



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

ESTUDIOS DE PRE INVERSIÓN PARA DESARROLLAR EFICIENCIA ENERGÉTICA
EN UNA PLANTA INDUSTRIAL TÍPICA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
CHRISTIAN FERNANDO NILO DONOSO

PROFESOR GUÍA:
LEONEL ALEJANDRO NÚÑEZ LAZO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2013

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL

TÍTULO DE: Ingeniero Civil Mecánico

POR: Christian Fernando Nilo Donoso

FECHA: 25/10/2013

PROFESOR GUÍA: Leonel Núñez Lazo

ESTUDIOS DE PRE INVERSIÓN PARA DESARROLLAR EFICIENCIA ENERGÉTICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL TÍPICA

Actualmente no existe una metodología orientada a la industria nacional que entregue herramientas de cálculo para evaluar y estimar el desempeño de plantas industriales. La industria nacional aporta una importante fracción del PIB con manufactura de baja complejidad y poca eficiencia energética. Considerando lo anterior se diseña y aplica una metodología para caracterizar el desempeño energético de una unidad productiva típica, su relación con la producción y costos directos. El trabajo se realizó en los siguientes pasos:

- I. Se confecciona una pauta para evaluar plantas industriales chilenas. Esta propone un estudio de las subunidades productivas relevantes energéticamente, una clasificación y un balance de energía.
- II. En base a la pauta mencionada se evalúan las alternativas disponibles para una mejora en eficiencia energética. Se evalúan indicadores por cada medida para clasificar y priorizar soluciones a implementar.
- III. Para el estudio del caso se realizaron intervenciones en planta para reconocer las instalaciones, la tecnología y la situación de consumos de energía. En las visitas se hizo un levantamiento de información específica de consumos de energía eléctrica y térmica. Con esta información se evaluó para su presentación la estructura del consumo, prácticas y tecnologías relativas a energía y eficiencia energética en planta.
- IV. Finalmente se evalúa el escenario con el proyecto integral de eficiencia energética. Para esto se realiza una evaluación de las medidas propuestas basándose en indicadores económicos lo que permite obtener una forma de priorizar la implementación de medidas. Otro aporte significativo que se analiza es el estudio de soluciones poco convencionales como el secado de material, el manejo de material fundido y la interacción entre equipos pertenecientes a un proceso, medidas de especial importancia en la industria chilena y se ejemplifican en el caso estudio. Entre estas destaca el estudio del secado, una de las especialidades de Innovatec que considera el procesar la carga previamente y el diseño de un equipo secador, lo que es interesante ya que interactúa con otras medidas de eficiencia energética, siendo una de las soluciones más completas. Para cerrar se discute con la empresa auditada sobre las medidas factibles de implementar.

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Antecedentes y motivación..... | 1 |
| 1.2. Objetivo general | 1 |
| 1.3. Objetivos específicos..... | 1 |
| 1.4. Alcances..... | 2 |
| 2. Antecedentes..... | 3 |
| 2.1. La industria..... | 3 |
| 2.2. Estado del arte (EA) | 5 |
| 2.2.1. Metodologías de Eficiencia Energética..... | 5 |
| 2.2.2. Publicaciones relevantes 2013..... | 7 |
| 2.2.3. Publicaciones relevantes 2012..... | 8 |
| 2.2.4. Publicaciones relevantes 2011..... | 9 |
| 2.2.5. Algunas soluciones típicas de EE aplicadas a la industria | 10 |
| 2.2.6. Discusión..... | 11 |
| 3. Propuesta de una metodología para el desarrollo de estudios de Eficiencia Energética (Auditorías y estudio de preinversión) | 12 |
| 3.1. Introducción..... | 12 |
| 3.2. Visión global de la planta..... | 15 |
| 3.3. EE en equipos térmicos..... | 16 |
| 3.3.1. Balance térmico..... | 16 |
| 3.3.2. Energía entregada por la combustión | 18 |
| 3.3.3. Energía utilizada en la carga | 19 |
| 3.3.4. Pérdidas de calor al entorno..... | 20 |
| 3.3.5. Flujo de calor en gases de combustión | 25 |
| 3.4. MEE típicas para sistemas térmicos..... | 26 |
| 3.4.1. Recirculación de gases de escape en el mismo proceso | 27 |
| 3.4.2. Precalentamiento de especies a combustionar | 28 |
| 3.4.3. Precalentamiento/secado de carga | 29 |
| 3.4.4. Mejora en la aislación/control de pérdidas | 30 |
| 3.4.5. Otras MEE para mejorar el proceso | 34 |
| 3.4.6. Buenas prácticas:..... | 37 |
| 3.5. Evaluación de sistemas eléctricos..... | 39 |

| | | |
|----------|--|----|
| 3.6. | Impacto del proyecto integral de EE | 42 |
| 3.7. | Evaluación económica y priorización de MEE | 42 |
| 3.7.1. | Evaluación económica de MEE | 42 |
| 3.7.2. | Evaluación global del proyecto de inversión de EE | 44 |
| 3.7.3. | Priorización de MEE | 44 |
| 4. | Resultados: Estudio de caso de la Planta A. | 46 |
| 4.1. | Actividad Principal y Líneas de Negocio..... | 46 |
| 4.2. | Descripción General del Proceso Productivo | 46 |
| 4.2.1. | Descripción del Proceso Productivo | 47 |
| 4.2.1.1. | Recepción y almacenamiento de residuos de plomo | 48 |
| 4.2.1.2. | Planta de baterías | 48 |
| 4.2.1.3. | Lavado de ánodos usados | 49 |
| 4.2.1.4. | Horno rotatorio | 50 |
| 4.2.1.5. | Fundición en ollas | 51 |
| 4.2.1.6. | Moldeo de ánodos solubles..... | 52 |
| 4.2.1.7. | Electrorefinación..... | 52 |
| 4.2.1.8. | Refinación térmica..... | 53 |
| 4.2.1.9. | Taller de recuperación de barras..... | 54 |
| 4.2.2. | Niveles de Producción..... | 55 |
| 4.3. | Antecedentes Energéticos..... | 55 |
| 4.4. | Evaluación de equipos térmicos..... | 57 |
| 4.4.1. | Horno Rotatorio | 57 |
| 4.4.1.1. | Evaluación energética del conjunto de MEE propuestas al HR..... | 63 |
| 4.4.2. | Ollas de Refino (OR) | 65 |
| 4.5. | Evaluación de equipos eléctricos | 70 |
| 4.5.1. | Análisis de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) en sistemas eléctricos asociados al HR..... | 71 |
| 4.5.2. | Análisis de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) en sistemas eléctricos asociados a OR | 73 |
| 4.6. | Balance General de Medidas de EE en Planta A. | 74 |
| 4.7. | Evaluación de MEE del área térmica..... | 76 |
| 4.8. | Evaluación económica de MEE del área Eléctrica | 80 |
| 4.9. | Evaluación económica del proyecto de Inversión de EE | 80 |

| | |
|---|----|
| 4.10. Financiamiento | 82 |
| 4.11. Recomendaciones de Buenas Prácticas para EE e Implementación de MEE | 82 |
| 4.12. Implementación de las MEE definidas y evaluadas en esta auditoría | 83 |
| 4.13. Plan de seguimiento | 84 |
| 5. Conclusiones | 85 |
| 6. Bibliografía..... | 88 |

1. Introducción

1.1. Antecedentes y motivación

El presente proyecto de título presenta una metodología para desarrollar estudios de preinversión en el ámbito de la Eficiencia Energética (EE).

Para una empresa, la EE, una herramienta de gestión energética en la industria, es una forma de reducir los costos, limpiar su imagen corporativa y cumplir con la normativa vigente. Como consecuencia, la ciudadanía mejora su calidad de vida al existir una reducción en contaminantes. De esta forma al pensar en EE se contribuye a una sociedad mejor.

Se presenta una metodología para desarrollar estudios de preinversión para el desarrollo de la eficiencia energética en una planta industrial típica. Además, para una planta real, se desarrolla el estudio de un caso que por confidencialidad se denomina Planta A. La empresa solicitó una auditoría en EE, en un esfuerzo por mejorar la eficiencia del proceso y así agregarle valor a su producción.

La auditoría se realizó en base a visitas a planta, mediciones, información de los procesos, etc. La auditoría concluyó y fue entregada a la empresa exitosamente.

La motivación de este trabajo, además de cumplir con el compromiso con la empresa, es impulsar la eficiencia energética más allá de la planta auditada. La metodología que se desarrolla busca ser un ejemplo que promueva el nacimiento de muchos y mejores proyectos de eficiencia energética en la industria, en favor de un país sustentable. El interés por desarrollar una metodología de eficiencia energética proviene de la idea de que es algo útil para futuras auditorías a realizar por el autor o por terceros. Útil en el sentido de que provee herramientas para la evaluación y una línea de pensamiento desarrollada durante la auditoría a la Planta A.

1.2. Objetivo general

Diseñar y aplicar una metodología para caracterizar el desempeño energético de una unidad productiva típica, su relación con la producción y con costos directos.

1.3. Objetivos específicos

- i. Desarrollar una pauta para diagnosticar energéticamente a empresas productivas,
- ii. Plantear una batería de medidas factibles de incorporar en empresas para mejorar su EE
- iii. Para el caso específico diseñar un plan de implementación de medidas y acciones de EE que considere costos de priorización, beneficios y plazos.

- iv. Evaluar alternativas de inversión orientadas a optimizar el uso energético en la empresa y definir un proyecto de inversión específico que considere los requisitos de la banca local.

1.4. Alcances

- La metodología para el estudio de EE de una empresa se enfoca en la industria nacional, se consideran las normativas y condiciones nacionales.
- El estudio realizado en este documento se enfoca principalmente en la eficiencia térmica y eléctrica.
- El enfoque del estudio no profundiza en cambio del tipo de energía del proceso, como fuentes renovables.
- Los alcances de este informe abarcan los reportes de operación de un horno rotatorio con datos relevantes, y los de ollas de refino del proceso de los que se obtuvieron datos.

2. Antecedentes

2.1. La industria

El enfoque de este proyecto toma como motivación y punto de partida a la industria chilena, la cual es un importante aporte al producto interno bruto del país, en torno al 11,9% como se muestra en la Figura 2.1. [1]

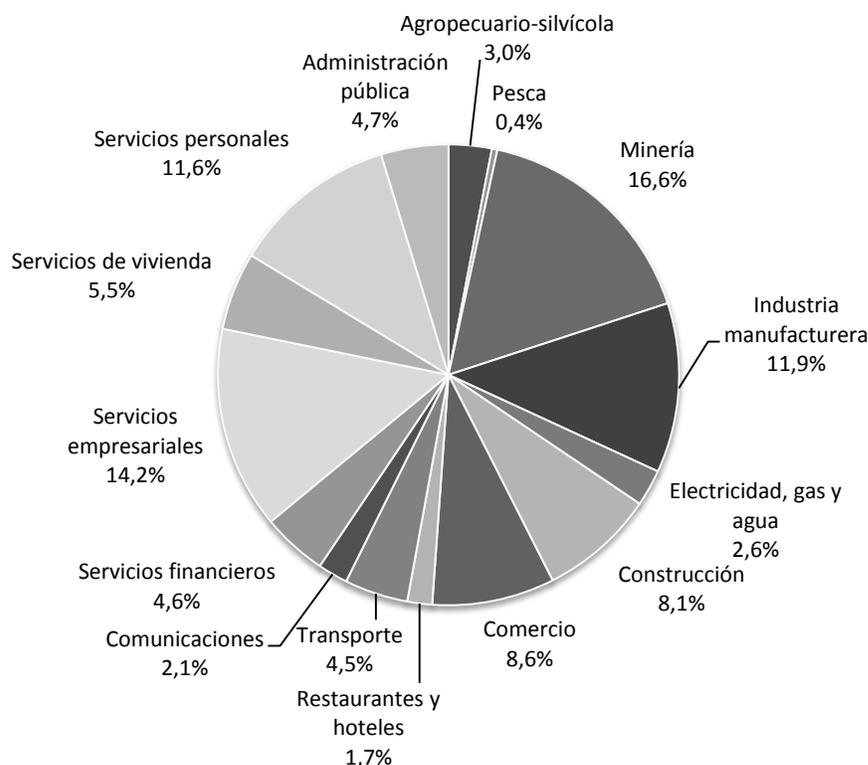


Figura 2.1 Porcentaje de participación de la industria en el PIB anual 2011 por clase de actividad económica (Elaboración propia con datos del Banco Central de Chile).

Desglosando según actividades a la industria minera y de manufactura como se observa en la Figura 2.2, ésta es principalmente extracción de recursos naturales, lo que se define como el sector primario de la industria. Por otro lado, la industria manufacturera nacional o del sector secundario es una industria de baja complejidad, por ejemplo la producción de alimentos, madera, celulosa, etc.

La industria manufacturera chilena no se ha desarrollado para fabricar productos de alta complejidad tecnológica. Manufactura más compleja, como la fabricación de equipos, aportan menos de un 2% al PIB nacional.

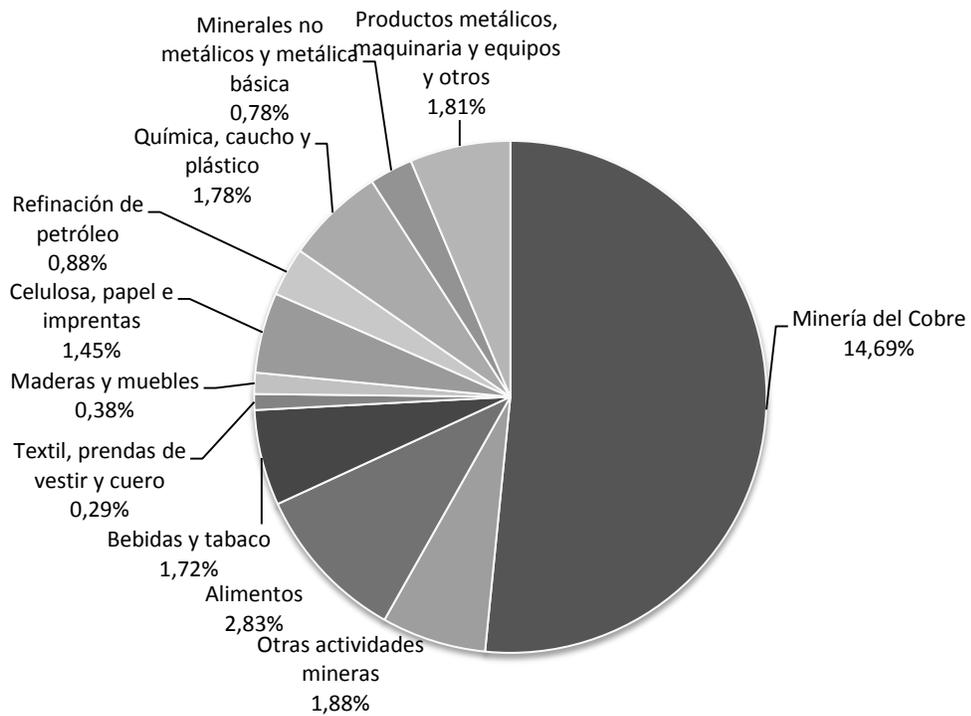


Figura 2.2 Porcentaje de participación de la industria en el PIB anual 2011 por clase de actividad económica de la industria relevante para esta memoria (Elaboración propia con datos del Banco Central de Chile).

Luego de observar la contribución en el PIB de los sectores de la economía, en la Figura 2.3 se comparan los sectores de la economía según el consumo energético nacional.

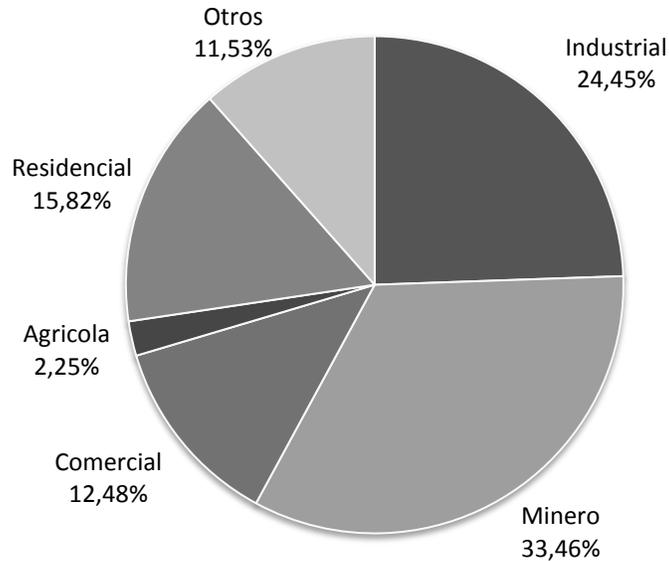


Figura 2.3 Consumo de energía por sector de la economía en Chile año 2011 (Elaboración propia con datos del INE).

La Figura 2.2, muestra a la minería del cobre aportando el 14,69% del PIB, pero la participación en la matriz energética corresponde a un tercio del consumo nacional. Para el resto de la industria, con una contribución del 11,9% en el PIB, se tiene un consumo de casi un cuarto de la matriz energética. Estas actividades económicas concentran la mayor parte del consumo energético nacional, por esto son interesantes de estudiar energéticamente.

La eficiencia energética en la industria es una inversión que impulsa la reducción de consumo de energía mediante buenas prácticas y tecnología, bajando los costos fijos de producción a mediano y corto plazo.

El caso a estudiar es de una industria manufacturera de baja complejidad: La Planta A, una empresa de reciclaje de metales no ferrosos. La industria nacional de productos metálicos, como la del caso estudio, aporta con el 1,81% del PIB.

2.2. Estado del arte (EA)

2.2.1. Metodologías de Eficiencia Energética

En sus inicios la EE en la industria era una herramienta considerada únicamente para reducir costos. El aumento en los precios del petróleo fue una de las causas más importantes para el desarrollo de la EE. El año 1997 la EE comienza a tomar real importancia, luego que las Naciones Unidas presentaran el protocolo de Kioto sobre el cambio climático. Numerosos países están impulsando localmente la EE en la industria con la creación de instituciones y departamentos cuya función general es reducir el consumo energético en la industria, sin reducir la producción. Las instituciones de

eficiencia energética en el mundo están desarrollando y financiando estudios, publicaciones y nuevas tecnologías. En la Tabla 2.1 se lista una selección de publicaciones de instituciones extranjeras sobre metodologías de eficiencia energética que entregan herramientas útiles en el contexto nacional y un enfoque relacionado a la industria Chilena.

Tabla 2.1: Publicaciones de eficiencia energética de instituciones extranjeras pertinentes.

| Institución | Publicación |
|--|---|
| Agencia Andaluza de la Energía Consejería de Economía, Innovación y Ciencia, España | Metodología para la elaboración de auditorías energéticas en la industria, 2011 |
| Asesoría y Gestión Técnica S.L. para el Centro de Difusión de la Innovación del Ayuntamiento de Las Rozas, España | Informe de vigilancia tecnológica sobre eficiencia energética en la PYME Auditoría/Diagnóstico energético, 2008 |
| The Energy Conservation Center, Japón | Japan Energy Conservation Handbook, 2008 |
| Asian Productivity Organization (APO) | Working Manual on Energy Auditing in Industries, 2008 |
| Environmental Energy Technologies Division, patrocinada por la Agencia de Protección Ambiental (EPA), EEUU | Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the U.S. Iron and Steel Industry An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers, 2010 |
| Office of Air Quality Planning and Standards, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), EEUU | Available and emerging technologies for reducing greenhouse gas emissions from the iron and steel industry, 2012 |
| Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), EEUU | Energy Conservation Techniques for the Iron Foundry Cupola, 1976 |
| U.S. Department of Energy. Industrial Technologies Program | Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry, 2008 |

Estas publicaciones entregan distintas metodologías para enfrentar problemas de eficiencia energética en la industria. Las metodologías son similares en el núcleo, pero

difieren en algunas normativas específicas de la región y de la época en que fueron publicadas.

En el ámbito nacional la dependencia energética del exterior y las normativas ambientales han creado un escenario en que el desarrollo de la eficiencia energética es indispensable. Siguiendo esta línea de pensamiento, al igual que en el resto del mundo, el gobierno y privados han impulsado la creación de instituciones enfocadas en impulsar la EE en Chile como la Agencia Chilena de Eficiencia Energética (AChEE), una fundación comprometida con promover el uso inteligente de la energía. La AChEE tiene como uno de sus objetivos consolidar el uso eficiente de la energía como una oportunidad de desarrollo sustentable para el país. Para llevar a cabo este objetivo la AChEE financia estudios de eficiencia energética, acredita a consultores, distribuye publicaciones además de otras actividades. Algunas publicaciones relevantes difundidas por la AChEE que se emplean para el desarrollo de esta memoria son:

- Manual de eficiencia energética en la industria de alimentos elaborados - AChEE y Chilealimentos A.G., 2012
- Estudio de Caso: Proyecto Piloto de Reemplazo de Motores Eléctricos en la Minería de Cobre en Chile – Ingeborg Mahla y Percy and Percy Consultores, 2009
- Manual de Gestión de Energía en la Industria Metal Mecánica - Comisión Nacional de Energía, a través del Programa País Eficiencia Energética y la Asociación Chilena de Industrias Metalúrgicas y Metalmecánicas, Asimet. 2007
- Guía de Implementación de Sistema de Gestión de la Energía basada en la ISO 50001 – AchEE y PwC Chile. 2012

Las publicaciones seleccionadas tienen una gran relación con este proyecto de título, en que se considera la industria metal mecánica, la minería y la industria de los alimentos. Este tipo de industria es representativa de Chile, es decir de baja complejidad, con procesos en base a energía térmica y motores eléctricos.

Por otro lado se revisaron artículos publicados en revistas internacionales, sobre estudios de casos en la industria que muestran los avances y mejoras que han tenido buenos resultados. Además entregan ejemplos de metodologías de estudio a equipos y plantas industriales. Las publicaciones estudiadas se resumen a continuación:

2.2.2.Publicaciones relevantes 2013

Las publicaciones seleccionadas del año 2013 tratan sobre MEE tales como recirculación de gases de escape. La recirculación es una tendencia que retomó importancia últimamente en hornos y calderas como una MEE de bajo costo y retornos a mediano plazo. La medida se describe detalladamente en los capítulos posteriores, en base a las publicaciones estudiadas. En éstas se mencionan metodologías de cálculo para caracterizar estos sistemas y sus potenciales de ahorro.

En este proyecto de título se evalúa la instalación de un sistema de recirculación en hornos y se propone además mezclar con el flujo de oxígeno, de los equipos estudiados, para obtener mejores resultados; descritos en la sección del estudio de caso.

Los documentos que resumen lo estudiado sobre recirculación son:

- *G. Liuzzo, N. Verdone, M. Bravi. 2007. The benefits of flue gas recirculation in waste incineration. Waste Management (27):106-116*

Este documento, publicado el 2007 describe de forma detallada el principio de la recirculación y entrega una base para el estudio de la tecnología.

- *Y. Byeonghun, K. Sung-Mi, L. Chang-Eon, L. Seungro. 2013. Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system. Energy 49:375–383*

Se estudia la recirculación en una caldera que opera con llama de pre mezcla. Cabe destacar el estudio de sistemas de menor envergadura, lo que permite estudiar la escalabilidad de esta medida.

2.2.3.Publicaciones relevantes 2012

Las publicaciones seleccionadas del año 2012 tienen relación con la industria del acero y con el aprovechamiento de recuperación de calor de baja entalpía. En general la tendencia es aprovechar el calor de los productos que se obtienen del horno como la escoria. Se proponen técnicas novedosas como la utilización de gas inerte en vez de agua, previa granulación. En este proyecto de título, en el caso estudio, se evalúa el aprovechamiento del calor manteniendo el producto aislado hasta la siguiente etapa.

- *Y. Ammar, S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, A. P. Roskilly. 2012. Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK. Applied Energy 8(1):3-20*

Este documento entrega una visión global de la recuperación de calor, además de algunas definiciones y criterios de selección. De esta forma establece una base para el estudio de recuperación de calor de distintas fuentes.

- *N. Ansari, A. Seifi. 2012. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. Energy 43(1):334-343*

El subsidio a la energía en Irán retrasó su desarrollo en eficiencia energética, lo que luego del aumento de los precios de energía obliga a desarrollar soluciones innovadoras. En este documento se destaca por la evaluación de un horno de fusión por arco eléctrico.

- *M. Guangyu, C.Jiuju, Z.Lihong, S. Wenqiang. 2012. Influence of Steam Recovery and Consumption on Energy Consumption per Ton of Steel. Energy Procedia 48:566-571*

Se evalúa la eficiencia del proceso mediante la recuperación de calor para generación de vapor. El documento aporta con su visión de los “indicadores energéticos”, importante herramienta para la evaluación energética.

El aprovechamiento de calor de baja entalpía es un tema muy importante en la cogeneración con ciclos orgánicos [2].

2.2.4.Publicaciones relevantes 2011

Las publicaciones seleccionadas del año 2011 tienen relación con la industria del cemento. La recuperación en estos procesos es indispensable ya que los gases de escape pueden llegar a muy altas temperaturas. También se puede recuperar calor mediante una camisa de agua en torno al horno. Los documentos clave que tratan estos temas son:

- *M. Johansson and M. Söderström. 2011. Options for the Swedish steel industry – Energy efficiency measures and fuel conversion. Energy (36)1:191-198*

Este documento propone mejoras a la eficiencia energética en la industria del acero sueca. Propuestas interesantes y que se relacionan con la industria nacional son la generación de electricidad (cogeneración), cambio del tipo de combustible y simbiosis industrial (alianza entre empresas para aprovechar mejor la energía).

- *P. Saneipoor G.F. Natere. 2011. Heat recovery from a cement plant with a Marnoch Heat Engine. Applied Thermal Engineering (31)10:1734-1743*

Esta publicación evalúa el desempeño de un nuevo motor de calor “Marnoch” en la recuperación de calor en una planta de cemento. Se evalúan dos configuraciones para estos motores y se evalúan los ahorros en electricidad. Este tipo de equipos permite ahorrar energía, reducir emisiones de CO₂ y bajar la temperatura de los gases de escape.

- *T. Wang, Y. Zhang, Z. Peng, G. Shu. 2011. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews (15)6:2862-2871*

Se estudia a profundidad la recuperación de gases de escape en motores de combustión interna. Se revisan los sistemas de recuperación y nuevas tecnologías. Según los autores el método más común para recuperar calor de gases de escape es mediante un ciclo Rankine, para el cual se proponen

distintas formas de mejorar el proceso. Además entrega una visión interesante para la selección de fluidos de trabajo, lo que es muy relevante para cogeneración.

La Agencia de Protección Ambiental de EE.UU. presentó un documento [3] en que se proponen mejoras a hornos de fundición de acero como recuperación de calor, enriquecimiento de la mezcla combustible con oxígeno, llama dividida y control de emisiones.

La forma de evaluación en estos documentos sirve de guía para la confección de la metodología y también se extraen ideas de mejoras en EE de procesos.

2.2.5. Algunas soluciones típicas de EE aplicadas a la industria

Dentro del marco de la eficiencia energética, a continuación se resumen algunas soluciones que han sido aplicadas efectivamente en plantas industriales:

- Recuperación de calor o utilización en otros procesos: Una medida adoptada frecuentemente, es la utilización del calor contenido en los gases de combustión:
 - Precalentando el aire de combustión
 - Precalentando el producto que ingresa al horno
 - Utilizar el calor en otro proceso
 - Cogeneración (Producción de calor y electricidad simultáneamente)

Ejemplos de medidas de este tipo aplicables a la industria son la recuperación de calor para precalentamiento de carga y generación de vapor en un horno rotatorio para la producción de cemento. Se estudia el caso para recuperación de 1 MW, equivalente al 4% de la energía introducida al sistema mediante cogeneración y precalentamiento de carga [4].

- Aislación: La aislación es un tema muy relevante en el diseño de un equipo, pero puede ocurrir que la aislación de diseño resulte insuficiente en operación. Para esto se puede aumentar el espesor del aislante o realizar una nueva evaluación para un aislante distinto, evaluando de la manera correspondiente. Se estudia el caso de un horno rotatorio en que se propone un sistema de aislación que permitiría ahorrar por lo menos 3 MW, equivalente a 11,7% de la energía introducida al sistema [4].
- Motores eléctricos de alta eficiencia: Con el avance de la tecnología y el uso, los nuevos motores eléctricos son fabricados con mejores eficiencias. Al reemplazar un motor antiguo por uno de alta eficiencia, se pueden obtener periodos de retorno de inversión menores al año. Se aplicó esta MEE con éxito en Planta los Pelambres y los Colorados de Minera Escondida, Planta el Soldado de Anglo American y en Fundición Hernán Videla Lira de Enamil. En estos casos, se obtuvo un máximo de mejora por equipo de un 5% de consumo eléctrico [18].

2.2.6.Discusión

En la revisión del EA el documento recoge elementos de las publicaciones pertinentes mencionadas anteriormente, y otras más que se citan en la bibliografía. Esta recopilación permite entregar herramientas de EE actualizadas a la fecha. Se observan MEE innovadoras desarrolladas actualmente y también se estudia la evolución de MEE conocidas que se han utilizado en la industria.

Hablando de estudios de eficiencia energética en la industria se han recogido visiones de EE de distintos países, pero siempre que sean relevantes a la industria nacional. De igual forma se seleccionan herramientas de EE aplicadas en el extranjero y se aplican a la realidad nacional.

Por otro lado se toman ideas innovadoras del estudio del caso desarrolladas en Innovatec y se evalúan nuevas herramientas de EE en la industria, aportando a la bibliografía con conceptos no estudiados previamente, como la evaluación energética del secado de pasta de Pb. Gracias a esto se pueden comparar las MEE recopiladas de la bibliografía y del estudio del caso.

3. Propuesta de una metodología para el desarrollo de estudios de Eficiencia Energética (Auditorías y estudio de preinversión)

3.1. Introducción

El estudio de Eficiencia Energética propuesto sigue una línea desarrollada en la Figura 3.1.

Para iniciar una auditoría de eficiencia energética en una planta industrial, se debe conocer el estado actual de la planta, la producción, sus consumos, equipos clave, etc.

En Innovatec la visión con respecto a EE en el estudio de equipos o procesos se divide en tres enfoques. Estos enfoques (Reparación, Optimización, Mejora) permiten enfrentar la EE en equipos según la eficiencia que presenten al momento de la auditoría como se describe a continuación:

- I. Reparación: La revisión a equipos y procesos indica que las pérdidas corresponden a más de un 20% de la energía introducida al sistema. Esto puede tener relación con
 - Tecnologías obsoletas
 - Equipos dañados
 - Diseño del proceso inadecuado (dimensionado, características de equipos, etc.)

La intervención en estos sistemas corresponde a una operación mayor, lo que implica grandes inversiones pero también significa grandes retornos. Se esperan periodos de retorno de la inversión (PRI) de 5 años o menos. Para PRI de más de 5 años conviene evaluar otros indicadores propuestos más adelante en el trabajo de título. Las deficiencias esperadas y MEE propuestas corresponderían a:

- Equipos (bombas, motores eléctricos, etc.) de baja eficiencia, operando fuera de las especificaciones de diseño (frenados, a RPM incorrectas): Corresponde un cambio a equipos adecuados y de mejor eficiencia.
 - Grandes pérdidas de calor por el manto, detectadas por altas temperaturas de pared: Mejoras en la aislación y control de la fuente de calor (combustión, resistencia eléctrica, solar, etc.).
- II. Optimización: Las pérdidas en los sistemas están entre el 5% y el 20% de la energía entregada al sistema. Por lo general se observa:
 - Procesos con potencial de mejora
 - No utilización de gases de escape
 - Tecnología levemente desactualizada
 - Procedimiento no considera EE, por lo que existen prácticas ineficientes

Intervenir los procesos no debiese ser complejo, lo que significa costos intermedios y bajos. Los ahorros proyectados para este grupo de MEE son buenos y entregan PRI de 2 o menos años. Este grupo de medidas, de gran impacto y de baja inversión deben priorizarse para implementar lo antes posible y así comenzar a percibir los ahorros involucrados. Las MEE agrupadas según este enfoque se estudian en los siguientes capítulos. Estas típicamente son:

- Buscar parámetros de operación que optimicen el procedimiento.
- Recuperación de calor sensible en gases de escape
- Recambio a equipos de mejores eficiencias
- Buenas prácticas

III. Mejora: En este enfoque se agrupan las MEE que mejoran un par de puntos porcentuales. Estas medidas son importantes en sistemas grandes ya que en sistemas pequeños los ahorros son imperceptibles. Los beneficios detrás de estas MEE, más allá del ahorro que entreguen, proveen de mejoras adicionales a la planta. En plantas en que ya se ha implementado eficiencia energética el camino a seguir es el propuesto en este enfoque, aunque en plantas industriales de mayor eficiencia las MEE que se puedan proponer son cada vez más caras debido a la complejidad de implementarlas y a la parada de procesos. Potenciales típicos de mejora según este enfoque son:

- Mejorar la combustión
- Recambio a equipos de mejores eficiencias
- Cogeneración
- Inversión en ERNC
- Camisas de agua
- Simbiosis con otras plantas

Para obtener la visión requerida de cada equipo y proponer las soluciones pertinentes se propone un grupo de actividades que se muestra a continuación.

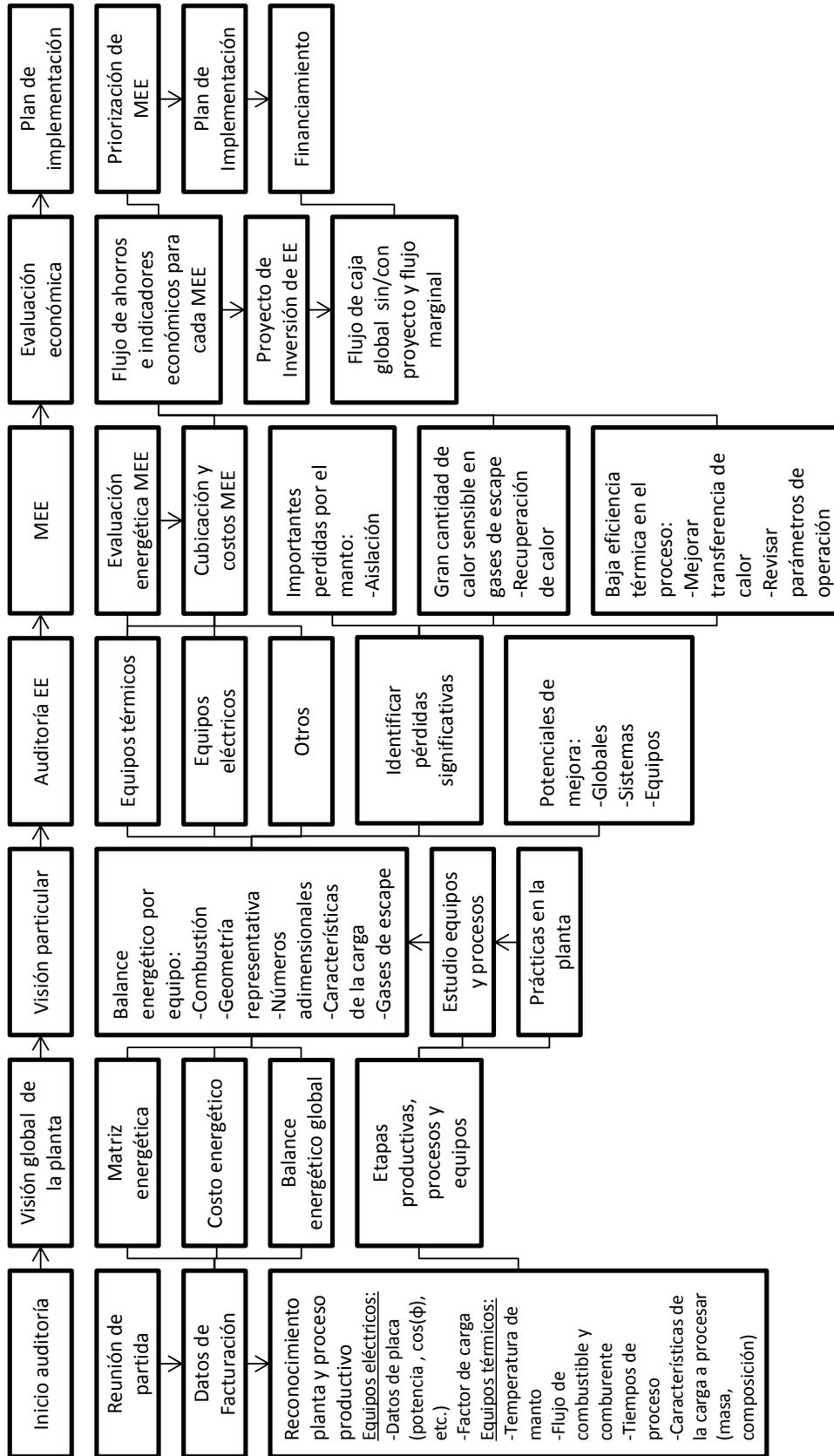


Figura 3.1: Esquema de metodología de EE.

3.2. Visión global de la planta

En esta etapa se busca familiarizarse con el proceso productivo y los principales equipos y por otro lado dialogar con la administración sobre su visión de lo que puede presentar mejoras y las expectativas de la auditoría.

Se inicia la auditoría con una reunión de partida, en que los integrantes presentan el estado actual de la planta, dan su visión sobre donde pueden haber gastos excesivos y que medidas podrían aplicarse, y comunican las expectativas que tienen de la auditoría. La idea es fijar algunos plazos para entregar avances, proponer fechas para visitas e inspecciones a la planta, etc.

Para el estudio energético global se solicitan datos de facturación de energía, como gasto en combustible y electricidad. Se consultan datos de producción mensual y anual para estudiar estacionalidad, y se listan los equipos presentes en planta.

Se dejan de lado datos de facturación de servicios, como suministro de agua o telefónico, y se consideran solo equipos relacionados con el proceso, omitiéndose los computadores e impresoras, que por lo general tienen ahorro de energía integrado.

Para las primeras visitas de reconocimiento de procesos, en base a la lista de equipos de planta se relacionan los gastos energéticos con la operación de cada equipo. Según el equipo se puede identificar inicialmente la distribución de la energía, como la transformación de energía eléctrica a mecánica, combustión, etc. Con esto se puede realizar una primera clasificación de equipos

Para el análisis de la planta, un punto de partida son los datos de facturación. Es importante tener información de facturación anual para realizar proyecciones con esta escala de tiempo. La facturación a considerar corresponde a cuentas de consumo eléctrico, combustibles como petróleo, gas, u otros y otros costos asociados a la combustión como comburentes (oxígeno)

Para la facturación a estudiar, se lleva el gasto a una unidad energética común, por lo general kilowatt hora (kWh). Con la información de facturación eléctrica y utilizando el poder calorífico de los combustibles para obtener el gasto energético, se obtiene la distribución de la matriz energética (ME) de la planta. ME es una herramienta que describe la distribución de los tipos de energía en la empresa, y permite captar de forma global el consumo de energía

La distribución de la ME de la planta indica que tipo de energía es en la que más gasta una empresa, lo que entrega una idea general del área de la planta con mayor potencial de mejora. Por otro lado, los datos de facturación permiten obtener el costo por unidad de energía de la planta, para valorizar los ahorros al implementar las medidas de eficiencia energética (MEE).

Para obtener el costo unitario de energía para la evaluación conviene considerar el costo final de la energía, por lo que hay que considerar arriendo de medidores, cargos

fijos, gasto en comburente y otros factores como los requerimientos de potencia eléctrica. Algunos costos de energía típicos se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Costos típicos de energía en Chile (Oct. 2013). Fuente: Chilectra, ENAP, e Indura

| Fuente de energía | Valor [\$/kWh] |
|---|----------------|
| Energía eléctrica industrias | 50-60 |
| Diesel Grado B | 40-50 |
| Diesel Grado B + O ₂ (OxyFuel) | 70-75 |
| Gas Licuado (Propano-Butano) | 90-95 |

3.3. EE en equipos térmicos

Como sistema térmico se entiende un equipo que utiliza el calor de la combustión para realizar un proceso, entendiéndose como parte de la fabricación de un producto y no como energía mecánica. Se dejan de lado en este análisis los motores y turbinas, pero se pueden abordar de forma similar.

De los equipos observados que utilizan la energía térmica para proceso mediante combustión lo primero a evaluar es el consumo de combustible. Dependiendo de la instrumentación instalada, se puede determinar el flujo instantáneo mediante flujómetros, pero por lo general solo se dispone de medidores simples con los que se puede hacer una estimación inicial, considerando las especificaciones del equipo. Es recomendable para evaluar equipos en paralelo con un solo medidor de consumo de combustible, medir el flujo de un equipo con los demás apagados. Si la operación del equipo no es continua, se puede medir el consumo de combustible por ciclo de operación.

Con respecto a la combustión se deben considerar los flujos de comburente, los que aportan oxígeno a la reacción. Se busca comparar el flujo real de comburente con el flujo teórico requerido por el combustible para reaccionar completamente. El flujo real de comburente se puede medir a la entrada del equipo. El flujo teórico requerido por la combustión se determina según el flujo másico de combustible en base a la reacción estequiométrica del combustible y el oxígeno.

3.3.1. Balance térmico

El balance térmico consiste en la identificación y cálculo de todos los flujos de energía térmica de un equipo durante la operación. Para esto se eligen los parámetros de operación para los que se desea modelar el sistema y se realiza el balance térmico considerando el equipo en estado estacionario.

La importancia del balance térmico como herramienta de análisis de EE reside en que se determinan inicialmente donde existen pérdidas importantes de energía y permite obtener la magnitud de la energía a la que se le da un uso real en el equipo.

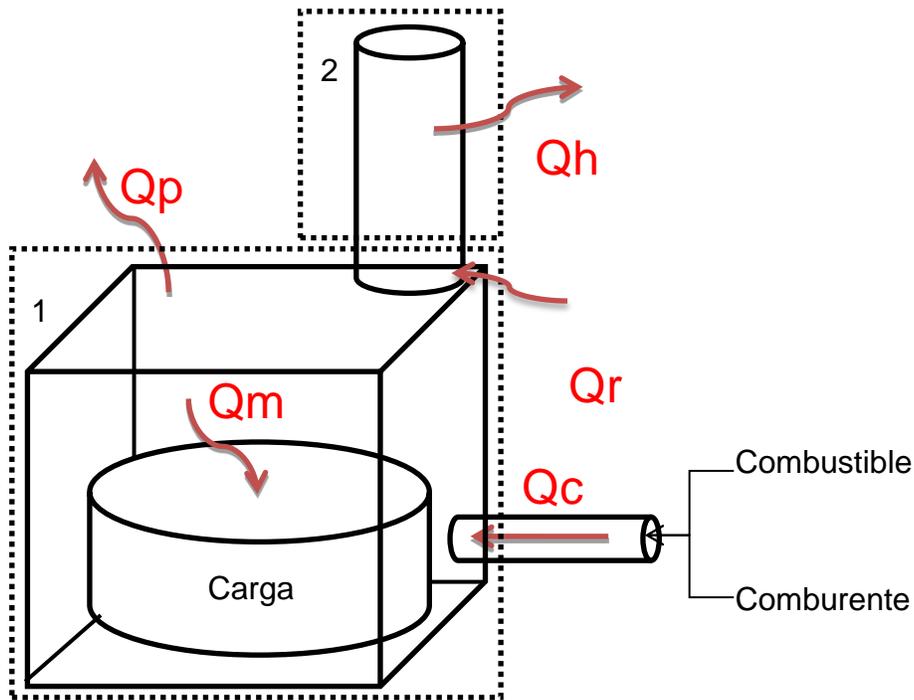


Figura 3.2 Modelo de análisis para balance térmico de hornos.

En la

Figura 3.2 se observa un modelo de un horno típico. En este se identifica la carga a calentar, el quemador, la estructura y el escape de gases. Se separa en volúmenes de control 1 y 2 donde en el primero se consideran los aportes y demandas del quemador, la carga y las pérdidas por las paredes del equipo en estado estacionario (es decir a una temperatura de horno constante). El segundo volumen de control considera el flujo de calor en los gases de escape en base a las temperaturas de los gases y la temperatura mínima de un recuperador de calor teórico. Del volumen de control 1 de la

Figura 3.2, se definen los siguientes flujos de calor, comunes a casi todos los equipos térmicos:

- Q_c : Calor entregado por el combustible
- Q_m : Calor utilizado por la masa de la carga
- Q_p : Calor en pérdidas convectivas y radiativas del equipo al entorno.
- Q_r : Calor requerido por la estructura del equipo (aislante, carcasa, etc.) para alcanzar la temperatura de operación.

Se considera el calor utilizable de los gases de combustión Q_h dentro del volumen de control 2, y se identifica a continuación:

- Q_h : Calor recuperable en los gases de escape

El balance implica:

$$Q_c = Q_m + Q_p \quad (3.1)$$

De forma análoga, se puede hacer un análisis instantáneo de flujos térmicos, en que las magnitudes son en kW y se definen de forma similar:

- \dot{Q}_c : Potencia entregada por el combustible.
- \dot{Q}_m : Calor utilizado por el flujo másico de carga.
- \dot{Q}_p : Calor en pérdidas convectivas y radiativas del horno al entorno.

Para el volumen de control 2, la potencia teórica que se puede recuperar en los gases de escape se identifica como:

- \dot{Q}_h : Potencia aprovechable en los gases de escape.

El balance debe cumplir:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_m + \dot{Q}_p \quad (3.2)$$

Para todos los cálculos, conviene considerar presiones y temperaturas adecuadas al entorno, como se describe a continuación.

3.3.2. Energía entregada por la combustión

Q_c : El calor entregado por el combustible se estima con el poder calorífico como se indica a continuación:

$$Q_c = m_{fuel} * PCI_D \quad (3.3)$$

De forma análoga, la potencia se calcula como:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_{fuel} * PCI_D \quad (3.4)$$

En que:

m_{fuel} : Masa de combustible utilizada en el procedimiento en kg

\dot{m}_{fuel} : Flujo másico de combustible utilizado en el procedimiento en kg/s

PCI_D : Poder calorífico del combustible en kJ/kg o en kWh/kg

Para un tiempo de operación Δt se puede aproximar:

$$\frac{m_{fuel}}{\Delta t} \approx \dot{m}_{fuel} \quad (3.5)$$

3.3.3. Energía utilizada en la carga

La energía utilizada se refiere al calor que efectivamente va al proceso. En un equipo que entrega energía térmica mediante combustión, parte de la energía de combustión es utilizada en el proceso de calentar la carga para obtener uno o varios subproductos. El resto de la energía son pérdidas. El proceso de calentamiento de carga se refiere por ejemplo a fundición de metal, incineración de desechos, preparación de vidrio, cocción de cerámicos, alimentos, secado de productos, etc.

Q_m : El calor requerido por la carga se estima considerando las características termofísicas de los componentes de la carga. Dependiendo del proceso, se requiere calentar, fundir, secar o evaporar material. Para material a fundir, una expresión genérica es:

$$Q_m = \sum_{componentes} m_i * (Cp_{s_i} * (T_{fusión i} - T_0) + H_i + Cpl_i * (T_{proc} - T_{fusión i})) \quad (3.6)$$

En que

m_i : Es la masa del componente i en la carga en kg. Para carga continua, se considera \dot{m}_i , en kg/s

Cp_{s_i} : Es el calor específico del componente i en estado sólido en kJ/kg K

Cls_i : Es el calor específico del componente i en estado líquido en kJ/kg K

$T_{fusión i}$: Temperatura de fusión del componente i en °C

T_0 : Temperatura a la que se encuentra la carga antes de comenzar el proceso en °C

T_{proc} : Temperatura máxima de proceso en °C

H_i : Calor de fusión del componente i en kJ/kg

Para el estudio de las características termofísicas de una carga a la que se le aplicará calor pueden darse los siguientes casos:

- Calentamiento sin cambio de fase
- Calentamiento con cambio de fase de la mezcla que compone la carga
- Calentamiento con cambio de fase de algunos componentes de la carga

Para estos casos puede ocurrir más de un cambio de fase. Para la fusión de componentes se utilizan los calores latentes y de fusión. Para los componentes que pasen de líquido a gaseoso se pueden utilizar los calores de evaporación, pero por lo general, conociendo la presión y la temperatura se pueden obtener datos más exactos con tablas de entalpía, como es el caso del agua.

Para componentes de la carga que reaccionen químicamente, es conveniente considerar la energía de reacción, y ver si es influyente en el balance. Para una primera estimación y dependiendo del sistema, puede considerarse una masa inerte.

3.3.4. Pérdidas de calor al entorno

En los equipos a evaluar parte de la energía de combustión se traspa al entorno como pérdidas de calor por convección y radiación (Q_p). Una estimación preliminar se puede realizar asimilando el equipo estudiado a una geometría simplificada, con una distribución de temperaturas de pared homogénea como se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Geometrías típicas de equipos

| Equipo | Geometría simplificada |
|--------------------|----------------------------------|
| Horno rotatorio | Cilindro horizontal rotatorio |
| Horno cilíndrico | Cilindro vertical |
| Equipos en general | Combinaciones de figuras simples |

Simplificando las paredes del equipo como las superficies de los polígonos considerados, el procedimiento para calcular las pérdidas es el siguiente:

a) Cálculo de Temperatura de película.

Suponiendo equipos con temperatura de pared homogénea, para el cálculo de Q_p se evalúan las propiedades termofísicas del entorno a la temperatura de película. Ésta es la temperatura del fluido en torno al equipo, calculada como el promedio entre la temperatura medida de la pared del horno T_{pared} , y la temperatura de los alrededores T_{∞} :

$$T_{pelicula} = \frac{T_{pared} + T_{\infty}}{2} \quad (3.7)$$

b) Cálculo de números adimensionales según la geometría del cuerpo

Por ejemplo, el número de Reynolds (Re) en un manto cilíndrico rotatorio se estima con la ecuación

$$Re = \frac{D^2 \omega}{2\nu} \quad (3.8)$$

En que:

D : Diámetro del cilindro, en m.

ω : Velocidad angular de rotación, en s^{-1}

ν : Viscosidad cinemática del aire a la temperatura de película, en m^2/s

Utilizando el número de Reynolds, para un cilindro rotatorio, el número de Nusselt (Nu_{CF}) es [5]:

$$Nu_{CF} = 0,133 * Re^{2/3} * Pr^{1/3} \quad (3.9)$$

$(Re < 4,3 \times 10^5, \quad 0,7 < Pr < 670)$

Los efectos de la convección natural, para este ejemplo, son importantes cuando:

$$Re < 4,7 * \left(\frac{Gr^3}{Pr} \right)^{0,137} \quad (3.10)$$

En que:

Gr : Número adimensional de Grasshof

Pr : Número adimensional de Prandtl

En este caso, se debe considerar:

$$Nu_{CN} = \left(0,6 + \frac{0,387 * Ra^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0,559}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2 \quad (3.11)$$

El cual es laminar alrededor de todo el cilindro [6] ya que el número de Grashof es mucho menor que el valor asociado a flujo turbulento [7].

Finalmente, el número de Nusselt promedio es:

$$\overline{Nu} = Nu_{CN} + Nu_{CF} \quad (3.12)$$

En el horno rotatorio, para las tapas modeladas como discos circulares, se tiene que el Reynolds se obtiene con:

$$Re = \frac{\omega * r^2}{\nu} \quad (3.13)$$

En la región laminar, en que el número de Reynolds es menor que $2,4 \times 10^5$, el número de Nusselt es:

$$Nu = \frac{0,585 * \sqrt{Re}}{\frac{0,6}{Pr} + \frac{0,95}{\sqrt[3]{Pr}}} \quad (3.14)$$

Para régimen turbulento, en que el número de Reynolds es mayor que $2,4 \times 10^5$, el número de Nusselt es:

$$Nu = 0.021 * Re^{0,8} * Pr^{1/3} \quad (3.15)$$

Este valor es válido para todo el intervalo del número de Prandtl, que se obtiene de tablas de características del aire a la temperatura de película [7].

Para las distintas geometrías se consideran distintos números adimensionales. Algunos ejemplos se muestran en la Tabla 3.3, donde se resumen los casos típicos.

Tabla 3.3: Números adimensionales de transferencia de calor por convección natural en el rango laminar para distintas geometrías [6]

| Geometría simplificada | Números adimensionales de las fracciones del manto que determinan la geometría |
|------------------------|--|
| Cilindro horizontal | <p>Manto cilíndrico</p> $\overline{Nu}_D = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 * Ra_D^{1/6}}{[1 + (0,559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ <p>Tapas planas (discos), para todo Ra_L:</p> $\overline{Nu}_L = \left\{ 0,825 + \frac{0,387 * Ra_L^{1/6}}{[1 + (0,492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$ |
| Cilindro vertical | <p>Tapa plana superior:</p> $\overline{Nu}_L = 0,54 * Ra_L^{1/4} \quad (10^4 \lesssim Ra_L \lesssim 10^7, Pr \gtrsim 0,7)$ $\overline{Nu}_L = 0,15 * Ra_L^{1/3} \quad (10^7 \lesssim Ra_L \lesssim 10^{11}, \text{para todo } Pr)$ <p>Paredes planas: De igual forma que las tapas planas (discos) del cilindro horizontal</p> |
| Paralelepípedos | <p>Pared vertical plana De igual forma que las tapas planas (discos) del cilindro horizontal</p> <p>Tapa plana superior: De igual forma que para cilindro vertical</p> |

- c) Obtención del coeficiente de transferencia de calor mediante el número adimensional de Nusselt.

Para cada fracción del manto, considerando el largo característico de la fracción y determinado \overline{Nu} , el coeficiente convectivo-radiativo se calcula usando:

$$h = \overline{Nu} * \frac{k}{L} + \sigma * \varepsilon * (T_{pared}^2 + T_{\infty}^2) * (T_{pared} + T_{\infty}) \quad (3.16)$$

En que:

k : Conductividad del aire a la temperatura de película de la pared, en W/m K

L : Longitud característica de la pared calculada usando el área dividido el perímetro de la fracción del manto.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ W/m² K⁴

ε : Emisividad de la pared del equipo, adimensional

T_{pared} : Temperatura de pared en K

T_{∞} : Temperatura del entorno en K.

- d) Evaluación del flujo de energía térmica considerando el área expuesta del equipo y la temperatura de pared.

El flujo de calor finalmente se calcula con:

$$\dot{Q}_P = \sum_{paredes} h_{pared_i} * A_{pared_i} * (T_{pared_i} - T_{\infty}) \quad (3.17)$$

En que:

A_{pared_i} : Área de la superficie del equipo correspondiente a la pared i, en m²

T_{pared_i} : Temperatura de la superficie del equipo correspondiente a la pared i, en °C

h_{pared_i} : Coeficiente convectivo-radiativo de la pared i, en W/m²K

3.3.5. Flujo de calor en gases de combustión

Q_h se calcula con el flujo másico de gases de combustión, la temperatura a la que son expulsados a la atmósfera y su calor específico. Los humos de combustión tienen una composición específica, la cual se puede obtener con el balance de productos y reactantes y se puede corroborar con datos de medidas isocinéticas de la chimenea. En la Tabla 3.4 se presenta un ejemplo de los datos requeridos para hacer este cálculo.

Tabla 3.4: Ejemplo de las características de gases de combustión

| Característica | Valor | | Unidad |
|---|-------|-------|---------|
| Temperatura gases escape | 700 | 900 | °C |
| Calor específico CO ₂ | 1,227 | 1,275 | kJ/kg K |
| Calor específico H ₂ O | 2,273 | 2,412 | kJ/kg K |
| Calor específico CO | 1,113 | 1,163 | kJ/kg K |
| Calor específico O ₂ | 1,086 | 1,112 | kJ/kg K |
| %masa CO ₂ | 68,47 | | % |
| %masa H ₂ O | 31,53 | | % |
| %masa CO | 0 | | % |
| %masa O ₂ | 0 | | % |
| Calor específico ponderado de los gases de escape | 1,557 | 1,634 | kJ/kg K |

Se puede estimar el calor recuperable de los gases de escape con:

$$Q_h = m_{gases} * \Delta T * \sum_{Componentes} x_i * Cp_i \quad (3.18)$$

En donde:

m_{gases} : Masa de gases liberados a la atmósfera en kg, corresponde a la suma de las masas de Oxígeno y Combustible utilizados.

ΔT : Diferencia de temperatura, en K, entre la temperatura de salida de los gases y la temperatura de utilización. Depende del proceso en que se utilice el calor residual.

x_i : Porcentaje en masa del componente i en los gases de escape

Cp_i : Calor específico del componente i de los gases de escape, en kJ/kg K

Por otro lado, la magnitud del flujo de calor puede estimarse de la siguiente forma:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{gases} * \Delta T * \sum_{Componentes} x_i * Cp_i \quad (3.19)$$

El flujo de gases puede estimarse del flujo de combustibles utilizando la relación entre flujo de combustible y comburente:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_{fuel} * (1 + AF) * \Delta T * \sum_{Componentes} x_i * Cp_i \quad (3.20)$$

En que para equipos con combustión Aire-Combustible, la relación Aire-Fuel (AF) es:

$$AF = \frac{m_{aire}}{m_{fuel}} \quad (3.21)$$

La relación aire combustible puede determinarse teóricamente de la ecuación estequiométrica pero la relación aire combustible real es específica de cada equipo.

3.4. MEE típicas para sistemas térmicos

Se proponen algunas medidas para mejorar la eficiencia energética, las que deben basarse en los resultados que se obtengan del balance energético y el estudio de la

planta en general. Las MEE propuestas por lo general se enfocan en reducir una o más fuentes de pérdidas de energía, por lo que es importante identificar estas pérdidas en el balance energético.

3.4.1. Recirculación de gases de escape en el mismo proceso

Por sus siglas en inglés, Exhaust Gas Recirculation (EGR) o Flue Gas Recirculation (FGR), esta medida consiste en un sistema que permite reinsertar los gases de combustión en un equipo (puede ser el mismo u otro) para aprovechar el calor, causar turbulencia y temperaturas homogéneas combustionando los productos de baja cinética y destruyendo compuestos que se forman por combustión incompleta, aprovechando la energía en los gases de escape y mejorando la combustión.

Se puede implementar en equipos, independiente de sus dimensiones, como motores Diesel, hornos de fundición y calderas. Se ha demostrado su efectividad en motores de combustión interna [8], en equipos con llama de premezcla con capacidades entre 20 y 25 kW [9] y en incineración de desechos hasta 6.100 kW [10].

Es factible en sistemas continuos y en procesos intermitentes ya que funciona en sincronía con el proceso principal. Permite una reducción en las emisiones de NO_x al permitir que aire ya utilizado, con bajo contenido de O₂, interactúe con la llama. Los porcentajes de recirculación utilizados están típicamente en rango del 10% al 20%, en que se reportaron mejoras globales del rendimiento de un 1,84% en sistemas pequeños [9] y de 2,3% en sistemas grandes [10]. Además, esta MEE puede instalarse en conjunto con otras MEE del proceso.

Para estimar el ahorro energético utilizando EGR se considera, por un lado, el factor de precalentamiento del aire/oxígeno de combustión y, por otro, el aumento en el flujo másico ingresando al horno. El calor reingresado al horno se puede calcular como:

$$\dot{Q}_{EGR} = \dot{m}_{EGR} * \overline{Cp}_{gases} * (T_{gases} - T_{EGR}) \quad (3.22)$$

En que:

\dot{Q}_{EGR} : Potencia extra obtenida gracias a EGR

\dot{m}_{EGR} : Flujo másico recirculado, entre un 10% y un 20% del flujo másico de gases de escape, se puede estimar por: $\dot{m}_{fuel} * (1 + ROP) * \%EGR$.

\overline{Cp}_{gases} : Promedio de los calores específicos de los gases de combustión a las temperaturas T_{gases} y T_{EGR} .

T_{gases} : Temperatura de gases de combustión

T_{EGR} : Temperatura de mezcla entre los gases recirculados y el flujo entrante de combustible y/o comburente. Se obtiene del balance de masa y energía al estudiar la mezcla de los flujos.

Al analizar esta medida, inicialmente se debe estudiar la factibilidad considerando requisitos de espacio y de posicionamiento adecuado del flujo recirculado. Para la implementación se deben considerar, por lo menos, los siguientes elementos:

- Ventilador/venturi que opere a las temperaturas de gases de escape
- Válvulas de control de flujo
- Ductería adecuada para el flujo de gases a recircular
- Sistema de control para regular la recirculación
- Montaje del sistema

3.4.2. Precalentamiento de especies a combustionar

Esta medida consiste en utilizar los gases de escape para calentar el combustible y/o el comburente mediante intercambiadores de calor. Se puede implementar en equipos, independiente de sus dimensiones, como motores Diesel, hornos de fundición y calderas. Se deben considerar las especificaciones del quemador ya que la medida se puede implementar de distintas formas en base a la evaluación del sistema. Las posibilidades se listan a continuación:

- Solo precalentar combustible: Algunos combustibles pesados como el Diesel Grado B no deben sobrecalentarse (sobre 160°C) ya que puede ocurrir cracking del combustible, liberando moléculas livianas de bajo PCI y dejando en el quemador alquitranes y otras moléculas pesadas que pueden tapan la boquilla [11]. Precalentar el combustible a una temperatura adecuada produce ahorros de energía que se pueden estimar como:

$$Q_{fuel} = m_{fuel} * C_{p_{fuel}} * \Delta T \quad (3.23)$$

En que:

Q_{fuel} : Ahorro energético estimado, en kWh

m_{fuel} : Masa de combustible en el periodo evaluado, en kg. Puede evaluarse por carga, para procesos intermitentes, o con el consumo anual de oxígeno.

$C_{p_{fuel}}$: Calor específico del combustible, en general en $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

ΔT : Aumento de la temperatura recomendado, en °C. $T_i = 25^\circ C$, $T_f = 160^\circ C$.

- Solo precalentar comburente: Precalentar el aire u oxígeno de combustión a una temperatura recomendada de 550°C [12] produce ahorros de energía que se pueden estimar como:

$$Q_{O_2} = m_{O_2} * Cp_{O_2} * \Delta T \quad (3.24)$$

En que:

Q_{O_2} : Ahorro energético estimado, en kWh

m_{O_2} : Masa de aire u oxígeno en kg. Puede evaluarse por carga, para procesos intermitentes, o con el consumo anual de oxígeno.

Cp_{O_2} : Calor específico del oxígeno, en general en $\frac{kJ}{kg \cdot K}$

ΔT : Aumento de la temperatura recomendado, en °C. $T_i = 25^\circ C$, $T_f = 550^\circ C$.

- Calentar ambos elementos de combustión separados: Si la mezcla de combustible y comburente se hace directamente en la llama esta es la mejor opción, entregando la suma de los ahorros mencionados previamente para el precalentamiento de los elementos de combustión separados.

Al analizar esta medida se debe estudiar la factibilidad considerando requisitos de espacio y ductos. Para la implementación se deben considerar por lo menos los siguientes elementos:

- Intercambiador Gases de escape/Combustible o Gases de escape/Comburente apropiado para el flujo de calor requerido.
- Ductería adecuada para el sistema
- Sistema de control para regular flujos y temperaturas
- Montaje del sistema

3.4.3. Precalentamiento/secado de carga

Esta medida consiste en utilizar el calor de los gases de escape para precalentar o secar la carga antes de entrar al horno o caldera, mejorando la utilización de la energía. Esta práctica implicaría una reducción de la demanda energética del equipo, reduciendo tiempos de operación o flujo másico de combustible requerido.

El precalentamiento se puede implementar en equipos con funcionamiento continuo como calderas, y en algunos tipos de hornos.

El ahorro de energía se calcula según el cambio de temperatura de la carga y según la pérdida de humedad, si es el caso, como se indica a continuación:

$$Q_{PC} = m_{carga} * C_{p_{carga}} * \Delta T + Q_{H_2O} \quad (3.25)$$

En que:

Q_{PC} : Ahorro energético estimado, en kWh

m_{carga} : Masa a calentar, en kg

$C_{p_{carga}}$: Calor específico de la carga dependiendo de los componentes de ésta, en general en $\frac{kWh}{kg \cdot K}$

ΔT : Aumento de la temperatura logrado, en °C. $T_i = 25^\circ C$, $T_f = 100 \sim 120^\circ C$.

Q_{H_2O} : Calor para eliminar la humedad (agua libre) de la carga, en kWh. Depende del grado de humedad, y de la temperatura que se pueda lograr con los gases de escape.

Al analizar esta medida, se debe diseñar el equipo de secado/precalentamiento según los requerimientos y la energía disponible, lo cual escapa de los alcances de esta memoria. Para la implementación se deben considerar por lo menos los siguientes elementos dependiendo de la carga:

- Sistemas de transporte de la materia prima al secador y luego a proceso
- Precalentador/secador
- Sistema de intercambiador térmico
- Elementos para el montaje del sistema

3.4.4. Mejora en la aislación/control de pérdidas

Esta medida consiste en disminuir el flujo de calor por convección y radiación térmica desde el proceso al entorno. En base a la evaluación de las pérdidas de calor al entorno de un equipo se puede determinar si la aislación actual es adecuada o insuficiente, lo que permitiría considerar una mejora. Por lo general los equipos que presentan pérdidas importantes son los que tienen una alta temperatura de manto (sobre 70°C).

Se plantea una medida que consiste en mejorar la aislación para disminuir las pérdidas de energía térmica al entorno, debido a las altas temperaturas del manto. Para ello se propone reemplazar o agregar aislantes con mejores características.

El ahorro energético depende del sistema (geometría del equipo, temperatura, régimen de operación, características del aislante, instalación del aislante, etc.). La evaluación se puede realizar de dos formas: Utilizando el método de resistencia térmica comparando la situación actual del equipo y la situación con nuevo aislante mediante las ecuaciones propuestas en la Tabla 3.2; o realizando una evaluación económica que comparando los costos de energía perdida en un periodo de tiempo y el costo del aislante. Normalmente se considera el tiempo de recambio o mantención del aislante.

- Pérdidas de calor al entorno: En un equipo que utiliza energía térmica se tiene que, por conservación de la energía, el calor que se pierde al entorno por el manto es equivalente al calor transferido por conducción a través de las paredes. Por esto se calcula el flujo de calor al exterior con información de mediciones reales de temperatura de pared y se evalúan las pérdidas de calor al entorno Q_p como se indica en la sección 3.3.4.
- Temperatura interior: Se mide en terreno o se estima la temperatura de proceso del equipo térmico. Es difícil conocer la distribución de temperatura al interior del equipo, en especial en equipos grandes y con operación en condiciones variables como constantes aperturas de puerta, distintos niveles de potencia, etc. Una estimación razonable es considerar la condición extrema en que la distribución de temperatura al interior del equipo es homogénea, con el mismo valor que la temperatura de llama. Éste escenario corresponde al peor caso, posiblemente la configuración en que hay mayores pérdidas.
- Conducción a través de las paredes: Un equipo que utiliza energía térmica para el proceso por lo general tiene un revestimiento interno cerámico/refractario, un chasis metálico y en algunos casos un aislante externo polimérico o de fibra mineral.

La conducción térmica en paredes planas de bajo espesor, cilindros y esferas puede estimarse utilizando el método de la resistencia térmica. Para otras geometrías el cálculo es bastante engorroso. Dada la condición de temperatura interior impuesta, la conducción es unidimensional en estado estacionario. En la Tabla 3.5 se resumen algunas fórmulas para estimar la conducción en geometrías simplificadas dadas las temperaturas de pared interna y externa.

Tabla 3.5: Conducción térmica para distintos tipos de paredes [5].

| Geometría de la pared | Conducción térmica en una pared con capas |
|-----------------------|--|
| Cilindro macizo | $\dot{Q}_{cond} = \frac{2\pi L * (T_{proc} - T_{pared})}{\sum \ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right) / k_i}$ <p>En donde:</p> <p>\dot{Q}_{cond}: Flujo de calor conducido al exterior, en W</p> <p>L: Largo del cilindro</p> <p>T_{proc}: Temperatura al interior del equipo, en °C</p> <p>T_{pared}: Temperatura de la pared exterior del equipo</p> <p>r_i: Distancia desde el centro del cilindro hasta la capa i, en m</p> <p>k_i: Conductividad térmica de la capa i de la pared, en $W/(m * °C)$</p> |
| Pared plana | $\dot{Q}_{cond} = \frac{A * (T_{proc} - T_{pared})}{\sum L_i / k_i}$ <p>En donde:</p> <p>\dot{Q}_{cond}: Flujo de calor conducido al exterior, en W</p> <p>A: Área de la pared expuesta a la carga, en m^2</p> <p>T_{proc}: Temperatura al interior del equipo, en °C</p> <p>T_{pared}: Temperatura de la pared exterior del equipo</p> <p>L_i: Espesor de la capa i de la pared, en m</p> <p>k_i: Conductividad térmica de la capa i de la pared, en $W/(m * °C)$</p> |

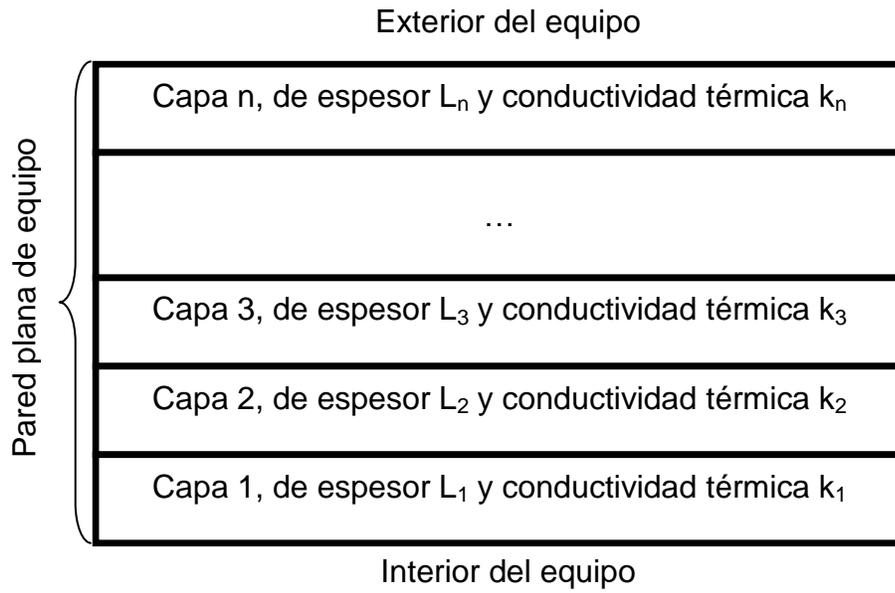


Figura 3.3: Diagrama de una pared plana de un equipo conformada por capas de aislante y de estructura.

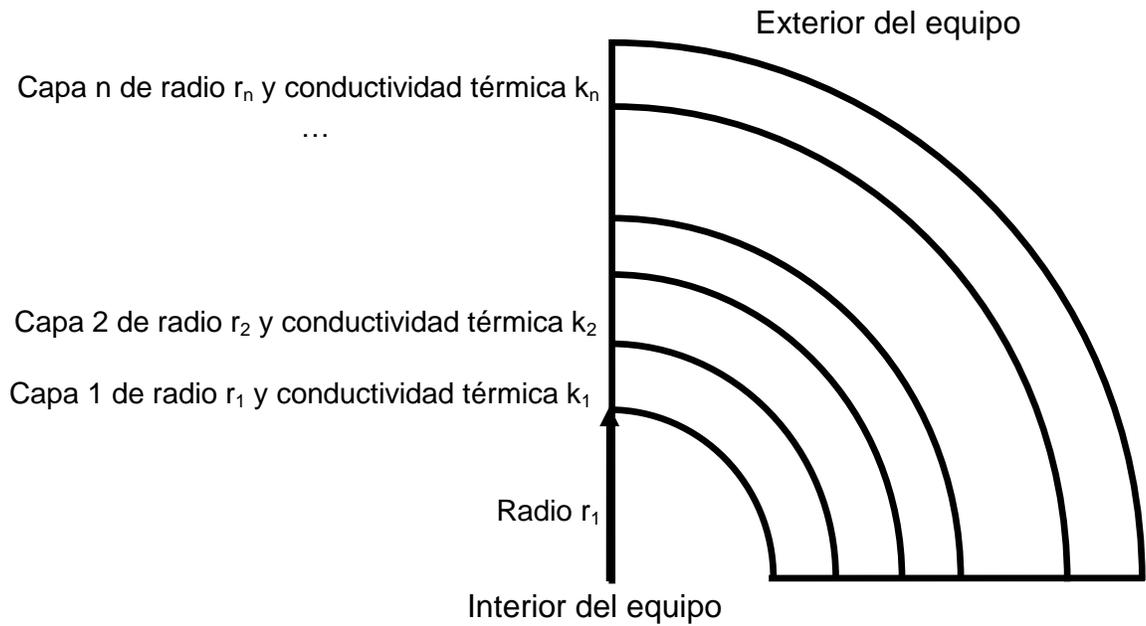


Figura 3.4: Diagrama de una sección de una pared cilíndrica de un equipo conformada por capas de aislante y de estructura.

Otras pérdidas de energía importantes ocurren por las aperturas del equipo. Para disminuir estas pérdidas se debe minimizar el tiempo que permanece expuesta la carga en operación, implementando sistemas de tapas eficientes y relativamente herméticas. Las pérdidas por aperturas se pueden estimar con [5]:

$$Q_{AET} = AET * \sigma * (T_{proc}^4 - T_{\infty}^4) * \Delta t + h_{int} * AET * (T_{proc} - T_{\infty}) \quad (3.26)$$

En que:

Q_{AET} : Calor perdido por aperturas en kWh

AET : Área de exposición de la carga al entorno, en m²

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, 5,67x10-8 W/m²K⁴

T_{proc} : Temperatura de proceso en K

T_{∞} : Temperatura del entorno en K

Δt : Tiempo de operación, en horas.

h_{int} : Coeficiente conductivo (convección natural) en la superficie de la carga

3.4.5. Otras MEE para mejorar el proceso

Este grupo de MEE consiste en mejoras específicas de cada proceso. Se estudia el proceso en función de sus parámetros de operación (temperatura, flujos másicos, tiempo de operación, etc.) hasta encontrar una configuración que optimice el uso de la energía sin afectar la productividad. A continuación se propone una metodología para encontrar estos valores:

- I. Definir indicadores relevantes del proceso: Dependiendo del sistema, se pueden identificar variables que indican si el procedimiento cumple con su función, si es eficiente, y otras variables relacionadas con EE y producción. Indicadores relevantes pueden ser la cantidad de producto realizado en cierto tiempo, consumo específico de energía, etc.
- II. Variar los parámetros del proceso para ver la influencia sobre los indicadores: Dentro de lo permitido en operación, se pueden variar ciertos parámetros como flujos másicos, tiempo de operación u otros parámetros específicos del equipo. Se compara esta variación con la variación de los indicadores relevantes. Puede no existir relación entre parámetros e indicadores. Se pueden determinar valores óptimos de operación o si las restricciones lo impiden, valores nocivos de operación.

- III. Implementar valores de operación en el equipo/sistema: Se restringen los valores de los parámetros de operación a los óptimos encontrados, y se verifica que mejoren el desempeño del procedimiento.

Para los pasos anteriores se presentan algunos parámetros utilizados en optimizaciones al procedimiento que se pueden implementar efectivamente como MEE.

- Porcentaje de utilización de energía en el proceso (%): Éste parámetro es por lo general el más relevante y se busca obtener el mayor valor posible, sin sobrepasar la estructura de costos. La óptima utilización de la energía puede variar con parámetros como los flujos másicos, temperatura, tiempo de proceso, forma y tamaño del producto. Además de encontrar los parámetros adecuados, la utilización inteligente tiene relación con MEE orientadas al control de pérdidas.
- Consumo específico (kWh/unidad): Éste parámetro permite relacionar el gasto energético con la cantidad producida en un equipo o sistema. El consumo específico por lo general disminuye beneficiosamente mientras más grande sea el equipo. De forma muy similar al porcentaje de utilización, también puede variar con parámetros como los flujos másicos, temperatura, tiempo de proceso, forma y tamaño del producto.
- Conversión (%): Por conversión se entiende la cantidad de producto final que se obtiene desde el producto inicial. Es común en procesos metalúrgicos u otros procesos térmicos en que se obtiene un producto por una reacción química o física. Para mejorar la conversión los parámetros influyentes son el tiempo de residencia en el horno, temperaturas y otros parámetros que mejoren la transferencia de calor.

En una planta industrial típica no siempre es factible estudiar el comportamiento del sistema variando los parámetros de operación. Pueden existir restricciones en la configuración del equipo o metas de producción que impidan obtener datos. Por otro lado, para un proceso de operación variable, se pueden obtener reportes de operación con la información requerida y buscar valores óptimos en los datos que se poseen.

Algunos parámetros que pueden influir en el proceso son: tiempo de operación, velocidad del aire al interior del equipo, masa a introducir en el sistema, etc. Un parámetro interesante a evaluar para realizar una optimización de procedimiento se presenta como ejemplo a continuación:

Variación del tamaño de lingotes: Esta medida se propone para equipos térmicos que funden lingotes metálicos (por ejemplo para laminación, refinar, etc.). El análisis también es válido en equipos térmicos que cocinan alimentos o en secadores.

Con el objetivo de reducir los tiempos de fusión, se propone emplear lingotes de menor dimensión en lugar de grandes tochos. Éstos pueden reducir la eficiencia de los equipos al requerir prolongados tiempos de calentamiento debido a su tamaño cuya

tasa de calentamiento y fusión es controlada por conducción térmica. Para analizar el calentamiento de objetos de diferente tamaño, se consideran los parámetros representados en la Figura 3.5:

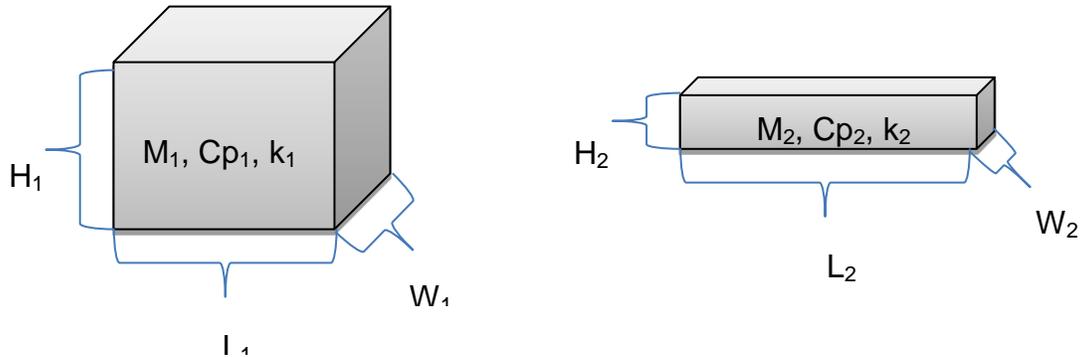


Figura 3.5: Supuestos de cálculo de los lingotes usados actualmente y de los lingotes propuestos en MEE

Considerando inicialmente el número de Biot para un análisis simplificado, ($Bi \ll 1$) la temperatura adimensional de un cuerpo es:

$$\theta_m = e^{\frac{hA}{\rho C_p V} t_m} \quad (3.27)$$

En que:

h : Coeficiente convectivo del medio, en W/m^2K

A : Área Superficial del cuerpo, en m^2

t_m : Tiempo que tarda el cuerpo en comenzar a fundirse, en s

ρ : Densidad del cuerpo, en kg/m^3

C_p : Calor específico del cuerpo, en J/kgK

V : Volumen del cuerpo, en m^3

Reemplazando $\rho * V = m$, para cada masa, se tiene

$$\theta_{m1} = e^{\frac{hA_1}{Cp*m_1}t_{m1}}$$

$$\theta_{m2} = e^{\frac{hA_2}{Cp*m_2}t_{m2}}$$
(3.28)

Considerando que los cuerpos deben alcanzar la misma temperatura, se tiene:

$$1 = e^{\left(\frac{hA_1}{Cp*m_1}t_{m1} - \frac{hA_2}{Cp*m_2}t_{m2}\right)}$$
(3.29)

Lo que es equivalente a:

$$0 = \frac{hA_1}{Cp * m_1} t_{m1} - \frac{hA_2}{Cp * m_2} t_{m2}$$
(3.30)

Desarrollando se tiene:

$$\frac{A_1}{m_1} t_{m1} = \frac{A_2}{m_2} t_{m2}$$
(3.31)

Esto implica que:

$$t_{m2}/t_{m1} = \frac{m_2/A_2}{m_1/A_1}$$
(3.32)

Esto puede interpretarse que la reducción del tiempo de fusión es directamente proporcional a la reducción de masa si se conserva la geometría, o si se modifica la geometría, el tiempo de fusión se reduce en proporción inversa con el área superficial.

3.4.6. Buenas prácticas:

Dependiendo del proceso, se pueden proponer otras medidas, entre ellas están las buenas prácticas, las cuales son específicas de cada proceso. A continuación se entregan algunos conceptos generales para proponer y evaluar MEE de este tipo.

- Evitar recalentar los productos: En una planta industrial es común tener que calentar un producto más de una vez, por ejemplo el temple y revenido del acero. Entre cada aumento de temperatura al producto generalmente la forma más simple de proceder es enfriando el producto a temperatura ambiente. El enfriamiento entre etapas simplifica la manipulación y es inevitable en procesos con equipos de distinta capacidad.
El mantener la temperatura del producto entre etapas reduciría el consumo de energía y el tiempo de operación.
- Layout adecuado: En plantas industriales que han crecido y han adaptado los procesos al espacio disponible, el flujo entre procesos puede ser lento gastando tiempo y energía. Para plantas productivas cuyos procesos son consecutivos, la distancia entre etapas puede hacer que el desplazamiento de productos afecte la producción, incurriendo en gastos energéticos extra. Esta medida tiene relación con el problema del recalentamiento ya que el desplazamiento de especies calientes entre etapas implica una pérdida de calor en el trayecto.
Para evaluar un cambio de layout se deben considerar factores como costo del desplazamiento de equipos, nuevos costos del desplazamiento del material, mejoras en los tiempos de producción, capacitación de operadores, etc.
- Ciclos de producción: Un equipo puede operar de manera continua o intermitente dependiendo del proceso productivo, esto es según la demanda de producto y la naturaleza del equipo. Por lo general en equipos térmicos conviene operar de manera continua o en ciclos de operación ininterrumpidos. El ahorro energético relacionado proviene de la inercia térmica del equipo y el entorno. En caso de interrumpir la operación para mantenimiento de equipos o en periodos de baja demanda de producto, el equipo se enfría según las condiciones del entorno y en la siguiente puesta en marcha parte de la energía térmica se utiliza en calentar la estructura y entorno de éste.
El ahorro energético relacionado con una operación ininterrumpida se evalúa en base a la masa y el calor específico de los materiales que conforman el equipo y la temperatura al momento de la detención. Se considera el calor que se pierde al enfriar y calentar el equipo como:

$$Q_r = 2 * M_{equipo} * Cp_{equipo} * \Delta T \quad (3.33)$$

Q_r : Energía requerida para calentar el equipo, en kWh

M_{equipo} : Masa del equipo, en kg

Cp_{carga} : Calor específico del equipo, consolidado en base a los materiales que conforman el equipo, en general en $\frac{kWh}{kg \cdot K}$

ΔT : Diferencia de temperatura a la que se calienta el equipo desde temperatura ambiente al estar detenido hasta la temperatura de operación, en °C. $T_i = 25^\circ C$, $T_f = T_{operacion}$.

Para implementar un proceso en que se opere de manera continua, se debe considerar principalmente la demanda de producto, operación 24 horas diarias, dimensión y capacidad de equipos.

- Equipos en espera (stand-by): Los equipos que no puedan operarse de forma continua se pueden operar en espera o stand-by. Esto se refiere a operar los equipos a baja potencia para reducir el consumo de energía y a la vez que no haya problemas de inicios y paradas como gasto de tiempo y energía excesiva. Para esto deben evaluarse distintos escenarios de operación: parada completa de equipo o stand-by. Considerando el tiempo esperado de detención se puede evaluar la mejor solución.

3.5. Evaluación de sistemas eléctricos

Se consideran los equipos que requieren energía eléctrica para operar, como es el caso de los motores eléctricos y la iluminación. Para motores eléctricos, se deben revisar las características como potencia, eficiencia, etc. según datos de placa, información de operación y del fabricante. También se debe considerar el factor de carga y el tiempo de utilización real. En la primera observación se debe constatar que los motores operen bajo los factores de diseño o por el contrario operen con frenos y otras condiciones.

Dependiendo del equipo (laminadores, mezcladores, cintas transportadoras, etc.) pueden proponerse varias medidas de eficiencia energética específicas. En general, en motores eléctricos, para hacer las evaluaciones energéticas, se deben considerar parámetros de operación como los de la Tabla 3.6. Estos parámetros representan el modelo de uso de los equipos, en que se consideran los turnos por día, las horas efectivas de turno y un factor de utilización típica de los equipos, que permite ponderar el tiempo de uso.

Tabla 3.6: Ejemplo de parámetros de operación de motores eléctricos empleados en evaluaciones energéticas

| Parámetro | Valor |
|---------------------------|----------|
| Turnos por día | 1-3 |
| Horas efectivas del turno | 8-20 |
| Utilización % | 50%-100% |

De esta forma se puede estimar el consumo eléctrico anual de cada motor.

Una medida considerada para reducir el consumo de energía eléctrica es el cambio de motores actualmente instalados por motores eléctricos de alta eficiencia. El modelo de

evaluación de ahorro eléctrico presentado consiste en determinar para un motor de potencia dada (Pot), el rendimiento típico con eficiencia estándar ($eff3$), el rendimiento mínimo con eficiencia Premium ($eff1$) y conocido el tiempo de operación (t_{OP}), calcular el ahorro de energía mediante la ecuación (3.34):

$$Ahorro E = Pot * \left(\frac{1}{eff3} - \frac{1}{eff1} \right) * t_{OP} \quad (3.34)$$

Por otro lado, la iluminación eficiente se debe abordar desde varios frentes: Proveer una cantidad de luz adecuada por unidad de área para la operación y ofrecer una eficiencia de iluminación adecuada. Para esto se define el flujo luminoso en lúmenes y la densidad de flujo luminoso o nivel de iluminación como el flujo luminoso en lúmenes por área sobre la que incide, esto es $1 \text{ lumen}/m^2 = 1 \text{ lux}$.

- Iluminación adecuada: El alcance de esta memoria no abarca el diseño de la iluminación, por lo que solo se menciona lo relacionado con eficiencia energética. En la Tabla 3.7 se presentan las iluminancias mínimas exigidas por la normativa chilena. La iluminancia se refiere a la cantidad de lúmenes por unidad de superficie iluminada. Esto significa que para un espacio de trabajo definido, se considera el área para obtener la iluminación requerida.
- Eficiencia lumínica: La eficiencia de una fuente de luz corresponde a los lúmenes por potencia entregada. Según la tecnología de iluminación se tienen diferentes características como se muestra en la Tabla 3.8.

Para evaluar el ahorro energético relacionado con el cambio a iluminación eficiente, se debe observar la situación actual considerando las características de lo que está instalado y la nueva iluminación. Con esto se puede estimar:

$$P = n_i * P_i - n_e * P_e \quad (3.35)$$

En que:

P : Reducción de potencia eléctrica requerida por cambio de iluminación, en kW.

n_i : Lámparas instaladas, de baja eficiencia

P_i : Potencia de las lámparas instaladas, en kW

n_e : Lámparas a instalar, de mejor eficiencia

P_e : Potencia de las nuevas lámparas, en kW

Se debe considerar que la iluminancia del recinto en que se cambian las lámparas debe mantenerse o aumentar, según la normativa vigente.

Tabla 3.7: Iluminancias mínimas para locales comerciales e industriales

| Tipo de local | Iluminancia [lux] |
|--|-------------------|
| Auditorios | 300 |
| Bancos | 500 |
| Bodegas | 150 |
| Bibliotecas públicas | 400 |
| Casinos, Restoranes, Cocina | 300 |
| Comedores | 150 |
| Fábricas en general | 300 |
| Imprentas | 500 |
| Laboratorios | 500 |
| Laboratorios de instrumentación | 700 |
| Naves de máquinas herramientas | 300 |
| Oficinas en general | 400 |
| Pasillos | 50 |
| Salas de trabajo con iluminación suplementaria en cada punto | 150 |
| Salas de dibujo profesional | 500 |
| Salas de tableros eléctricos | 300 |
| Subestaciones | 300 |
| Salas de venta | 300 |
| Talleres de servicio, reparaciones | 200 |
| Vestuarios industriales | 100 |

• **Tabla 3.8: Tipos de lámparas para iluminación industrial**

| Tipo de lámpara | Flujo luminoso (lm) | Eficacia luminosa (lm/W) | Vida media (h) |
|-------------------------------------|---------------------|--------------------------|----------------|
| Lámparas incandescentes | 90-8.400 | 6-16,8 | 1.000 |
| Lámparas halógenas a tensión de red | 260-44.000 | 10,4-22 | 3.000 |
| Lámparas halógenas a baja tensión | 60-2.200 | 12-22 | 5.000 |
| Lámparas fluorescentes | 650-6.150 | 65-104 | 20.000 |
| Lámparas de vapor de mercurio | 1.600-57.000 | 32-57 | 24.000 |
| Lámparas de halogenuros metálicos | 3.300-190.000 | 68-120 | 20.000 |
| Lámparas de sodio de baja presión | 18.000-32.000 | 100-173 | 18.000 |
| Lámparas de sodio de alta presión | 3.500-120.000 | 70-150 | 32.000 |

3.6. Impacto del proyecto integral de EE

Una vez evaluado el ahorro producido por las MEE de forma independiente se evalúa el impacto del conjunto de MEE en la matriz energética de la planta. El proyecto de MEE se evalúa energéticamente como conjunto. Si se implementan varias MEE en un solo equipo hay que considerar como influye una medida sobre la otra. En este caso el ahorro porcentual se multiplica. Las MEE que no interfieren entre sí, como MEE para distintos equipos, permiten sumar el ahorro de cada medida. De esta forma se obtiene el ahorro total que entrega el proyecto de eficiencia energética.

3.7. Evaluación económica y priorización de MEE

La evaluación económica de las MEE estudiadas es importante ya que permite obtener indicadores para comparar el impacto de las medidas en la planta. La teoría tras la evaluación económica escapa de los alcances de esta memoria, en consecuencia esta pauta se desarrolla como herramienta de evaluación y se profundiza solo en lo indispensable. Considerando esto se propone un procedimiento en base a herramientas de evaluación económica las cuales se explican a continuación.

3.7.1. Evaluación económica de MEE

Para las MEE propuestas en las auditorías, se realizan evaluaciones económicas independientes. Para realizar la evaluación económica se requiere lo siguiente:

- Determinar el periodo de evaluación: El periodo de evaluación depende del horizonte temporal de la empresa, y es común para todas las MEE y para evaluar el proyecto globalmente. Por lo general se consideran 10 años.
- Información MEE: Ahorro energético anual monetizado, costo de inversión para implementar la MEE, la depreciación de los equipos si es el caso e indicar si existe algún beneficio tributario.
- Flujo de ahorros para el periodo de evaluación: Un flujo de ahorros es un estudio de las inversiones y ahorros en un cierto periodo de evaluación. La información sobre el periodo de evaluación y sobre la MEE permite construir el flujo de caja.

Para la construcción del flujo de ahorros de MEE se agregan las inversiones en el año 0. Luego los ahorros anuales se anotan en las casillas respectivas de cada año en el horizonte a evaluar. Sin proyecciones del costo de la energía a futuro se asume el costo de la energía constante en el tiempo.

Los indicadores más comunes que pueden obtenerse del flujo de caja para la evaluación económica son:

- Periodo de Retorno de la Inversión (PRI) expresa generalmente en años el tiempo de retorno de la inversión dados los ahorros anuales calculados. Se calcula de la siguiente forma:

$$PRI = \frac{\text{Inversión}}{\text{Ahorro anual}} \quad (3.36)$$

- Tasa Interna de Retorno (TIR) se refiere al porcentaje de retorno de la inversión obtenido en el periodo de evaluación, considerando el flujo de caja y llevando los balances a valor presente. Se calcula de la siguiente forma:

$$TIR = \frac{-I + \sum_{i=1}^n F_i}{\sum_{i=1}^n i * F_i} \quad (3.37)$$

En que:

I : Inversión inicial, en pesos

F_i : Flujo del año i , en pesos

n : Periodo de evaluación, en años

- Valor Actual Neto (VAN) para cada año del periodo de evaluación se lleva a valor presente el balance del flujo de caja proyectado. Se calcula de la siguiente forma:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} - I \quad (3.38)$$

En que:

I : Inversión inicial, en pesos

F_i : Flujo del año i , en pesos

n : Periodo de evaluación, en años

k : Tipo de interés. Corresponde al interés anual que puede entregar el capital de inversión. En Chile por lo general para proyectos de inversión en EE es adecuado utilizar entre un 10% y un 15%.

Por ejemplo, el flujo de ahorros para evaluar el cambio de un motor eléctrico de 10 HP a un motor de eficiencia Premium, la inversión estimada es alrededor de \$400.000. Considerando un factor de carga del 50%, se estima que el cambio del motor produciría ahorros de 1.366 kWh anuales, que llevado a un costo eléctrico típico de 64 \$/kWh entrega un ahorro anual de \$87.246. Considerando una tasa de interés del 12%, el flujo de caja para esta medida sería:

Tabla 3.9: Ejemplo de flujo de ahorros de una MEE

| AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-----------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| FLUJO. \$ | -387.702 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 | 87.246 |
| TIR | 18,3% | | | | | | | | | | |
| VAN (12%) | 105.257 | | | | | | | | | | |

Este flujo de caja entrega VAN positivo, y TIR mayor a la tasa de retorno, lo que implica que el cambio es viable. El periodo de retorno de la inversión (PRI) es menor a 5 años. Con estos indicadores se puede realizar una primera comparación entre las medidas y permite discernir entre medidas similares.

3.7.2. Evaluación global del proyecto de inversión de EE

Conociendo el periodo de evaluación y el ahorro energético global, se realiza una evaluación económica al proyecto global de eficiencia energética. Para esto se desarrolla lo siguiente:

- Flujo de caja de la situación actual de la empresa: Se evalúa el desempeño de la empresa en el horizonte temporal definido previamente. Para esto se incluye una proyección de los gastos (insumos, costos de operación, costos de energía) y los ingresos (venta de productos, etc.). También se consideran las depreciaciones y los impuestos.
- Flujo de caja considerando la implementación del proyecto de EE: Se realiza un segundo flujo de caja en que se completa el flujo de caja de la situación actual considerando además el total de las inversiones en MEE según el momento en que se hará la inversión de cada MEE, el ahorro anual que produce el proyecto, los cambios en la producción, la depreciación de los nuevos equipos y el nuevo pago de impuestos.
- Flujo de caja marginal: Con el flujo de caja de la situación actual y el de la implementación del proyecto se confecciona un tercer flujo de caja con las diferencias entre ambos (con proyecto y sin proyecto). El flujo de caja marginal entrega un flujo de ahorros y permite evaluar las MEE en el contexto de la planta.

3.7.3. Priorización de MEE

La priorización de las medidas se realiza en base a la teoría de EE desarrollada en el capítulo 3. En resumen, se priorizan las medidas de baja inversión y alto impacto. Otro factor importante en la priorización de medidas es el tiempo de implementación. Algunas medidas, como el cambio de motores eléctricos, son medidas de rápida implementación y producen ahorros desde el primer día. Para presupuestos restringidos a ciertas MEE, conviene priorizar en las medidas de mayor impacto (baja inversión y

buenos ahorros) ya que ahorros posteriores permitirían implementar el resto de la batería de medidas paulatinamente. La optimización del periodo de implementación de cada medida debiese considerar factores como paradas de planta, estacionalidad de producción y otros factores, y se puede programar utilizando la expresión algebraica del VAN u otro programa de optimización económica, escapándose del alcance de esta memoria. Si el presupuesto para implementar MEE cubre todas las opciones viables financieramente, se recomienda priorizar la implementación de medidas de rápida implementación. Para esto se construye un flujo de caja marginal con las inversiones de EE diferidas según sea el plan de implementación, lo que permite pagar las inversiones completa o parcialmente con flujo de ahorros. Se debe considerar que las medidas implementadas inicialmente no afecten la factibilidad de medidas posteriores.

4. Resultados: Estudio de caso de la Planta A.

Parte del trabajo de memorista en Innovatec corresponde a una auditoría que se lleva a cabo a la Planta A. utilizando la metodología desarrollada. A continuación se resume la evaluación energética y el programa de inversión en EE realizados.

4.1. Actividad Principal y Líneas de Negocio

La planta industrial auditada inicia sus actividades en el año 2003 con la finalidad de canalizar el reciclaje industrial de productos de plomo. Ésta se encuentra ubicada en la ciudad de Calama, Región de Antofagasta. Las actividades desarrolladas por la empresa se pueden dividir en tres grandes áreas de proceso: planta de baterías, planta de fundición y planta de electrorefinación.

La primera área o planta de baterías, desarrolla el reciclaje del plomo secundario proveniente de baterías usadas de Pb-Ácido. Los productos obtenidos por esta planta son:

- Plásticos y materiales no metálicos, como polipropileno (PP) y polivinilcloruro (PVC), que son los constituyentes de las cajas. Estos elementos son posteriormente separados y reciclados al mercado correspondiente.
- Solución de ácido sulfúrico libre (electrolito).
- Plomo metálico de bornes y grillas.
- Pasta de batería compuesta por óxidos (PbO_x) y sulfatos de plomo ($PbSO_4$), que es el componente principal (borra).

4.2. Descripción General del Proceso Productivo

El proceso productivo de las fundiciones de plomo secundario es descrito por la EPA en 1986, mediante el siguiente extracto resumido del proceso:

“Las fundiciones de plomo secundario producen plomo y aleaciones de plomo a partir de material de chatarra plomífera. El plomo secundario se obtiene de baterías de vehículos desechadas y de otras materias primas utilizadas en la fundición secundaria de plomo como los contrapesos de llanta, tuberías, soldaduras, escorias, y revestimientos de plomo.

La fundición secundaria de plomo consiste en tres operaciones principales: pretratamiento, fundición, y refinación de la chatarra, descritas a continuación:

El pretratamiento de la chatarra es la eliminación parcial de los contaminantes metálicos y no metálicos contenidos en la chatarra y en los residuos plomíferos. Los procesos

usados para pretratar la chatarra son el trozado, la trituración y la exudación de la batería. Se vacía el electrolito y se trituran las baterías. Luego se separa el plomo de los materiales no metálicos. La chatarra o pasta de plomo obtenida se exuda para eliminar parte del exceso de agua por escurrimiento. A continuación pasa al proceso de fundición o reducción.

En la fundición se produce plomo por fusión y separación del plomo de los contaminantes metálicos y no metálicos, reduciendo los óxidos a plomo elemental. La fundición se efectúa en altos hornos, hornos de reverbero y rotatorios. Los materiales de carga utilizados en los altos hornos son: chatarra de metal pretratada, segunda escoria, chatarra de hierro, coque, escoria reciclada, polvo de combustión, y cal. El calor que necesita el proceso para fundir el plomo es producido por la reacción del combustible con el oxígeno en el aire inyectado al horno. En la combustión, parte del coque que se introdujo al horno, al reaccionar, funde la carga mientras que el resto reduce los óxidos de plomo a plomo elemental. A medida que la carga de plomo se funde, la cal y el hierro suben a la superficie del baño fundido y forman un fundente que retarda la oxidación del producto de plomo. Finalmente se vacía el plomo directamente o en moldes y a continuación se lleva a refinación.

La refinación y colado del plomo crudo proveniente de los hornos de fundición puede determinar su dureza, aleación y oxidación según el grado de pureza o el tipo de aleación deseada. Estas operaciones pueden realizarse en hornos de reverbero, sin embargo, es más común que se utilicen hornos de tipo olla. En hornos de aleación se funden y mezclan lingotes de plomo y materiales de aleación. Los materiales de aleación más comunes son el antimonio, estaño, arsénico, cobre y níquel. Los hornos de oxidación pueden ser unidades tipo crisol o de reverbero y son usados para oxidar el plomo y arrastrar los óxidos de plomo producido a la corriente de aire de combustión para su posterior recuperación en filtros de manga de alta eficiencia”

4.2.1.Descripción del Proceso Productivo

La fundición secundaria de plomo consiste en producir plomo y aleaciones de plomo, mayormente a partir de baterías de vehículos en desuso, y también de otras fuentes de plomo usado (cañerías, soldaduras, escoria, revestimientos de plomo). Los procesos de producción consisten en el pretratamiento, fundición y refinación de la chatarra.

Los principales procesos productivos y las etapas llevadas a cabo se pueden apreciar en los diagramas de la Figura 4.1.

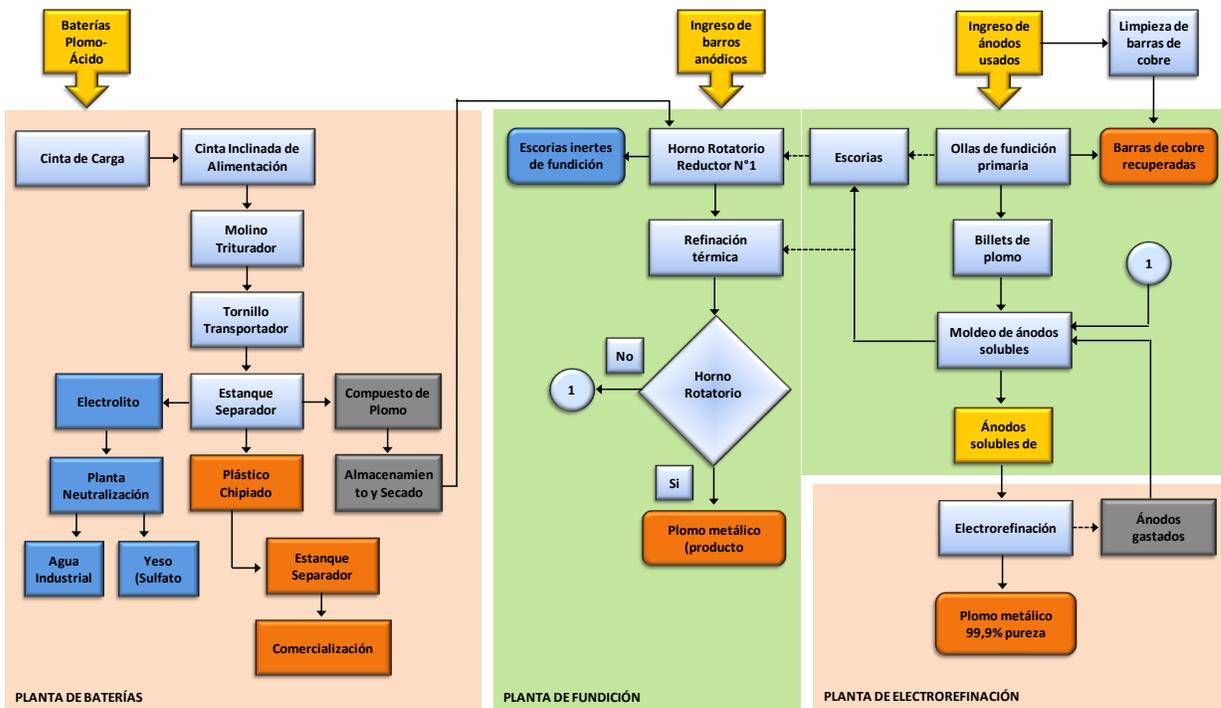


Figura 4.1: Diagrama de flujo del proceso productivo.

4.2.1.1. Recepción y almacenamiento de residuos de plomo

Los drosses, barras anódicas, scraps y ánodos usados de plomo generados por distintas empresas mineras del rubro cuprífero, son recibidos en el patio de descarga, previo a su registro en una romana de pesaje. Una vez ingresados, son dispuestos temporalmente en un sector de almacenamiento en tránsito, destinado exclusivamente para tales fines. Con la finalidad de evitar potenciales impactos al medio ambiente por emisiones de material particulado o derrames de soluciones desde los receptáculos de borras anódicas, estos residuos son mantenidos en este sector en los mismos contenedores utilizados para efectos de transporte desde el lugar de origen. Éstos corresponden a contenedores metálicos de 40 pies de largo, diseñados y destinados exclusivamente para el transporte y almacenamiento temporal de estos residuos de plomo. Adicionalmente y para mayor seguridad, los barras anódicas, en la mayoría de los casos estarán confinados en receptáculos plásticos de 1 m³ de capacidad (isocontenedores).

4.2.1.2. Planta de baterías

La Planta de Baterías tiene como objetivo tratar el plomo secundario proveniente de las baterías usadas, recurso que se genera diariamente a lo largo de todo el país. Las

instalaciones tienen una capacidad actual para tratar del orden de 1.000 toneladas/mes de alimentación de baterías usadas. La Figura 4.2, muestra la Planta de Baterías de la empresa.



Figura 4.2: Planta de Baterías: a) Vista del elevador de baterías, b) Separador de material ligero

4.2.1.3. Lavado de ánodos usados

Debido a consideraciones ambientales con respecto al transporte de ánodos usados desde su lugar de origen hasta la planta recicladora se realiza un lavado preliminar de éstos en las instalaciones del cliente. Al llegar a la planta, cada ánodo es transportado hacia una cámara de lavado con la ayuda de un tecele eléctrico. Éstos deben ser sometidos nuevamente a un proceso de lavado en la planta recicladora para remover la mayor cantidad posible de suciedad adosada superficialmente. El lavado se realiza en un sistema de rodillos paralelos con inyección de agua industrial reutilizada.

Las borras y agua residual resultantes del proceso de lavado se acumulan en bateas adyacentes a la cámara de lavado desde donde se bombea agua. Las borras son recuperadas e ingresan al proceso productivo como materia prima del horno rotatorio, cuyo proceso se explica más adelante.

Esta etapa concluye con el corte de la barra de cobre (oreja) de cada ánodo, las que se derivan hacia el taller de recuperación de barras. Las planchas de ánodos de plomo son apiladas en un sector adyacente al área de fundición, debidamente habilitado para tales efectos. Las virutas de plomo generadas en el corte, son recuperadas y enviadas al proceso de fundición.

4.2.1.4. Horno rotatorio

Corresponde a un proceso de reducción en el que las principales especies presentes en los barros anódicos, corresponden a PbSO_4 (sulfato de plomo), PbO_2 (peróxido de plomo) y PbO (óxido de plomo). Este proceso de fusión-reducción térmica se realiza en el horno rotatorio de llama directa de la Figura 4.3. De acuerdo a las reacciones químicas los productos que salen del proceso descrito corresponden a plomo metálico (Pb), dióxido de carbono gaseoso y escorias de fundición (FeS).



a)



b)

Figura 4.3: Proceso de fundición en Horno Rotatorio: a) Acceso para carga frontal, b) Vista lateral del cilindro

El horno rotatorio corresponde a un cilindro giratorio con capacidad de carga de 5.000 kg aproximadamente, el cual es alimentado por la puerta frontal con escorias de plomo provenientes de las ollas de fundición y barros anódicos previamente deshidratados, como se muestra en la Figura 4.4. En la parte posterior se ubica un quemador, el cual utiliza una mezcla de petróleo y oxígeno. El consumo de petróleo Diesel de este horno corresponde a unos 40 l/h. La temperatura de operación alcanza los 1.200°C.

Cuando el producto del horno rotatorio contiene impurezas inferiores a 200 ppm de antimonio y bismuto pasa a un proceso de moldeo final. En caso que las concentraciones de Sb y Bi en el plomo metálico sean mayores a 200 ppm, se envía al proceso de moldeo de ánodos solubles para su posterior refinación electrolítica y/o refinación pirometalúrgica según convenga.



a)



b)

Figura 4.4: Descarga lateral del Horno Rotatorio: a) Riel con moldes para vaciado de Pb y escoria, b) Vista lateral del sistema de descarga

La carga frontal que posee el horno se encuentra completamente confinada mediante una cabina que posee compuertas automáticas que se abren sólo para los procesos de carga/descarga del horno. Los gases y material particulado en suspensión, generados en este proceso, son captados por una campana y enviados por ducterías selladas a un sistema de filtración a través de filtros de mangas; como se muestra en la Figura 4.5.



a)



b)

Figura 4.5: Filtro de Mangas de la Planta para los procesos de Fundición: a) Salida de gases de escape ya filtrados, b) Acumulación de material particulado en sacos.

4.2.1.5. Fundición en ollas

Corresponde a la fundición de ánodos en desuso previamente lavados. Este material contiene Cu, Bi, Sb y otros los cuales deben ser removidos por medio de refinación

pirometalúrgica por oxidación de dichos componentes. Estos óxidos se separan por flotación, debido a su baja densidad, siendo removidos mecánicamente y derivados al proceso primario de reducción que se describe más adelante. Los equipos se muestran en la Figura 4.6.

Las planchas de ánodos usados son cargadas en las ollas de fusión a una razón de 25 toneladas al día. La temperatura de trabajo de estas ollas es de aproximadamente 480°C, generando una producción de 19 toneladas al día de billets de plomo metálico de 800 kg cada uno.



Figura 4.6: Proceso de fundición en Ollas de Refino: a) Olla de Refino con equipo de mezcla sobre su tapa, b) Vista lateral donde se observa un quemador expuesto.

4.2.1.6. Moldeo de ánodos solubles

Esta etapa productiva consta de dos ollas de fusión de plomo cuya temperatura de trabajo corresponde a los 350°C. La alimentación de combustible (petróleo Diesel grado B) es de 20 l/h. El material a fundir proviene del plomo metálico generado en el horno rotatorio (con concentraciones de Sb y Bi superiores a 200 ppm) y de las ollas de fundición de ánodos. Estas ollas producen ánodos solubles de plomo con aproximadamente un 98% de pureza de plomo, los cuales son enviados a electro refinera. Las escorias de descarte son tratadas en el horno rotatorio.

4.2.1.7. Electrorefinación

En el evento de que los niveles de impurezas presentes en la aleación a recuperar excedan los niveles comercialmente viables de refinar pirometalúrgicamente, el metal

fundido será moldeado en forma de ánodo y su refinación se ejecutará por la vía de electrorefinación en una pequeña planta de refinación (100 kVA), contemplada para este efecto. Esta etapa corresponde a la electrorefinación de los ánodos solubles de plomo provenientes de las ollas de moldeo de ánodos. La refinación se realiza en 22 celdas a temperatura ambiente, corriente continua de 30 V y 2.500 A, como se muestra en la Figura 4.7. Se utiliza un electrolito con ácido fluorhídrico (60-80 g/l) y litargirio de plomo (80-100 g/l). La proporción de ácido fluorhídrico, ácido bórico y agua es de 2:1:5, de tal forma que una solución de 200 l debe tener 50 l de ácido fluorhídrico, 25 kg de ácido bórico y 125 l de agua. Cada celda cuenta con 27 ánodos y 26 cátodos. Los cátodos madre son generados en dos celdas adicionales, los que originalmente tienen un peso aproximado de 2,5 kg (1 mm de espesor). Después de un periodo aproximado de una semana de electro refinación, se obtienen cátodos de plomo de 12 mm de espesor y un peso promedio de 45 kg, con una pureza de 99,8% de plomo y menor a 200 ppm de Sb Finalmente, los cátodos obtenidos son enviados a fundición y moldeo.

Los ánodos solubles son retirados desde las celdas para ser lavados con agua industrial, siendo posteriormente reincorporados a las celdas para concluir con su proceso de recuperación de plomo. Una vez desgastados, son retirados definitivamente desde las celdas para ser refundidos y moldeados como nuevos ánodos solubles.



Figura 4.7: Planta de Electrorefinación: a) Tinas de lavado de barras, b) Disposición de barras para lavado.

4.2.1.8. Refinación térmica

La refinación térmica corresponde a la etapa intermedia del proceso de fundición para la obtención de plomo de alta pureza. Consta de dos ollas de fusión, las cuales operan normalmente a 480 °C.

La materia prima que se carga en estas ollas proviene principalmente del producto obtenido en el horno rotatorio. En este proceso se incorporan ciertas cantidades de NaOH o NaNO₃ para capturar el Sb aún presente en el plomo a refinar. Estas

proporciones se establecen de acuerdo a la cantidad de antimonio presente en el plomo metálico a fundir en las ollas de refinación térmica. El producto final corresponde a billetes (tochos) de plomo, que se comercializa como materia prima para la producción de ánodos de plomo. Los drosses de descarte son tratados en el horno rotatorio.

4.2.1.9. Taller de recuperación de barras

En este taller se recuperan las barras de cobre (orejas) cortadas previamente desde los ánodos de plomo usados, como se observa a la izquierda de la Figura 4.8.

Como primer paso se realiza el corte de la plancha de plomo remanente localizado en el área de acople con la barra. Luego, la barra de cobre se introduce en un baño de estaño (318 a 320°C), donde se recupera el plomo aún presente en la barra, el que se moldea en billetes de 15 a 17 kg, como se muestra a la derecha de la Figura 4.8.



Figura 4.8: Taller de recuperación de barras: a) Barras de Cobre recuperadas desde los ánodos, b) estañadora del taller de recuperación.

Posteriormente, la barra de cobre es introducida a una tina de lavado (con hidróxido de sodio), como se muestra en la Figura 4.9. Luego se enjuaga, se escobilla y pule, se le cortan los remaches y se le realiza una limpieza final.

Finalmente las barras son apiladas y comercializadas, junto a los restos de viruta de cobre recuperadas. Los restos de plomo obtenidos en este taller son enviados a las ollas de fundición de ánodos reincorporándolos al proceso.



Figura 4.9: Tina de Lavado de Barras.

4.2.2. Niveles de Producción

Actualmente la planta procesa Borrás Anódicas y baterías de Plomo-Acido a una tasa media mensual que le permite producir unas 1.000 toneladas de Pb refinado. La participación de tales materias primas aproximadamente comprende 20% de borras y 80% de baterías de Pb-Acido.

4.3. Antecedentes Energéticos

La matriz energética de la planta se compone de energía eléctrica, utilizada en iluminación y equipos eléctricos (la mayoría motores) y energía térmica obtenida principalmente de petróleo y oxígeno para los procesos metalúrgicos previamente descritos. Según los datos de facturación del año 2012, el consumo típico de energía es de unos 14,5 GWh, y su costo anual asciende a unos MM\$ 970. La distribución de la matriz energética se resume en la Figura 4.10:

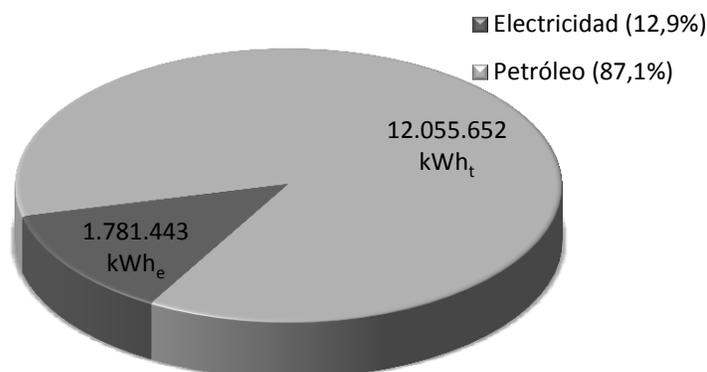


Figura 4.10: Distribución de la matriz energética en la planta.

El análisis de los principales consumos de la empresa es el siguiente:

Energía eléctrica

Energía eléctrica utilizada principalmente en motores eléctricos para los equipos y procesos de la planta e iluminación de las naves.

Energía eléctrica utilizada en iluminación y otros equipos en las oficinas administrativas y casa de cambio de la planta productiva.

Energía Térmica

Petróleo y oxígeno, utilizados principalmente como energía térmica, para los procesos de fusión y refinación llevados a cabo en hornos y ollas de fundición.

Los equipos de proceso existentes en la planta, son aquellos utilizados en la elaboración de plomo metálico, que corresponden a procesos metalúrgicos necesarios para realizar labores de fundición y de refinación térmica. Los principales equipos de proceso utilizados en la planta son: el horno rotatorio (HR) y las ollas de refinados (OR). Estos equipos son responsables del 100% del consumo de petróleo de la planta. En la Tabla 4.1 se muestra la distribución de consumo por equipos.

Tabla 4.1: Distribución del consumo de energía térmica

| Equipo | Consumo [kWh] | Consumo [I] | Porcentaje |
|--------------------|---------------|-------------|------------|
| Fundición en ollas | 5.570.824 | 556.359 | 46 % |
| Horno rotatorio | 6.484.827 | 647.640 | 54% |

4.4. Evaluación de equipos térmicos

4.4.1. Horno Rotatorio

El horno para fundición de plomo es de tipo rotatorio, formado por una envoltura cilíndrica horizontal de acero y aislado interiormente con ladrillos refractarios, pudiendo resistir temperaturas en torno a los 1.200°C. En uno de los extremos está situado el quemador y en el otro la salida de los gases quemados y la carga frontal. Las características del horno rotatorio se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características Horno Rotatorio.

| Parámetros | Valor | Unidad | Observaciones |
|--------------------------------|----------|--------|---|
| Diámetro exterior | 4,0 | m | |
| Longitud | 4,0 | m | |
| Espesor de aislación | 9,0 | in | Cromo Magnesita |
| Capacidad de carga | 15,0 | TON | Cada 6 horas |
| Temperatura de operación | 800-1000 | °C | |
| Composición típica de la carga | – | – | Sulfatos y óxidos de Plomo, carbón, ceniza de soda y fierro metálico. |

Durante la inspección del horno rotatorio, los siguientes puntos resultaron relevantes en la evaluación de eficiencia energética:

- La temperatura de pared del horno rotatorio se mide a través de un termómetro infrarrojo. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 4.3 e indican que existe alta temperatura de pared del horno lo que permite inferir que existen pérdidas excesivas hacia el entorno. Por este motivo, se considera como MEE la opción de mejorar la aislación del equipo.

Tabla 4.3 Medidas de temperatura del manto del horno rotatorio.

| T° de Pared, Ubicación | T°, °C |
|-----------------------------|--------|
| Temperatura Cilindro Punta | 170 |
| Temperatura Cilindro Centro | 260 |
| Temperatura Cilindro Fondo | 195 |
| Temperatura Cilindro Tapa | 270 |

- De la misma forma, se mide una alta la temperatura del cañón de escape de gases de combustión, lo que supone un potencial de aprovechamiento de calor sensible.
- Se constata que en el proceso de reducción en el horno rotatorio se deja enfriar el material líquido para fabricar tochos de grandes dimensiones antes de la refinación, etapa donde se vuelve a fundir el material. Como MEE se considera el uso directo del plomo líquido extraído del HR en las ollas de refino.

- Del análisis de los registros de operación, se observa una gran dispersión de los indicadores de eficiencia energética. Esto indica que de optimizar el control de la operación se podría reducir el consumo de energía, MEE que se analiza en el apartado MEE HR 4.

La Tabla 4.4 presenta los resultados del balance térmico típico del HR para el caso promedio, en que la carga virgen es de unas 14,34 t, el tiempo promedio de proceso es de 5,78 horas, el consumo de petróleo es de 539 l y el de oxígeno es de 1.096 m³. Se consideran condiciones de temperatura de proceso de 1.000°C, temperatura de pared del HR de 350 °C, temperatura de escape de gases reportada en torno a los 700 °C y temperatura ambiente promedio anual de 13,3°C.

Tabla 4.4: Balance térmico y principales flujos de energía térmica del proceso de Horno Rotatorio.

| Descripción | Potencia [kW] | Energía térmica anual [kWh/año] | Porcentaje del gasto |
|---|---------------|---------------------------------|----------------------|
| Calor utilizado en la carga Q_m | - | 3.466.047 | 60,85% |
| Calor emitido en pérdidas convectivo-radiativas Q_p | 391,96 | 2.332.770 | 40,96% |
| Calor de Combustión Q_c Teórico (Q_p+Q_m) | 957,02 | 5.798.817 | 100,00% |

| Descripción | Potencia [kW] | Energía térmica anual [kWh/año] | Porcentaje del gasto |
|---|---------------|---------------------------------|----------------------|
| Calor liberado en gases de combustión Q_h | 108,63 | 697.682 | 12,25% |

Las principales observaciones del análisis de los resultados del balance térmico del HR son las siguientes:

- El HR balancea bien los consumos de energía vs la energía inyectada, es decir, lo estimado, en promedio, coincide con la energía aportada por la combustión de acuerdo a los registros operacionales.
- Se estima que las pérdidas convectivo-radiativas de energía del HR son excesivas y reducen mucho la eficiencia del equipo. En efecto, se estima que las pérdidas de hornos de alta temperatura no deberían superar el 12-20% del balance; en este caso, las pérdidas representan una fracción superior al 40% y se asocian a la alta temperatura de pared del mismo.

- Las pérdidas de energía por calor sensible de los humos de combustión representan una interesante componente de energía térmica de alta temperatura, que puede emplearse en otros procesos de inferior temperatura tales como: precalentamiento de fluidos, generación de agua caliente sanitaria y/o, secado de materia prima de proceso.

Sobre la base de los resultados anteriores, se proponen las siguientes medidas de EE (MEE) para mejorar el desempeño del horno rotatorio. En la Tabla 4.7 se resumen los valores de ahorros e inversión requeridos para cada medida:

MEE HR 1: Recirculación de gases en el mismo proceso. Dadas las altas temperaturas de gases de combustión del horno rotatorio y el tipo de combustible, (Diesel grado B y oxígeno) esta medida puede mejorar la combustión incrementando la turbulencia y el flujo circulante en el horno, y reincorporar hidrocarburos no combustionados. Esta medida permitiría reducir el tiempo de calentamiento del horno después de una detención, disminuyendo el tiempo requerido de operación y el combustible requerido.

MEE HR 2: Precalentamiento de combustible/comburente con calor de gases de combustión residuales. Considerando las altas temperaturas de los gases de escape, el flujo másico de combustible, en torno a 110 l/h en llama alta y el flujo másico de oxígeno, de 264 kg/h, se proponen estas dos MEE. La implementación de éstas supondría un reingreso de la potencia perdida en gases de escape, reduciendo el requisito de combustible o disminuyendo el tiempo de operación dependiendo de la temperatura máxima admitida.

MEE HR 3: Secado de pasta de baterías/borras. Se pudo constatar que la pasta de baterías y las borras anódicas sometidas al proceso de reducción en el horno rotatorio presentan un alto grado de humedad. Según se indicó, el rango de humedad permitida está entre un 5% y un 15%, lo que está considerado en el procedimiento de reducción. La solución actual para reducir la humedad previa a la reducción consiste en la remoción de agua por escurrimiento en un patio de secado a la intemperie y operar a llama baja por media hora para remover el excedente y evitar shock térmico en las paredes del horno durante la carga. La MEE planteada implica el diseño y fabricación de un secador. En particular, para la medida de secado de material a reducir (ME HR 3) se realizaron ensayos de secado de pasta de baterías y borras anódicas, con cierto grado de humedad. Estos ensayos fueron realizados para obtener curvas de secado y con estos parámetros diseñar un equipo que utilice el calor de los gases de combustión para extraer la humedad del material.

Se solicitó a la empresa muestras de material para realizar los ensayos. Inicialmente se propuso fabricar pellets extruidos, para obtener cilindros compactos, facilitando el manejo de material en el secado, y disminuyendo la emisión de material particulado.

Para realizar los ensayos de extrusión, se confeccionaron boquillas de extrusión de distintos diámetros. El material se extruyó con una matriz y un émbolo mediante un

pistón hidráulico, como se muestra en la Figura 4.11. Los ensayos de extrusión, para ambos materiales, fueron infructuosos ya que el material al perder humedad se compacta y las presiones de extrusión superan las del equipo. No es conveniente extruir a grandes presiones ya que la energía requerida puede ser muy alta, lo que no corresponde a una MEE.



Figura 4.11: Matriz de extrusión y émbolo para confección de pellets de material.

En un enfoque alternativo a la extrusión, se moldearon bloques de distintos tamaños (briqueteado, ver Figura 4.12) y se realizaron de forma paralela el secado anhidro y el secado por convección forzada. El briqueteado de material cumple la función de reducir el material particulado en el secado y en el proceso de fusión en HR.



Figura 4.12: Probetas para ensayos de secado pasta/borras de Pb.

Durante el secado, realizado en un horno eléctrico convectivo, se midieron las temperaturas y velocidades del aire con una termocupla y un anemómetro de hilo

caliente respectivamente. Se registró la humedad relativa del ambiente con un higrómetro, y se pesaron las muestras con una báscula de precisión. Las especificaciones técnicas de los equipos se detallan en la Tabla 4.5. Los ensayos de secado se realizaron en el Laboratorio de Procesos Mecánicos de la Universidad de Chile

Los ensayos permitieron obtener tiempos de secado según forma del bloque (ver Figura 4.13), velocidad y temperatura del aire y se determinó el porcentaje de aglomerante requerido para una adecuada cohesión. Con esta información se realiza la evaluación de MEE HR 3. El diseño del equipo de secado escapa de los alcances de esta memoria.

Tabla 4.5: Especificaciones de Equipos de Medición.

| Termómetro Fluke 68° | |
|---|--|
| Rango de operación | -32 a 760 °C (-25 a 1400 °F) |
| Razón de distancia al objetivo | 50:1 |
| Emisividad | Ajustable digitalmente (de 0.1 a 1.0 cada 0.01) |
| Precisión de medición | Para mediciones sobre 23 °C (73°F): Error es el mayor entre $\pm 1\%$ leído o ± 1 °C (± 2 °F) |
| Báscula de precisión CWS-6/15H | |
| Capacidad: | 6kg/1g / 15kg/5g |
| Unidades: | kg / lb |
| Pantalla: | Cristal Líquido con 5 dígitos. Pantalla iluminada. |
| Voltaje CA: | 127 V - 60 Hz |
| Anemómetro de hilo caliente Lutron AM-4204 | |
| Rango de velocidad | 0,2 – 20m/s |
| Rango de temperatura | 0°C – 50°C |
| Precisión | $\pm 5\%$ de la lectura |
| Higrómetro HTC | |
| Rango de humedad | 10% - 99% |
| Rango de temperatura | 50°C -70°C |
| Resolución | 0,1°C y 1% HR |
| Horno eléctrico de convección | |
| Velocidad aire | 0,5 m/s – 25 m/s |
| Potencia eléctrica resistencias | 3 resistencias de 15 kW |
| Rango de temperatura | 0°C – 100°C |

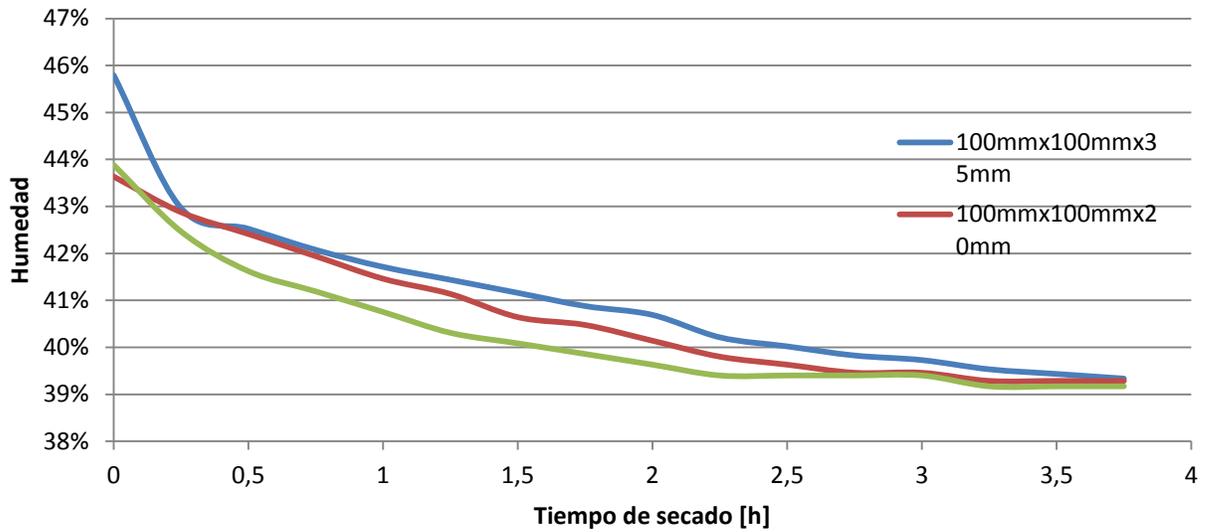


Figura 4.13: Curva de secado típica, para briquetas de pasta de baterías, dimensiones indicadas en mm.

MEE HR 4: Modificaciones al procedimiento de operación del HR, que consiste en mantener los niveles de producción y, sin modificar drásticamente el procedimiento, optimizar energéticamente el proceso. Dado que la composición de la carga es variable, a continuación se entregan recomendaciones generales.

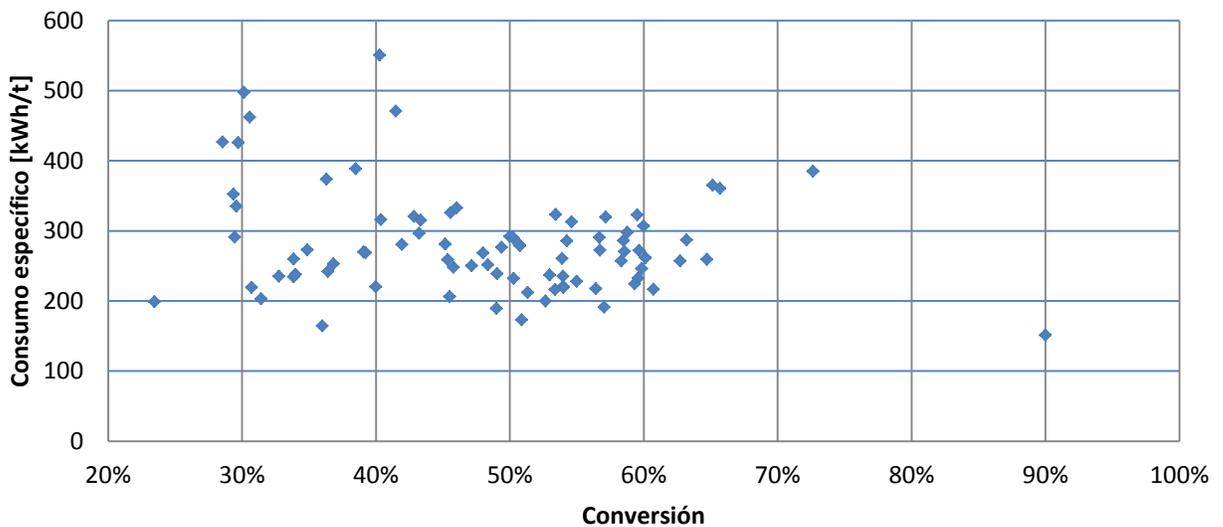


Figura 4.14 Conversión vs. Consumo específico Sept. - Nov. 2012

En la Figura 4.14, generada mediante el análisis de una muestra de reportes de operación de la compañía, se observan datos de consumo específico de combustible (kWh/t) versus porcentaje de conversión de la carga (Masa de Pb obtenido vs masa de

la carga tratada); que revelan la ejecución de procedimientos con alta conversión y bajo consumo específico de energía. Se propone uniformar la práctica operacional trabajando con cargas de unas 12 t y tiempos de operación del orden de 4 horas, para generar conversiones del orden de 70% con consumos específicos en torno de 293 kWh/t. Comparativamente a la situación promedio, cargas de 14 t/5,3 horas de proceso & conversiones del 52%, la carga propuesta presenta un alto potencial de ahorro de energía según se observa en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Propuestas de cambio al procedimiento

| | Carga virgen [t] | Tiempo de operación [h] | Conversión | Consumo Específico [kWh/t] |
|-----------|-------------------------|--------------------------------|-------------------|-----------------------------------|
| Promedio | 14,37 | 5,28 | 52% | 377,6 |
| Propuesto | 12 | 4,0 ±0,2 | ~70% | 293,6 |

Como se observa, la disminución en el consumo específico implica grandes ahorros en cada carga, los que se reflejan en la producción anual.

MEE HR 5: Mejorar la aislación para disminuir las pérdidas de energía térmica al entorno, debido a las altas temperaturas del manto. Para ello se propone incrementar el espesor de aislante del HR, agregando una capa aislante de baja conductividad térmica entre el ladrillo y la pared del horno.

4.4.1.1. Evaluación energética del conjunto de MEE propuestas al HR

En la Tabla 4.7 se resume la evaluación preliminar de las propuestas comparando sus ahorros energéticos, el ahorro monetario anual y el periodo de recuperación de la inversión (PRI). El monto/costo de inversión de las MEE se obtuvo a partir de cotizaciones referenciales de proveedores de la empresa.

Tabla 4.7: Ahorros y valorización de propuestas MEE en Horno Rotatorio.

| Ítem | Medida | Ahorro estimado por carga [kWh] | Mejora en el rendimiento | Ahorro anual [kWh] | Ahorro Anual [\$] | Inversión [\$] | PRI [años] |
|------------|---|---------------------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|------------|
| MEE HR1 | Recirculación de 20% de los gases en el mismo proceso | 92,9 | 1,84% | 103.723 | 7.425.561 | 9.700.000 | 1,3 |
| MEE HR2 | Pre calentamiento de oxígeno | 396,5 | 7,85% | 442.789 | 31.699.260 | 6.800.000 | 0,2 |
| MEE HR3 | Pre calentamiento de combustible | 112,2 | 2,22% | 125.336 | 8.972.827 | 7.300.000 | 0,8 |
| MEE HR4 | Secado de Pasta/Borras (15% húmedo, 5% seco) | 1.051,3 | 20,82% | 1.173.849 | 84.035.857 | 106.000.000 | 1,3 |
| MEE HR5 | Modificaciones al procedimiento (Carga de 12 t & 4 horas de procesamiento hasta conversión al 70%) | 1425,9 | 28,24% | 1.592.144 | 113.981.587 | 8.000.000 | 0,1 |
| MEE HR6 | Mejorar aislación (5 cm de concreto refractario de $K = 0,3447 \text{ W/m K}$) | 563,2 | 11,17% | 629.438 | 45.061.484 | 12.000.000 | 0,3 |
| MEE | Total | 3.642 | | 3.120.993 | 223.431.913 | 149.800.000 | 0,7 |

Los resultados muestran que, en general, todas las MEE generan interesantes ahorros de energía que permiten financiar la ejecución de los sub proyectos en periodos muy cortos.

La mejor medida corresponde a las modificaciones al procedimiento operativo. Se basa en una muestra de casos reales que entregan buenos resultados. Dado que la modificación no es tan drástica, se puede aplicar fácilmente y así obtener resultados inmediatos; lo que permitiría comprobar si la mejora propuesta es real. El análisis estadístico de los datos es directo por lo que un análisis más profundo a nuevos datos permitiría encontrar nuevas mejoras.

El secado de material tiene un excelente pronóstico. La humedad en el proceso es la principal pérdida de energía, por lo que al reducirse, disminuirá el calor expulsado en los gases de escape. Además, se pueden incluir fuentes de calor solar para secado.

4.4.2. Ollas de Refino (OR)

La refinación térmica se realiza en hornos tipo Morgan con crisol de acero, las cuales operan normalmente a 480 °C. Estos equipos, denominados Ollas de Refino (OR) fueron desarrolladas por la empresa, con apoyo de asesores externos. Estas están formadas por una envoltura cilíndrica vertical de acero A-37, con aislamiento de fibra para cubrir el manto exterior de la olla y su forro. Además, poseen ladrillos refractarios para el revestimiento del hogar y paredes exteriores de la olla y manto exterior. En la Tabla 4.8 se muestran las características de las ollas de refino.

Tabla 4.8: Características de las Ollas de Refino.

| Parámetros | Valor | Unidad | Observaciones |
|--------------------------------|-------|--------|----------------------|
| Diámetro exterior | 4,0 | m | |
| Altura | 2,5 | m | |
| Espesor de aislación | 4,5 | in | Anillos concéntricos |
| Capacidad de carga | 50,0 | TON | |
| Temperatura de operación | 550,0 | °C | Máxima |
| Composición típica de la carga | Pb | – | 97% , para refinar |

De la inspección de las ollas de refino se deducen varios componentes que presentan potencial de mejora de EE. El detalle es el siguiente:

- Mediante termómetro infrarrojo se mide alta temperatura de pared de ollas de refino en operación, lo que implica pérdidas excesivas al entorno. Como MEE Se considera la opción de mejorar la aislación del equipo.

Tabla 4.9: Temperaturas medidas de Olla de Refino.

| T° de Pared, Ubicación | T°, °C |
|------------------------|--------|
| Temperatura Arriba | 140 |
| Temperatura Centro | 115 |
| Temperatura Abajo | 100 |

- Durante la inspección se observa que la operación de las ollas de refino es sin tapa, como se presenta en la Figura 4.15. Esto se traduce en fugas de calor de proceso al entorno.



Figura 4.15: Carga de OR típica.

- El manejo de tochos grandes simplifica la operación, pero implica un mayor tiempo de calentamiento en la refinación en ollas. Existe potencial de mejora al reducir el tamaño de los tochos a lingotes estándar lo cual acortaría el tiempo de fusión.
- De igual forma que en el horno rotatorio, se mide mediante termómetro infrarrojo una alta temperatura del cañón de escape de gases de combustión, entre 300-340°C, lo que supone un potencial de aprovechamiento del calor sensible.

Al igual que en el horno rotatorio, el primer consumo de energía en el proceso es el transporte del material. La carga típica de unas 45 t en tochos de plomo es introducida en las ollas de refino. Mediante la combustión de petróleo con oxígeno se introduce energía térmica al proceso, en que el consumo típico por carga es de unos 8.098 kWh.

Los gastos térmicos se calculan de igual forma que en la sección del horno rotatorio y se resumen en la Tabla 4.10.

Tabla 4.10: Balance térmico y principales flujos de energía térmica del proceso de Refinación térmica.

| Descripción | Potencia [kW] | Energía térmica anual [kWh/año] | Porcentaje del gasto |
|--|---------------|---------------------------------|----------------------|
| Calor producido por combustión Q_c | 401 | 6.484.828 | 100,0% |
| Calor utilizado en carga + fundentes Q_m | | 1.067.149 | 16,5% |
| Pérdidas convectivo-radiativas por manto y aperturas Q_p | 66,5 | 1.068.865 | 16,5% |
| Calor de Combustión Q_c Teórico (Q_p+Q_m) | | 2.136.014 | 32,9% |
| Calor recuperable en gases de escape Q_h | 22,8 | 368.509 | 5,7% |
| Pérdidas por ineficiencia del proceso | | 3.980.304 | 61,4% |

De este balance se deducen las siguientes conclusiones:

- i. El 16,5% de la energía aportada se emplea para procesar la carga.
- ii. Las pérdidas de calor de las ollas representan una cantidad similar de energía que la aportada a la carga, lo cual no está bien.
- iii. La energía requerida por la carga y las pérdidas de las ollas es un 32,9% de la energía inyectada por el quemador, por lo cual no se cumple el balance. El quemador inyecta más energía de la necesaria, lo cual se relaciona con el método de fusión de grandes tochos que hace muy ineficiente al proceso.
- iv. Los gases de escape llevan una interesante cantidad de calor sensible y escapan a alta temperatura de las ollas (del orden de 400 °C).

Basado en los análisis del balance térmico de ollas, se plantean las siguientes MEE:

MEE OR 1: Transporte de plomo líquido desde el HR a ollas de refino, que consiste en cargar las ollas con material líquido proveniente del HR. La medida se evalúa considerando que al emplear material líquido se deja de emplear energía para fundir tochos. En tal caso la energía ahorrada por carga se evalúa con la ecuación 2.4 aplicada a un solo componente y sin el efecto del agua presente. Como la capacidad del HR es de unas 20 t por batch y la conversión media puede ser del 50%, la carga de Pb líquido a refinación es de unas 10 t. El resto de la carga de la olla debe ser con Pb sólido en lingotes.

MEE OR 2: Empleo de lingotes estándar para reducir el tiempo fusión y operación. Se propone emplear lingotes estándar de 25 kg para la carga de ollas, en lugar de la práctica actual que emplea grandes tochos de 90x80x 50 cm (de unas 4 t cada uno). Como se mostró en el análisis del balance térmico de ollas, el uso de grandes tochos tiene el inconveniente reducir la eficiencia de los equipos al requerir prolongados tiempos de calentamiento debido al tamaño de los tochos cuya tasa de calentamiento y fusión es controlada por conducción térmica. El análisis de calentamiento de lingotes vs tochos unitarios (ver metodología), revela que el tiempo de calentamiento hasta la fusión tiene una proporción del orden del 4%; es decir un lingote de 25 kg alcanza la temperatura de fusión en 1/25 del tiempo que le toma al tocho llegar a dicha temperatura. Para evaluar la medida se considera una reducción conservadora del tiempo de operación, equivalente a un 50% del tiempo de operación actual. Sin embargo, esta medida trabaja con las MEE OR 3 y MEE OR4, que promueven una mejora de eficiencia de estos equipos.

MEE OR 3: Incorporación de tapas para las ollas, para evitar pérdidas por fugas de calor por la entrada superior de la ollas: Considerando el tamaño de aperturas, la temperatura de la carga expuesta y el balance de energía que indica grandes fugas, se propone instalar tapas con accionamiento mecanizado, que permitan la carga y manipulación del contenido sin obstruir la operación. Se evalúa usando el área expuesta del proceso y las componentes de transferencia por convección y radiación térmica:

$$Q_{AET} = AET * \sigma * (T_{proc}^4 - T_{\infty}^4) * \Delta t + h_{int} * AET * (T_{proc} - T_{\infty}) \quad (4.1)$$

En que:

Q_{AET} : Calor perdido por aperturas en kWh

σ : Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ W/m²K⁴

T_{proc} : Temperatura de proceso en K

T_{∞} : Temperatura del entorno en K

Δt : Tiempo de operación, en horas.

h_{int} : Coeficiente conductivo (convección natural) en la superficie de la carga

MEE OR 4: Mejoramiento de la aislación térmica del equipo. Las mediciones de temperatura superficial de ollas, con termómetro infrarrojo, revelan niveles superiores a 100 °C; lo que se considera excesivo. De forma análoga al caso del HR 5 se evalúa una mejora a la aislación al incorporar una capa aislante en contacto con el manto de la olla. El resto de la aislación y la configuración del crisol permanecen sin cambios.

En la Tabla 4.11 se resume la evaluación preliminar de las propuestas de MEE para ollas de refinación comparando sus ahorros energéticos, el ahorro monetario anual y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

Tabla 4.11: Ahorros y valorización de propuestas MEE en ollas de refino (OR).

| Ítem | Medida | Ahorro estimado por carga [kWh] | Ahorro anual [kWh] | Ahorro Anual [\$] | Inversión [\$] | PRI [años] |
|------------|---|---------------------------------|--------------------|--------------------|-------------------|------------|
| MEE OR1 | Transporte plomo líquido horno rotatorio a olla de refino | 244,5 | 193.801 | 13.874.188 | 23.100.000 | 1,7 |
| MEE OR2 | Lingotes estándar de 25 kg | 4.004,1 | 3.173.552 | 227.194.562 | 26.400.000 | 0,2 |
| MEE OR3 | Tapa de olla | 716,8 | 568.097 | 40.670.097 | 14.900.000 | 0,4 |
| MEE OR4 | Mejorar aislante | 427,2 | 338.564 | 24.237.774 | 20.000.000 | 0,9 |
| MEE | | | 4.274.013 | 305.976.621 | 84.400.000 | 0,3 |

Se observa que el cambio de dimensiones de los lingotes es la medida más rentable. El tapar la olla durante el proceso tiene gran potencial como MEE. La utilización del plomo fundido obtenido del horno rotatorio es una medida que puede presentar mejoras potenciales de ahorro debido a la mejora en la conducción térmica dentro de la olla, pero es un procedimiento que puede ser peligroso si no se implementan medidas de seguridad, en las cuales reside el costo adicional.

4.5. Evaluación de equipos eléctricos

Se evalúan los equipos eléctricos y se considera el cambio de motores de eficiencia estándar a motores de alta eficiencia (MAE). El valor de reemplazo a MAE se obtuvo cotizando dichos equipos a proveedores locales. Luego construyendo la Tabla 4.12 con potencias, rendimientos y precios estándar se estima el precio de cambio de motores eléctricos. Esta tabla es referencial pero la información de motores eléctricos está disponible en catálogos de proveedores. Por lo general, para las cotizaciones se debe indicar el régimen de operación de los motores a reemplazar para encontrar el motor adecuado para el uso requerido.

Tabla 4.12: Eficiencias Premium y Estándar para distintos motores eléctricos

| 4 polos | | | |
|---------|-----------|-----------|---------------|
| Pot kW | Rend eff1 | Rend eff3 | Valor eff1 \$ |
| 0,18 | | 62,0% | 128.918 |
| 0,25 | | 67,0% | 131.392 |
| 0,37 | | 69,0% | 134.326 |
| 0,55 | 78,0% | 72,0% | 141.998 |
| 0,75 | 82,5% | 74,0% | 268.651 |
| 1,1 | 83,8% | 76,2% | 161.442 |
| 1,5 | 85,0% | 78,5% | 175.584 |
| 2,2 | 86,4% | 81,0% | 200.331 |
| 3 | 87,4% | 82,6% | 228.613 |
| 4 | 88,3% | 84,2% | 263.966 |
| 5,5 | 89,2% | 85,7% | 316.996 |
| 7,5 | 90,1% | 87,0% | 387.702 |
| 11 | 91,0% | 88,4% | 511.437 |
| 15 | 91,8% | 89,4% | 652.849 |
| 18,5 | 92,2% | 90,0% | 621.167 |
| 22 | 92,6% | 90,5% | 900.320 |
| 30 | 93,2% | 91,4% | 1.183.144 |
| 37 | 93,6% | 92,0% | 1.430.615 |
| 45 | 93,9% | 92,5% | 1.713.439 |
| 55 | 94,2% | 93,0% | 2.066.969 |
| 75 | 94,7% | 93,6% | 2.811.196 |
| 90 | 95,0% | 93,9% | 3.304.324 |

Se observa además que para motores grandes la mejora en la eficiencia y el precio por kW son cada vez menores. De esto se concluye que para motores con gran utilización tiende a ser rentable el cambio de motores grandes, y con baja utilización por lo general solo es conveniente cambiar solo los motores pequeños.

Tabla 4.13: Detalle del gasto eléctrico, mejoras en el rendimiento y ahorro de energía en área trituración de baterías.

| DESCRIPCION | Potencia, HP | Consumo Actual, kWh/año | Ahorro anual, kWh | Ahorro Anual, \$ | Inversión Estimada, \$ | PRI, años |
|---|--------------|-------------------------|-------------------|------------------|------------------------|-----------|
| SECCION : NAVE PLANTA DE BATERIAS | | | | | | |
| LÍNEA DE TRANSPORTE DE BATERIAS A MOLINO | | | | | | |
| Cinta inclinada | 7,5 | 15.879 | 727 | 46.438 | 320.531 | 6,90 |
| AREA DE TRITURACIÓN/MOLIENDA | | | | | | |
| Molino para baterías | 150 | 190.117 | 2.091 | 133.584 | 4.073.252 | 16,32 |
| AREA DE TRANSPORTE DE MATERIAL TRITURADO | | | | | | |
| Tornillo principal descarga del molino | 7,5 | 15.879 | 727 | 46.438 | 320.531 | 6,90 |
| Tornillo descarga material (pulpa) de plomo | 5 | 12.589 | 604 | 38.600 | 253.360 | 5,69 |
| Tornillo descarga plástico (material liviano) | 5 | 12.589 | 604 | 38.600 | 253.360 | 5,69 |
| AREA DE TRATAMIENTO DE ÁCIDO | | | | | | |
| Central hidráulica prensa filtro | 10,1 | 34.537 | 1.366 | 87.246 | 387.702 | 4,44 |
| Central hidráulica puerta filtro | 4,0 | 13.815 | 919 | 58.673 | 228.613 | 3,90 |
| Agitador acido / Cal | 1,5 | 5.065 | 603 | 38.510 | 161.442 | 4,19 |
| Bomba agua neutralizada | 4,0 | 13.815 | 919 | 58.673 | 228.613 | 3,90 |
| SUB TOTAL NAVE PLANTA DE BATERIAS | | 236.019 | 3.942 | 251.817 | 4.967.673 | 9 |

En general, se observa que el cambio de motores eléctricos actuales por motores de alta eficiencia no produce beneficios de interés que hagan meritorios los cambios; por lo que no se recomienda proceder por esta vía.

4.5.1. Análisis de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) en sistemas eléctricos asociados al HR

En la Tabla 4.14 el gasto en energía eléctrica se desglosa en los distintos equipos y se realiza una estimación de los ahorros al implementar mejoras en éstos. Se evalúa el periodo de recuperación de la inversión, PRI, para los equipos con potenciales mejoras.

El análisis global indica que el cambio de los motores eléctricos evaluados en esta sección es una inversión que podría recuperarse en 18 años; por lo que no se recomienda avanzar con este sub proyecto. Sin embargo, en una estrategia de mediano plazo es recomendable cambiar los motores pequeños, utilizados en bombas de refrigeración de quemadores y aceite, con una inversión total en torno de \$361.772 y un retorno de la inversión a los 5 años. No obstante lo anterior, estas medidas no son relevantes en la Eficiencia Energética de la planta en su globalidad.

Tabla 4.14: Ahorros y valorización de propuestas MEE en energía eléctrica sección Horno Rotatorio

| DESCRIPCION | Potencia [HP] | Consumo Anual [kWhe] | Ahorro anual [kWhe] | Ahorro anual [\$] | Inversión [\$] | PRI [años] |
|---|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------|
| SECCION : NAVE DE FUNDICIÓN | | | | | | |
| AREA PROCESO BULLON (HORNO ROTATORIO DE FUNDICIÓN) | | | | | | |
| Central hidráulica para motor hidráulico + motorred. Sist. rotación horno | 50 | 102.230 | 1.636 | 104.481 | 1.430.615 | 13,7 |
| SISTEMA DE REFRIGERACIÓN QUEMADOR HORNO Y ACEITE SIST. ROTACIÓN | | | | | | |
| Bomba para refrigeración quemador (1+1) | 2,2 | 9.118 | 593 | 37.857 | 180.886 | 4,8 |
| Bomba para refrigeración aceite (1+1) | 2,2 | 9.118 | 593 | 37.857 | 180.886 | 4,8 |
| Chiller | 29,9 | 61.614 | 1.294 | 82.649 | 910.926 | 11 |
| AREA TRATAMIENTO GASES DE ESCAPE | | | | | | |
| Extractor principal horno | 100,7 | 207.223 | 2.279 | 145.603 | 2.774.029 | 19 |
| Extractor filtro campana horno | 100,7 | 207.223 | 2.279 | 145.603 | 2.774.029 | 19 |
| Extractor filtro campana ollas de refino | 100,7 | 207.223 | 2.279 | 145.603 | 2.774.029 | 19 |
| AREA DE AIRE COMPRIMIDO PLANTA | | | | | | |
| Compresor general planta + Secador de aire | 100,7 | 115.124 | 1.266 | 80.890 | 2.774.029 | 34,3 |
| SUB TOTAL NAVE FUNDICIÓN | 513 | 918.873 | 12.220 | 780.543 | 13.799.430 | 18 |

En la Tabla 4.11 se resume la evaluación preliminar de las propuestas de MEE para ollas de refinación comparando sus ahorros energéticos, el ahorro monetario anual y el periodo de recuperación de la inversión (PRI).

4.5.2. Análisis de Medidas de Eficiencia Energética (MEE) en sistemas eléctricos asociados a OR

En la Tabla 4.15 el gasto en energía eléctrica se desglosa en los distintos equipos y se realiza una estimación de los ahorros al implementar mejoras en éstos. Se evalúa el periodo de recuperación de la inversión, PRI, para los equipos con potenciales mejoras. Se observa que el cambio global de los motores eléctricos evaluados en esta sección es una inversión que podría recuperarse en 4 años. La evaluación no considera ingresos por la venta de los motores usados, lo que disminuiría el PRI.

Tabla 4.15: Ahorros y valorización de propuestas MEE en energía eléctrica en el área de refinación térmica de Pb.

| DESCRIPCION | Potencia [HP] | Consumo Anual [kWhe] | Ahorro anual [kWhe] | Ahorro anual [\$] | Inversión [\$] | PRI [años] |
|---|---------------|----------------------|---------------------|-------------------|------------------|------------|
| AREA PROCESO DE REFINACIÓN TÉRMICA (OLLAS DE REFINO) | | | | | | |
| Bomba petróleo quemador ollas de refino | 3,0 | 24.314 | 1.313 | 83.867 | 200.331 | 2,39 |
| Agitadores ollas de refino | 51,0 | 314.979 | 5.040 | 321.915 | 1.465.968 | 4,55 |
| Bombas de plomo trasvasije desde ollas de refino | 10,1 | 62.167 | 1.927 | 123.101 | 387.702 | 3,15 |
| SUB TOTAL NAVE FUNDICIÓN | 64,1 | 401.460 | 8.280 | 528.882 | 2.054.000 | 4 |

En general, se estima que estas medidas, en forma separada y en su conjunto, exhiben indicadores que justifican su implementación; ya que generan ahorros interesantes para el beneficio del negocio, con periodos de recuperación inferiores a 5 años.

4.6. Balance General de Medidas de EE en Planta A.

El balance general de energía se muestra en la Tabla 4.16 y compara la situación energética sin y con Medidas de EE.

Tabla 4.16: Balance de energía sin y con MEE.

Consumo actual

| Componente | Unidad | Subtotal, kWh | % del consumo | Subtotal, \$ | % del gasto |
|-------------------------------|------------------|-------------------|----------------|--------------------|----------------|
| Eléctrica | kWh _e | 1.781.443 | 12,87% | 113.791.832 | 11,65% |
| Térmica | kWh _t | 12.055.652 | 87,13% | 863.068.187 | 88,35% |
| Total situación actual | | 13.837.095 | 100,00% | 976.860.019 | 100,00% |

Consumo proyectado con MEE

| Componente | Unidad | Subtotal, kWh | % del consumo | Subtotal, \$ | % del gasto |
|-----------------------------------|------------------|------------------|----------------|--------------------|----------------|
| Eléctrica | kWh _e | 1.747.010 | 21,70% | 111.592.393 | 19,82% |
| Térmica | kWh _t | 6.304.028 | 78,30% | 451.307.476 | 80,18% |
| Total situación proyectada | | 8.051.038 | 100,00% | 562.899.869 | 100,00% |

Ahorros potenciales al aplicar MEE

| | |
|-----------------------------------|---------------|
| Eléctrica | 1,93% |
| Térmica | 47,71% |
| Total situación proyectada | 41,82% |

Las principales conclusiones del análisis global indican que:

- i. La reducción global del consumo de energía después de aplicar las MEE analizadas en este estudio alcanza una cifra de 41,8%, equivalente a unos 5,78 GWh/año.
- ii. La reducción global del gasto de energía después de aplicar las MEE analizadas en este estudio alcanza una cifra de 42,38%, equivalente a unos \$ 413 millones anuales.

- iii. La participación de las reducciones potenciales de energía es típicamente 1,93% eléctrica & 47,7% térmica. La distribución de reducciones potenciales del gasto mantiene la misma proporción, es decir unos \$ 2,2 millones anuales por electricidad vs unos \$ 411 millones anuales por petróleo & oxígeno.
- iv. Claramente resulta muy atractivo ejecutar las MEE que reducen los gastos térmicos, antes que aquellas que reducen los gastos de energía eléctrica.
- v. Otra conclusión de interés muestra que después de aplicar las MEE, la matriz energética de la planta tiende a emparejarse con una proporción eléctrica/térmica del orden de 1:3,6 (actualmente es del orden de 1:6,7), en tanto que el gasto energético alcanzaría la proporción 1:4 (actualmente es del orden de 1: 7,6).

Estos valores de reducciones de energía y las inversiones asociadas presentados, son preliminares y requieren una revisión importante a nivel de ingeniería de detalles. No obstante ello, de todas las MEE evaluadas las más influyentes o de mayor peso son respectivamente:

- i. Modificaciones al procedimiento (Carga de 12 t & 4 horas de procesamiento hasta conversión al 70%), que genera una importante reducción del consumo unitario de energía, y
- ii. Secado del material o carga virgen que se alimenta al HR (pasta de Baterías & Borrás de EW). Esta medida presenta un gran potencial ya que implica una gran disminución de consumo de combustible, lo que implicará una reingeniería del proceso.

Finalmente cabe destacar que las mejoras a los sistemas eléctricos tienen baja influencia, pero son de fácil implementación.

4.7. Evaluación de MEE del área térmica

La Tabla 4.17 muestra la estimación de inversiones para la ejecución de las MEE en el Horno Rotatorio, que fue obtenida por consulta a especialistas y mediante cotizaciones de equipos típicos; es decir es una estimación gruesa a nivel de perfil.

Tabla 4.17: Estimado de inversiones para la ejecución de Medidas de Eficiencia Energética en Horno Rotatorio.

| Item | Medida | Equipo Requerido | Valor unitario, MM\$ | Capacidades Requeridas | Inversión, [\$] |
|--------------|---|----------------------------|----------------------|--|--------------------|
| MEE HR 1 | Recirculación de 20% de los gases en el mismo proceso | Ventilador | 2,0 | 500 m ³ /h & 1.000 Pa | 9.700.000 |
| | | Valvulas de control | 2,0 | | |
| | | Ductería | 1,5 | | |
| | | Control | 1,2 | | |
| | | Montaje | 3,0 | | |
| MEE HR 2 | Precalentamiento de oxígeno | Intercambiador gas/gas | 2,0 | Área de intercambio 2m ² , 75 kWt | 6.800.000 |
| | | Ductería | 0,8 | | |
| | | Control | 2,0 | | |
| | | Montaje | 2,0 | | |
| MEE HR 3 | Precalentamiento de combustible | Intercambiador gas/liquido | 2,5 | Área de intercambio 1m ² , 21,3 kWt | 7.300.000 |
| | | Ductería | 0,8 | | |
| | | Control | 2,0 | | |
| | | Montaje | 2,0 | | |
| MEE HR 4 | Secado de Pasta/Borras (15% húmedo, 5% seco) | Mezclador/aglomerador | 8,0 | | 106.000.000 |
| | | Moldeadora | 6,0 | | |
| | | Secador | 60,0 | | |
| | | Obras intercambiador | 12,0 | | |
| | | Montaje | 20,0 | | |
| MEE HR 5 | Modificaciones al procedimiento (Carga de 12 toneladas y 4 horas) | Especificación | 2,0 | | 8.000.000 |
| | | Capacitación | 2,0 | | |
| | | Control del proceso | 4,0 | | |
| MEE HR 6 | Mejorar aislación (5 cm de aislante de K = 0,3447 W/m K) | AISLANTE (m2) | 4,0 | | 12.000.000 |
| | | Obras e instalación | 8,0 | | |
| TOTAL | | | | | 149.800.000 |

En total estas inversiones suman unos \$ 150 millones y comprenden montos de mínimo \$ 6,8 millones para la MEE HR 2, hasta máximo unos \$ 106 millones para la MEE HR 4. Debe notarse que la MEE HR 5, comprende inversiones blandas ligadas a especificaciones, procedimientos y capacitación para control del proceso; a diferencia de las otras MEE que requieren inversiones en equipamiento para ser materializadas.

La Tabla 4.18 muestra la evaluación económica de las MEE propuestas para el HR, flujos de ahorros calculados a 10 años con tasa de descuento del 12%. Esta tasa de descuento, como se mencionó anteriormente, es esperable en proyectos de inversión en EE.

Tabla 4.18: Evaluación económica de las MEE propuestas para el Horno Rotatorio.

| | | | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MEE HR 1 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -9.700.000 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 | 7.425.596 |
| | TIR | 76,3% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 32.256.274 | | | | | | | | | | |
| MEE HR 2 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -6.800.000 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 | 31.699.409 |
| | TIR | 466,2% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 172.308.731 | | | | | | | | | | |
| MEE HR 3 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -7.300.000 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 | 8.972.869 |
| | TIR | 122,9% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 43.398.711 | | | | | | | | | | |
| MEE HR 4 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -106.000.000 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 | 84.036.252 |
| | TIR | 79,0% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 368.823.566 | | | | | | | | | | |
| MEE HR 5 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -8.000.000 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 | 113.982.123 |
| | TIR | 1424,8% | | | | | | | | | | |
| MEE HR 6 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -12.000.000 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 | 45.061.696 |
| | VAN (12%) | 242.608.631 | | | | | | | | | | |

La MEE de mejores indicadores corresponde a aquella referida a modificar el procedimiento operativo uniformando la cantidad de carga y limitando el tiempo de conversión unas 4 horas (MEE HR 5). Esta medida plantea inversiones en capacitación y buenas prácticas como se indicó arriba.

A continuación le siguen las MEE HR 2, 3 y 6; en el sentido que requieren relativamente bajas inversiones y generan interesantes beneficios; por otro lado son medidas de baja complejidad tecnológica por lo que su éxito está prácticamente garantizado.

Las MEE HR 1 y 4 presentan similares TIR y PRIs, pero difieren notablemente en el monto de inversiones para su implementación. La MEE 1 es una de baja inversión, pero también de bajo impacto en la reducción de consumo energético. Por otro lado, la MEE HR 4 es de alto impacto en la reducción de consumo energético; si bien requiere una alta inversión para su materialización y presenta una complejidad tecnológica

relativamente alta para la puesta a punto del sistema de moldeado y secado de pelets/briquetas que se estudió inicialmente en esta auditoría.

Sobre la base de los antecedentes expuestos se recomienda ejecutar las MEE con las siguientes prioridades:

- MEE HR 5
- MEE HR 6, 2 y 3
- MEE HR 1 (se recomienda evaluar detalladamente su desempeño previsto)
- MEE HR 4 (luego de evaluar detalladamente su complejidad tecnológica)

En la Tabla 4.18 se muestra la estimación de inversiones para la ejecución de las MEE en Ollas de refino, también fue obtenida por consulta a especialistas y mediante cotizaciones de equipos típicos.

En total estas inversiones suman unos \$ 89,5 millones y comprenden montos de mínimo \$ 15 millones para la MEE OR 3 hasta máximo unos \$ 31,2 millones para la MEE OR 2. Todas las MEE consideradas en esta sección de la planta requieren inversiones en equipamiento y obras de mejoramiento para ser materializadas.

La Tabla 4.20 muestra la evaluación económica de las MEE propuestas para OR, flujos de ahorros calculados a 10 años con tasa de descuento del 12%.

La MEE de mejores indicadores (MEE OR 2) corresponde a aquella referida a trabajar con lingotes de 25 kg en lugar de fundir grandes tochos. Esta medida plantea inversiones en equipamiento e instrucción del personal para operar un nuevo sistema de moldeo mecanizado, por ende comprende una cuota de incertidumbre tecnológica por la puesta a punto de la nueva tecnología propuesta.

A continuación le siguen las MEE OR 3 y 4; en el sentido que requieren relativamente bajas inversiones y generan interesantes beneficios; también son medidas de baja complejidad tecnológica con altas probabilidades de éxito.

La MEE HR 1 presenta los más bajos indicadores de las 04 MEE analizadas, fundamentalmente por su relativamente alto monto de inversión y largo periodo de recuperación.

Sobre la base de los antecedentes expuestos se recomienda ejecutar las MEE con las siguientes prioridades:

- MEE OR 2
- MEE OR 3 y 4

No se recomienda implementar la MEE OR 1 a menos que la compañía rediseñe su layout en la zona del HR, ya que en tal caso se podría aprovechar una suerte de economía de escala para la modificación de puente o grúa o similares equipos de manipulación de carga en caliente.

Tabla 4.19: Estimado de inversiones para la ejecución de Medidas de Eficiencia Energética en sección Ollas de Refino

| Item | Medida | Equipo requerido | Valor, MM\$ | Capacidades requeridas | Costo estimado de la medida, MM\$ |
|-------------------------------|---|--|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| MEE OR1 | Transporte plomo líquido horno rotatorio a olla de refino | Olla de transporte 15 t | 10,8 | 15 t | 23,4 |
| | | Adecuación puente grúa 15 t | 10,5 | 15 t | |
| | | Obras | 2,1 | | |
| MEE OR2 | Lingotes de 25 kg | Lingoteras | 2,4 | 200 unidades | 31,2 |
| | | Máquina de moldeo | 24 | 35 u/h | |
| | | Obras | 4,8 | | |
| MEE OR3 | Tapa de olla | Tapa diámetro 4 m con estructura aislada y mecanismo de manipulación | 10,9 | Con sistema de Rotación & levante | 14,9 |
| | | Sistema de mando y control | 2 | | |
| | | Montaje | 2 | | |
| MEE OR4 | Mejorar aislante | Aislante (m2) | 12 | | 20,0 |
| | | Obras e instalación | 8 | | |
| Total MEE consideradas | | | | | 89,5 |

Tabla 4.20 Evaluación económica de las MEE propuestas para Ollas de Refino

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|-----------|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| MEE OR1 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -23.400.000 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 | 13.874.188 |
| | TIR | 58,7% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 54.992.257 | | | | | | | | | | |
| MEE OR2 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -31.200.000 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 | 227.194.562 |
| | TIR | 728,2% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 1.252.499.946 | | | | | | | | | | |
| MEE OR3 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -14.937.500 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 | 40.670.097 |
| | TIR | 272,3% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 214.857.619 | | | | | | | | | | |
| MEE OR4 | AÑO | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| | FLUJO, \$ | -20.000.000 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 | 24.237.774 |
| | TIR | 121,1% | | | | | | | | | | |
| | VAN (12%) | 116.948.829 | | | | | | | | | | |

4.8. Evaluación económica de MEE del área Eléctrica

Como se observa en las Tabla 4.14 y Tabla 4.11, que describen las MEE eléctricas en la nave de fundición (HR & OR), las inversiones en motores de alta eficiencia son del orden de \$ 15 millones; sin embargo al evaluar las MEE con periodos de recuperación bajo 5 años se descubre que las MEE factibles corresponden a cambio de 09 motores con inversiones que no superan los \$ 4 millones. Su aporte a la reducción del consumo global no supera el 2%, por lo que resultan marginales con respecto al total de ahorros e inversiones. No obstante ello se recomienda ejecutar estas MEE, dado su bajo nivel inversional y su probada eficiencia en reducción de gastos energéticos.

4.9. Evaluación económica del proyecto de Inversión de EE

Para hacerla evaluación económica del proyecto se hizo un análisis de marginal, considerando la situación actual, sin proyecto, y la situación futura, con proyecto. El flujo de caja marginal, situación con proyecto vs situación sin proyecto, permite evaluar las condiciones en las que el flujo de ahorros de energía es capaz de sostener las inversiones propuestas.

La Tabla 4.21 muestra el flujo de caja de la situación actual, que se construyó con los siguientes supuestos:

- Producción actual: 17.000 t/año
- Precio del Pb LME: USD 2.210 por ton (equivalente a \$ 1.060.800 con una tasa de cambio de \$ 480 por USD).
- Costos anuales de energía: \$ 970.000.000

Tabla 4.21: Flujo de caja de la situación sin proyecto de EE.

| ITEM / AÑOS | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| INGRESOS | | | | | | | | | | | |
| PRODUCCIÓN (t/AÑO) | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 |
| PRECIO PROMEDIO (\$/t) | 0 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 |
| INGRESOS TOTALES (MM\$) | 0 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 |
| EGRESOS (MM\$) | | | | | | | | | | | |
| COSTOS DE PRODUCCIÓN EXCEPTO ENERGÍA | 0 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 |
| COSTOS DE ENERGÍA | 0 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 | 970 |
| Amortización | 0 | | | | | | | | | | |
| Depreciación | 0 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 |
| EGRESOS TOTALES | 0 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 | 8.767 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO | 0 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 | 9.266 |
| Impuesto a las Utilidades (17%) | 0 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 | 1.575 |
| Utilidad Después de Impuesto | 0 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 | 7.691 |
| Más Depreciación | 0 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 | 584 |
| FLUJO NETO CAJA | 0 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 | 8.275 |

La Tabla 4.22 muestra el flujo de caja de la situación con proyecto que, aparte de las consideraciones anteriores, se construyó con los siguientes datos adicionales:

- Costos anuales de energía: \$ 562.000.000

- Inversiones para MEE Térmicas: \$ 380.715.445 (99,1% de la inversión en MEE)
- Inversiones para MEE Eléctricas: \$ 3.422.143(0,9% de la inversión en MEE)

Tabla 4.22: Flujo de caja de la situación con proyecto de EE

| ITEM / AÑOS | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| INGRESOS | | | | | | | | | | | |
| PRODUCCIÓN (t/AÑO) | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 | 17.000 |
| PRECIO PROMEDIO (\$/t) | 0 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 | 1.060.800 |
| INGRESOS TOTALES (MM\$) | 0 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 | 18.034 |
| EGRESOS (MM\$) | | | | | | | | | | | |
| COSTOS DE PRODUCCIÓN EXCEPTO ENERGÍA | 0 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 | 7.213 |
| COSTOS DE ENERGÍA | 0 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 | 445 |
| Amortización | 0 | | | | | | | | | | |
| Depreciación | 0 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 |
| EGRESOS TOTALES | 0 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 | 8.281 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO | 0 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 | 9.753 |
| Impuesto a las Utilidades (17%) | 0 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 | 1.658 |
| Utilidad Después de Impuesto | 0 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 | 8.095 |
| Más Depreciación | 0 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 | 622 |
| INVERSIONES PARA: | | | | | | | | | | | |
| - MEE electricas | -3,4 | | | | | | | | | | 0,3 |
| - MEE termicas | -380,7 | | | | | | | | | | 38 |
| FLUJO NETO CAJA | -384,14 | 8.717 | 8.755 |

El flujo de caja marginal se muestra en la Tabla 4.23 y muestra los siguientes argumentos a favor de la ejecución del proyecto de inversión:

- El flujo neto anual es de unos M\$ 442 millones
- El periodo de recuperación de la inversión es levemente inferior a 01 año
- Las inversiones del proyecto, considerando la ejecución de todas las medidas en el año 0, se pagan solo con flujo de ahorros

Tabla 4.23: Flujo de caja marginal del proyecto de EE

| ITEM / AÑOS | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|--------------------------------------|-------------|------------|------------|------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| INGRESOS TOTALES (MM\$) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| EGRESOS | | | | | | | | | | | |
| COSTOS DE PRODUCCIÓN EXCEPTO ENERGÍA | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| COSTOS DE ENERGÍA | 0 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 | -525 |
| Depreciación | 0 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| EGRESOS TOTALES | 0 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 | -487 |
| UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO | 0 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 | 487 |
| Impuesto a las Utilidades (17%) | 0 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 | 83 |
| Utilidad Después de Impuesto | 0 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 | 404 |
| Más Depreciación | 0 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| INVERSIONES PARA: | | | | | | | | | | | |
| - MEE electricas | -3,4 | | | | | | | | | | 0,34 |
| - MEE termicas | -380,7 | | | | | | | | | | 38,07 |
| RECUPERACION DE LA INVERSION | -384 | 58 | 500 | 943 | 1.385 | 1.827 | 2.270 | 2.712 | 3.154 | 3.596 | 4.115 |
| FLUJO NETO CAJA | -384 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 442 | 480 |

Los indicadores económicos de la evaluación marginal son los siguientes:

| | |
|--------------|--------|
| T.I.R. | 115,1% |
| V.A.N. (12%) | 2.127 |

En consecuencia, el proyecto presenta todos los elementos que indican que debe ser ejecutado; esto es:

- Excelentes indicadores económicos
- Interesante flujo de ahorros
- Bajo periodo de retorno de las inversiones

4.10. Financiamiento

El proyecto presenta características para financiarse en varios esquemas, que a la compañía le resultan cómodas y atractivas:

- Financiamiento con capital propio
- Financiamiento por banca privada
- Financiamiento mixto (banca y capital propio)
- Financiamiento en modelo ESCO

No se ha discutido con la compañía que modalidad de financiamiento adoptará para su ejecución, pero de acuerdo a la experiencia de otros proyectos se estima que la compañía comenzará a ejecutar las MEE en forma priorizada; con financiamiento propio y con sus capacidades tecnológicas.

4.11. Recomendaciones de Buenas Prácticas para EE e Implementación de MEE

La Planta A tiene incorporadas una interesante batería de buenas prácticas (BP EE) y MEE de eficiencia energética en su operación, incluyendo las siguientes:

- Control de motores en vacío: Apagado de equipos eléctricos cuando no están funcionando
- Arranque de equipos eléctricos de forma secuencial y planificada
- Control del factor de potencia a niveles por sobre el 95%
- Partidores suaves y variadores de frecuencia para la mayoría de los motores trabajando en ciclos de partida-parada

- Control de encendido-apagado de equipos de oficina: luces, PC e impresoras, etc.
- Control de unidades aire acondicionado
- Iluminación eficiente

No obstante, no existe un manual de buenas prácticas de EE incorporado a las operaciones cotidianas de la compañía. En este sentido y a propósito de la próxima implementación de las MEE propuestas en esta auditoría, se propone organizar el diseño y transferencia, al personal, de un manual ad hoc para la compañía.

Por otro lado, la MEE HR 4 comprende un cambio de procedimiento operacional en el HR, que corresponde más bien a una buena práctica con inversiones en capacitación interna y documentación; por lo que de resultar efectiva en términos operacionales y energéticos debe incorporarse tanto al manual de operaciones de la planta como a la sección de buenas prácticas para EE.

4.12. Implementación de las MEE definidas y evaluadas en esta auditoría

En la sección previa se recomienda la ejecución priorizada de las MEE de acuerdo a la siguiente secuencia:

MEE térmicas

- Ejecución de MEE relativas a mejora de aislación de hornos y ollas (incluye tapas para OR)
- Ejecución de MEE relativas a precalentamiento de Diesel y Oxígeno empleando calor residual
- Ejecución de MEE relativas a acondicionamiento de la carga de HR & lingotes para OR

Cabe destacar que ejecución de las MEE térmicas requiere una fase de ingeniería de detalles para definir bien los trabajos de intervención de equipos existentes y montaje de nuevas unidades, así como la programación de actividades en épocas propicias en cuanto a plazo y disponibilidad de las unidades productivas.

MEE Eléctricas

Las MEE eléctricas, que consisten en reemplazo de 09 motores estándar por motores de alta eficiencia, se pueden ejecutar en cuanto la compañía disponga de los equipos en planta y pueda intervenir las unidades productivas.

4.13. Plan de seguimiento

Para realizar el seguimiento de la disminución de los costos energéticos, medibles anualmente, se utiliza el siguiente indicador:

- Consumo de energía por unidad producida en kWh/t

La disminución del consumo energético total de la empresa se estima en un 41,8 %, el cual surge de los cálculos de los ahorros generados. Los valores actuales y esperados del indicador propuesto se observan en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Indicador de seguimiento de las MEE propuestas.

| Índice | Valor actual | Valor propuesto | Unidad |
|---|--------------|-----------------|--------|
| Consumo de energía por unidad producida en HR | 577,09 | 335,22 | kWh/t |
| Consumo de energía por unidad producida en OR | 334,67 | 141,68 | kWh/t |

5. Conclusiones de la memoria

El desarrollo de eficiencia energética (EE) en la industria nacional, siguiendo la corriente mundial, ha tomado cada vez más fuerza. Esta se ha vuelto una práctica estándar en la mejora de procesos existentes y en el diseño de procesos, equipos y edificios. El trabajo realizado en esta memoria, en base a los objetivos, se enfoca en la industria nacional, de manufactura poco compleja, caracterizada por el consumo de combustible para procesos térmicos y motores eléctricos, como se resume a continuación:

i. Desarrollo de una pauta para diagnosticar energéticamente a empresas productivas:

En la primera etapa de este proyecto de título se desarrolla una pauta para diagnosticar energéticamente a empresas productivas. El desarrollo del diagnóstico se representa en un diagrama de flujo con las etapas consideradas. Comienza con el inicio de la auditoría para obtener una visión global de la planta en que se describe el proceso productivo. De esta revisión se desprende el estudio de las etapas productivas, abarcando procesos, equipos y prácticas.

La auditoría se desarrolla evaluando cada una de las partes que componen la planta para determinar su desempeño energético y al consolidar estudio de las partes se obtiene el desempeño energético global de la planta.

ii. Plantear una batería de medidas factibles de incorporar en empresas para mejorar su EE

La teoría de EE para el estudio de equipos o procesos entrega tres enfoques:

Reparación: La revisión a equipos y procesos indica que las pérdidas corresponden a más de un 20% de la energía introducida al sistema. Esto puede tener relación con

- Tecnologías obsoletas
- Equipos dañados
- Diseño del proceso inadecuado (dimensionado, características de equipos, etc.

La intervención en este sistema corresponde a una intervención mayor, lo que implica grandes inversiones pero también significa grandes retornos. Se esperan periodos de retorno de la inversión (PRI) de 5 años o menos. Para PRI de más de 5 años conviene evaluar los otros indicadores propuestos en el trabajo de título. Las deficiencias esperadas y MEE propuestas corresponderían a:

- Equipos (bombas, motores eléctricos, etc.) de baja eficiencia y operando fuera de las especificaciones de diseño (frenados, a RPM incorrectas): Corresponde un cambio a equipos adecuados y de mejor eficiencia.

- Grandes pérdidas de calor por el manto, detectadas por altas temperaturas de pared: Mejoras en la aislación y control de la fuente de calor (combustión, resistencia eléctrica, solar, etc.).

Optimización: Las pérdidas en los sistemas están entre el 5% y el 20% de la energía entregada al sistema. Por lo general se observa:

- Procesos con potencial de mejora
- No utilización de gases de escape
- Tecnología levemente desactualizada
- Procedimiento no considera EE, por lo que existen prácticas ineficientes

Intervenir los procesos no debiese ser complejo, lo que significa costos intermedios y bajos. Los ahorros proyectados para este grupo de MEE son buenos y entregan PRI de dos o menos años. Este grupo de medidas, de gran impacto y de baja inversión son prioritarias en su implementación para comenzar a percibir los ahorros involucrados. Las MEE agrupadas según este enfoque ya fueron estudiadas en capítulos anteriores:

- Buscar parámetros de operación que optimicen el procedimiento.
- Recuperación de calor sensible en gases de escape
- Recambio a equipos de mejores eficiencias
- Buenas prácticas

Mejora: En este enfoque se agrupan las MEE que mejoran un par de puntos porcentuales. Estas medidas son importantes en sistemas grandes ya que en sistemas pequeños los ahorros son imperceptibles. Los beneficios detrás de estas MEE, más allá del ahorro que entreguen, proveen de mejoras adicionales a la planta. En plantas en que ya se ha implementado eficiencia energética el camino a seguir es el propuesto en este enfoque, aunque en este caso las MEE que se puedan proponer son cada vez más caras debido a la complejidad de implementarlas y a la parada de procesos. Potenciales típicos de mejora según este enfoque son:

- Mejorar la combustión
- Recambio a equipos de mejores eficiencias
- Cogeneración
- Inversión en ERNC
- Camisas de agua
- Simbiosis con otras plantas

iii. Para el caso específico diseñar un plan de implementación de medidas y acciones de EE que considere costos de priorización, beneficios y plazos.

Basándose en la metodología desarrollada, se realiza el estudio de un caso. La planta industrial auditada por Innovatec se dedica al reciclaje de metales no ferrosos. Destacan dentro del consumo energético de la planta dos equipos que operan combustionando Diesel Grado B y Oxígeno.

Luego de determinar potenciales de mejora a equipos y procesos, se asignan medidas de eficiencia energética (MEE) adecuadas en base a la batería de medidas factibles confeccionada.

iv. Evaluar alternativas de inversión orientadas a optimizar el uso energético en la empresa y definir un proyecto de inversión específico que considere los requisitos de la banca local.

La metodología de estudio concluye con una evaluación económica de cada MEE y global del proyecto, la que entrega indicadores para priorizar MEE. Así se desarrolla un plan de implementación de medidas y acciones de EE que considera costos de priorización, beneficios y plazos.

En la industria se debe evitar una puesta en marcha de una planta industrial sin las consideraciones adecuadas relacionadas con eficiencia energética. Esto podría ocurrir por una normativa medioambiental permisiva, poca regulación y problemas de financiamiento. Algunas medidas de eficiencia energética pueden implicar retornos poco tangibles, lo que las hace poco interesantes, pero con políticas de inversión a largo plazo casi siempre se obtienen retornos positivos.

Actualmente, una modalidad de cofinanciamiento de medidas consiste en el pago de un crédito en proporción al ahorro mensual, muy atractivo en Chile debido al alto costo energético a la fecha. Dada la política energética actual, sumado al éxito de la Agencia Chilena de Eficiencia Energética, una estrategia interesante podría ser la eliminación al impuesto por este tipo de créditos, para así lograr un incentivo a las empresas a integrar eficiencia energética en todas sus decisiones estratégicas.

6. Bibliografía

- [1] BANCO CENTRAL DE CHILE. 2012. *Informe Cuentas Nacionales de Chile Primer Trimestre 2012*.
- [2] P. STEHLIK. 2006. *Heat transfer as an important subject in waste-to-energy systems*. Applied Thermal Engineering 27(10):1658–1670.
- [3] D. J. MARTIN, J. J. McCABE. 1976. *Energy conservation techniques for the iron foundry cupola. Final report*. U.S. Environmental Protection Agency. Carolina del Norte.
- [4] V. ARI y T. ENGIN. 2005. *Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study*. Energy Conversion and Management 46(4):551–562
- [5] A. S. LAVINE, F. P. INCROPERA, D. P. DEWITT, T. L. BERGMAN. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4ª ed. Jefferson City. John Wiley & Sons Inc. 1033 p.
- [6] A. BEJAN. 1993. *Heat Transfer*. Chichester. John Wiley & Sons, Inc. 675 p.
- [7] PEDRO FERNÁNDEZ DÍEZ. 2013. *Teoría de ingeniería térmica y de fluidos*. Santander. Redsauc. Vol 13.
- [8] G.H. ABD-ALLA. 2002. *Using exhaust gas recirculation in internal combustion engines: a review*. Energy Conversion and Management 43(8):1027–1042.
- [9] Y. BYEONGHUN, K. SUNG-MIN, L. CHANG-EON, L. SEUNGRO. 2013. *Effects of exhaust gas recirculation on the thermal efficiency and combustion characteristics for premixed combustion system*. Energy 49(1): 375–383.
- [10] G. LIUZZO, N. VERDONE, M. BRAVI. 2007. *The benefits of flue gas recirculation in waste incineration*. Waste Management 27(1):106–116
- [11] P. SCHMIDT. 1985. *Fuel oil manual*. Nueva York. Industrial Press Inc. Volumen 10.

- [12] Y. JOUMANI, J-F. SIMON, B. LEROUX. 2009. *Heat recovery for full-oxy Float furnaces with ALGLASS SUN burners: First industrial results*. En: GMIC Energy Efficiency Workshop. 15 de octubre de 2009. Cleveland, EEUU. AirLiquide. 23 p.
- [13] J. R. HOWELL, R. SIEGEL. 1981. *Thermal Radiation Heat Transfer*, 3ª ed. Hemisphere Pub. Corp. 868 p.
- [14] BCS INCORPORATED. 2008. *Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U.S. Industry*. U.S. Department of Energy. Washington.
- [15] WOLFRAM|ALPHA. Wolfram Alpha LLC. 2013. [en línea] <www.wolframalpha.com> [consulta: 03 abril 2013]
- [16] THERMTEST INC. 2013. [en línea] <www.thermtest.com> [consulta: 03 abril 2013]
- [17] THE FURUKAWA BATTERY CO. LTD. 2003. *Lead-based alloy for lead storage battery, plate for lead storage battery and lead storage battery*. Patente de la República de China CN 1533617 A (CN 03800705)
- [18] SERVICIOS DE INGENIERÍA DEUMAN LTDA. 2010. *Guía de asistencia técnica de EE en sistemas motrices - Sistemas de bombeo*. Ministerio de Energía Gobierno de Chile. Santiago.
- [19] Y. AMMAR, S. JOYCE, R. NORMAN, Y. WANG, A. P. ROSKILLY. 2012. *Low grade thermal energy sources and uses from the process industry in the UK*. Applied Energy 8(1):3-20
- [20] R. DIPIPO. 2004. Second Law assessment of binary plants generating power from low-temperature geothermal fluids. Geothermics 33(5): 565–586.
- [21] N. ANSARI, A. SEIFI. 2012. A system dynamics analysis of energy consumption and corrective policies in Iranian iron and steel industry. Energy 43(1):334-343
- [22] PWC CHILE. 2011. *Guía de Implementación de Sistema de Gestión de la Energía basada en la ISO 50001*. AChEE. Santiago.

- [23] M. GUANGYU, C.JIUJU, Z.LIHONG, S. WENQIANG. 2012. Influence of Steam Recovery and Consumption on Energy Consumption per Ton of Steel. Energy Procedia 48:566-571
- [24] M. JOHANSSON, M. SÖDERSTRÖM. 2011. Options for the Swedish steel industry – Energy efficiency measures and fuel conversion. Energy (36)1:191-198
- [25] P. SANEIPOOR, G.F. NATERE. 2011. Heat recovery from a cement plant with a Marnoch Heat Engine. Applied Thermal Engineering (31)10:1734-1743
- [26] T. WANGA, Y. ZHANG, Z. PENG, G. SHU. 2011. A review of researches on thermal exhaust heat recovery with Rankine cycle. Renewable and Sustainable Energy Reviews (15)6:2862-2871