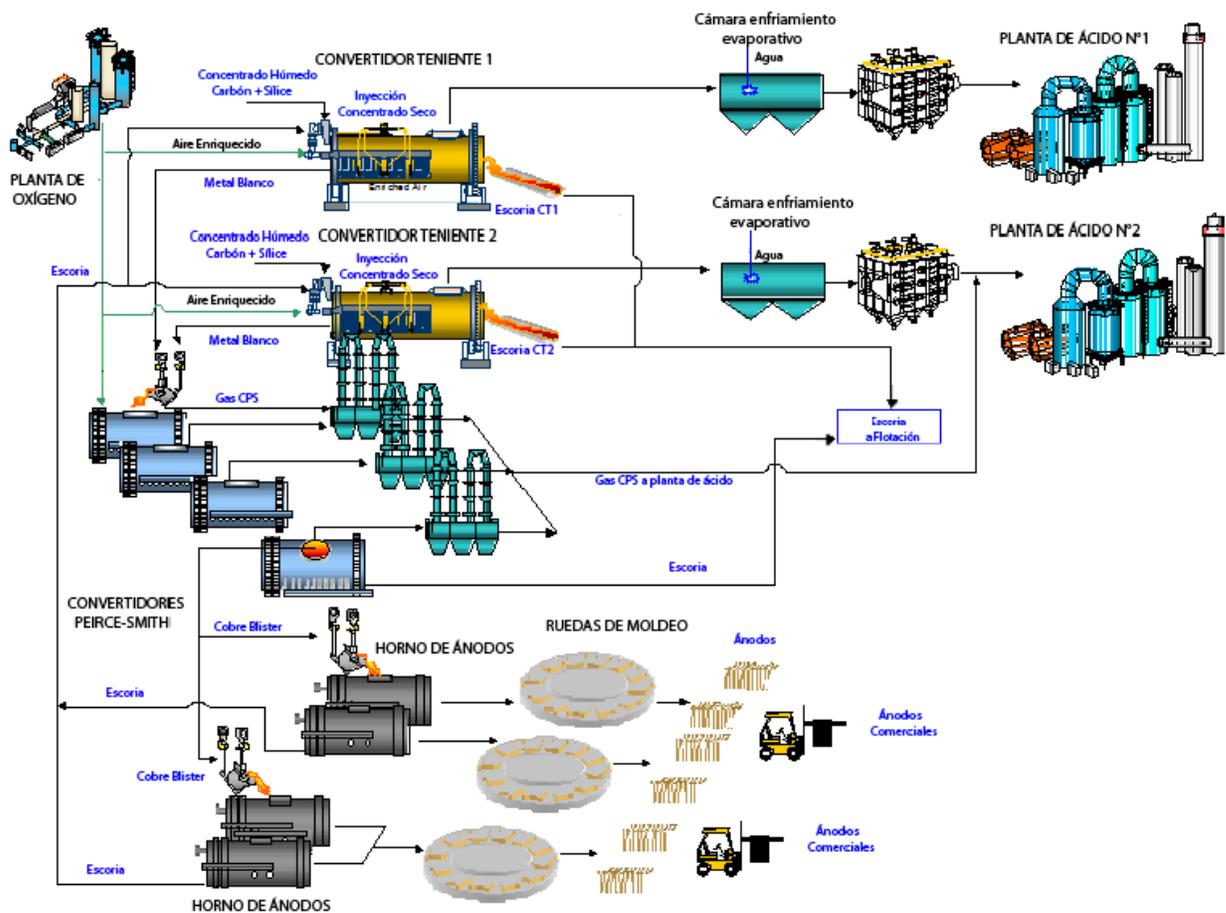


Ilustración 28: Flowsheet Fundición Caletones, año 2019.

El concentrado llega con un contenido aproximado de cobre de 26 – 29% y una humedad del 7 – 9% [4], el que se procesa en dos secadores de lecho fluidizado para reducir la humedad a un 0,2% [8]. La fundición consta de dos convertidores Teniente a los que llega el concentrado seco y, en presencia de aire enriquecido entre un 35 – 37% [10], se produce metal blanco de ley promedio 74%

y una escoria con contenido de Cu del 8,5%. El metal blanco se alimenta a cuatro convertidores Peirce – Smith (uno de estos está para casos de mantención general) donde se produce cobre blíster con pureza del 98,6%, el que, luego, se deriva a la siguiente etapa del proceso, el refinado anódico, que consta de cuatro Hornos de Ánodos y tres ruedas de moldeo, que producen un ánodo de cobre comercial de 99,6% de pureza.

La escoria producida tanto por los convertidores Teniente como por los convertidores PS se envían a un proceso de chancado – molienda – flotación, previo proceso de enfriamiento en pozos, para producir un concentrado de escorias que se reprocessa en la fundición, pasando por los procesos estándar de los demás concentrados. Por otro lado, la escoria generada por los HA se recircula hacia los CPS.

Los gases provenientes de fusión y conversión son captados por campanas ubicadas en las bocas de estos reactores, los que son enviados a cámaras de enfriamiento evaporativo para eliminar el polvo más grueso, y luego por precipitadores electrostáticos para recolectar el polvo más fino, el que es enviado a una Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición, donde se recupera el cobre mediante métodos hidrometalúrgicos, dando lugar a una solución rica en cobre (PLS) que es reintegrada a los procesos. El gas restante posee fundamentalmente SO_2 y As, los que se envían a las Plantas de Ácido de contacto simple (la que incluye un sistema de captura de gases de cola) para producir ácido sulfúrico de 98,5% de pureza y un efluente arsenical, el cual se envía a la Planta de Tratamiento de Efluentes para obtener residuo de arsénico estable calcinado, arsenito/arseniato de calcio (con contenido 5 – 7% de As), el que se embolsa en maxi – sacos para su disposición final ^[8].

3 MODELAMIENTO DEL *OPERATIONAL EXPENDITURE*

La Corporación Nacional del Cobre de Chile, en su Instructivo de Costos de Operación, da los lineamientos para organizar los costos del negocio minero que administra. En éste se indica que “todo circuito de producción consta de procesos operativos que interactúan entre sí a fin de entregar al mercado un bien comercial”. A su vez, cada proceso operativo está compuesto de operaciones unitarias relacionadas entre sí, formadas a su vez por elementos de gasto ^[21].

Tabla 17: Definición del circuito productivo ^[21].

Procesos Operativos	Minería a Cielo Abierto
	Minería Subterránea
	Concentración de Minerales
	Fundición
	Refinería
	Hidrometalurgia

Los costos de comercialización por ventas de cobre y sus subproductos no constituyen parte del OPEX de los procesos operativos de concentración de minerales, refinería ni hidrometalurgia, pero sí constituyen un descuento para los ingresos brutos del negocio. Estos descuentos se basan en las fórmulas y parámetros encontrados en las Orientaciones Comerciales ^[21].

Tabla 18: Operaciones unitarias relacionadas a la fundición y a la refinería del cobre ^[21].

Proceso Operativo	Operaciones Unitarias	Comentarios
Fundición	Recepción y Mezcla	-
	Fusión	-
	Conversión	-
	Refinación y Moldeo	-
	Planta de Limpieza de Gases	-
	Mantenimiento	-
	Administración	Solo gasto directo.
Refinería	Electrorrefinación	-
	Tratamiento de Barro Anódico	-
	Mantenimiento	-
	Administración	Solo gasto directo.

3.1 Bases de datos

Se cuentan con planillas de las tres fundiciones y de las dos refinerías que se desean modelar. Sin embargo, las planillas de la División El Teniente (Fundición Caletones) y de la División Salvador (Fundición y Refinería Potrerillos) presentan una estructura de gastos demasiado general para la profundidad que se requiere en los modelos. Al contrario, las dos planillas de la Fundición y Refinería de la División Chuquicamata, API Referente N15FP15 “Desarrollo Fundición Chuquicamata”, que aborda un antiguo proyecto realizado en la VP el año 2015 que analiza distintas opciones para aumentar la capacidad de la fundición, pero que no llegó a puerto debido a sus malos resultados económicos; y el API Referente N14MS03 “Explotación Chuquicamata Subterránea”, perteneciente a la evaluación económica del proyecto Chuquicamata Subterráneo, contienen un desglose de insumos, precios, tarifas y gastos suficiente para realizar una estandarización de los costos en la fundición y refinería, es decir, incluyen gasto por operación unitaria, por equipo, por elemento de gasto y con un alto nivel de detalle, debido a que los datos se extraen desde el Sistema Contable SAP, el que contiene el máximo nivel de detalle posible.

Tabla 19: Elementos de Gasto.

Elementos de Gasto	Remuneraciones
	Materiales
	Combustibles
	Energía Eléctrica
	Suministros
	Servicios de Terceros
	Otros

Los datos por utilizar corresponden al proyecto N15FP15 (planilla base u original), y los datos del segundo proyecto se tienen como una planilla de verificación (planilla auxiliar) ante posibles errores y faltas de datos que pueda presentar la planilla elaborada en la Vicepresidencia de Proyectos.

En la planilla original (N15FP15) se incluyen los gastos de todos los insumos de la Fundición y Refinería de Chuquicamata, incorporando algunos de los cambios producto del Decreto Supremo N°28, que restringe las emisiones de arsénico, azufre y material particulado (y que entra en vigencia para las fundiciones antiguas en diciembre del 2018), lo que en la práctica implica detener toda una línea de fusión, es decir, el Secador N°4 y el Convertidor Teniente N°2, y la fundición completa por un plazo de entre 60 – 80 días ^[22], hasta que las nuevas Plantas de Ácido de doble contacto estén completamente operativas.



Chuquicamata detiene horno Convertidor Teniente 2 para cumplir Decreto Supremo 28 que regula captura de arsénico y azufre

DICIEMBRE 11, 2018

Actualidad

EL MERCURIO DE CALAMA | Martes 11 de diciembre de 2018 | 5

A las cero horas del miércoles se detendrá la Fundición de Chuqui

CODELCO. La empresa estatal detendrá su línea de fusión para cumplir el Decreto Supremo N°28, que regulará las emisiones de las fundiciones de cobre del país.

Cristián Venegas M.
 cvenegas@mercuriocalama.cl



Ilustración 29: Titulares de prensa sobre las detenciones de la Fundición DCH [23], [22].

La reorganización de los datos se ensambla en una planilla Excel auxiliar a la que se le denomina “pre – modelo” (uno de fundición y otro de refinería), en la cual se codifican todos los gastos, precios, consumos e I/P con las vinculaciones correspondientes, ya sea con los días operativos o con los tonelajes procesados o producidos al año en cada operación unitaria, según los datos incluidos en la planilla base.

La planilla original contiene todos los gastos globales, con lo que es posible determinar todos los precios unitarios y ordenarlos según el Instructivo de Costos de Operación: por operación unitaria y por elemento de gasto. Por otra parte, haciendo uso de la Guía para la Trazabilidad de Costos se pudo determinar todos los insumos que tienen un carácter de relevancia para la estimación de costos FURE (fundentes, agua, energía, combustibles, entre otros [24]), los que poseen datos de consumos y/o I/P. Para aquellos gastos de insumos que no registran I/P o consumo se parametriza según el tonelaje procesado o producido registrado en el plan de producción abreviado que contiene el proyecto API N15FP15.

Finalmente, en el pre – modelo los elementos de gasto “Servicios de Terceros” y “Otros” se caracterizan con un gasto y un precio unitario por día.

Tabla 20: Ejemplo de la caracterización realizada a cada insumo de la fusión.

Concepto	Sílice fina	Petróleo Búnker	Querosén	Energía Eléctrica	Agua industrial	Insumo secundario
I/P	t/tms	kg/tms	L/tms	MWh/tms	m ³ /tms	-
Consumo	t	kg	L	MWh	m ³	-
Precio	USD/t	USD/kg	USD/L	USD/MWh	USD/m ³	USD/tms
Gasto	Miles USD					

Por otro lado, el detalle de las remuneraciones y la dotación, que no se encuentra en la planilla N15FP15, se obtiene de un archivo relativo a la Reformulación del Proyecto Chuquicamata Subterráneo (0.1 Remuneraciones OO.CC.May – 17 Integrado), que cuenta con el detalle de todas las remuneraciones y la dotación por operación unitaria, en el horizonte temporal requerido.

De esta manera, se busca explicitar la hoja “Parámetros” del modelo, que contiene el *input* de gran parte de las tarifas, precios e I/P de las operaciones unitarias pertenecientes a los procesos operativos atinentes a este estudio, de tal manera de obtener una “Estimación del OPEX Base” (mediante la vinculación con el programa de producción o balance másico estandarizado para las etapas de fundición y refinería), al que se le aplica una corrección monetaria para obtener, finalmente, la “Estimación del OPEX Calculado”.

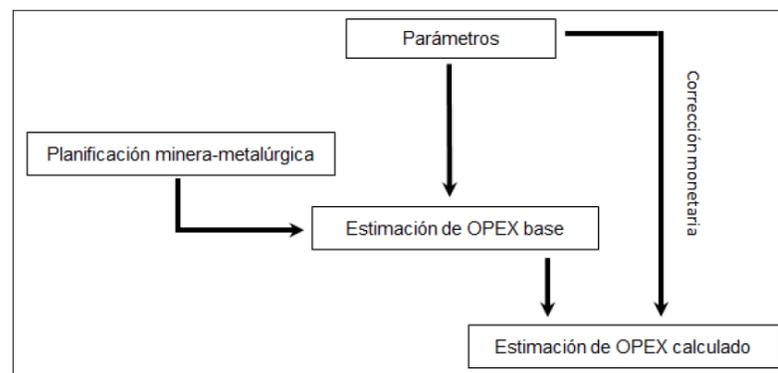


Ilustración 30: Representación esquemática del modelo para calcular el Costo Operacional ^[21].

La corrección monetaria es un mecanismo que permite reconocer el efecto inflacionario en los bienes de una empresa debido al transcurso de cierta cantidad de tiempo ^[25], es decir, los revalora y actualiza. Este ajuste lo establecen reglamentariamente los lineamientos de Codelco, Cochilco y el Ministerio de Desarrollo Social. Esta estimación considera la aplicación de dos bases de corrección monetaria ^[21]:

1. Los índices IPM, IPC y TC publicados en el documento “Antecedentes económicos y comerciales para planificación”, emitido por Codelco.
2. Los índices IPM, IPC, y TC publicados en el documento “Normas para la presentación de antecedentes de proyectos de inversión de Codelco – Chile”, emitido por el MDS – Cochilco.

El mecanismo se basa en determinar dos factores de corrección: uno para la moneda chilena y otro para la moneda estadounidense, y opera de la siguiente forma ^[21]:

$$\text{Moneda Extranjera} = \frac{(\text{IPM}_{\text{USA}})_{\text{final}}}{(\text{IPM}_{\text{USA}})_{\text{inicial}}}$$

$$\text{Moneda Nacional} = \frac{(\text{TC}_{\text{Chile}})_{\text{inicial}}}{(\text{TC}_{\text{Chile}})_{\text{final}}} \cdot \frac{(\text{IPC}_{\text{Chile}})_{\text{final}}}{(\text{IPC}_{\text{Chile}})_{\text{inicial}}}$$

Ecuación 12: Fórmula para determinar los factores de corrección monetaria ^[21].

Estos factores de corrección son anuales según las estimaciones del tipo de cambio y precio del cobre, los que corporativamente se distribuyen en bandas de proyección inferior, media y superior. Como se ve en la tabla inferior, la proyección se realiza a seis años y a largo plazo, en base a una moneda presupuestada en enero del 2017 que es corregida en base a la planificación realizada en noviembre de ese mismo año.

Tabla 21: Factores de corrección monetaria según proyección media de TC y precio del cobre.

Económicos	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
IPC Chile	Moneda	116,8	116,8	116,8	116,8	116,8	116,8	116,8
IPM EE. UU.	ppto.	191,2	191,2	191,2	191,2	191,2	191,2	191,2
Tipo de cambio	enero 2017	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0
IPC Chile	Moneda	115,4	115,4	115,4	115,4	115,4	115,4	115,4
IPM EE. UU.	pln.	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2	193,2
Tipo de cambio	nov. 2017	649,0	636,0	644,0	643,0	643,0	658,0	658,0
Factores de corrección monetaria	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Moneda extranjera (USD)	ratio	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Moneda nacional (CLP)	ratio	1,06	1,09	1,07	1,07	1,08	1,05	1,05

3.2 BALANCE DE MASA FURE

Una pieza fundamental para realizar los modelos técnico – económicos es el balance másico de la fundición y refinería, ya que es el que se vincula con las distintas tarifas presentes en el modelo para, de esta manera, determinar todos los consumos de los insumos principales y los gastos de los secundarios. Se busca establecer y calcular flujos másicos específicos (toneladas métricas húmedas, secas o finas) para calcular consumos y gastos, lo que requiere completar todo el balance FURE por operación unitaria.

Tabla 22: Descripción de flujos requeridos para cálculo de consumos y gastos.

Proceso Operativo	Operaciones Unitarias	Flujo requerido	Uni.
Fundición	Recepción y Mezcla	Toneladas métricas húmedas de concentrado mezclado alimentadas.	tmh
	Fusión	Toneladas métricas secas de concentrado mezclado alimentadas.	tms
	Conversión	Toneladas métricas finas de Cobre Nuevo producidas.	tmf
	Refinación y Moldeo	Toneladas métricas finas de Cobre Moldeado (Ánodos).	tmf
	Plantas de Limp. de Gases	Toneladas métricas de Ácido Sulfúrico producidas.	tm
	Plantas de Oxígeno	Toneladas métricas de oxígeno requeridas por la fundición.	tm
Refinería	Electrorrefinación	Toneladas métricas finas de Cobre Despachado (Cátodos).	tmf
	Trat. Barro anódico	Kilogramos de barro anódico crudo generado.	kg

La planilla base API Referente N15FP15 contiene un plan de producción abreviado por operación unitaria que solo considera el tonelaje procesado o producido en cada una de éstas, pero no está parametrizado mediante un cálculo previo, por lo que estos flujos son utilizados solo para calcular las tarifas y precios unitarios faltantes de los insumos en los “pre – modelos” y no para el balance, del que se utiliza solamente el flujo de mineral seco entrante a los hornos de fusión (el que se modifica según las definiciones operativas a largo plazo), considerando un horizonte temporal que inicia el año 2017 y culmina el 2039, al igual que la planilla N15FP15.

Por otro lado, el proyecto Chuquicamata Subterráneo (planilla auxiliar) contiene dos planillas claves que dan cuenta del balance de masa de la división y que contienen el detalle de todos los algoritmos para confeccionar los balances FURE: “Reformulación 2017 – FUCO V13” y “Reformulación 2017 – REF V13”, las que desmenuzan el balance de la fundición y la refinería, respectivamente. Sin embargo, estas planillas exceden el nivel de detalle que se requiere, ya que realiza el balance por elemento considerando no solo cobre, sino que oro, plata, antimonio y arsénico, con múltiples vínculos a otras planillas que dificultan su comprensión. Además, estas fuentes de información contienen datos y flujos obsoletos, que deben ser actualizados, y errores de indexación, por lo que, para corregir estos datos por valores más realistas, el balance se realiza con la cooperación de la Gerencia de Recursos Mineros (GRM) de Casa Matriz, los que disponen de un Balance FURE Corporativo ya validado.

Debido a la diferencia radical entre los balances de los proyectos anteriores (planillas base y auxiliar), lo que se busca es realizar un balance intermedio que represente en toda su envergadura

a la Fundición y Refinería Chuquicamata, dejando a la vista los algoritmos que la configuran, a diferencia al balance abreviado del proyecto N15FP15, y utilizando parámetros clave necesarios y suficientes (leyes, recuperaciones, tonelajes, capacidades) de los metales de interés correspondientes.

3.2.1 Diagrama de flujos FURE detallado de la División Chuquicamata

La Fundición y Refinería Chuquicamata es la unidad más compleja de Codelco, debido a que posee múltiples tipos de concentrado (propio, concentrado de la División Radomiro Tomic, calcinas de División Ministro Hales, calcinas de polvos metalúrgicos y concentrado de escoria) que se deben mezclar en proporciones definidas según un balance de calor macro, que varía en base a las cantidades iniciales de cobre, azufre y arsénico (fundamentalmente) de cada uno de estos flujos. Luego, se obtiene un concentrado final mezclado que es enviado a los dos reactores de fusión (se realiza el balance de las dos líneas de fusión a pesar de que el Convertidor Teniente cesa su operación a fines del 2018, ya que las Fundiciones Potrerillos y Caletones sí poseen esta tecnología; por lo tanto, los parámetros del CT quedan indexados, vinculados y en calidad de modificables según los datos de cada división). Además, la refinería está sobredimensionada por lo que, para completar su capacidad, se debe recurrir a la compra de ánodos externos (provenientes de la División El Teniente o de la Fundición Altonorte), que permitan el uso óptimo de estas instalaciones. Esto se ve acentuado con la salida de una de las líneas de fusión.

Todas estas condiciones distinguen a la Fundición y Refinería Chuquicamata de las otras fundiciones de Codelco, por lo que su balance másico es mucho más complejo que el de las otras dos divisiones, lo que representa una ventaja en el sentido de que se modela la división más compleja y completa de todas, capturando gran parte de las tecnologías utilizadas por estas tres fundiciones.

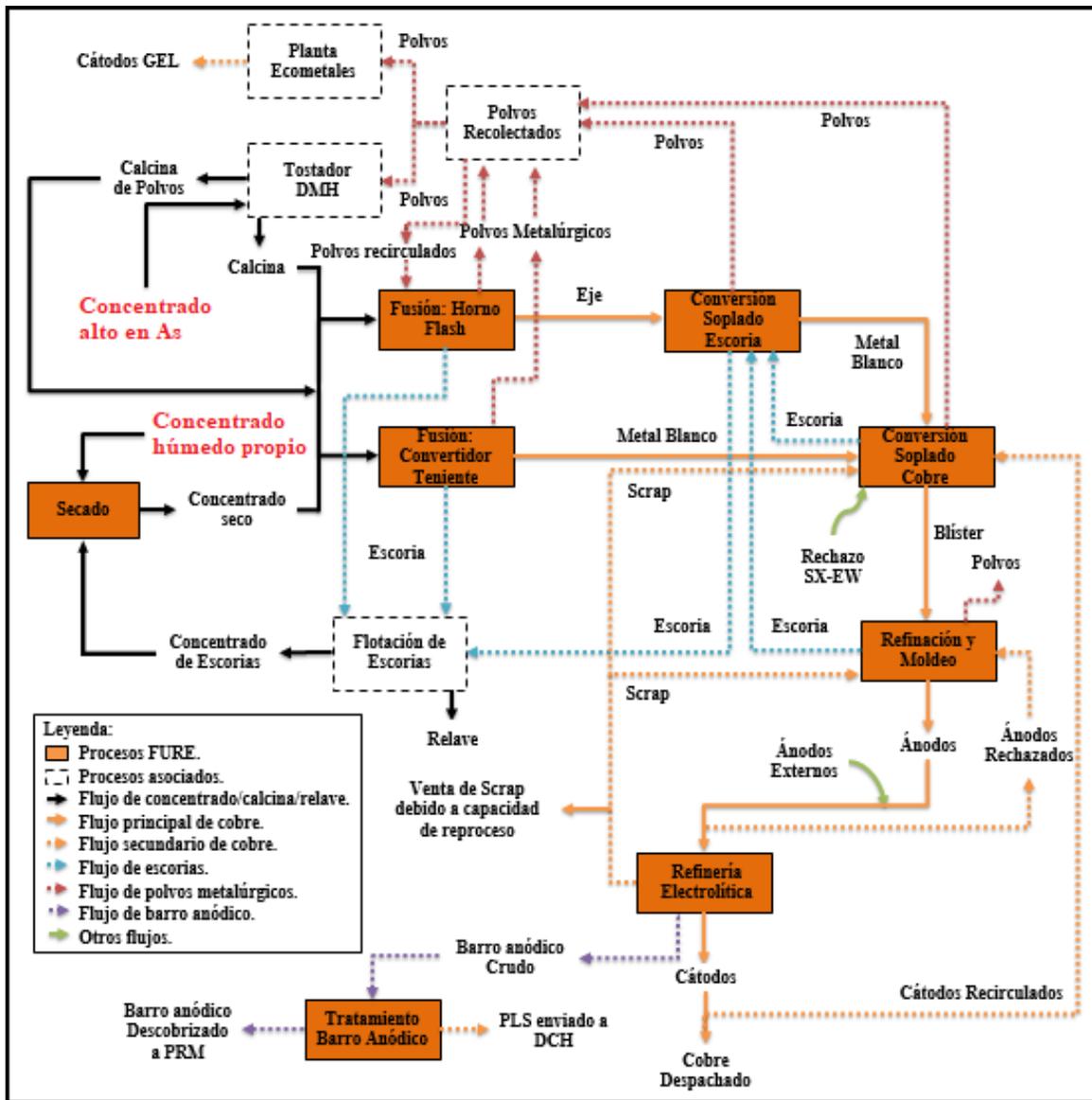


Ilustración 31: Diagrama de flujos FURE de la DCH detallado.

3.2.2 Balance de masa FURE estandarizado

En primer lugar, se debe tener claro el detalle de todos los concentrados y calcinas entrantes a la fundición, es decir, las leyes de cobre, arsénico y azufre de todas las especies, dada la importancia de estos elementos tanto por la cantidad de azufre y arsénico emitidos al ambiente como por el balance de calor en los hornos de fusión, balance que no se realiza debido a que los datos entregados por la GRM ya contienen la representación de este balance (es decir, es un *input* para el balance de masa). Luego, a modo de simplificación, los tonelajes de las calcinas se consideran un *input* y pueden ser modificados por el usuario, mientras que el tonelaje de concentrado propio corresponde a la diferencia entre la capacidad de la fundición y las calcinas de DMH y recirculaciones (concentrado de escorias, calcinas de polvos y polvos metalúrgicos recirculados al Horno Flash).

Tabla 23: Caracterización de los tipos de concentrado/calcina adicionadas a la fusión.

Flujos a fusión	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Concentrado Propio	ktms	823,2	729,1	514,2	482,9	567,0	472,6	543,8
	% Cu	28,01	29,47	30,37	29,31	28,56	28,83	28,98
	% As	1,07	0,41	1,17	1,02	0,94	1,23	1,42
	% S	34,85	33,24	39,00	39,76	35,27	34,80	36,08
Calcinas DMH	ktms	317,9	414,7	491,3	526,4	444,5	291,3	467,9
	% Cu	34,19	33,46	32,36	31,62	31,89	31,17	31,12
	% As	0,29	0,29	0,28	0,29	0,29	0,33	0,31
	% S	22,78	19,18	19,29	19,62	19,30	19,09	19,57
Concentrado de Escorias	ktms	138,7	154,7	103,1	100,8	99,4	74,5	99,3
	% Cu	37,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00
	% As	0,83	0,14	0,64	0,56	0,58	0,79	0,81
	% S	11,75	8,86	9,11	9,37	9,12	9,38	9,17
Calcinas de polvos	ktms	18,4	23,6	31,8	31,1	30,7	23,0	30,6
	% Cu	12,74	15,01	16,51	16,51	16,51	16,49	16,51
	% As	1,14	0,58	0,89	0,84	0,76	0,88	0,91
	% S	5,02	5,24	3,85	3,79	3,90	4,48	4,07
Mezcla	ktms	1.298,2	1.322,1	1.140,4	1.141,2	1.141,6	861,4	1.141,6
	% Cu	30,27	30,99	31,17	30,44	30,01	29,74	29,96
	% As	0,85	0,35	0,73	0,64	0,65	0,88	0,90
	% S	29,00	25,48	26,82	26,80	25,93	26,48	26,11

Las leyes del concentrado mezclado se calculan mediante el promedio ponderado de las leyes y toneladas respectivos:

$$Ley_X^{Mezcla}[\%] = \frac{1}{tms_{Mezcla}} \cdot \sum_y Ley_X^y[\%] \cdot tms_y$$

Ecuación 13: Cálculo de la ley del elemento “X” en el concentrado mezclado, según los concentrados parciales “y”.

Por otro lado, se deben describir todos los flujos de especies que existen tanto en la fundición como en la refinera (procesos FURE) con un alto nivel de detalle, de tal modo de visualizarlo como un modelo de múltiples subprocesos con entradas, salidas y recirculaciones y con variados contenidos de cobre y otros metales pertinentes. Luego, para cada operación unitaria de la fundición se consideran **Factores de distribución de cobre** y **Leyes de cobre** para eje, escoria, polvos, blíster y ánodos, los que son datos de ingreso. Estos valores son actualizados en conjunto con la GRM para que sean consistentes entre ellos, dado los errores que presentaban las planillas originales.

Los factores de distribución son constantes para efectos del modelo, pero provienen de un cálculo físico – químico que debe ser actualizado constantemente para lograr valores más precisos, al

contrario de las leyes de cobre, que poseen una dispersión de $\pm 3\%$ y son operativamente gestionables.

Tabla 24: Leyes de cobre de los flujos de salida de los reactores presentes en la fundición.

Leyes de Cu	Uni.	Tipo	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Horno Flash	%	Eje	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00	62,00
	%	Escoria	2,50	2,50	3,50 ¹	3,50	3,50	3,50	2,50
	%	Polvo	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00
Convertidor Teniente	%	MB	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00	72,00
	%	Escoria	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	%	Polvo	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Convertidor PS Soplado a Escoria	%	MB	74,30	74,30	74,30	74,30	74,30	74,30	74,30
	%	Escoria	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
	%	Polvo	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Convertidor PS Soplado a Cobre	%	Blíster	98,31	98,31	98,31	98,31	98,31	98,31	98,31
	%	Escoria	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00	35,00
	%	Polvo	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Horno Anódico	%	Ánodo	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60
	%	Escoria	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00	30,00
	%	Polvo	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90

Tabla 25: Factores de distribución de cobre por equipo y proceso.

F. Dist. de Cu	Uni.	Tipo	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Horno Flash	%	Eje	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20	93,20
	%	Escoria	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77	2,77
	%	Polvo	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03	4,03
Convertidor Teniente	%	MB	81,73	81,73	81,73	81,73	81,73	81,73	81,73
	%	Escoria	17,87	17,87	17,87	17,87	17,87	17,87	17,87
	%	Polvo	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Convertidor PS Soplado a Escoria	%	MB	91,27	91,27	91,27	91,27	91,27	91,27	91,27
	%	Escoria	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
	%	Polvo	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
Convertidor PS Soplado a Cobre	%	Blíster	95,80	95,80	95,80	95,80	95,80	95,80	95,80
	%	Escoria	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
	%	Polvo	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Horno Anódico	%	Ánodo	98,67	98,67	98,67	98,67	98,67	98,67	98,67
	%	Escoria	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32	1,32
	%	Polvo	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

¹ La ley de cobre de la escoria del Horno Flash aumenta un punto porcentual desde el 2019 al 2022, lo que se debe a los trabajos realizados para ampliar su capacidad. En el largo plazo, retoma su valor histórico.

- 1. Recepción y Mezcla:** Para calcular las tmh alimentadas se utiliza la humedad estándar de 9% de todos los concentrados de la corporación. Se entiende de esta ecuación que el *input* principal es la capacidad de fusión (tms alimentadas) y no las tmh, a pesar de que esta etapa sea la primera operación unitaria de la fundición. Este método es una simplificación de la realidad ya que, como se dijo, existen distintos tipos de concentrados y calcinas con humedades distintas entre sí.

$$\text{Alimentación a Fundición [tmh]} = \text{Capacidad de Fusión [tms]} \cdot (1 + \text{Humedad}[\%])$$

Ecuación 14: Cálculo de las toneladas métricas húmedas alimentadas a la fundición.

Tabla 26: Tonelaje húmedo total procesado (concentrado y calcinas totales procesadas).

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Conc. húmedo HF	ktmh	683,8	750,5	1.243,2	1.243,9	1.244,4	938,9	1.244,4
Conc. húmedo CT	ktmh	731,2	690,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ENTRADA TOTAL	ktmh	1.415,0	1.441,1	1.243,2	1.243,9	1.244,4	938,9	1.244,4
Salidas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Conc. seco HF	ktms	627,4	688,6	1.140,5	1.141,2	1.141,6	861,4	1.141,6
Conc. seco CT	ktms	670,8	633,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SALIDA TOTAL	ktms	1.298,2	1.322,2	1.140,5	1.141,2	1.141,6	861,4	1.141,6

- 2. Fusión:** Las tms alimentadas representan la capacidad de tratamiento de la fundición, pero que se corresponde con la suma de distintos tipos de concentrado, como se menciona en la Tabla 23, de la que se desprende un concentrado final mezclado. La cantidad de concentrado total real entrante a la fundición se debe complementar con la recirculación de parte de los polvos metalúrgicos (alrededor del 30% de los polvos de fusión y conversión), con lo que, aplicando nuevamente la fórmula del concentrado mezclado, se logra obtener el tonelaje y las leyes de los elementos del flujo efectivamente ingresados a la fusión. Luego, mediante la aplicación de los Factores de distribución, se establecen las toneladas métricas finas (tmf) de eje, metal blanco, escoria y polvos en cada uno de los dos hornos de fusión. Finalmente, mediante la ley de cobre de estas especies se puede determinar las tms de cada producto.

$$\text{tmf}_{\text{Eje,MB,Esc,Polv}} = \text{tmf}_{\text{input}} \cdot \text{Factor de distribución Cu}_{\text{Eje,MB,Esc,Polv}}$$

$$\text{tms}_{\text{Eje,MB,Esc,Polv}} = \frac{\text{tmf}_{\text{Eje,MB,Esc,Polv}}}{\text{Ley}_{\text{Cu}}}$$

Ecuación 15: Cálculo de las tms y tmf según leyes y Factores de distribución.

Debido al transporte de los concentrados y calcinas, se consideran pérdidas por manejo de materiales de alrededor de 0,4%, los que se asignan a las tms y tmf ingresadas a los hornos de fusión.

Finalmente, el eje generado por el Horno Flash es enviado a los hornos de Conversión en Soplado a Escoria, el metal blanco generado en el Convertidor Teniente es procesado en la Conversión en Soplado a Cobre, las escorias van a Flotación y los polvos generados se recolectan y se envían a tratamiento o recirculación.

Tabla 27: Balance másico de la etapa de Fusión.

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Conc. seco total	ktms	1.298,2	1.322,2	1.140,5	1.141,2	1.141,6	861,4	1.141,6
Conc. seco HF	ktms	627,4	688,6	1.140,5	1.141,2	1.141,6	861,4	1.141,6
Polvos Recirc. HF	ktms	20,0	21,8	29,5	28,8	28,4	21,3	28,4
ENT. TOTAL HF ²	ktms	644,8	707,6	1.165,3	1.165,3	1.165,3	879,2	1.165,3
Conc. seco CT	ktms	670,8	633,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polvos Recirc. CT	ktms	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ENT. TOTAL CT ²	ktms	668,1	631,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Eje HF	ktms	288,7	324,4	539,5	527,3	519,9	388,8	519,2
Escoria HF	ktms	212,8	239,1	284,0	277,6	273,7	204,7	382,7
Polvos HF	ktms	43,0	48,3	80,4	78,5	77,4	57,9	77,3
SAL. TOTAL HF	ktms	544,5	611,8	903,9	883,4	871,0	651,4	979,2
Metal Blanco CT	ktms	229,5	222,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escoria CT	ktms	361,4	349,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polvos CT	ktms	10,1	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SAL. TOTAL CT	ktms	601,0	581,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

² Se consideran pérdidas por manejo de materiales del 0,4% del tonelaje total enviado a los hornos de fusión.

Tabla 28: Balance de cobre en Fusión por equipo.

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Concentrado seco total	ktmf	392,9	409,8	355,5	347,4	342,6	256,2	342,1
Concentrado seco HF	ktmf	189,9	213,4	355,5	347,4	342,6	256,2	342,1
Polvos Recirculados HF	ktmf	3,0	3,3	4,9	4,8	4,7	3,5	4,7
ENTRADA TOTAL HF³	ktmf	192,1	215,8	358,9	350,8	345,9	258,7	345,4
Concentrado seco CT	ktmf	203,0	196,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polvos Recirculados CT	ktmf	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ENTRADA TOTAL CT³	ktmf	202,2	195,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Eje de HF	ktmf	179,0	201,1	334,5	326,9	322,4	241,1	321,9
Escoria de HF	ktmf	5,3	6,0	9,9	9,7	9,6	7,2	9,6
Polvos de HF	ktmf	7,8	8,7	14,5	14,2	13,9	10,4	13,9
SALIDA TOTAL HF	ktmf	192,1	215,8	358,9	350,8	345,9	258,7	345,4
Metal Blanco de CT	ktmf	165,3	159,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escoria de CT	ktmf	36,1	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polvos de CT	ktmf	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
SALIDA TOTAL CT	ktms	202,2	195,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

- 3. Conversión Soplado a Escoria o Conversión 1°:** Esta etapa recibe la mata o eje enviada desde el HF y las recirculaciones de escorias de los procesos siguientes de Soplado a Cobre y Refino y Moldeo, dado que estos dos últimos generan una escoria con alto contenido de cobre (35 y 30% respectivamente). Aplicando las mismas ecuaciones anteriores, pero utilizando los Factores de distribución y las leyes de cobre de esta etapa, se puede calcular el metal blanco (enviado a Soplado a Cobre), la escoria (tratada en flotación de escorias) y los polvos generados (a tratamiento de polvos o recirculación).

Tabla 29: Balance de cobre en Conversión Soplado a Escoria.

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Eje HF	ktmf	179,0	201,1	334,5	326,9	322,4	241,1	321,9
Escoria Soplado a Cobre	ktmf	15,4	16,0	14,4	14,1	13,9	10,8	13,9
Escoria de Refino	ktmf	5,7	6,4	5,8	5,8	5,7	4,7	5,7
ENTRADA TOTAL	ktmf	200,1	223,5	354,7	346,8	342,0	256,6	341,5
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Metal Blanco	ktmf	182,6	204,0	323,8	316,5	312,1	234,2	311,7
Escoria	ktmf	16,9	18,8	29,9	29,2	28,8	21,6	28,8
Polvos	ktmf	0,6	0,7	1,1	1,0	1,0	0,8	1,0
SALIDA TOTAL	ktmf	200,1	223,5	354,7	346,8	342,0	256,6	341,5

³ Se consideran pérdidas por manejo de materiales del 0,4% del tonelaje total enviado a los hornos de fusión.

- 4. Conversión Soplado a Cobre o Conversión 2°:** Este proceso recibe el metal blanco producido en el CT y en la Conversión Soplado a Escoria y múltiples recirculaciones: cátodos rechazados provenientes de la ER (para el modelo de fundición es un *input*, mientras que para el de refinería está calculado según los cátodos producidos), una entrada fija de cátodos rechazados provenientes del procesamiento hidrometalúrgico de minerales oxidados (SX – EW) y otra cantidad fija de *scrap* proveniente de la electrorrefinación. Tanto los cátodos provenientes del proceso SX – EW como la cantidad de chatarra de cobre son un *input* para ambos modelos.

Tabla 30: Balance de cobre en Conversión Soplado a Cobre.

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Metal Blanco Soplado Esc.	ktmf	182,6	204,0	323,8	316,5	312,1	234,2	311,7
Metal Blanco de CT	ktmf	165,3	159,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Cátodos recirculados	ktmf	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Rechazo SX – EW	ktmf	0,8	0,6	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
<i>Scrap</i>	ktmf	34,9	34,9	34,9	34,9	34,9	34,9	34,9
ENTRADA TOTAL	ktmf	384,0	399,8	359,8	352,0	347,6	269,7	347,2
Salidas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Cu NUEVO	ktmf	333,3	348,6	310,2	303,2	299,0	224,3	298,6
Total de Cu Blíster	ktmf	367,9	383,0	344,7	337,2	333,0	258,4	332,6
Escoria	ktmf	15,4	16,0	14,4	14,1	13,9	10,8	13,9
Polvos	ktmf	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7
SALIDA TOTAL	ktmf	384,0	399,8	359,8	352,0	347,6	269,7	347,2

Nuevamente se utilizan las ecuaciones anteriores (Ecuación 16) y los factores de distribución y leyes de especies correspondientes para obtener los flujos de salida. Para efectos del modelo se hace una distinción entre Cobre Nuevo, que es el que se vincula con las tarifas de los insumos, y el flujo total enviado al Refino y Moldeo: el Cu Nuevo solo considera el cobre proveniente del metal blanco ingresado a los hornos (del CT y de Conversión Soplado a Escoria), mientras que el flujo total de Cobre Blíster que se envía al refino considera también el cobre proveniente de las recirculaciones. Finalmente, la escoria se recircula a Conversión Soplado a Escoria y los polvos se recolectan para ser enviados al Tratamiento de Polvos o a la recirculación en el HF.

- 5. Refinación y Moldeo:** Esta operación unitaria recibe el cobre blíster desde la Conversión y las recirculaciones de *scrap* y de ánodos rechazados. La cantidad de *scrap* reprocessada corresponde al resto de chatarra no tratada en la Conversión Soplado a Cobre, en donde existe una diferencia entre los dos modelos: para el de fundición esta cantidad es un *input* ingresado manualmente (al igual que la proporción de chatarra recirculada a la conversión, lo que implica que la cantidad de *scrap* total es digitada por el usuario), mientras que para

el modelo de refinería, se calcula en base a la cantidad de *scrap* producido, según el Factor de Generación de *Scrap*, menos la cantidad procesada en la conversión, que es una entrada al modelo. Finalmente, la cantidad de ánodos rechazados recirculados se estima en el 5% del total de ánodos (internos y externos, ya que la Refinería Electrolítica está sobredimensionada, por lo que se requiere la compra de ánodos) y se devuelven a la etapa de refino.

La Fundición Chuquicamata posee una capacidad máxima de reproceso de material en sus hornos de refino, es decir, la cantidad de chatarra y de ánodos rechazados que se pueden reprocesar tiene un límite y, si se supera ese límite, se debe recurrir a la venta del *scrap* sobrante, ya que se prioriza la fundición de ánodos. Este tope de reprocesamiento se estima en 100.000 tmf/año para la fundición de Chuquicamata, pero es un factor inherente a la capacidad de los hornos anódicos de cada planta.

$$Scrap \text{ recirc. a Refino [tmf]} = Scrap \text{ total generado ER} - Scrap \text{ enviado a C. Sop. a Cobre}$$

Ecuación 16: Scrap recirculado a la etapa de Refino y Moldeo.

$$\text{Toneladas repr. [tmf]} = \begin{cases} Scrap + \text{Ánodos rech.} & \text{si } Scrap + \text{Ánodos rech.} < \text{Cap. de repr.} \\ \text{Cap. de repr} & \text{si } Scrap + \text{Ánodos rech.} \geq \text{Cap. de repr.} \end{cases}$$

$$\text{Venta Scrap [tmf]} = \begin{cases} 0 & \text{si } Scrap + \text{Án. rech.} < \text{Cap. de repr.} \\ Scrap + \text{Án. rech.} - \text{Cap. de repr.} & \text{si } Scrap + \text{Án. rech.} \geq \text{Cap. de repr.} \end{cases}$$

Ecuación 17: Condición de reproceso y de venta de chatarra de cobre en la Refinación.

Análogamente a los procesos anteriores, se utilizan los Factores de distribución de cobre y la Ecuación 15 para calcular todos los flujos de salida: el Cobre Moldeado (ánodos), que se envían a la Electrorrefinación, la escoria, que es recirculada a la Conversión Soplado a Escoria, una cantidad de *scrap* variable que va a venta y polvos metalúrgicos que, actualmente, son una pérdida de cobre hasta que el nuevo sistema de captura de gases de refino esté operativo.

Tabla 31: Balance de cobre en Refino y Moldeo.

Entradas	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Cu blíster	ktmf	367,9	383,0	344,7	337,2	333,0	258,3	332,5
<i>Scrap</i>	ktmf	35,6	87,7	76,4	71,4	70,6	68,8	69,2
Ánodos recirculados	ktmf	27,5	34,4	34,6	33,1	32,8	32,3	32,4
ENTRADA TOTAL	ktmf	430,9	505,1	455,7	441,7	436,4	359,4	434,1
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Cu MOLDEADO	ktmf	425,2	476,2	438,4	431,1	426,9	353,2	426,4
Escoria	ktmf	5,7	6,4	5,9	5,8	5,7	4,7	5,7
Polvos	ktmf	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
<i>Scrap a Venta</i>	ktmf	0,0	22,5	11,4	4,8	3,8	1,5	2,0
SALIDA TOT. REAL ⁴	ktmf	430,9	482,6	444,3	436,9	432,6	357,9	432,1
SALIDA TOTAL	ktmf	430,9	505,1	455,7	441,7	436,4	359,4	434,1

- 6. Plantas de Ácido:** Para calcular las toneladas de ácido producidas por las plantas de tratamiento de gases se utiliza una ecuación corporativa facilitada por la GRM, en donde se estandariza la manera de calcular este tonelaje en base a la normativa dada por el DS N°28.

El Decreto Supremo N°28 establece el límite de emisión anual de las fundiciones existentes en Chile ^[26], además de definir una captura y fijación mínima obligatoria del 95% para estos gases. Las concentraciones máximas de SO₂ a emitir por las Plantas de Ácido debe ser de 600 ppm y la de As de 1 mg/Nm³, mientras que los secadores y los HLE deben emitir una concentración de material particulado inferior o igual a 50 mg/Nm³ y, finalmente, las chimeneas de los HA deben mantener un nivel de opacidad de los humos inferior o igual a 20%, según método de escala Ringelman o método 9, de Determinación visual de la opacidad de las emisiones de fuentes estacionaras, de acuerdo al Código de Regulaciones Federales (CFR) 20 de los Estados Unidos, Parte 60 ^[26].

Tabla 32: Límites máximos de emisiones de SO₂ y As para fuentes existentes.

Fuente emisora	SO₂ [tpa]	As [tpa]
Chuquicamata	49.700	476
Caletones	47.680	130
Potrerrillos	24.400	157

Según las indicaciones dadas por este decreto, se establece una fórmula corporativa para calcular las toneladas de ácido sulfúrico producidas en base al tonelaje de azufre entrante a la fundición, la captura requerida por ley (se proyecta una captura mayor a la fijada por el

⁴ No se considera el *Scrap* a venta.

MMA), la fijación de S en otros materiales (mata, escoria, polvos, pérdidas varias) y la concentración del ácido (98,5%).

$$\text{Ácido sulfúrico [t]} = \text{Azufre en concentrado mezclado[t]} \cdot \frac{(\text{Captación} - \text{Fijación})[\%]}{\frac{\text{Ley}_{\text{S}}^{\text{H}_2\text{SO}_4} [\%]}{\text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 [\%]}}$$

Ecuación 18: Fórmula corporativa de cálculo de las toneladas de Ácido Sulfúrico producidas.

Tabla 33: Producción de ácido sulfúrico comercial.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Azufre aliment. a fundición	ktmf	378,4	339,0	308,0	307,9	298,0	229,8	300,2
Captación de S	%	89,00	90,72	95,02	96,57	96,57	96,57	96,96
Fijación de S	%	14,91	14,71	8,23	6,93	6,93	6,93	6,60
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Producción de H₂SO₄	ktm	870,7	800,0	830,1	857,1	829,6	639,8	842,4

7. Planta de Oxígeno: Para determinar la cantidad de oxígeno requerido por los hornos de fusión y conversión se debe realizar un balance térmico que involucra múltiples reacciones químicas que escapan de los objetivos y alcances de este trabajo por lo que, a modo de simplificación, se calculan las toneladas de oxígeno requeridas en base a la capacidad de fusión, multiplicadas por un Factor de Producción de Oxígeno (23% en el largo plazo).

Tabla 34: Cálculo del Oxígeno requerido por la fundición.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Conc. Mezclado	ktms	1.318,2	1.344,0	1.170,0	1.170,0	1.170,0	882,7	1.170,0
F. prod. de Ox.	%	22,13	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00	23,00
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
OX. TOTAL	ktm	291,8	309,1	269,1	269,1	269,1	203,0	269,1

8. Flotación de Escorias: Las escorias de fusión y de conversión se tratan mineralúrgicamente mediante un proceso de flotación para producir un concentrado de escorias que es retornado a la fundición, para lo que se utiliza, a modo de síntesis, una recuperación de cobre global de 88%, con lo que se puede calcular la cantidad de cobre contenido en este concentrado y las toneladas métricas secas efectivamente enviadas a la fundición.

$$\text{Concentrado de Escorias[tms]} = \frac{\text{Escorias totales[tmf]} \cdot \text{Recuperación}[\%]}{\text{Ley}_{\text{Cu}}^{\text{Concentrado de Escorias}} [\%]}$$

Ecuación 19: Concentrado de Escorias retornado a la fundición.

Como cualquier proceso de flotación de minerales, se generan sendas cantidades de relaves mineros, los que son depositados en los lugares que la mina ya tiene predispuestos para este tipo de desechos, los que están debidamente reglamentados.

Tabla 35: Producción de Concentrado de Escoria.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Escorias HF	ktmf	5,3	6,0	9,9	9,7	9,6	7,2	9,6
Escorias CT	ktmf	36,1	35,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Escorias Conversión 1°	ktmf	16,9	18,8	29,9	29,2	28,8	21,6	28,8
ESCORIA TOTAL	ktmf	58,3	59,8	39,8	38,9	38,4	28,8	38,4
	ktms	742,9	777,1	583,1	569,9	562,0	421,0	670,5
	% Cu	7,85	7,69	6,83	6,83	6,83	6,84	5,72
Recuperación de Cu	%	88,00	88,00	88,00	88,00	88,00	88,00	88,00
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
CONCENTRADO DE ESCORIAS	ktms	138,7	154,7	103,1	100,8	99,4	74,5	99,3
	ktmf	51,3	52,6	35,1	34,3	33,8	25,3	33,7
	% Cu	37,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00	34,00
	% As	0,83	0,14	0,64	0,56	0,58	0,79	0,81
	% S	11,75	8,86	9,11	9,37	9,12	9,38	9,17

- 9. Tratamiento de Polvos:** Por medio del sistema de tratamiento de gases se logran recolectar gran parte de los polvos producidos por los hornos de fusión y conversión, de los cuales alrededor del 30% son recirculados directamente al Horno Flash (la fracción gruesa de los polvos), mientras que el resto se divide equitativamente entre dos destinos posibles: la planta de Ecometales, filial de Codelco, que lixivia estos polvos, abate el arsénico y el antimonio presentes en este PLS para, finalmente, producir cátodos comerciales (denominados cátodos GEL); o el tostador de la División Ministro Hales, que produce calcina de polvos metalúrgicos que es retornada a la fundición de Chuquicamata. Tanto para los polvos enviados a Ecometales como para los enviados al tostador DMH se consideran pérdidas de material por manejo del 0,4% (al igual que para los hornos de fusión) y, mediante recuperaciones sucesivas de masa y de cobre según los procesos internos de cada planta, se logra determinar las toneladas de cobre fino efectivamente recuperadas en cada una de ellas.

Tabla 36: Balance de masa y cobre de polvos metalúrgicos.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Polvos HF	ktms	43,0	48,3	80,4	78,5	77,4	57,9	77,3
	ktmf	7,8	8,7	14,5	14,2	13,9	10,4	13,9
Polvos CT	ktms	10,1	9,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	ktmf	0,8	0,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Polvos Conversión Soplado Escoria	ktms	6,0	6,7	10,6	10,4	10,3	7,7	10,2
	ktmf	0,6	0,7	1,1	1,0	1,0	0,8	1,0
Polvos Conversión Soplado Cobre	ktms	7,7	8,0	7,2	7,0	6,9	5,4	6,9
	ktmf	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,5	0,7
TOTAL DE POLVOS	ktms	66,8	72,8	98,2	95,9	94,6	71,0	94,4
	ktmf	9,9	11,0	16,3	15,9	15,6	11,7	15,6
	% Cu	14,85	15,04	16,55	16,55	16,55	16,52	16,55
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Polvos Recirculados a HF	ktms	20,0	21,8	29,5	28,8	28,4	21,3	28,3
	ktmf	3,0	3,3	4,9	4,8	4,7	3,5	4,7
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Polvos a Ecometales⁵	ktms	23,3	25,4	34,2	33,4	33,0	24,7	32,9
	ktmf	3,4	3,8	5,7	5,5	5,5	4,1	5,5
Rec. Cu en PTPF	%	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00	85,00
Rec. Cu PAAA	%	96,89	96,89	96,89	96,89	96,89	96,89	96,89
Rec. Cu SX – EW	%	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00
Cátodos GEL	ktmf	2,8	3,1	4,6	4,5	4,4	3,3	4,4
	% Cu	99,99						
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Polvos a Tostador DMH⁵	ktms	23,3	25,4	34,2	33,4	33,0	24,7	32,9
	ktmf	3,4	3,8	5,7	5,5	5,5	4,1	5,5
Rec. de masa	%	78,84	93,00	93,00	93,00	93,00	93,00	93,00
Rec. de Cu	%	85,81	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80
Calcina de polvos	ktms	18,4	23,6	31,8	31,1	30,7	23,0	30,6
	ktmf	2,3	3,5	5,3	5,1	5,1	3,8	5,1

10. Electrorrefinación: Esta etapa recibe los ánodos moldeados por la fundición y una cantidad variable de ánodos externos, debido a que esta refinería está sobredimensionada y posee capacidad ociosa que se completa con estos ánodos (provenientes de Altonorte o de El Teniente). Como se dijo en la etapa de Refinación y Moldeo, el rechazo anódico es del 5% del total de ánodos (internos más externos), los que son recirculados a la etapa de refino. De la misma forma, el rechazo catódico debido a la calidad de los cátodos se estima en 0,1%, cantidad que es recirculada a la etapa de Conversión Soplado a Cobre.

⁵ Se consideran pérdidas por manejo de materiales del 0,4% del tonelaje de polvos no recirculados.

Tabla 37: Balance de masa y cobre en la Electrorrefinería.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Cu MOLDEADO	ktms	426,9	478,1	440,1	432,8	428,6	354,6	428,1
	ktmf	425,2	476,2	438,3	431,0	426,9	353,2	426,4
	% Cu	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60
	% As	0,19	0,11	0,25	0,24	0,21	0,23	0,25
	% Sb	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03
	ppm Ag	753,5	870,8	917,5	1.025,1	886,2	712,1	917,7
	ppm Au	2,2	2,3	2,7	2,7	2,5	2,1	2,3
Ánodos externos	ktms	124,5	214,4	255,4	231,4	231,0	293,9	222,4
	ktmf	124,0	213,5	254,4	230,5	230,1	292,7	221,5
	% Cu	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60	99,60
	% As	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,13
	% Sb	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03
	ppm Ag	644,6	636,4	622,4	627,2	620,4	591,6	625,8
	ppm Au	4,7	4,6	4,4	4,4	4,3	4,0	4,4
Capacidad Refinería	ktms	551,4	692,5	695,5	664,2	659,6	648,5	650,5
	ktmf	549,2	689,7	692,7	661,5	657,0	645,9	647,9
Ánodos rechazados	ktms	27,5	34,6	34,8	33,2	33,0	32,4	32,5
	ktmf	27,4	34,4	34,6	33,1	32,9	32,3	32,4
Ánodos enviados a ER	ktms	523,9	657,9	660,7	631,0	626,6	616,1	618,0
	ktmf	521,8	655,3	658,1	628,4	624,1	613,6	615,5
	tmf As	934,1	739,4	1.351,3	1.252,6	1.148,2	1.166,4	1.307,2
	tmf Sb	114,5	175,6	207,2	253,6	195,9	155,2	202,6
	tmf Ag	381,8	525,2	534,6	559,3	497,0	405,1	505,5
	tmf Au	1,4	2,0	2,2	2,1	2,0	1,8	1,9
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Factor de Scrap	%	13,50	18,70	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
Scrap	ktms	70,7	123,0	111,7	106,6	105,9	104,1	104,4
	ktmf	70,4	122,5	111,2	106,2	105,5	103,7	104,0
Rec. ER	%	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80
Rech. catódico	ktmf	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Cu DESPACHADO	ktmf	450,0	531,1	545,3	520,7	517,1	508,4	510,0
	% Cu	99,96	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99	99,99

Por otro lado, se considera un Factor de Generación de chatarra de cobre (*scrap*) con respecto al total de ánodos enviados efectivamente a la refinería electrolítica (no se toma en cuenta el rechazo anódico), ánodos que se recirculan en la Conversión Soplado a Escoria y en la Refinería. Por lo tanto, para calcular la cantidad de cobre despachado, se utiliza la siguiente relación, en donde se obtienen valores similares al estimado por la Reformulación del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo, el cual estima valores máximos de producción de cátodos de 520.000 tmf anuales.

$$\text{Cu despachado [tmf]} = (\text{Án. enviados a ER} - \text{Scrap}) \cdot \text{Recuperación[\%]} - \text{Rechazo catódico}$$

Ecuación 20: Cálculo del Cu despachado (cátodos).

El subproducto de los cátodos depositado en el piso de las celdas de ER es el barro anódico, el que se envía a una Planta de Tratamiento de Barro Anódico o, según las planificaciones futuras, a la Planta Recuperadora de Metales (PRM).

11. Tratamiento de Barro Anódico: Los barros anódicos crudos (BAC) son recolectados y lixiviados para recuperar el cobre remanente, el que es retornado a la DCH, para su posterior tratamiento. El tonelaje de barro descubrizado (BAD) se calcula mediante las recuperaciones parciales de cada elemento de interés, y se envía a la PRM de Mejillones, la que produce cobre, oro, plata, paladio, platino, telurio y selenio comerciales.

Tabla 38: Balance de masa en la PTBA.

Entrada	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rec. de elementos en BAC	% Cu	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	% As y Sb	12,80	12,80	12,80	12,80	12,80	12,80	12,80
	% Au	81,49	81,49	81,49	81,49	81,49	81,49	81,49
	% Ag	83,09	83,09	83,09	83,09	83,09	83,09	83,09
	% Otros	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00	36,00
Barro Anódico Crudo	tmf Cu	459,2	576,6	579,1	553,0	549,2	540,0	541,7
	tmf As	119,5	94,6	172,9	160,3	146,9	149,2	167,3
	tmf Sb	14,6	22,5	26,5	32,4	25,1	19,9	25,9
	tmf Ag	311,2	428,0	435,6	455,8	405,0	330,1	411,9
	tmf Au	1,2	1,6	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5
	tmf otros	251,5	450,7	207,5	173,0	251,4	278,8	172,4
	tm	1.157,2	1.574,0	1.423,4	1.376,2	1.379,2	1.319,5	1.320,7
Salida	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rec. de elementos al BAD	% Cu	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	% As y Sb	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	% Au	99,00	99,00	99,00	99,00	99,00	99,00	99,00
	% Ag	99,50	99,50	99,50	99,50	99,50	99,50	99,50
	% Otros	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00	98,00
BAD	tmf Cu	4,6	5,8	5,8	5,5	5,5	5,4	5,4
	tmf As	13,1	10,4	19,0	17,6	16,2	16,4	18,4
	tmf Sb	1,6	2,5	2,9	3,6	2,8	2,2	2,9
	tmf Ag	308,1	423,7	431,3	451,2	400,9	326,8	407,8
	tmf Au	1,2	1,6	1,8	1,7	1,6	1,5	1,5
	tmf otros	246,5	441,7	203,4	169,5	246,4	273,2	168,9
	tm	575,1	885,7	664,2	649,1	673,4	625,5	604,9

Finalmente, y a modo de indicador, se calculan algunos KPI's importantes que permiten saber hacia dónde direccionar la gestión de esta parte del negocio.

$$R. FU[\%] = \frac{Cu \text{ Mold.} - Rch_{.1} \cdot F_1 - Rch_{.2} \cdot F_2 + ((Conc. Esc. + Calc. Plv.) \cdot F_3 + Cát. GEL + Scp \text{ Venta})[tmf]}{\frac{Concentrado \text{ total final a fusión [tmf]}{1 - Pérdida \text{ por manejo}[\%]}}$$

$$Rch_1 \cdot F_1 = (Cát. Rech. + Rechazo SXEW + Scrap)[tmf] \cdot F. Dist. Conv. 2^\circ \cdot F. Dist. Ref. y Mold.$$

$$Rechazo_2 \cdot Factor_2 = (\text{Án. Rech.} + Scrap)[tmf] \cdot F. Dist. Ref. y Mold.$$

$$Factor_3[\%] = F. Dist. HF \cdot F. Dist. Conv. 1^\circ \cdot F. Dist. Conv. 2^\circ \cdot F. Dist. Ref. y Mold.$$

Ecuación 21: Fórmula para determinar la Recuperación de la fundición⁶.

$$\text{Factor de Cu Nuevo}[\%] = \frac{Cu \text{ Nuevo}}{\frac{Concentrado \text{ total final a fusión [tmf]}{1 - Pérdida \text{ por manejo}[\%]}}$$

Ecuación 22: Fórmula para determinar el Factor de Cobre Nuevo.

$$F. Cu \text{ Mold.}[\%] = \begin{cases} \frac{Cu \text{ Mold.} - (Scrap^{Rf.yMd} + \text{Án. rech.}) \cdot F. Cu \text{ Án.}[\%]}{\frac{Concentrado \text{ total final a fusión [tmf]}{1 - Pérdida \text{ por manejo}[\%]}} & \text{si } Scrap + \text{Án. rech.} < Cap. repr. \\ \frac{Cu \text{ Mold.} - Cap. repr. \cdot F. Cu \text{ Án.}[\%] \cdot Ley_{Cu}^{\text{Án.}}[\%]}{\frac{Concentrado \text{ total final a fusión [tmf]}{1 - Pérdida \text{ por manejo}[\%]}} & \text{si } Scrap + \text{Án. rech.} \geq Cap. repr. \end{cases}$$

Ecuación 23: Fórmula para determinar el Factor de Cobre Moldeado.

$$\text{Factor de generación de Ácido Sulfúrico c/r a Fusión}[\%] = \frac{\text{Ácido producido[tm]}}{\text{Capacidad de Fusión[tms]}}$$

Ecuación 24: Fórmula para determinar el Factor de generación de Ácido.

⁶ Concentrado final incluye recirculación de polvos. El Factor 3 incorpora el Factor de Distribución del HF, debido a que es el equipo de fusión que se ocupa a largo plazo, a pesar de que en los dos primeros años también funcione el CT.

Tabla 39: Indicadores de gestión FURE.

Indicadores de gestión Fundición	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Recuperación fundición	%	94,67	95,01	95,24	95,23	95,24	95,54	95,24
Factor de Cu Nuevo	%	84,18	84,39	86,08	86,09	86,10	86,39	86,11
Factor Cu Moldeado	%	91,69	91,50	94,37	94,49	94,63	98,16	94,64
Factor de generación de ácido respecto a fusión	%	66,05	59,53	70,95	73,25	70,91	72,48	72,00
Captación de S	%	89,00	90,72	95,02	96,57	96,57	96,57	96,96
Periodo Operativo	días	362	330	362	362	362	270	362
Indicadores de gestión Refinería	Uni.	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Recuperación Refinería Electrolítica	%	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80	99,80
Factor de generación <i>Scrap</i>	%	13,50	18,70	16,90	16,90	16,90	16,90	16,90
Ánodos rechazados	%	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Cátodos rechazados	%	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Generación de barro anódico	tm	1.157	1.574	1.424	1.376	1.379	1.319	1.321
Periodo Operativo	días	362	362	362	362	362	362	362

3.3 MODELO OPEX DE FUNDICIÓN

3.3.1 Pre – modelo de Fundición N°1

Al seguir los lineamientos de la planilla base, cada operación unitaria de la Fundición Chuquicamata posee una o más sub – operaciones o equipos relacionados, de tal modo de que cada elemento de gasto se asocia con estas sub – operaciones, lo que finalmente se traduce en un gasto total desglosado. Esta planilla cuenta con todos los datos aglomerados en una única hoja Excel, por lo que se realiza un tratamiento de datos con tal de separar todos los insumos por operación unitaria y, dentro de cada una de éstas, por elemento de gasto.

Debido a que los antiguos hornos que procesaban la escoria generada por los reactores de fusión y conversión ya no son utilizados por las tres fundiciones atingentes al estudio, el proceso de Tratamiento de Escorias ya no está ligado a la Gerencia de Fundición, sino que a la Gerencia de la Planta Concentradora, debido al nuevo tratamiento al que se someterán las escorias (enfriamiento – chancado – molienda – flotación) una vez se culminen los cambios de infraestructura necesarios en cada una de las tres divisiones. Es por lo que esta operación unitaria ya no es parte de la fundición, sino que a la etapa de concentración de minerales, por lo que el único costo considerado para la fundición es un pequeño costo de transporte adjuntado como costo administrativo.

Tabla 40: Desglose de procesos de cada operación unitaria de la Fundición DCH, según planilla base.

Proceso Operativo	Operaciones Unitarias	Desglose de Sub – operaciones
Fundición	Recepción y Mezcla	Almacenamiento y distribución; Servicio de Mano de Obra; Secador N°4; Secador N°5; Secadores.
	Fusión	Horno Flash y Convertidor Teniente N°2.
	Conversión	Convertidores Peirce – Smith
	Refinación y Moldeo	Hornos de Ánodos y Ruedas de Moldeo
	Planta de Limpieza de Gases	Administración Servicios Planta de Ácido; Operación limpieza de Gases; Operación Contacto Gases; Operación Planta ATP; Mantención Mecánica Planta de Ácido; Mantención Eléctrica Planta de Ácido.
	Mantenimiento Interno	Mantención Mecánica Molienda; Mantención Mecánica HF; Mantención Mecánica CT2; Mantención Mecánica CPS y grúas 100t; Mantención Mecánica HA; Mantención Refractaria; Mantención Eléctrica.
	Administración Directa	Ingeniería de Procesos; Administración de operaciones; Administración de mantenimiento; Staff subgerencia; Gestión de Activos Planta Oxígeno; Operación Planta de Oxígeno; Planta de Oxígeno 400 tpd N°1; Planta de Oxígeno 400 tpd N°2; Planta de Oxígeno 400 tpd N°3; Nitrógeno Planta de Oxígeno; Control Unidad Uraso.

La planilla de remuneraciones base divide al personal indefinido en dos categorías: nuevo y antiguo, en donde el personal antiguo va a la baja y el nuevo al alza a medida que se avanza en el horizonte temporal. Ambos grupos poseen un sueldo base diferente, por lo que se calcula el gasto total anual por sub – operación y un sueldo anual por persona para rol A y rol B, considerando el promedio ponderado entre el personal nuevo y el antiguo.

Partidas relativas a la Planta de Oxígeno (que no es una operación unitaria propiamente tal) ubicadas originalmente en la Administración, son enviadas a una nueva hoja llamada “Operación General”, ya que produce oxígeno y nitrógeno fundamentalmente para la fusión y la conversión. En el modelo final, los costos de las plantas de oxígeno se dividen entre estas dos operaciones unitarias: 80% para fusión y el resto para la conversión, dado que la primera es la que más lo utiliza.

El resto de los insumos relativos a la Administración se caracterizan solo con un gasto y no con un precio, ya que sus gastos no son operativos y son en general fijos.

Tabla 41: Detalle de los insumos presentes en los elementos de gasto de la fundición.

Elem. de Gasto	Descripción
Remuneraciones	Dotación Rol A y Rol B.
Materiales	Sílice (fundente), carbón coque, soda cáustica, desmoldante, cal viva granulada, elementos de sondaje/perforación, maderas, reactivos, colectores, refractario; soldadura eléctrica; lubricantes, elementos de desgaste, cables y acero, acero estructural; tuberías, válvulas y accesorios; materiales para construcción, envases para productos, herramientas, otros materiales fundición, material eléctrico, material de laboratorio, materiales generales bodega y otros, implementos de seguridad, ropa de trabajo, víveres, medicamentos, repuestos (vías férreas, compresor, palas, equipos de extracción, equipos de servicio, correa transportadora, equipos concentradora/filtros, chancadores/molinos, equipos de fundición y equipos de refinería), repuestos en general, útiles de escritorio, muebles e instalaciones, suministro de equipos computacionales y de redes.
Combustibles	Petróleo búnker, querosén, gas natural y petróleo diésel.
Energ. Eléctrica	Energía y potencia eléctrica, energías renovables no convencionales.
Suministros	Agua potable, industrial y desmineralizada, aire baja y alta presión, vapor.
Servicios de Terceros	Arriendos de equipos, vehículos e instalaciones; transporte de concentrado; consultorías asociadas a administración, operación, seguridad, otras; transporte de materiales y suministros, servicios (estudios de ingeniería, apoyo a la operación, inspección técnica, muestreo, mantenimiento, de alimentación y campamentos, aseo industrial y de oficina; mantención y reparación de puertas e instalaciones, campamentos y edificios, camas, vehículos y equipos; administrativos, varios internos) y bonos adicionales.
Otros	Seguros y bienes, comunicaciones, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios, contratos, traslados, actividades deportivas y sociales, vestuario, otros.

La planilla base de la fundición contiene gran cantidad de información con un alto nivel de detalle, por lo que se necesita reducir la cantidad de datos agrupando insumos afines y descartando los insumos que representen un bajísimo costo de operación, según las Bases de Estimación del Instructivo de Costos de Operación ^[21], en el que se estipula un nivel de precisión de la estimación de $\pm 5 - \pm 10\%$ en el OPEX total. Esto se va realizando en pre – modelos sucesivos, de tal manera de vislumbrar el impacto en la magnitud y en el costo del Modelo de Fundición.

3.3.2 Pre – modelo de Fundición N°2

Se deben confirmar todos los cálculos que contiene el pre – modelo según los gastos contenidos en la planilla base, para detectar posibles errores de indexación o datos de gastos sin cálculo ni justificación alguna. Los valores de gastos recalculados se verifican con las cantidades incluidas en la planilla de costos auxiliar, para comprobar que sean del mismo orden de magnitud.

Tabla 42: Ajustes realizados en el Pre – modelo de Fundición N°2.

Op. Unitaria	Errores	Simplificaciones
Recepción y Mezcla	Gasto en gas natural no incluye un algoritmo detrás, por lo que se recalcula su valor según datos de consumo y tonelaje.	En Materiales, los gastos en útiles de escritorio, muebles e instalaciones, suministro de equipos computacionales y de redes se juntan en un único apartado denominado “Gastos de oficina”, según las sub – operaciones existentes. Los implementos de seguridad y ropa de trabajo, víveres y medicamentos se expresan solo con un gasto, al ser de carácter no operativo.
Fusión	Existe diferencias entre gastos totales con respecto a la planilla base. Esto se explica en que ésta contiene algoritmos vinculados a años siguientes (años desfasados).	
Conversión	Se corrige gasto en agua industrial, ya que planilla original está vinculada con el precio del agua potable.	En Energía Eléctrica, las energías renovables no convencionales se describen solo con un gasto, al ser secundarias.
Refino y Moldeo	En el cálculo de los suministros existe diferencia en el gasto debido a que los algoritmos están vinculados con producción del año siguiente (años desfasados).	En Servicios de Terceros, se crea la categoría “Servicio de mantenimiento y reparación no operativas”, que agrupa en una sola cuenta los gastos de puertas e instalaciones, campamentos y edificios, camas, vehículos y equipos, según las sub – operaciones existentes.
Limpieza de Gases		
Mantenimiento	-	
Administración	-	
Operación General	Se corrige gasto en agua industrial, ya que planilla original está vinculada con el precio del agua potable, y además en años desfasados.	En Otros, contratos, traslados, actividades deportivas y sociales, vestuario y otros se agrupan en una sola categoría, según las sub – operaciones existentes: “Beneficios al personal”.

Con estas modificaciones, se reduce la cantidad de filas de la planilla Excel, que se utiliza como indicador de la cantidad de datos manejados, y que en este pre – modelo disminuyen de 2.011 filas de la planilla Excel hasta 1.757, representando una disminución del 12,63% de la envergadura del pre – modelo sin afectar el gasto total de la fundición.

3.3.3 Pre – modelo de Fundición N°3

Para seguir disminuyendo el tamaño del modelo final, se realizan nuevas simplificaciones al pre – modelo.

Tabla 43: Ajustes realizados en el Pre – modelo de Fundición N°3.

Elementos de gasto	Simplificaciones
Remuneraciones	-
Materiales	<p>Los Gastos de oficina se envían a la Administración Directa.</p> <p>Los implementos de seguridad, ropa de trabajo, víveres y medicamentos son adjuntados al gasto en remuneraciones, según las sub – operaciones presentes.</p> <p>Las Herramientas y el Material Eléctrico se agrupan en una misma cuenta, por operación unitaria.</p>
Combustibles	-
Energía Eléctrica	Las energías renovables no convencionales, separadas por sub – operación, se agrupan para tener una sola cuenta por operación unitaria.
Suministros	-
Servicios de Terceros	<p>Consultorías asociadas a administración presentes en todas las operaciones unitarias se trasladan a la Administración</p> <p>Arriendos de equipos, vehículos e instalaciones se agrupan en “Arriendos Varios”, según las sub – operaciones existentes.</p> <p>Servicios de Apoyo a la Operación, Servicios Técnicos y Bonos adicionales se agrupan en una misma categoría, según las sub – operaciones existentes.</p> <p>Los Servicios de Mantenimiento de las distintas operaciones unitarias se envían al Mantenimiento.</p> <p>Servicios de alimentación y campamentos, servicio de aseo industrial y de oficina, servicios varios y servicio de mantención y reparación no operativo se agrupan en una sola categoría llamada “Servicios Varios”, según las sub – operaciones existentes.</p>
Otros	Seguros y bienes, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios y beneficios al personal se agrupan en una sola categoría denominada “Otros Gastos”, según las sub – operaciones existentes.

El modelo de costos estándar de la Planta Concentradora cuenta con una tarifa única de energía eléctrica, que incluye tanto a la energía como a la potencia eléctrica que, sin embargo, no se da en el caso de la fundición, ya que la planilla base considera tarifas distintas para energía y potencia eléctrica (la potencia eléctrica hace referencia a la energía requerida para operar los equipos principales, mientras que el gasto en energía eléctrica habla de gastos secundarios en electricidad, llámese cableado, iluminarias, etc). Se intenta corregir este dato para seguir la misma línea de la Planta Concentradora, pero tanto la planilla auxiliar como otras planillas referentes a precios y tarifas contienen distintas tarifas para potencia y energía, por lo que se decide finalmente conservar el formato original.

Sin embargo, se descubre que la planilla base contiene un error en el precio de la potencia eléctrica, ya que posee un valor de 38,3 USD/MWh para el 2015, siendo que el valor para ese año debe ser de 59,7 USD/MWh (según las Orientaciones Comerciales), lo que se corrige en este pre – modelo según proyecciones al 2015 realizadas en mayo del 2014 (esto, para ser consistente con el año de configuración del proyecto). Esto sustenta la necesidad de revisar y verificar todas las tarifas de insumos relevantes una vez esté estructurado el modelo final, de tal manera de tener precios correspondientes al año 2017.

Con estos cambios, se logra reducir la cantidad de filas de la planilla Excel desde las 1.757 anteriores a 1.324, lo que representa una disminución acumulada del 34,16% de líneas, sin afectar el costo total de la fundición.

3.3.4 Pre – modelo de Fundición N°4

Se procede a calcular el peso del costo de cada insumo de la fundición con respecto al costo total de ésta y, a su vez, el peso de cada insumo con respecto al costo total de la operación unitaria a la que pertenece. Con esto, se busca seleccionar solo los costos fundamentales y descartar los insumos que representan un bajísimo costo para la fundición, considerando los insumos relevantes detallados en la Guía para la Trazabilidad de Costos de Operación ^[24], presentes en el Anexo A.

La Tabla 44 muestra los pesos de cada insumo (incluyendo las remuneraciones del personal) con respecto al total de los costos de la fundición, por lo que se puede saber cuáles son los más relevantes en estos términos. Para descartar insumos, se aplica un primer criterio de descarte, que debe cumplir dos condiciones para que la cuenta sea eliminada del pre – modelo: el peso del costo del insumo con respecto al gasto total de la fundición debe ser menor al 0,05% y, de los insumos que cumplan esta norma, el peso del costo del insumo con respecto al gasto en esa operación unitaria debe ser menor a 0,5%.

$$\text{Peso del Costo } c/r \text{ a toda la Fundición } [\%] \leq \sim 0,05\%$$

$$\text{Peso del Costo } c/r \text{ a cada Operación Unitaria } [\%] \leq 0,5\%$$

Ecuación 25: Primer Criterio de descarte de insumos según costos.

Tabla 44: Distribución de los costos de cada insumo de la fundición (incluye remuneración del personal).

Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]
Rol A	2,80	Otros materiales	0,30	Potencia Eléctrica	14,51
Rol B	25,92	Herramientas y Material Eléctrico	1,11	ERNC	0,10
Sílice Fina	0,41	Mat. Laboratorio	0,05	Agua Potable	0,14
Sílice Mezcla	0,24	Mat. Grl. Bodega	0,56	Agua Industrial	1,02
Sílice Intermedia	0,39	Rep. Vías Férreas	0,03	Agua Desmin.	0,22
Carbón Coque	0,19	Rep. Compresor	0,51	Aire Baja Presión	3,81
Soda Cáustica líquida NaOH	0,02	Repuestos Palas	0,002	Aire Alta Presión	1,61
Desmoldante	0,50	Rep. Eq. Extracción	0,0002	Vapor	0,14
Cal viva granul.	1,01	Rep. Eq. de Servicio	0,26	Arriendos Varios	1,57
Elem. Sondaje /Perforación	0,02	Repuestos Correa Transportadora	0,02	Transporte de Concentrado	1,39
Maderas	0,01	Repuestos Equipos Concentrado/Filtro	0,002	Consult. Asociadas a Administración	0,04
Reactivos	0,40	Repuestos Chancador/Molino	0,04	Transp. Materiales y Suministros	0,002
Colectores	0,11	Repuestos Equipos Fundición	1,12	Consult. Asociadas a Operación	0,89
Refractario	1,92	Rep. Eq. Refinería	0,002	Otras Consultorías	0,05
Soldadura, Electrodo	0,03	Repuestos Equipos Seguridad	0,0003	Consult. Asociadas a Seguridad	0,001
Lubricantes	0,12	Rep. en General	1,53	Serv. Estudio de Ing.	0,13
Elementos de Desgaste	0,03	Gastos de Oficina	0,09	Serv. de Apoyo Op. e Inspección Técnica, Bonos contratistas	2,82
Cables, Acero	0,07	Petróleo Bunker	7,30	Servicio de Muestreo	1,18
Acero Estructural	0,56	Querosén	0,81	Serv. Mantenimiento	0,02
Tuberías, válvulas y accesorios	1,09	Gas Natural	3,41	Servicios Varios	9,15
Materiales para construcción	0,001	Petróleo Diésel	0,23	Servicios Administrativo	0,003
Envases productos	0,01	Energía Eléctrica	6,43	Otros gastos	1,57

La segunda condición se aplica debido a que puede darse el caso de que, a pesar de que con respecto a la fundición el peso del insumo sea extremadamente bajo, sea relevante para una o varias operaciones unitarias en particular. En casos como estos se debe eliminar la cuenta solo en las operaciones unitarias en las que el peso del costo del insumo no sea relevante para el proceso (debe cumplirse el Primer Criterio de descarte), sin embargo, para el caso del primer filtro, todas las cuentas seleccionadas pueden ser extraídas del Pre – modelo Fundición N°4, es decir, para todas las operaciones unitarias se cumplen con ambas condiciones.

Los elementos marcados en color rojo son los insumos extraídos según el primer filtro y los seleccionados en color azul son los servicios que pertenecen solo a la Administración, por lo que no se eliminan a pesar de cumplir con el filtro (solo se eliminan insumos relacionados a la operación). Esto se traduce en una disminución de filas acumulada del 40,78% (se disminuye de las 1.324 líneas del anterior pre – modelo a 1.191), asociada a la extracción de aproximadamente un 0,26% de los costos totales de la fundición.

3.3.5 Pre – modelo de Fundición N°5

Se procede a realizar el segundo proceso de filtrado de costos, para lo que, previamente, se realizan las últimas agrupaciones y depuraciones de datos:

- Se separa la categoría anteriormente agrupada como “Servicios Varios” (ésta aglomera a los Servicios de alimentación y campamentos, Servicios de Aseo industrial y de Oficina, Servicios Varios y el Servicio de Mantenimiento y Reparación no operativo), ya que en ella se agrupa un gasto de 9,147%, lo que no permite vislumbrar el aporte del Servicio de Mantenimiento y Reparación No Operativo, que se estima que debe ser la cuenta que más aporta a este gasto.
- Los gastos de la sub – operación catalogada como “Secadores” se dividen equitativamente entre ambos equipos de secado de la Recepción y Mezcla. En esta misma operación unitaria, el “Servicio de Mano de Obra” se elimina del pre – modelo, al tener poquísimos insumos con un bajo costo correspondiente.
- Los gastos de las sub – operaciones nombradas como “Administración Servicios Planta de Ácido” se eliminan debido a que solo es un gasto minúsculo en energía y potencia eléctrica, que representa el 0,078% del gasto total en la Limpieza de Gases.
- Los gastos relativos a la sub – operación “Gestión de Activos Plantas de Oxígeno” y “Operación Plantas de Oxígeno” se eliminan debido a que contienen poquísimos insumos que representan un costo ínfimo con respecto al gasto total de la Operación General de producción de oxígeno (el costo es de 0,058% con solo cinco insumos entre ambas sub – operaciones).
- Al igual que en el filtro anterior, las cuentas de la Administración Directa no se analizan al no ser de carácter operacional, por lo que sus costos se estudian en el modelo final.

Luego, se define el Segundo Criterio de descarte de insumos de manera análoga al criterio anterior, con un aumento del porcentaje de corte:

$$\text{Peso del Costo c/r a toda la Fundición [\%]} \leq 0,5\%$$

$$\text{Peso del Costo c/r a cada Operación Unitaria [\%]} \leq 0,5\%$$

Ecuación 26: Segundo Criterio de descarte de insumos según costos.

Tabla 45: Distribución de los costos de cada insumo de la fundición (incluye remuneraciones) después del primer filtro.

Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]
Rol A	2,80	Otros materiales	0,30	Agua Industrial	1,02
Rol B	25,92	Herramientas y Material Eléctrico	1,11	Agua Desmineralizada	0,22
Sílice Fina	0,41	Mat. Grls. Bodega	0,56	Aire Baja Presión	3,81
Sílice Mezcla	0,24	Rep. Compresor	0,51	Aire Alta Presión	1,61
Sílice Intermedia	0,39	Rep. Eq. Servicio	0,26	Vapor	0,14
Carbón Coque 1/2	0,19	Rep. Eq. Fundición	1,12	Arriendos Varios	1,57
Soda Cáustica líq.	0,02	Rep. en General	1,53	Transp. de Conc.	1,39
Desmoldante	0,50	Gastos de Oficina	0,09	Consult. Asoc. a Op.	0,89
Cal viva granulada	1,01	Petróleo Bunker	7,30	Servicios de Estudio de Ingeniería	0,13
Reactivos	0,44	Querosén	0,81	Serv. de Apoyo Op. e Insp. Técnica, Bonos contratistas	2,84
Colectores	0,11	Gas Natural	3,41	Serv. de Muestreo	1,16
Refractario	1,92	Petróleo Diésel	0,23	Servicios Varios	2,03
Lubricantes	0,12	Energía Eléctrica	6,43	Serv. Mant. y Rep. Inst. (No op.)	7,12
Cables, Acero	0,07	Potencia Eléctrica	14,51	Otros gastos	1,57
Acero Estructural	0,56	ERNC	0,10	-	-
Tuberías, válvulas y accesorios	1,09	Agua Potable	0,14	-	-

En este caso, no todos los insumos cumplen con las condiciones, por lo que se analiza caso a caso las cuentas que potencialmente pueden ser descartadas. Por esta razón, se seleccionan en rojo los

que cumplen la primera condición del Segundo Criterio (y en azul los insumos que deberían ser extraídos, pero que solo pertenecen a la Administración), pero se analiza en particular si este costo se extrae o no. Se debe mencionar que los distintos tipos de sílice, el carbón del tipo coque, la soda cáustica, el desmoldante y la cal viva granulada son Insumos Relevantes, y por eso no se descartan del pre – modelo.

Luego, para estudiar la segunda condición, se elabora una tabla de doble entrada entre las cuentas destacadas con color rojo y las operaciones unitarias. La tabla se completa con tres posibles opciones:

1. **SÍ:** La cuenta cumple con la segunda condición y es eliminada del pre – modelo, dado que cumple a cabalidad el Segundo Criterio.
2. **NO:** El insumo no cumple con la segunda condición, por lo que su costo es relevante para esa operación unitaria. Luego, no se extrae del pre – modelo.
3. **NO, IR:** Corresponde a un Insumo Relevante para esa operación unitaria por lo que, independiente del peso de su costo, no se extrae del pre – modelo.

Tabla 46: Análisis de la segunda condición del Segundo Criterio.

Cuenta	Recep. y Mezcla	Fusión	Conversión	Ref. y Moldeo	Limpieza de Gases	Mant.	Op. General
Reactivos	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	SÍ	SI
Colectores	-	-	-	NO	SÍ	-	-
Lubricante	SÍ	-	-	-	SÍ	NO	SI
Cable, acero	-	-	-	-	SÍ	SÍ	SÍ
Otros Mat.	-	-	-	-	-	NO	-
Rep. Eq. Serv.	-	-	-	-	NO	SÍ	-
Petróleo Diésel	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
ERNC	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	-	SÍ
Agua Potable	SÍ	SÍ	-	SÍ	SÍ	-	SÍ
Agua Desmin.	NO, IR	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	-	SÍ
Vapor	NO, IR	SÍ	SÍ	NO	-	-	-
Serv. Est. Ing.	-	SÍ	SÍ	-	-	-	SÍ

Con todos estos ajustes, la cantidad de líneas del pre – modelo disminuyen a 967, con lo que la disminución acumulada alcanza el 51,91% de filas de la planilla Excel, mientras que la porción de costos extraídos es de 1,236% del total, lo que sumado al pre – modelo anterior, acumula un total de 1,493% de los costos totales eliminados del Pre – modelo Fundación N°5.

3.3.6 Pre – modelo Final de Fundición

El último paso para completar el pre – modelo tiene referencia con el análisis de las remuneraciones y la dotación de la planta Fundición. Según la Reformulación del Proyecto Chuquicamata Subterránea, la dotación de la fundición tiene dos clases de trabajadores, tanto para los roles A como los roles B: personal nuevo y personal antiguo ^[27], los que se diferencian en el tipo de contrato bajo el cual ingresan a la corporación, ya que el contrato nuevo implica un sueldo base menor acorde con los precios del mercado, mientras que los sueldos de la dotación antigua han aumentado tanto debido a las múltiples negociaciones colectivas con los sindicatos que sus sueldos sobrepasan el valor de mercado, lo que encarece el costo remunerativo. Es por lo que la proporción de dotación nueva va progresivamente aumentando y la antigua disminuyendo, según las planificaciones futuras del PMCHS, para lograr disminuir el sueldo base promedio.

Por otro lado, la dotación total sufre modificaciones que van de la mano con los importantes cambios que está sufriendo la Fundición Chuquicamata. La variación dotacional entre los años 2019 y 2020 tiene referencia a la salida del Convertidor Teniente, mientras que las disminuciones sucesivas desde el 2021 hasta el año 2023 se relacionan con el mejoramiento del área de Refino y Moldeo ^[27].

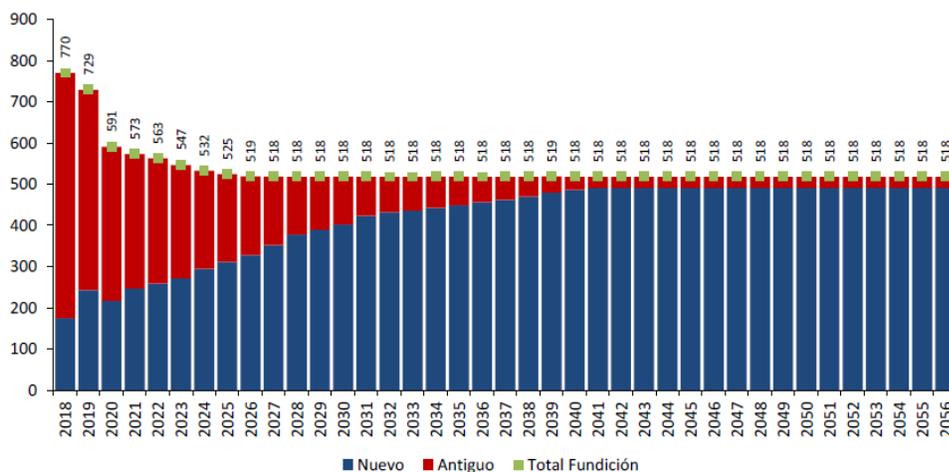


Ilustración 32: Evolución dotacional rol A y rol B nuevo y antiguo de la Fundición DCH.

El archivo de la dotación contiene las remuneraciones y el personal total año a año (suma de todos los turnos de la fundición), separado por operación unitaria y por sub – operación. Resalta a la vista el hecho de que, para los roles B, la cantidad de trabajadores en cada sub – operación no es constante en el horizonte temporal (sin considerar las disminuciones debido a la salida de una línea de fusión y al mejoramiento del área de Refino y Moldeo) de hecho, en algunos casos presenta grandes variaciones que no se explican pero que, sin embargo, en la suma anual total cumple con las proyecciones de dotación y es constante a largo plazo. Esto es un problema para poder configurar el modelo final, ya que éste calcula automáticamente la cantidad de personal dado el sistema de turno y la cantidad de trabajadores por turno (para ambos roles).

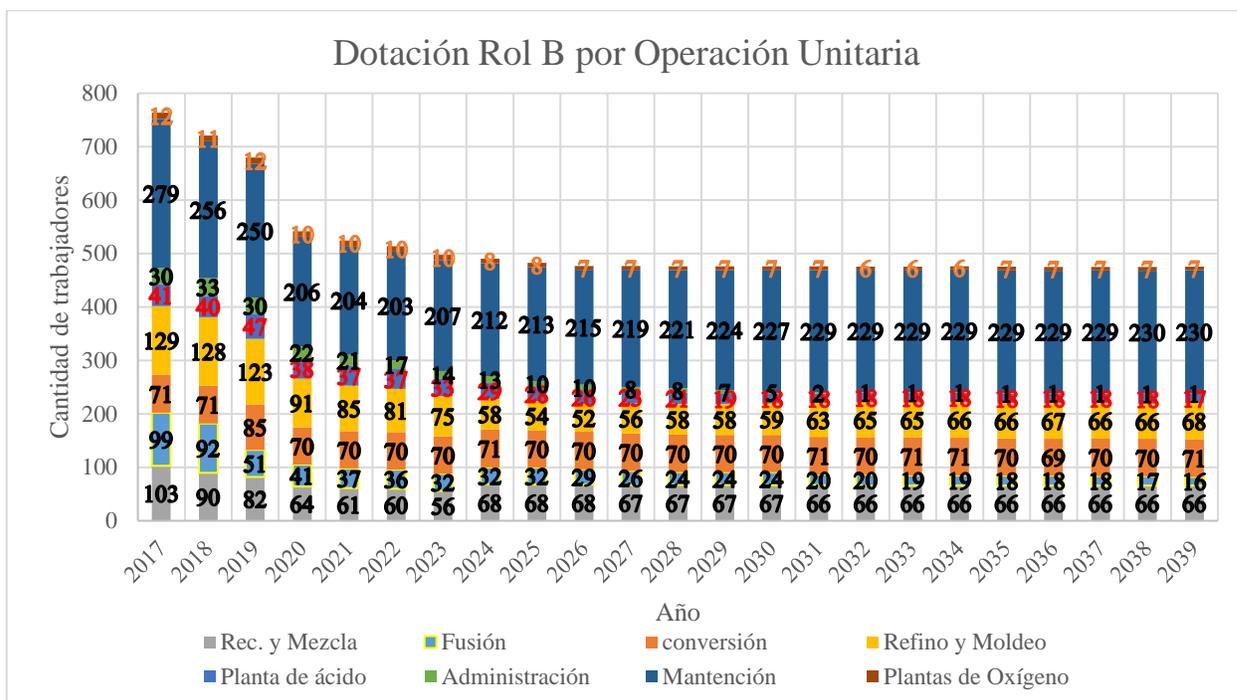


Ilustración 33: Detalle de la dotación Rol B de la Fundación DCH por operación unitaria.

Se hace necesario, entonces, expresar una cantidad fija de trabajadores en cada sub – operación, por lo que se calculan los promedios dotacionales en todo el horizonte temporal, teniendo en cuenta que hay una línea de fusión deja de operar a fines del 2018 y ajustando la suma total de la dotación a las planificaciones hechas en la Reformulación del PMCHS. Se considera que el Mantenimiento Eléctrico y Mecánico de la Planta de Ácido es parte del Mantenimiento Interno, es decir, se trasladan sus costos y su dotación a la Mantenición.

Tabla 47: Desglose de la proyección dotacional Rol B de la Fundación Chuquicamata.

Sub – operación	Dotación total	Sub – operación	Dotación total
Secador Rotatorio N°4	36 (0)	Mantenición Secador N°4	12 (0)
Secador a Vapor N°5	62	Mantenición Secador N°5	8
Horno Flash	38	Mantenición Horno Flash	30
Convertidor Teniente	48 (0)	Mantenición CT	30 (0)
Convertidores PS	72	Mantenición CPS y grúas	32
Hornos de Refino y Moldeo	66	Mantenición Ref. y Moldeo	32
Plantas de Ácido	26	Mantenición P. de Ácido	32
Operación Grl. (Pl. de Ox.)	8	Mantenición P. de Oxígeno	0
Administración	11	Mantenición Eléctrica	60
-	-	Mantenición Refractaria	44

Tabla 48: Desglose de la proyección dotacional Rol A de la Fundición Chuquicamata.

Sub – operación	Dotación total	Sub – operación	Dotación total
Recepción y Mezcla	0	Mantención Rec. y Mezcla	3
Fusión	3	Mantención Fusión	3
Conversión	3	Mantención Conversión	3
Refino y Moldeo	3	Mantención Ref. y Moldeo	3
Limpieza de Gases	3	Mantención P. de Ácido	9
Operación Grl. (Pl. de Ox.)	3	Mantención Eléctrica	3
Administración	15	Mantención Refractaria	3

Si bien no se cumplen exactamente las proyecciones de la Reformulación, se conserva la tendencia global de disminución dotacional desde el 2019, aunque no se refleja la disminución gradual debida al mejoramiento del área de Refino y Moldeo ^[27]. En suma, la dotación total hasta el 2018 es de 704 personas, mientras que la proyección desde el 2019 es de 578 personas. Se considera, además, un gerente (rol E), aunque en la realidad puede haber más de una gerencia.

Finalmente, se puede configurar el modelo final, el que consta de los siguientes insumos:

Tabla 49: Insumos considerados en el modelo definitivo de fundición.

Elemento de Gasto	Descripción
Remuneraciones	Dotación Rol A y Rol B.
Materiales	Sílice (fundente), carbón coque, soda cáustica, desmoldante, cal viva granulada, reactivos, colectores, refractario, lubricantes, acero estructural; tuberías, válvulas y accesorios; herramientas y material eléctrico; otros materiales fundición, materiales generales bodega y otros, repuestos (compresor, equipos de servicio, equipos de fundición), repuestos en general, gastos de oficina.
Combustibles	Petróleo búnker, querosén, gas natural.
Energía Eléctrica	Energía eléctrica, potencia eléctrica.
Suministros	Agua industrial, agua desmineralizada, aire baja y alta presión, vapor.
Servicios de Terceros	Arriendos varios, transporte de concentrado, consultorías asociadas a producción, administración y otras, servicios (apoyo a la operación, inspección técnica, muestreo, de alimentación y campamentos, aseo industrial y de oficina, mantención y reparación, otros, administrativos) y bonos adicionales a contratistas.
Otros	Seguros y bienes, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios.

3.3.7 Modelo OPEX generalizado de las Fundiciones de Cobre de Codelco

El modelo final consta de cinco hojas Excel: Inicio, Parámetros, Balance de Masa, OPEX base planta y OPEX calculado.

3.3.7.1 Hoja Inicio

Presenta una breve descripción de la base técnica del modelo de fundición y de lo que contiene, además de lo que se espera finalmente obtener cuando se junten los tres módulos de la evaluación económica: un flujo de caja e indicadores económicos del proyecto.

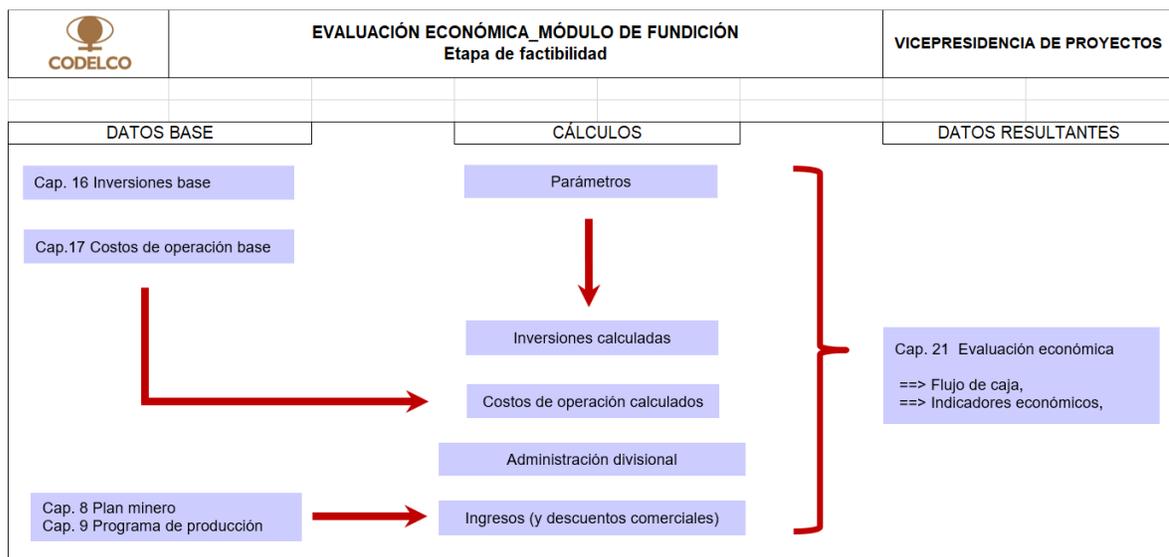


Ilustración 34: Esquema de Evaluación Económica para proyectos de fundiciones.

Además, posee una descripción específica del modelo OPEX fundición:

“El módulo de costos fundición contiene la estimación de todos los gastos necesarios para producir ánodos de cobre. Los costos de la fundición se han estructurado según SGP – GASP – EV – INS – 001 *Instructivo Costos de Operación* emitido por el área de Evaluación Económica – Financiera VP. El instructivo explica definiciones publicadas en:

- I. Guía para la Trazabilidad de Costos de Operación para Proyectos Estructurales emitida por la Gerencia Corporativa de Evaluación de Inversiones y Control de Proyectos.
- II. Informes de Gestión Operacional emitidos mensualmente por cada división perteneciente a Codelco.

Dicho de otra forma, el modelo está estructurado en flujos de gastos para la recepción y mezcla, fusión, conversión, refinado y moldeo, planta de limpieza de gases. El módulo de costos contiene además información física como: dotación propia, consumos de energía, consumos de combustible, consumo de suministros, dotación de terceros.

El estándar satisface el método de cálculo y detalle publicados en SIC – P – 005 *Base de Estimación de Costos de Capital y Operación* para Estudios de Factibilidad.”

3.3.7.2 Hoja Parámetros

Debido a que los proyectos manejan estimaciones del precio del cobre, el modelo contempla un botón programado que da cuenta de tres bandas de precio del cobre y de tipo de cambio entre peso chileno y dólar estadounidense (Proyección Inferior, Proyección Media, Proyección Superior, detalladas en las OO.CC. de la corporación), lo que se utiliza posteriormente para la corrección monetaria de los gastos calculados. Esto permite vislumbrar el cambio del costo unitario de la fundición según la banda de precio de cobre escogida, debido a que el factor de corrección monetaria se calcula en base a estos parámetros.⁷

Posteriormente, se consignan los precios de cada insumo, distinguiéndose tres tipos diferentes: precios de combustibles, energía eléctrica y agua desalada (que son de suma importancia para la gran mayoría de los proyectos), precios de materiales de importancia operacional y el resto de materiales secundarios, que se agrupan y se expresan por tonelaje producido o procesado, según la operación unitaria.

Tabla 50: Proyección de precios de combustible, energía eléctrica y agua industrial.⁸

Insumo	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Querosén	USD/L	0,49	0,49	0,51	0,53	0,53	0,61	0,61
Gas natural	USD/MBTU	9,66	7,93	8,14	8,45	8,57	9,68	9,68
Petróleo búnker	USD/kg	0,37	0,38	0,39	0,41	0,41	0,48	0,48
Energía SING	USD/MWh	59,02	62,23	58,79	57,93	54,70	54,15	54,15
Potencia SING	USD/MWh	65,26	62,28	60,16	58,92	57,60	56,72	56,72
Agua industrial	USD/m ³	6,17	5,03	5,00	5,59	5,55	5,58	5,56

⁷ Cálculo de factor de corrección monetaria se muestra en la Ecuación 12, página 42.

⁸ Antecedentes de planificación de noviembre del 2017, para ser consistente. Estos precios, por lo tanto, no corresponden necesariamente a los del proyecto API N15FP15, sino que están actualizados.

Tabla 51: Proyecciones de precios de materiales relevantes para la operación.⁹¹⁰

Materiales	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Fundente Sílice Fina	USD/t	95,53	100,54	95,53	100,54	109,12	107,46	107,46
Fundente Sílice Mezcla	USD/t	59,00	61,27	61,58	62,79	63,11	66,61	66,61
Fundente Sílice Intermedia	USD/t	48,61	48,61	50,11	50,55	50,50	50,15	50,15
Carbón Coque (1 ½ a 2 ½)	USD/t	462,00	465,12	467,36	471,83	473,09	488,37	488,37
Soda Cáustica Líq. NaOH	USD/kg	0,72	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74	0,74
Desmoldante	USD/kg	2,02	1,98	2,00	2,00	2,00	2,04	2,04
Cal viva Granulada	USD/tmf	142,67	145,94	147,76	150,47	151,24	161,46	161,46
Carbonato de Sodio	USD/kg	0,34	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35

El grueso de los materiales se divide en materiales para operación y para mantenimiento, divididos por sub – operación y calculados en base al tonelaje producido o procesado según la operación unitaria. Se toma el precio base del año 2015 (según la información de la planilla base) y se proyecta en todo el horizonte temporal.

Tabla 52: Precios de Reactivos para operación y mantenimiento en el Largo Plazo.

Reactivos para Op.	Unidad	Precio	Reactivos para Mant.	Unidad	Precio
Operación Limpieza Gases	USD/t de ác.	0,003	M. Mecánica Rec. y Mez.	USD/tmh	0,02
Operación Contacto Gases	USD/t de ác.	0,78	M. Mecánica HF	USD/tms	0,19
Operación Planta Tratam. Efluentes	USD/t de ác.	0,003	M. Mecánica CT ¹¹	USD/tms	0,00
-	-	-	M. Mecánica CPS	USD/tmf	0,11
-	-	-	M. Mecánica HA	USD/tmf	0,14
-	-	-	M. Mecánica P. Ác.	USD/t de ác.	0,05
-	-	-	M. Eléctrica P. Ác.	USD/t de ác.	0,01

⁹ El Carbonato de Sodio equivale al Colector, el que se actualiza con información del proyecto API N14MS03.

¹⁰ Los precios están actualizados según Planificaciones hechas en noviembre del 2017.

¹¹ Precio se debe a que CT sale de operación en el 2018. Precio antes de esta salida equivale a 0,04 USD/tms.

Tabla 53: Precios de Lubricantes para mantenimiento en el Largo Plazo.

Lubricantes para Mantenimiento	Unidad	Precio
M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,04
M. Mecánica Horno Flash	USD/tms	0,02
M. Mecánica Convertidor Teniente ¹²	USD/tms	0,00
M. Mecánica CPS y grúas 100t	USD/tmf	0,08
M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	0,13
M. Eléctrica Equipos Fund.	USD/tms	0,09

Tabla 54: Precios de Acero Estructural para operación y mantenimiento en el Largo Plazo.¹³

Acero Estructural para Operación	Unidad	Precio	Acero Estructural para Mantenimiento	Unidad	Precio
Secador Rotatorio (N°4)	USD/tmh	0,00	M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,12
Secador a Vapor (N°5)	USD/tmh	0,01	M. Mecánica Horno Flash	USD/tms	0,20
Almacenamiento y Distribución de Concentrado	USD/tmh	0,04	M. Mecánica Convertidor Teniente	USD/tms	0,00
Horno Flash	USD/tms	0,23	M. Mecánica CPS y grúas 100t	USD/tmf	0,32
Convertidor Teniente	USD/tms	0,00	M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	0,19
Convertidores PS	USD/tmf	0,30	M. Mecánica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,07
Planta de Oxígeno Kobe Steel (N°1)	USD/t de óx.	0,16	M. Eléctrica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,002

¹² Precio se debe a que CT sale de operación en el 2018. Precio antes de esta salida equivale a 0,01 USD/tms.

¹³ Precios correspondientes al Secador N°4, al CT y a la Mantenimiento del CT son cero debido a que dejan de operar a partir del año 2019. Precio antes de la salida equivale a 0,01 USD/tmh, 0,56 USD/tms y 0,36 USD/tms, respectivamente.

Tabla 55: Precios de Tuberías, válvulas y accesorios para operación y mantención en el Largo Plazo.¹⁴

Tuberías, válvulas y accesorios para Operación	Unidad	Precio	Tuberías, válvulas y accesorios para Mantención	Unidad	Precio
Secador a Vapor (N°5)	USD/tmh	0,01	M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,03
Almacenamiento y Distribución de Concentrado	USD/tmh	0,07	M. Mecánica Horno Flash	USD/tms	0,85
Horno Flash	USD/tms	0,61	M. Mecánica CT	USD/tms	0,00
Convertidor Teniente	USD/tms	0,00	M. Mecánica CPS y grúas 100t	USD/tmf	0,03
Horno de Refino y Rueda de Moldeo	USD/tmf	0,32	M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	0,12
Operación Limpieza Gases	USD/t de ác.	0,02	M. Eléctrica Equipos Fundición	USD/tms	0,04
Operación Contacto Gases	USD/t de ác.	0,03	M. Mecánica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,80
Planta de Oxígeno Kobe Steel (N°1)	USD/t de óx.	0,08	M. Eléctrica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,002
Planta de Oxígeno L'Air Liquide (N°2)	USD/t de óx.	0,02	-	-	-
Planta de Oxígeno BOC (N°3)	USD/t de óx.	0,15	-	-	-

Tabla 56: Precios de Otros materiales fundición para mantención en el Largo Plazo.

Otros Materiales fundición para Mantención	Unidad	Precio
M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	1,86

¹⁴ Precios correspondientes al CT y a la Mantención del CT son cero debido a que dejan de operar a partir del año 2019. Precio antes de la salida equivale a 0,23 USD/tms y 1,25 USD/tms, respectivamente.

Tabla 57: Precios de Material eléctrico y Herramientas para operación y mantención en el Largo Plazo.¹⁵

Material eléctrico y Herramientas para Operación	Unidad	Precio	Material eléctrico y Herramientas para Mantención	Unidad	Precio
Secador Rotatorio (N°4)	USD/tmh	0,00	M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,03
Secador a Vapor (N°5)	USD/tmh	0,11	M. Mecánica Horno Flash	USD/tms	0,20
Almacenamiento y Distribución de Concentrado	USD/tmh	0,02	M. Mecánica Convertidor Teniente	USD/tms	0,00
Horno Flash	USD/tms	0,16	M. Mecánica CPS y grúas 100t	USD/tmf	0,20
Convertidor Teniente	USD/tms	0,00	M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	0,10
Convertidores PS	USD/tmf	0,63	M. Refractario	USD/tms	0,04
Horno de Refino y Rueda de Moldeo	USD/tmf	0,28	M. Eléctrica Equipos Fund.	USD/tms	0,84
Operación Limpieza Gases	USD/t de ác.	0,01	M. Mecánica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,05
Operación Contacto Gases	USD/t de ác.	0,10	M. Eléctrica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,37
Operación Planta Tratam. Efluentes	USD/t de ác.	0,02	-	-	-
Planta de Oxígeno Kobe Steel (N°1)	USD/t de óx.	0,24	-	-	-
Planta de Oxígeno L'Air Liquide (N°2)	USD/t de óx.	0,03	-	-	-
Planta de Oxígeno BOC (N°3)	USD/t de óx.	0,01	-	-	-

¹⁵ Precios correspondientes al Secador N°4, al CT y a la Mantención del CT son cero debido a que dejan de operar a partir del año 2019. Precio antes de la salida equivale a 0,16 USD/tmh, 0,57 USD/tms y 0,07 USD/tms, respectivamente.

Tabla 58: Precios de Materiales generales Bodega para operación y mantención en el Largo Plazo.¹⁶

Material Grls. Bodega para Operación	Unidad	Precio	Materiales Grls. Bodega para Mantención	Unidad	Precio
Secador Rotatorio (N°4)	USD/tmh	0,00	M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,11
Almacenamiento y Distribución de Concentrado	USD/tmh	0,01	M. Mecánica Horno Flash	USD/tms	0,30
Horno Flash	USD/tms	0,03	M. Mecánica CT	USD/tms	0,00
Convertidores PS	USD/tmf	0,09	M. Mecánica CPS y grúas 100t	USD/tmf	1,22
Horno de Refino y Rueda de Moldeo	USD/tmf	0,05	M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	0,40
Operación Limpieza Gases	USD/t de ác.	0,01	M. Refractorio	USD/tms	0,04
Operación Contacto Gases	USD/t de ác.	0,04	M. Mecánica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,15
Operación Planta Tratam. Efluentes	USD/t de ác.	0,02	M. Eléctrica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,01
Planta de Oxígeno Kobe Steel (N°1)	USD/t de óx.	0,10	-	-	-
Planta de Oxígeno L'Air Liquide (N°2)	USD/t de óx.	0,01	-	-	-
Planta de Oxígeno BOC (N°3)	USD/t de óx.	0,005	-	-	-

¹⁶ Precios correspondientes al Secador N°4 y a la Mantención del CT son cero debido a que dejan de operar a partir del año 2019. Precio antes de la salida equivale a 0,06 USD/tmh y 0,15 USD/tms, respectivamente.

Tabla 59: Precios de Repuestos para operación y mantención en el Largo Plazo.¹⁷

Repuestos para Operación	Unidad	Precio	Repuestos para Mantención	Unidad	Precio
Secador Rotatorio (N°4)	USD/tmh	0,00	M. Mecánica Rec. y Mezcla	USD/tmh	0,67
Secador a Vapor (N°5)	USD/tmh	0,01	M. Mecánica Horno Flash ¹⁸	USD/tms	0,80
Almacenamiento y Distribución de Concentrado	USD/tmh	0,08	M. Mecánica Convertidor Teniente	USD/tms	0,00
Horno Flash	USD/tms	0,14	M. Mecánica CPS	USD/tmf	3,08
Convertidor Teniente	USD/tms	0,00	M. Mecánica Horno de Refino	USD/tmf	1,18
Convertidores PS	USD/tmf	0,77	M. Refractario	USD/tms	0,32
Horno de Refino y Rueda de Moldeo	USD/tmf	0,29	M. Mecánica Planta de Ácido	USD/t de ác.	2,78
Operación Planta Tratam. Efluentes	USD/t de ác.	0,07	M. Eléctrica Planta de Ácido	USD/t de ác.	0,04
Planta de Oxígeno Kobe Steel (N°1)	USD/t de óx.	0,93	-	-	-
Planta Ox. L'Air Liquide (N°2)	USD/t de óx.	1,04	-	-	-
Planta de Oxígeno BOC (N°3)	USD/t de óx.	1,17	-	-	-
Control Uraso	USD/t de óx.	0,82	-	-	-

Tabla 60: Precios de Suministros secundarios en el Largo Plazo.

Suministros	Unidad	Precio	Suministros	Unidad	Precio
Agua Desmineralizada	USD/m ³	8,00	Aire Alta Presión	USD/MNm ³	24,00
Aire Baja Presión	USD/MNm ³	12,00	Vapor	USD/t	14,00

¹⁷ Los Repuestos para operación incluyen al Compresor, Equipos de la Fundición y Generales, mientras que los de mantención contemplan al Compresor, Equipos de Servicio, Equipos de la Fundición y Generales.

Precios correspondientes al Secador N°4, al CT y a la Mantención del CT son cero debido a que dejan de operar a partir del año 2019. Precio antes de la salida equivale a 0,07 USD/tmh, 0,05 USD/tms y 2,27 USD/tms, respectivamente.

¹⁸ El precio de los Repuestos para Mantención del HF los años 2017 y 2018 es de 40,87 USD/tms, dada las modificaciones realizadas para aumentar su capacidad.

Debido a que los servicios a terceros responden a contratos fijos, el precio de estos se asigna por día operativo y se separan por operación unitaria.

Tabla 61: Tarifas de distintos tipos de Servicios para la fundición en los primeros años.

Servicio de Transporte de Concentrado	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sistema Recepción y Mezcla	Miles USD/día	9,95	9,95	6,67	6,67	6,67	6,67	6,67
Arriendos Varios	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sistema Recep. y Mezcla	Miles USD/día	8,27	8,27	7,78	7,78	7,78	9,03	7,78
Sistema Fusión		0,11	0,11	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Sistema Conversión		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02
Sistema Refino y Moldeo		0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,54	0,42
Sistema Limp. de Gases		0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Sistema de Mant. Equipos Operación		1,99	1,99	1,38	1,38	1,38	1,38	1,38
Sistema Op. General		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Servicio de Mant. y Rep. Inst. No Operativas ¹⁹	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sistema Recepción y Mezcla	Miles USD/día	4,64	4,74	3,69	3,69	3,69	4,28	3,69
Sistema Fusión		2,83	2,85	1,63	1,63	1,63	1,92	1,63
Sistema Conversión		1,30	1,30	1,30	1,30	1,30	1,68	1,30
Sistema Refino y Moldeo		1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,66	1,28
Sistema Limp. de Gases		0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,32	0,27
Sistema de Mant. Equipos Operación		109,02	39,57	26,77	26,77	26,77	97,84	26,77
Sistema Op. General		2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39	2,39
Servicios Varios ²⁰	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sistema Recep. y Mezcla	Miles USD/día	10,29	10,39	7,67	7,67	7,67	8,90	7,67
Sistema Fusión		12,08	12,11	7,25	7,25	7,25	8,57	7,25
Sistema Conversión		7,03	7,03	7,03	7,03	7,03	9,07	7,03
Sistema Refino y Moldeo		3,27	3,27	3,27	3,27	3,27	4,21	3,27
Sistema Limp. de Gases		4,17	4,17	3,48	3,48	3,48	4,11	3,48
Sistema de Mant. Equipos Operación		2,66	2,66	1,96	1,96	1,96	1,99	1,96
Sistema Op. General		3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63	3,63

¹⁹ Incluye puertas, campamentos, edificios, vehículos, camas, puertas y otros.

²⁰ Incluye consultorías asociadas a operación, servicios de apoyo a la operación, bonos a contratistas, servicio de inspección técnica, servicio de muestreo, servicio de alimentación y campamentos, servicio de aseo industrial, servicio de aseo de oficina, servicios varios.

Tabla 62: Tarifas de Otros servicios para la fundición en los primeros años.

Otros	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Sistema Recep. y Mezcla	Miles USD/día	2,26	2,22	1,92	1,92	1,92	2,23	1,92
Sistema Fusión		1,47	1,47	0,87	0,87	0,87	1,03	0,87
Sistema Conversión		1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,52	1,17
Sistema Refino y Moldeo		1,50	1,50	1,50	1,50	1,50	1,94	1,50
Sistema Limp. de Gases		1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43	1,43
Sistema de Mant. Equipos Operación		1,13	1,13	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09
Sistema Op. General		0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48

Finalmente, se registran las últimas tarifas referentes a la Administración Directa (que habían quedado pendientes), los que se agrupan por elemento de gasto y por día.

Tabla 63: Tarifas de insumos referentes a la Administración.

Administración Directa	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Materiales	Miles USD/día	0,94	0,94	0,87	0,87	0,87	1,02	0,87
Servicios		12,54	12,54	10,16	10,16	10,16	12,54	10,16
Otros		1,75	1,75	1,75	1,75	1,75	2,07	1,75

Luego de registrar los precios y tarifas de todos los insumos, se debe registrar el I/P de los materiales sustanciales, los combustibles, la energía eléctrica y los suministros, expresados en su valor en el Largo Plazo.

Tabla 64: I/P de Materiales en el Largo Plazo.²¹

Consumo de fundente	Unidad	Valor	Consumo de carbón coque	Unidad	Valor
Sílice fina (HF)	t/tms	0,03	Horno Flash	t/tms	0,00006
Sílice mezcla (CT)	t/tms	0,00	Convertidor Teniente	t/tms	0,00
Sílice mezcla (CPS)	t/tmf	0,01	Convertidores PS	t/tmf	0,002
Sílice intermedia (CPS)	t/tmf	0,06	-	-	-

²¹ Los I/P referentes al CT son cero dado que su operación cesa en el 2019, pero su valor en los años anteriores es de 0,04 t/tms de sílice mezcla y de 0,002 t/tms de carbón coque.

Tabla 65: I/P de Combustibles a Largo Plazo.²²

Sub – operación	Consumo de petróleo búnker		Consumo de gas natural		Consumo de querosén	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Secador Rotatorio N°4	kg/tmh	0,00	MBTU/tmh	0,00	-	-
Secador a Vapor N°5	kg/tmh	6,80	MBTU/tmh	0,36	-	-
Horno Flash	kg/tms	4,84	MBTU/tms	0,09	L/tms	0,09
Convertidor Teniente	kg/tms	0,00	MBTU/tms	0,00	L/tms	0,00
Convertidores PS	kg/tmf	14,72	MBTU/tmf	0,03	L/tmf	3,39
Hornos Ref. y Moldeo	kg/tmf	34,53	MBTU/tmf	0,02	L/tmf	1,90
Op. Contacto Gases	-	-	-	-	L/t de ác.	0,06

Tabla 66: I/P de Suministros a Largo Plazo.²³

Sub – operación	Consumo agua industrial		Consumo aire alta/baja presión		Consumo de vapor	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Secador Rotatorio N°4	m ³ /tmh	0,00	MNm ³ /tmh	0,00/-	-	-
Secador a Vapor N°5	m ³ /tmh	0,88	MNm ³ /tmh	0,01/-	t/tmh	0,01
Horno Flash	m ³ /tms	0,06	MNm ³ /tms	0,09/-	-	-
Convertidor Teniente	m ³ /tms	0,00	MNm ³ /tms	0,00/0,00	-	-
Convertidores PS	m ³ /tmf	4,78	MNm ³ /tmf	0,19/1,85	-	-
Hornos de Ref. y Moldeo	m ³ /tmf	5,58	MNm ³ /tmf	0,06/0,19	t/tmf	0,04
Op. Limpieza Gases	m ³ /t de ác.	1,43	-	-	-	-
Op. Contacto Gases	m ³ /t de ác.	0,46	-	-	-	-
Op. Tratam. de Efluentes	m ³ /t de ác.	0,02	-	-	-	-
P. Ox. Kobe Steel (N°1)	m ³ /t de óx.	0,17	-	-	-	-
P. Ox. L'Air Liq. (N°2)	m ³ /t de óx.	0,14	-	-	-	-
Planta Ox. BOC (N°3)	m ³ /t de óx.	0,12	-	-	-	-

²² Los I/P referentes al Secador N°4 y al CT son cero dado que su operación cesa el 2019, pero los valores previos a esta fecha son de 6,80 t/tmh y 0,39 t/tms de petróleo búnker, y 0,42 MBTU/tmh y 0,07 MBTU/tms de gas natural, respectivamente, y el consumo de querosén del CT es de 3,33 L/tms. Por otro lado, el I/P de petróleo búnker del Secador N°5 antes del 2019 era de 13,33 t/tmh pero, debido al cambio tecnológico, después de este año es 6,80 t/tmh.

²³ Los I/P referentes al Secador N°4 y al CT son cero dado que su operación cesa el 2019, pero los valores previos a esta fecha son de 0,40 m³/tmh y 0,46 m³/tms de agua industrial, y 0,03 MNm³/tmh y 0,09 MNm³/tms de aire alta presión, respectivamente, y el consumo de aire baja presión del CT previo al 2019 es de 0,75 MNm³/tms.

Tabla 67: I/P de la Energía Eléctrica a Largo Plazo.²⁴

Sub – operación	Consumo energía eléctrica		Consumo potencia eléctrica	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Secador Rotatorio N°4	MWh/tmh	0,00	MWh/tmh	0,00
Secador a Vapor N°5	MWh/tmh	0,01	MWh/tmh	0,01
Alm. y Distribución de concentrado	MWh/tmh	0,01	MWh/tmh	0,01
Horno Flash	MWh/tms	0,03	MWh/tms	0,05
Convertidor Teniente	MWh/tms	0,00	MWh/tms	0,00
Convertidores PS	MWh/tmf	0,06	MWh/tmf	0,11
Hornos de Ref. y Rueda de Mold.	MWh/tmf	0,01	MWh/tmf	0,02
Operación Limpieza Gases	MWh/t de ác.	0,01	MWh/t de ác.	0,03
Operación Contacto Gases	MWh/t de ác.	0,12	MWh/t de ác.	0,34
Operación Tratam. de Efluentes	MWh/t de ác.	0,0005	MWh/t de ác.	0,001
Planta de Ox. Kobe Steel (N°1)	MWh/t de óx.	0,14	MWh/t de óx.	0,30
P. de Ox. L'Air Liquide (N°2)	MWh/t de óx.	0,13	MWh/t de óx.	0,28
Planta de Oxígeno BOC (N°3)	MWh/t de óx.	0,02	MWh/t de óx.	0,29
Control Uraso	MWh/t de óx.	0,02	MWh/t de óx.	0,03
Nitrógeno Planta de Oxígeno	MWh/t de óx.	0,01	MWh/t de óx.	0,02

Tabla 68: I/P de insumos desagrupados en el Largo Plazo (excepto CT).

Sub – operación	Insumo	Unidad	Valor
Secador Rotatorio N°5	Agua Desmineralizada	m ³ /tmh	0,02
CT (2017 y 2018)	Soda Cáustica Líquida NaOH al 50%	kg/tms	0,38
Hornos de Refino y Rueda de Moldeo	Desmoldante	kg/tmf	1,27
	Carbonato de Sodio	kg/tmf	1,88
Op. Trat. de Efluentes	Cal viva granulada 80% CaO libre	tmf/t de ác.	0,02

Finalmente, para concluir la hoja Parámetros, se adjunta el sistema de turno para roles A y B y los sueldos anuales correspondientes. El sistema de turno depende de la faena en cuestión, pero se

²⁴ Los I/P referentes al Secador N°4 y al CT son cero dado que su operación cesa en el 2019, pero los valores previos a esta fecha son de 0,02 MWh/tmh y 0,01 MWh/tms de energía eléctrica, y 0,01 MWh/tmh y 0,02 MWh/tms de potencia eléctrica, respectivamente.

utiliza un algoritmo estándar para determinar la cantidad de personas requeridas por puesto de trabajo (factor de contratrurno), lo que considera los turnos, vacaciones, porcentaje promedio de ausentismo y de capacitación laboral. Para el caso de la fundición, el sistema de turno para los roles B es de 6x1 6x2 6x3, mientras que para los roles A es de 4x3.

Total días trab. = Días año – Vacaciones – Días no trab. por descanso – Días perdidos

$$\text{Contraturnos y reemplazos} = \text{Turnos por día} \cdot \left(1 + \frac{\text{días no trabajados}}{\text{días trabajados}}\right)$$

Número de personas = ENTERO MENOR(Contraturnos y reemplazos)

$$\text{Factor adicional} = \frac{\text{Contraturnos y reemplazos}}{\text{Numero de personas}}$$

Ecuación 27: Cálculo del factor de contratrurno y reemplazo.

Tabla 69: Detalle de sistema de turnos rol A y rol B.

Factor de Contratrurno y reemplazo	Turno 6x1 6x2 6x3	Turno 4x3
Días año	365	365
Días de trabajo	18	4
Días de descanso	6	3
Total días ciclo	24	7
FIJO: Semanas de vacaciones	3	3
FIJO: Días de vacaciones	21	21
Días que cubrir	344	344
Número de ciclos	14	49
Días no trabajados por descanso	86	147
Días que cubrir	258	197
%Ausentismo promedio de DCH	4%	4%
%Capacitación promedio de DCH	0,5%	0,5%
Días perdidos	12	9
TOTAL DÍAS TRABAJADOS AL AÑO	246	188
TOTAL DÍAS NO TRABAJADOS AL AÑO	119	177
Número de turnos de 12 horas por día	2	2
Contraturnos y reemplazo por puesto de trabajo	2,96	3,89
Número de personas	2	3
Factor adicional	148,1%	129,6%

Para determinar las remuneraciones de todo el personal se calcula un promedio ponderado entre las remuneraciones y los trabajadores nuevos y antiguos, de tal manera de representar el descenso en el sueldo mensual que implica este nuevo contrato. Se estima que al año 2025 los sueldos se estabilizan en 19.400 USD/mes para los roles E (nivel gerencial), 11.700 USD/mes para los roles A (jefes de turno y supervisores) y 6.800 USD/mes para los roles B (operadores y mantenedores).

Tabla 70: Remuneraciones de los distintos tipos de trabajadores, por persona.

Trabajadores	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rol E	USD/mes	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400
Rol A	USD/mes	12.400	12.400	12.400	12.400	12.200	11.900	11.900
Rol B	USD/mes	7.300	7.300	7.300	7.300	7.200	7.100	7.100

3.3.7.3 Balance de masa

Para el caso de la fundición se considera el balance ya descrito solo hasta la venta de ánodos de cobre y ácido sulfúrico comercial como subproducto. También se incluye el tratamiento de polvos y la flotación de escorias, dado que estos se recirculan a la fundición.

3.3.7.4 OPEX base Planta

En esta hoja se determinan los consumos de los insumos principales y los gastos totales por operación unitaria y por elemento de gasto, mediante la vinculación entre las dos hojas anteriores. Además, se calcula la dotación total por operación unitaria, para roles B (divididos en mantenedores y operadores) y roles A, en donde se adapta el *input* para obtener aproximadamente la dotación consignada en el PMCHS.

$$\text{Dot. total Op. Unitaria} = \text{ENTERO}(\text{Input dotación} \cdot \text{Factor Adicional}) \cdot \text{Número de personas}$$

Ecuación 28: Cálculo de la dotación total, considerando contraturnos y reemplazos²⁵.

Luego se determinan los gastos desglosados en miles de USD, mediante la vinculación de los consumos con los precios respectivos o mediante la multiplicación del precio por el tonelaje procesado o producido (insumos secundarios):

²⁵ Factor Adicional y Número de personas calculados en Ecuación 27, página 85.

Tabla 71: Separación de los gastos en las operaciones unitarias.

Desglose de Cuentas por cada operación unitaria
Remuneración operadores
Remuneración mantenedores
Materiales de operación
Materiales de mantenimiento
Combustible
Energía Eléctrica
Suministros
Servicios de operación
Servicios de mantención (no operativa)
Otros

Para el caso de la Operación General se realiza una distinción, ya que en ella se incluyen tanto los consumos y gastos de las Plantas de Oxígeno como las remuneraciones del personal rol A (considerando el sistema de turnos 4x3) correspondientes a la Fusión, Conversión, Refino y Moldeo, Limpieza de Gases y Planta de Oxígeno (la planilla de la División Chuquicamata no incluye personal rol A en la Recepción y Mezcla). Para calcular los gastos finales, se distribuyen los gastos de la Planta de Oxígeno en un 80% para la Fusión, dado que es la operación unitaria que utiliza mayor enriquecimiento en el aire inyectado a los hornos, y un 20% para la Conversión, que lo utiliza en menor medida. De la misma manera, el gasto en remuneraciones rol A se reparte en partes equitativas entre Fusión, Conversión, Refino y Moldeo y Limpieza de Gases.

Por otro lado, la Mantención General contiene los cálculos remunerativos de los roles B divididos en Mantención Eléctrica y en Mantención Refractario, al igual que los jefes roles A. Además, se incluyen los roles A referentes a la mantención de las demás operaciones unitarias.

La dotación de la Administración no presenta contraturnos y reemplazos, ya que estos puestos de trabajo son no operativos. Se incluye un rol E (gerente de planta), roles A y roles B, y los insumos correspondientes (materiales, servicios y otros gastos).

Finalmente, se puede calcular el costo total de la fundición por elemento de gasto y por operación unitaria (no se consideran gastos actualizados mediante la corrección monetaria, sino solo los costos bases, ya que la actualización se realiza en la hoja final). Además, a modo de indicador de la planta, se calculan algunos consumos y se muestra la dotación total de la Fundición Chuquicamata, considerando la dotación de terceros.

Tabla 72: Distribución porcentual promedio de los gastos de la fundición por operación unitaria y por elemento de gasto.²⁶

Por Op. Unitaria	Uni.	R.y Mez.	Fusión	Conv.	R. y Mold	Limp. Gases	Mant.	Adm.
Peso	%	11,46	16,47	14,09	12,45	15,85	26,54	3,14
Por El. de Gasto	Uni.	Rem.	Mat.	Comb.	Energía	Sum.	Servicios	Otros
Peso	%	20,55	11,70	8,72	22,03	20,05	15,48	1,47

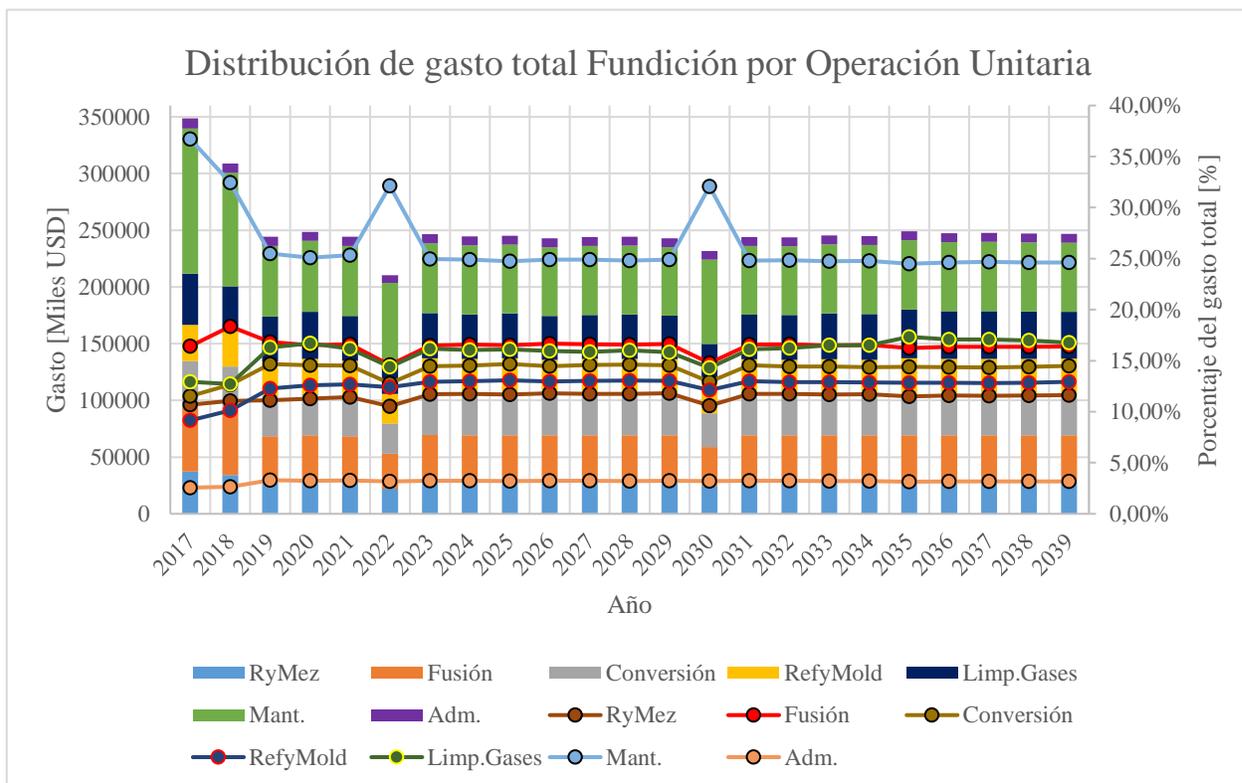


Ilustración 35: Desglose de gastos de la fundición por operación unitaria.

Los detalles de cada operación unitaria se expresan en el Anexo B, en donde se evalúan los porcentajes de cada elemento de gasto en cada operación unitaria.

²⁶ Se consideran los costos de todo el horizonte temporal, desde el 2017 hasta el 2039.

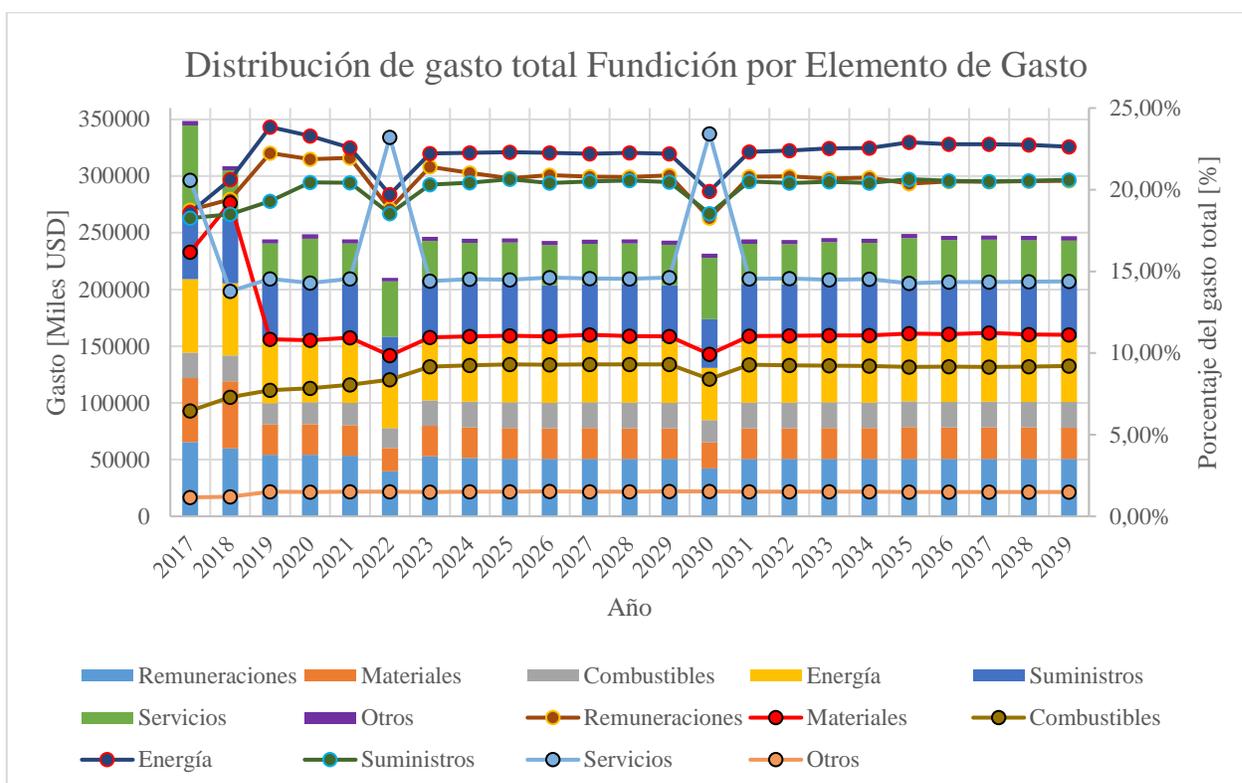


Ilustración 36: Desglose de gastos de la fundación por elemento de gasto.

Tabla 73: Indicadores de consumos principales de la fundación.

Consumo total Fundación	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Petróleo Búnker	t	37.311	39.505	33.816	33.466	33.263	26.153
Querosén	Miles MBTU	4.279	4.306	2.038	2.002	1.979	1.549
Agua industrial (desalada)	Miles m ³	7.013	7.221	6.783	6.761	6.666	5.223
Fundentes (sílice)	t	66.391	67.801	53.255	52.710	52.383	39.424
Energía Eléctrica	Miles MWh	1.025	1.022	976	988	973	742

Tabla 74: Dotación de la fundación por turno.²⁷

Dotación	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	LP
Operadores	#Personas	178	178	136	136	136	136
Mantenedores	#Personas	140	140	119	119	119	119
Supervisores y otros	#Personas	41	41	41	41	41	41
TOTAL DOTACIÓN	#Personas	359	359	296	296	296	296
Dotación de terceros	#Personas	117	117	117	117	117	117

²⁷ La dotación de terceros representa a los contratistas, y el sistema de turno es idéntico al de los operadores.

Tabla 75: Dotación total de la fundición.

Dotación	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	LP
Operadores	#Personas	356	356	272	272	272	272
Mantenedores	#Personas	280	280	238	238	238	238
Supervisores y otros	#Personas	69	69	69	69	69	69
TOTAL DOTACIÓN	#Personas	705	705	579	579	579	579
Dotación de terceros	#Personas	234	234	234	234	234	234

3.3.7.5 OPEX Calculado

El último paso es aplicar los factores de corrección monetaria, calculados previamente en la Tabla 21, a los gastos calculados en la hoja anterior, para lo que se debe calcular un Factor de Corrección global, para ajustar el gasto según el tipo de moneda utilizada, es decir, en qué tipo de moneda se pagan los elementos de gasto. Esto se indica en la tabla inferior, en donde se expresan los porcentajes gastados en moneda nacional (CLP) y en dólar norteamericano (USD).

$$\text{Factor de Corrección} = \%CLP \cdot \text{Factor C. Moneteria CLP} + \%USD \cdot \text{Factor C. Monetaria USD}$$

Ecuación 29: Factor de corrección monetaria ponderado por tipo de moneda utilizada.

Tabla 76: Factores de corrección monetaria, seis primeros años.

Fact. de Corrección	CLP	USD	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Remuneraciones	100%	0%	1,07	1,09	1,07	1,08	1,08	1,05
Materiales	30%	70%	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02
Combustibles	0%	100%	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Energía	0%	100%	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01	1,01
Suministros	70%	30%	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04
Servicios	70%	30%	1,05	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04
Otros	100%	0%	1,07	1,09	1,07	1,08	1,08	1,05

Cada gasto anual se multiplica por el factor de corrección monetaria correspondiente, con lo que los costos quedan actualizados a moneda de noviembre del 2017. Sin embargo, para el caso de los combustibles y la energía eléctrica no se aplica el factor, debido a que se paga completamente en dólar norteamericano y sus precios ya están actualizados. Mientras que, para el caso de las remuneraciones, se agrega un multiplicador opcional que considera el Escalamiento Laboral Anual, que se asigna como de 0%, pero que en la práctica posee un valor mayor.

$$\text{Gasto Calculado} = \text{Gasto OPEX base Planta} \cdot \text{Factor de Corrección}$$

$$\text{Remun. Calcul.} = \text{Remun. OPEX base Planta} \cdot \text{F. de Corrección} \cdot (1 + \text{Esc. Costo Laboral} [\%])$$

Ecuación 30: Cálculo de Gasto Calculado y de Remuneración calculada con escalamiento de costo laboral.

Tabla 77: OPEX calculado por operación unitaria y por elemento de gasto.²⁸

Costos Unitarios Planta Fundición				
POR OPERACIÓN UNITARIA		Unidad	POR ELEMENTO DE GASTO	
Recepción y Mezcla	25,40	USD/tms	46,77	Remuneraciones
Fusión	24,86	USD/tms	28,02	Materiales
Conversión	28,54	USD/tms	18,78	Combustible
Refino y Moldeo	27,72	USD/tms	31,25	Energía
Limpieza de Gases	34,68	USD/tms	45,02	Suministros
Mantenimiento	59,65	USD/tms	34,77	Servicios
Administración	7,10	USD/tms	3,34	Otros
TOTAL	207,95	USD/tms	207,95	TOTAL

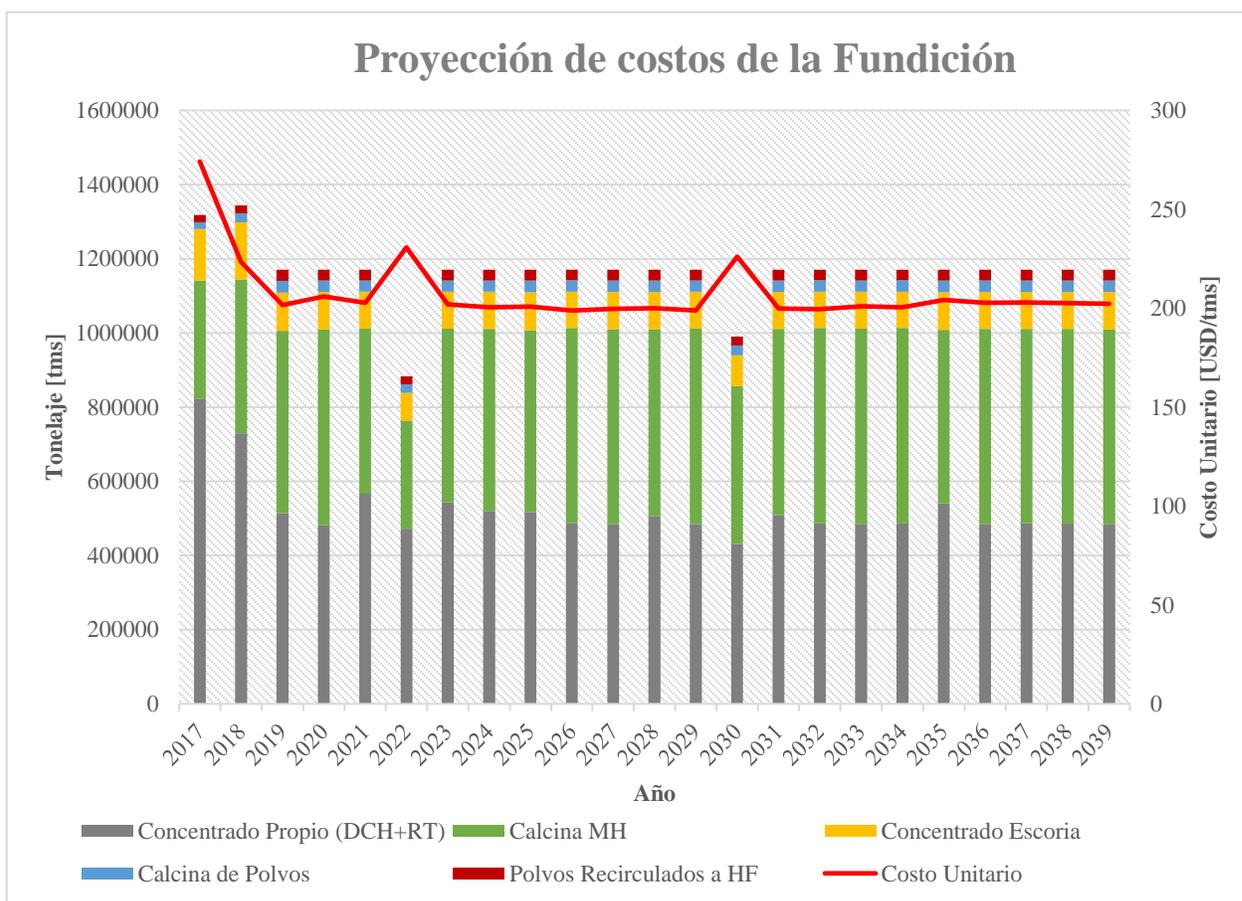


Ilustración 37: Proyección de costo unitario y alimentación de la Fundición Chuquicamata.

²⁸ El detalle de los gastos calculados se muestra en el Anexo C. El costo unitario se calcula en base al total de costos en todo el horizonte temporal.

3.4 MODELO OPEX DE REFINERÍA

3.4.1 Pre – modelo de Refinería N°1

Análogamente al caso de la fundición, la planilla base contiene el siguiente desglose de operaciones unitarias (llamadas sub – operaciones, para seguir la misma línea que el modelo OPEX de fundición) de la Refinería Electrolítica, el que está condensado en una misma hoja de la planilla original por lo que, en el primer pre – modelo, se distribuyen los datos para que cada operación unitaria se describa en una hoja Excel diferente.

Tabla 78: Desglose de los procesos de cada operación unitaria de la refinería de cobre.

Elemento de Gasto	Operación Unitaria	Sub – operaciones
Refinería	Electrorrefinación	Electrorrefinación cátodos permanentes; Procesos de Máquina (PDA); Recepción y Despacho de Materiales; Planta de Intercambio Iónico (IX).
	Tratamiento de Barro Anódico	Planta de Tratamiento Barro Anódico
	Mantenimiento Interno	Administración Mantenimiento; Gestión y Servicios Mantenimiento; Planificación Refinería; Mantenimiento Mecánica ER – Planta de Metales Nobles – IX; Mantenimiento Eléctrico; Mantenimiento Mecánica Máquinas; Mantenimiento Oleohidráulico; Mantenimiento Sistemas de Control.
	Administración Directa	Administración Refinería; Adm. Gestión Operativa; Ingeniería y Procesos; Adm. Producción; Área Inversiones.

La planilla N15FP15 daba cuenta de un proyecto referente a la Fundición Chuquicamata, por lo que los datos de la refinería constituyen un agregado secundario al proyecto, el que contiene estimaciones simples (“regla de tres”) de parte de su gasto: el elemento de gasto “Suministros” no aparece detallado en esta planilla, solo aparece un gasto total de suministros que se calcula en base a una ponderación promedio (según benchmarking de años anteriores) del resto de gastos de la refinería. Debido a esto, los datos de los suministros se completan con los indicadores contenidos en la planilla auxiliar API N14MS03.

Por otro lado, las remuneraciones se obtienen del mismo archivo desde el cual se extraen las remuneraciones de la fundición, donde igualmente existe división entre personal indefinido nuevo y antiguo, en el que el personal antiguo va a la baja y el nuevo al alza a medida que se avanza en el horizonte temporal. Ambos grupos poseen un sueldo base diferente, por lo que se calcula el gasto total anual por sub – operación y un sueldo anual por persona para rol A y rol B, considerando personal nuevo y antiguo, análogamente al caso de la fundición.

Los datos referentes a la Administración solo se caracterizan con un gasto y no con un precio, dado su carácter no operacional.

Con todos estos ajustes, el Pre – modelo de Refinería completa un total de 924 filas de la planilla Excel, a la que se le realizan simplificaciones similares a todos los pre – modelos de fundición, de tal manera de reducir la envergadura del modelo final, agrupando insumos afines y descartando insumos que representen un bajo costo operativo, siguiendo las Bases de Estimación del Instructivo de Costos de Operación ^[21]. Esto se va realizando en pre – modelos sucesivos, de tal manera de vislumbrar el impacto en la magnitud y en el costo del Modelo de Refinería.

Tabla 79: Detalle de los insumos presentes en los elementos de gasto de la refinería.

Elemento de Gasto	Descripción
Remuneraciones	Dotación Rol A y Rol B.
Materiales	Ácido sulfúrico, floculante sulfonato de sodio Avitone, maderas, materiales de sondaje, reactivos, acondicionadores, otros materiales, soldadura eléctrica, lubricantes, cables y acero, acero estructural; tuberías, válvulas y accesorios; materiales para construcción, envases para productos, herramientas, material eléctrico, material de laboratorio, materiales generales bodega, implementos de seguridad, ropa de trabajo, víveres, medicamentos, repuestos (compresor, equipos de servicio, correa transportadora, concentradora, equipos de refinería, seguridad), repuestos en general, útiles de escritorio, muebles e instalaciones, suministro de equipos computacionales y de redes.
Combustibles	Petróleo diésel, gas natural.
Energía Eléctrica	Energía y potencia eléctrica, y energías renovables no convencionales.
Suministros	Agua potable, agua industrial, aire alta/baja presión, vapor.
Servicios de Terceros	Arriendos de equipos, vehículos e inmuebles; transporte de producto, transporte de materiales y suministros; consultorías asociadas a administración, operación y seguridad; servicios (estudios de ingeniería, embarque, apoyo a la operación, inspección técnica, muestreo, mantenimiento, de alimentación y campamentos, aseo industrial y de oficina; mantención y reparación de puertas e instalaciones, campamentos y edificios, camas, vehículos y equipos; administrativos, varios internos) y bonos adicionales a contratistas.
Otros	Seguros y bienes, comunicaciones, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios, contratos, traslados, actividades deportivas y sociales, vestuario, otros.

3.4.2 Pre – modelo de Refinería N°2

De la misma manera que se trata el modelo de fundición, se deben confirmar todos los cálculos que contiene el pre – modelo de refinería según los gastos contenidos en la planilla base, para detectar posibles errores de indexación o datos de gastos sin cálculo ni justificación alguna. Los valores de gastos recalculados se verifican con las cantidades incluidas en la planilla de costos auxiliar

N14MS03, de tal manera que sean del mismo orden de magnitud, lo que valida el algoritmo y las tarifas utilizadas.

Tabla 80: Ajustes realizados en el Pre – modelo N°2 de Refinería.

Op. Unitaria	Errores	Simplificaciones
ER	<p>Para calcular gasto en ácido sulfúrico, se corrige el precio de este insumo, ya que la planilla base contiene una tarifa aproximada.</p> <p>Algunos de los costos de la energía eléctrica no provienen de un cálculo previo, sino que es solo un dato escrito manualmente.</p>	<p>En Materiales, los útiles de escritorio, muebles e instalaciones, suministro de equipos computacionales y de redes se juntan en un único apartado denominado “Gastos de oficina”, según las sub – operaciones existentes, y se envían a la Administración. Los implementos de seguridad y ropa de trabajo, víveres y medicamentos se expresan solo con un gasto y se suman al gasto en remuneraciones, según las sub – operaciones.</p> <p>En Energía Eléctrica, las energías renovables no convencionales se describen solo con un gasto, al ser secundarias. Por otro lado, se corrige la tarifa de la potencia eléctrica, análogamente al caso de la fundición.</p> <p>En Servicios de Terceros, se crea la categoría “Servicio de mantención y reparación no operativas”, que agrupa en una sola cuenta a puertas e instalaciones, campamentos y edificios, camas, vehículos y equipos, según las sub – operaciones existentes, caracterizados con un gasto y un precio. Se agrupan todos los Arriendos por operación unitaria, caracterizados con un precio y un gasto. Los Servicios de mantenimiento de las distintas operaciones unitarias se envían al Mantenimiento. Los Servicios de apoyo a la operación, servicios técnicos y bonos adicionales se agrupan en una misma categoría, según las sub – operaciones existentes. Los Servicios de alimentación y campamentos, servicio de aseo industrial y de oficina y servicios varios se agrupan en una sola categoría llamada “Servicios Varios”, según las sub – operaciones existentes. Las Consultorías asociadas a administración y Servicios administrativos presentes en todas las operaciones unitarias se trasladan a la Administración</p>
Tratamiento de Barro Anódico	<p>Esto se corrige utilizando las tarifas de la energía y potencia.</p>	
Mantenimiento	-	
Administración	-	<p>En Otros, contratos, traslados, actividades deportivas y sociales, vestuario y otros se agrupan en una sola categoría, según las sub – operaciones existentes, llamada “Beneficios al personal”. Luego, los seguros y bienes, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios y los beneficios al personal se agrupan en una sola categoría denominada “Otros Gastos”, según las sub – operaciones.</p>

Al ya tener el *know how* de los pre – modelos de costos de la fundición, las simplificaciones que se realizan en este pre – modelo son análogas al caso de la fundición, pero aplicado a otras operaciones unitarias. Luego, con todos estos ajustes, la cantidad de líneas del Pre – modelo N°2 toma un valor de 560, implicando una disminución del 39,39% aproximadamente en el total de filas de la planilla Excel, sin afectar los costos totales de la refinería.

Además, se redistribuyen las sub – operaciones: la Administración Mantenimiento, Gestión y Servicios Mantenimiento y la Planificación Refinería, situados originalmente en el Mantenimiento, se adjuntan a la cuenta de Administración Directa, dado que son de carácter administrativo y gerencial, por lo que no representan gasto operativo ni de mantenimiento.

3.4.3 Pre – modelo de Refinería N°3

Luego de agrupar las cuentas, se realiza el filtro de datos según costos, utilizando un criterio distinto al ocupado en el caso de la fundición, dado el menor volumen de datos que contiene el pre – modelos de Refinería N°2 (se consideran los insumos relevantes detallados en la Guía para la Trazabilidad de Costos de Operación ^[24]). Se calcula el peso del costo de cada insumo de la refinería con respecto al costo total de ésta y, a su vez, el peso de cada insumo con respecto a la operación unitaria a la que pertenece.

$$\text{Peso del Costo } c/r \text{ a toda la Refinería } [\%] \leq 0,2\%$$

$$\text{Peso del Costo } c/r \text{ a cada Operación Unitaria } [\%] \leq 1\%$$

Ecuación 31: Criterio de descarte de insumos refinería según costos.

Con color rojo se denotan las cuentas que se deben eliminar según el Criterio, sin considerar la Administración, por su carácter no operativo. En efecto, los apartados marcados con color azul son aquellos que deberían eliminarse, pero están suscritos solo a la Administración Directa, por lo que se conservan y analizan posteriormente.

Los Servicios de Muestreo y el Agua Industrial no se eliminan a pesar de su bajo porcentaje, debido a que son insumos relevantes.

Tabla 81: Distribución de los costos de cada insumo de la refinería (incluye Administración).

Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]	Cuenta	Peso [%]
Rol A	5,06	Material Eléctrico	1,56	Aire Alta/Baja Pres.	1,39
Rol B	30,09	Mat. Grl. Bodega	0,86	Vapor	6,81
Ácido Sulfúrico	1,70	Rep. Eq. Concent.	0,02	Arriendos Varios	0,78
Sulfonato de Sodio Avitone	0,47	Repuestos Compresor	0,10	Transp. Materiales y Suministros	0,01
Maderas	0,04	Rep. Equipos de Servicio	0,02	Transporte de Producto	0,37
Materiales de Sondaje	0,02	Rep Correa Transportadora	0,01	Consult. Asociadas a Op.	0,80
Reactivos	1,39	Rep. Eq. Refinería	4,80	Consult. Asoc. a Seg.	0,21
Acondicionadores	0,30	Rep. Eq. Seg.	0,02	Consult. Asoc. Adm.	0,01
Otros materiales	0,25	Rep. en General	1,60	Servicios Adm.	0,002
Sold. Eléctrica	0,01	Gastos de Oficina	0,47	Serv. Estudio de Ing.	0,25
Lubricantes	0,03	Gas Natural	0,15	Servicio de Embarque	0,02
Cables, Acero	0,04	Petróleo Diesel	0,12	Serv. de Apoyo Op., Insp. Técnica, Bonos contratistas	4,40
Acero Estructural	0,14	Energía Eléctrica	8,49	Servicio de Muestreo	0,14
Tuberías, válvulas y acc.	0,19	Potencia Eléctrica	14,38	Servicio de Mantenimiento	0,17
Mat. de Const.	0,07	ERNC	0,09	Servicios Varios	3,88
Envases para producción	0,92	Agua Potable	0,69	Servicio Mant. y Rep. no operativa	3,76
Herramientas	0,72	Agua Industrial	0,16	Otros gastos	2,03

Luego de aplicado el filtro de datos, se obtiene que las filas del Pre – modelo N°3 disminuyen en un 57,47% acumulado, contabilizando un total de 429 líneas y eliminando el 1,07% de los costos.

3.4.4 Pre – modelo Final de Refinería

Se realizan los últimos ajustes para comenzar a ensamblar el modelo.

- El Mantenimiento Mecánico ER – IX – Plamen (PTBA) se divide de tal forma de separar los gastos de la Planta de Tratamiento de Barros Anódicos de las cuentas relacionadas con

la Electrorrefinación. Para hacerlo, se estima mediante benchmarking que el costo del mantenimiento mecánico de la PTBA es el 10% del costo total. Luego, el costo unitario se expresa en USD por kilos de barro anódico generado en las celdas de ER.

- Las Herramientas y el Material Eléctrico se juntan en una sola cuenta para seguir la misma lógica del modelo de fundición.
- El Agua Potable se elimina de la planilla, debido a que no es un gasto relacionado con la operación misma.

Con estos últimos ajustes, el Pre – modelo Final de Refinería queda formado por 351 líneas de la planilla Excel, lo que representa una disminución acumulada del 62,01%, que va de la mano con la extracción del 1,76% de los costos totales.

Luego, se debe definir la dotación y las remuneraciones de los roles A y B, la que posee también dos clases de trabajadores (al igual que el caso de la fundición) para estos roles: personal nuevo y personal antiguo ^[27], los que se diferencian en el tipo de contrato bajo el cual ingresan a la corporación, ya que el contrato nuevo implica un sueldo fijo menor y, por lo tanto, un gasto menor en remuneraciones. La dotación nueva va progresivamente aumentando con el horizonte temporal.

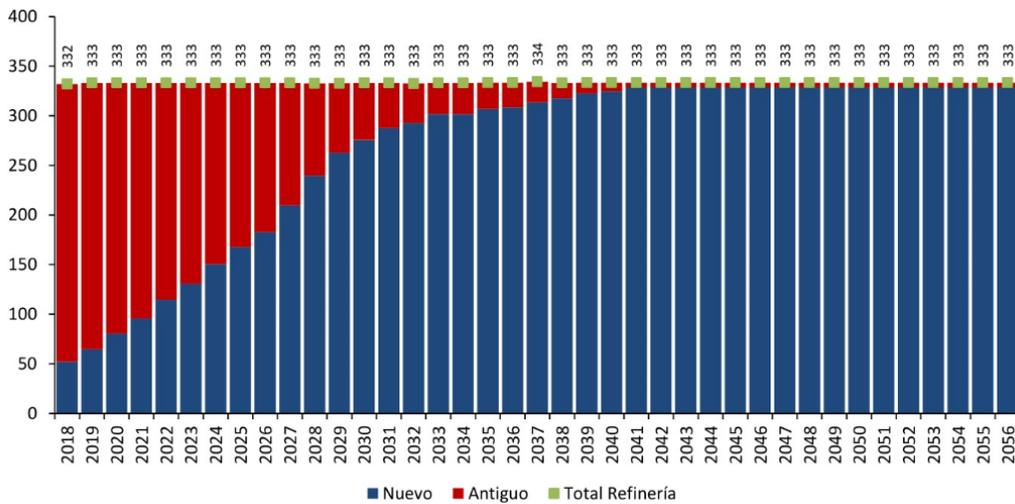


Ilustración 38: Evolución dotacional rol A y rol B nuevo y antiguo de la Refinería DCH.

El archivo de la dotación contiene las remuneraciones y el personal total año a año (suma de todos los turnos de la refinería), separado por operación unitaria y por sub – operación. Esto es un problema para poder configurar el modelo final, ya que éste calcula automáticamente la cantidad de personal dado el sistema de turno y la cantidad de trabajadores por turno (para ambos roles), por operación unitaria.

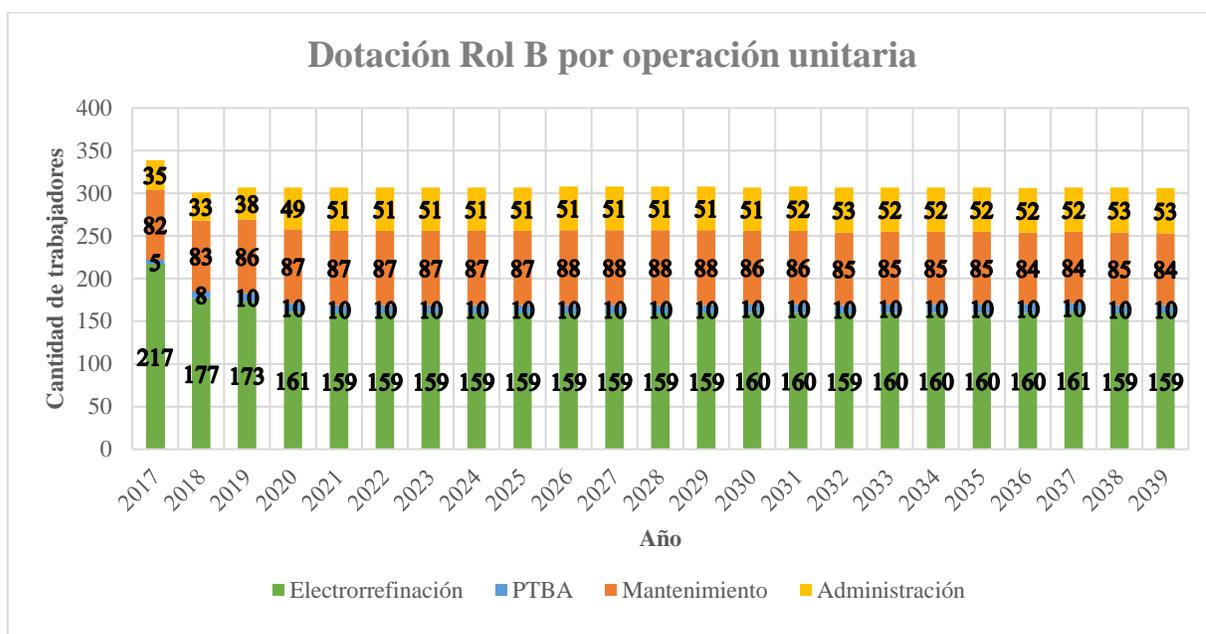


Ilustración 39: Detalle de la dotación Rol B de la Refinería DCH por operación unitaria.

Se hace necesario, entonces, expresar una cantidad fija de trabajadores en cada sub – operación, por lo que se estima la dotación en el Largo Plazo y en todo el horizonte temporal, tratando de que la suma total de la dotación se aproxime a las planificaciones de la Reformulación del Proyecto Chuquicamata Subterráneo.

Con los ajustes, se establece una dotación de 306 operadores y mantenedores y 27 roles A, contabilizando un total de 333 trabajadores, lo que va en línea con el Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo. Además, se adiciona un gerente de toda la planta, aunque en la realidad pueden existir distintos niveles gerenciales, lo que depende de cada división.

Tabla 82: Desglose de la proyección dotacional Rol B de la Refinería Chuquicamata.

Sub – operación	Dotación total	Sub – operación	Dotación total
Electrorrefinación	60	M. Mecánica ER - IX	6
Proceso Máquinas (PDA)	24	M. PTBA	6
Recepción y Despacho de Mat.	76	M. Eléctrica	24
Tratamiento Barro Anódico	8	M. Mecánica Máquinas	26
Administración	48	M. Oleohidráulico	14
-	-	M. Sistemas de Control	14

Tabla 83: Desglose de la proyección dotacional Rol A de la Refinería Chuquicamata.

Sub – operación	Dotación total	Sub – operación	Dotación total
Electrorrefinación	3	M. Mecánica ER - IX	3
Tratamiento Barro Anódico	0	Mantención PTBA	3
Administración	15	Mantención Eléctrica	3

Finalmente, se puede configurar el modelo final, el que consta de los siguientes insumos:

Tabla 84: Insumos considerados en el modelo definitivo de refinería.

Elemento de Gasto	Descripción
Remuneraciones	Dotación Rol A y Rol B.
Materiales	Ácido sulfúrico, floculante sulfonato de sodio Avitone, reactivos, acondicionadores, otros materiales, materiales para construcción, envases para productos, herramientas, material eléctrico, materiales generales bodega, repuestos equipos de refinería y conc., repuestos en general, gastos de oficina.
Combustibles	Gas natural (solo en Administración).
Energía Eléctrica	Energía y potencia eléctrica.
Suministros	Agua industrial, aire alta/baja presión, vapor.
Servicios de Terceros	Arriendos varios; transporte de producto; consultorías asociadas a administración, operación y seguridad; servicios (estudios de ingeniería, apoyo a la operación, inspección técnica, muestreo, varios; mantención y reparación de puertas e instalaciones, campamentos y edificios, camas, vehículos y equipos, administración) y bonos adicionales a contratistas.
Otros	Seguros y bienes, publicaciones, comisiones de servicio, gastos varios.

3.4.5 Modelo OPEX generalizado de las Refinerías de Codelco

El modelo final consta de cinco hojas Excel: Inicio, Parámetros, Balance de Masa, OPEX base planta y OPEX calculado.

3.4.5.1 Hoja Inicio

Análogamente al caso de la fundición, esta hoja presenta una breve descripción de la base técnica del modelo de refinería y de lo que contiene, además de lo que se espera finalmente obtener cuando se junten los tres módulos de la evaluación económica: un flujo de caja e indicadores económicos del proyecto en cuestión.

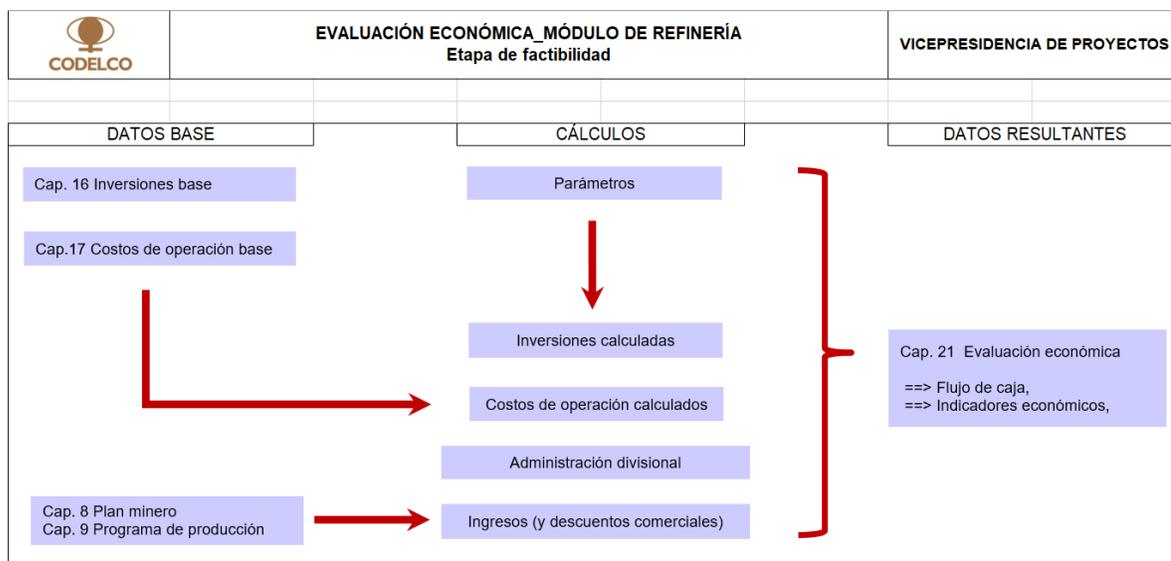


Ilustración 40: Esquema de Evaluación Económica para proyectos en refinerías.

Además, posee una descripción específica del modelo OPEX refinería:

“El módulo de costos refinería contiene la estimación de todos los gastos necesarios para producir cátodos de cobre. Los costos de la fundición se han estructurado según SGP – GASP – EV – INS – 001 *Instructivo Costos de Operación* emitido por el área de Evaluación Económica – Financiera VP. El instructivo explica definiciones publicadas en:

- I. Guía para la Trazabilidad de Costos de Operación para Proyectos Estructurales emitida por la Gerencia Corporativa de Evaluación de Inversiones y Control de Proyectos.
- II. Informes de Gestión Operacional emitidos mensualmente por cada división perteneciente a Codelco.

Dicho de otra forma, el modelo está estructurado en flujos de gastos para la electrorrefinación y el tratamiento del barro anódico. El módulo de costos contiene además información física como: dotación propia, consumos de energía, consumos de ácido, consumo de suministros, dotación de terceros.

El estándar satisface el método de cálculo y detalle publicados en SIC – P – 005 *Base de Estimación de Costos de Capital y Operación* para Estudios de Factibilidad.”

3.4.5.2 Hoja Parámetros

También se consideran tres bandas de precio del cobre y de tipo de cambio entre peso chileno y dólar estadounidense (Proyección Inferior, Proyección Media, Proyección Superior, detalladas en las Orientaciones Comerciales de la corporación), lo que se utiliza posteriormente para la corrección monetaria de los gastos calculados. Esto permite vislumbrar el cambio del costo unitario

de la refinería según la banda de precio de cobre escogida, debido a que el factor de corrección monetaria se calcula en base a estos parámetros.²⁹

Luego, se consignan los precios de cada insumo, distinguiéndose tres tipos diferentes: precios de ácidos, energía eléctrica y agua desalada (que son de suma importancia para los proyectos en esta área), precios de materiales de importancia operacional y el resto de materiales secundarios, que se agrupan y se expresan por tonelaje producido o procesado, según la operación unitaria.

Tabla 85: Proyección de precios de ácidos, energía eléctrica y agua industrial.³⁰

Insumo	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Ácido Sulfúrico	USD/t	53,00	53,00	53,00	53,00	53,00	53,00	53,00
Ác. Clorhídrico	USD/t	765,18	765,18	879,92	887,71	886,91	880,67	880,67
Energía SING	USD/MWh	59,02	62,23	58,79	57,93	54,70	54,15	54,15
Potencia SING	USD/MWh	65,26	62,28	60,16	58,92	57,60	56,72	56,72
Agua industrial	USD/m ³	6,17	5,03	5,00	5,59	5,55	5,58	5,56

Tabla 86: Proyecciones de precios de materiales relevantes para la operación.³¹

Materiales	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sulfonato de Sodio Avitone	USD/lb	8,85	8,85	8,28	8,36	8,35	8,29	8,29
Floculante Magnafloc	USD/kg	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09	3,09
Acondicionador Thiourea	USD/kg	5,83	5,83	6,62	6,68	6,67	6,63	6,63
Cola animal granulada	USD/kg	9,30	9,30	9,30	9,30	9,30	9,30	9,30

El grueso de los materiales se divide en materiales para operación y para mantenimiento, divididos por sub – operación y calculados en base al tonelaje producido según la operación unitaria. Se toma el precio base del año 2015 (según la planilla base) y se proyecta en todo el horizonte temporal.

Tabla 87: Precios de Reactivos para operación y mantenimiento en el Largo Plazo.

Reactivos para Op.	Unidad	Precio	Reactivos para Mant.	Unidad	Precio
Electrorrefinación	USD/tmf	0,05	M. Mecánica ER – IX	USD/tmf	0,01
PTBA	USD/kg	0,09	M. Mecánica PTBA	USD/kg	0,0005
-	-	-	M. Eléctrica	USD/tmf	0,004
-	-	-	M. Sistemas de Control	USD/tmf	0,02

²⁹ Cálculo de factor de corrección monetaria se muestra en la Ecuación 12, página 42.

³⁰ Antecedentes de planificación de noviembre del 2017. Estos precios, por lo tanto, no corresponden necesariamente a los del proyecto API N15FP15, sino que están actualizados. El Ácido Clorhídrico y el Floculante Magnafloc no se encuentran dentro de la planilla API N15FP15, sino que se agregan desde la planilla auxiliar, API N14MS03.

³¹ Algunos insumos se actualizan con la información del proyecto API N14MS03: la Thiourea equivale al Acondicionador de la planilla original y la Cola animal equivale a Otros Materiales.

Tabla 88: Precios de Envases para operación en el Largo Plazo.

Envases para Producción para Operación	Unidad	Precio
Electrorrefinación	USD/tmf	0,01
Procesos Máquinas (PDA)	USD/tmf	1,82
PTBA	USD/kg	0,09

Tabla 89: Precios de Mat. Eléctrico y Herramientas para operación y mantención en el LP.

Mat. Eléc. y Herramientas para operación	Unidad	Precio	Mat. Eléc. y Herramientas para mantención	Unidad	Precio
Electrorrefinación	USD/tmf	0,33	M. Mecánica ER – IX	USD/tmf	0,05
Procesos Máquinas (PDA)	USD/tmf	0,54	M Mecánica Máquinas	USD/tmf	0,47
Recep. y Desp. Materiales	USD/tmf	0,14	M. Mecánica PTBA	USD/kg	0,002
Planta Interc. Iónico (IX)	USD/tmf	0,01	M. Oleohidráulico	USD/tmf	0,16
PTBA	USD/kg	0,05	M. Eléctrica	USD/tmf	2,47
-	-	-	M. Sistemas de Control	USD/tmf	0,19

Tabla 90: Precios de Mat. Generales de Bodega para operación y mantención en el LP.

Materiales Grls. Bodega para operación	Unidad	Precio	Materiales Grls. Bodega para mantención	Unidad	Precio
Electrorrefinación	USD/tmf	0,49	M. Mecánica ER – IX	USD/tmf	0,31
Procesos Máquinas (PDA)	USD/tmf	0,24	M Mecánica Máquinas	USD/tmf	0,19
Recep. y Desp. Materiales	USD/tmf	0,04	M. Mecánica PTBA	USD/kg	0,01
Planta Interc. Iónico (IX)	USD/tmf	0,01	M. Oleohidráulico	USD/tmf	0,27
PTBA	USD/kg	0,07	M. Eléctrica	USD/tmf	0,03

Tabla 91: Precios de Repuestos para operación y mantención en el Largo Plazo³²

Repuestos para operación	Unidad	Precio	Repuestos para mantención	Unidad	Precio
Electrorrefinación	USD/tmf	1,50	M. Mecánica ER – IX	USD/tmf	2,28
Procesos Máquinas (PDA)	USD/tmf	2,22	M Mecánica Máquinas	USD/tmf	4,42
Recep. y Desp. Materiales	USD/tmf	0,12	M. Mecánica PTBA	USD/kg	0,10
Planta Interc. Iónico (IX)	USD/tmf	0,01	M. Oleohidráulico	USD/tmf	1,72
PTBA	USD/kg	0,01	M. Eléctrica	USD/tmf	0,25
-	-	-	M. Sistemas de Control	USD/tmf	1,49

Tabla 92: Precio de Suministros secundarios en el Largo Plazo.

Suministros	Unidad	Precio	Suministros	Unidad	Precio
Aire Baja y Baja Presión	USD/MNm ³	36,00	Vapor	USD/t	14,00

Debido a que los servicios a terceros responden a contratos fijos, el precio de estos se asigna por día operativo y se separan por operación unitaria.

³² Los Repuestos incluyen los Repuestos de Equipos de Refinería y los Repuestos Generales.

Tabla 93: Tarifas de distintos tipos de Servicios para la refinería en los primeros años.

Serv. de Transp. de Prod.	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sistema Electrorrefinación	Miles USD/día	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Arriendos Varios	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sistema Electrorrefinación	Miles	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52	1,52
Sistema PTBA	USD/día	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Sistema Mant. Eq. Op.		0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Servicio de Muestreo	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sistema Electrorrefinación	Miles USD/día	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Sistema PTBA		0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Servicio de Mantenimiento y Rep. Inst. No Operativas ³³	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sistema Electrorrefinación	Miles	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04	7,04
Sistema PTBA	USD/día	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
Sistema de Mant. Eq. Op.		1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
Servicios Varios ³⁴	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sistema Electrorrefinación	Miles	17,31	17,31	17,31	17,31	17,31	17,31	17,31
Sistema PTBA	USD/día	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98	2,98
Sistema de Mant. Eq. Op.		0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65

Tabla 94: Tarifas de Otros servicios para la fundición en los primeros años.

Otros	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Sist. Electrorrefinación	Miles USD/día	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16	3,16
Sistema PTBA		0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Sistema Mant. Eq. de Op.		0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81

Finalmente, se registran las últimas tarifas referentes a la Administración Directa (que habían quedado pendientes), los que se agrupan por elemento de gasto y por día.

Tabla 95: Tarifas de insumos referentes a la Administración.

Administración Directa	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022	LP
Materiales	Miles USD/día	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41	2,41
Combustibles		0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44
Servicios		7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40	7,40
Otros		1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46	1,46

³³ Incluye puertas, campamentos, edificios, vehículos, camas, puertas y otros.

³⁴ Incluye consultorías asociadas a operación, consultorías asociadas a seguridad, servicios de estudio de ingeniería, servicio de apoyo a la operación, bonos a contratistas, servicio de inspección técnica, servicio de alimentación y campamentos, servicio de aseo industrial, servicio de aseo de oficina, servicios varios.

Luego de registrar los precios y tarifas de todos los insumos, se debe registrar el I/P de los materiales sustanciales, los combustibles, la energía eléctrica y los suministros, expresados en su valor en el Largo Plazo.

Tabla 96: I/P de Materiales en el Largo Plazo.

Consumo de Ác. Sulfúrico	Unidad	Valor	Consumo de Floculante	Unidad	Valor
Electrorrefinación	t/tmf	0,04	Sulfonato Sodio Avitone (ER)	lb/tmf	0,13
PTBA	t/kg	0,001	Magnafloc 1011 (PTBA)	kg/kg	0,001

Tabla 97: I/P de la Energía Eléctrica en el Largo Plazo.

Sub – operación	Consumo energía eléctrica		Consumo potencia eléctrica	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Electrorrefinación	MWh/tmf	0,29	MWh/tmf	0,48
Proceso Máquinas (PDA)	MWh/tmf	0,02	MWh/tmf	0,04
Planta Intercambio Iónico (IX)	MWh/tmf	0,01	MWh/tmf	0,01
PTBA	MWh/kg	0,001	MWh/kg	0,003

Tabla 98: I/P de los Suministros en el Largo Plazo.

Sub – operación	Consumo agua industrial		Consumo aire alta y baja presión		Consumo de vapor	
	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor
Electrorrefinación	m ³ /tmf	0,40	MNm ³ /tmf	0,07	GCal/tmf	0,16
Proceso Máquinas (PDA)	m ³ /tmf	0,63	MNm ³ /tmf	0,01	GCal/tmf	0,01
Planta de Intercambio Iónico (IX)	m ³ /tmf	-	MNm ³ /tmf	-	GCal/tmf	0,002
PTBA	m ³ /kg	0,05	MNm ³ /kg	0,03	GCal/kg	0,01

Tabla 99: I/P de insumos desagrupados en el Largo Plazo.

Sub – operación	Insumo	Unidad	Valor
Electrorrefinación de Cátodo permanente	Acondicionador grado comercial Thiourea	kg/tmf	0,06
	Cola animal granulada Tipo 120	kg/tmf	0,04
Planta Intercambio Iónico (IX)	Ácido Clorhídrico HCl al 32%	t/tmf	0,004

Finalmente, se adjunta el sistema de turno para roles A y B y los sueldos anuales correspondientes. Al igual que el caso de la fundición, se utilizan algoritmos estándar para determinar la cantidad de personas requeridas por puesto de trabajo (factor de contrturno), lo que considera los turnos, vacaciones, porcentaje promedio de ausentismo y de capacitación laboral.

Para el caso de la refinería, y al igual que la fundición, el sistema de turno para los roles B es de 6x1 6x2 6x3, mientras que para los roles A es de 4x3.

Tabla 100: Detalle de sistema de turnos rol A y rol B.³⁵

Factor de Contrturno y reemplazo	Turno 6x1 6x2 6x3	Turno 4x3
Días año	365	365
Días de trabajo	18	4
Días de descanso	6	3
Total días ciclo	24	7
FIJO: Semanas de vacaciones	3	3
FIJO: Días de vacaciones	21	21
Días que cubrir	344	344
Número de ciclos	14	49
Días no trabajados por descanso	86	147
Días que cubrir	258	197
%Ausentismo promedio de DCH	4%	4%
%Capacitación promedio de DCH	0,5%	0,5%
Días perdidos	12	9
TOTAL DÍAS TRABAJADOS AL AÑO	246	188
TOTAL DÍAS NO TRABAJADOS AL AÑO	119	177
Número de turnos de 12 horas por día	2	2
Contrturnos y reemplazo por puesto de trabajo	2,96	3,89
Número de personas	2	3
Factor adicional	148,1%	129,6%

Para determinar las remuneraciones de todo el personal se calcula un promedio ponderado entre las remuneraciones y los trabajadores nuevos y antiguos, de tal manera de representar el descenso en el sueldo mensual que implica el nuevo contrato a realizar. Para ser consistente con el caso de

³⁵ Las fórmulas para calcular el factor de turno son idénticas al caso de la fundición, Ecuación 27, página 85.

la fundición, en el modelo de refinería los sueldos también se estabilizan en el año 2025, con valores de sueldos de 19.400 USD/mes para los roles E (nivel gerencial), 11.900 USD/mes para los roles A (jefes de turno y supervisores) y 7.200 USD/mes para los roles B (operadores).

Tabla 101: Remuneraciones de los distintos tipos de trabajadores, por persona.

Trabajadores	Precio	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Rol E	USD/mes	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400	19.400
Rol A	USD/mes	12.900	12.800	12.300	12.300	12.300	12.200	12.000
Rol B	USD/mes	7.600	7.600	7.500	7.500	7.500	7.400	7.300

3.4.5.3 Balance de masa FURE

Para el caso de la refinería, se considera el balance completo hasta la venta de cátodos de cobre, a pesar de que los flujos de entrada a la refinería son los ánodos provenientes de la fundición y los externos. De esta manera se destaca que, para ambos modelos, se requiere confeccionar el balance FURE en su totalidad.

3.4.5.4 OPEX base Planta

En esta hoja se determinan los consumos de los insumos principales y los gastos totales por operación unitaria y por elemento de gasto, mediante la vinculación entre las dos hojas anteriores. Cada operación unitaria presenta el cálculo de la dotación para ambos roles de la misma forma que la presenta el modelo de fundición (Ecuación 28, página 86), aproximándose a la dotación proyectada en el PMCHS. Luego se determinan los gastos desglosados en miles de USD, mediante la vinculación de los consumos con los precios respectivos o la multiplicación del precio por el tonelaje pertinente (insumos secundarios).

Además, se define una Operación General que incluye solo las remuneraciones del personal rol A (considerando el sistema de turnos 4x3) correspondientes a la Electrorrefinación (la planilla de la División Chuquicamata no incluye personal rol A en el Tratamiento del Barro Anódico) por lo que todo este gasto se asigna a esta operación unitaria.

Por otro lado, la Mantenimiento General contiene los cálculos remunerativos de los roles B divididos en Mantenimiento Eléctrico, Mantenimiento Oleohidráulico y en Mantenimiento de Sistemas de Control. Solo existe un rol A para la Mantenimiento Eléctrico. Además, se incluyen los roles A referentes a la mantenimiento de las dos operaciones unitarias.

La dotación de la Administración no presenta contraturnos y reemplazos, ya que estos puestos de trabajo son no operativos. Se incluye un rol E (gerente de planta, aunque en la práctica puede haber más de una gerencia), roles A y roles B, y los insumos correspondientes (materiales, combustibles, servicios y otros gastos).

Tabla 102: Desglose de gastos en las operaciones unitarias.

Desglose de Cuentas por cada operación unitaria
Remuneración operadores
Remuneración mantenedores
Materiales de operación
Materiales de mantenimiento
Combustible
Energía Eléctrica
Suministros
Servicios de operación
Servicios de mantención (no operativa)
Otros

Finalmente, se puede calcular el costo total de la Refinería Electrolítica por elemento de gasto y por operación unitaria.

Tabla 103: Desglose de gastos de la refinería por operación unitaria y por elemento de gasto.³⁶

Por Op. Unitaria	Uni.	ER	PTBA	Mant.	Adm.	-	-	-
Peso	%	58,60	3,93	27,01	10,45	-	-	-
Por El. de Gasto	Uni.	Rem.	Mat.	Comb.	Energía	Sum.	Servicios	Otros
Peso	%	29,80	16,06	0,15	24,18	13,59	14,26	1,97

Los detalles de cada operación unitaria se expresan en el Anexo B, en donde se evalúan los porcentajes de cada elemento de gasto en cada operación unitaria.

³⁶ Se consideran los costos de todo el horizonte temporal, desde el 2017 hasta el 2039.

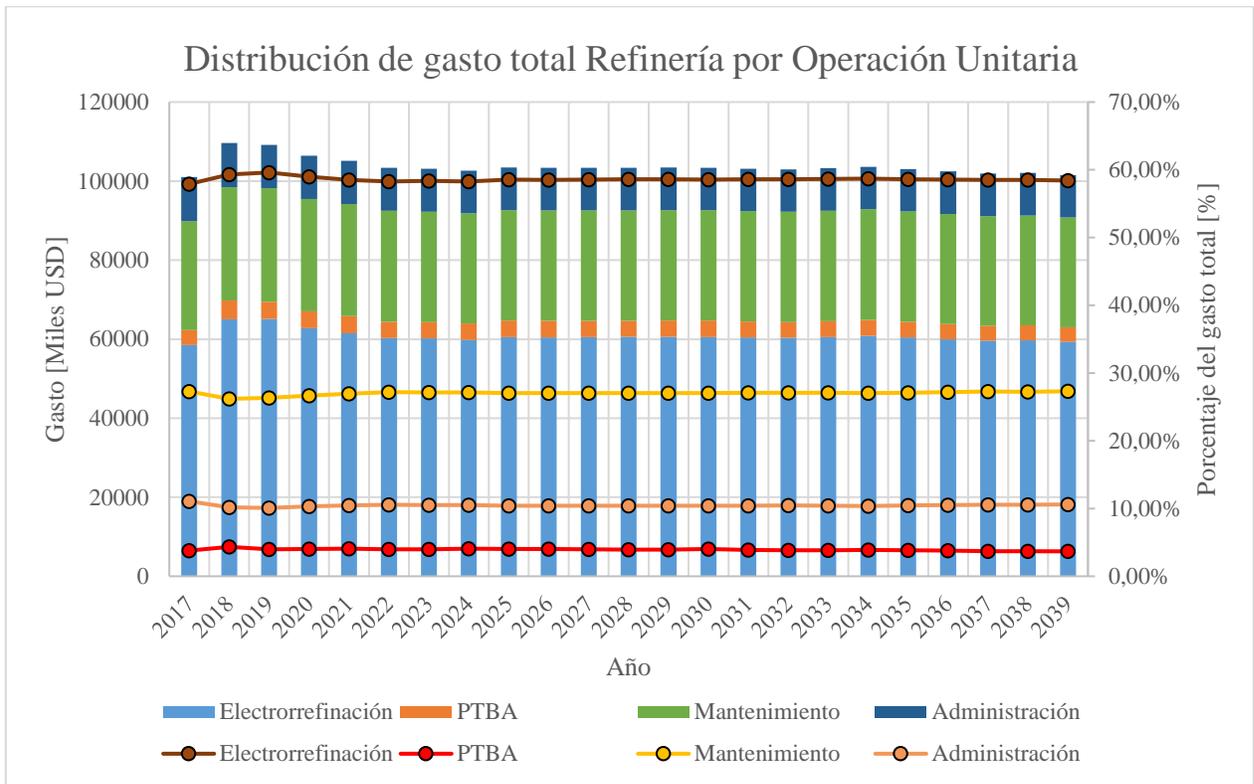


Ilustración 41: Desglose de gastos de la refinería por operación unitaria.

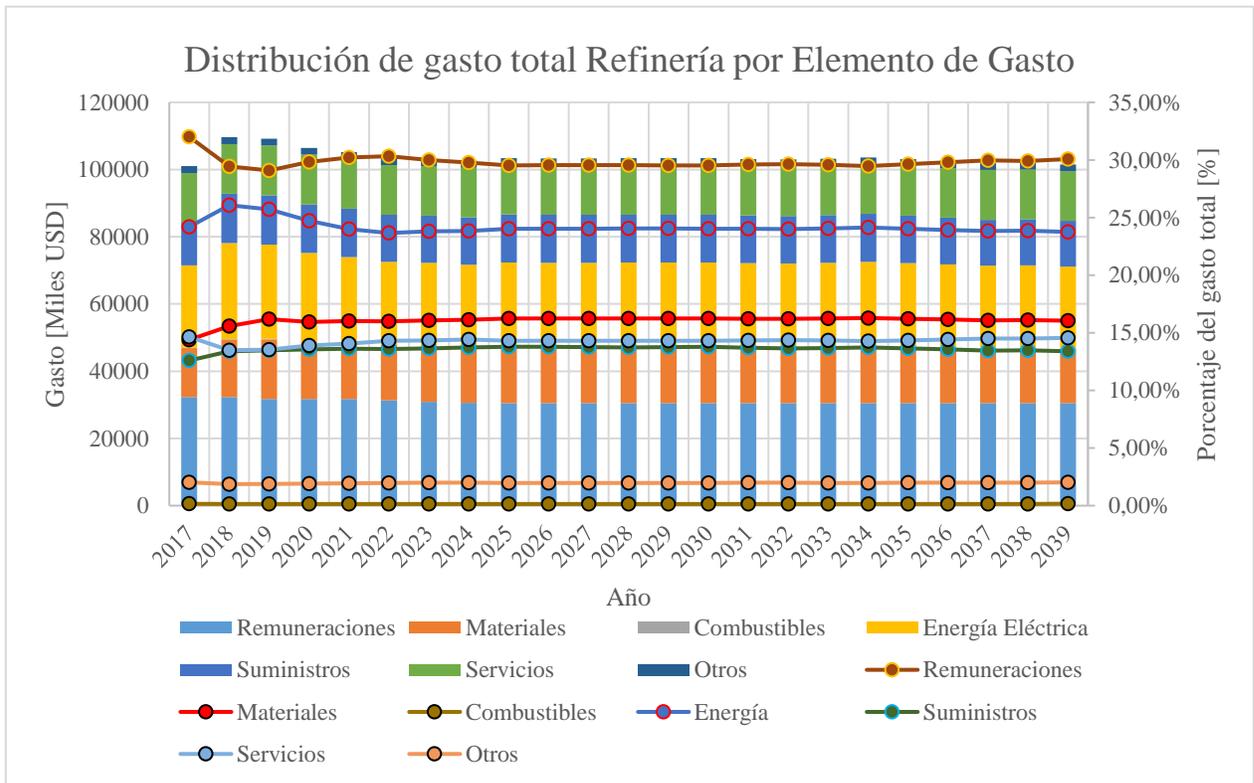


Ilustración 42: Desglose de gastos de la refinería por elemento de gasto.

A modo de indicador, se calculan algunos consumos generales de la refinería y la dotación.

Tabla 104: Indicadores de consumos principales de la refinería.

Consumo total Refinería	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Ácido Sulfúrico	t	20.886	24.829	25.325	24.199	24.042	23.606
Ácido Clorhídrico	t	1.847	2.180	2.238	2.138	2.123	2.087
Agua industrial (desalada)	Miles m ³	240	294	292	280	279	272
Energía Eléctrica	Miles MWh	388	459	470	449	446	439

Tabla 105: Dotación por turno de la refinería.

Dotación por turno	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	LP
Operadores 6x1 6x2 6x3	#Personas	84	84	84	84	84	84
Mantenedores 6x1 6x2 6x3	#Personas	45	45	45	45	45	45
Supervisores y otros 4x3	#Personas	68	68	68	68	68	68
TOTAL DOTACIÓN	#Personas	197	197	197	197	197	197
Dotación de terceros	#Personas	95	95	95	95	95	95

Tabla 106: Dotación total refinería.³⁷

Dotación	Unidad	2017	2018	2019	2020	2021	LP
Operadores	#Personas	168	168	168	168	168	168
Mantenedores	#Personas	90	90	90	90	90	90
Supervisores y otros	#Personas	76	76	76	76	76	76
TOTAL DOTACIÓN	#Personas	334	334	334	334	334	334
Dotación de terceros	#Personas	190	190	190	190	190	190

3.4.5.5 OPEX Calculado

El último paso es aplicar los factores de corrección monetaria a los gastos calculados en la hoja anterior, para lo que se debe ponderar el factor de corrección monetaria calculado en la Tabla 21 por el tipo de moneda utilizada, es decir, en qué tipo de moneda se pagan los elementos de gasto. Los factores de corrección son idénticos a los tipificados en el modelo de fundición, detallados en la Tabla 76, y se obtienen utilizando la Ecuación 29.

Cada gasto anual se multiplica por el factor de corrección monetaria correspondiente, con lo que los costos quedan actualizados a moneda de noviembre del 2017. Sin embargo, para el caso de los combustibles y la energía eléctrica no se aplica el factor, debido a que se paga completamente en dólar norteamericano, mientras que, para el caso de las remuneraciones, se agrega un multiplicador opcional que considera el Escalamiento Laboral Anual, el que está detallado en la Ecuación 30.

³⁷ La dotación de terceros representa a los contratistas, y el sistema de turno es idéntico al de los operadores.

Tabla 107: OPEX calculado por operación unitaria y por elemento de gasto.³⁸

Costos Unitarios Planta Refinería				
POR OPERACIÓN UNITARIA		Unidad	POR ELEMENTO DE GASTO	
Electrorrefinación	5,52	¢/lb	2,89	Remuneraciones
Tratamiento Barro Anódico	0,37	¢/lb	1,51	Materiales
Mantención	2,58	¢/lb	0,01	Combustible
Administración	1,01	¢/lb	2,22	Energía
-	-	¢/lb	1,30	Suministros
-	-	¢/lb	1,36	Servicios
-	-	¢/lb	0,19	Otros
TOTAL	9,48	¢/lb	9,48	TOTAL

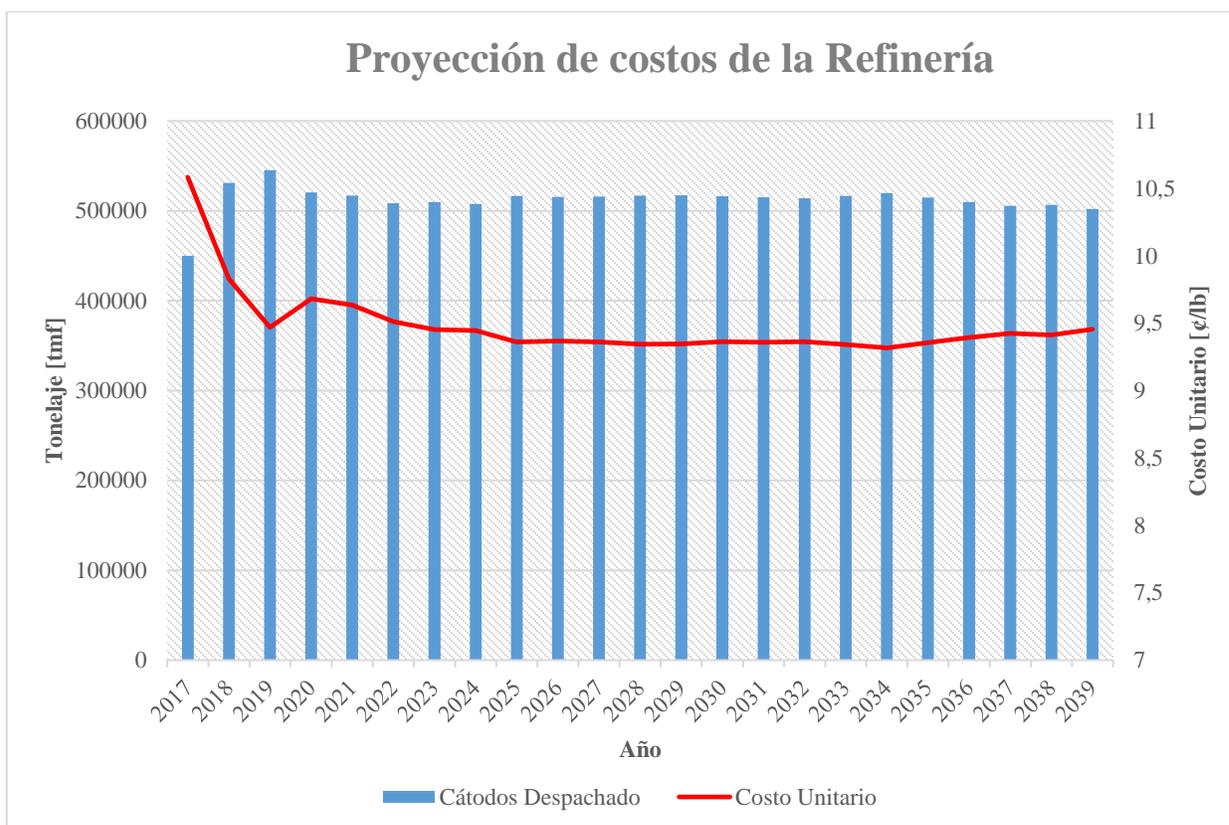


Ilustración 43: Proyección de costo unitario y producción de la Refinería Chuquicamata.

³⁸ El detalle de los gastos calculados se muestra en el Anexo C. El costo unitario se calcula en base al total de costos en todo el horizonte temporal, hasta el año 2039.

4 ANÁLISIS

4.1 Balance FURE

La Fundición y Refinería de la División Chuquicamata es la más compleja y particular de las que posee Codelco, por lo que modelar correctamente su balance másico es un desafío y corresponde al caso más complicado, debido a las muchas particularidades que posee: desde la recirculación de los polvos metalúrgicos, los distintos tipos de concentrado y calcinas que procesa, las variadas recirculaciones en las operaciones unitarias intermedias, la venta de *scrap* debido a la superación del límite de procesamiento de la refinería, y hasta la necesidad de comprar ánodos para completar la capacidad de la ER. Es sabido que cada división posee sus propias particularidades, por lo que el modelo de balance FURE debe modificarse según a qué división pertenezca el proyecto, pero se incorporan parametrizaciones de flujos, leyes y recuperaciones estándar, dejando libre la opción de modificar sus valores, que dependen de cada planta en particular.

Las leyes de salida de los equipos de la fundición se pueden controlar en faena y son relativamente estables (dispersión aproximada de $\pm 3\%$), aunque dependen de cada división. Sin embargo, los Factores de Distribución de Cu no son controlables en la operación, sino que responden a un cálculo posterior que debe ser actualizado permanentemente si se quiere tener un balance preciso. Estos factores son claves para simplificar en gran medida el balance másico, por lo que cada proyecto debe procurar obtener la mejor actualización de estos, los que dependen a su vez de los datos de cada planta de fundición.

La utilización de la humedad del concentrado de 9% es una simplificación válida, ya que el cálculo de las toneladas métricas húmedas se realiza en base a la capacidad de fusión, sin considerar cuánto tonelaje de esta capacidad es concentrado y cuánto es calcina, la que posee una humedad mucho menor a la corporativa.

La generación de chatarra de cobre en la ER siempre está presente, ya que es inherente a la operación de esta planta. Sin embargo, la tasa de generación de *scrap* se puede controlar y lograr ser disminuida, lo que trae ventajas para el costo tanto de la fundición como de la refinería. De la misma manera, mejoras operativas pueden lograr reducir el porcentaje de ánodos rechazados, lo que reduce el costo unitario de la fundición y de la refinería y podría lograr evitar la venta de *scrap* debido a la superación de la capacidad de reproceso, lo que solucionaría la paradójica situación de tener que comprar ánodos externos para completar la capacidad de la ER y, a su vez, la necesaria venta de *scrap* debido al límite de reproceso de los hornos de refino. Por lo tanto, las toneladas recirculadas que se procesan en el refino y moldeo dependen de esta capacidad de reproceso.

Los gráficos inferiores demuestran esta relación entre factores operacionales (porcentaje de rechazo de ánodos y generación de *scrap*) y resultados económicos (costos unitarios): el aumento de ambos factores operacionales genera un aumento de los costos unitarios, lo que se justifica en que cualquier reprocesamiento debido a falencias del sistema es un costo extra que debería minimizarse o eliminarse. En particular, el aumento del costo unitario de la refinería electrolítica se debe al aumento en el costo unitario de la Electrorrefinación (fundamentalmente), debido al envío de menor cantidad de libras de cobre a despacho producto del aumento de material

recirculado, mientras que, para el caso de la fundición, se genera un aumento del Cu moldeado, lo que provoca un aumento del gasto en refinación y moldeo, lo que incrementa el costo unitario final. Sin embargo, el costo de la fundición pareciera tener una cota superior, ya que se observa un *plateau* en ambos gráficos (a un valor aproximado de 208,02 USD/tms, para ambas figuras), que aparece debido a la capacidad límite de reprocesamiento de chatarra de cobre, ya que cuando se supera esta barrera, se vende *scrap*, es decir, sale del proceso de fundición y no altera ni el gasto en las operaciones unitarias ni los tonelajes procesados o producidos en cada una de éstas.

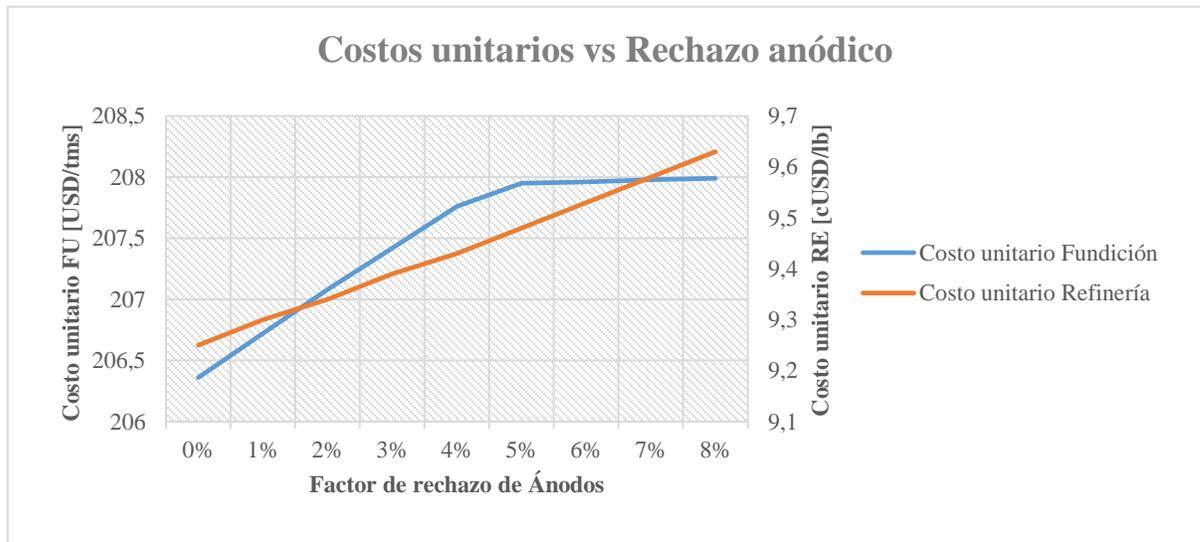


Ilustración 44: Análisis de sensibilidad de Costos unitarios vs Rechazo de Ánodos.

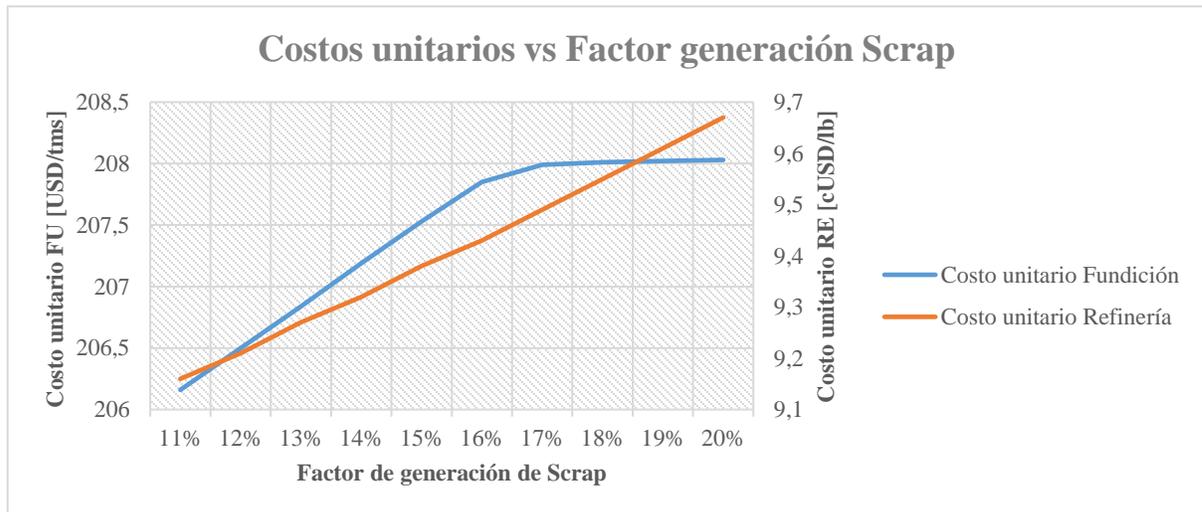


Ilustración 45: Análisis de sensibilidad de Costos unitarios vs Factor de generación de Scrap.

El Horno Flash genera alrededor del 80% de los polvos metalúrgicos generados en la fundición (en el Largo Plazo, sin considerar el CT), por lo que capturar y reprocesar este material es fundamental

para recuperar la mayor cantidad de cobre posible, en particular para la Fundición Chuquicamata, que tiene a este equipo como horno único y principal de fusión. Por este motivo, recientemente, las gestiones apuntan a dividir el tratamiento de los polvos no recirculados entre el Tostador DMH y la planta de Ecometales, (hace algunos años la totalidad de estos polvos era enviado a esta última planta). Este cambio se debe a que la recuperación de cobre del tostador es mayor que la recuperación del proceso de lixiviación de la filial de la corporación (a partir del año 2018, la recuperación global de la planta de Ecometales es de 80,71% vs 92,81% que posee el tostador de la División Ministro Hales), por lo que, en el horizonte de Largo Plazo, se decide que el 50% de los polvos se envían al tostador y la otra mitad a Ecometales, de tal manera de no afectar los contratos actuales que posee Codelco con su filial.

El uso de factores facilita enormemente los cálculos y reduce la complejidad algorítmica, pero concentra y esconde información valiosa que no se ve reflejada en los modelos, por lo que estos se aplican cuando son estrictamente necesarios, como en los Factores de Distribución, en la planta de Oxígeno y para la generación de *Scrap*, de tal manera de no escaparse de los alcances del trabajo de investigación.

Un indicador relevante para cada planta es la recuperación global obtenida. Para el caso de la refinería es un dato, ya que en general es estable, pero para el caso de la fundición, es un número que responde a una fórmula dependiente de los tonelajes tratados y producidos en distintas operaciones unitarias³⁹, por lo que es variable. Cada uno de los términos que componen esta ecuación involucran flujos de salida (algunos recirculados) y factores de distribución dependiendo de la etapa en que se recircule el material. Es válido cuestionarse el por qué se incluyen las calcinas de polvos (producidas en el Tostador DMH) y los cátodos GEL (proveniente del tratamiento de polvos en Ecometales) como ganancia en la fórmula ya que, si bien se recupera parte del cobre contenido en los polvos, el proceso no lo realiza la fundición, por lo que no se debería incluir en la recuperación de esta planta o, si es que se incluye, se deberían añadir también los costos del tostador y de la planta Ecometales como parte de los costos de la fundición, para ser consistentes. Sin embargo, la Fundición Chuquicamata no incorpora estos costos, lo que convierte a este indicador en una medida de cuánto metal se recupera con respecto al cobre contenido en el concentrado final mezclado, independientemente de qué planta lo procese.

4.2 Modelo OPEX de Fundición

Debido a que las planificaciones son de noviembre del 2017, el plan de producción no incluye las detenciones programadas del 2019 debido al término de la construcción de las dos plantas de ácido de doble contacto de la DCH, por lo que se considera que ese año se procesan las 1.170.000 tms correspondientes con la planificación a Largo Plazo.

Se busca que los insumos agrupados en una misma cuenta estén relacionados entre sí, en especial los servicios de terceros que se agrupan por operación unitaria. En particular, si se agrupasen

³⁹ Ecuación 21, página 60.

masivamente los Materiales, no serían eliminados por ninguno de los dos filtros utilizados, por lo que no habría pérdida de costo, pero sí habría pérdida de información al agruparse muchas cuentas en una sola unificada. Luego, se decide agrupar progresivamente insumos afines sin tomar en cuenta los insumos relevantes, los que aparecen íntegramente en el modelo, para destacar su presencia en el cálculo de los costos operacionales.

La cantidad de pre – modelos no fue planificada, sino que simplemente es una respuesta directa de la cantidad de datos que contiene la planilla base API Referente N15FP15, ya que los costos se eliminan progresivamente de tal forma de tener una medición de qué porcentaje se extrae con respecto al gasto total de la planilla original. La Guía de Trazabilidad de Costos permite seguir eliminando costos hasta alcanzar una extracción del 5% e incluso 10%, sin embargo, se decide concluir la depuración de cuentas con tan solo el 1,49% de gasto extraído, ya que se considera que la reducción en la cantidad de insumos ya es relevante, porque se eliminan el 51,91% de las filas de la planilla Excel.

El cálculo del Factor adicional de personal está debidamente estandarizado, por lo que incorpora un algoritmo que permite la variación del sistema de turno según la modalidad de cada división, con lo que el cálculo del factor es automático si se varía el estilo de turnos de la planta, el porcentaje de ausentismo y/o el de capacitación, por lo que se recalculan todos los costos aguas abajo.

Debido a los múltiples ajustes dotacionales de la Fundición Chuquicamata, no se logra cuadrar exactamente la dotación del modelo con la del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo, pero se logra una buena aproximación a Largo Plazo. Esto se debe a que el modelo solo considera la disminución de personal debido a la salida de una de las líneas de fusión, pero no la disminución debido al mejoramiento del área de refino y moldeo.

El hecho de que se dividan los gastos de la Planta de Oxígeno en un 80% para la fusión y un 20% para la conversión se basa en un análisis del Informe mensual de Gestión Operacional de la DCH del 2016 ^[28], de tal manera que los porcentaje de costos de ambas operaciones unitarias con respecto al total de la fundición ahí indicados y los obtenidos en el modelo final sean similares, lo que se logra con este ajuste (sin embargo, para darle holgura al modelo, este porcentaje es un *input* modificable). Esta decisión está sustentada, además, en el hecho de que la fusión requiere aire con alto enriquecimiento de oxígeno (33 – 36%) ^[41], mientras que la conversión a veces ni siquiera requiere un enriquecimiento mayor al 21% natural del aire. Indudablemente esta decisión afecta la distribución porcentual de los elementos de gasto, generando un aumento en el gasto de energía eléctrica en estas dos operaciones unitarias ⁴⁰, dado que las plantas de oxígeno la utilizan enormemente para su funcionamiento (corresponde a alrededor de un 80% del gasto total en estas operaciones).

Si se observa la distribución porcentual de los costos OPEX base ⁴¹, ésta se mantiene relativamente constante después de la salida de una de las líneas de fusión, excepto los años 2022 y 2030, que

⁴⁰ Ilustración 47 y 48, Anexo B.

⁴¹ Ilustraciones 35 y 36, páginas 89 y 90.

son los años de mantenciones generales planificadas, por lo que existe un aumento del gasto en mantenimiento (en particular en los servicios) y una disminución de los gastos anuales en las demás operaciones unitarias debido al procesamiento de menor cantidad de concentrado. Por este motivo, el costo unitario en esos años aumenta alrededor de un 13% respecto al promedio, alza que se amortigua (ya que podría ser aún mayor) debido a que la subida del gasto en mantenimiento no logra igualar la disminución de los costos de las demás operaciones unitarias.

En particular en la distribución de gastos por operación unitaria, se ve que se desembolsa alrededor de la cuarta parte del costo solo en la mantención interna de la fundición, lo que se explica en la antigüedad y en el alto desgaste de la planta debido a las altas temperaturas y presiones que se manejan en los equipos principales, las que erosionan el ladrillo refractario, corroen el acero, dañan las instalaciones eléctricas y deterioran a todos el equipamiento en general. Es por lo que se planifican mantenciones generales futuras a la planta, lo que implica su detención por algunos meses en esos años. Las demás operaciones unitarias presentan un porcentaje de gasto similar a través de los años luego de la salida del CT y del Secador N°4, ya que en los años 2017 y 2018 el gasto en fusión es mayor.⁴²

Si se escruta la distribución de los costos por elemento de gasto, se nota claramente que las remuneraciones, la energía y los suministros son los que concentran más del 60% de los gastos totales, lo que se debe a que los costos en mano de obra, energía eléctrica y agua en Chile son altos: el bajo grado de automatización de la Fundición Chuquicamata (el gasto remunerativo no disminuye significativamente a pesar de la disminución del sueldo base promedio planificada por la Reformulación del PMCHS)⁴³, el alto consumo de la energía eléctrica de la planta (alrededor de 1.000.000 de MWh anuales)⁴⁴ y las dificultades inherentes presentes en el norte del país para encontrar cursos de agua barata (esto deriva en que Codelco planifique considerando un precio de agua desalada, la que es alrededor de 10 veces más cara que el agua dulce proveniente de vertientes cercanas), encarecen los costos de la fundición, por lo que pierde competitividad ante fundiciones extranjeras, que son más baratas de operar y cuentan con mejores estándares ambientales y operativos.

Si se diversificara la matriz energética chilena mediante el mayor uso de las energías renovables, aprovechando así las virtudes del Desierto de Atacama, se lograría disminuir el precio de este insumo, y si se progresa en automatizar los procesos dentro de la planta, se lograría aumentar la competitividad de las fundiciones de Codelco debido a la disminución de los costos unitarios, lo que haría más atractivo este negocio para la corporación, agregando más valor a la cadena productiva. El caso del agua parece irremediable, ya que su escasa presencia en el norte de Chile es innegable, por lo que el avance debe ir en la línea de utilizar menos agua en los procesos (6.700.000 m³ de agua anuales, es decir, 0,21 m³/s aproximadamente)⁴⁴ o recirculándola dentro de

⁴² El detalle de cada una de las operaciones unitarias se muestra en sendos gráficos, en el Anexo B.

⁴³ Tabla 70, página 87.

⁴⁴ Tabla 73, página 90.

la misma planta, lo que requiere de innovación, la que prácticamente no existe en esta área dado el poco atractivo que posee este negocio en Chile.

Finalmente, el costo unitario promedio de la fundición resulta ser de 207,95 USD/tms, un valor intermedio entre los datos históricos del Informe de Gestión Operacional de la DCH (el que muestra un valor sin depreciación de 222,50 USD/tms ^[28] para el año 2016) y los proyectados por el PMCHS (valor promedio de 204,35 USD/tms ^[27])⁴⁵, lo que se explica en que la planilla de costos base se confecciona con datos del 2015, pero con la respectiva actualización de algunos de los precios de los insumos relevantes al año 2017 y, además, con las planificaciones dotacionales incluidas en el PMCHS. Entonces, el modelo final de fundición representa una mezcla de datos del año 2015 y unos actualizados al año 2017, por lo que se comprende que el costo unitario esté dentro del margen anterior. El costo unitario⁴⁶ de los dos primeros años es mayor debido a que sigue operando el CT y el Secador N°4 y, además, se consideran gastos extras estos años dado las modificaciones necesarias en esta planta producto del DS N°28, en particular para el potenciamiento del HF.

4.3 Modelo OPEX de Refinería

La confección de los pre – modelos y del modelo final se simplifica notablemente debido a que se cuenta con el *know how* del modelo de fundición, y a que esta gerencia posee menos operaciones unitarias y muchas menos cuentas que el caso anterior. Luego, debido a que el tratamiento de datos es análogo, se aplica tan solo un filtro de costos que logra eliminar un porcentaje de estos similar al caso anterior (1,76% de los costos y un 62,01% de reducción de filas con respecto al Pre – modelo N°1), para cumplir los preceptos de la Guía de Trazabilidad de Costos de Operación. De la misma forma, la agrupación de cuentas sigue los mismos lineamientos tomados en el modelo de fundición, lo que implica que se obtiene una menor cantidad de pre – modelos de refinería.

A diferencia del caso de la fundición, se logra emular el perfil dotacional del PMCHS en todo el horizonte temporal, debido a que la refinería no posee modificaciones sustanciales que impliquen una variación dotacional importante. El sistema de turno y los algoritmos correspondientes son idénticos al caso de la fundición, permitiendo también modificaciones futuras. De igual manera, la producción de cátodos se asemeja a la presupuestada en este proyecto, en donde la variable principal es la capacidad de la refinería (mientras que en el caso de la fundición es la capacidad de fusión), es decir, la cantidad de ánodos que la planta puede procesar y, por lo tanto, la cantidad necesaria de ánodos externos que se deben comprar.

Si se observa la distribución porcentual de los costos OPEX base⁴⁷, ésta se mantiene relativamente constante en todo el horizonte temporal, lo que se debe a la estabilidad de la planta de refinería, ya

⁴⁵ Promedio obtenido de periodo operativo 2018 – 2030 inclusive.

⁴⁶ Ilustración 37, página 92.

⁴⁷ Ilustraciones 41 y 42, página 110.

que no se planifican inversiones mayores en esta área. La disminución progresiva en el gasto desde el año 2018 hasta el 2023 aproximadamente, se debe a la disminución planificada de la capacidad de la refinería para poder producir 520.000 tmf de cátodos anuales, lo que implica disminuir la cantidad de ánodos tratados.

Si se estudia la distribución de gastos por operación unitaria, la Electrorrefinación es la que concentra casi el 60% de todo el gasto de esta planta, lo que tiene sentido ya que es la operación principal, y si se considera que gran parte del gasto en mantenimiento está aplicado a las operaciones de la ER, se puede considerar que el gasto en esta operación unitaria llega a más de un 80% del total. Se ve que el costo del descubrimiento del barro anódico es marginal, no superando el 5% del total de gasto de la Refinería.⁴⁸

Si se escruta la distribución de los costos por elemento de gasto, la distribución porcentual se mantiene relativamente constante en todo el horizonte de tiempo, siendo las remuneraciones y la energía eléctrica los gastos más significativos dentro de este proceso operativo, sumando alrededor del 55% del total. El resto de elementos de gasto oscila en torno al 15%, excepto la categoría “otros” y los combustibles, cuyo gasto es prácticamente nulo.

Nuevamente resalta a la vista que, si una diversificación de la matriz energética puede ayudar a disminuir el precio de la energía en el norte del país, se podría aumentar la competitividad de este negocio y así agregar más valor a la cadena productiva, ya que el alto grado de automatización ya presente en las refinерías dificulta disminuir los gastos remunerativos.

De la misma manera que en el modelo de fundición, el costo unitario promedio de la Refinería Chuquicamata, 9,48 ¢/lb, resulta ser un valor intermedio entre los datos históricos del Informe de Gestión Operacional de la DCH (que postula un valor de costo unitario sin depreciación de 11,20 ¢/lb) y los proyectados por el PMCHS (costo unitario promedio sin depreciación de 7,51 ¢/lb), lo que se debe, análogamente, a una mezcla de datos del año 2015 y otros actualizados al año 2017. El perfil de costo unitario⁴⁹ disminuye hasta el 2019 debido al aumento de la producción de cátodos, pero el 2020 aumenta debido a la disminución planificada de esta producción (para alcanzar el óptimo de producción del PMCHS). Sin embargo, a partir del 2021 el costo unitario vuelve a disminuir progresivamente hasta el 2025 debido a la disminución del gasto remunerativo (el que representa alrededor del 30% de los costos totales), alcanzando un valor aproximadamente constante hasta los años finales, donde aumenta levemente debido a la producción de menos cátodos.

4.4 Análisis de Riesgo

Es sabido que el negocio de fundiciones y refinерías en Chile representa una ganancia marginal dado los altos costos de estos procesos. Las condiciones climáticas ayudan a esto, dado la escasez

⁴⁸ El detalle de cada una de las operaciones unitarias se muestra en sendos gráficos, en el Anexo B.

⁴⁹ Ilustración 43, página 112.

hídrica del norte del país, que se ha solucionado mediante la construcción de una planta desaladora para el distrito norte, lo que implica bombear agua desalada desde las costas chilenas hasta la alta cordillera, donde se encuentran las minas, lo que inexorablemente aumenta el precio del agua en 10 veces su valor y, además, el alto consumo de energía eléctrica, la que depende casi en su totalidad de plantas termo e hidroeléctricas, no potenciándose aun el uso de energías limpias, que ya no son tan caras de implementar como lo era hace algunos años. Eventuales alzas en estos dos sensibles parámetros generarían incrementos considerables en los costos de la fundición y de la refinación, por lo que se debería trabajar en promover la diversificación de la matriz eléctrica y en innovación para aumentar la recirculación de agua dentro de los procesos.

Siempre está latente la posibilidad de que la normativa ambiental recientemente actualizada endurezca aún más sus premisas y obligue a una nueva modernización de la planta completa. Codelco debe obedecer cualquier normativa ambiental aprobada si quiere mantener su cartera de productos actual, pero sin duda, un endurecimiento de las leyes ambientales implica un costo extra que puede impactar al negocio en el corto plazo.

Dado que la planta se encuentra en pleno Desierto de Atacama, los conflictos sociales con comunidades aledañas son, en general, escasos, dado la baja densidad poblacional del norte de Chile.

Los barros anódicos descubrizados presentan contenidos altos de plata (56% promedio), oro (0,25% promedio) y de otros metales relevantes (Se, Te, Pt, Pa), los que salen de la Refinería y se envían a la Planta Recuperadora de Metales (que no es parte del análisis), donde se tratan y se comercializan estos metales. Esta planta permite diversificar la cartera de productos al aprovechar el subproducto generado en las celdas ER, agregando valor a la delicada línea productiva FURE la que, como ya se sabe, posee márgenes de utilidad muy mínimos.

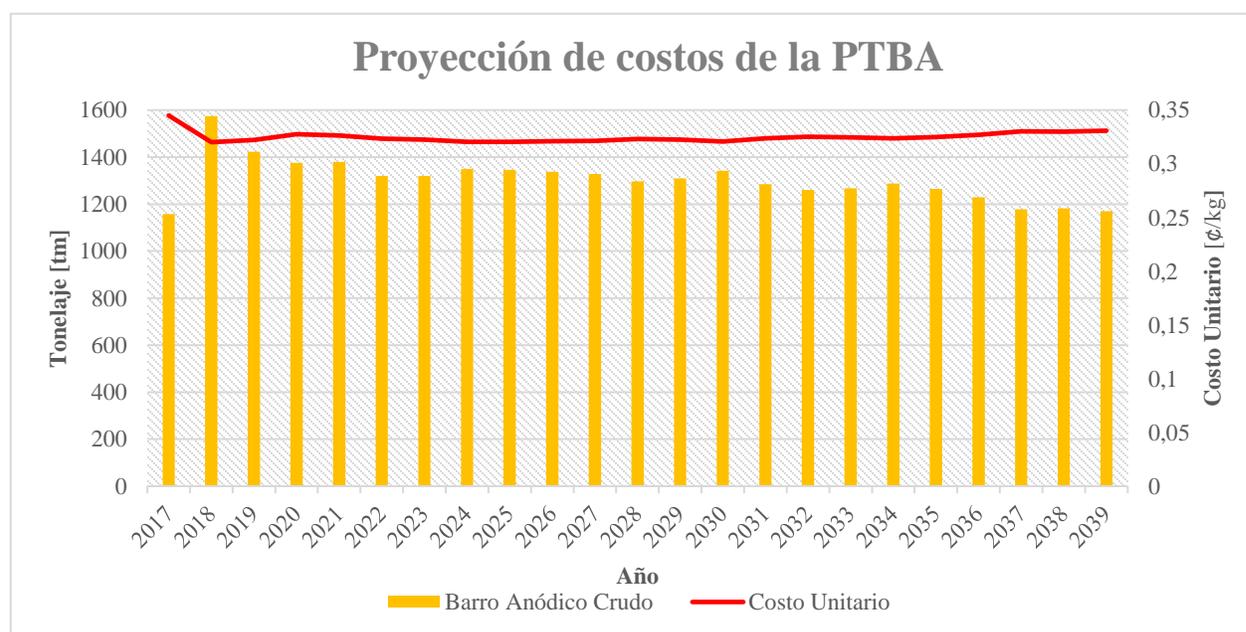


Ilustración 46: Proyección de costo unitario y tonelaje de BAC procesado en la PTBA.

La existencia de economías de escala en la Planta de Tratamiento de Barro Anódico se ve claramente en los dos primeros años del ciclo, en donde un aumento de tonelaje en el tratamiento de los barros permite disminuir el costo por kilo de barro procesado. De este modo, no es mala idea tratar los barros de Potrerillos en esta planta para producir más BAD a un costo menor, para seguir agregando valor al negocio (sin embargo, se debe considerar un costo de transporte que puede que aumente los costos unitarios, lo que requiere de un estudio más en detalle).

De esta misma manera, se puede extender este análisis a la PRM, donde el aumento de la producción de barros (de Chuquicamata, Potrerillos y de alguna refinería externa) puede ampliar los márgenes de ganancia de Codelco, debido a las economías de escala y a los contenidos de oro y particularmente de plata (dado que la División Ministro Hales posee gran cantidad de este metal en sus calcinas).

5 CONCLUSIONES

Las dos herramientas creadas logran conformar dos modelos de estimación de costos de operación de los procesos FURE, ya que contienen un listado de los insumos más importantes tanto de las fundiciones como de las refinerías de Codelco, con tarifas y precios visibles y digitados manualmente según los datos de cada faena, modificables según a qué división pertenezca cada proyecto y, mediante la vinculación con el balance másico, ambos modelos logran estimar los indicadores de costos necesarios para los proyectos. A su vez, debido a que se trabaja por medio de tarifas e I/P's, agregar algún otro equipo (por ejemplo, el secador de lecho fluidizado utilizado en las fundiciones de Caletones y Potrerillos, o incluso alguna nueva tecnología) con sus respectivos insumos, precios y tarifas es sencillo, ya que los algoritmos de cálculo son solo sumas y multiplicaciones ya codificadas, que ejemplifican los métodos de cálculo globales de los modelos.

Por lo tanto, se estandarizan los métodos de cálculo y los parámetros del balance másico y, entonces, los modelos logran constituir un estándar de estimación de costo de operación de los procesos FURE, lo que reduce los inconvenientes a la hora de aprobar o rechazar el capital para los proyectos en estas áreas, dado que el esquema y los algoritmos serán de conocimiento de los ministerios pertinentes, por lo que los esfuerzos se concentran en analizar los indicadores finales y no en cómo está elaborada la planilla. Los modelos finales contienen una lista estándar de los insumos más importantes para poder estimar los costos de ambas plantas, dando la opción de modificar parámetros claves.

Los modelos logran relacionar directamente parámetros técnicos y económicos, permitiendo vislumbrar los efectos en estos últimos si es que las variables de la planta se ven modificadas: se ve el efecto de cambios en parámetros y flujos del balance másico sobre el costo unitario final de cada planta. De esta forma, se puede gestionar de mejor manera este parte del negocio de Codelco, lo que favorece la toma de decisiones.

Se completa el módulo de costos de la evaluación económica al aportar los dos estándares de costos de fundición y refinería del cobre, lo que permite medir la rentabilidad de los futuros proyectos gestionados por la Vicepresidencia de Proyectos, constituyendo un único estándar de planificación a largo plazo.

Si se consideran las operaciones unitarias de la fundición, la que se lleva mayor porcentaje de costos es el mantenimiento interno de la planta (25% aproximadamente), mientras que las demás operaciones unitarias presentan porcentajes similares (oscilando en un 15%), sin contar la Administración. Por el lado de los elementos de gasto, las remuneraciones, la energía eléctrica y los suministros (particularmente el agua industrial) son los que mayor porcentaje ocupan, cada uno con aproximadamente un 20%, siendo los insumos medulares de esta planta.

Análogamente, si se consideran las operaciones unitarias de la refinería, la Electrorrefinación se lleva alrededor del 60% (lo que aumenta aún más si se considera que gran parte del gasto en mantenimiento es para la ER), siendo la operación principal, dado que la PTBA representa un gasto

casi marginal. Por el lado de los elementos de gasto, las remuneraciones representan el 30% de los gastos y la energía eléctrica un 25%, siendo los insumos principales para esta planta, ya que el resto oscila en torno al 15%, exceptuando la categoría “otros” y los combustibles, que son casi cero.

El costo unitario promedio de la Fundición Chuquicamata es de 207,95 USD/tms y el de la Refinería es de 9,48 ¢/lb, valores que consideran los gastos de todo el horizonte temporal y que se encuentran dentro de los valores históricos y proyectados de ambas plantas, considerando las planificaciones de la Reformulación del Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo.

6 TRABAJO FUTURO

Los modelos están hechos para planificaciones a largo plazo, y la dotación no es inmune a esto, por lo que ambos generan una cantidad de personal por operación unitaria fija en todo el horizonte temporal. Con esto, los modelos excluyen posibles modificaciones dotacionales en el corto plazo, como es el caso del mejoramiento del área del Refino y Moldeo, que implica una disminución leve y progresiva de dotación que no pudo ser considerada en el modelo de fundición. Incorporar flexibilidad en la codificación de la dotación permitiría solucionar y mejorar los modelos.

El modelo de fundición simplifica en gran medida la producción de oxígeno, agrupando todo en un Factor de producción de oxígeno. Afinar los detalles en el cálculo de las toneladas de oxígeno requeridas pueden afinar y precisar los gastos en esta operación.

El esquema global de evaluación de proyectos incluye un módulo de ingresos, que no está vinculado a los productos finales calculados en el balance FURE (cátodos, ánodos, ácido sulfúrico, barros anódicos, entre otros), dejando el circuito de modelos abierto. Para darle consistencia, se pueden hacer vinculaciones entre planillas para cerrar el circuito, según el tipo de proyecto.

7 GLOSARIO

1. API: Antecedentes de Proyecto de Inversión.
2. Cochilco: Corporación Chilena del Cobre.
3. Codelco: Corporación del Cobre de Chile.
4. CPS: Convertidor Peirce – Smith.
5. CT: Convertidor Teniente.
6. DCH: División Chuquicamata.
7. DMH: División Ministro Hales.
8. ERNC: Energías Renovables No Convencionales.
9. EE: Energía Eléctrica.
10. FURE: Fundición y Refinería.
11. GCEI: Gerencia Corporativa de Evaluación de Inversiones y Control de Proyectos.
12. GRM: Gerencia de Recursos Mineros.
13. HA: Horno de Refino o de Ánodos.
14. HELE: Horno Eléctrico de Limpieza de Escorias.
15. HF: Horno Flash Outokumpu.
16. HLE: Horno de Limpieza de Escorias.
17. I/P: Insumo/Producto.
18. IPC: Índice de Precios al Consumidor en Chile.
19. IPM: Índice de Precios al por Mayor en Estados Unidos de América.
20. LP: Largo Plazo, referente a horizonte de planificación.
21. MB: Metal Blanco.
22. MDS: Ministerio de Desarrollo Social.
23. MMA: Ministerio de Medio Ambiente.
24. OO.CC.: Orientaciones Comerciales para Venta de Cobre y Subproductos.
25. PAAA: Planta de Abatimiento de Arsénico y Antimonio.
26. PDA: Plataforma de Automatización.
27. PLS: *Pregnant Leach Solution* (Solución cargada de lixiviación).
28. PMCHS: Proyecto Minero Chuquicamata Subterráneo.

29. PRM: Planta Recuperadora de Metales.
30. PTBA: Planta de Tratamiento de Barros Anódicos.
31. PTE: Planta de Tratamiento de Escorias.
32. PTPF: Planta de Tratamiento de Polvos de Fundición.
33. SIC / SGP: Sistema de Inversión de Capital / Sistema de Gestión de Proyectos.
34. SX – EW: Proceso de Extracción por Solvente y de Electro – obtención (por sus siglas en inglés), del procesamiento hidrometalúrgico de minerales de cobre.
35. TC: Tipo de Cambio CLP/USD.
36. Uraso: Unidad Recuperadora, Almacenamiento y Suministro de Oxígeno.
37. VP: Vicepresidencia de Proyectos.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] CODELCO – CHILE, página institucional. 2018. [en línea] <<https://www.codelco.com/>> [Consulta: agosto y septiembre 2018].
- [2] PÉREZ, J. 2017. Problemática de las fundiciones de cobre en Chile y *Lean Management* como metodología de gestión. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de empresas. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial. Codelco – Chile, División Ventanas. pp. 3 – 9.
- [3] VOISIN, L. [2010]. Fundamentos de Metalurgia Extractiva, Pirometalurgia, [diapositivas], Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 9 diapositivas; texto en español e inglés.
- [4] DURÁN, M. 2013. Simulación de proceso de secado de concentrado de cobre, Codelco, División El Teniente. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 11 – 28.
- [5] BUSTAMANTE, R. 2003. Pirometalurgia del cobre. En: SCHULZ, B. (Ed.) Introducción a la Metalurgia. Santiago de Chile, Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Metalúrgica. pp. 140 – 187.
- [6] RICHTER, G. [2015]. Desafíos Fundición y Refinería Codelco, [diapositivas], Gerencia Optimización Fundiciones y Refinerías, Vicepresidencia Productividad y Costos, 1 diapositiva; texto en español e inglés. 25p.
- [7] CODELCO – CHILE – División Salvador. 2011. Declaración de Impacto Ambiental, Flotación de Escorias Convertidor Teniente Fundición Potrerillos. pp. 7 – 11.
- [8] BEAS, S. 2012. Proceso para la eliminación de impurezas de efluentes provenientes de las fundiciones de cobre. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 8 – 27.
- [9] RODRÍGUEZ, C. 2009. Modelo de operación para manejo de gases de la Fundición Caletones. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 54 – 69.
- [10] ORÓSTICA, F. 2013. Aumento de producción en Planta de Oxígeno N°3, Fundición Caletones. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 5 – 27.
- [11] GUTIÉRREZ, C. 2008. Modelado y automatización de Planta de Oxígeno N°2, Codelco, División El Teniente. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil Químico. Valparaíso de Chile,

Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 10 – 12.

[12] COMISIÓN DE EVALUACIÓN. 2016. Calificación Ambiental Proyecto “Plan Maestro de Fundiciones: Etapa II y III”. En: SESIÓN N°14 fecha 26 de mayo de 2016 de la Comisión de Evaluación de la Región de Antofagasta. Antofagasta de Chile. Servicio de Evaluación Ambiental. pp. 25.

[13] CIFUENTES, L. [2016]. Fundamentos de Metalurgia Extractiva, Electrometalurgia, [diapositivas], Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 1 diapositiva; texto en español.

[14] FERNÁNDEZ, E. 2014. Propuesta para mejorar la calidad catódica en el proceso de descubrido en Codelco División Ventanas. Proyecto para optar al título de Ingeniero Civil en Metalurgia Extractiva. Valparaíso de Chile, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. pp. 23 – 25.

[15] CORTÉS, C. 2009. Evaluación del Negocio del Barro Anódico en Codelco. Tesis para optar al grado de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial. pp. 67.

[16] SGA, Gestión Ambiental S.A. 2008. Declaración de Impacto Ambiental Proyecto Tratamiento de Impurezas en ánodos y cátodos de División Codelco Norte. pp. 23 – 30.

[17] CODELCO – CHILE – División Salvador, Gerencia de Sustentabilidad. 2011. Declaración de Impacto Ambiental, Adecuación del Bodegaje de Barros Anódicos Refinería Electrolítica Potrerillos. pp. 11 – 12.

[18] PROUST CONSULTORES LTDA. 2013. Declaración de Impacto Ambiental, Proyecto Planta Recuperadora de Metales. Capítulo 2, pp. 1 – 22.

[19] ETCHEVERRY, J. 2013. Modelo de gestión para la optimización del proceso de conversión de la Fundición Chuquicamata. Tesis para optar al grado Magíster en Gestión y Dirección de empresas. Santiago de Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial. Codelco – Chile, División Chuquicamata. pp. 8 – 9.

[20] ECOMETALES. 2015. Reporte de Sustentabilidad 2015. pp. 26 – 29.

[21] CÁRDENAS, M. 2014. Instructivo de Costos de Operación. Gerencia de Administración y Servicios a Proyectos, Vicepresidencia de Proyectos de Codelco. pp. 1 – 29.

[22] VENEGAS, C. A LAS cero horas del miércoles se detendrá la Fundición de Chuqui. 2018. El Mercurio Calama, Chile, 11 dic. Página 5.

[23] CHUQUICAMATA DETIENE horno Convertidor Teniente 2 para cumplir Decreto Supremo 28 que regula captura de arsénico y azufre. 2018. El América, Minería, Calama, Chile, 11 dic.

[24] CODELCO – CHILE. 2010. Guía para la Trazabilidad de Costos de Operación en Proyectos Estructurales. pp. 14 – 15.

[25] SERVICIO DE IMPUESTOS INTERNOS, página institucional. 2018. [en línea] <http://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/renta/001_002_2655.html> [Consulta: 26 de diciembre 2018].

[26] CHILE. Ministerio del Medio Ambiente. Decreto N°28: Establece norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico, 12 diciembre 2013.

[27] CODELCO – CHILE – División Chuquicamata, Gerencia Transformación División Chuquicamata. 2017. Gastos de Operación (OPEX) DCH para Reformulación Evaluación Económica PMCHS. pp. 22 – 25.

[28] CODELCO – CHILE – División Chuquicamata, Gerencia de Administración. 2016. Informe mensual de Gestión Operacional. Chile. 160p.

9 ANEXO A: INSUMOS RELEVANTES

Tabla 108: Insumos relevantes de la fundición y la electrorrefinería.

Proceso	Actividad	Materiales e Insumos principales
Fundición	Recepción y Mezcla	Energía y potencia eléctrica, gas natural, petróleo búnker, agua industrial, agua desmineralizada, aire alta presión, vapor.
	Fusión	Agua industrial, aire, energía eléctrica, fundentes, reactivos varios.
	Conversión	Agua industrial, aire, energía eléctrica, fundentes, reactivos varios.
	Refinación y Moldeo	Agua industrial, aire, desmoldantes, energía eléctrica, vapor.
	Limpieza de Gases	Agua industrial, reactivos, floculantes, lechada de cal, querosén.
	Planta de Oxígeno	Agua industrial, energía eléctrica.
Refinería	Cátodos iniciales	Agua industrial, aire, vapor, energía eléctrica, ácido sulfúrico, bordes de plástico, floculante.
	Electrorrefinación	Ácido sulfúrico, agua industrial, aire, vapor, energía eléctrica.
	Embarque de cátodos	Zunchos.
	Purificación Electrolito	Energía eléctrica.
	Tratamiento de Barro Anódico	Agua industrial, aire, vapor, servicios de control de calidad.

10 ANEXO B: DESGLOSE DE GASTOS OPEX BASE

10.1 Desglose de cada Operación Unitaria de la Fundación DCH

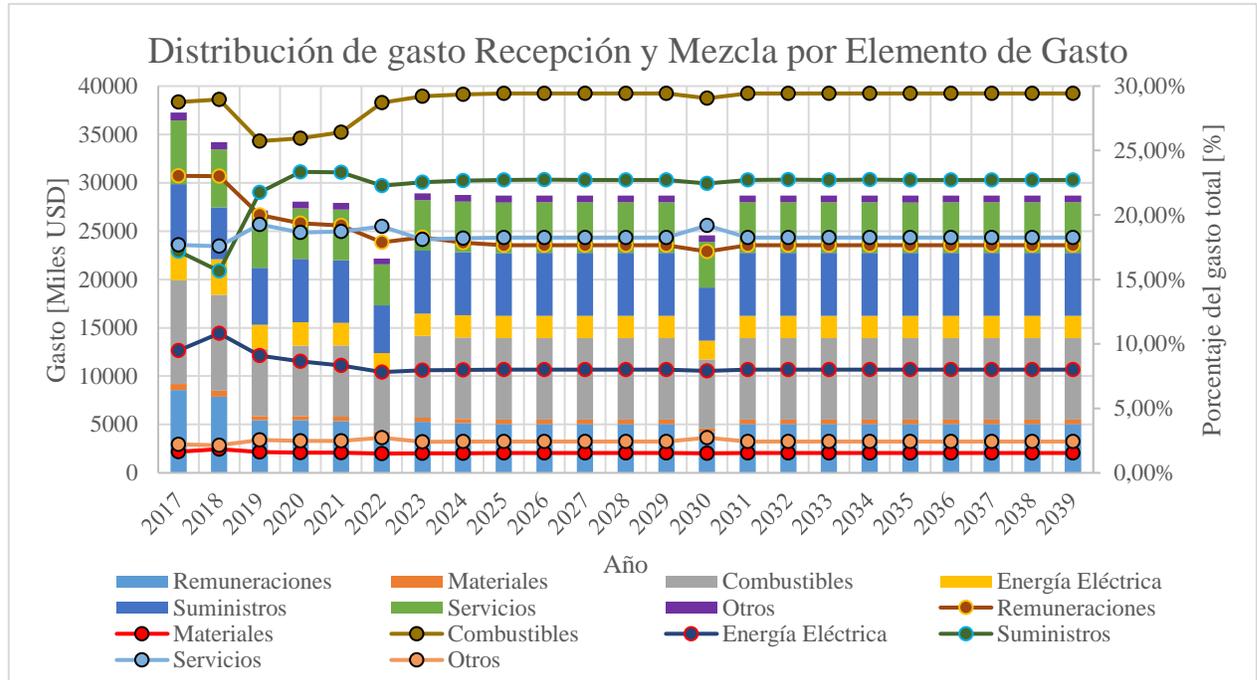


Ilustración 47: Desglose de gastos de Recepción y Mezcla.

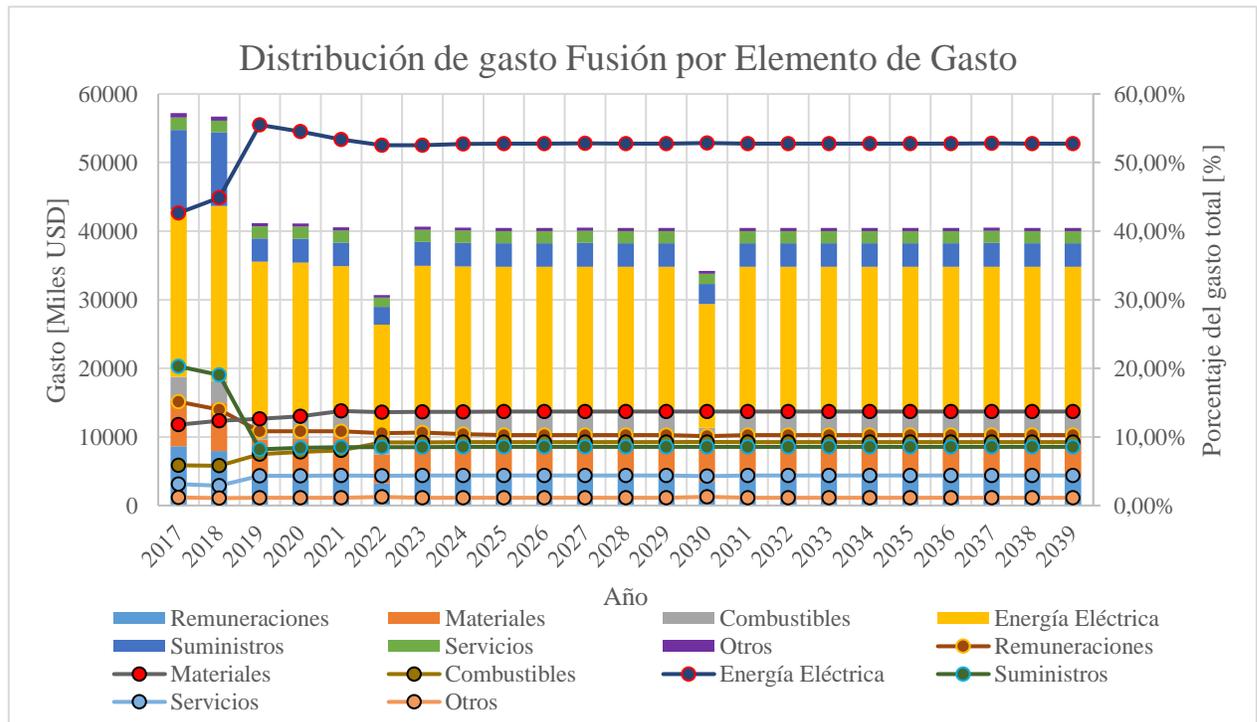


Ilustración 48: Desglose de gastos de Fusión.

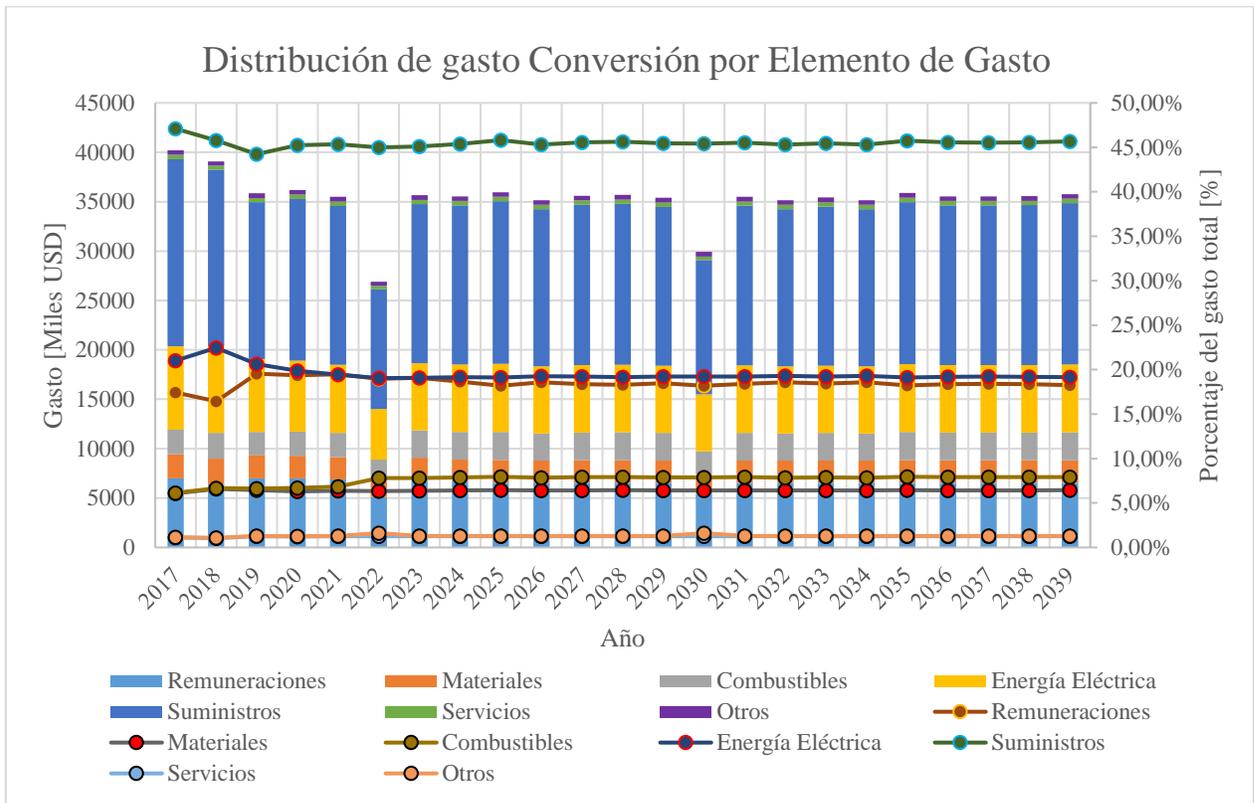


Ilustración 49: Desglose de gastos de Conversión.

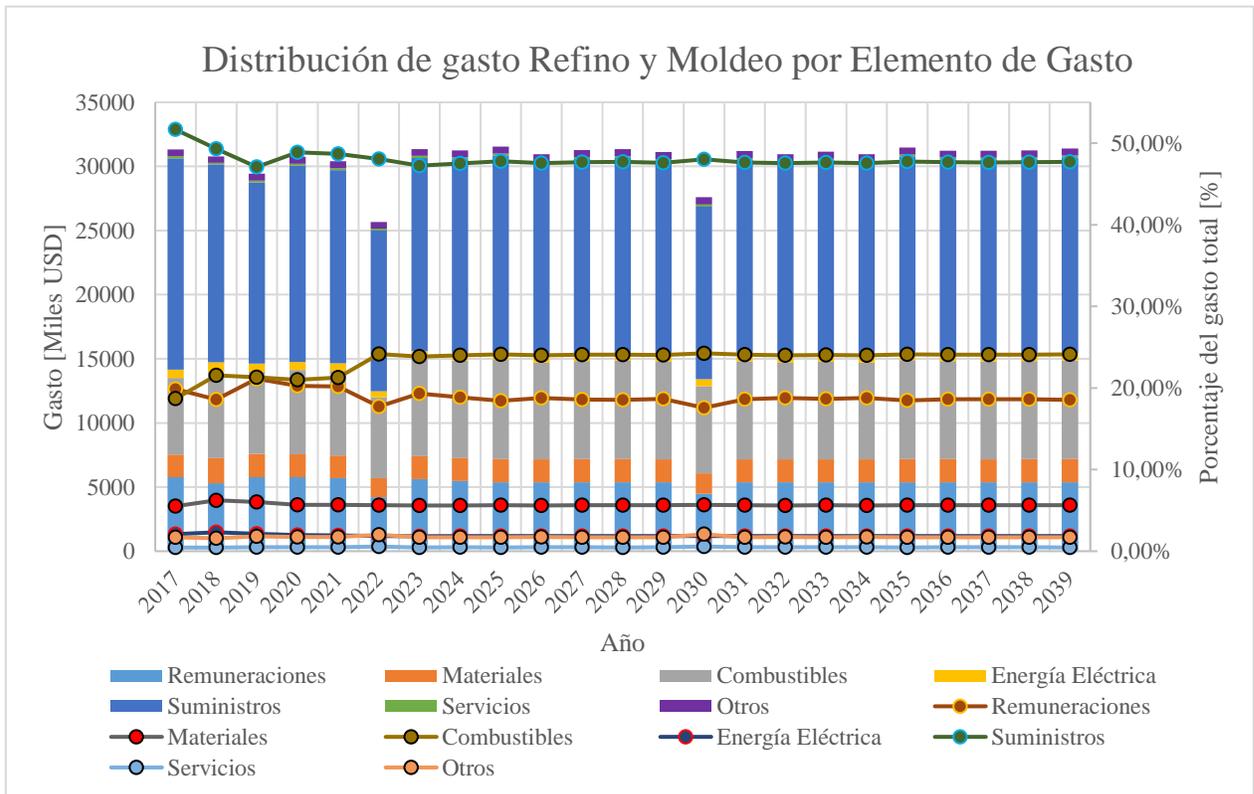


Ilustración 50: Desglose de gastos de Refino y Moldeo.

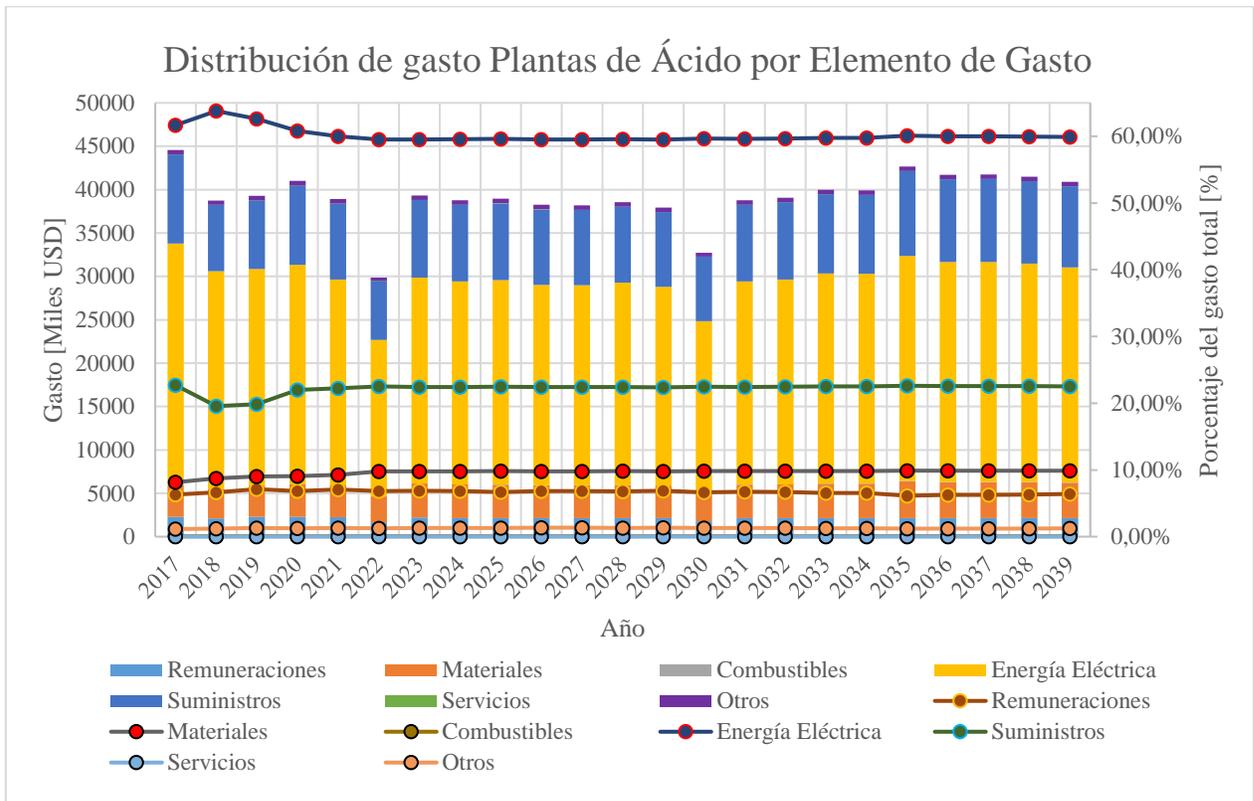


Ilustración 51: Desglose de gastos de Limpieza de Gases.

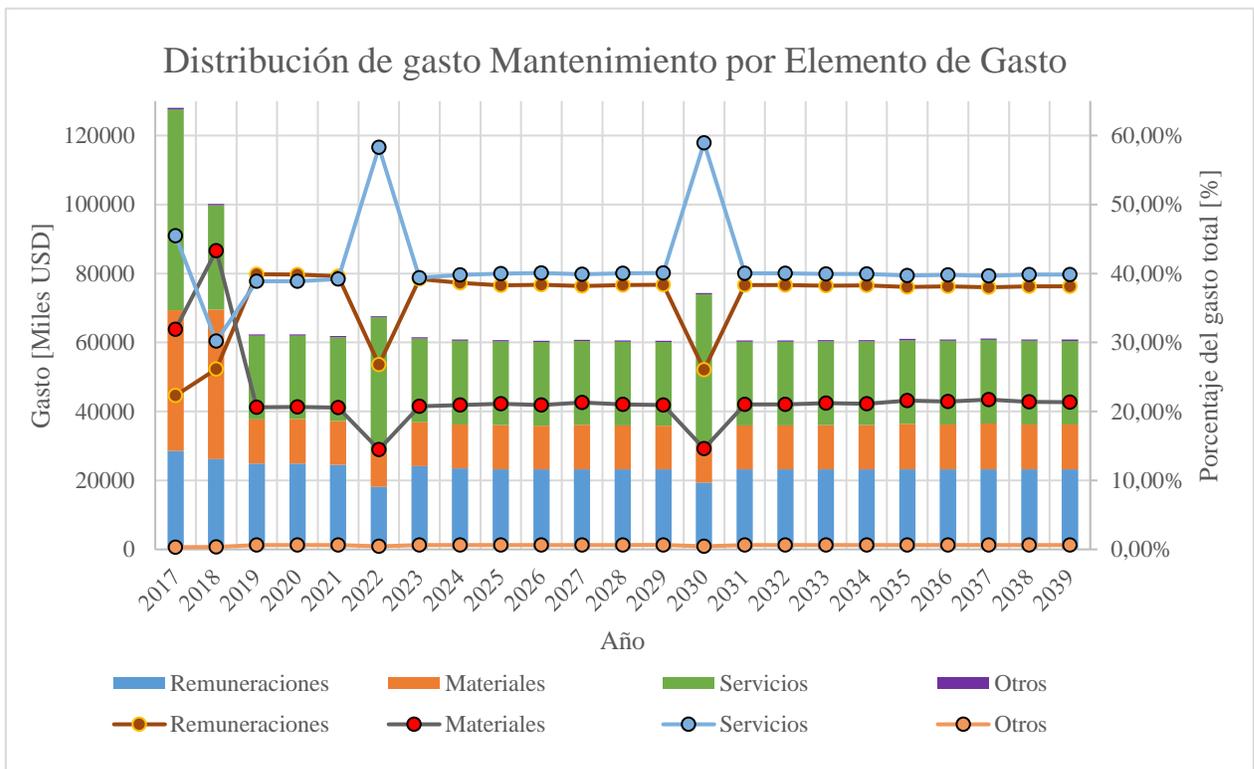


Ilustración 52: Desglose de gastos de Mantenimiento.

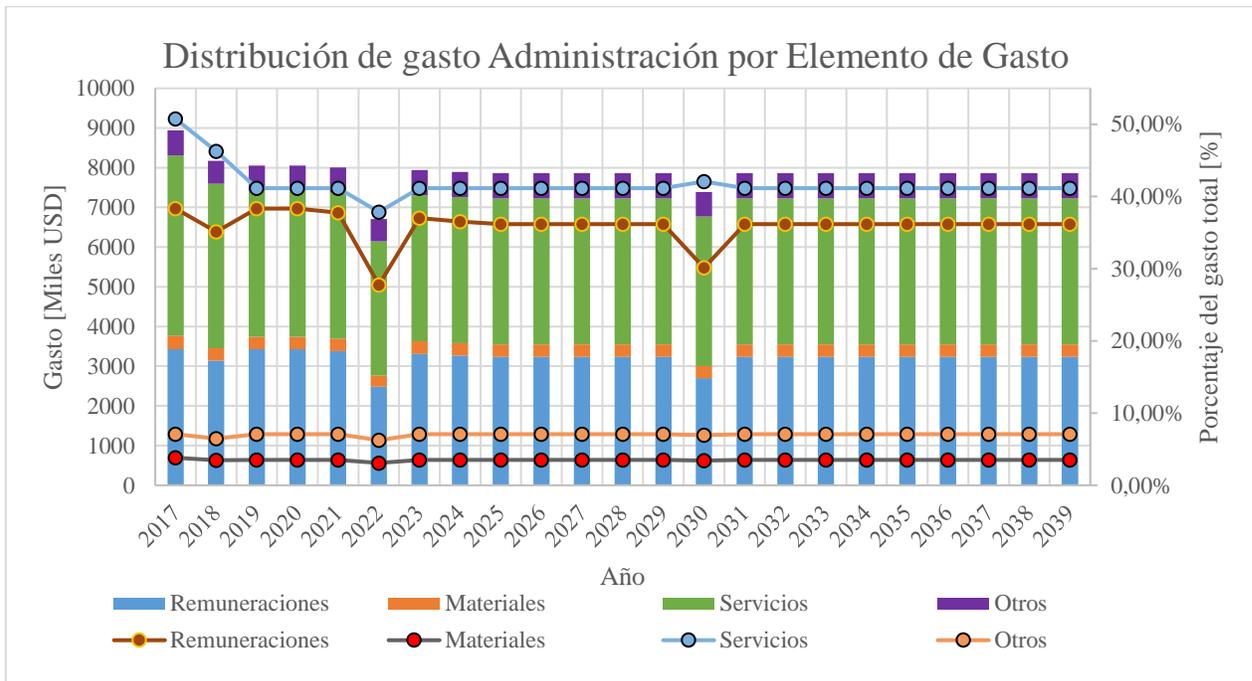


Ilustración 53: Desglose de gastos de Administración.

10.2 Desglose de cada Operación Unitaria de la Refinería DCH

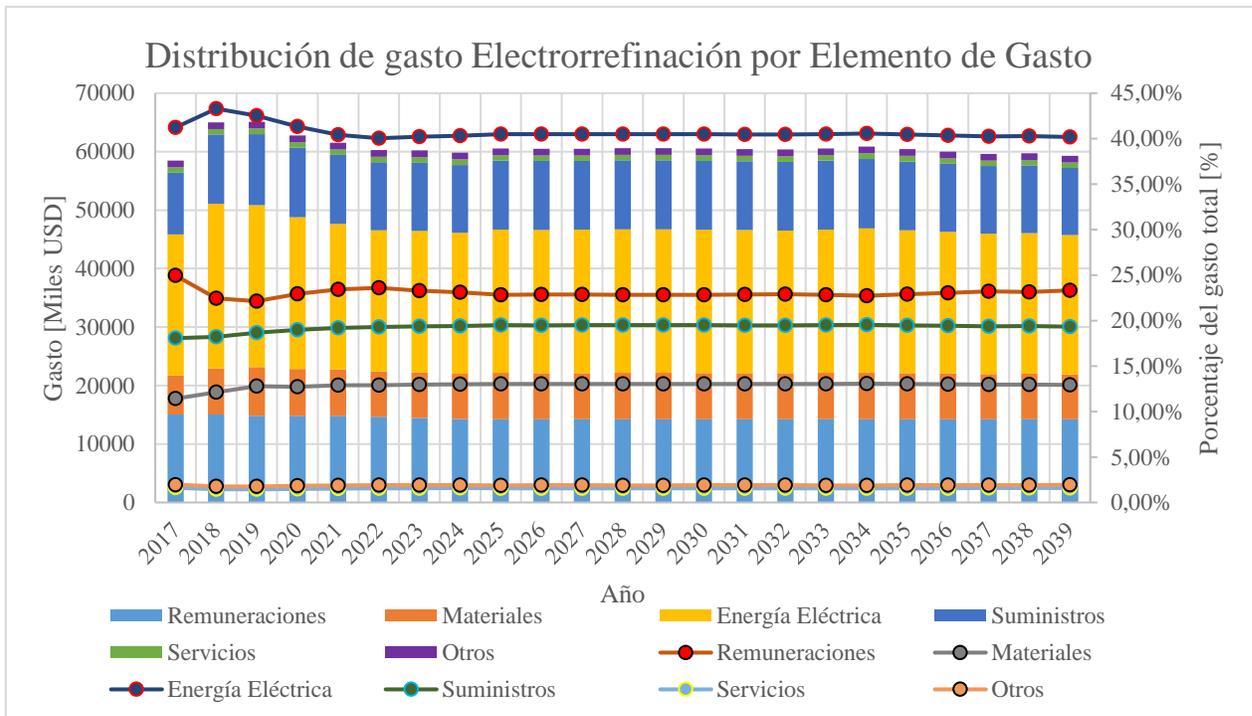


Ilustración 54: Desglose de gastos de Electrorrefinación.

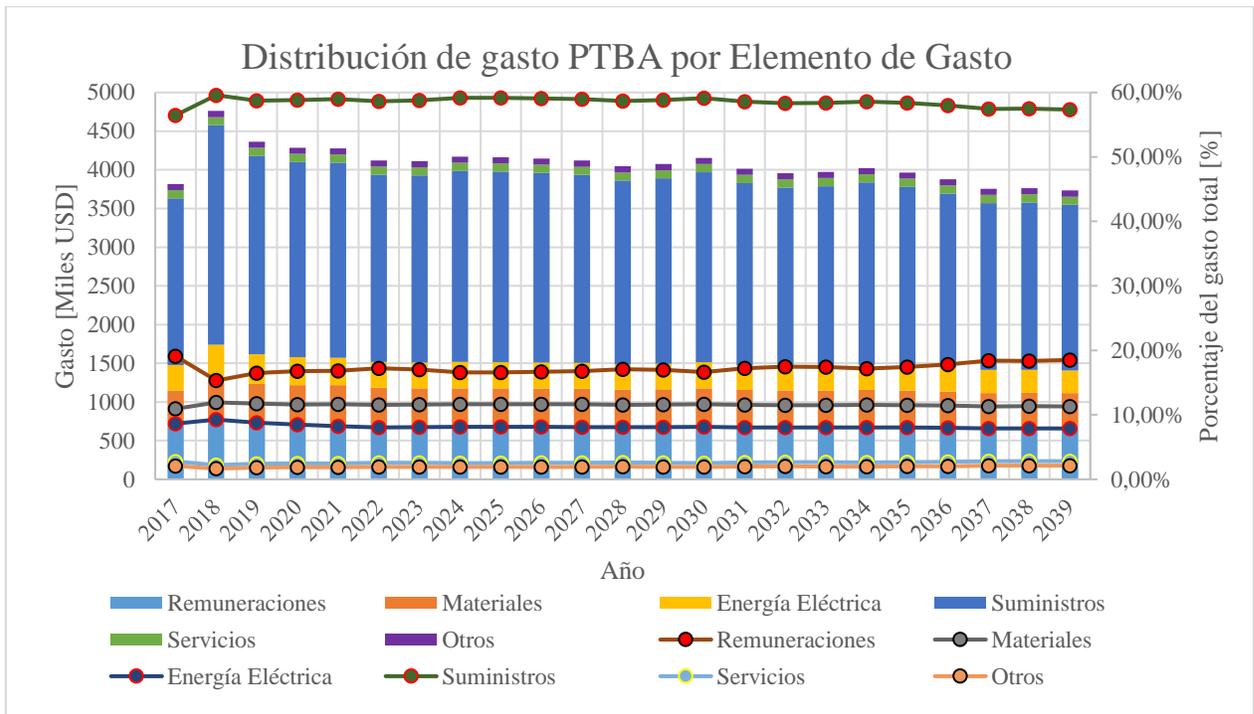


Ilustración 55: Desglose de gastos de la Planta de Tratamiento de Barro Anódico.

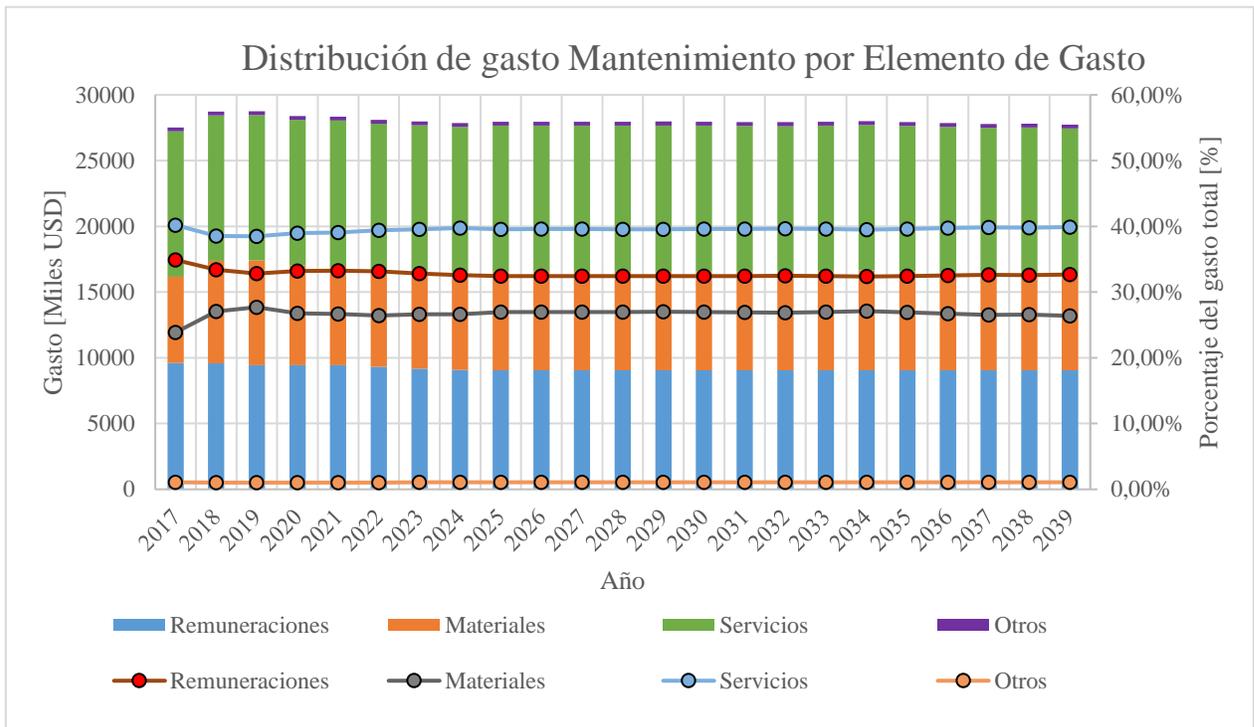


Ilustración 56: Desglose de gasto del Mantenimiento.

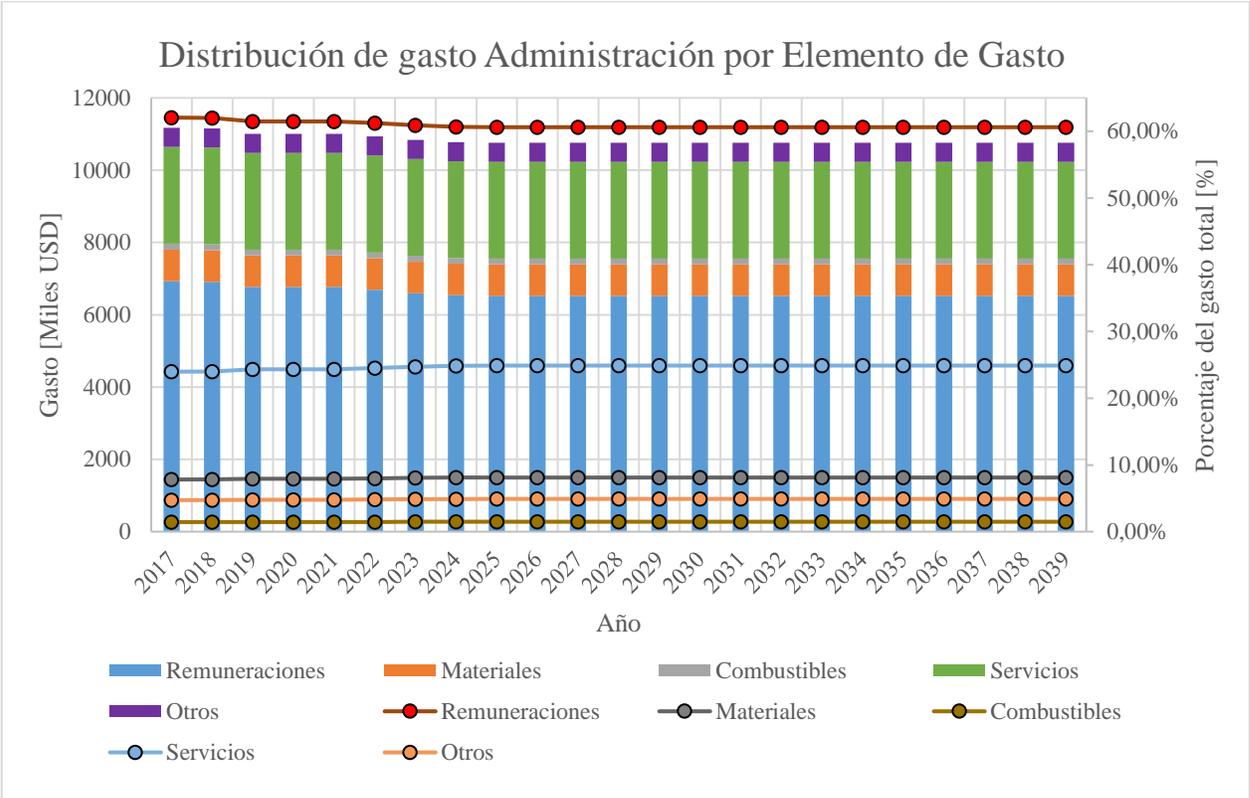


Ilustración 57: Desglose de gastos de la Administración.

11 ANEXO C: DESGLOSE GASTOS OPEX CALCULADO

Se muestran los primeros 6 años planificados.

Tabla 109: Gastos OPEX calculados de la fundición.

Cuenta [miles USD]	Op. Unit.	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Remun. operadores	Rec. y Mez.	9.148	8.557	5.833	5.842	5.762	5.090
Remun. mantenedores	Mantenición	1.867	1.746	753	754	743	657
Materiales de operación	Rec. y Mez.	626	650	451	452	452	339
Materiales de mantenimiento	Mantenición	1.483	1.520	1.306	1.308	1.308	980
Combustible	Rec. y Mez.	10.717	9.902	6.983	7.280	7.376	6.364
Energía	Rec. y Mez.	3.539	3.699	2.466	2.425	2.325	1.733
Suministros	Rec. y Mez.	6.720	5.696	6.225	6.914	6.872	5.128
Servicios de operación	Rec. y Mez.	6.916	6.396	5.516	5.522	5.522	4.952
Servicios de mantención	Mantenición	5.668	5.314	4.335	4.340	4.340	3.892
Otros	Rec. y Mez.	873	795	746	747	747	665
Remun. operadores	Fusión	8.028	7.510	3.575	3.580	3.531	3.119
Remun. mantenedores	Mantenición	5.601	5.239	2.822	2.827	2.788	2.463
Materiales de operación	Fusión	5.780	6.014	4.290	4.443	4.699	3.484
Materiales de mantenimiento	Mantenición	31.191	34.005	3.083	3.085	3.085	2.311
Combustible	Fusión	3.359	3.284	3.081	3.215	3.256	2.826
Energía	Fusión	4.551	4.766	5.570	5.469	5.273	3.925
Suministros	Fusión	11.525	10.910	3.070	3.113	3.111	2.310
Servicios de operación	Fusión	42	38	17	17	17	15
Servicios de mantención	Mantenición	5.663	5.254	3.388	3.392	3.392	3.042
Otros	Fusión	565	527	340	340	340	303
Remun. operadores	Conversión	6.721	6.287	6.773	6.784	6.691	5.910
Remun. mantenedores	Mantenición	2.987	2.794	3.010	3.015	2.974	2.627
Materiales de operación	Conversión	2.224	2.354	2.120	2.090	2.062	1.548
Materiales de mantenimiento	Mantenición	1.724	1.814	1.608	1.573	1.551	1.155
Combustible	Conversión	2.465	2.595	2.377	2.426	2.421	2.096
Energía	Conversión	3.488	3.602	3.072	2.947	2.808	2.078
Suministros	Conversión	19.702	18.885	16.607	17.153	16.858	12.479
Servicios de operación	Conversión	8	7	8	8	8	7
Servicios de mantención	Mantenición	3.163	2.926	3.181	3.184	3.184	2.856
Otros	Conversión	453	421	456	457	457	407

Tabla 110: Gastos OPEX calculados de la fundición.

Cuenta [miles USD]	Op. Unitaria	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Remun. operadores	Ref. y Mold.	6.161	5.763	6.209	6.219	6.133	5.418
Remun. mantenedores	Mantención	2.987	2.794	3.010	3.015	2.974	2.627
Materiales de operación	Ref. y Mold.	1.805	2.017	1.861	1.831	1.813	1.508
Mat. de mantenimiento	Mantención	1.791	2.019	1.851	1.821	1.804	1.482
Combustible	Refi.y Mold.	5.961	6.746	6.394	6.570	6.587	6.304
Energía	Ref. y Mold.	664	725	642	619	594	485
Suministros	Ref. y Mold.	17.287	16.416	14.896	16.161	15.909	13.015
Servicios de operación	Ref. y Mold.	158	146	159	159	159	143
Servicios de mantención	Mantención	1.728	1.598	1.737	1.739	1.739	1.560
Otros	Ref. y Mold.	579	539	584	585	585	521
Remun. operadores	Limp. Gases	2.427	2.270	2.446	2.450	2.416	2.134
Remun. mantenedores	Mantención	2.987	2.794	3.010	3.015	2.974	2.627
Materiales de operación	Limp. Gases	3.817	3.590	3.777	3.954	3.839	3.086
Mat. de mantenimiento	Mantención	3.908	3.614	3.767	3.890	3.763	2.879
Combustible	Limp. Gases	23	22	23	25	25	22
Energía	Limp. Gases	28.109	25.293	25.417	25.736	24.118	18.324
Suministros	Limp. Gases	10.861	8.254	8.508	9.828	9.442	7.198
Servicios de operación	Limp. Gases	8	8	8	8	8	7
Servicios de mantención	Mantención	1.686	1.559	1.431	1.432	1.432	1.284
Otros	Limp. Gases	550	511	554	555	555	494
Remun. operadores	Op. General	747	699	753	754	743	657
Remun. mantenedores	Op. General	0	0	0	0	0	0
Remuneraciones Rol A	Op. General	2.379	2.225	2.397	2.401	2.362	2.064
Materiales de operación	Op. General	1.425	4.005	4.315	4.321	4.252	3.715
Energía	Op. General	24.796	698	527	528	528	473
Suministros	Op. General	806	706	606	678	673	502
Servicios de operación	Op. General	16	15	16	16	16	15
Servicios de mantención	Op. General	2.287	2.115	2.300	2.302	2.302	2.065
Otros	Op. General	185	172	186	187	187	166
Remuneraciones Rol A	Mantención	4.281	4.005	4.315	4.321	4.252	3.715
Remun. mantenedores	Mantención	9.709	9.081	9.784	9.799	9.665	8.537
Mat. de mantenimiento Eléc.	Mantención	1.321	1.356	1.176	1.176	1.176	881
Mat. de mant. Refr.	Mantención	550	564	489	489	489	367
Servicios de operación	Mantención	754	698	527	528	528	473
Servicios de mantención	Mantención	42.410	14.832	10.970	10.982	10.982	9.849
Otros	Mantención	435	405	423	424	424	378
Remuneraciones totales	Administración	3.653	3.417	3.682	3.688	3.635	3.191
Materiales	Administración	351	307	323	323	323	292
Servicios	Administración	4.506	4.168	3.673	3.677	3.677	3.297
Otros	Administración	675	628	680	681	681	607

Tabla 111: Gastos OPEX calculados de la refinería.

Cuenta [miles USD]	Op. Unitaria	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Remun operadores	Electrorrefinación	15.550	15.868	15.465	15.489	15.489	14.934
Remun. mantenedores	Mantención	3.110	3.174	3.093	3.098	3.098	2.987
Mat. de operación	Electrorrefinación	6.855	8.142	8.576	8.218	8.159	7.945
Materiales de mantenimiento	Mantención	3.566	4.236	4.331	4.138	4.110	4.011
Combustible	Electrorrefinación	0	0	0	0	0	0
Energía	Electrorrefinación	24.104	28.143	27.680	25.948	24.874	24.127
Suministros	Electrorrefinación	11.082	12.607	12.809	12.579	12.470	12.078
Servicios de operación	Electrorrefinación	989	1.003	994	995	995	979
Serv. de mantención	Mantención	9.247	9.382	9.298	9.309	9.309	9.157
Otros	Electrorrefinación	1.218	1.243	1.228	1.229	1.229	1.201
Remun. operadores	PTBA	778	793	773	774	774	747
Remun. mantenedores	Mantención	583	595	580	581	581	560
Mat. de operación	PTBA	429	587	529	511	513	487
Materiales de mantenimiento	Mantención	134	184	165	160	160	152
Combustible	PTBA	0	0	0	0	0	0
Energía	PTBA	330	441	383	363	352	332
Suministros	PTBA	2.261	3.019	2.704	2.662	2.665	2.510
Servicios de operación	PTBA	111	112	111	112	112	110
Serv. de mantención	Mantención	1.505	1.527	1.514	1.515	1.515	1.491
Otros	PTBA	85	86	85	85	85	84
Remun. Rol A	Op. General	495	501	476	476	476	462
Remun. Rol A	Mantención	1.485	1.503	1.427	1.429	1.429	1.385
Remun. mantenedores	Mantención	5.054	5.157	5.026	5.034	5.034	4.853
Materiales de mantenimiento	Mantención	990	1.176	1.203	1.149	1.141	1.114
Materiales de mantenimiento Oleo.	Mantención	1.272	1.511	1.546	1.477	1.466	1.431
Materiales de mantenimiento Eléc.	Mantención	783	930	951	909	903	881
Servicios de operación	Mantención	14	15	15	15	15	14
Servicios de mantención	Mantención	837	849	841	842	842	828
Otros	Mantención	312	319	315	315	315	308
Remun totales	Administración	7.388	7.519	7.267	7.278	7.278	7.033
Materiales	Administración	896	902	898	899	899	892
Combustibles	Administración	160	160	160	160	160	160
Servicios	Administración	2.810	2.851	2.825	2.828	2.828	2.782
Otros	Administración	563	574	567	568	568	555