



## **Costos generados por la Aplicación del Plan Operativo de Control de Episodios Críticos del PdD de la Fundición Hernán Videla Lira**

**Wilson R. Rodríguez<sup>1</sup>; Ester A. Quevedo<sup>1</sup>**

1. Departamento de Industria y Negocios, Facultad de Ingeniería, Universidad de Atacama, Chile

---

### **Resumen**

La industria minera ha generado contaminación en muchas zonas del país. Este es el caso de la fundición Paipote, razón por el cual debió implementar un plan de descontaminación producto de la superación de la norma de concentración de diversos contaminantes en las zonas aledañas. Para tal efecto se crearon dos herramientas para cumplir los objetivos establecidos por la normativa ambiental, siendo estas: la incorporación de tecnología y el plan operativo de control de episodios críticos, que consiste en restricciones en la operación basados en información meteorológica con el objetivo de prevenir episodios críticos. Este trabajo determinó el costo que generó a la fundición Paipote la aplicación del plan operativo entre los años 1995 y 2000. Se concluyó que las pérdidas totales por la implementación del plan operativo alcanzó un valor de US\$ 14.802.475 y la principal restricción operacional se realizó en la etapa de fusión de concentrado generando una pérdida económica estimada de US\$ 11.741.607.

**Palabras claves:** Descontaminación, Fundición, Paipote.

---

### **Abstract**

The mining industry has generated pollution in many zones of the country. The same has happened with Paipote foundry. This is reason why it was created a decontamination plan, due to the overcoming of the concentration rule of several pollutants in the nearby zones. In order to fulfil the established goals of the enviromentals rules, two measures were created. These measures are: the incorporation of new technology and the operative plan of critical episodes, which consists on operation restrictions based on meteorological information with only intention of preventing critical episodes. This research determined the cost generated to Paipote foundry by the application of the operative plan between the years 1995 and 2000. It was concluded that the total lost produced by the running of the operative plan was of US\$ 14.802.475 and that the main operational restriction took place during the concentrate fusion stage generating an estimative economic last of US\$ 11.741.607.

**Keywords:** Decontamination, Foundry, Paipote.

## 1. Introducción.

Chile es un país minero, a lo largo de su extensión nos encontramos con yacimientos en su mayoría de Cobre. La explotación de este mineral, ha llevado consigo la contaminación de muchas zonas del país. Pero en estos tiempos, el tema medioambiental está normado de manera más estricta por la legislación vigente, esto implicó que varias fundiciones del país que por años estaban emitiendo sustancias contaminantes tuvieron que someterse a planes de descontaminación.

En el año 1993 la zona circundante a la Fundición Hernán Videla Lira (Paipote) por Decreto Supremo N° 225<sup>1</sup> del Ministerio de Agricultura, fue declarada zona saturada para Anhídrido Sulfuroso, esto determinó que esta fundición debía presentar un plan de descontaminación (PdD) y generar cambios en su proceso productivo. De esta forma, comenzó un plan de descontaminación, que concluyó el año 2000, cumpliendo con las normas de calidad del aire.

Cuando se realiza un plan de descontaminación, las inversiones son cuantiosas, por lo tanto, se hace necesario conocer dimensión de los recursos económicos utilizados

Cabe señalar que el PdD de la fundición Paipote, creó dos herramientas para cumplir los objetivos establecidos para el mejoramiento de la calidad del aire. Estas son [9]:

- 1.- Incorporación de tecnología, que mejora la eficiencia de la captación de azufre.
- 2.- Plan operativo de control y prevención de episodios críticos, que consiste en restricciones en la operación de la fundición para prevenir episodios críticos basados en información meteorológica.

Con el objeto de poder determinar posteriormente la eficiencia de cada instrumento a través de la relación costo-beneficio, es que el presente artículo se ha propuesto como objetivo determinar el costo de la aplicación del plan operativo utilizados por el PdD desarrollado en la Fundición Paipote.

## 2. Proyecto de modernización.

El Proyecto de Modernización de la Fundición Paipote [ENAMI B], tuvo como objetivo fundamental el aumento de la captación y procesamiento de los gases contaminantes generados en los diferentes procesos. Sin embargo, el proyecto consideró además una ampliación en la capacidad de procesamiento, de manera tal que este aumento en la producción permitiera contrarrestar los efectos económicos negativos que los proyectos ambientales generan, implicando así, un mejoramiento en la competitividad de la fundición, mediante una ampliación de la capacidad de procesamiento y disminución de costos operacionales.

El Plan de Modernización de la Fundición concluye exitosamente el año 2002, con la instalación de un Horno Eléctrico y con una capacidad de fusión nominal de 325.000 toneladas anuales [ENAMI B], pero debido al control de emisiones no se ha alcanzado tal capacidad. Ese mismo año se logró procesar 306.056 toneladas anuales [ENAMI G].

Para el logro de estos objetivos medioambientales, el proyecto contempló básicamente la eliminación de la fusión en el Horno Reverbero (HR), principal generador de gases contaminantes, para realizarla totalmente en el Convertidor Teniente (CT), operando con inyección de concentrado seco y aire enriquecido con oxígeno; y procesando los gases generados en la operación de fusión/conversión en plantas de ácidos, para lo cual se consideraron nuevos sistemas de enfriamiento y limpieza de los gases, así como una segunda planta de ácido, adicional a la preexistente, con lo cual se hacía posible procesar la totalidad de los gases sulfurosos captados en la campana del CT y convertidores tradicionales (CPS's). Para el tratamiento de las escorias de fusión/conversión, se consideró la instalación de un Horno Eléctrico.

La eliminación del Horno Reverbero (cuyos gases permitían la producción de vapor para generación de energía eléctrica y aire de soplado del proceso de conversión) y

1

los mayores requerimientos de energía eléctrica, implicaron variados cambios en los servicios, siendo necesaria la instalación de una nueva subestación eléctrica de 110 KV y nuevos electrosofladores.

Con el nuevo esquema operacional, las metas del proyecto contemplaron alcanzar un aumento de la capacidad de procesamiento anual de concentrados del orden de 25%, con un incremento en los niveles de captación desde el 45% a 90% del Azufre total ingresado, lo que implicaba una mayor producción de Ácido Sulfúrico del orden de 180%.

El proyecto evaluado arrojó indicadores financieros que hicieron altamente conveniente para ENAMI, y para el país, ejecutar el Proyecto de Modernización Fundición Hernán Videla Lira [ENAMI C], considerando los siguientes equipos e instalaciones:

- Una planta de ácido adicional a la existente de 75.000 Nm<sup>3</sup>/hr.
- Un ducto de enlace para transporte gases de los Convertidores Pierce-Smith a la nueva Planta de Ácido.
- Un sistema de enfriamiento y limpieza de gases del CT.
- Una nueva subestación eléctrica de 110/6 KV.
- Una planta de oxígeno.
- Un secador de concentrados.
- Un sistema de transporte e inyección neumática de concentrados secos al CT.
- Tres sopladores de aire accionados eléctricamente.
- Un horno eléctrico para el tratamiento de escorias de fusión/conversión.

### **3. Plan operativo de control de episodios críticos.**

El Plan Operacional de control de episodios críticos consiste en una serie de medidas de restricción operacional tendiente a disminuir las emisiones de Anhídrido Sulfuroso(SO<sub>2</sub>) a la atmósfera, con el fin de controlar la ocurrencia de episodios críticos.

El plan operativo implementado por la Fundición Paipote, a través del tiempo sufrió diversas modificaciones con el fin de adaptarse a las exigencias legales y el nuevo

escenario que propondrían los continuos cambios tecnológicos [Servicio Salud Atacama 2001].

Este plan comenzó a desarrollarse informalmente a inicios del 1994 debido a la presión social existente producto de los altos niveles de contaminación registrados en esa época. En Enero de 1995, se pone en funcionamiento el primer plan de acción operacional y es enviado a las autoridades para su aprobación, la principal característica de este plan, es la de ser un plan reactivo, es decir, las medidas se tomaban cuando la concentración de los gases era elevada. La vigencia de este plan fue hasta el mes de Mayo del año de 1995, debido a que en ese mes ocurre un episodio crítico de gran magnitud.

### **4. Determinación de las pérdidas de producción por efectos de los planes de control de episodios críticos.**

El proceso de la Fundición Paipote es un proceso continuo, comienza con el ingreso de materias primas, que pasan por etapas y que para finalizar, se obtiene un producto al mismo tiempo que ingresa la alimentación al proceso, es decir, cualquier interferencia en las primeras etapas afecta las siguientes. Para el caso de las restricciones medioambientales, la puesta en marcha de los planes operativos afectó el proceso en la etapa de fusión de concentrados en una primera instancia, lo que implicó una disminución en cuanto a la capacidad de producción de ánodos y de Ácido Sulfúrico a esto se le denomina Pérdidas de Producción.

#### **4.1 Determinación de las pérdidas de fusión de concentrados.**

Durante los años en que se mantuvo en funcionamiento el HR las pérdidas de fusión se determinaron a través de la cuantificación de las restricciones operacionales en HR y el CT, ya que estos equipos eran los que llevaban a cabo la fusión de concentrados, así su detención o disminución de producción generaba pérdidas. Por otra parte cuando el esquema operacional ya no contaba con el HR la determinación de las pérdidas se cuantificó a través de las detenciones o disminuciones

del nivel de producción del CT, ya que era el único equipo que generaba la Fusión de concentrados.

Para establecer un procedimiento de cálculo y los criterios en cuanto a la utilización de datos se hizo un conocimiento de la información existente, para estos fines se revisaron en su totalidad: reportes diarios de la operación de fundición (1995-2000) [ENAMI D], libros de novedades de fundición y del departamento de meteorología (1995-200), informes del departamento de medioambiente [ENAMI H] y reportes diarios de la operación del Convertidor Teniente. Además se realizaron verificaciones cruzadas de datos con el fin de validar la información. El conocimiento de la información existente permite concluir que se cuenta con datos de tiempos de restricción para cada condición operacional y las características de estas condiciones operacionales en cada distinta configuración operacional.

Se debe señalar también que la capacidad de producción de un equipo puede medirse en una tasa de producción que es igual a una cantidad de producción en un tiempo a una condición operacional determinada, de esta manera, cada vez que se restringió la operación en la Fundición Hernán Videla Lira por el control ambiental se variada la condición operacional y por lo tanto, también cambiaban las tasas de fusión de concentrados por el tiempo que duraba la restricción. De esta forma, se concluye que para determinar la cantidad de pérdidas de fusión de concentrados se determina la tasa a las distintas condiciones de restricción y el tiempo en que varió esta tasa con respecto a la condición sin restricción, lo que se explica por la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdidas} = \Delta\text{Tasa} * \text{Tiempo} \quad [1]$$

Donde:

**Pérdidas:** Disminución de la capacidad de fusión, por el control de las emisiones (ton).

**$\Delta$ Tasa:** La diferencia entre tasa de fusión de concentrados a una condición sin restricción y la tasa de fusión de concentrados a una condición con restricción (ton/hr).

**Tiempo:** Tiempo desde que comienza una condición con restricción hasta que termina la condición de restricción. (hr) [ENAMI A].

Aplicando la ecuación 1 a los datos obtenidos, se determinaron las pérdidas de producción en el HR y en el CT, cuyos resultados se aprecian en la siguiente tabla.

AÑO	PERDIDAS TOTALES DE FUSION		
	HR	CT	HR + CT
1995	40.552	12.142	52.694
1996	40.646	8.318	48.964
1997	27.319	1.476	28.795
1998	7.507	3.002	10.509
1999	0	11.399	11.399
2000	0	10.230	10.230
<b>TOTAL</b>	<b>116.025</b>	<b>46.566</b>	<b>162.597</b>

**Tabla N° 1: Resumen** de las pérdidas de fusión de concentrados por la aplicación de los planes operacionales

#### 4.2 Determinación de las pérdidas de producción de ánodos y de ácido.

Las pérdidas en cuanto a la disminución de la capacidad de producción de ánodos y de Ácido Sulfúrico se estimaron al encontrar una relación entre la Carga Nueva Útil fundida (CNU), la producción de ánodos y ácido, para esto se utilizaron los programas de producción de la Fundición, la relación que se obtiene se expresa como un factor. A continuación se presenta la tabla con el programa de producción [ENAMI E].

Año	CNU (ton)	Ánodos (ton f cu) <sup>2</sup>	Ánodos (ton) <sup>3</sup>	Ácido (ton)
1995	260.211	75.769	76.012	82.756
1996	234.030	68.599	68.847	83.121
1997	237.001	69.954	70.235	130.112
1998	267.340	70.634	70.946	205.184
1999	280.678	71.568	71.884	234.128
2000	296.002	76.818	77.157	239.587

**Tabla N° 2:** Programa de producción de la Fundición.

<sup>2</sup> ANODOS (ton f Cu) f : Ánodos finos = [ ANODO s \* Ley (% Cu) ] / 100.

<sup>3</sup> ANODOS (ton): Ánodos secos = [ ANODO f \* 100 ] / Ley (% Cu).

Los índices se obtienen dividiendo ánodos (tonf Cu) y ácido (ton) por la CNU.

Los resultados se presentan en la siguiente tabla.

Año	Índice Ánodos	Índice Ácido
1995	0,291	0,318
1996	0,293	0,355
1997	0,295	0,549
1998	0,264	0,768
1999	0,255	0,834
2000	0,260	0,809

**Tabla N° 3:** Índices de Acido y Ánodo calculados a partir del programa de producción de la Fundición Hernán Videla Lira

Una vez obtenidos los índices, se determinan las pérdidas en cuanto a la disminución de la capacidad de producción de ánodos y ácido. Para esto se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\text{Pérdidas Ánodos} = \text{Pérdidas de fusión} * \text{índice Ánodos} \quad [2]$$

$$\text{Pérdidas Ácido} = \text{Pérdidas de fusión} * \text{índice Acido} \quad [3]$$

Aplicando la ecuación 2 y 3 para cada año, se obtienen los siguientes resultados.

Año	CNU Pérdida (ton)	Pérdida Ánodos (ton)	Pérdida Ácido (ton)
1995	52.694	15.344	(*) <sup>4</sup>
1996	48.964	14.353	(*)
1997	28.795	8.499	15.808
1998	10.509	2.776	8.065
1999	11.399	2.906	9.508
2000	10.230	2.655	8.280

**Tabla N° 4:** Cálculo de las pérdidas de producción de ánodos y ácido

<sup>4</sup> (\*) Durante este período sólo se contaba con una planta de ácido, por esta razón no se contabilizan las pérdidas de producción por la disminución de la capacidad de producción debido al control de los episodios críticos.

## 5. Estimación del costo asociado a la aplicación del plan operativo.

### 5.1 Definición del método Maquila.

Este método es utilizado para determinar el estado de resultado de una empresa productora, generalmente se utiliza en minería y consiste en la subdivisión por etapas del proceso y cada una de ellas se evalúa con un ingreso y un egreso, cuya diferencia representa las utilidades o pérdidas de cada etapa, la suma de la utilidad o pérdida de cada una de las etapas del proceso representa las utilidades totales de la empresa. La Fundición HVL utiliza este método, por este motivo las pérdidas de producción se determinaron por etapas.

### 5.2 Cálculo de los costos de las pérdidas de producción.

Para estimar las pérdidas económicas de producción se desglosó los costos totales de producción en costos fijos y costos variables por etapa. Cuando, por efecto de la implementación de los Planes de control operativo, se restringe la operación, la Fundición deja de percibir ingresos en las etapas de fusión, refinado y producción de ácido, pero incurriendo en los gastos fijos, entonces el costo de dejar de producir está dado por la diferencia entre los ingresos y el costo variable, es decir, es el ingreso marginal.

El ingreso marginal se estimó a partir de la diferencia entre los cargos de tratamientos unitarios por etapas y los costos variables unitarios por etapas y se presentan continuación.

Año	Fundición	Refino	Ácido
1995	72,30	36,78	28,78
1996	70,78	38,08	29,82
1997	84,11	43,80	33,34
1998	83,95	51,28	30,91
1999	48,18	34,38	25,67
2000	59,90	46,68	23,08

**Tabla N° 5:** Ingreso marginal por etapa (US\$/ ton)

Fuente: [ENAMI F]

La valorización de las pérdidas de producción se halló con el producto de las pérdidas de producción y los costos marginales en cada una de las etapas, tal como se muestran en las siguientes tablas.

Año	Pérdidas fusión(CN U) (ton)	Ingreso Marginal (US\$/ton)	Pérdidas económicas (US\$)
1995	52.694	72,3	3.809.776
1996	48.964	70,78	3.465.672
1997	28.795	84,11	2.421.947
1998	10.509	83,95	882.231
1999	11.399	48,18	549.204
2000	10.230	59,9	612.777
TOTAL			11.741.607

**Tabla N° 6:** Valorización de las pérdidas de fusión de concentrados (US\$)

Año	Pérdidas Refino (ton)	Ingreso Marginal (US\$/ton)	Pérdida económica (US\$)
1995	15.344	36,78	564.352
1996	14.353	38,08	546.562
1997	8.499	43,8	372.256
1998	2.776	51,28	142.353
1999	2.906	34,38	99.908
2000	2.655	46,68	123.935
TOTAL			1.849.368

**Tabla N° 7:** Valorización de las pérdidas de refino a fuego (US\$)

Año	Pérdidas Ácido (ton)	Ingreso Marginal (US\$/ton)	Pérdidas económicas (US\$)
1995	-----	28,78	-----
1996	-----	29,82	-----
1997	15.808	33,34	527.039
1998	8.065	30,91	249.289
1999	9.508	25,67	244.070
2000	8.280	23,08	191.102
TOTAL			1.211.501

**Tabla N° 8:** Valorización de las pérdidas de producción de ácido (US\$)

La valorización de las pérdidas totales considerando todas las etapas del proceso se muestran en la siguiente tabla.

Año	Pérdidas Fundición (US\$)	Pérdidas Refino (US\$)	Pérdidas Ácido (US\$)	Total Anual (US\$)
1995	3.809.776	564.352	-----	4.374.129
1996	3.465.672	546.562	-----	4.012.234
1997	2.421.947	372.256	527.039	3.321.242
1998	882.231	142.353	249.289	1.273.873
1999	549.204	99.908	244.070	893.182
2000	612.777	123.935	191.102	927.815
Total	11.741.607	1.849.368	1.211.501	14.802.475

**Tabla N° 9:** Valorización de las pérdidas totales de producción por etapa (US\$)

## 6. Conclusiones

Se concluyó que las principales restricciones operacionales del Plan se realizaron en la etapa de fusión de concentrado afectando posteriormente a las etapas de refino a fuego y producción de ácido.

Por otra parte se determinó que las pérdidas de fusión de concentrados alcanzó un valor de 162.597 toneladas, respecto a las pérdidas obtenidas en los equipos de fusión, las mayores se obtuvieron en el horno reverbero y fueron 116.025 toneladas y en el convertidor teniente se obtuvieron pérdidas de 46.566 toneladas. Se determinó que las pérdidas en la etapa de refino y ácido son directamente proporcionales a las pérdidas de fusión. Las pérdidas en el refino a fuego se estimaron en 46.533 toneladas de ánodo y las pérdidas de ácido sulfúrico fueron estimadas en 41.661 toneladas. Con respecto a la valoración económica de las pérdidas totales estas alcanzan un valor de US\$ 14.802.475 por la implementación del plan operativo, concluyendo que en la etapa de fusión se genera la mayor pérdida económica cuyo valor es de US\$ 11.741.607.

## 7. Referencias

ENAMI A, Plan Operacional de Control de episodios Críticos de la Fundición HVL, Departamento de Medioambiente, 1995-2002.

ENAMI B, Plan de Modernización de la Fundación Hernán Videla Lira, 2002.

ENAMI C, Detalle Inversión Real Proyecto de Modernización de la Fundación Hernán Videla Lira (1995-2002),2002.

ENAMI D, Reportes Diarios Operación, Fundación Hernán Videla Lira, Área Fundación, 1995-2000.

ENAMI E, Programa de Producción, Fundación Hernán Videla Lira, 1995-2000.

ENAMI F, Estado de Resultado de la Fundación Hernán Videla Lira, 1995-2000.

ENAMI G, Charla "Plan de Modernización de la Fundación Hernán Videla Lira", Septiembre 2003.

ENAMI H, Libro diario de Novedades, meteorología, Departamento de medioambiente, Fundación Hernán Videla Lira, 1996-2001

Servicio de Salud Atacama 2001, Resoluciones conjuntas SSA y SAG durante el PdD de la Fundación HVL (ENAMI).

Rodríguez C. Wilson 2001, Valoración de los Beneficios en Salud Generados por la Aplicación del PdD de la Fundación HVL, Tesis de Magíster, PUC 2001.