



COSTO MARGINAL DE LA MITIGACION DE CARBONO DE LA IMPLEMENTACION DE PROYECTOS DE EFICIENCIA LUMINICA EN LA INDUSTRIA MINERA DE COBRE PRIMARIO EN CHILE

Wilson Rodríguez, Marcos Zuñiga, Alexander Borger

Departamento de Industria y Negocios – Universidad de Atacama
wilson.rodriguez@industria.uda.cl; marcos.zuniga@industria.uda.cl;
alexander.borger@industria.uda.cl

RESUMEN

El presente trabajo analiza la mitigación de carbono en esta industria dada la implementación de proyectos de iluminación eficiente y siendo el principal objetivo el de establecer la curva de costos marginales en la mitigación de carbono producida por la implementación de los proyectos de eficiencia lumínica en cada una de las áreas de la industria minera, considerando a su vez la industria privada y estatal. Para desarrollar los cálculos se extrapolan los parámetros medioambientales y económicos utilizados en la aplicación de proyectos de iluminación eficiente en una división de Codelco. Los resultados señalan que la implementación es más eficiente en la industria privada que en la estatal, y por ejemplo, para el caso de establecer políticas públicas, la implementación de los proyectos debe realizarse en el siguiente orden: Servicios, refinación, LIX/SX/EW, concentradora, fundición, mina subterránea y mina rajo. La mitigación que se consigue implementando los proyectos en toda la industria es aproximadamente 46.600 toneladas de carbono con un beneficio de 263 US\$/t de carbono mitigado.

Palabras claves: Iluminación eficiente, eficiencia energética, carbono mitigado

ABSTRACT

The present work analyzes the carbon mitigation in this industry, once the implementation of projects of efficient illumination was given, and being his main objective the one of establishing the marginal cost curve in the mitigation of carbon produced by the implementation of the projects of light-emitting efficiency in every one of the areas of the mining industry, considering both, the state and the private industries. To develop the estimates certain environmental and economic parameters used in the implementation of efficient lighting projects performed in a division of Codelco, are extrapolated. The results indicate that the implementation is more efficient in the private industry than in the state one, and for example, in order to establish public politics, the implementation of projects should be done in the following order: service, refining, LIX/SX/EW, concentrator, smelter, mine and mine pit. Mitigation is achieved by implementing projects throughout the industry is approximately 46,600 tonnes of carbon with a profit of 263 US\$/t of carbon mitigated.

Keywords: Efficient lighting, energy efficiency, carbon mitigated

1. INTRODUCCIÓN

En la industria minera la iluminación tiene mucha importancia, la producción en la mina transcurre en turnos que se desarrollan durante todo el día permitiendo una explotación más intensiva de los equipos y un incremento de la producción, aún así la iluminación representa un consumo menor al 1 % del total de energía eléctrica consumida en esta industria [1]. Cabe destacar que un mejoramiento en la iluminación genera un menor gasto en energía, así como otros beneficios indirectos, tales como un mejoramiento de las condiciones de trabajo, un incremento en la seguridad y la disminución del cansancio general y visual [2]. Los proyectos de mejoramiento de la eficiencia de la iluminación en minería tuvieron un impulso inicial hace 2 décadas cuando la CONAMA propuso una normativa lumínica aplicable a tres regiones de Chile.

Por esa misma razón se estudiaron los efectos de dicha normativa [3] en el proyecto, con lo cual se estimó que el cambio de luminaria de baja eficiencia por otra de alta eficiencia generaría un ahorro energético que iría desde un 25% hasta un 40 %. Por otra parte, Barrios [4] resalta las experiencias exitosas en el reemplazo de los sistemas de iluminación estándar por uno de mayor eficiencia en fundiciones y refinerías

en Chile, estimando ahorros de energía en torno a un 60%.

2. DEFINICIÓN DE TECNOLOGÍA EN ILUMINACIÓN

Para implementar soluciones de iluminación en la industria minera del cobre, en el mercado existe una gran variedad de lámparas y luminarias que en principio podrían satisfacer los requerimientos de la industria minera. Las lámparas son los aparatos encargados de generar la luz y las luminarias son aparatos destinados a alojar, soportar y proteger la lámpara y sus elementos auxiliares, además de concentrar y dirigir el flujo luminoso. En la actualidad las lámparas de descarga a raíz de sus mejores prestaciones, como son el ahorro energético y los beneficios económicos en comparación con sus pares incandescentes, están siendo más recomendadas para el uso industrial.

Esto se comprueba en variados trabajos que han analizado los parámetros de eficiencia y duración de cada tipo de lámpara. En la tabla 1 se presentan los tipos de lámparas existentes en el mercado nacional y en la tabla 2 se aprecian las diferencias en los parámetros entre autores para la lámpara de sodio de alta presión, siendo esta la preferida en la industria minera, por sus ventajas de aplicabilidad en las soluciones [5].

Tabla 1. Eficiencia de lámparas

| Tipo de lámpara | Eficiencia energética (Lum/W) | Vida promedio (h) |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------|
| Incandescente | 10 a 35 | 1.000 a 4.000 |
| Vapor de Mercurio | 20 a 60 | 24.000+ |
| LED | 20 a 40 | |
| Fluorescente | 50 a 100 | 6.000 a 24.000 |
| Haluro Metálico | 50 a 110 | 6.000 a 20.000 |
| Sodio de Alta Presión | 50 a 140 | 24.000 a 40.000 |
| Sodio de Baja Presión | 100 a 180 | 16.000 |

Fuente: [6]

Tabla 2. Promedio de Vida de Ampolletas de Sodio de Alta Presión

| Referencia | Eficiencia (Lum/W) | | Vida Promedio (h) | |
|------------|--------------------|------|-------------------|------|
| | Max. | Min. | Max. | Min. |
| [7] | 40 | 140 | [7] | 40 |
| [8] | 22 | 115 | [8] | 22 |
| [9] | 52 | 140 | [9] | 52 |

3. METODOLOGÍA

Para determinar el ahorro de energía por la introducción de un sistema de iluminación eficiente, se estima una línea base que se generará por la implementación de un proyecto de iluminación eficiente en una faena de la minería del cobre, teniendo en consideración el tiempo de uso promedio de la iluminación y la potencia en iluminación que se requiere para su funcionamiento óptimo en cada proceso y subproceso. El total de energía ahorrada en la industria corresponde a la suma de todos los ahorros potenciales de cada faena minera. De la revisión bibliográfica se obtiene una propuesta para determinar la energía de la línea base, así como también la del sistema con iluminación eficiente realizada por Hagler Baillo [10], ésta propone una metodología que consiste en determinar el promedio de energía de los equipos por hora además del promedio de horas de utilización de dichos equipos. Para ello se toma una muestra de empresas que componen una industria, como se expresa en la ecuación (1):

$$E = \text{Pot. Prom.} * \text{Hr Op. prom.} * N^{\circ} \text{Lum.} \quad (1)$$

Al cambiarse el sistema lumínico estándar por uno eficiente cambia el número de luminarias y la potencia promedio. Otra metodología para establecer la línea base, es la propuesta por la OECD&IEA [11] quienes hacen una modificación a lo establecido por Hagler Bailly, utilizando para extrapolar en la iluminación en una empresa, la potencia ocupada para la iluminación por unidad de área (Pot/m²). La desventaja de ambos métodos es la cantidad importante de información que se requiere, tanto en el escenario base como en el escenario con iluminación eficiente. De esta forma, teniendo en consideración los estudios

mencionados, la metodología que se propone en este trabajo consiste en los siguientes pasos:

Paso 1- Determinar los parámetros de los análisis económicos y medioambientales de los proyectos de iluminación eficiente realizados en la industria minera del cobre, y extrapolar los resultados obtenidos en esas faenas a la industria en su totalidad y en los diversos procesos que componen.

Paso 2- Conceptualizar el proceso productivo del cobre primario en Chile determinando procesos y subprocesos en los cuales se extrapolarán los parámetros definidos en el paso anterior, y cuya definición depende principalmente de la información que se requiere para extrapolar los resultados de los proyectos analizados.

Paso 3- Determinar los costos de mitigación y las cantidades de carbono mitigados que se generarían por la implementación de proyectos de eficiencia en iluminación, en cada proceso, subproceso y en general en la industria minera del cobre primario.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

Paso 1: El presente estudio analiza la información del trabajo realizado por el PRIEN [12], que revisa varios proyectos de implementación de iluminación eficiente realizados en una fundición de Cobre de CODELCO (Ver tabla 3). Allí se muestra la información y los resultados de los siguientes sectores: Planta ánodos y refinado, planta unidad fusión y conversión, plantas de oxígeno y aire y planta de preparación de carga.

Este estudio, muestra en el diagnóstico inicial la necesidad de cambiar el sistema estándar

de iluminación en varios sectores de la fundición. Luego de analizar la iluminancia (lúmenes/metro²) requerida se determinó también utilizar las ampollitas eficientes para minimizar el consumo. Los resultados se

muestran en la tabla 4, considerando además el cálculo del VAN desde un punto de vista privado y estatal.

Tabla 3. Impacto económico y energético de los proyectos de iluminación eficiente en fundición de Codelco

| Sector | Recomendación (Lux) | Potencia (W) | VAN (KUS\$) | | tc Mit | Area (m ²) |
|-----------------------|---------------------|--------------|-------------|---------|--------|------------------------|
| | | | Estatal | Privado | | |
| Planta Oxígeno (ext) | 250 | 20125 | 2,7 | 53,5 | 123 | 593 |
| Planta Aire | 250 | 13600 | 46,1 | 112,7 | 82 | 1260 |
| Cancha Nave Fund. | 200 | 39000 | 25,5 | 100,1 | 215 | 7000 |
| Nave Convertidor | 150 | 60060 | -135,6 | -56,8 | 343 | 2563 |
| Nave Anodo | 300 | 15000 | 19,1 | 64,3 | 34 | 2744 |
| Nave Refino | 300 | 25550 | 35,5 | 118,1 | 163 | 2304 |
| Edif. Alm. Materiales | 150 | 9000 | -0,1 | 17,7 | 45 | 2720 |
| Planta Secado | 150 | 30410 | -26,0 | 37,6 | 162 | 1337 |
| Correas | 100 | 47350 | -77,0 | 22,3 | 295 | 1094 |

Fuente: PRIEN 1999

Para desarrollar el paso 1 se tiene en consideración los resultados de los proyectos de iluminación en la fundición de Cobre y los siguientes supuestos:

1) La luminosidad en cada sector en estudio es homogénea antes y después de realizar el proyecto de mejoramiento de iluminación.

2) Los costos por unidad de potencia (VAN/Pot) y la mitigación por unidad de potencia (CMit/Pot) generados por los proyectos de mejoramiento lumínico tienen relación directa con los niveles de

luminosidad. Es decir, se considera que en sectores de similar iluminación el VAN del proyecto y el carbono mitigado por el mejoramiento en iluminación son proporcionales a la potencia utilizada para su iluminación. Para tal efecto los sectores analizados en la tabla 4 se clasificaron en A, B, C y D, de acuerdo a los niveles de iluminación (lux) que se requerían. De esta forma, se calculan los parámetros seleccionados para cada categoría establecida, los resultados se muestran también en la tabla 4:

Tabla 4. Categorización de proyectos de iluminación eficientes en Fundición de Cobre

| Categoría | Recom (lux) | Pot. (W) | VAN (KUS\$) | | VAN/Pot | | C Mit/Pot (tc/W) |
|-----------|-------------|----------|-------------|---------|---------|---------|------------------|
| | | | Estatal | Privado | Estatal | Privado | |
| A | 0-100 | 47350 | -77,0 | 22,3 | -1,63 | 0,47 | 0,0062 |
| B | 101-200 | 138470 | -136,2 | 98,5 | -0,98 | 0,71 | 0,0055 |
| C | 201-300 | 33725 | 48,8 | 166,2 | 1,45 | 4,93 | 0,0061 |
| D | 300-400+ | 40550 | 54,6 | 182,4 | 1,35 | 4,50 | 0,0049 |

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 5. Parámetros de la evaluación

| Parámetro | Valor | Unidad |
|----------------------|-------|-----------|
| Tipo de cambio | 600 | \$/US\$ |
| Horizonte de tiempo | 10 | años |
| Horas de iluminación | 24 | Horas/día |
| Precio energía | 61,6 | \$/KW |
| Factor de emisión | 765 | tc/GWh |

Paso 2. Para extrapolar los parámetros definidos en la tabla 4 se conceptualiza de forma simplificada el proceso de obtención del cobre. Para cada proceso y subproceso se definen las diversas áreas que generan flujos de materiales característicos, de forma similar a la definida por los informes del consejo minero [13] y Cochilco [14], tal como se aprecia en las figuras 1 y 2. Para el caso de los minerales de cobre sulfurados se definieron las siguientes áreas: mina (subterránea y Rajo), concentradora, fundición, refinera electrolítica y servicios. Para los minerales de cobre oxidados y mixtos, las áreas definidas son: mina, lixiviación, electroobtención y servicios.

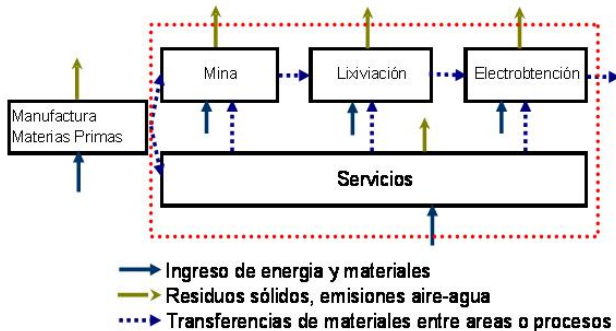


Figura 1. Proceso de obtención del cobre oxidado

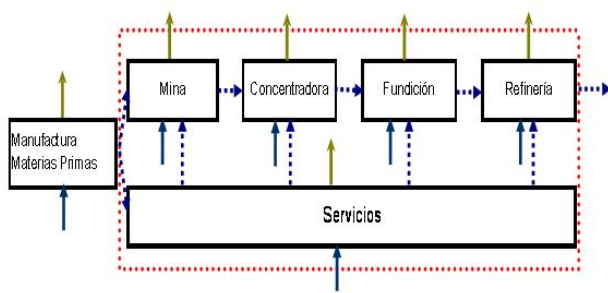


Figura 2. Proceso de obtención del cobre sulfurado

Dado que la información disponible de la fundición es distinta a las otras unidades definidas en la conceptualización de la industria, el análisis se hará en ambas situaciones (casos) dependiendo de la información que se tenga de la unidad. Para el primer caso se determinan para los sulfuros de cobre los costos de mitigación y la cantidad de carbono mitigado para los procesos de la mina, concentradora y refinadora, y para los óxidos de cobre en la mina, lixiviación y electroobtención.

Para el análisis de la fundición se utilizarán otros parámetros para extrapolar, siendo estos la mitigación de carbono por unidad de área (C Mit/Área) y el costo por unidad de área (VAN/Área), los supuestos que se establecen para este caso son:

1) La luminosidad en cada sector de la fundición es homogénea antes y después de realizar el proyecto de mejoramiento de iluminación.

2) Los costos por unidad de área (VAN/Área) generados por los proyectos de mejoramiento lumínico tienen relación directa con los niveles de luminosidad. Es decir, se considera que en áreas de similar iluminación el VAN del mejoramiento en iluminación es proporcional a la potencia utilizada.

Caso 1: Se determinan los parámetros VAN/Pot y Mit/Pot para cada proceso definido en la conceptualización, para tal efecto se toma como modelo del proceso conceptualizado una división de Codelco, considerando los datos de las potencias instaladas en iluminación de cada proceso (mina, concentradora y lixiviación-electroobtención) y de cada subproceso (Ver anexo A). De esta forma, cada subproceso de la faena modelo se clasifica inicialmente

como A, B, C o D de acuerdo a la iluminación requerida, y se calcula el VAN y el carbono mitigado utilizando para este efecto los parámetros VAN/Pot y Mit/Pot de referencia de cada categoría establecida en el paso 2 (Ver tabla 4).

De esta forma, el VAN/Pot y Mit/Pot del proceso i , se determina sumando inicialmente los VAN calculados para cada subproceso j del proceso i y luego dividiéndolo por la suma de las potencias de cada subproceso j (de similar forma se calcula la mitigación por unidad de potencia para el proceso i). Esto se muestra en las ecuaciones 2 y 3:

$$\frac{VAN_i}{Pot_i} = \frac{\sum VAN_{ij}}{\sum Pot_{ij}} = \frac{\sum \left(\frac{VAN}{Pot} \right)_{Ref} * Pot_{ij}}{\sum Pot_{ij}} \quad (2)$$

$$\frac{Mit_i}{Pot_i} = \frac{\sum Mit_{ij}}{\sum Pot_{ij}} = \frac{\sum \left(\frac{Mit}{Pot} \right)_{Ref} * Pot_{ij}}{\sum Pot_{ij}} \quad (3)$$

Las potencias en iluminación utilizadas en cada proceso de la división de Codelco considerada como faena modelo, se aprecian en la tabla 6. La potencia utilizada en la iluminación de cada proceso conceptualizado de la industria minera, se obtiene considerando inicialmente la energía eléctrica total utilizada en los procesos y extrapolando los porcentajes de uso de la energía eléctrica en iluminación respecto de la energía total usada de la faena modelo. Estos valores se aprecian en la tabla 7.

Tabla 6 Potencia en iluminación por Areas en Faena Modelo (W)

| Proceso | Potencia (W) |
|-----------------|--------------|
| Mina | 27.850 |
| Mantenimiento | 56.400 |
| Chancado | 102.040 |
| Concentradora | 56.440 |
| Hidrometalurgia | 354.515 |
| Refinería | 118.082 |

Fuente: [5]

Tabla 7. Porcentaje de consumo de EE. en ilum. (%)

| Proceso | Mina Rajo | Mina Subt. |
|-----------------|-----------|------------|
| Mina | 1,46 | 1,97 |
| Concentradora | 0,17 | 0,06 |
| Hidrometalurgia | 0,27 | 0,27 |
| Refinería | 1,42 | 1,42 |

Fuente: [5]

Caso 2: El cálculo del VAN y la mitigación de C en una fundición se hace utilizando directamente los parámetros de referencias VAN/Area y CMit/Area, así como el área de las fundiciones. Para tal efecto inicialmente debe estimarse los valores de las áreas de cada fundición de acuerdo a los procesos y las tecnologías utilizadas (ver tabla 8). El supuesto considerado en este paso es que las fundiciones tienen el mismo layout que la fundición modelo y las áreas en los diferentes procesos son proporcionales al número de equipos que se utilizan en ellas. La metodología utilizada es la siguiente:

- Se determinan los componentes tecnológicos del proceso metalúrgico de cada fundición.
- Se establece la superficie que ocupa cada componente en el proceso en la fundición de referencia (modelo)
- Se establecen las áreas que ocuparía cada subproceso de acuerdo a los componentes tecnológicos que tienen, y las áreas de referencia, obteniendo finalmente la relación de las áreas teóricas con las de referencia.

Se calcula el costo de la implementación de un proyecto de iluminación eficiente como la relación entre áreas por la variable a calcular (VAN y Mit C).

Tabla 8. Tecnologías utilizadas en las fundiciones de Chile

| Fundición | Dimensión CT | CT | Horno Flash Outokumpu | Reactor Noranda | Peirce Smith | Horno Escoria | Horno Eléctrico |
|--------------|--------------|----|-----------------------|-----------------|--------------|---------------|-----------------|
| Chuquicamata | 5*22 | 2 | 1 | | 3 | 2 | |
| Caletones | 5*22 | 2 | | | 4 | 4 | |
| Potrerrillos | 5*22 | 1 | | | 3 | 2 | |
| Ventanas | 4*15 | 1 | | | 3 | | 1 |
| Paipote | 4*15 | 1 | | | 2 | | 1 |
| Chagres | | | 1 | | 3 | 2 | |

Fuente: [15]

Tabla 9. Areas estimadas y de referencia para sectores de fundiciones de cobre en Chile

| Sectores | Codelco Norte | Caletones | Potrerrillos | Ventanas | Paipote | Chagres | Alto norte |
|----------------------|---------------|-----------|--------------|----------|---------|---------|------------|
| Planta Oxígeno (ext) | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 | 19 |
| Planta Aire | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 | 55 |
| Cancha Nave Fund. | 5.185 | 7.310 | 4.935 | 4.935 | 4.560 | 3.785 | 3.785 |
| Nave Convertidor | 3.000 | 3.688 | 2.313 | 2.313 | 2.063 | 2.313 | 2.313 |
| Nave Anodo | 2.744 | 2.744 | 2.744 | 2.744 | 2.744 | 2.744 | 2.744 |
| Nave Refino | 0 | 2.304 | 1.536 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Edif. Alm. Mat | 2.720 | 2.720 | 2.720 | 2.720 | 2.720 | 2.720 | 2.720 |
| Planta Secado | 1.337 | 1.337 | 1.337 | 1.337 | 1.337 | 1.337 | 1.337 |
| Correas | 1.094 | 1.094 | 1.094 | 1.094 | 1.094 | 1.094 | 1.094 |

Fuente: Elaboración Propia

Paso 3: El proceso i representa solo a una división de una empresa considerada como modelo, en el cálculo del VAN y la Mit de C del proceso i (caso 1) para la industria ($VAN_{i-Chile}$ y la $Mit_{i-Chile}$), se extrapolan los parámetros de proceso i de la división de Codelco VAN/Pot , Mit/Pot y $(Energía\ ilum)/(Energía\ total)$ al resto de la industria, considerando el supuesto de ser estos parámetros son representativos de la industria. Para esto se aplican las ecuaciones 4 y 5:

$$Mit_{i-Chile} = \left[\frac{\sum_j \left(\frac{Mit}{Pot} \right)_{Ref-i} * Pot_{ij}}{\sum_j Pot_{ij}} \right] * Pot_{i-Chile} \quad (4)$$

$$VAN_{i-Chile} = \left[\frac{\sum_j \left(\frac{VAN}{Pot} \right)_{Ref-i} * Pot_{ij}}{\sum_j Pot_{ij}} \right] * Pot_{i-Chile} \quad (5)$$

Donde

Pot_{ij} : Potencia en iluminación utilizada en la industria minera de cobre en el proceso i

Mit_{ref-j} : Es la mitigación de carbono de referencia obtenida en la fundición de cobre de Codelco para el subproceso j

Pot_{ref-j} : Es la potencia en iluminación de referencia utilizada en la fundición de cobre de Codelco para el subproceso j

Pot_{ij} : Es la potencia en iluminación en el subproceso j del proceso i de la división de Codelco analizada.

Inicialmente para determinar la potencia en iluminación en cada proceso de la industria minera se calcula el consumo de energía eléctrica en cada proceso, obteniéndose de la multiplicación de la producción de cobre de dicho proceso por el consumo unitario para cada sector en estudio, como lo establece la siguiente ecuación:

$$Cons. E. Elec._i = CU_i * Producción_i$$

Donde

Consumo Energía Eléctrica_i: Consumo de energía eléctrica en el proceso i

CU_i: Coeficiente Unitario de consumo de electricidad en el proceso i (MJ/Ton producción)

Producción_i: Producción de Cobre en el proceso i

Ambos datos (CU_i y Producción_i) se obtienen proyectando estas variables de los informes realizados por Cochilco [14] [16] (ver tabla 10 y tabla 11).

Tabla 10 Producción Proyectada de la Minería del Cobre Chileno (2011)

| Proceso | TMF |
|------------------|-----------|
| Mina | 6.320.000 |
| Mina Rajo | 5.182.400 |
| Mina Subterránea | 1.137.600 |
| Concentrado | 4.150.000 |
| Cátodo SX/EW | 2.170.000 |
| Producción Total | 6.320.000 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11 Coef. Unitario de consumo proyectado de energía (2011)

| Proceso | Coef. | Unidades |
|------------------|--------|---------------------|
| Mina Rajo | 775 | MJ/TMF mineral |
| Mina Subterránea | 2.205 | MJ/TMF mineral |
| Concentradora | 9.199 | MJ/TMF concentrado |
| LIX/SX/EW | 10.748 | TMF cátodo |
| Refinería | 1.252 | (NJ/TMF cátodos ER) |
| Servicio | 557 | MJ/TMF total proa. |

Fuente: Elaboración propia

La propiedad de las empresas mineras puede ser privada o estatal, por lo que el parámetro VAN/Pot se especifica para ambas situaciones, y así se obtiene la potencia de iluminación para cada proceso (ver tabla 12) considerando la propiedad de la empresa. Cabe señalar que los parámetros relacionados con la mitigación (Mit/Pot) no son afectados por los impuestos, de esta forma dichos parámetros son similares en ambos casos.

Tabla 12 Potencia en iluminación en faenas mineras (W)

| Proceso | Privado | Estatal |
|------------------|---------|---------|
| Mina Rajo | 734.508 | 334.113 |
| Mina Subterránea | 619.883 | 281.973 |
| Concentradora | 790.965 | 269.618 |
| LIX/SX/EW | 659.211 | 486.095 |
| Refinería | - | 585.353 |

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida las potencias de iluminación en cada proceso de acuerdo a la propiedad de la empresa, se estiman también por cada proceso y según la propiedad, el VAN y la mitigación de acuerdo a las ecuaciones 5 y 6, teniendo en consideración el tipo de extrapolación realizada.

Para el caso 1, se reemplazan los valores de las potencias de la iluminación en cada proceso y se multiplican por los VAN/Pot, y Mit/Pot de referencia obtenidos en el paso 2.

Para el caso 2, los VAN y la mitigación de C generado por proyectos de iluminación se obtienen ponderando los valores de VAN y Mit de C de referencia por los factores de área de cada fundición (Área proyectada/Área referencia), obteniendo los siguientes resultados (ver tabla 13 y figura 3).

Tabla 13. VAN y Mitigación de Carbono por Proyectos de iluminación en la minería del Cobre en Chile

| Proceso | VAN (US\$) | | Mitigación (TC) | |
|------------------|------------|-----------|-----------------|---------|
| | Privado | Estatal | Privado | Estatal |
| Mina Rajo | 2.203.078 | 169.165 | 4.659 | 4.179 |
| Mina Subterránea | 2.539.119 | 217.885 | 4.166 | 1.959 |
| Concentradora | 3.548.463 | 251.837 | 5.377 | 1.763 |
| Fundición | 1.953.085 | 567.171 | 2.741 | 5.668 |
| LIX/SX/EW | 3.118.633 | 566.547 | 4.439 | 3.267 |
| Refinería | | 2.170.558 | | 5.982 |
| Servicio | 1.908.559 | 323.221 | 1.656 | 753 |

Fuente: Elaboración propia

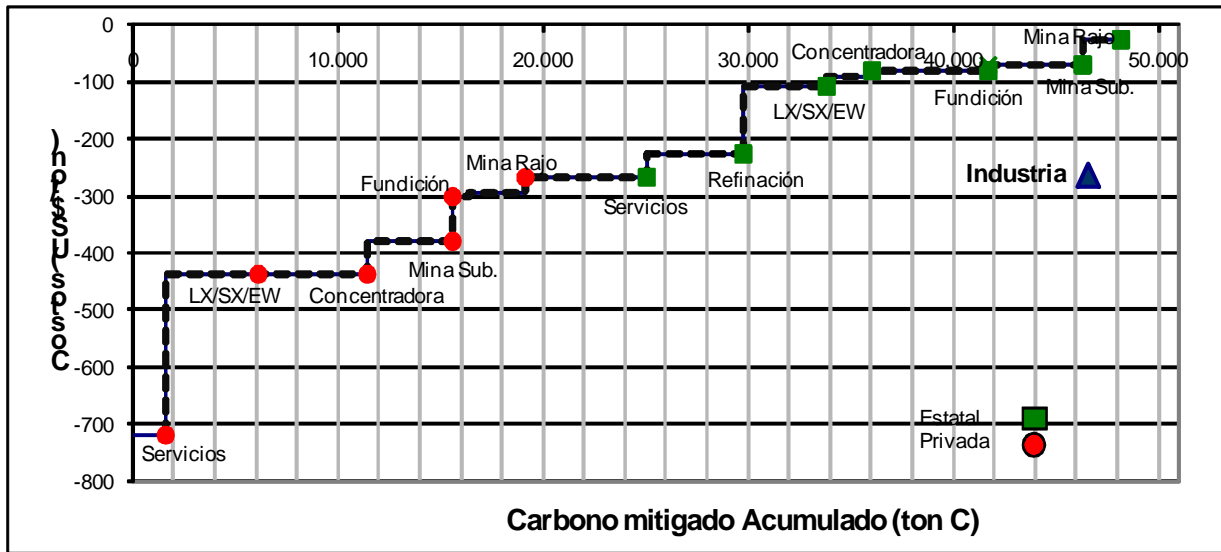


Figura 3. Costo Marginal de mitigación de carbono con iluminación eficiente en la minería de Chile para año 2012 (US\$/tc)

5. CONCLUSIONES

Respecto al orden en que deben ser seleccionadas las operaciones de la minería primaria del cobre para realizar los proyectos de iluminación eficiente, se concluye que la minería privada es una mejor opción. Esto se da principalmente dado que su tributación es menor que la minería estatal. El orden establecido de acuerdo a la eficiencia para la mitigación (US\$/tc) para cada una de las actividades señaladas en el modelo son: servicio, refinación, LIX/SX/EW, concentradora, Mina Subterránea, fundición y mina rajo. Este orden es tanto para la

minería privada como estatal, excepto en la refinación que es una operación considerada solo en la industria estatal y que precede al proceso definido como servicio. Cabe señalar que el orden de estas actividades está en concordancia a los supuesto realizados, y que señalan que el VAN y el carbono mitigado son proporcionales a la potencia de iluminación ocupada, es decir, a mayor potencia implica un mayor VAN al igual que una mayor mitigación de carbono. Y por otra parte las actividades que utilizan el recurso humano en su ejecución necesitan mayor potencia lumínica para poder desarrollarse, de esta forma "servicio" es la actividad esperada como la de mayor impacto económico y

medioambiental al desarrollar un proyecto de iluminación eficiente.

Los costos de mitigación para cada una de las actividades seleccionada (US\$/ton) es menor a cero en cada una de ellas, es decir, en vez de representar un costo para la empresa es un beneficio, siendo el total de 19,5 millones dólares por sobre una tasa de descuento de 19 %, considerando la aplicación de estos proyectos en la industria privada como estatal. La actividad que genera un mayor VAN por la realización de este tipo de proyecto es el proceso de "concentración" en la industria privada. El valor máximo que se obtiene de mitigación de carbono realizando estos proyectos de iluminación eficiente en todas las actividades de la industria es de aproximadamente 46.600 toneladas de carbono mitigado considerando un horizonte hasta el año 2015 y estableciendo la realización de estos proyectos el año 2011. Cabe señalar que la cantidad mitigada no representa una gran diferencia entre la industria privada y la estatal, ya que en este caso no existe una diferencia impositiva entre ambas industrias.

Analizando los resultados se determina que el costo de mitigación es muy inferior al precio de la tonelada de carbono que actualmente se tranza en el mercado y que se proyectan para el largo plazo (15-20 US\$/tc), esto es muy concluyente ya que el costo de mitigación del carbono implementando un proyecto de iluminación no tan solo es bajo sino también negativo, siendo muy atractivo para la industria, ya que se asegura un retorno en cualquier escenario de las variables consideradas. Por último los resultados del modelo respecto a variaciones en el tipo de cambio y/o la utilización de la energía en iluminación (24 horas establecidas en este trabajo) señalan que los resultados no sufren modificaciones importantes, por lo que estas conclusiones son consistentes.

5. REFERENCIAS

[1] OP&S, C., Informa técnico: Factibilidad sistema de iluminación plantas y minas. 2005, Codelco.

[2] Svetlana, M., Electrificación de minas, ed. E.P.y. Educación. 1985.

[3] CONAMA, Análisis general del impacto económico y social del anteproyecto de norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica, . 1998, Unidad de economía ambiental: Santiago, Chile.

[4] Barrios, A., Las Fuentes renovables de energía y el Uso Eficiente, Programa de Estudios de Investigación en energía, in Programa Chile sustentable, S. Larrain, C. Stevens, and M.P. Aedo, Editors. 2002, Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile: Santiago. p. 69-72.

[5] Codelco, Informe técnico: Factibilidad sistema de iluminación plantas y minas. 2005, Codelco.

[6] Ontario Ministry of Energy. Lighting Reference Guide. 2005.

[7] Ontario Ministry of Energy. Lighting Reference Guide. 2009.

[8] EPA, U.E.P.A. Building Upgrade Manual. 2004 [cited 2008 http://www.energystar.gov/index.cfm?c=business.bus_upgrade_manual].

[9] Maillet, A.J., Energy-Efficient Lighting and Lighting Practices for the Pulp and Paper Industry. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992. Vol. 28(N° 4, July / August 1992).

[10] Hagler Bailly Services, An Initial View on Methodologies for Emission Baselines: Case Study on Energy Efficiency". 2000, IEA and OECD: Paris.

[11] OECD and IEA, Emission Baselines, Estimating the Unknown. 2000: Paris.

[12] PRIEN, Mecanismos de Inversión para el ahorro de energía: La incorporación de equipos eléctricos eficientes en la minería del Cobre, trabajo realizado para CODELCO. 1999, Codelco Santiago.

[13] Minero, C., Uso eficiente de energía en las industria minera y buenas practicas,

acuerdo marco producción limpia sector gran minería. 2002.

[14] Cochilco, Coeficientes unitarios de consumo de energía de la minería del Cobre 1995-2009. 2010, Cochilco.

[15] Valenzuela, A., et al., The chilean copper metallurgical industry: An update, in

Yazawa International Symposium in the TMS Annual Meeting (The minerals, Metal & Material Society). 2003: San Diego, California, USA.

[16] Cochilco, Anuario de estadística del cobre y otros minerales 1990-2009, C.C.d. Cobre, Editor. 2010, Cochilco.