



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO



Joseph Alexander Cabezas Morales

**Evaluación técnica y económica para la sustitución
de motores normales por otros de alta eficiencia,
en pequeñas y medianas empresas mineras**

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATOLICA
DE VALPARAISO

Evaluación técnica y económica para la sustitución de motores normales por otros de alta eficiencia, en pequeñas y medianas empresas mineras

Joseph Alexander Cabezas Morales

Informe final para optar al título de Ingeniero Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Medina Hanke

Profesor Guía

Sr. Domingo Ruiz Caballero

Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth

Secretario Académico

Valparaíso, 20 de Septiembre de 2018

Dedicado a mis padres y a mi futura esposa Camila Espinoza.

Agradecimientos

Mis más grandes agradecimientos a mi familia que estuvo siempre apoyándome en toda mi carrera y siempre confiaron en mí. A mi madre y padre porque aunque no son de demostrar tantos sentimientos los sentí siempre conmigo, a mis hermanos especialmente a Gisela y Varioska que hicieron a veces de madre para mí, a mi hermano Ricardo quien es mi partner inseparable y a los demás que siempre tuvieron palabras de apoyo y tranquilidad para mí persona, a todos los amigos que conocí a lo largo de la carrera y con los cuales sufrimos para llegar donde estamos, a todos aquellos que quedaron en el camino pero que me dieron fuerzas para seguir adelante. Un agradecimiento especial al profesor Edmundo López que comenzó este proyecto junto a mí pero que por cosas de la vida no pudo continuar brindándome su ayuda, su primer impulso me hizo llegar donde estoy, un gran agradecimiento a la minera el soldado que sin su ayuda no podría haber logrado terminar con este estudio que espero sirva para los que vienen después y un agradecimiento lleno de amor para mi futura esposa Camila Espinoza y su familia, pues ella llegó en el momento indicado a mi vida y me llenó de felicidad, para acompañarme en las buenas y en las malas.

Quilpué, 23 de febrero de 2017

J. C

Resumen

El informe consiste en dar a conocer los pasos a seguir para realizar una evaluación técnica y económica de una típica pequeña y mediana empresa minera, para así poder sustituir motores normales por motores de alta eficiencia. Se debe tener en cuenta además las ventajas y desventajas de realizar un cambio de motor y si la situación es la más idónea, para lo cual se toma como ejemplo a la mediana minería del cobre en Chile, esta será representada por la planta (División El Soldado perteneciente al consorcio minero Anglo American Chile), cabe destacar que aunque la división el soldado forma parte del grupo minero Anglo American Chile esta toma decisiones independientes en cuanto a proyectos mineros es por esto que puede ser considerada dentro del rango de las medianas empresas mineras.

Palabras claves: eficiencia energética, motores eficientes, pequeña y mediana empresa minera.

Abstract

The report consists of announcing the steps to be taken to carry out a technical and economic evaluation of a typical small and medium mining company, in order to be able to replace normal engines with high efficiency motors. The advantages and disadvantages of an engine change should also be taken into account, and if the situation is the most appropriate, for which the average copper mining in Chile is taken as an example, the latter will be represented by the plant (Division El Soldado belonging to the mining consortium Anglo American Chile), it is possible to emphasize that although the division the soldier is part of the mining group Anglo American Chile this makes independent decisions regarding mining projects is for that reason that can be considered within the range of the medium mining companies .

Keywords: energy efficiency, efficient engines, small and medium mining company.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	3
Objetivos específicos	3
1 Caracterización de pequeña y mediana empresa minera	4
1.1 La pequeña minería en Chile.	4
1.2 La mediana minería en Chile.	5
2 Alcance del proyecto y desarrollo.	7
2.1 Desarrollo de la metodología a implementar	8
2.1.1 Programa analisis de fallas.	9
2.1.2 Programa de modernización.	10
2.2 Análisis de la informacion existente.....	10
2.3 Evaluación de la sustitución de motores de alto uso y que presentan fallas, por otros motores nuevos eficientes.....	11
2.3.1 Analisis de costos de reparación.	12
2.3.2 Análisis económico del motor usado y nuevo.	13
2.4 Evaluación de la sustitución de motores que deben ser rebobinados por otros motores nuevos eficientes.....	14
2.5 Evaluación de la mejor opción de compra de un motor para un nuevo proyecto.	15
2.6 Uso de un programa de evaluación económica para la sustitución de motores normales por otros de alta eficiencia en pequeñas y medianas empresas mineras.....	16
3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.....	17
3.1 Programa Análisis de Fallas	17
3.1.1 Distribucion de Weibull (DW) [3].....	18
3.1.2 Aproximación de la duración de un motor usando distribución de Weibull.....	19
3.1.3 Valorización de las pérdidas anuales de anergía	21
3.1.4 Costos de operación anual (COA)	21
3.1.5 Costos de reparación (CR)	22
3.1.6 Costos de inversión	23

3.1.7 Flujos del proyecto	24
3.2 Programa de modernización	26
3.2.1 Evaluación de la sustitución de un motor que debe ser rebobinado, por un motor nuevo más eficiente	26
3.2.2 Valorización de las pérdidas anuales de energía	26
3.2.3 Costos de operación anual (COA)	26
3.2.4 Costos de inversión del rebobinado (CIR)	26
3.2.5 Costos de inversión del motor nuevo	27
3.2.6 Flujos del proyecto	27
3.3 Evaluación para la mejor opción de compra de un motor para un nuevo proyecto	28
3.3.1 Valorización de las pérdidas anuales de energía	28
3.3.2 Costos de operación anual (COA)	28
3.3.3 Costos de inversión del motor nuevo	28
3.3.4 Elección de la alternativa más rentable.....	28
4 Consideraciones generales.....	30
4.1 Consideraciones generales en los cálculos asociados a las medidas de UEE [7]	30
4.2 Modelos estadísticos asociados a las medidas de UEE	31
4.2.1 Determinación de la eficiencia nominal de un equipo en planta.....	31
4.2.2 Determinación de la eficiencia real de un equipo en planta.....	34
4.2.3 Obtención de PEC	35
4.2.4 Obtención de PEAU.....	35
4.2.5 Obtención de PEPR	35
5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)	36
5.1 Alcance del proyecto [8]	36
5.2 Resultados esperados para el proyecto piloto	38
5.2.1 Caso 1: Sustitución por un Motor EFF1	41
5.2.2 Caso 2: Sustitución por un Motor EFF2.....	43
5.2.3 Caso 3: Sustitución por un Motor EFF3.....	44
6 Normativa	45
6.1 Normativa de UEE utilizada.....	45
Bibliografía	51

Introducción

La energía eléctrica es un insumo fundamental para la mayoría de las plantas industriales, particularmente para la pequeña y gran minería del cobre debido a la naturaleza de los procesos que en ésta se desarrollan. Si se tiene en cuenta que dicho recurso ha sufrido considerables alzas en el último tiempo, es natural el estudiar medidas que permitan un uso eficiente de la misma, para de esta manera reducir los costos operacionales, mientras que a la vez, se fortalece la política de uso eficiente de energía.

Se observa que en Chile existen tres sectores de la industria minera claramente diferenciados. Entre estos destacan las empresas de la gran minería, las que da cuenta mayoritaria de la producción de cobre, oro y plata alcanzando aproximadamente al 90% del total extraído [1]. Esta minería no resulta atrayente para la finalidad del proyecto, ya que esta cuenta con lo último en tecnología en mejora de eficiencia, siendo la pequeña y mediana minería el sector con menos conocimiento sobre el tema y donde claramente se puede aprovechar de realizar análisis técnicos y económicos para la mejora de la eficiencia.

Por su parte la mediana minería, sector conformado por aproximadamente 30 empresas, también da cuenta de una realidad diferente. Estas compañías en forma mayoritaria, tiene una estrecha relación con Enami (Empresa nacional de minería), ya que dicha empresa estatal ha entregado históricamente apoyo en materias de comercialización y procesamiento de minerales. Este sector por sí sólo y para graficar su importancia a nivel nacional da cuenta de exportaciones que superan otras relevantes del país como la salmonera, vitivinícola y de celulosa, por lo que es importante que mantenga su crecimiento. Es por ello, que estos segmentos de la minería chilena son relevantes para un desarrollo armónico del sector, junto a la gran minería.

Los motores eléctricos son los corazones de una planta o de un proceso minero. Las aplicaciones de motores incluyen bombas, ventiladores, compresores, molinos, trituradoras, grúas, sopladores, etc.

Las estadísticas han demostrado que a pesar de su fiabilidad y simplicidad de construcción, la tasa anual de fallas de motores se estima entre 3-5% por año, y en casos extremos hasta 12% [2], como en la industria del papel.

Se estima que el 92 % de los fallos de los motores eléctricos ocurren en el arranque [2]. La mayoría de estos fallos ocurren debido a la baja resistencia. También son comunes los fallos por sobrecorriente.

El tiempo de inactividad en una fábrica puede ser muy caro y, en algunos casos, puede exceder el coste de la sustitución del motor.

Es por esto que se debe tener el tino necesario para saber cuándo y en qué ocasión se puede sustituir un motor normal por uno de alta eficiencia.

En este contexto se enmarca el presente trabajo de proyecto de titulación, teniendo como objetivo fundamental, servir de guía para la implementación de proyectos de uso eficiente de la energía eléctrica en el parque de motores asociados a plantas concentradoras de cobre como de máquinas más utilizadas en la minería.

Para realizar la evaluación técnica económica de cada una de las medidas propuestas en el presente trabajo, se utilizaron datos obtenidos de la empresa minera El Soldado yacimiento minero de la comuna de Nogales, Según la bibliografía consultada, proyectos de este tipo pueden ser considerados como mecanismos de desarrollo limpio, por lo que es posible el obtener renta a través de la venta de bonos de carbono, lo que hace proyectos de este tipo aún más atractivos.

Es por esto que el siguiente informe tiene como objetivo ser un texto guía para el futuro ingeniero o toda persona con conocimientos sobre el tema, a la hora de tener que emprender un proyecto de eficiencia energética en motores eléctricos, referidos a la pequeña y mediana empresa minera, es aquí donde se podrá apoyar a la hora de tener que elegir la mejor opción dentro de todas las que maneja, todo esto apoyado evaluaciones técnicas y económicas respaldadas por indicadores económicos como (VAN, TIR, ETC...)

En la gran pequeña y mediana minería existe un significativo potencial no explotado de eficiencia energética (EE), entre los cuales, aquellos vinculados con la energía eléctrica son fundamentales. Estos ahorros de energía se vinculan básicamente, con la sustitución de equipos viejos y con la implantación de equipos de control, en base a electrónica de potencia. Se comprende la importancia de este tema por tanto este informe apoya proyectos de eficiencia energética, en cuanto ellos permiten simultáneamente un ahorro de energía y un mejoramiento de la confiabilidad con que operan sus instalaciones.

Según lo anterior, se puede decir que las metas que se persiguen con la elaboración de este informe de proyecto 2 son:

- Desarrollo de un sistema de evaluación técnica y económica de proyectos de eficiencia energética asociado al parque de motores en la pequeña y mediana minería del cobre.
- En particular, se analiza el caso de una planta representativa de la industria de la mediana minería del cobre en Chile (División El Soldado perteneciente al consorcio minero Anglo American Chile) para así entender el proceso a seguir para la sustitución de motores.

A partir de estos dos se desprenden los **objetivos secundarios**.

- De acuerdo a los resultados, se podrá expandir dicha metodología a la pequeña minería lo cual debería resultar más fácil para el momento de selección de motores para reemplazo.
- Fomentar la eficiencia energética indirectamente.

Objetivos generales

- Analizar técnico y económico para la sustitución de motores normales por otros de alta eficiencia en pequeñas y medianas empresas mineras.
- De acuerdo a los resultados, se podrá expandir dicha metodología a la pequeña minería.

Objetivos específicos

- Desarrollar un programa para análisis de la mejor opción para la sustitución de motores normales por otros de alta eficiencia
- Caracterizar a la pequeña y mediana empresa minera.

1 Caracterización de pequeña y mediana empresa minera.

1.1 La pequeña minería en Chile.

La Pequeña Minería ha sido un actor importante en el desarrollo minero nacional. A través de un constante esfuerzo por encontrar nuevos cuerpos mineralizados, los productores de este sector han dejado en evidencia depósitos minerales que en muchos casos ha permitido el posterior desarrollo de importantes proyectos de mediana y gran minería.

La caracterización de la pequeña minería a nivel mundial no tiene parámetros universales y uniformes. Incluso en Chile no se ha establecido una norma que la defina en forma única. Asimismo, la pequeña minería se puede subdividir en dos segmentos, la pequeña minería propiamente tal y un segmento denominado pequeña minería artesanal. No existe tampoco un definición clara que distinga estos dos segmentos, pero se puede señalar que el sector artesanal es el más precario e informal. Sólo para efectos de tributación se define a la minería artesanal como una faena con un máximo de cinco personas dependientes.

Las definiciones legales a nivel nacional respecto a la pequeña minería se muestran en la Tabla 1-1 [2]

Estas definiciones son ampliamente aceptadas en la industria de la minería en Chile, ya que permiten identificar con un alto grado de exactitud, las diferencias entre una pequeña y mediana empresa minera, un dato muy valioso para este informe ya que trabajaremos con estos 2 sectores y estos deben estar completamente diferenciados uno del otro.

Para posteriores análisis económicos estos datos son de gran ayuda pues estos cálculos son los que entregan los resultados finales a la hora de tomar una decisión.

1 Caracterización de pequeña y mediana empresa minera.

Tabla 1-1 Definiciones legales de pequeña minería artesanal.

Sernageomin Definición en base a Trabajadores y Horas Trabajadas	Código de Minería Definición en base a Trabajadores	Ley de Impuesto a la renta (Minería Artesanal) Definición en base a Trabajadores	ENAMI Definición en base a Producción
Menor a 80 trabajadores	Menor a 12 trabajadores	Menor a 5 trabajadores	Son los productores que en forma individual venden o benefician mensualmente hasta 10.000 toneladas de minerales o su equivalente en productos mineros.
Menor a 200.000 horas trabajadas			

Bajo este contexto otros países, al igual que Chile, utilizan diversos parámetros para clasificar la pequeña minería, tales como: nivel de producción, cantidad de propiedad minera, capital invertido o número de trabajadores, y existen otras naciones que simplemente no la diferencian de la mediana y gran minería.

1.2 La mediana minería en Chile.

La caracterización de la mediana minería en Chile da cuenta que es un sector dentro de la industria minera con dinamismo y proyecciones de crecimiento. Actualmente, existen más de 30 compañías en este segmento de la minería que aportaron 307.400 toneladas de cobre fino, 7.243 kg de oro y 105.367 kg de plata, entre otros metales, durante el 2012. En cuanto a la producción de cobre, ésta representó el 5,6% del total nacional. Estas empresas se encuentran ubicadas principalmente en la zona norte y central de Chile. La definición de mediana minería no está tampoco normada en forma clara en Chile, existiendo varias definiciones, en base al número de trabajadores o según la producción. Esta última es la que utiliza el Instituto de Ingenieros de Minas y es la que tiene mayor aceptación Tabla 1-2 [2]

1 Caracterización de pequeña y mediana empresa minera.

Tabla 1-2 Definiciones legales de la mediana minería.

Sernageomin Definición en base a Trabajadores y Horas Trabajadas	Instituto Ingenieros de Minas de Chile Definición en base a Producción	ENAMI Definición en base a Producción
Entre 80 y 400 trabajadores	Explotación entre 300 y 8.000 toneladas de mineral al día (menos de 50.000 toneladas de cobre fino por año aproximadamente)	Es aquel sector de productores, actuales o potenciales, que en forma individual venden o benefician mensualmente más de 10.000 toneladas de minerales o su equivalente en productos mineros.
Entre 200.000 horas y 1.000.000 de horas trabajadas		

2 Alcance del proyecto y desarrollo.

Debido a la política de uso eficiente de la energía establecida como directriz del sistema de gestión de El Soldado, y a la importancia que ha adquirido en la agenda nacional el tema en los últimos años, es que se desarrolla un programa que promueva el UEE (Uso Eficiente de la Energía), y con esto un mayor consumo de cobre, sentando un precedente en la industria de la gran minería en Chile. De los antecedentes expuestos en este capítulo se deduce dos aspectos fundamentales a tomar en cuenta en cualquier programa de UEE.

- Instalaciones de larga data: Se trata de instalaciones mineras de larga data, razón por la cual un proyecto de UEE debe considerar la medición de la obsolescencia del equipamiento, promoviendo con justificaciones de carácter económico, la modernización de parte de los equipos y procesos.

- Instalaciones que hacen uso intensivo de la energía: Se trata de instalaciones que hacen un uso intensivo de la energía, de la eléctrica en particular, de modo que las técnicas que propenden al UEE adquieren vital importancia.

El proyecto consiste en desarrollar un software (planilla de cálculo) que permita realizar la evaluación técnica y económica de medidas de eficiencia energética para cualquier empresa de la mediana minería en Chile, tomando como referencia los datos obtenidos desde la empresa minera El Soldado.

Las medidas de UEE que se someterán a dicha evaluación técnico-económica operan sobre el parque de motores de un determinado lugar y pueden ser divididas en dos grandes grupos de acuerdo al espíritu que se persigue con la implementación de cada una.

2.1 Desarrollo de la metodología a implementar

La metodología a implementar se resume en el cuadro sinóptico expuesto en la siguiente figura:

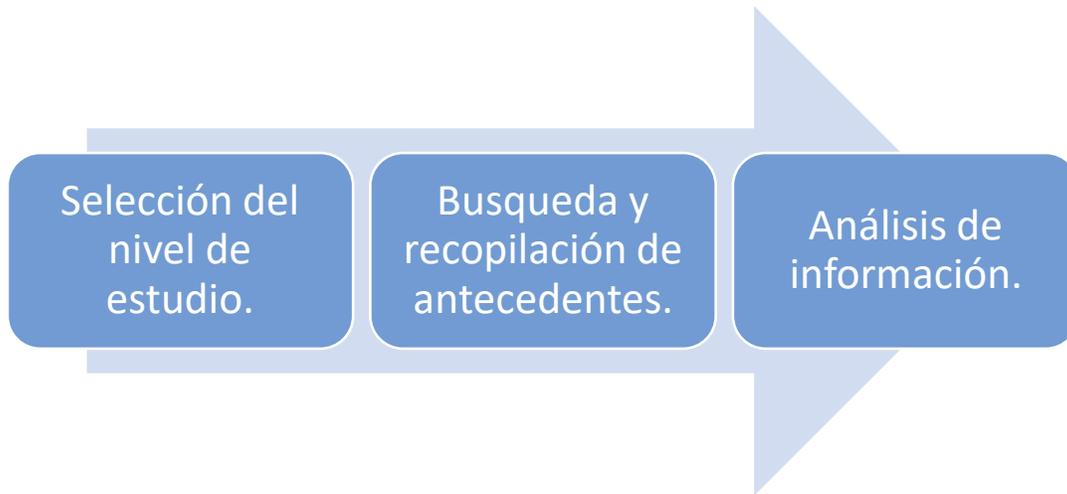


Figura 2-1 Cuadro sinóptico de la metodología a seguir.

En él se puede observar que el proceso parte con la selección del nivel de estudio, o área de implementación del programa de UEE dentro del proceso productivo de la planta. Para lograr lo anterior se realizará un acopio y posterior análisis de información primaria o general de la planta, mediante lo que se espera obtener la definición de las etapas del proceso productivo de DES (División El Soldado). Posteriormente, se obtendrán antecedentes generales para dichas etapas, lo que en conjunción con el uso de criterios de selección claramente definidos, permite realizar la selección del nivel de estudio.

Una vez realizado lo anterior, se realizará una caracterización del nivel de estudio seleccionado, para finalmente recopilar y analizar antecedentes específicos sobre dicho nivel.

Posteriormente, se realiza la evaluación misma del programa de “Sistema de evaluación técnico - económica de medidas de uso eficiente de la energía eléctrica en el parque de motores de una planta concentradora de cobre”.

Para esto se divide la metodología en dos grandes grupos. Por un lado se tiene un accionar basado en el análisis de las estadísticas de fallas de los equipos seleccionados, que consiste en obtener mediante histogramas de fallas de grupo de motores con características muy similares de funcionamiento, una función de distribución de Weibull que modele el comportamiento de dichas fallas. Con dicho modelo se obtienen dos parámetros importantes: el tiempo medio de fallas y la probabilidad de falla, lo que permitirá someter a los equipos a una evaluación de la sustitución de motores con alta frecuencia y probabilidad de fallas por motores eficientes, cuando el caso así lo amerite.

Por otra parte, se tiene un proceder basado en un programa de modernización y actualización de los procesos productivos asociados a los motores seleccionados, que se basa en dos formas distintas de abordar el problema.

Mediante el análisis de la información entregada previamente, se observa la presencia de motores en planta que han sufrido fallas intempestivas, y deben ser sometidos a un mantenimiento correctivo. En particular se analiza el caso de fallas en el bobinado del estator, analizando la evaluación de la sustitución de motores que deben ser sometidos a un proceso de rebobinado, por motores eficientes.

También se analiza la opción de compra de un motor para ser implementado en planta, que muestre la mejor rentabilidad, comparativamente hablando.

Es importante el señalar que en todas las medidas de UEE que se implementarán, no se considera para realizar la evaluación económica, la valorización económica asociada a la pérdida de producción que se tiene cuando se interviene un motor activo en el proceso productivo de la planta. Lo anterior se justifica por dos razones:

- El programa de recambio se realizaría conforme al plan de mantenimiento programado.
- Es tremendamente complejo y subjetivo el realizar una valorización de la pérdida de producción asociada a la detención de un motor en particular.

Para todas las medidas de UEE descritas anteriormente, se considera el recambio de motores de idénticas características de placa, con lo que no se introducen mejoras en las condiciones de operación de los motores. Esto se debe principalmente a que se desea observar únicamente los resultados de la implementación de dichas medida sin el efecto que pudiese producir en el Costo de Inversión, Mantenimiento - Reparación y Operación el cambio en las condiciones de operación de un motor, no significando lo anterior que dichas medidas puedan ser abordadas en un estudio posterior, ya que pueden ser fuente de un importante ahorro energético.

A continuación se desglosan cada una de las medidas mencionadas anteriormente, que forman parte del programa de UEE promovido por este estudio.

Se tiene que dependiendo del análisis de la información se pueden tomar 2 acciones a seguir:

2.1.1 Programa analisis de fallas.

- se analiza la opción de rebobinar el estator de los motores en la planta en la que necesiten dicho procedimiento, versus la compra de un motor nuevo y eficiente.

2.1.2 Programa de modernización.

- Mediante histogramas de fallas se modela el MODELO WEIBULL [3] que modela el comportamiento de dichas fallas

2.2 Análisis de la información existente.

En esta etapa se busca recopilar todo antecedente que sirva para la selección del nivel de estudio, o área de la producción donde se implementarán las medidas de UEE. Para esto se realiza una recopilación y posterior análisis de información primaria o general de la planta, obteniendo la definición de las etapas del proceso productivo de DES. Una vez realizado lo anterior, se obtendrán antecedentes generales para dichas etapas. Esto permitirá realizar una clasificación del parque de motores existente en las diversas partes de la planta, lo que en conjunción con el uso de criterios de selección claramente definidos, permitirá realizar la selección del nivel de estudio.

Posteriormente se realizará una caracterización del nivel de estudio seleccionado, para finalmente recopilar y analizar antecedentes específicos sobre dicho nivel, que permitan la implementación de cada una de las medidas que contempla el programa de UEE.

Este paso es de suma importancia ya que entrega el grado de importancia del sector dentro de la empresa minera, este proyecto está enfocado para diferenciar un sector de otro ya que se consideran los sectores de mayor consumo y gasto para su pronta modernización, esto se ve traducido en cambio de motores o reparación lo que conlleva a la empresa a realizar un gasto, pero que a la larga se traducirá en ganancias, puesto que el uso eficiente de la energía es lo que busca y es su principal enfoque.

La caracterización del nivel de estudio sirve de comparación entre sectores para ver cuál es la primera prioridad es por esto que este paso no se puede saltar ya que de nada serviría aplicar medidas de UEE a un sector en del cual no se tendrá mayor retorno de dinero si no que mayormente pérdidas.

El siguiente cuadro sinóptico resume las acciones a realizar para obtener y procesar la información necesaria para la realización del proyecto.

Es de suma importancia seguir cada una de sus partes en el orden indicado para así tener un mejor resultado y poder trabajar de la mejor forma posible, se creó el cuadro sinóptico con la función de servir de ayuda a quien quiera emprender un proyecto de uso eficiente de energía.

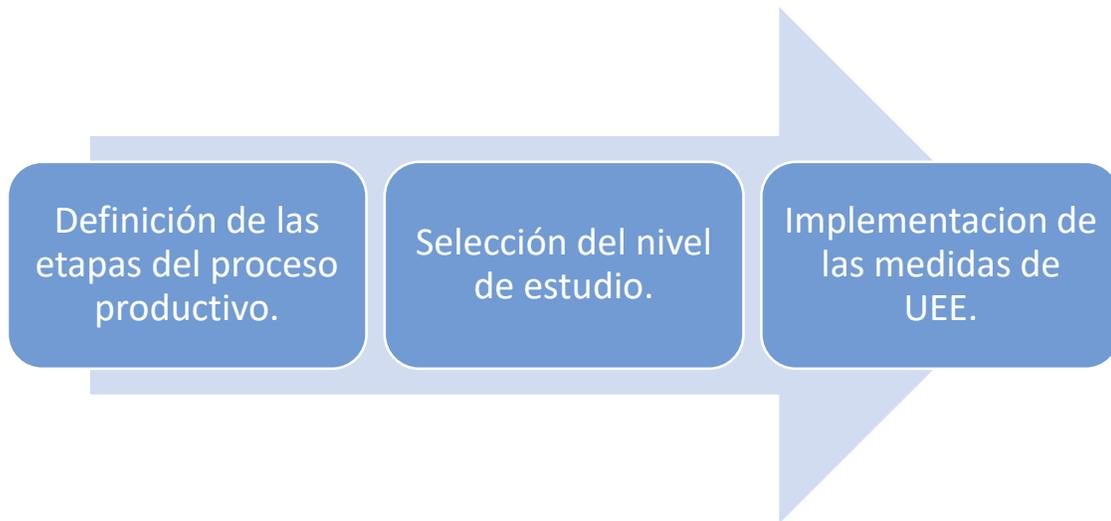


Figura 2-2 Cuadro sinóptico metodología a seguir para análisis de información existente.

Para la definición del proceso productivo se tiene que recopilar los siguientes antecedentes generales:

- Consumo energético por nivel de proceso DES
- Planos de las instalaciones (procesos productivos e instalaciones eléctricas)
- Informes de mantención y operación de los equipos eléctricos.

Para lo cual se abastecerá de información en los departamentos de mantención, adquisiciones, abastecimiento y o servicios.

La selección del nivel de estudio depende de los criterios de selección mencionados en el informe anterior, una vez elegido el nivel de estudio aplicamos medidas de UEE que se guíen según la normativa.

2.3 Evaluación de la sustitución de motores de alto uso y que presentan fallas, por otros motores nuevos eficientes.

Mediante la inclusión de este criterio como parte de la metodología a implementar en el programa de EE, se pretende evaluar la rentabilidad asociada a la sustitución de motores con alto uso y probabilidad de fallas, según la estadística de fallas de la planta que conforma parte de la información recolectada previamente, por motores más eficientes. Es claro, según lo anterior, que la evaluación se debe hacer para este caso sobre motores que se encuentran operativos.

Para realizar el análisis económico se contrastan los costos de operación, inversión y reparación de ambas posibilidades, es decir, continuar con la operación de los motores obsoletos v/s la adquisición de motores nuevos eficientes. De esta manera se obtendrán índices económicos

relevantes y representativos que permitan evaluar el proyecto desde el punto de vista económico, como lo son el TIR, VAN y PRC. Dichos indicadores serán comunes a todas las evaluaciones técnicas-económicas llevadas a cabo en el presente documento.

Se analiza el reemplazo de un motor en uso con una alta probabilidad y frecuencia de fallas, por un motor de mayor eficiencia, conforme a los criterios de eficiencia que se encuentran señalados en la sección normativa.

El siguiente cuadro sinóptico resume las acciones a realizar para el programa de fallas.



Figura 2-3 Cuadro sinóptico metodología a seguir para el programa de fallas.

2.3.1 Análisis de costos de reparación.

Los análisis de costos de reparación se realizarán utilizando la siguiente fórmula:

$$CR(i) = PF(I) * CMC \tag{2-1}$$

Dónde:

CR (i) = Costos de reparación para el año i.

PF (i) = horizonte de evaluación del proyecto.

CMC = costos asociados al mantenimiento correctivo.

2.3.2 Análisis económico del motor usado y nuevo.

Este estudio se lleva a cabo comparando el análisis económico de un motor nuevo con el análisis del costo de reparación de uno viejo de la ecuación (1-1).

Puesto que se tienen los costos de inversión del motor nuevo (CI) que hablan del valor monetario del motor y sus costos de operación anual (COA)

Los análisis de costos de operación anual de un motor nuevo se realizaran utilizando la siguiente ecuación:

$$COA = (P_{nom} * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta \quad (2-2)$$

Dónde:

COA= Costos de operación anual.

Fc= Factor de carga.

Hrsan= horas anuales de operación.

Pe= precio monómico de la energía [4].

η = eficiencia del motor.

Precio monómico de la energía: Monto total que equivale a un precio único por concepto de venta o compra de energía y potencia. Es igual al ingreso o costo total por venta o compra de energía y potencia dividido por la energía total vendida o comprada.

Finalmente se comparan los indicadores económicos como: Valor actual neto (VAN), Tasa interna de retorno (TIR) y el periodo de recuperación del capital (PRK). Así después elegimos la mejor opción para aplicar medidas de UEE.

La comparación de estos indicadores dará una visión más amplia del proyecto a desarrollar y será de gran ayuda para la toma de una decisión, cada una de las ecuaciones escogidas no hace más que facilitar la toma de decisiones dentro de un proyecto de uso eficiente de energía, es por esto que lo que se espera es ver un menor costo de inversión y una mayor ganancia, siempre teniendo en cuenta la eficiencia de sus motores y como afectan estos en los aspectos técnicos y económicos de la empresa minera.

2.4 Evaluación de la sustitución de motores que deben ser rebobinados por otros motores nuevos eficientes.

Mediante la inclusión de este criterio como parte de la metodología a implementar en el programa de EE, se pretende evaluar la rentabilidad asociada a la sustitución de motores que deben ser rebobinados, es decir que no se encuentran operativos, por motores nuevos eficientes.

Para realizar el análisis económico se contrastan los costos de operación e inversión de ambas posibilidades, es decir, el rebobinado de los motores obsoletos y la adquisición de motores eficientes, para así obtener índices económicos relevantes y representativos que permitan evaluar el proyecto desde el punto de vista económico como son el TIR, VAN y PRK.

El siguiente cuadro sinóptico resume las acciones a realizar para el programa de rebobinados:

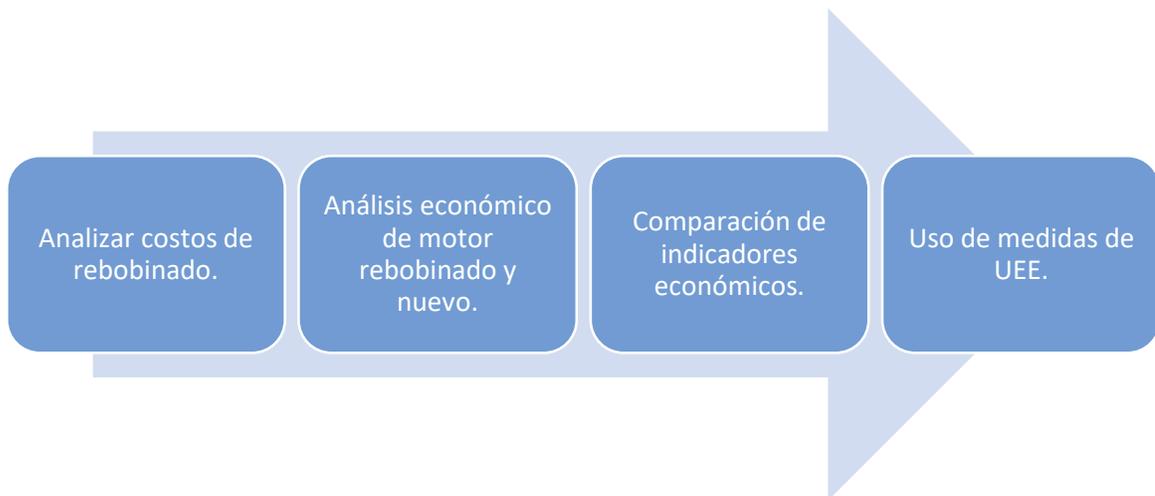


Figura 2-4 Cuadro sinóptico metodología a seguir.

Se analizan los costos de rebobinar un motor con su bobinado dañado, para esto se realiza una cotización de rebobinado, con estos costos se realiza un análisis económico al comparar costos de rebobinado del motor vs costo monetario de la compra de un motor nuevo eficiente y sus costos operacionales anuales como lo se indica en la ecuación (2-2)

La comparación de estos datos económicos será de gran ayuda para la toma de decisiones, ya que si se advierte que es más conveniente rebobinar un motor, antes que cambiarlo por otro nuevo, claramente se tomara esta decisión, pero esta debe ser acompañada de un indicador económico sólido.

2.5 Evaluación de la mejor opción de compra de un motor para un nuevo proyecto.

Mediante la inclusión de este criterio como parte de la metodología a implementar en el programa de UEE, se pretende determinar la mejor opción desde el punto de vista técnico - económico, al considerar la compra de un motor nuevo para suplir la demanda de este tipo de dispositivos, cuando se desea expandir una parte o la totalidad de planta.

Las opciones consideradas se diferencian entre sí, por el valor que la eficiencia nominal del equipo alcanza, al incidir esto en el costo de fábrica del mismo. Para el análisis se consideran las normativas de motores eficientes expuestas en la sección normativas, es decir, EFF1, EFF2 y EFF3.

Para analizar la rentabilidad de cada opción, de manera de poder establecer una relación de orden con lo anterior, se consideran todos los costos de inversión y operación en el horizonte de evaluación. Dichos valores son llevados al año cero, para obtener un costo de inversión y operación equivalente a todo el horizonte de evaluación, que permita discriminar la alternativa más rentable.

El siguiente cuadro sinóptico resume las acciones a realizar para el programa de evaluación de nuevos proyectos:

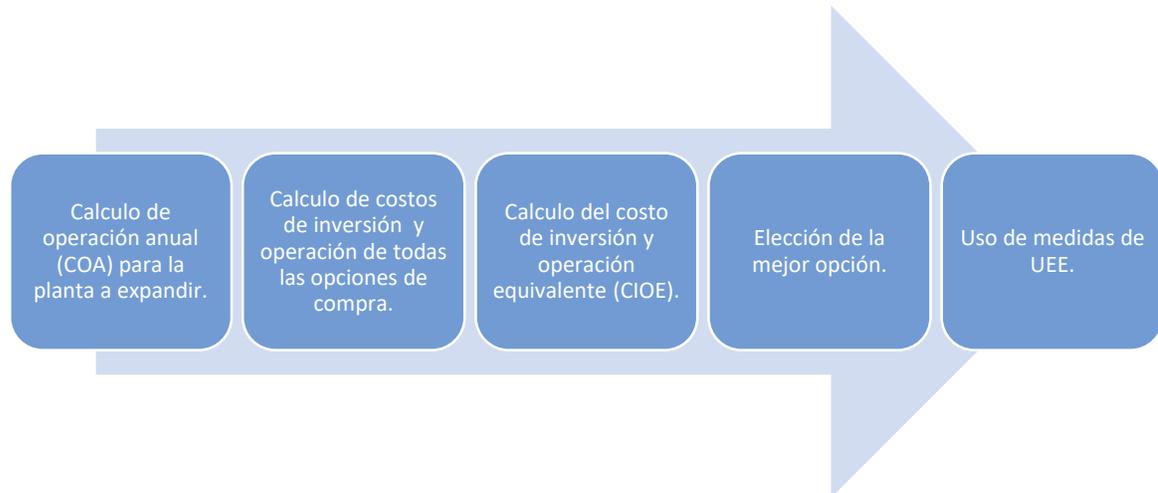


Figura 2-5 Cuadro sinóptico metodología a seguir.

Para la evaluación de la mejor opción de compra de un motor para un nuevo proyecto se comienza realizando el cálculo de operación anual (COA) para lo cual se ingresan valores del sector de la planta a expandir donde se desea implementar el uso de motores eficientes. Para este procedimiento se utiliza la ecuación (1-2).

Posteriormente se realizan los cálculos de inversión y operación de todas las opciones de compra, en todos los años de compra. Luego se llevan todos los flujos del proyecto al año 0, para la opción

k de compra, usando la siguiente ecuación que entrega los costos de inversión y operación equivalentes (CIOE):

$$CIOE^k = CI^k + \sum_{i=1}^n COA(i) * \frac{1}{(1+r)^i} \quad (2-3)$$

Se debe encontrar el k para tener la mínima CIOE.

Se realiza la elección de la mejor opción y posteriormente se aplican medidas de UEE.

2.6 Uso de un programa de evaluación económica para la sustitución de motores normales por otros de alta eficiencia en pequeñas y medianas empresas mineras.

Teniendo estas tres ecuaciones claramente definidas además de los indicadores económicos es que se crea un programa en Excel tal que al ingresar los datos requeridos para lo que se quiere hacer de entre las opciones que entrega este proyecto, arroje la mejor opción a elegir en el ámbito económico.

El programa se pondrá a prueba analizando el área de proceso de concentración del cobre de la mediana Empresa Minera el Soldado

3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.

El software es un conjunto de ecuaciones integradas en una planilla de Excel, estas fueron escogidas acorde su importancia dentro del proyecto y se presentan a continuación.

3.1 Programa Análisis de Fallas

Se analiza el reemplazo de un motor en uso con una alta probabilidad y frecuencia de fallas, por un motor de mayor eficiencia, conforme a los criterios de eficiencia que se encuentran señalados en la sección normativa del segundo informe.

Se analizan los flujos de caja del proyecto, para obtener indicadores económicos que reflejen la rentabilidad de este. Se consideran como parte relevante del problema, los costos de inversión, reparación y operación (costos asociados al consumo de la energía eléctrica).

Para determinar la probabilidad de falla se aproxima la estadística de fallas de un grupo homogéneo de motores en uso que se desea reemplazar, utilizando la distribución de Weibull, que es una distribución de probabilidades continua de las más aceptadas dentro de la teoría de duración de elementos, principalmente porque permite modelar casos en que la tasa incremental de fallas es creciente, decreciente o constante a través del tiempo. Algunas consideraciones a tomar en cuenta sobre esta distribución se exponen a continuación.

Se utilizaron tres tipos de distribuciones de probabilidad para el cálculo de ecuaciones presentes en el informe, estas son:

- Distribución de Weibull
- Distribución Uniforme Discreta
- Distribución Binomial

Siendo la distribución de Weibull la que alcanzaba valores más exactos y la que se encuentra más aceptada para este tipo de cálculos económicos.

3.1.1 Distribucion de Weibull (DW) [3]

La distribución de Weibull queda definida por las siguientes expresiones:

- Función Densidad de Probabilidad

$$f(x) = \frac{\alpha}{\beta} * \left(\frac{x}{\beta}\right)^{(\alpha-1)} * e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha}, x \geq 0 \quad (3-1)$$

(α y β) parámetros de la función

(α y β) > 0

- Función de Densidad Acumulada

$$F(X) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1 - e^{-\left(\frac{x}{\beta}\right)^\alpha} \quad (3-2)$$

- Valor medio de la duración de un equipo regido por una función de distribución de Weibull, viene dada por:

$$E(X) = \beta * \Gamma * \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) [\text{años}] \quad (3-3)$$

- Probabilidad de falla en el año i, de un equipo regido por una función de distribución de Weibull viene dada por:

$$PFalla(\text{año } i) = 100 * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (\text{año } i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{\text{año } i^\alpha}{\beta^\alpha}} [\%] \quad (3-4)$$

Entrega la probabilidad de que falle el motor en un año determinado, de suma importancia para tomar la decisión de si es conveniente cambiar o no por otro nuevo o uno de mayor eficiencia.

3.1.2 Aproximación de la duración de un motor usando distribución de Weibull

De acuerdo a la ecuación (3-1), la función de distribución de Weibull queda definida al asignarle valores a los parámetros α y β , por lo que si se quiere aproximar la estadística de falla de un motor en uso usando esta distribución, se deben elegir convenientemente los valores de dichos parámetros. Para ello se realiza una minimización de la suma del módulo del error relativo, o Error Absoluto Relativo Total (EART), entre los valores obtenidos mediante la distribución de Weibull y los valores que se registran en la estadística de falla de un grupo de motores homogéneos. Esto es, encontrar α y β tal que:

$$\text{Min EART} = \sum_i (100 + \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * i^{\alpha-1} * e^{-\frac{i^\alpha}{\beta^\alpha}}) = 100 \quad (3-5)$$

Con: $\alpha > 0$ y $\beta > 0$, i = año de evaluación, X_i = estadística de falla del año de evaluación.

Obtenidos los valores de α y β , se calcula el Valor Medio de la duración del equipo conforme a la ecuación (3-3). Dicho valor entrega valiosa información del comportamiento del motor ya que permite clasificarlo de acuerdo a dos categorías, las que son:

- Motor Eficiente $E(X) > 3,5$ [años] (Valor representativo según la bibliografía consultada)
- Motor Obsoleto $E(X) < 3,5$ [años] (Valor representativo según la bibliografía consultada) [5].

Lo anterior se justifica ya que se pueden observar dos grandes grupos de motores en la industria de la minería en Chile. Se observa la presencia de una buena cantidad de motores que presentan un tiempo medio entre fallas que se encuentra entre 1,14 y 1,62 años. Por el contrario, existen grupos de motores cuyo tiempo medio entre fallas es manifiestamente superior, entre 2,81 y 4,94 años.

La Tabla siguiente muestra los valores estadísticos de falla sugeridos para motores obsoletos y para motores nuevos eficientes, los que se propone emplear como parámetros para evaluar un programa de uso eficiente energía, cuando no se cuente con estadísticas de fallas.

De esta manera siempre se podrá realizar los cálculos requeridos para un análisis económico, se pretende no dejar ninguna grieta en la investigación.

3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.

Tabla 3-1 valores estadísticos de fallas para motores eficientes y obsoletos.

Tipo de motor	α	β	Tiempo medio entre fallas
Motores eficientes	12,081	4,571	4,36
Motores obsoletos	2,016	1,783	1,58

En la siguiente figura se muestran en un mismo gráfico, las distribuciones de fallas que se obtiene con los parámetros de la Tabla 3-1

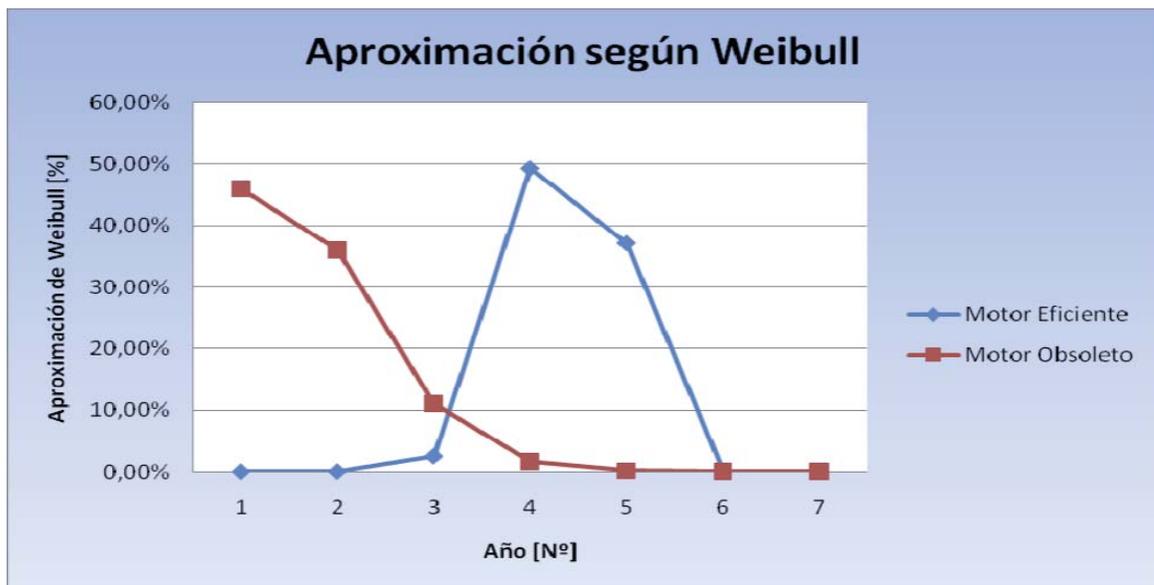


Figura 3-1 Aproximación de Weibull para motores eficientes y obsoletos

En la Figura 3-1, se puede apreciar que para motores nuevos eficientes, cerca del 50% de los motores fallan después de cuatro años de operación continua. En cambio, en el caso de los motores obsoletos un porcentaje similar falla al primer año de operación continua. En ambos casos se tiene el comportamiento que se espera en un motor de acuerdo a su naturaleza.

Cabe destacar que pocos son los motores eficientes que presentan fallas en los primeros 3 años, siendo este dato clave para una buena comparación entre motor eficiente y obsoleto ya que deja las cosas más claras a la hora de tomar decisiones.

3.1.3 Valorización de las pérdidas anuales de anergia

Dicho valor (vpae), corresponde a la valorización económica de la energía que se desperdicia por concepto de pérdidas energéticas por cada año de uso del motor. Dicho valor se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$vpae = \left(\frac{746 * P_{med}}{\eta} - 746 * P_{med} \right) * hrs_{an} * p_e \quad (3-6)$$

P_{med} : Se refiere al valor de la carga media en [HP], que el usuario espera obtener en el eje del motor. Se trata de un valor medio representativo de la operación en régimen permanente del motor, durante las horas anuales de uso de éste (que se definen posteriormente).

Hrs_{an} : Número de horas anuales de uso continuo (hrs_{an}), que en promedio se le da al motor que se desea sustituir, suponiendo que la carga en el eje es P_{med} , durante todas estas horas de uso.

p_e : Precio monómico de la energía (p_e) asociado al consumo de energía eléctrica del motor a sustituir, medido en [USD/kWh].

η : Eficiencia del Motor en Planta, medida en [%].

3.1.4 Costos de operación anual (COA)

Corresponde al costo, medido en [USD], en que se incurre por concepto de consumo de energía primaria para el correcto funcionamiento del motor, y se obtiene según:

$$COA = 0,746 * (P_{nom} * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta \text{ [USD]} \quad (3-7)$$

COA= Costos de operación anual.

f_c = Factor de carga.

Hrs_{an} = horas anuales de operación.

p_e = precio monómico de la energía.

η = eficiencia del motor.

3.1.5 Costos de reparación (CR)

Corresponde al costo anual en que se incurre cuando se producen fallas que requieren de Mantenimiento Correctivo.

Para obtenerlo se utiliza la siguiente expresión:

$$CR(i) = CRMC * PFalla(i) \quad (3-8)$$

$$CR(i) = \sum_I CRMC * 100 * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (\text{año } i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{i^\alpha}{\beta^\alpha}}$$

$i = \text{año de evaluación}$

Donde PFalla(i) se obtiene según lo expuesto en (3-4), y donde CRMC, corresponde al costo de reparación asociado al mantenimiento correctivo, el que según los registros de la planta entre 1998-2007, se distribuye de la siguiente manera:

1. Rebobinado de Estator, con un 54,79% de los casos.
2. Completo (Rebobinado de Estator, Arreglo de Rodamientos y Arreglo de jaula de ardilla), con un 39,60% de los casos.
3. Otros, con un 5,61% de los casos.

Según lo anterior, sólo se tomaran en cuenta los dos primeros puntos, ya que en conjunto suman un 94,39% de los casos. Para la obtención del CRMC, se recurrió a datos de la planta que resumen los costos asociados a estos procedimientos en los últimos 10 años.

De esta forma es posible modelar los costos asociados a los puntos 1 y 2, obteniéndose los siguientes resultados [8], cabe observar que estos modelos fueron entregados por la Empresa Minera el Soldado para su uso en el proyecto:

$$Y = 4,47 * X + 176,14 [\text{USD}] \quad Y = 4,31 * X + 227,27 [\text{USD}] \quad (3-9)$$

$$Y = \text{Costo del rebobinado} [\text{USD}] \quad Y = \text{Costo del mantenimiento}$$

$$X = \text{Potencia} [\text{HP}] \quad \text{completo} [\text{USD}]$$

$$X = \text{Potencia} [\text{HP}]$$

Usando lo anterior, se tiene que:

$$Y = 0,5479+(4,47*X+176,14)+0,396*(4,31*X+227,97) \quad (3-10)$$

$$Y = 4,155*X+186,78$$

Y=Costo del mantenimiento correctivo[USD] X = Potencia [HP]

es decir: CRMC(Pnom) =4,155*Pnom+186,78

Por lo que, el Costo de Reparación para el año i viene dado por:

$$CR(i) = 100 * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{i^\alpha}{\beta^\alpha}} * (4,155 * Pnom + 186,78) \quad (3-11)$$

3.1.6 Costos de inversión

Corresponde al costo en que se debe incurrir por la compra de un motor nuevo. Para el presente estudio se consideró la compra de un motor eficiente que cumpla la normativa expuesta en la sección normativa.

Modelos para representar el costo de fábrica asociado al motor.

$$Y = b + m*x \quad (3-11)$$

Y = Costos de fábrica [USD]

x = Potencia [HP]

M = costo fijo.

B = costo por grado de potencia.

Modelo entregado por la empresa el soldado para su uso en el proyecto, del cual se extraen las ideas finales para el desarrollo del software.

3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.

Tabla 1-2 Modelos de los costos de fábrica de motores eficientes.

Costos de Fábrica motores nuevos	
Norma	Costo de Fábrica
EFF1	$Y = 56 * X + 486,8$
EFF2	$Y = 54,96 * X + 128,1$
EFF3	$Y = 39,53 * X + 154,1$

Cabe destacar que para llevar a cabo este modelo, se recurrió a información contenido en catálogos de proveedores de motores, así como múltiples cotizaciones a éstos llevados a cabo en nuestro país.

Para obtener el costo de inversión en cada uno de los casos, se aplicará un recargo del 30% sobre el valor fábrica. Dicho recargo se distribuye, según la literatura consultada, de la siguiente manera:

- 15%, debido a las obras de ingeniería y montaje necesarias para la instalación del motor en planta.
- 10%, debido a todas las tasas arancelarias que afectan al costo del motor desde que se entrega en la fábrica, hasta que se tiene dicho motor con llave en mano.
- 5%, debido al transporte que se debe realizar desde la fábrica hasta la planta.

3.1.7 Flujos del proyecto

Para realizar la evaluación económica del proyecto, se consideran los costos de inversión, operación y reparación de ambas opciones a través del tiempo. Al realizar lo anterior se obtienen los siguientes flujos de caja a través del tiempo:

$$F_0 = -CI(Pnom) \quad (3-12)$$

$$F_1 = (CR(i)_{mo} - CR(i)_{mn}) + (COA_{mo} - COA_{mn})$$

$$F_1 = (CR(i) - CR(i)') + (COA - COA')$$

Donde (') representa parámetros del motor nuevo

i: año de evaluación. mo: motor obsoleto. mn: motor nuevo.

3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.

Costos de reparación para motor viejo: (3-13)

$$CR(i) = 100 * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{i\alpha}{\beta^\alpha}} * (4,155 * Pno + 186,78)$$

Costos de reparación para motor nuevo: (3-14)

$$CR(i)' = 100 * \frac{\alpha'}{\beta'^{\alpha'}} * (i)^{\alpha'-1} * e^{-\frac{i\alpha'}{\beta'^{\alpha'}}} * (4,155 * Pnom' + 186,78)$$

Costos de operación anual motor viejo: (3-15)

$$COA = 746 * (Pnom * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta \text{ [USD]}$$

Costos de operación anual motor nuevo: (3-16)

$$COA' = 746 * (Pnom' * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta' \text{ [USD]}$$

(3-17)

Flujos del proyecto

$$Fi = f_c * hrs_{an} * p_e * 100 * \left(\frac{Pnom}{\eta} - \frac{Pnom'}{\eta'} \right) +$$

$$100 * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{i\alpha}{\beta^\alpha}} * (4,155 * Pnom + 186,78) - 100 * \frac{\alpha'}{\beta'^{\alpha'}} * (i)^{\alpha'-1} * e^{-\frac{i\alpha'}{\beta'^{\alpha'}}} * (4,155 * Pnom' + 186,78) \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} VAN = & -CI(Pnom) + \sum_{i=1}^n f_c * hrs_{an} * p_e * 100 * \left(\frac{Pnom}{\eta} - \frac{Pnom'}{\eta'} \right) * \frac{1}{(1+k)^i} \\ & + \sum_{i=1}^n 100 * \left(CRMC(Pnom) * \frac{\alpha}{\beta^\alpha} * (i)^{\alpha-1} * e^{-\frac{i\alpha}{\beta^\alpha}} \right) * \frac{1}{(1+k)^i} \\ & - \sum_{i=1}^n 100 * \left(CRMC(Pnom') * \frac{\alpha'}{\beta'^{\alpha'}} * (i)^{\alpha'-1} * e^{-\frac{i\alpha'}{\beta'^{\alpha'}}} \right) * \frac{1}{(1+k)^i} \end{aligned}$$

Donde:

n: horizonte de evaluación. K: Tasa de descuento.

3.2 Programa de modernización

Se analizan una serie de medidas tendientes a lograr una modernización u optimización en el uso del parque de motores de DES. Para ello se simularán los flujos de caja del proyecto, obteniendo indicadores económicos que reflejen la rentabilidad del proyecto, teniéndose en cuenta cualquier alcance técnico para la correcta realización del proyecto.

3.2.1 Evaluación de la sustitución de un motor que debe ser rebobinado, por un motor nuevo más eficiente

Al revisar la estadística de falla de la planta, se observa la presencia de motores en planta que han sufrido fallas intempestivas, y deben ser sometidos a un mantenimiento correctivo. En particular se analiza el caso de fallas en el bobinado del estator, que constituye el 54,79% de los casos en los últimos 10 años, lo que justifica el análisis de este tipo de medidas.

Al igual que para las otras medidas, se analizan los flujos de caja del proyecto, para obtener indicadores económicos que reflejen la rentabilidad del proyecto.

En lo que sigue, se detallan las principales consideraciones teóricas que se toman en cuenta para la realización del software que permite el cálculo de los resultados que se exponen en el capítulo 2 del presente documento, conforme a la metodología expuesta en el informe pasado del mismo.

3.2.2 Valorización de las pérdidas anuales de energía

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en la ecuación (3-6)

3.2.3 Costos de operación anual (COA)

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en la ecuación (3-7)

3.2.4 Costos de inversión del rebobinado (CIR)

Corresponde al costo en que se debe incurrir por el rebobinado del estator del motor que debe ser sometido a mantenimiento correctivo.

$$Y = 4,466 * X + 176,1 \quad (3-19)$$

Y = Costos del proceso de rebobinado [USD]

x = Potencia [HP]

Vale la pena destacar, que dichas ecuaciones fueron construidas a partir de los registros de mantención de la planta llevados a cabo durante 1998 a 2007, es decir de los últimos 10 años.

3.2.5 Costos de inversión del motor nuevo

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en el punto 3.1.6

3.2.6 Flujos del proyecto

Para realizar la evaluación económica del proyecto, se consideran los Costos de Inversión y Operación de ambas opciones a través del tiempo. Al realizar lo anterior, se obtienen los siguientes flujos de caja a través del tiempo:

$$F_0 = CRM(Pnom) - CI(Pnom) \quad (3-20)$$

$$F_1 = (COA_{mo} - COA_{mn}) = (COA - COA')$$

Donde (') representa parámetros del motor nuevo

i: año de evaluación.

mo: motor obsoleto.

mn: motor nuevo.

$$\text{costos de operación anual motor viejo} \quad (3-21)$$

$$COA = 746 * (P_{nom} * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta$$

$$\text{costos de operación anual motor nuevo} \quad (3-22)$$

$$COA' = 746 * (P_{nom}' * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta'$$

$$\text{Flujos del proyecto} \quad (3-23)$$

$$Fi = f_c * hrs_{an} * p_e * 100 * \left(\frac{P_{nom}}{\eta} - \frac{P_{nom}'}{\eta'} \right)$$

$$VAN = CRI(Pnom) - CI(Pnom) + \sum_{i=1}^n f_c * hrs_{an} * p_e * 100 * \left(\frac{P_{nom}}{\eta} - \frac{P_{nom}'}{\eta'} \right) * \frac{1}{(1+k)^i}$$

Donde:

n: horizonte de evaluación.

K: Tasa de descuento.

3.3 Evaluación para la mejor opción de compra de un motor para un nuevo proyecto

Se analizan diversas opciones de compra de motores nuevos para posibles expansiones de una o más partes de la planta, para posteriormente indicar cuál de esta es la que presenta una mayor rentabilidad.

Las opciones consideradas se diferencian entre sí por el valor que la eficiencia nominal del equipo alcanza, lo que se ve reflejado en el costo de fábrica del mismo. Para el análisis de consideración de las normativas de motores eficientes expuestas en la sección normativa, es decir, EFF1, EFF2 y EFF3.

3.3.1 Valorización de las pérdidas anuales de energía

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en la ecuación (3-6).

3.3.2 Costos de operación anual (COA)

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en la ecuación (3-7).

3.3.3 Costos de inversión del motor nuevo

Se obtienen de igual manera que lo expuesto en el punto 3.1.6.

3.3.4 Elección de la alternativa más rentable

Para realizar la evaluación económica del proyecto, se considera como la más rentable aquella que presente un menor costo de inversión y operación a través del tiempo. Para obtener esto se llevan al año 0 todos los flujos en el tiempo considerados en el análisis, obteniéndose con esto un Costo de Inversión y Operación Equivalente (CIOE) en el año 0 para cada una de las opciones consideradas, permitiendo discriminar entre estas de acuerdo a la relación de orden que se tenga para el CIOE. Eso es:

$$F_0 = CRM(Pnom) - CI(Pnom) \quad (3-24)$$

$$F_1 = (COA_{mo} - COA_{mn}) = (COA - COA')$$

Donde (') representa parámetros del motor nuevo

i: año de evaluación.

mo: motor obsoleto.

mn: motor nuevo.

3 Desarrollo de la planilla de Excel para calculos de analisis economico.

costos de operación anual motor normal (3-25)

$$COA = 746 * (P_{nom} * f_c * hr_{san} * p_e * 100) / \eta$$

costos de operación anual motor nuevo (3-26)

$$COA' = 746 * (P_{nom}' * f_c * hr_{san} * p_e * 100) / \eta'$$

Flujos del proyecto (3-27)

$$Fi = f_c * hr_{san} * p_e * 100 * \left(\frac{P_{nom}}{\eta} - \frac{P_{nom}'}{\eta'} \right)$$

$$VAN = CRI(P_{nom}) - CI(P_{nom}) + \sum_{i=1}^n f_c * hr_{san} * p_e * 100 * \left(\frac{P_{nom}}{\eta} - \frac{P_{nom}'}{\eta'} \right) * \frac{1}{(1+k)^i}$$

Donde:

n: horizonte de evaluación.

K: Tasa de descuento.

4 Consideraciones generales

4.1 Consideraciones generales en los cálculos asociados a las medidas de UEE [7]

Los elementos considerados como relevantes para la evaluación de un proyecto son subjetivos, pues dependen del criterio del evaluador.

Por lo mismo es que a continuación se exponen los argumentos que justifican que ciertos aspectos que pudiesen ser considerados como relevantes en la obtención de indicadores económicos, según la metodología y cálculos expuestos con anterioridad, no sean considerados en dichos cálculos.

- **Costos asociados a la detención de un motor activo en planta:** La detención de un grupo de motores tiene efecto sobre la producción de la planta. Para evitar lo anterior, se considera la sustitución de motores de acuerdo al mantenimiento programado o preventivo con que se dispone.
- **Valorización del aumento de confiabilidad:** sin embargo la dificultad para fijar una metodología que pueda ser expandida a casos similares imposibilita realizar un análisis numérico al respecto. Sin embargo se tendrán en cuenta los efectos que se producen al aumentar la confiabilidad de un parque de motores, pero de modo cualitativo.
- **Costos de Mantenimiento:** Este ítem no se considera como parte del proyecto, ya que se supone que ya sea un motor nuevo eficiente o un motor usado, ambos con similares características técnicas (Frame, Voltaje nominal, Número de polos, Potencia nominal, etc.), se tienen costos de mantenimiento muy similares para ambos casos, por lo que los efectos de esta diferencia no tienen incidencia alguna en los resultados finales.

4.2 Modelos estadísticos asociados a las medidas de UEE

La complejidad o falta de una metodología clara y transversalmente aceptada para la obtención de determinados parámetros de funcionamiento de los motores en planta, que son relevantes en los cálculos expuestos en el presente capítulo, amerita la obtención de los mismos a través de otros medios que excluyan o complementen la recolección de datos en terreno.

Bajo este contexto se propone la utilización de una serie de modelos llevados a cabo utilizando la estadística obtenida a partir del estudio del estado del arte del tema, lo que permita la obtención de aproximaciones de ciertos parámetros de los equipos, permitiendo con esto la evaluación técnicoeconómico de las medidas, que es el fin último del presente estudio.

4.2.1 Determinación de la eficiencia nominal de un equipo en planta

Si no se cuenta con un valor de la eficiencia nominal (η_0) de un motor operativo, valor original del motor cuando éste está nuevo y medido a plena carga, se puede obtener del modelo construido durante este estudio para este fin. El modelo entrega la eficiencia nominal de un motor según su año de fabricación, para lo cual se utiliza la Tabla 4-1 como referencia.

Tabla 4-1 eficiencia nominal de un motor según su año de fabricación.

Potencia [hp]	Eficiencia según el año de fabricación					
	1994	1955	1965	1977	1987	1997
7,5	84,4	87,0	84,0	84,0	87,5	89,5
15	87,0	89,5	88,0	86,0	88,5	91,0
25	89,5	90,5	89,0	88,0	91,0	92,4
50	90,5	91,0	91,5	90,0	92,4	93,0
75	91,0	90,5	91,5	91,0	93,0	94,1
100	91,5	92,0	92,0	91,5	93,6	94,5

Con lo anterior es posible generar una tabla de las pérdidas nominales que se tienen para un motor (P_{ernom}) según su año de fabricación, simplemente usando que:

$$100 = P_{ernom}[\%] + \eta_0[\%] \quad (4-1)$$

Tabla 4-2 Pérdidas Nominales de un motor según su año de fabricación.[8]

Potencia [hp]	Pérdidas según el año de fabricación					
	1994	1955	1965	1977	1987	1997
7,5	15,5	13,0	16,0	16,0	12,5	10,5
15	13,0	10,5	12,0	14,0	11,5	9,0
25	10,5	9,5	11,0	12,0	9,0	7,6
50	9,5	9,0	8,5	10,0	7,6	7,0
75	9,0	9,5	8,5	9,0	7,0	5,9
100	8,5	8,0	8,0	8,5	6,4	5,5

Para modelar las pérdidas nominales de un motor para un mismo año de fabricación se eligió un modelo que reflejará dos cosas importantes:

1. Las pérdidas nominales disminuyen conforme se aumenta la potencia nominal del Motor.
2. Mientras mayor sea la potencia nominal, más difícil es el disminuir las pérdidas.

Considerando lo anterior se eligió el siguiente modelo:

$$Y = b_j + \frac{a_j}{X} \quad (4-2)$$

$$X = \text{Potencia del motor [HP]} \quad Y = \text{Pérdidas [\%]}$$

$$j = \text{año de fabricación}$$

Para determinar $\{a_j, b_j\}$, se realizó la siguiente minimización para cada año de fabricación j :

$$\text{Min} \sum_i \left\| \left(b_j + \frac{a_j}{X_i} \right) - \text{Perdnom}j * (X_j) \right\| \quad (4-3)$$

$$\left(b_j + \frac{a_j}{X_i} \right) > 0 \quad \left(b_j + \frac{a_j}{X_i} \right) < \left(b_j + \frac{a_j}{X_k} \right) \text{ con } i > k$$

X_i = valores para P_{nom} [HP] según tabla 4-3

Lo anterior produce los siguientes resultados.

Tabla 1-3 Modelo Eficiencia según año de Fabricación.

Eficiencia según el año de fabricación			
Año	b	a	Índice de corrección
1944	8,35713	53,5715	0,985
1955	8.00348	34,4730	0,965
1965	7.66625	62,5031	0,900
1977	8,94117	52,9411	0,955
1987	6,66607	43,7544	0,938
1997	5,53835	37,2123	0,958

Por lo tanto, de acuerdo al año de fabricación del motor, se utiliza una proyección lineal de los parámetros del modelo construido, para determinar el valor de la Eficiencia.

$$Y = \frac{(k-i)}{(j-i)} * \left[100 - \left(b_i + \frac{a_i}{X} \right) \right] + \frac{(j-k)}{(j-i)} * \left[100 - \left(b_j + \frac{a_j}{X} \right) \right] \quad (4-4)$$

$i < k < j$

i, j intervalo de evaluación.

k año de evaluación

X = Potencia nominal [HP]

Y = Eficiencia nominal [%]

A continuación se muestran los valores para la Eficiencia Nominal que se tienen según su año de fabricación, obtenidos a través del modelo expuesto en el presente capítulo:

Como dato los valores actualizados de eficiencia nominal para los últimos 3 años serían

- 2015 = 91,36
- 2016 = 91,4
- 2017 = 91,45

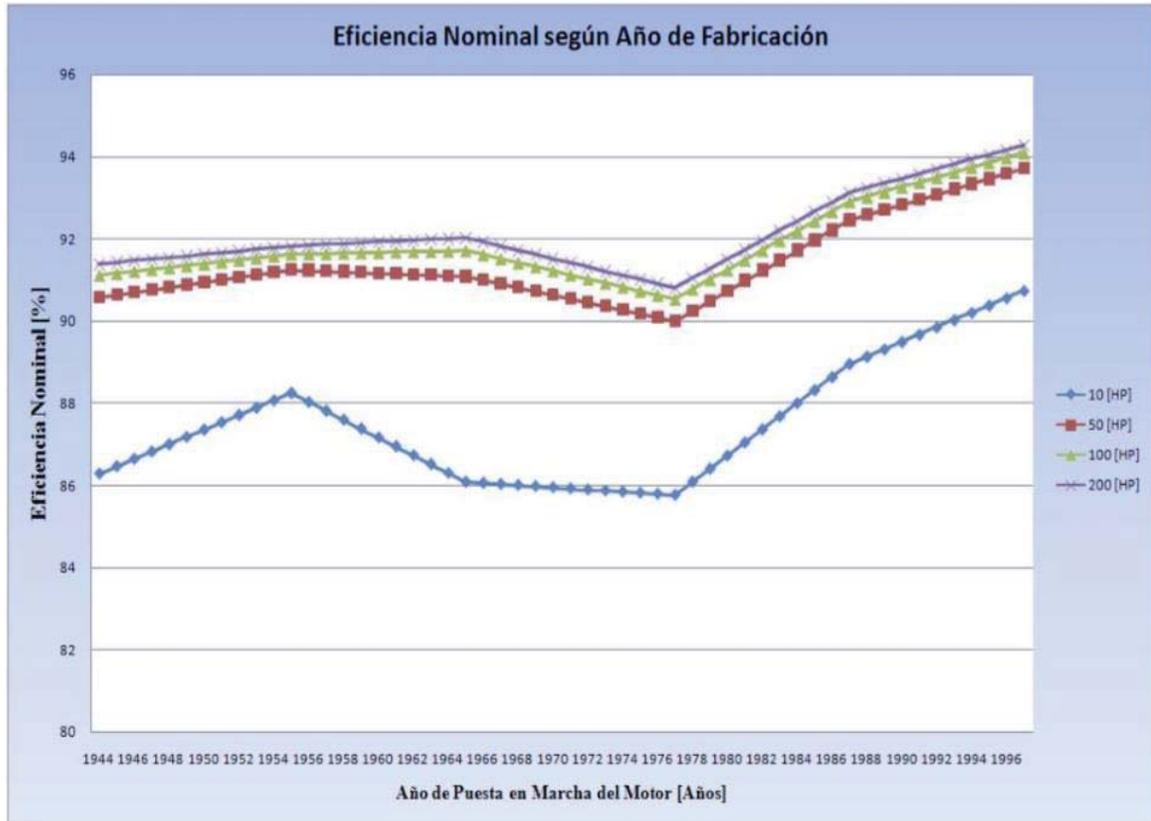


Figura 4-1 Modelo Eficiencia según año de Fabricación

4.2.2 Determinación de la eficiencia real de un equipo en planta

Si no se cuenta con un valor de la eficiencia real (η) del motor operativo se puede obtener dicho valor del modelo construido a partir de la recolección de datos. Dicho modelo es:

$$\eta[\%] = \eta_o[\%] * PEC[0/1] * PEAU[0/1] * PEPR[0/1] \quad (4-5)$$

Dónde:

- PEC: Penalización de la eficiencia debido al grado de carga del motor, medida [0/1]
- PEAU: Penalización de la eficiencia debido a los años de uso del motor, medida [0/1]
- PEPR: Penalización de la eficiencia debido a los procesos de rebobinado sobre el motor, medida [0/1]

4.2.3 Obtención de PEC

Para calcular el factor de penalización por grado de carga (PEC) que afecta a la eficiencia nominal del motor, debido a que este no trabaja a carga nominal, se utiliza el siguiente modelo:

$$PEC = \frac{f_c}{f_c * \eta_0 + (1 - \eta_0) * (0,5 * f_c^2 + 0,5)} [0/1] \quad (4-6)$$

Donde f_c : factor de carga [0/1]

El modelo se obtuvo a partir de estadística realizada por Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), para la Corporación Nacional del Cobre Codelco-Chile. [1]

4.2.4 Obtención de PEAU

Se calcula el factor de penalización por años de uso (PEAU) del motor que afecta a la eficiencia nominal del motor debido al uso que ha tenido éste último, lo que provoca un incremento de sus pérdidas en el fierro, por roce y por ventilación, y pérdidas en el cobre debido a los procesos de mantenimiento y reparaciones, usando la siguiente expresión:

$$Y = 1,163 * X + 0,174 \quad (4-7)$$

Y=eficiencia actual [0/1]

X = eficiencia original [0/1]

4.2.5 Obtención de PEPR

Se estima el factor de penalización de la eficiencia por proceso de rebobinados (PEPR), a partir de:

$$PEPR = (100 - NPR * 2) [\%] \quad (4-8)$$

Lo anterior establece que la Eficiencia Nominal del motor se ve disminuida en 2% en promedio, por cada proceso de rebobinado que se le realice al motor, según la bibliografía consultada. [5]

5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)

En el presente capítulo se exponen los resultados obtenidos, para un caso particular de aplicación, de una de las medidas de UEE abordadas en este proyecto, dando a conocer los resultados que se pueden obtener al implementar proyectos de este tipo.

5.1 Alcance del proyecto [8]

El proyecto consiste en la evaluación técnico-económica de la sustitución de 4 líneas de motores que operan sobre las celdas de flotación de DES, y donde cada línea consta de nueve motores. Para fines de este estudio se supondrá un comportamiento idéntico para cada una de estas, de manera de facilitar el cálculo y generalizar los resultados.

Con la realización de este proyecto, de carácter piloto en la industria de la mediana minería en Chile, se busca comprobar la factibilidad económica en el reemplazo de motores por unidades de mayor eficiencia. Debido a que los equipos se encuentran actualmente operativos en planta, se abordará el problema mediante la metodología expuesta en el presente trabajo como análisis de fallas.

A continuación se exponen las características técnicas de los equipos a reemplazar y las características de funcionamiento de la planta los cuales fueron entregados por la minera el soldado por medio de correos, donde se encuentran operando dichos dispositivos.

Tabla 5-1 Características técnicas del Proyecto Piloto a Implementar en DES.

Características Técnicas de los Equipos		
1	Cantidad de motores idénticos	36
2	Equipo accionado por el motor	Celda
3	Potencia KW/HP	18/25
4	Fabricante del motor	CIC
5	Año de fabricación (aproximado)	1980
6	Velocidad (RPM)	1455
7	Numero de polos	4
8	Tensión nominal (Volts entre fases)	380 V
9	Corriente nominal por fase	35,8 A
10	Frecuencia nominal (Hz)	50 Hz
11	Factor de potencia nominal	0,86
12	Numero de fases	3
13	Conexión (Y/D)	Y/D
14	Sistema de partida	Actuador Y/D
15	Sistema de control (VDF)	No
16	Aislación (clase B,E)	F
17	Clasificación de acuerdo a su protección (NEMA)	TEFC
18	Forma de acoplamiento (C fase, D flange, u otro)	Directo
19	Protección de sobre temperatura (sensores de T°)	No
20	Sistema de medición disponible (energía)	No
21	Numero promedio de rebobinados	1

Tabla 5-2 Características de funcionamiento del Proyecto Piloto a Implementar en DES.

Eficiencia según el año de fabricación		
1	Proceso productivo asociado	molienda conv
2	Factor de carga	80,36 %
3	Horas de uso	8633
4	Antigüedad	27

A continuación se exponen y discuten los resultados obtenidos considerando los datos expuestos anteriormente.

5.2 Resultados esperados para el proyecto piloto

Al ingresar parte de la información expuesta en 5.1, se puede obtener mediante el modelo desarrollado en 3.1, valores para los parámetros que permiten determinar los costos de operación, inversión y mantenimiento de los motores actualmente utilizados en planta. Algunos puntos que se deben tener en cuenta para dicho cálculo, se detallan a continuación.

- Mediante el año de puesta en marcha del motor, y el modelo construido en 4.2.1, se determinó una eficiencia nominal para los equipos en planta de 88,94%.
- Mediante el modelo construido en 4.2.3, el valor de PEC, o penalización de la eficiencia debido al grado de carga del motor, fue estimado en 0,9974 [o/1].
- Mediante el modelo construido en 4.2.4, el valor de PEAU, o penalización de la eficiencia debido a los años de uso del motor, fue estimado en 0,9674 [o/1].
- Mediante el modelo construido en 4.2.5, el valor de PEPR, o penalización de la eficiencia debido a los procesos de rebobinado sobre el motor, fue estimado en 0,9766, debido a que en promedio los dispositivos han sido rebobinados 1,0035 durante su vida de funcionamiento.
- Se determinó una eficiencia real para los equipos en planta de 83,81%, a través de:

$$\eta[\%] = \eta_o * PEC * PEAU * PEPR[\%] \quad (5-1)$$

$$\eta[\%] = 88,94 * 0,9974 * 0,9674 * 0,9766 = 83,81 \%$$

5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)

Se determinaron las pérdidas anuales de energía, según 3.2.2, es decir.

$$pae = \left(\frac{\frac{746 * P_{med}}{\eta} - 746 * P_{med}}{1000000} \right) * hrs_{an} [MWh] \quad (5-2)$$

$$pae = \left(\frac{\frac{746 * 25 * 0,8036}{0,8381} - 746 * 25 * 0,8036}{1000000} \right) * 8,533 = 24,7 [MWh]$$

A continuación se resumen los valores obtenidos.

Tabla 5-3 Datos Obtenidos a través del Modelo Desarrollado, para el Motor Operativo en Planta.

Datos entregados por el modelo: motor usado		
Variable	Unidad	Valor
Eficiencia Nominal	[%]	88,94
Eficiencia Real	[%]	83,81
Pérdidas Anuales de Energía	[%]	24,70

Además es posible obtener los costos de operación anual o COA y los costos de reparación o CR, según lo expuesto en 3.1.4 y 3.1.5. Esto es.

- Costos anuales asociados al consumo de suministro eléctrico o COA, viene dado por.

$$COA = 0,746 * (P_{nom} * f_c * hrs_{an} * p_e * 100) / \eta [USD] \quad (5-3)$$

$$COA = 0,746 * (25 * 0,8036 * 8,533) / 0,8381$$

$$= 152,59 * p_e [USD]$$

Si se considera el precio de la electricidad $p_e = 65, 95$ y 125 [USD/MWh], se tiene que.

5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)

Tabla 5-4 Costos de Operación para el Motor Operativo en Planta.

Costos de operación motor usado	
precio de la electricidad [USD/MWh]	valor [USD]
65	9,918
95	14,496
125	19,073

Considerando la las fórmulas anteriores se obtiene que.

Tabla 5-5 Probabilidad de Falla y Costos de Reparación para el Motor Operativo en Planta.

Probabilidad de Falla y Costos de Reparación para cada Año de Evaluación del Motor Usado						
variable	unidad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
probabilidad de falla	[%]	6,40%	21,93%	32,61%	25,94%	10,78%
costos de reparación	[USD]	18,56	63,73	94,77	75,39	31,34

De igual manera considerando los parámetros de α y β utilizados para modelar el comportamiento de motores nuevos, se tiene que.

Tabla 5-6 Probabilidad de Falla y Costos de Reparación para el Motor Nuevo.

Probabilidad de Falla y Costos de Reparación para cada Año de Evaluación del Motor Nuevo						
variable	unidad	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
probabilidad de falla	[%]	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
costos de reparación	[USD]	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

En lo que sigue se exponen los resultados, y además se obtienen parámetros similares a los expuestos en la Tabla 5-3 y 5-4, pero para el motor nuevo que reemplazaría al motor operativo. Se considerará la sustitución por motores del tipo EFF1 o NEMA Standards MG 1- 2003, EFF2 o NEMA Standards MG 1- 1998 y EFF3 o motores de eficiencia estándar.

5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)

Para realizar la evaluación económica, en todos los casos, se considerarán las siguientes apreciaciones.

- Un horizonte de evaluación de cinco años.
- Una tasa de descuento del 12%.

El precio monómico de la energía tomará tres valores, de manera de representar tres escenarios distintos desde el punto de vista del suministro eléctrico. Estos son:

- 65 [USD/MWh], que representa aproximadamente el valor del insumo para el largo plazo, según la bibliografía consultada¹⁹.
- 95 [USD/MWh], que representa aproximadamente el valor promedio que se tendría entre Enero de 2010 a Enero de 2011, según la bibliografía consultada.
- 125 [USD/MWh], que representa aproximadamente el valor promedio que se tendría Entre Enero de 2009 a Enero de 2010, según la bibliografía consultada.
- N° de horas Críticas: Son el mínimo número de horas que el motor debe trabajar en un año.
- Carga Media Crítica: Es la mínima potencia media que el motor debe soportar en su eje en un año, para que la sustitución del motor activo en planta por un motor más eficiente, sea rentable.
- Precio Crítico de la Energía: Es el mínimo valor de la energía eléctrica que debe existir, para que la sustitución del motor activo en planta por un motor más eficiente, sea rentable.
- Eficiencia Real Crítica: Es el máximo valor que la eficiencia real del equipo en planta.

5.2.1 Caso 1: Sustitución por un Motor EFF1

Tabla 5-7 Datos Obtenidos a través del Modelo Desarrollado, para el Motor Tipo EFF1.

Datos entregados por el modelo: motor nuevo EFF1		
Variable	Unidad	Valor
Eficiencia nominal	[%]	92,66
Eficiencia real	[%]	92,66
Pérdidas anuales de energía	[MWh]	10,13
Ahorro anual de energía	[MWh]	14,57
Costo de inversión del motor	[USD]	2453

5 Proyecto piloto de reemplazo en División El Soldado (DES)

En las tablas 5-7, 5-10 y 5-12 eficiencia nominal, eficiencia real y pérdidas anuales de energía fueron calculadas de igual manera que en la tabla 5-3.

De igual manera, se tiene que.

- Ahorro anual de energía corresponde a la resta de las pérdidas anuales de energía que se tienen tanto para el motor usado como para el motor nuevo.
- Costo de inversión corresponde a un 30 % sobre el costo de fábrica del motor a adquirir, que según lo expuesto en 3.1.6, corresponde a.

Tabla 5-8 modelos de los costos de motores eficientes.

Costos de Inversión Motores Nuevos		
Norma	Costo de Fabrica [USD]	Costo de Inversión [USD]
EFF1	$Y = 56 * x + 486,8$	1453
EFF2	$Y = 54,96 * x + 128,1$	1953
EFF3	$Y = 39,53 * x + 154,1$	1485

De esta manera, se obtienen los siguientes indicadores económicos.

Tabla 5-9 Resultados Económicos para la Sustitución por Motores Tipo EFF1.

precio de la energía [USD/MWh]	VAN [USD]	TIR [%]	PRC [Meses]	Inversión [USD]	N° de Horas Criticas [hrs]	Carga Media Critica [HP]	Eficiencia real Critica [%]
65	1162	29,66%	37	2463	5629	10,53	86,63
95	2738	61,05%	25	2463	3851	3,28	88,44
125	4314	70,99%	18	2463	2927	0,00	89,42

5.2.2 Caso 2: Sustitución por un Motor EFF2

Tabla 5-10 Datos Obtenidos a través del Modelo Desarrollado, para el Motor Tipo EFF2.

Datos entregados por el modelo: motor nuevo EFF2		
Variable	Unidad	Valor
Eficiencia nominal	[%]	90,90
Eficiencia real	[%]	90,90
Pérdidas anuales de energía	[MWh]	12,80
Ahorro anual de energía	[MWh]	11,90
Costo de inversión del motor	[USD]	1953

Tabla 5-11 Resultados Económicos para la Sustitución por Motores Tipo EFF2

precio de la energía [USD/MWh]	VAN [USD]	TIR [%]	PRC [Meses]	Inversión [USD]	N° de Horas Criticas [hrs]	Carga Media Critica [HP]	Eficiencia real Critica [%]
65	1037	31,62%	35	1953	5361	10,07	86,31
95	2324	53,34%	24	1953	3668	3,97	87,71
125	3611	73,63%	18	1953	2788	46,90	88,46

5.2.3 Caso 3: Sustitución por un Motor EFF3

Tabla 5-12 Datos Obtenidos a través del Modelo Desarrollado, para el Motor Tipo EFF3

Datos entregados por el modelo: motor nuevo EFF3		
Variable	Unidad	Valor
Eficiencia nominal	[%]	86,44
Eficiencia real	[%]	86,44
Pérdidas anuales de energía	[MWh]	19,98
Ahorro anual de energía	[MWh]	4,2
Costo de inversión del motor	[USD]	1485

Tabla 5-13 Resultados Económicos para la Sustitución por Motores Tipo EFF3.

precio de la energía [USD/MWh]	VAN [USD]	TIR [%]	PRC [Meses]	Inversión [USD]	N° de Horas Criticas [hrs]	Carga Media Critica [HP]	Eficiencia real Critica [%]
65	-178	7,10%	0	1485	8760	28,13	83,40
95	333	20,62%	46	1485	6776	14,31	84,35
125	844	32,86%	34	1485	5150	10,22	84,85

6 Normativa

6.1 Normativa de UEE utilizada

Para el análisis económico se considerarán como motores eficientes, los motores definidos por la norma NEMA 12-10 vigente a partir de 1998 (a la que algunos fabricantes asocian como EM) y aquella definida por el Consortium for Energy Efficiency (CEE), con el patrocinio de la US Environmental Protection Agency (EPA) y el Department of Energy (DOE) de los Estados Unidos, quienes publican una tabla más exigente de eficiencia de motores, a la que los fabricantes normalmente asocian su línea de motor XE Extra Efficiency o motores NEMA Premium. Los motores que cumplen la Norma NEMA MG-1-1998 son los denominados motores estándar. El valor de la eficiencia de estos motores coincide, muy aproximadamente, con la denominación EFF2 del European Labelling Scheme. Por otra parte, los niveles de eficiencia del CEE fueron adoptados por la Norma NEMA PREMIUM (NEMA Standards MG 1- 2003) y coinciden, muy aproximadamente, con la denominación EFF1 del European Labelling Scheme.

De acuerdo a esto, los motores eficientes serán:

- Aquellos que tienen una eficiencia igual o peor que los definidos por la Norma NEMA 12-10 del año 1998. El valor de esta eficiencia también coincide con la denominación EFF2 del European Labelling Scheme.
- Los motores eficientes o NEMA Premium son aquellos que cumplen con la Norma NEMA Premium (NEMA Standards MG 1-2003) y coinciden, muy aproximadamente, con la denominación EFF1 del European Labelling Scheme.

En todas las Normas se hace distinción entre los motores abiertos y totalmente cerrados. En general, se tiende a utilizar el motor totalmente cerrado, es decir, que se enfríe en forma externa el motor, evitando que la contaminación del aire externo deteriore las partes internas del motor.

El cuadro siguiente muestra los valores de las eficiencias de los motores estándar enteramente cerrados de dos y cuatro polos para distintas potencias según la Norma NEMA 12-10 del año 1998.

Tabla 6-1 NEMA 2-8 Motores totalmente cerrados (TEFC). [6]

Pot [HP]	2 polos Nom	4 polos Nom	6 polos Nom	8 polos Nom
1	75,5	82,5	80	74
1,5	82,5	84	85,5	77
2	84	84	86,5	82,5
3	85,5	87,5	87,5	84
5	87,5	87,5	87,5	85,5
7,5	88,5	89,5	89,5	85,5
10	89,5	89,5	89,5	88,5
15	90,2	91	90,2	88,5
20	90,2	91	90,2	89,5
25	91	92,4	91,7	89,5
30	91	92,4	91,7	91
40	91,7	93	93	91
50	92,4	93	93	91,7
60	93	93,6	93,6	91,7
75	93	94,1	93,6	93
100	93,6	94,5	94,1	93
125	94,5	94,5	94,1	93,6
150	94,5	95	95	93,6
200	95	95	95	94,1
250	95,4	95	95	94,5
300	95,4	95,4	95	

350	95,4	95,4	95	
400	95,4	95,4		
450	95,4	95,4		
500	95,4	95,8		

Tabla 6-2 Tabla de eficiencia mínima de motores según NEMA Premium. Ref: Norma NEMA Premium, Junio 2001. [6]

Pot [HP]	2 polos Nom	4 polos Nom	6 polos Nom
3	88,5	89,5	89,5
5	89,5	89,5	89,5
7,5	91	91,7	91,7
10	91,7	91,7	91,7
15	91,7	92,4	92,4
20	92,4	93	92,4
25	93	93,6	93
30	93	93,6	93,6
40	93,6	94,1	94,1
50	94,1	94,5	94,1
60	94,1	95	94,5
75	94,5	95,4	95
100	95	95,4	95,4
125	95,4	95,4	95,4
150	95,4	95,8	95,8

Discusión y conclusiones

Aunque un programa de Uso Eficiente de la Energía (UEE), puede ser llevado a cabo simultáneamente en diversas partes del proceso de la producción de una planta cualquiera, se eligió el sectorizar la aplicación del programa en una parte específica de la producción de dicha planta. La principal razón de este proceder, es que uno de los objetivos de la implementación de este plan es el marcar un precedente a nivel divisional o corporativo, por lo que el desarrollo del mismo debe ser gradual, definiendo el nivel en que se iniciará el programa y donde la incorporación de todas las medidas de optimización para el uso eficiente de la energía en un solo proyecto, es innecesaria.

Al tomar en cuenta la naturaleza de los procesos llevados a cabo en la planta de motores con celdas de flotación de División El Soldado (DES), se tiene que este bloque de la producción tiene más potencial para llevar a cabo un programa de UEE, ya que es un proceso de concentración de cobre donde se consume cerca del 80% de la energía eléctrica asociada a la división. En dicho proceso se considerarán las etapas de Chancado, Molienda, Flotación y Espesamiento y Filtrado

Según lo expuesto en el capítulo 5 para el primer caso, se concluye que para los tres escenarios considerados, se consiguen indicadores económicos que ameritan la implementación del proyecto. Además se observa que aunque se realizarán variaciones en las condiciones de operación de la planta, los resultados seguirían marcando la misma pauta. Por ejemplo, al considerar el peor de los escenarios (65 USD/MWh) en las definiciones realizadas en la página 85, se tiene que.

- Aunque se variará en un 33% el número de horas anuales de utilización de los motores (lo que es una enorme variación) el proyecto seguiría siendo rentable.
- Aunque se disminuyera en un 48% la carga original de los motores, el proyecto seguiría siendo rentable.
- El mínimo precio de la energía eléctrica que se puede pagar para que el proyecto siga siendo rentable, es de aproximadamente 43 [USD/MWh], que es aproximadamente lo que se pagaba cuando no existían restricciones en el envío de gas natural argentino.
- Considerando que la eficiencia real del equipo en planta fue estimada en 83,81%, es posible un error en esta estimación de hasta 2,82%, y que el proyecto siga siendo rentable.

Evidentemente los parámetros descritos en los últimos cuatro puntos, admiten aún mayores rangos de operación al considerar escenarios más favorables (95 y 125 USD/MWh).

Para el segundo caso de análisis, Según lo expuesto, al igual que para el caso anterior, se concluye que para los tres escenarios considerados, se consiguen indicadores económicos que ameritan la implementación del proyecto, aun cuando se realicen pequeñas variaciones en las condiciones de operación de la planta. Por ejemplo, al considerar el peor escenario, se tiene que.

- Aunque se variará en un 37% el número de horas anuales de utilización de los motores, lo que es una enorme variación, el proyecto seguiría siendo rentable.
- Aunque se disminuyera en un 50% la carga original de los motores, el proyecto seguiría siendo rentable.
- El mínimo precio de la energía eléctrica que se puede pagar para que el proyecto siga siendo rentable, es de aproximadamente 40,84 [USD/MWh], que es aproximadamente lo que se pagaba cuando no existían restricciones en el envío de gas natural argentino.
- Considerando que la eficiencia real del equipo en planta fue estimada en 83,81%, es posible un error en esta estimación de hasta 2,5%, y que el proyecto siga siendo rentable.

Analizando el tercer caso de sustitución de motores, se nota que a diferencia de los dos casos anteriores, no se observan resultados económicos que ameriten la implementación del proyecto, al menos para el escenario base de 65 [USD/MWh]. De todas maneras, se observan resultados menos rentables en comparación a la sustitución de motores de mayor eficiencia, para los otros escenarios considerados en las simulaciones.

Por lo tanto, Los resultados obtenidos para el reemplazo de los 36 de motores de 25 [HP], que se encuentra operando en Molienda convencional Flotación, son:

- Al considerar un horizonte de evaluación de cinco años, una tasa de descuento del 12% y la estadística de falla expuesta en el punto 9.1.1, se obtienen resultados económicos que ameritan la sustitución de motores activos en planta por motores eficientes del tipo EFF1 y EFF2. Esto ocurre no sólo al considerar valores peaks para el suministro de energía eléctrica, sino que también para valores como los que se espera tener en el largo plazo.
- Lo anterior no es replicable para la sustitución de motores activos por motores del tipo EFF3, o de eficiencia estándar, debido a la baja rentabilidad que se obtendría con este actuar.
- Al realizar variaciones en torno a los valores actuales de operación de los motores, no se obtendrían resultados diferentes desde el punto de vista de la implementación del programa. Esto es, ya que para que ocurriera esto, las variaciones deberían ser demasiado grandes, afectando de sobremano en los parámetros de funcionamiento de la planta, lo que es especialmente falso en la industria de la minería donde se tienen condiciones de funcionamiento sumamente constantes en el tiempo.

-
- Se obtuvo una tolerancia del al menos un 2,5% en el cálculo de la eficiencia real de los equipos en planta, lo que da algo de tolerancia al modelo en el cálculo de este parámetro.

En conclusión se puede afirmar que de acuerdo a los análisis técnicos y económicos realizados en este proyecto, contamos con una herramienta técnica y económica que nos sirve de guía para la toma de decisiones a la hora de emprender un nuevo proyecto de eficiencia energética en motores, para la mediana y pequeña empresa minera.

Bibliografía

- [1] Codelco, «libro de la gran minería en Chile,» Editorial ocho libros, abril 2014.
- [2] S. A. Gwinner, «Análisis técnico y económico de proyectos de eficiencia energética en Puerto Patache de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi,» Universidad de Chile 2015.
- [3] R. S. Moreno, A. R. Aguilar, E. F. Hernández, F. P. Soto, «Aplicaciones de la distribución Weibull en ingeniería», 2008.
- [4] Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Mercados Eléctricos - IEE3372, 2000.
- [5] J. C. Andreas, «Energy Efficient Electric Motors,» Editorial Marcel Decker, New York, 1982, Norma Nema, 1993.
- [6] Norma NEMA MG-1-1998.
- [7] Anglo American Chile, “Reporte de Desarrollo Sustentable”, elaboración propia, 2006.
- [8] Vice-Presidencia Técnica y Proyectos Gerencia Ingeniería de Anglo American Chile, “Estudio capacidad sistema eléctrico año 2006 Mina El Soldado”, Estudio realizado por Penta Ingeniería, Marzo de 2007.