



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELÉCTRICA**

**ANÁLISIS TÉCNICO ECONÓMICO DE MOTORES ENERGÉTICAMENTE
EFICIENTES Y SU APLICACIÓN EN LA INDUSTRIA MINERA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

RODRIGO JAVIER VALLEJOS VILLAGRA

**PROFESOR GUÍA:
NELSON MORALES OSORIO**

**MIEMBROS DE LA COMISION
ARIEL VALDENEGRO ESPINOZA
JORGE ROMO LÓPEZ**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2011**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: RODRIGO JAVIER VALLEJOS VILLAGRA
FECHA: 07 DE MARZO
PROF. GUÍA: SR. NELSON MORALES OSORIO

“Análisis técnico económico de motores energéticamente eficientes y su aplicación en la industria minera”

La gran cantidad de problemas ambientales existentes hoy en día, ha provocado en la población una toma de conciencia y una nueva actitud de los actores sociales frente al cuidado del medio ambiente. Es por esto que los gobiernos están cada vez más preocupados del cuidado de la energía, impulsando programas de eficiencia energética dirigidos tanto al consumo residencial como al industrial. Por otro lado, la creciente inestabilidad de precios de la energía, ha obligado a la industria a buscar nuevas formas de disminuir la demanda. Es en este punto en el cual aparecen los equipos energéticamente eficientes, y entre ellos, los motores eléctricos.

Dichas ideas sirven como motivación a esta memoria, a la cual se le ha planteado como objetivo, estudiar tanto las diferencias de operación, como las posibles ventajas económicas de este tipo de motores con respecto a los motores tradicionales, pretendiendo usar datos fidedignos y actualizar algunos estudios e ideas ya obsoletas con respecto a la materia.

Para lograr este objetivo se recabó la información que imparten los fabricantes de motores, para realizar una comparación entre el comportamiento de los motores eficientes versus los motores de más baja eficiencia. Se programó un software que permite estimar los parámetros de motores eléctricos de inducción de baja tensión, con el fin realizar modelos más acabados y poder obtener mas información respecto de su operación.

También se hizo un análisis de las ofertas de mercado disponibles, calculando los indicadores económicos más importantes con respecto a la aplicación de este tipo de motores, permitiendo de esta forma, clarificar el proceso de decisión de la compra de un motor de alta eficiencia versus otro de más baja. Dentro de este mismo punto, se aplicaron estos conceptos a un proyecto real de explotación minera, logrando tener una idea más clara de los beneficios de estos motores.

Una vez finalizada la investigación, se pudo concluir que en general los motores de mas alta eficiencia se comportan de manera muy similar a los de menor eficiencia. Tanto con los datos de fabricantes como por la modelación se detectaron dos diferencias: La velocidad de giro y corrientes de partida superiores para los motores eficientes. Dichas diferencias podrían tener alguna repercusión en casos particulares mencionados con mayor detalle en el documento.

Al término del análisis económico se pudo concluir que la conveniencia económica en la inversión en este tipo de motores depende fuertemente del precio de la energía. En general, para la mayoría de las potencias y marcas, cuando se tiene un porcentaje de uso alto y el precio se mantiene igual al de la actualidad (0.1 USD/kWh) o superior, es rentable invertir en este tipo de motores. Cuando el precio de la energía es bajo, se recomienda realizar un análisis más detallado.

Agradecimientos

Agradezco a todas las personas que ayudaron a la realización de este documento, en particular al Sr Nelson Morales, profesor guía de la memoria; al Sr Oscar Vega y al área de electricidad de la empresa JRI Ingeniería; quienes mostraron su interés en el tema propuesto y confiaron en mi para llevar a cabo esta investigación.

Agradezco también a mis profesores, compañeros y amigos conocidos en la escuela de ingeniería, con quienes compartimos proyectos e ideas que han aportado en mi formación profesional y personal.

Agradezco por último a toda mi familia y en particular a mis padres, por darme su incondicional apoyo a lo largo de todo este período académico y en general, en mi vida.

A mis padres...

Tabla de contenidos

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 8 |
| 1.1 | MOTIVACIÓN | 8 |
| 1.2 | OBJETIVO GENERAL | 9 |
| 1.3 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 9 |
| 1.4 | ESTRUCTURA DEL TRABAJO | 10 |
| 2 | ANTECEDENTES GENERALES | 11 |
| 2.1 | EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL MUNDO | 11 |
| 2.2 | EVOLUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA Y LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN CHILE | 13 |
| 2.3 | ANÁLISIS DEL SECTOR MINERO | 15 |
| 3 | ANTECEDENTES ESPECÍFICOS | 19 |
| 3.1 | PROCESOS ASOCIADOS A LA GRAN MINERÍA DEL COBRE | 19 |
| 3.2 | MOTORES DE INDUCCIÓN TRIFÁSICOS | 20 |
| 3.2.1 | PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO | 20 |
| 3.2.2 | ESTATOR | 21 |
| 3.2.3 | ROTOR | 22 |
| 3.2.4 | DESLIZAMIENTO | 23 |
| 3.2.5 | CARACTERÍSTICAS DEL PAR TORQUE-VELOCIDAD | 24 |
| 3.2.6 | DISEÑO DEL MOTOR | 26 |
| 3.2.7 | CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO | 28 |
| 3.3 | MOTORES ENERGÉTICAMENTE EFICIENTES | 30 |
| 3.3.1 | EFICIENCIA ESTÁNDAR DE MOTORES | 30 |
| 3.3.2 | CONCEPTO DE EFICIENCIA | 31 |
| 3.3.3 | NATURALEZA DE LAS PÉRDIDAS EN LOS MOTORES ELÉCTRICOS | 32 |
| 3.3.4 | INCREMENTO DE LA EFICIENCIA. | 37 |
| 3.3.5 | NORMAS SOBRE NIVELES DE EFICIENCIA DE MOTORES ELÉCTRICOS | 39 |
| 4 | COMPARACIÓN TÉCNICA DE MOTORES: ALTA EFICIENCIA VS EFICIENCIA ESTÁNDAR | 47 |
| 4.1 | ANÁLISIS DE DATOS DE CATÁLOGOS | 48 |

| | | |
|------------|---|------------|
| 4.1.1 | MOTORES A ESTUDIAR | 48 |
| 4.1.2 | ANÁLISIS DE DATOS | 49 |
| 4.2 | ANÁLISIS DE CIRCUITOS EQUIVALENTES | 53 |
| 4.2.1 | ELECCIÓN DEL MODELO | 53 |
| 4.2.2 | ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE CIRCUITO EQUIVALENTE | 54 |
| 4.2.3 | ANÁLISIS COMPARATIVO DE PARÁMETROS DE MOTORES | 59 |
| 4.2.4 | ANÁLISIS DEL MÉTODO DE ESTIMACIÓN USADO | 68 |
| 4.3 | CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO | 70 |
| 5 | COMPARACIÓN ECONÓMICA DE MOTORES DE ALTA EFICIENCIA VS EFICIENCIA ESTÁNDAR | 72 |
| 5.1 | FACTORES PARA LA CORRECCIÓN DE LA EFICIENCIA | 72 |
| 5.1.1 | CORRECCIÓN POR VOLTAJE DIFERENTE AL NOMINAL | 72 |
| 5.1.2 | CORRECCIÓN POR FRECUENCIA DISTINTA A LA NOMINAL | 73 |
| 5.1.3 | CORRECCIÓN POR CARGA DISTINTA A LA NOMINAL | 73 |
| 5.1.4 | CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DISTINTA A LA NOMINAL | 74 |
| 5.1.5 | CORRECCIÓN POR ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR | 75 |
| 5.2 | OFERTAS DE MERCADO DISPONIBLES | 76 |
| 5.2.1 | US MOTORS | 76 |
| 5.2.2 | SIEMENS | 78 |
| 5.2.3 | GENERAL ELECTRIC | 81 |
| 5.3 | CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS | 83 |
| 5.3.1 | APLICACIÓN DE FACTORES DE DERATING | 84 |
| 5.3.2 | PRECIO DE LA ENERGÍA | 86 |
| 5.3.3 | INDICADORES | 87 |
| 5.4 | CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO | 95 |
| 6 | APLICACIÓN DE CASO DE ESTUDIO | 97 |
| 6.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO | 97 |
| 6.1.1 | PROCESO PRODUCTIVO | 97 |
| 6.1.2 | EQUIPOS INSTALADOS | 99 |
| 6.2 | SELECCIÓN DE MOTORES A ESTUDIAR | 101 |
| 6.2.1 | CARACTERIZACIÓN DE USO | 102 |
| 6.3 | ANÁLISIS ECONÓMICO | 104 |

1 Introducción

En el presente capítulo se entrega un resumen del trabajo realizado, especificando su estructura, con el fin de dar mayor claridad al proceso de lectura del mismo. También se incluyen los objetivos generales y específicos, así como los factores que sirvieron de motivación a dicha investigación.

1.1 Motivación

Hoy en día existe gran preocupación en el mundo entero por los problemas medioambientales, problemas que hace algunos años no existían, como el calentamiento global, disminución de la capa de ozono, etc. Dichos problemas son en gran medida causados por las emisiones de los grandes generadores térmicos de los sistemas eléctricos.

Es por este motivo, que los gobiernos mundiales, y en particular el nuestro, han empezado a tomar conciencia de la gravedad del problema, lanzando campañas de eficiencia energética destinadas tanto a los consumos residenciales como a los industriales.

Es claro que la aplicación de medidas de eficiencia energética en los hogares podría ayudar en gran medida a frenar el crecimiento de la demanda, sin embargo es posible encontrar otro sector de aplicación de estas medidas, que concentra un alto porcentaje del consumo de energía eléctrica en nuestro país: la industria minera.

Tomando en cuenta los elementos anteriores y sumado a la inestabilidad global de los precios de los combustibles, la cual repercute en el precio de la energía, surge como una necesidad disminuir el consumo en este tipo de industrias, para lo cual se ha centrado la atención en un equipo fundamental: los motores eléctricos.

Son estas ideas las que dan origen a la motivación de esta memoria: clarificar algunos conocimientos errados comunes acerca de este tipo de motores y establecer una comparación fidedigna, basada en datos dados por los fabricantes entre los motores de alta eficiencia y los estándar.

1.2 Objetivo general

Realizar una comparación entre los motores de alta eficiencia y los de eficiencia estándar actuales, con el fin de minimizar las dudas existentes tanto en materia de funcionamiento y comportamiento en la práctica, como en el tema de costos y conveniencia económica.

1.3 Objetivos específicos

Para lograr de buena manera el objetivo propuesto anteriormente se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Revisar el “estado del arte” en temas de eficiencia energética, tanto a nivel mundial como local, con el fin de situar un contexto en el cual trabajar.
- Revisar el funcionamiento de los motores de inducción e identificar las pérdidas típicas, que permitan tener un conocimiento más acabado del problema de aumento de eficiencia.
- Conocer procesos asociados a la gran minería, con el propósito de analizar la importancia que tienen los motores en términos energéticos en las faenas mineras.
- Revisar y clarificar las múltiples normas de eficiencia con que se rigen los fabricantes de motores, y conocer los cambios a futuro con respecto al tema.
- Analizar los datos de catálogo de los fabricantes, con el fin de tener una comparación fidedigna del comportamiento de cada tipo de motor.
- Comparar parámetros de los modelos circuitales para un conjunto de motores eficientes versus motores de eficiencia estándar y desarrollar un software que permita el cálculo de dichos parámetros, con el fin de tener una representación más detallada del comportamiento de dichos motores.
- Revisar las ofertas de mercado disponibles actualmente, comparar precios y calcular indicadores económicos que permitan evaluar la conveniencia de este tipo de motores, para tomar una correcta decisión de compra.
- Aplicar los conocimientos anteriormente descritos a un proyecto real, permitiendo tener una idea más concreta de los beneficios de este tipo de motores.

1.4 Estructura del trabajo

El trabajo está organizado en siete capítulos, los cuales serán descritos a continuación:

En el capítulo uno se presentan tanto los objetivos generales y específicos del trabajo, así como sus motivaciones principales.

En los capítulos dos y tres, se presentan los antecedentes generales y específicos respectivamente. En éstos se revisan aspectos como el estado del arte del tema de eficiencia energética, funcionamiento de los motores de inducción y descripción de las pérdidas. También se tocan temas como la distribución del consumo eléctrico en una faena minera, así como los temas normativos y de clasificaciones que rigen a los motores de alta eficiencia.

El capítulo cuatro trata de establecer una comparación entre el comportamiento de los motores de alta eficiencia frente a otros de más baja eficiencia, basados en una primera etapa en los datos entregados por los fabricantes y posteriormente desarrollando los modelos circuitales para cada tipo de motor. Para esto se desarrollará un programa que permita calcular los parámetros del modelo y que entrega una gráfica con el comportamiento del torque en función de la velocidad.

El capítulo número cinco, también realiza una comparación entre ambos tipos de motores, pero esta vez en términos económicos. Para esto se presentan las ofertas de mercado disponibles de las marcas más prestigiosas y se calcula una serie de indicadores económicos que permiten a las industrias tomar una correcta decisión de compra.

El capítulo seis aplica los conceptos anteriormente vistos a un proyecto real de operación de una faena minera. Se obtienen los beneficios de optar por la compra de motores eficientes.

Para finalizar, en el capítulo siete se entregan las conclusiones generales del trabajo realizado.

2 Antecedentes generales

2.1 Eficiencia energética en el mundo

Definición de eficiencia energética.

De acuerdo con WEC¹ 2004, el término eficiencia energética se refiere a todos los cambios que se traducen en la disminución de la cantidad de energía utilizada para producir una unidad de actividad económica (por ejemplo, energía utilizada por unidad de PIB o valor agregado) o para satisfacer las necesidades energéticas residenciales manteniendo un determinado nivel de confort.

Por lo tanto, la eficiencia energética está asociada con la eficiencia económica e incluye cambios tecnológicos, económicos y en el comportamiento de la población.

Algunas medidas generales para la contribución a la eficiencia energética tanto en el sector minero, como en los demás, son las siguientes:

- Medidas de Mantenimiento

El ahorro de energía puede resultar a partir de mejores prácticas de operación y mantenimiento. Tales medidas incluyen el apagado de equipos sin uso; mejoramiento de la curva de demanda eléctrica; reducción de ajustes de temperatura en invierno; apagado de luces; eliminación de fugas de vapor, aire comprimido y calor. Por otra parte, una apropiada limpieza y reemplazo de filtros, así como una adecuada lubricación de los equipamientos, además de un correcto reemplazo y limpieza de luminarias en sistemas lumínicos puede traducirse en un óptimo uso de la energía en las instalaciones industriales existentes.

¹ World Energy Council

- Modificación de Procesos y Equipamiento

Estos cambios pueden ser aplicados a los equipos existentes o bien pueden ser incorporados en el diseño de nuevo equipamiento. Ejemplos de esto, pueden incluir el uso de componentes de mayor eficiencia o mayor vida útil, como es el caso de motores y luminarias respectivamente; la implementación de nuevos conceptos que entreguen mayor eficiencia a los procesos; o el reemplazo de un proceso existente por uno que utilice una menor cantidad de energía.

- Mejoras en la operación de los equipos

La mejor utilización de los equipos puede lograrse por medio de una inspección minuciosa de los procesos productivos, horarios y prácticas de operación. Típicamente, las plantas industriales son instalaciones de múltiples unidades que involucran una serie de operaciones independientes, con consideraciones mínimas en el consumo energético global de la planta. El mejoramiento en la eficiencia de la planta puede lograrse a través de una apropiada secuencia en los procesos de operación, reordenando horarios para que las maquinarias sean utilizadas de manera continua, disminuyendo de esta manera las pérdidas asociadas a las puestas en marcha de los equipos; además se puede calendarizar la operación de algunos procesos durante los períodos de baja demanda, con el objetivo de nivelar la curva de carga diaria, y a la vez tratando de reducir el uso de energía durante el horario de punta. Ejemplo de esto, puede ser la instalación de variadores de velocidad en sistemas de ventilación y bombeo.

- Reducción de Pérdidas de Calor en Edificios

La reducción de pérdidas de calor puede lograrse incorporando sistemas de aislamiento térmico en los edificios, u otras medidas más simples, como son el cerrado de puertas, reducción de escapes de calor, entre otros. Además, se pueden integrar cambios en el diseño arquitectónico del edificio, con el objetivo de aprovechar de una mejor manera la energía proveniente del Sol.

2.2 Evolución del Consumo de Energía y la Eficiencia Energética en Chile

Según un estudio del PRIEN de la Universidad de Chile, durante 1990 y 2006, el consumo de energía a nivel nacional creció a una tasa anual promedio de 5,07%, crecimiento ligeramente inferior al experimentado por el producto interno bruto (PIB) que creció a un ritmo del 5,72%. En la figura 2.1 se muestra la evolución a través de los años de ambos indicadores, donde es posible apreciar que siguen la misma tendencia, es decir, ambos crecen sostenidamente a una tasa promedio similar.

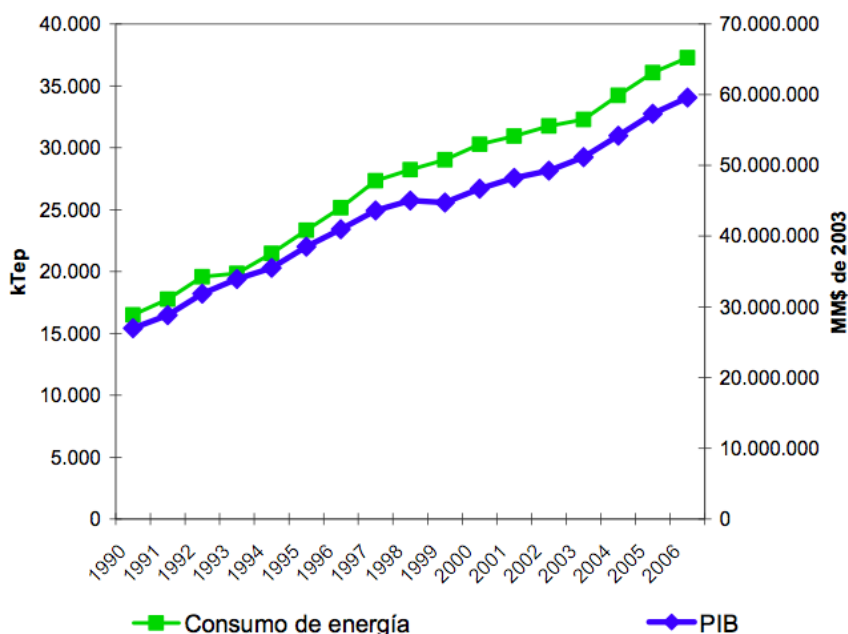


Figura 2.1: Evolución del PIB y consumo de energía en Chile [1]

Para apreciar de mejor manera la correlación entre PIB y consumo energético es que se agrega la figura 2.2, que muestra la variación del consumo de energía y del PIB con respecto a los valores del año 1990, donde queda más claro que se ha producido un desacoplamiento entre el PIB y el consumo de energía en los años 2005 y 2006.

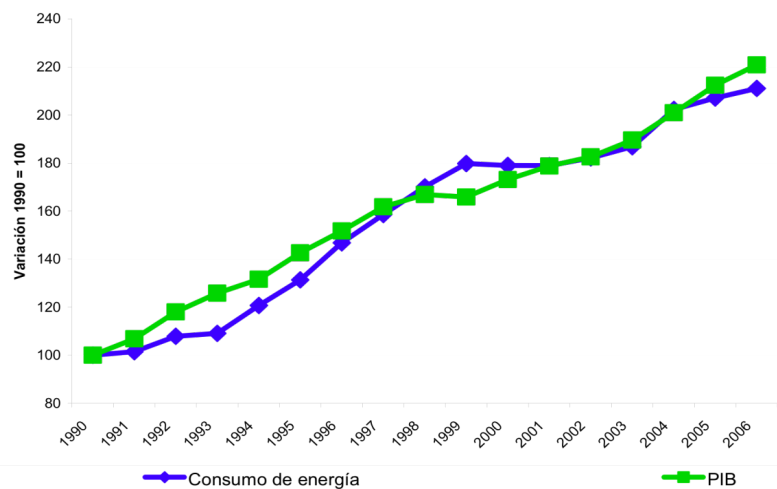


Figura 2.2: Variación del consumo de energía y del PIB con respecto a 1990 [1]

En la figura 2.3 es posible observar la evolución del consumo de energía anual de los distintos sectores, siendo destacable el crecimiento del sector servicios, en relación a los otros sectores, a partir del año 1994. Se puede observar que en todos los años el consumo minero tiene una cuota importante de participación en el total.

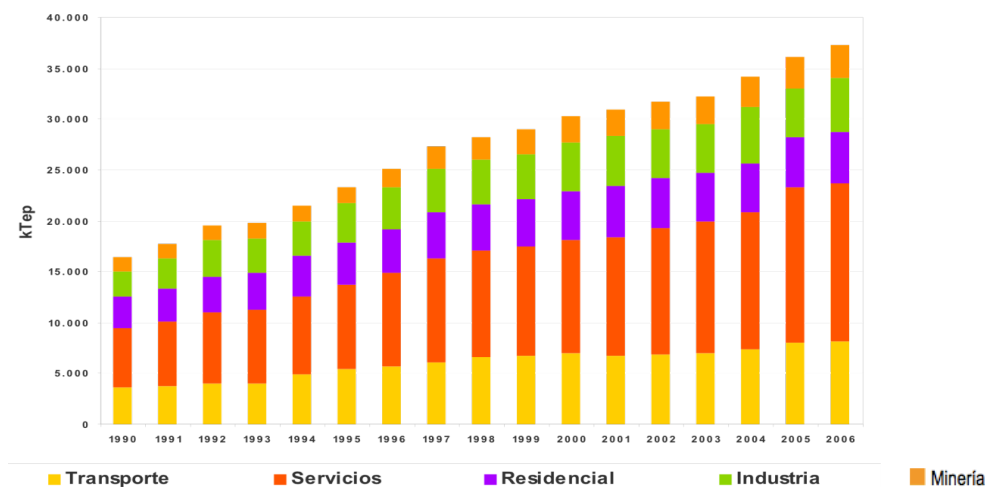


Figura 2.3: Consumo de energía por sector [1]

El Cuadro siguiente permite ilustrar los cambios estructurales en la distribución del consumo de energía en Chile. Del análisis de dicho cuadro se desprende que la estructura del consumo de energía no ha sufrido un cambio significativo entre 1990 y 2006, no obstante que el consumo de energía ha aumentado a más del doble. Cabe destacar que el sector residencial ha visto reducida su importancia relativa

umentando la del sector servicios. Esto se justifica por el reemplazo paulatino de la leña por combustibles más eficientes en el sector residencial y por un aumento sostenido en la actividad del sector servicios y de la generación termoeléctrica

| Sector | 1990 | | 2006 | |
|-------------|--------|------|--------|------|
| | kTep | % | kTep | % |
| Industria | 2.477 | 15% | 5.391 | 15% |
| Minería | 1.421 | 9% | 3.171 | 9% |
| Servicios | 5.909 | 36% | 14.393 | 40% |
| Transporte | 3.594 | 22% | 8.153 | 23% |
| Residencial | 3.081 | 19% | 5.006 | 14% |
| Total | 16.483 | 100% | 36.114 | 100% |

Tabla 2.1: Distribución de los consumos de energía por sectores [1]

2.3 Análisis del sector minero

El consumo de energía en este sector está influenciado directamente por los cambios que ocurran en el sector del cobre, pudiéndose apreciar en la tabla 2.2 que la estructura de consumos de energía entre cobre y otros se ha mantenido relativamente constante. Sin embargo, se observa que en el periodo ha habido una variación en la distribución de los consumos del “Resto”, apreciándose un crecimiento en la importancia relativa de “Minas Varias”, con la consiguiente caída de los consumos de energía del hierro y el salitre.

| | 1990 | 2006 |
|--------------|------|------|
| Cobre | 74% | 75% |
| Resto | 26% | 25% |
| Salitre | 6% | 4% |
| Hierro | 6% | 3% |
| Minas Varias | 14% | 18% |

Tabla 2.2: Distribución de los consumos de energía en minería [1]

Desde los años 1990 a 2006, el consumo de energía en el sector creció a un ritmo promedio de 5,3%. En la Figura 2.4 se aprecia lo íntimamente ligados que están los consumos de energía de la minería del cobre y del conjunto del sector minero. En efecto, ambas curvas se comportan de manera casi idéntica. Además de la observación de dicha figura, se aprecian 2 periodos; el primero entre 1990 y 1994 donde el consumo de energía se mantiene prácticamente constante y un segundo periodo, desde 1995 hasta 2006, donde se advierte un aumento sostenido en el

consumo de energía, debido fundamentalmente a la expansión de la producción del cobre.

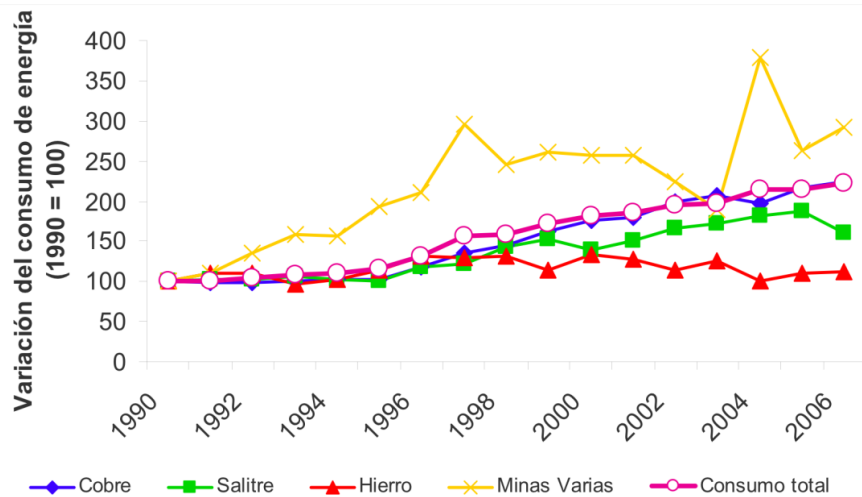


Figura 2.4: Variación de consumo minero según mineral [1]

En efecto, el Cuadro siguiente resume las principales faenas que fueron abiertas a partir del año 1994 y que entraron en operación recientemente. La información disponible permite vislumbrar grandes perspectivas de desarrollo para el sector y, por lo tanto, esperar que el crecimiento en la demanda de energía del sector se mantenga en el tiempo.

| Faena | Año de inicio de operaciones |
|---|------------------------------|
| Cerro Colorado (*) | 1994 |
| Quebrada Blanca (*) | 1994 |
| La Candelaria (*) | 1994 |
| Zaldivar (*) | 1995 |
| Manto Verde (*) | 1995 |
| Andacollo (*) | 1996 |
| Collahuasi (*) | 1998 |
| El Abra (*) | 1996 |
| Radomiro Tomic (*) | 1998 |
| Lomas Bayas (*) | 1998 |
| Plan desarrollo el Teniente (**) | 2003 a 2007 |
| Escondida Norte (**) | 2005 |
| Refugio (**) | 2005 |
| Choquelimpie (**) | 2005 |
| Spence (**) | 2006 |
| Escondida, lixiviación de sulfuros (**) | 2006 |
| Gaby (**) | 2007 |
| Ministro Alejandro Hales (**) | 2007 |
| Expansión Andina (**) | 2008 |
| Esperanza (**) | 2009 |
| Ampliación de Pelambres (**) | 2009 |
| Pascua - Lama (**) | 2009 |

Fuente: (*) CNE, 2002
 (**) Página web de COCHILCO, 2007

Tabla 2.3: Nuevas faenas mineras [1]

Como se puede ver, la instalación de faenas mineras está teniendo un crecimiento acelerado desde los últimos años. A continuación se muestra un gráfico que indica que entre todos los sectores de la minería, el cobre representa la mayor importancia en términos energéticos.

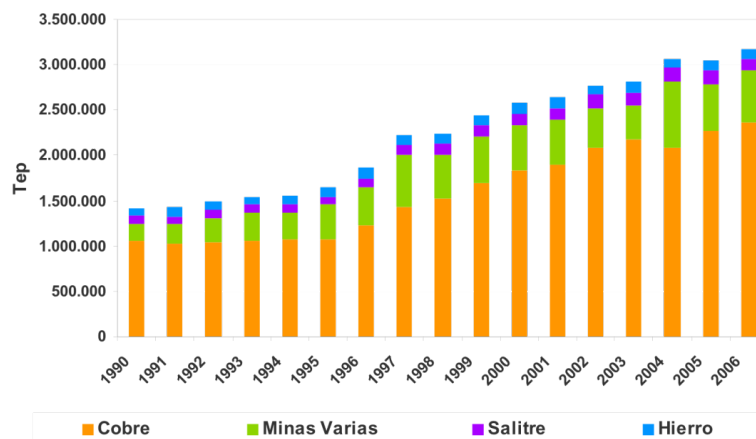


Figura 2.5: Evaluación del consumo de energía en el sector minero [1]

Industria del cobre

En 1990 la industria del cobre consumió 1.051.300 Tep, cifra que se ha incrementado en un 125% al 2006 a una tasa media anual de 5,3%. Sin embargo, como fue mencionado anteriormente, hasta el año 1995 el consumo se mantuvo relativamente constante y a partir de 1996, se aprecia un crecimiento sostenido en el consumo de un 8,3%.

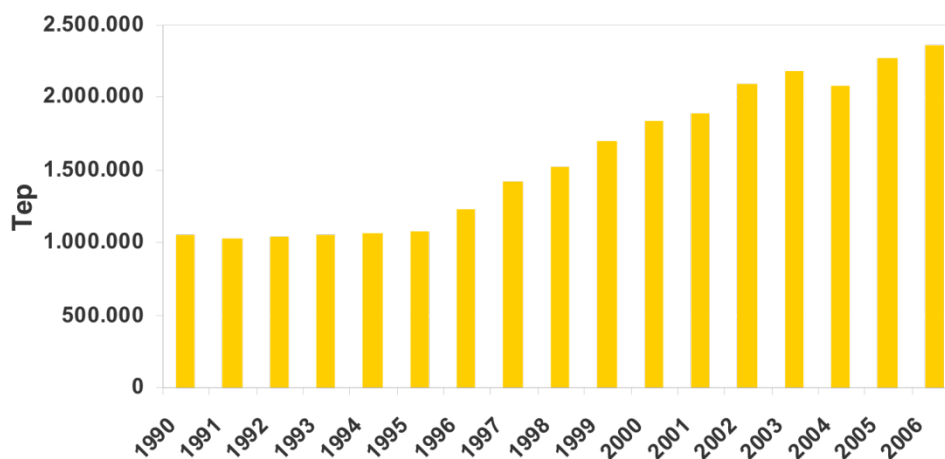


Figura 2.6: Evolución del consumo de energía en la minería del cobre [1]

3 Antecedentes específicos

3.1 Procesos asociados a la Gran Minería del Cobre

Para realizar de manera correcta un estudio de eficiencia de motores eléctricos, es necesario conocer los usos que se les da a dichas máquinas, por lo que a continuación se realizará una revisión de las etapas involucradas en el proceso de extracción y procesamiento del cobre, facilitando con esto la lectura y comprensión del presente estudio.

Los procesos básicos asociados a la gran minería del cobre se muestran esquemáticamente a continuación:

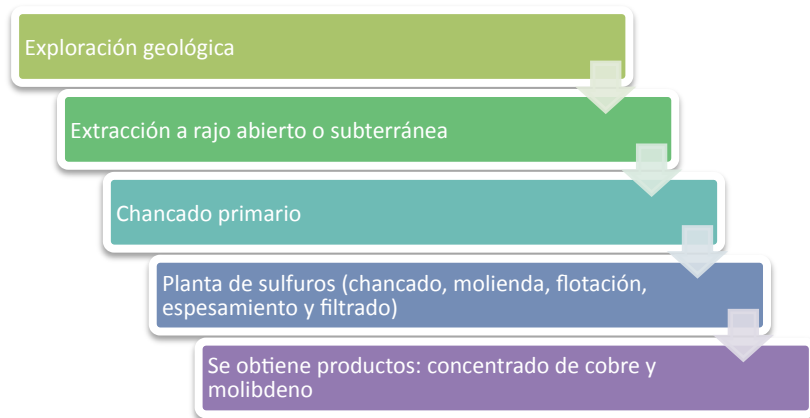


Figura 3.1: Procesos asociados a la minería del cobre.

El proceso parte con la extracción del mineral, ya sea de manera subterránea o en minas a rajo abierto, para posteriormente ser triturado en el proceso de chancado. Una vez realizado lo anterior, el material puede ser llevado a la planta de sulfuros o de óxidos, que a través de distintos procesos permiten extraer el cobre del mineral.

A través de la planta de sulfuros se obtiene como producto el concentrado de cobre; o mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de otros metales, con una pureza cercana al 31% de cobre. A su vez, el concentrado de cobre puede ser sometido a los procesos de fundición y electrorefinación, que permiten obtener cátodos de alta pureza de cobre (99,99%).

De la misma manera, al realizar el procesamiento del mineral a través de la planta de óxidos se obtienen cátodos de cobre, o cobre de alta pureza (99,99%).

La siguiente tabla muestra un análisis detallado del consumo de energía por proceso. Cabe señalar que en los procesos de extracción y refinación del cobre, la etapa que consume la mayor cantidad de energía es la fase de concentrado (53%), el cual se basa fundamentalmente al movimiento de material, por lo que resulta de gran trascendencia la observación de las potencialidades de eficiencia energética en este proceso.

| CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR PRODUCTOS DE COBRE (*) | | | | | |
|--|---------------------------|-----------------------------|---------|-----------|---|
| Procesos | Producto Comercial | Coef. Unitarios (KWH / TMF) | | Variación | Causas |
| | | 1995 | 2004 | | |
| Extracción Concentración (53%) | CONCENTRADO (30% Cu) | 1.837,4 | 2.204,1 | 20,0% | Baja de leyes, Reemplazo de secadores por filtros |
| Fundición (11,6%) | BLÍSTER (99,5 % Cu) | 2.615,4 | 3.302,7 | 26,3% | Eliminación de hornos de reverberos, Incorporación Horno Flash, Conv. TTE y Noranda |
| Refinación Electrolítica (2,4%) | CÁTODOS (99,99% Cu) | 2.947,5 | 3.654,1 | 24,0% | Causas anteriores. Consumo estable en refinación |
| Extracción / Lixiviación / Ext. Solventes / Elect.Obtención (33%) | CÁTODOS SX EW (99,99% Cu) | 3.291,4 | 3.111,5 | -5,5% | Consumo estable y más eficiente |

Tabla 3.1: Energía eléctrica consumida por proceso [1]

3.2 Motores de inducción trifásicos

El motor de inducción trifásico, también llamado motor asíncrono, es hoy día el motor eléctrico más utilizado en las aplicaciones industriales, sobre todo el motor con rotor de jaula de ardilla.

3.2.1 Principios de funcionamiento

El motor de inducción trifásico, tal como se muestra en la siguiente figura, se compone de un estator fijo, un bobinado trifásico alimentado por una red eléctrica trifásica y un rotor giratorio. No hay ninguna conexión eléctrica entre el estator y el rotor. Las corrientes del rotor se inducen desde el estator a través del entrehierro. Tanto el estator como el rotor están fabricados por un conjunto de láminas de acero silicoso de alta capacidad de magnetización, que proporciona bajas pérdidas por corrientes de Foucault e histéresis.

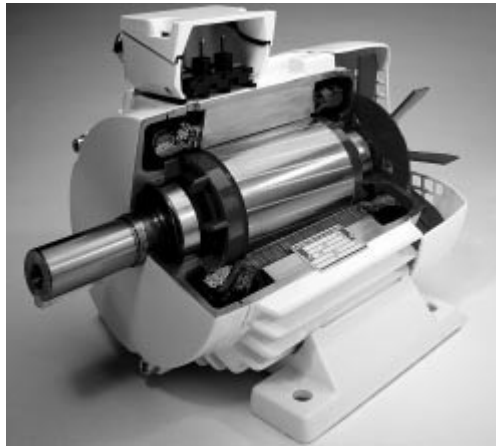


Figura 3.2: Motor de inducción trifásico tipo jaula de ardilla [14]

3.2.2 Estator

El *bobinado del estator* está formado por tres bobinados individuales que se superponen y están desfasados con un ángulo de 120° eléctricos. Cuando se conecta a la alimentación, la corriente de entrada primero magnetiza el estator. Esta *corriente de magnetización* genera un *campo rotatorio* que gira con la *velocidad de sincronismo* o velocidad síncrona n_s .

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (3.1)$$

Donde: $n_s = \text{velocidad síncrona [rpm]}$

$f = \text{frecuencia [Hz]}$

$p = \text{n}^\circ \text{ de pares de polos}$

Para el número de pares de polos más pequeño $2p = 2$ en un circuito de 50 Hz, se tiene la velocidad sincrónica más alta, $n_s = 3000 \text{ rpm}$. Las velocidades sincrónicas de un circuito de 50 Hz se indican en la tabla siguiente:

| | | | | | | | | | | |
|---------------------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Pares de polos $2p$ | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 16 | 24 | 32 | 48 |
| n_s en rpm | 3000 | 1500 | 1000 | 750 | 600 | 500 | 375 | 250 | 188 | 125 |

Tabla 3.2: Velocidades sincrónicas de motores de inducción de 50 Hz

3.2.3 Rotor

En los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla, el rotor está formado por un núcleo de rotor cilíndrico de acero silicoso laminado y ranurado, provisto de barras generalmente de aluminio unidas en sus extremos con anillos, para formar una jaula cerrada.

En una analogía con un transformador, el motor de inducción con rotor bloqueado actúa como un transformador cortocircuitado en el secundario. Por consiguiente, el bobinado del estator corresponde al bobinado primario y el bobinado del rotor, al bobinado secundario.

Dado que está en cortocircuito, la corriente interna del rotor depende de la tensión inducida y de la resistencia de la jaula. La interacción entre el flujo magnético y los conductores con corriente del rotor genera un par de torsión que se corresponde con la rotación del campo rotatorio. Las barras de la jaula están dispuestas en la periferia del rotor y no son paralelas respecto al eje de rotación, para impedir fluctuaciones en el par de torsión (véase la siguiente figura). Esto se denomina "inclinación".

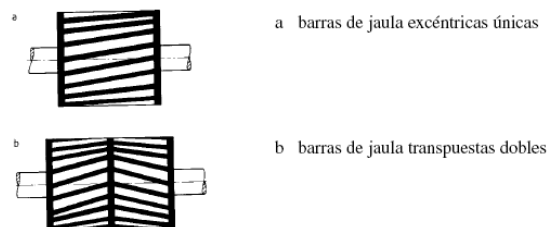


Figura 3.3: Tipos de bobinados de rotor jaula de ardilla [14]

Cuando está en vacío, el rotor casi alcanza la velocidad sincrónica del campo rotativo, ya que el par de torsión antagonista es reducido (ninguna pérdida sin carga). Si la rotación fuera la de sincronismo, la tensión ya no se induciría, la corriente dejaría de fluir y ya no habría par de torsión.

Durante el funcionamiento, la velocidad del rotor baja hasta la velocidad de carga n . La diferencia relativa entre la velocidad sincrónica y la de carga se denomina deslizamiento s . Basado en este deslizamiento s , dependiente de la carga, la tensión inducida en el bobinado del rotor cambia y éste, a su vez, cambia la corriente del rotor y el par de torsión M . Al aumentar el deslizamiento, también lo hacen la corriente del

rotor y el par de torsión. Dado que el motor de inducción trifásico actúa como un transformador, la corriente del rotor se transforma en la parte del estator (o primario) y la corriente de alimentación del estator cambia esencialmente de la misma manera. La potencia eléctrica del estator generada por la corriente de alimentación se convierte, a través del entrehierro, en potencia mecánica en el rotor. Por ello, la corriente del estator consta de dos componentes, la corriente de magnetización y la corriente de carga en sí.

3.2.4 Deslizamiento

La diferencia relativa entre la velocidad sincrónica n_s y la velocidad n de funcionamiento de régimen se denomina *deslizamiento* s y suele expresarse en porcentaje. Dependiendo del tamaño de la máquina, durante el funcionamiento de régimen esta diferencia es aproximadamente del 10-3%. El deslizamiento es una de las características más importantes de una máquina de inducción.

| | | |
|---|--|-------|
| $\text{Deslizamiento } s = \frac{n_s - n}{n_s}$ | s = deslizamiento n_s = velocidad sincrónica n = velocidad del rotor | (3.2) |
|---|--|-------|

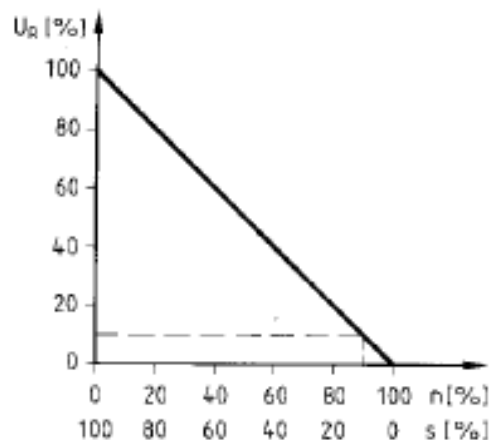


Figura 3.4: Relación tensión rotórica vs deslizamiento [14]

La tensión del rotor inducida U_r , mostrada en la figura 3.4, es proporcional al deslizamiento s . En la posición de parada, la tensión alcanza su máximo con $n = 0$ y $s = 1$, lo que también intensifica al máximo el flujo de corriente. En las aplicaciones reales, este hecho lo confirma la elevada corriente de arranque. El par de torsión

también alcanza su máximo durante el periodo de parada con una resistencia de rotor determinada. Este comportamiento puede modificarse variando el diseño. Sin embargo, la resistencia del rotor no suele utilizarse para este fin. La siguiente fórmula se aplica para la velocidad del rotor:

| | | |
|---|--|-------|
| $\text{Velocidad del rotor } n = n_s \cdot (1 - s)$ | n = velocidad del rotor n_s = velocidad sincrónica s = deslizamiento | (3.3) |
|---|--|-------|

3.2.5 Características del par torque-velocidad

La Figura 3.5 muestra, mediante los siguientes parámetros, las características de par de torsión propias de los motores de inducción con rotor de jaula de ardilla. El par acelerador abarca toda la característica de par, desde la parada hasta la velocidad máxima.

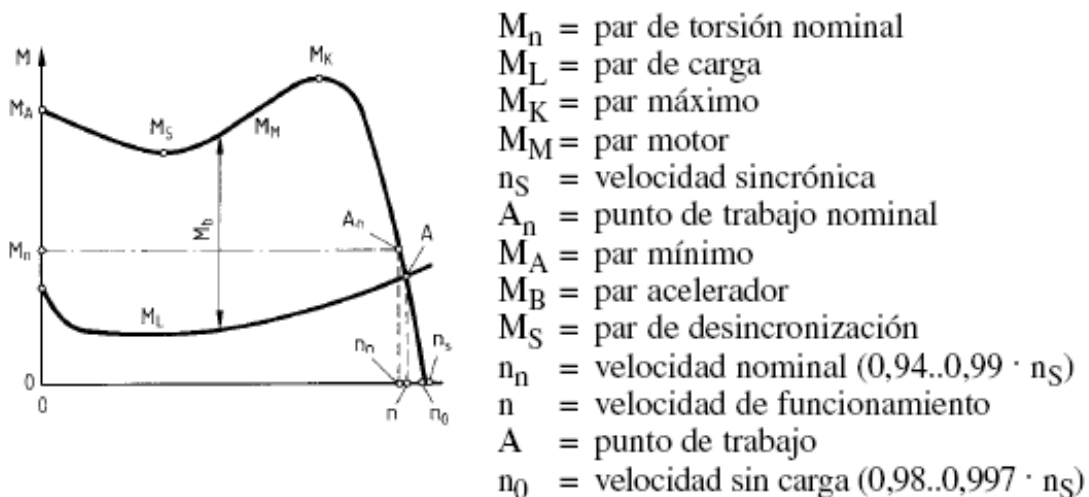


Figura 3.5: Características del par de torsión en función de la velocidad [14]

Ma Par inicial de arranque en la posición de parada; también llamado *par mínimo*. Los valores proporcionados por los fabricantes de motores deberían estar comprendidos entre -15% y +25% respecto del par nominal.

Mn *Par de torsión de régimen* durante el funcionamiento de régimen con una *potencia de régimen* P_n y una velocidad de régimen n_n . Sin carga, el par es muy bajo y cubre la fricción interna. Cuando el motor se carga, su velocidad disminuye ligeramente por el valor del deslizamiento s y el par aumenta. Un motor estándar en funcionamiento continuo debe poder proporcionar el par nominal sin exceder el límite de temperatura. El par nominal puede excederse hasta cierto punto a lo largo de todo el régimen de funcionamiento, siempre que el límite de temperatura no se sobrepase.

Mk *Par máximo*. Éste es el *par máximo* que un motor puede proporcionar. Si la potencia aumenta por encima de la carga nominal P_n , el deslizamiento s continúa incrementándose, la velocidad n disminuye y el motor proporciona un par mayor. Esto puede aumentarse hasta el valor máximo M_k (par máximo), momento en el que el motor se hace *inestable*, es decir, su velocidad disminuye de repente con este valor de deslizamiento (deslizamiento de interrupción) y la velocidad del motor tiende a 0.

Según las normas, el par máximo debe ser $M_k \geq 1,6 M_n$ y es necesario poder sobrecargar el motor al menos durante 15 segundos con este valor y la tensión y frecuencia nominal. En la mayoría de los motores, el par máximo es considerablemente mayor y suele alcanzar valores de $M_k = 2...3,5 M_n$. Por consiguiente, los motores de inducción son especialmente apropiados para las cargas intermitentes, siempre que el calor adicional pueda disiparse.

Ms *Par de desincronización*; es el par mínimo producido durante la aceleración. En cualquier caso, debe ser mayor que el par de carga M_L a esa determinada velocidad, ya que, de lo contrario, el motor no puede acelerarse. Los valores mínimos del par de desincronización se indican en las normas correspondientes al funcionamiento a tensión nominal.

ML *Par de carga*, es *par antagonista* que representa a la carga durante la aceleración.

Mm *Par motor*, también denominado *par acelerador*.

Mb *Par acelerador*, definido como la diferencia entre el par motor M_m y el par de carga M_L .

Durante el arranque, el par mínimo M_A debe ser mayor que el par mínimo de la carga M_L , y, durante la fase de aceleración completa, el par motor M_M debe permanecer por encima del par de carga M_L , como muestra la Figura 3.5. En la intersección de las dos líneas de par (punto de funcionamiento A), el motor funciona con velocidad constante n . En caso de sobrecarga, el punto de trabajo A aumenta por encima del punto de trabajo nominal A_n . Esto sólo se permite durante un periodo corto de tiempo para evitar el sobrecalentamiento del motor.

El punto de trabajo A tampoco debe ser demasiado bajo, por lo que no debería elegirse un motor sobredimensionado. Si está por debajo del 50% de la carga nominal, el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ disminuyen enormemente y los motores dejan de funcionar de forma económica. Un motor más grande también tiene una intensidad de arranque I_A mayor, ya que esta corriente es independiente del par de carga. Los motores de mayor tamaño sólo reducirían el tiempo de aceleración.

3.2.6 Diseño del motor

En los motores de inducción trifásicos, las características del par pueden adaptarse en gran medida a la aplicación. En este caso, las propiedades importantes son una intensidad de arranque baja I_A y un par de arranque alto M_A . La característica de par y el tamaño de la intensidad de arranque vienen determinados principalmente por el tipo de jaula del rotor y la forma de la ranura del rotor, como puede verse en la Figura 3.6.

Es posible conseguir un par mínimo elevado M_A y una intensidad de arranque baja I_A mediante una resistencia óhmica de rotor relativamente alta en el par de arranque. Básicamente, durante el arranque se origina un "efecto de desplazamiento de corriente" (efecto pelicular) más o menos elevado; esto se aplica a todos los tipos de diseños de rotor. Se distinguen los siguientes diseños:

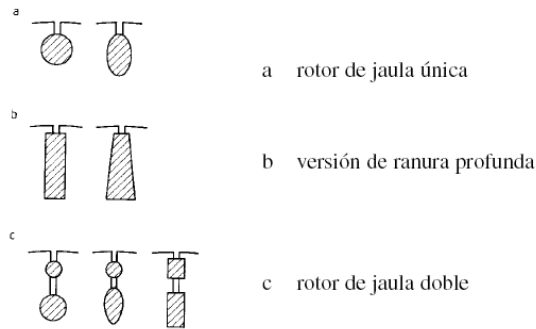


Figura 3.6: Forma de ranura para rotor jaula de ardilla [14]

Rotores de jaula de ardilla normales con ranura única y conductores circulares, rectangulares o trapezoidales, hechos normalmente de aluminio y provistos de un par de arranque relativamente elevado (1,8 a 2,5 veces M_n) y una corriente de arranque alta (5 a 10 veces I_n).

Rotores de desplazamiento de corriente, también llamados *rotores de barra profunda*. Si las barras de la jaula son altas y estrechas, durante la puesta en marcha se produce un *desplazamiento de corriente*, dado que en ese momento la frecuencia del rotor es alta. La corriente fluye por la parte exterior o "piel" del rotor. Este efecto reduce la sección transversal eficaz del conductor y, por consiguiente, aumenta la resistencia óhmica. El resultado es un par de arranque MA bueno y una intensidad de arranque IA baja favorable. Durante el funcionamiento, el desplazamiento de corriente deja de tener efecto, ya que en ese momento la frecuencia del rotor es muy baja y las corrientes y los pares del motor son normales.

Rotores de jaula de ardilla doble, cuya barra está dividida en dos barras individuales que suelen estar eléctricamente aisladas la una de la otra. La *jaula externa* tiene una *resistencia óhmica alta* y la *interna*, una *resistencia óhmica baja*. La resistencia alta se consigue utilizando un material de alta resistividad y/o un tamaño de sección transversal de conductor apropiado. El efecto es incluso mayor que en un rotor de desplazamiento de corriente. Durante el arranque, la corriente fluye esencialmente sólo por la jaula exterior, lo cual reduce la corriente de arranque IA e incrementa relativamente el par de arranque MA . Durante el funcionamiento, la corriente se distribuye entre las dos jaulas de acuerdo a sus resistencias óhmicas.

Rotores de jaula de ardilla de alta resistencia, también llamados rotores de deslizamiento, con forma de ranura como la de un rotor de jaula de ardilla normal, pero con conductores de latón o de aleación de aluminio de alta resistencia en lugar de conductores de Al o Cu. Esto hace que la resistencia óhmica aumente. Este rotor, comparado con el de desplazamiento de corriente, permanece constante a lo largo de todo el régimen de velocidad y, durante su funcionamiento, produce un deslizamiento elevado con una característica de velocidad flexible y un par de arranque máximo poco pronunciado. El par de arranque MA es alto respecto a la resistencia del rotor y la intensidad de arranque IA disminuye. Dado que durante el funcionamiento la resistencia óhmica es alta, las pérdidas son relativamente grandes, por lo que las prestaciones son poco económicas. En consecuencia, estos rotores se utilizan poco hoy en día, sobre todo desde que las características deseadas también pueden conseguirse con dispositivos electrónicos de bajas pérdidas, como los variadores y los arrancadores suaves.

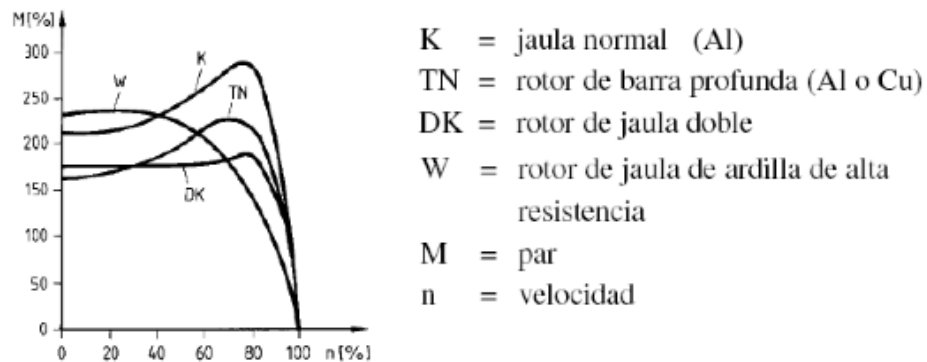


Figura 3.7: Características de principales tipos de jaulas [14]

3.2.7 Características de funcionamiento

Las características de funcionamiento son una presentación gráfica del comportamiento de:

- La velocidad
- La corriente de línea
- El factor de potencia
- La potencia
- El rendimiento
- El deslizamiento en función de la carga.

La Figura 3.8 muestra las características de funcionamiento de un motor de inducción típico.

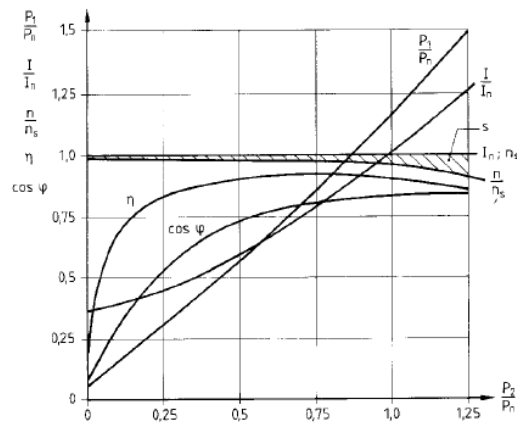


Figura 3.8: Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga [14]

n = velocidad

n_s = velocidad sincrónica

P_1 = potencia de entrada

P_2 = potencia de salida

η = rendimiento

$\cos \phi$ = factor de potencia

I = corriente de entrada

I_n = intensidad nominal

s = deslizamiento

P_n = potencia nominal

n La *velocidad* n sólo disminuye ligeramente conforme aumenta la carga. Por consiguiente, los motores de jaula de ardilla estándar tienen unas *características de velocidad "rígidas"*.

s El *deslizamiento* s aumenta más o menos proporcionalmente con el incremento de la carga.

$\cos \phi$ El *factor de potencia* o $\cos \phi$ depende *en gran medida de la carga* y normalmente alcanza su máximo durante la sobrecarga. En el régimen de carga parcial, es relativamente desfavorable, ya que, incluso con cargas parciales, la magnetización es prácticamente constante.

η El *rendimiento* η muestra una característica *relativamente plana* y es prácticamente constante por encima de la media-carga. Suele alcanzar su máximo cuando está por debajo de la potencia de régimen P_n .

I La *corriente* I aumenta proporcionalmente comenzando más o menos a media-carga. Por debajo de la media-carga, la corriente disminuye sólo ligeramente hasta convertirse en la corriente de carga nula I_0 (magnetización constante).

P La *potencia* P aumenta más o menos en proporción con el inicio de carga comenzando en la potencia de carga nula. En el régimen de sobrecarga, la potencia aumenta algo más de prisa, ya que las pérdidas también se incrementan con más rapidez.

Dado que el rendimiento η y el factor de potencia $\cos\phi$ pueden tener un efecto importante sobre la eficacia económica de un motor, es muy importante saber cuáles son los valores de la carga parcial. Ambos valores determinan el rendimiento económico del funcionamiento. En el régimen de carga parcial, los dos valores disminuyen. Además, el factor de potencia $\cos\phi$ de los motores de velocidad baja es inferior al de los motores de velocidad elevada. Por consiguiente, los motores de velocidad alta y dimensionamiento preciso no sólo resultan más baratos al comprarlos, sino también al utilizarlos.

3.3 Motores energéticamente eficientes

3.3.1 Eficiencia estándar de motores

Durante el período de 1960 a 1975, los motores eléctricos, en particular los de rango de 1 a 250 HP, fueron diseñados con un criterio de mínimo costo. La cantidad de material activo, es decir, laminación de acero, cobre o aluminio, se seleccionaba a los mínimos niveles requeridos para un correcto funcionamiento. La eficiencia fue mantenida a niveles suficientes para mantener los requerimientos de temperatura necesarios. Como consecuencia, dependiendo del tipo de carcasa y sistema de ventilación, existe un amplio rango de eficiencias para los polifásicos motores polifásicos NEMA diseño B.

La siguiente tabla, muestra las eficiencias asociadas a un rango de motores, las cuales también se muestran en forma gráfica:

| hp | Nominal efficiency range | Average nominal efficiency |
|-----|--------------------------|----------------------------|
| 1 | 68–78 | 73 |
| 1.5 | 68–80 | 75 |
| 2 | 72–81 | 77 |
| 3 | 74–83 | 80 |
| 5 | 78–85 | 82 |
| 7.5 | 80–87 | 84 |
| 10 | 81–88 | 85 |
| 15 | 83–89 | 86 |
| 20 | 84–89 | 87.5 |
| 25 | 85–90 | 88 |
| 30 | 86–90.5 | 88.5 |
| 40 | 87–91.5 | 89.5 |
| 50 | 88–92 | 90 |
| 60 | 88.5–92 | 90.5 |
| 75 | 89.5–92.5 | 91 |
| 100 | 90–93 | 91.5 |
| 125 | 90.5–93 | 92 |
| 150 | 91–93.5 | 92.5 |
| 200 | 91.5–94 | 93 |
| 250 | 91.5–94.5 | 93.5 |

Tabla 3.3: Eficiencias a plena carga de motores de inducción diseño B [8]

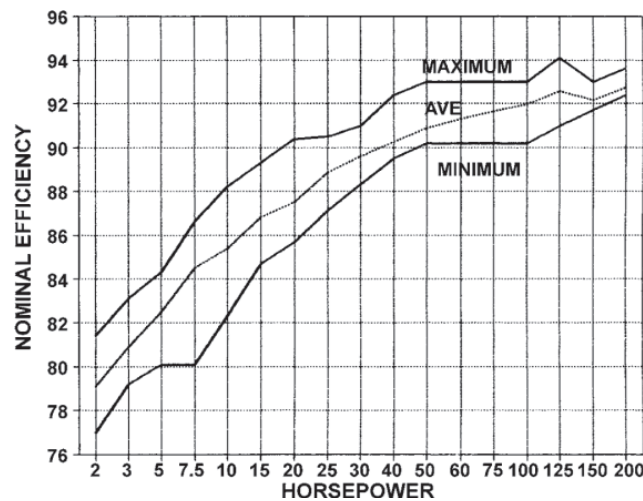


Figura 3.9: Rango de eficiencia nominal de motores estándar NEMA diseño B (4 polos) [8]

3.3.2 Concepto de eficiencia

La eficiencia de un motor eléctrico y de una máquina en general, se refiere a la habilidad que tenga ésta en convertir energía mecánica a energía eléctrica, es decir, Watts de potencia en los terminales de entrada, en Watts (o HPs) de potencia en el eje del motor. Como es sabido, al hacer la conversión, el mismo motor absorbe cierta cantidad de energía, es decir, se pierde energía. Éstas pérdidas se ven cuantificadas en las siguientes expresiones.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Energía mecánica de salida}}{\text{Energía eléctrica de entrada}} * 100\% \quad (3.4)$$

Pero

$$\text{Energía mecánica de salida} = \text{energía eléctrica de entrada} - \text{pérdidas}$$

O

$$\text{Energía eléctrica de entrada} = \text{Energía mecánica de salida} + \text{pérdidas}$$

Con esto, es claro que para reducir la energía de entrada al motor, es necesario reducir las pérdidas.

Para cumplir con lo anterior, a continuación se hará una descripción de las pérdidas existentes en los motores de inducción polifásicos.

3.3.3 Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

Como es sabido, las pérdidas eléctricas se refieren a la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas por su naturaleza se pueden clasificar en 5 tipos: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales.

3.3.3.1 Pérdidas en los conductores

Las pérdidas en los conductores se localizan en dos zonas: estator (I^2R en las bobinas del estator) y rotor (I^2R en las bobinas del rotor). Éstas pérdidas dependen del cuadrado de la corriente circulante.

- Pérdidas en los conductores del estator

Estas pérdidas están en función de la corriente que pasa a través del bobinado de estator y de la resistencia del mismo. Son casi nulas en vacío y aumentan al incrementar la carga.

En función del factor de potencia (FP), la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

$$I_l = \frac{P \text{ eléctrica de entrada}}{\sqrt{3} * V_l * FP} \quad (3.5)$$

Para mejorar el comportamiento del motor es importante conocer la relación entre la eficiencia y el factor de potencia. Si se despeja el factor de potencia, la ecuación se puede escribir como:

$$FP = \frac{P \text{ mecánica de salida}}{\sqrt{3} * V_l * I_l * EF} \quad (3.6)$$

Con la ecuación anterior se puede ver que si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia tenderá a disminuir. Para dejar el factor de potencia en una cantidad constante, la corriente de estator debe reducirse una cantidad proporcional al aumento de eficiencia. Si se pretende que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más de lo que la eficiencia aumente. Desde el punto de vista del diseño, esto es difícil de lograr debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el torque máximo.

Por otra parte, la corriente de línea se puede expresar como:

$$I_l = \frac{P \text{ mecánica de salida}}{\sqrt{3} * V_{salida} * FP * EF} \quad (3.7)$$

La expresión anterior muestra que las pérdidas en el estator (I^2R) son inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Además, las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del enrollado. Para un cierto motor, la resistencia del enrollado es inversamente proporcional al peso del mismo, es decir, a más material conductor en el estator, se tendrán menos pérdidas.

- Pérdidas en los conductores del rotor.

Son directamente proporcionales a la resistencia de bobinado del rotor, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado rotórico (barras y anillos) y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente nulas en vacío y aumentan con el cuadrado de la corriente de rotor y la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$Pérd. Rotor = \frac{(PMS + Pérdidas F y V)}{1 - S} * S \quad (3.8)$$

Con PMS: Potencia mecánica de salida
F y V: Fricción y ventilación
S: Deslizamiento

3.3.3.2 Pérdidas en el núcleo magnético

Estas pérdidas tienen dos componentes, las pérdidas por corrientes de Eddy y las pérdidas por el fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son prácticamente nulas.

- Pérdidas por histéresis.

Son causadas debido a las propiedades de remanencia que tienen los materiales magnéticos al ser excitados por un flujo magnético en una dirección. Como el flujo de excitación cambia de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, cuya área está relacionada por la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

- Pérdidas por corrientes de Eddy.

Son causadas por las corrientes inducidas o corrientes de Eddy que circulan en las láminas magnéticas del núcleo del estator las que son inducidas por el flujo magnético giratorio del estator. De hecho, de acuerdo a la ley de Faraday, el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor, estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por lo tanto éstas pérdidas dependen del flujo máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

3.3.3.3 Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas al rozamiento en los rodamientos y a la resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor.

La fricción en los rodamientos es una función de las dimensiones de éste, la velocidad, el tipo de rodamiento, la carga y la lubricación usada. Estas pérdidas son relativamente fijas para un tipo de diseño, y debido a que constituyen un porcentaje menor del total de pérdidas del motor, los cambios que se puedan hacer al diseño para reducirlas no afectan mayormente la eficiencia del motor.

3.3.3.4 Pérdidas adicionales en carga.

Son pérdidas difíciles de determinar por medio de cálculos o mediciones directas. Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se supone que varían con el cuadrado del torque de salida.

La naturaleza de estas pérdidas es compleja. Son función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en éstas pérdidas son: el diseño del enrollado, la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras del estator; la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones en la superficie del rotor, el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

3.3.3.5 Distribución de las pérdidas.

El diseño final del motor, es un balance entre las diferentes pérdidas, con el objetivo de obtener una eficiencia elevada y aún poder satisfacer los requerimientos operacionales típicos, como torque de partida, corriente de partida, torque máximo y factor de potencia.

| Loss distribution | 1 hp | | | 5 hp | | |
|----------------------------|-------|--------|---------|-------|--------|---------|
| | Watts | % Loss | PU loss | Watts | % Loss | PU loss |
| Stator power loss I_1^2R | 120 | 43 | 0.16 | 305 | 40 | 0.08 |
| Rotor power loss I_2^2R | 35 | 13 | 0.05 | 150 | 20 | 0.04 |
| Magnetic core loss | 76 | 28 | 0.10 | 225 | 29 | 0.06 |
| Friction and windage loss | 24 | 9 | 0.03 | 30 | 4 | 0.01 |
| Stray load loss | 19 | 7 | 0.03 | 51 | 7 | 0.01 |
| Total losses | 274 | 100 | 0.37 | 761 | 100 | 0.20 |
| Output, W | 746 | | | 3730 | | |
| Input, W | 1020 | | | 4491 | | |
| Efficiency, % | 73 | | | 83 | | |

Tabla 3.4: Distribución de pérdidas típicas para motores estándar NEMA-B (1 y 5 HP) [8]

| 25 hp | | | 50 hp | | | 100 hp | | | 200 hp | | |
|--------|--------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|---------|---------|--------|---------|
| Watts | % Loss | PU loss | Watts | % Loss | PU loss | Watts | % Loss | PU loss | Watts | % Loss | PU loss |
| 953 | 42 | 0.05 | 1,540 | 38 | 0.04 | 1,955 | 28 | 0.026 | 3,425 | 30 | 0.023 |
| 479 | 21 | 0.03 | 860 | 22 | 0.02 | 1,177 | 18 | 0.016 | 1,850 | 16 | 0.012 |
| 351 | 15 | 0.02 | 765 | 20 | 0.02 | 906 | 13 | 0.012 | 1,650 | 15 | 0.011 |
| 168 | 7 | 0.01 | 300 | 8 | 0.01 | 992 | 14 | 0.013 | 1,072 | 10 | 0.007 |
| 345 | 15 | 0.02 | 452 | 12 | 0.01 | 1,900 | 27 | 0.025 | 3,235 | 29 | 0.022 |
| 2,296 | 100 | 0.13 | 3,917 | 100 | 0.10 | 6,930 | 100 | 0.092 | 11,232 | 100 | 0.075 |
| 18,560 | | | 37,300 | | | 74,600 | | | 149,200 | | |
| 20,946 | | | 41,217 | | | 81,530 | | | 160,432 | | |
| 89 | | | 90.5 | | | 91.5 | | | 93.0 | | |

Tabla 3.5: Distribución de pérdidas típicas para motores estándar NEMA-B (25 y 200 HP) [8]

La distribución de las pérdidas de los motores eléctricos a carga nominal se muestra en las tablas 3.4 y 3.5 para varias potencias. Es importante para los diseñadores de los motores entender esta distribución de las pérdidas, con el fin de hacer cambios de diseño para mejorar la eficiencia de los motores. En un general, la distribución de pérdidas promedio para el estándar de diseño NEMA B, se puede resumir como sigue:

| Motor component loss | Total loss, % |
|---------------------------|---------------|
| Stator power loss I^2R | 37 |
| Rotor power loss I_2^2R | 18 |
| Magnetic core loss | 20 |
| Friction and windage | 9 |
| Stray load loss | 16 |

Tabla 3.6: Promedio de pérdidas en motores NEMA-B [8]

3.3.4 Incremento de la eficiencia.

La distribución de pérdidas de la tabla anterior indica la importancia de los cambios de diseño para mejorar la eficiencia de los motores. Sin embargo, con el aumento de eficiencia y potencia, el nivel de dificultad para mejorar la eficiencia aumenta. Considerando sólo las pérdidas de potencia del estator y rotor, para mejorar un punto en la eficiencia del motor a plena carga, se requiere una reducción creciente en estas pérdidas de potencia, como lo muestra la siguiente tabla:

| hp | Original efficiency, % | Increased efficiency, % | Decrease in power losses required, % |
|-----|------------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 73.0 | 74.0 | 8 |
| 5 | 83.0 | 84.0 | 11 |
| 25 | 89.0 | 90.0 | 16 |
| 50 | 90.5 | 91.5 | 19 |
| 100 | 91.5 | 92.5 | 28 |
| 200 | 93.0 | 94.0 | 38 |

Tabla 3.7: Relación entre aumento de eficiencia y disminución de pérdidas [8]

Las pérdidas en el motor pueden reducirse hasta alrededor de un 50% a través del uso de mejores materiales, optimizando la geometría, ajustando mejor el motor con la carga y mejorando el proceso de fabricación.

Cuando se intenta maximizar la eficiencia de un motor, debe considerarse que ésta puede incrementarse por dos métodos diferentes. Una posibilidad es lograr la mejoría fundamentalmente a base de agregar materiales y empleando tecnologías más costosas. La otra posibilidad es optimizar el diseño del motor utilizando métodos de optimización. Estos dos enfoques difieren en que en el primer caso la mejoría se alcanza modificando un diseño existente, mientras que en el segundo caso se obtienen diseños totalmente nuevos.

En la primera variante, el incremento de los materiales implica fundamentalmente aumentar el volumen del material activo (acero magnético y material conductor de la corriente) y las mejoras tecnológicas que significan emplear aceros magnéticos de mejor calidad, utilizar un mayor factor de llenado de las ranuras, incrementar el número de ranuras del estator y del rotor, etc.

Las características de diseño de la mayoría de los motores de alta eficiencia son:

- Las pérdidas en los conductores del estator disminuyen aumentando el área disponible para los conductores mediante la colocación en las ranuras de conductores de mayor sección o a través de un incremento de las dimensiones de las ranuras. Una variación en la configuración del devanado puede contribuir también a la reducción de estas pérdidas, si se logra disminuir con ello la longitud de las cabezas de la bobina y por lo tanto, la longitud del bobinado del estator.
- Las pérdidas en los conductores del rotor pueden reducirse incrementando la cantidad del material conductor (en las barras y en los anillos), utilizando materiales de mayor conductividad, así como aumentando el flujo total que atraviesa el entrehierro. La magnitud de estos cambios está limitada por las siguientes restricciones: torque mínimo de arranque requerido, corriente máxima de arranque permisible y el factor de potencia mínimo aceptable.
- Las pérdidas en el núcleo magnético se reducen haciendo que el motor opere con inducciones más bajas que las normales; y para compensar se ha ido incrementando la longitud de la estructura ferromagnética. Esto disminuye las pérdidas por unidad de peso, pero debido a que el peso total aumenta, la mejoría en cuanto a pérdidas no es proporcional a la reducción unitaria de estas. La disminución en la carga magnética también reduce la corriente de magnetización; y esto influye positivamente en el factor de potencia.
- Las pérdidas por fricción y ventilación están asociadas a los ventiladores y a la cantidad de ventilación requerida para extraer el calor generado por otras pérdidas en el motor, tal como las pérdidas en el cobre, las del núcleo y las adicionales. Según se reducen las pérdidas que generan calor, es posible reducir el volumen de aire requerido para moverlas y de esta manera, se pueden reducir las pérdidas por ventilación. Esto resulta válido especialmente en el caso de motores cerrados con ventilación externa forzada. Otro camino es el logro de un mejor diseño aerodinámico. Uno de los subproductos importantes de la reducción de las pérdidas de ventilación, es la disminución de los niveles de ruido.

- Las pérdidas adicionales se pueden reducir mediante un diseño optimizado del motor y mediante un proceso cuidadoso de producción. Como éstas pérdidas están asociadas al procesamiento, tal como las condiciones superficiales del rotor, se pueden minimizar a través de un control cuidadoso del proceso de fabricación. Las pérdidas adicionales son las más difíciles de controlar en el motor, debido al gran número de variables que contribuyen a las mismas.

3.3.5 Normas sobre niveles de eficiencia de motores eléctricos

3.3.5.1 La norma NEMA de motores eficientes (1997).

A contar de 1997 la norma NEMA define el concepto de motor eficiente. La Tabla siguiente, designada por NEMA como Tabla 12-6C muestra los valores de eficiencia, nominales y mínimos, para motores cerrados (TEFC). Esta Tabla fue publicada por NEMA en 1987, de tal modo que los fabricantes tuvieron 10 años para adaptar sus diseños al nuevo estándar. Define con precisión la tolerancia en el valor de la placa (es la columna que designa como eficiencia mínima aceptable) para cada uno de los motores señalados.

| POT. [HP] | 2 polos | | 4 polos | | 6 polos | | 8 polos | |
|--------------|---------|------|---------|------|---------|------|---------|------|
| | Nom. | Min | Nom. | Min | Nom. | Min | Nom. | Min |
| 1 | 75.5 | 74 | 82.5 | 81.5 | 80 | 78.5 | 74 | 72 |
| 1.5 | 82.5 | 81.5 | 84 | 82.5 | 85.5 | 84 | 77 | 75.5 |
| 2 | 84 | 82.5 | 84 | 82.5 | 86.5 | 85.5 | 82.5 | 81.5 |
| 3 | 85.5 | 84 | 87.5 | 86.5 | 87.5 | 86.5 | 84 | 82.5 |
| 5 | 87.5 | 86.5 | 87.5 | 86.5 | 87.5 | 86.5 | 85.5 | 84 |
| 7.5 | 88.5 | 87.5 | 89.5 | 88.5 | 89.5 | 88.5 | 85.5 | 84 |
| 10 | 89.5 | 88.5 | 89.5 | 88.5 | 89.5 | 88.5 | 88.5 | 87.5 |
| 15 | 90.2 | 89.5 | 91 | 90.2 | 90.2 | 89.5 | 88.5 | 87.5 |
| 20 | 90.2 | 89.5 | 91 | 90.2 | 90.2 | 89.5 | 89.5 | 88.5 |
| 25 | 91 | 90.2 | 92.4 | 91.7 | 91.7 | 91 | 89.5 | 88.5 |
| 30 | 91 | 90.2 | 92.4 | 91.7 | 91.7 | 91 | 91 | 90.2 |
| 40 | 91.7 | 91 | 93 | 92.4 | 93 | 92.4 | 91 | 90.2 |
| 50 | 92.4 | 91.7 | 93 | 92.4 | 93 | 92.4 | 91.7 | 91 |
| 60 | 93 | 92.4 | 93.6 | 93 | 93.6 | 93 | 91.7 | 91 |
| 75 | 93 | 92.4 | 94.1 | 93.6 | 93.6 | 93 | 93 | 92.4 |
| 100 | 93.6 | 93 | 94.5 | 94.1 | 94.1 | 93.6 | 93 | 92.4 |
| 125 | 94.5 | 94.1 | 94.5 | 94.1 | 94.1 | 93.6 | 93.6 | 93 |
| 150 | 94.5 | 94.1 | 95 | 94.5 | 95 | 94.5 | 93.6 | 93 |
| 200 | 95 | 94.5 | 95 | 94.5 | 95 | 94.5 | 94.1 | 93.6 |

Tabla 3.8: Tabla nema 12-6c / motores totalmente cerrados (tefc) [15]

En 1998 NEMA publica nuevamente la tabla que define los valores mínimos de los “motores eléctricos eficientes”, la que ahora designa como Tabla NEMA 12-10. Extiende ahora la potencia de los motores que define hasta los 500 HP.

| POT | 2 polos | 4 polos | 6 polos | 8 polos |
|------|---------|---------|---------|---------|
| [HP] | Nom. | Nom. | Nom. | 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 3.9: Tabla nema 12-10 Motores totalmente cerrados (tefc) [15]

3.3.5.2 Los motores premium.

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, publican una tabla todavía más exigente de eficiencia de motores, a la que los fabricantes normalmente asocian su línea de motor XE Extra Efficiency.

La tabla de eficiencia mínima de motores según CEE (Motores XE Extra Efficiency) se presenta a continuación.

| POT | 2 polos | 4 polos | 6 polos |
|------|---------|---------|---------|
| [HP] | Nom. | Nom. | Min |
| 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 |
| 200 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |

Tabla 3.10: tabla de eficiencia mínima de motores según CEE (Motores XE Extra Efficiency) [15]

El 20 de Junio del 2001 CEE se alinea con la denominación NEMA Premium. Las tablas para motores cerrados se muestran a continuación:

| POT | 2 polos | 4 polos | 6 polos |
|------|---------|---------|---------|
| [HP] | Nom. | Nom. | Nom. |
| 1 | 77 | 85.5 | 82.5 |
| 1.5 | 84 | 86.5 | 87.5 |
| 2 | 85.5 | 86.5 | 88.5 |
| 3 | 86.5 | 89.5 | 89.5 |
| 5 | 88.5 | 89.5 | 89.5 |
| 7.5 | 89.5 | 91.7 | 91 |
| 10 | 90.2 | 91.7 | 91 |
| 15 | 91 | 92.4 | 91.7 |
| 20 | 91 | 93 | 91.7 |
| 25 | 91.7 | 93.6 | 93 |
| 30 | 91.7 | 93.6 | 93 |
| 40 | 92.4 | 94.1 | 94.1 |
| 50 | 93 | 94.5 | 94.1 |
| 60 | 93.6 | 95 | 94.5 |
| 75 | 93.6 | 95.4 | 94.5 |
| 100 | 94.1 | 95.4 | 95 |
| 125 | 95 | 95.4 | 95 |
| 150 | 95 | 95.8 | 95.8 |
| 200 | 95.4 | 96.2 | 95.8 |
| 250 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 300 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 350 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 400 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 450 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |
| 500 | 95.8 | 96.2 | 95.8 |

Tabla 3.11: Tabla de eficiencia mínima de motores NEMA PREMIUM (600V o menos) [15]

| | | | |
|-----------|---------|---------|---------|
| POT | 2 polos | 4 polos | 6 polos |
| [HP] | Nom. | Nom. | Nom. |
| 250 a 500 | 95 | 95 | 95 |

Tabla 3.12: Tabla de eficiencia mínima de motores NEMA PREMIUM (5 kV o menos) [15]

3.3.5.3 Los motores abiertos y totalmente cerrados.

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. La tabla siguiente muestra un resumen de los niveles de eficiencia para ciertas potencias según norma NEMA de ambos tipos de motores.

| HP | Open Drip-Proof | | | Totally Enclosed Fan-Cooled | | |
|-----|-----------------|--------|--------|-----------------------------|--------|--------|
| | 6-pole | 4-pole | 2-pole | 6-pole | 4-pole | 2-pole |
| 1 | 82.5 | 85.5 | 77.0* | 82.5 | 85.5 | 77.0 |
| 1.5 | 86.5 | 86.5 | 84.0 | 87.5 | 86.5 | 84.0 |
| 2 | 87.5 | 86.5 | 85.5 | 88.5 | 86.5 | 85.5 |
| 3 | 88.5 | 89.5 | 85.5 | 89.5 | 89.5 | 86.5 |
| 5 | 89.5 | 89.5 | 86.5 | 89.5 | 89.5 | 88.5 |
| 7.5 | 90.2 | 91.0 | 88.5 | 91.0 | 91.7 | 89.5 |
| 10 | 91.7 | 91.7 | 89.5 | 91.0 | 91.7 | 90.2 |
| 15 | 91.7 | 93.0 | 90.2 | 91.7 | 92.4 | 91.0 |
| 20 | 92.4 | 93.0 | 91.0 | 91.7 | 93.0 | 91.0 |
| 25 | 93.0 | 93.6 | 91.7 | 93.0 | 93.6 | 91.7 |
| 30 | 93.6 | 94.1 | 91.7 | 93.0 | 93.6 | 91.7 |
| 40 | 94.1 | 94.1 | 92.4 | 94.1 | 94.1 | 92.4 |
| 50 | 94.1 | 94.5 | 93.0 | 94.1 | 94.5 | 93.0 |
| 60 | 94.5 | 95.0 | 93.6 | 94.5 | 95.0 | 93.6 |

Tabla 3.13: Tabla comparativa de eficiencia mínima de motores abiertos y cerrados NEMA PREMIUM [15]

3.3.5.4 Los motores de 50 hz y la norma IEC.

Cuando se habla de 50 Hz, en general, se habla de la aplicación de Normas IEC. De hecho, no es posible aplicar las tablas publicadas por NEMA para otra frecuencia porque ellas sólo existen para motores que operan con 60 Hz nominales. Por la misma razón tampoco es posible aplicar las tablas de eficiencia de motores estándar NEMA publicadas en 1993 (Tabla 12-6C) y en 1998 (Tabla 12-10), mencionadas en las secciones anteriores.

Finalmente, los métodos de medida de eficiencia de motores probados con Norma IEC son diferentes a los empleados al medir un motor con Norma NEMA. De esta

forma, es necesario resolver dos cuestionamientos al enfrentar la caracterización de los motores de 50 Hz nominales:

- a) Si los motores que operan en países que emplean 50 Hz van a ser probados según una norma similar a la IEC o a la norma NEMA.
- b) Si los límites de eficiencia para los motores que operan en países que emplean 50 Hz van a ser los acordados por la Comisión Europea y los fabricantes europeos o Chile va a desarrollar una tabla propia a partir de la Norma NEMA y NEMA Premium.

Lo más natural es que los países que operan con 50 Hz elijan las Normas IEC para los motores eléctricos que utilizan, debido que adaptar y extender la aplicación de las Normas NEMA a 50 Hz es una tarea compleja.

Resuelto lo anterior, se deben adoptar los límites de eficiencia establecidos para los motores de 50 Hz que se muestran en la Tabla siguiente. En Europa se distinguen tres niveles de eficiencia (EFF1, EFF2 y EFF3), siendo el nivel EFF1 el mejor.

| 3000 RPM Motors, 2 polos | | | 1500 RPM Motors, 4 polos | | |
|--------------------------|----------|----------|--------------------------|----------|----------|
| kW | EFF1 [%] | EFF2 [%] | kW | EFF1 [%] | EFF2 [%] |
| 1.1 | 82.8 | 76.2 | 1.1 | 83.8 | 76.2 |
| 1.5 | 84.1 | 78.5 | 1.5 | 85 | 78.5 |
| 2.2 | 85.6 | 81 | 2.2 | 86.4 | 81 |
| 3 | 86.7 | 82.6 | 3 | 87.4 | 82.6 |
| 4 | 87.6 | 84.2 | 4 | 88.3 | 84.2 |
| 5.5 | 88.6 | 85.7 | 5.5 | 89.2 | 85.7 |
| 7.5 | 89.5 | 87 | 7.5 | 90.1 | 87 |
| 11 | 90.5 | 88.4 | 11 | 91 | 88.4 |
| 15 | 91.3 | 89.4 | 15 | 91.8 | 89.4 |
| 18.5 | 91.8 | 90 | 18.5 | 92.2 | 90 |
| 22 | 92.2 | 90.5 | 22 | 92.6 | 90.5 |
| 30 | 92.9 | 91.4 | 30 | 93.2 | 91.4 |
| 37 | 93.3 | 92 | 37 | 93.6 | 92 |
| 45 | 93.7 | 92.5 | 45 | 93.9 | 92.5 |
| 55 | 94 | 93 | 55 | 94.2 | 93 |
| 75 | 94.6 | 93.6 | 75 | 94.7 | 93.6 |
| 90 | 95 | 93.9 | 90 | 95 | 93.9 |

Tabla 3.14: eficiencias para motores IEC 50 HZ, totalmente cerrados [15]

3.3.5.5 Situación actual.

Una completa legislación ha sido aprobada en la Unión Europea con el objetivo de reducir el consumo de energía y por lo tanto las emisiones de CO2. El consumo de energía y la eficiencia de los motores de inducción en el ámbito industrial se discute

en el Reglamento 640/2009 de la UE. Este reglamento se aplica a todos los países de la Unión Europea.

La norma IEC 60034-30:2008 define las clases de eficiencia para 50 y 60 Hz y dispone, en todo el mundo, cuales son los motores que están involucrados y en cuales se aplican excepciones. El Reglamento de la UE se basa esencialmente en este estándar.

3.3.5.6 Nueva nomenclatura.

Se han definido nuevas clases de eficiencia en IEC 60034-30 para motores de inducción (IE=eficiencia internacional):

- IE1 (Eficiencia estándar)
- IE2 (Alta eficiencia)
- IE3 (Eficiencia Premium).

Nuevas técnicas de medida para determinar la eficiencia.

Adicionalmente a la nueva nomenclatura, las técnicas de medidas también han cambiado: con la nueva técnica de medida IEC 60034-2-1:2007, las pérdidas adicionales de carga ya no se suponen un valor dado de 0,5%, sino que se determinan mediante mediciones.

Esto significa que la eficiencia nominal disminuye desde EFF1 a IE2 o desde EFF2 a IE1 respectivamente, aunque nada cambie en el motor ni técnicamente ni físicamente.

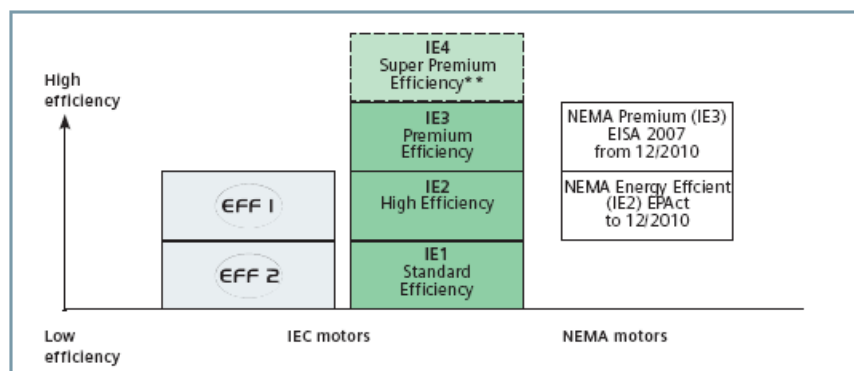


Figura 3.10: Representación gráfica de distintas normas de clasificación de motores [13]

La eficiencia especificada en IEC 60034-30 debería ser determinada correspondientemente a IEC 60034-2-1:2007. Esta parte ha sido válida desde noviembre de 2007 y desde noviembre de 2010 hacia adelante reemplaza la anterior IEC 60034-2 parte del estándar. Lo nuevo: las actuales pérdidas adicionales son ahora medidas y no consideradas como un valor dado.

A continuación se detalla un ejemplo en donde se puede apreciar las diferencias entre la estimación de las pérdidas con la norma antigua y la nueva.

| | Previous EFF measuring technique (incl. lump sum losses) EN/IEC 60034-2: 1996 50 Hz | New technique to determine losses acc. to IEC 60034-2-1: 2007 50 Hz | New technique to determine losses acc. to IEC 60034-2-1: 2007 60 Hz |
|---------------|---|--|--|
| 5.5 kW 4-pole | 89.2 % | 88.2 % | 89.5 % |
| 45 kW 4-pole | 93.9 % | 93.1 % | 93.6 % |
| 110 kW 4-pole | 95.9 % (not defined acc. to CEMEP) | 94.5 % | 95.0 % |

Tabla 3.15: Comparación de eficiencias con distintas normas para calcular [13]

A continuación se muestra un cuadro resumen con las principales diferencias entre la norma antigua y nueva.

| | | |
|----------------------|---|---|
| | CEMEP Voluntary EU Agreement | EU Regulation No 640/2009 passed 07/2009 based upon standard IEC 60034-30 |
| Description | Voluntary agreement between the EU Commission and the European Manufacturers Association CEMEP. | The EU Regulation does apply to all EU countries. IEC 60034-2-1: 2007 is the basis for determining the losses and therefore the efficiency. |
| Number of poles | 2, 4 | 2, 4, 6 |
| Power range | 1.1 – 90 kW | 0.75 – 375 kW |
| Level | EFF3 - Standard EFF2 - Improved efficiency EFF1 - High efficiency | IE1 - Standard Efficiency IE2 - High Efficiency IE3 - Premium Efficiency |
| Voltage | 400V, 50Hz | < 1000V, 50/60 Hz |
| Degree of protection | IP5X | all |
| Motors with brake | no | no |
| Geared motors | no | yes |
| Ex motors | no | EU Regulation – NO Siemens stamps zone 2/21/22 |
| Validity | Voluntary agreement; is withdrawn with the implementation of domestic legislation. | Standard IEC 60034-30, valid since October 2008; EU Regulation is becoming effective on 16.06.2011. This means that manufacturers may no longer market IE1 motors in the European Economic Area. |

Tabla 3.16: Comparación características principales de norma IEC antigua y nueva [13]

4 Comparación técnica de motores: Alta eficiencia vs eficiencia estándar

Como se ha visto en los capítulos anteriores, los motores de inducción trifásicos, tienen un amplio uso en la industria, debido a su relativamente bajo costo, robustez y casi nulas medidas de mantenimiento, comparados con otros equipos eléctricos. Es por esta razón, que los fabricantes y desarrolladores de este tipo de motores han modificado y creado nuevos diseños con el fin de aumentar su eficiencia.

Por otro lado, a pesar de que la tecnología de los motores de alta eficiencia ya lleva algunos años, es frecuente que en las áreas de ingeniería de las distintas empresas aún se tenga desconocimiento en el tema, arrastrando con ello una serie de dudas, lo cual lleva a preferir la elección de un motor tradicional ante uno energéticamente eficiente. El presente capítulo pretende desmitificar y aclarar estas dudas en el aspecto técnico, revisando y comparando el comportamiento de los distintos tipos de motores.

En general, el comportamiento detallado de un motor, está dado por su curva característica de torque en función de la velocidad, el que se obtiene a partir de los parámetros del circuito equivalente. Desafortunadamente, estos datos rara vez son proporcionados por los fabricantes. En reemplazo de esto, se proveen al cliente los llamados “datos de catálogo”, los que incluyen potencia nominal, torque máximo, corriente de partida, entre otros.

Si bien dichos datos son suficientes para tener una idea general del comportamiento del motor, en ciertos casos es útil tener los parámetros de dichos motores, con el fin de realizar estudios mas precisos. Es por este motivo, que en el capítulo también se desarrollará un script en el software MATLAB, que permita calcular de manera fácil dichos parámetros.

4.1 Análisis de datos de catálogos

4.1.1 Motores a estudiar

El estudio pretende hacer un contraste entre el comportamiento de motores estándar frente a motores de alta eficiencia. Los datos se tomaron de diversos catálogos. En el desarrollo se muestran sólo los del fabricante ABB (ref. [15]), sin embargo en los anexos del presente documento se pueden encontrar los del fabricante General Electric (ref. [16]), comprobándose que para ambos fabricantes se tienen los mismos resultados.

Para la marca ABB, se seleccionó un conjunto de 14 motores, con una potencia mínima de 11 kW y máxima de 200 kW. A continuación se muestran dos tablas. La primera contiene los datos tomados de motores de eficiencia premium o clase IE33, mientras que la tabla 4.2 muestra las características de los motores de mas baja eficiencia IE2.

| Motores IE3 | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|------------|------|------|----------------|-----------|----------|------|---------|---------|
| Potencia | Velocidad nom. | Eficiencia | | | Factor de pot. | Corriente | | | Torque | |
| KW | RPM | 100% | 75% | 50% | cos(phi) | Inom | Ipart/In | Tn | Tpar/Tn | Tmax/Tn |
| 11 | 1473 | 92,3 | 93 | 92,8 | 0,84 | 20,4 | 7,7 | 71,3 | 2,6 | 2,9 |
| 15 | 1474 | 92,7 | 93,4 | 93,2 | 0,84 | 27,8 | 7,9 | 97,1 | 2,8 | 3,3 |
| 18,5 | 1481 | 93,3 | 94 | 93,8 | 0,82 | 34,9 | 7,6 | 119 | 3 | 3,1 |
| 22 | 1480 | 93,3 | 94,1 | 94,1 | 0,82 | 41,5 | 8,2 | 141 | 2,8 | 3,1 |
| 30 | 1484 | 94,4 | 94,9 | 94,7 | 0,84 | 54,6 | 8,3 | 193 | 3 | 3,3 |
| 37 | 1482 | 94,9 | 95,5 | 95,4 | 0,86 | 65,4 | 7,7 | 238 | 2,8 | 3,1 |
| 45 | 1482 | 95,2 | 95,6 | 95,5 | 0,85 | 80,2 | 7,9 | 289 | 2,8 | 3,2 |
| 55 | 1485 | 95,4 | 95,9 | 95,7 | 0,85 | 97,8 | 7,9 | 353 | 3 | 3,3 |
| 75 | 1486 | 95,7 | 95,8 | 95,3 | 0,85 | 133 | 7,4 | 481 | 2,5 | 2,8 |
| 90 | 1487 | 95,9 | 96 | 95,5 | 0,85 | 159 | 7,9 | 577 | 2,9 | 3 |
| 110 | 1490 | 96,3 | 96,3 | 95,7 | 0,85 | 193 | 7,8 | 704 | 2,4 | 3,1 |
| 132 | 1490 | 96,4 | 96,4 | 95,9 | 0,85 | 232 | 7,9 | 845 | 2,6 | 3,2 |
| 160 | 1489 | 96,4 | 96,4 | 96,1 | 0,86 | 278 | 7,9 | 1026 | 2,7 | 3 |
| 200 | 1490 | 96,5 | 96,5 | 96,3 | 0,87 | 343 | 7,6 | 1281 | 2,5 | 2,9 |

Tabla 4.1: Datos de motores de eficiencia IE3 seleccionados.

| Motores IE2 | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|------------|------|------|----------------|-----------|----------|------|---------|---------|
| Potencia | Velocidad nom. | Eficiencia | | | Factor de pot. | Corriente | | | Torque | |
| KW | RPM | 100% | 75% | 50% | cos(phi) | Inom | Ipart/In | Tn | Tpar/Tn | Tmax/Tn |
| 11 | 1466 | 90,4 | 91,6 | 91,3 | 0,84 | 20,9 | 6,8 | 71,6 | 2,2 | 2,8 |
| 15 | 1470 | 91,4 | 92,4 | 92,2 | 0,83 | 28,5 | 7,1 | 97,4 | 2,6 | 3 |
| 18,5 | 1477 | 91,9 | 92,9 | 92,7 | 0,84 | 34,5 | 7,2 | 119 | 2,6 | 2,9 |
| 22 | 1475 | 92,4 | 93,3 | 93,2 | 0,84 | 40,9 | 7,3 | 142 | 2,6 | 3 |
| 30 | 1480 | 93,2 | 94 | 93,7 | 0,84 | 55,3 | 7,4 | 193 | 2,8 | 3 |
| 37 | 1479 | 93,4 | 93,9 | 93,4 | 0,84 | 68 | 7,1 | 238 | 2,6 | 2,9 |
| 45 | 1480 | 93,9 | 94,3 | 93,9 | 0,85 | 81,3 | 7,5 | 290 | 2,8 | 3,2 |
| 55 | 1480 | 94,4 | 95 | 94,7 | 0,85 | 98,9 | 7 | 354 | 2,6 | 2,9 |
| 75 | 1484 | 94,5 | 94,5 | 93,9 | 0,85 | 134 | 6,9 | 482 | 2,5 | 2,8 |
| 90 | 1483 | 94,7 | 94,8 | 94,9 | 0,86 | 159 | 7,2 | 579 | 2,5 | 2,7 |
| 110 | 1487 | 95,1 | 95,1 | 94,3 | 0,86 | 194 | 7,2 | 706 | 2 | 2,5 |
| 132 | 1487 | 95,4 | 95,4 | 94,7 | 0,86 | 232 | 7,1 | 847 | 2,3 | 2,7 |
| 160 | 1487 | 95,6 | 95,6 | 95,1 | 0,85 | 284 | 7,2 | 1027 | 2,4 | 2,9 |
| 200 | 1486 | 95,6 | 95,6 | 95,3 | 0,86 | 351 | 7,2 | 1285 | 2,5 | 2,9 |

Tabla 4.2: Datos de motores de eficiencia IE2 seleccionados.

4.1.2 Análisis de datos

Con las tablas anteriores se pueden obtener algunas conclusiones generales acerca del comportamiento de motores energéticamente eficientes, los cuales serán clarificados a continuación:

- Eficiencia.

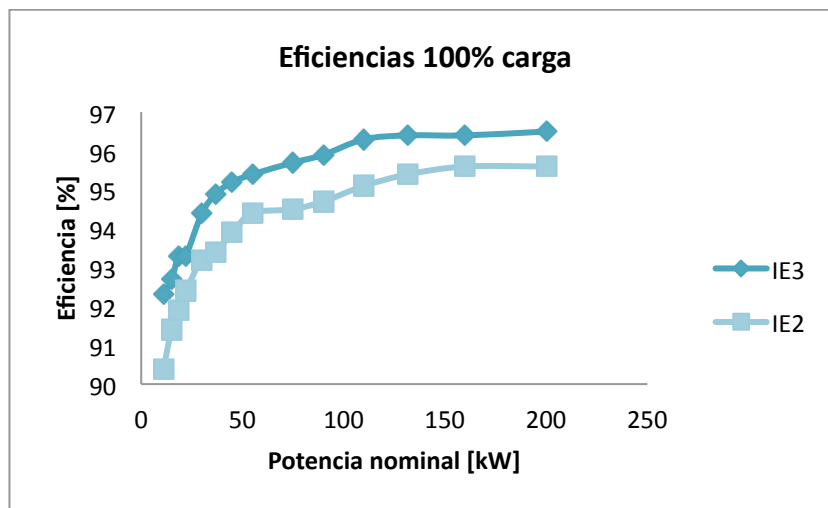


Figura 4.1: Gráfico eficiencia versus potencia nominal.

La característica principal de un motor de eficiencia premium es el bajo consumo energético con respecto a un motor de eficiencia estándar o de eficiencia aumentada, lo cual se ve claramente reflejado en la figura anterior, donde se grafican las eficiencias a plena carga para los distintos tipos de motores seleccionados

previamente. El beneficio de esta diferencia tiene directa relación con los costos de operación del motor (energía), los cuales de acuerdo a diversos estudios, pueden alcanzar varias veces el costo de un motor.

Se observa que las mayores diferencias se consiguen en motores de baja potencia, llegando en este caso a tener una diferencia de 1,9 puntos porcentuales. A medida que aumenta la potencia nominal, esta diferencia se estrecha, donde para los motores de 200 kW, el motor de eficiencia Premium supera al de alta eficiencia por sólo 0,9 puntos porcentuales. La justificación de este fenómeno será estudiada una vez que se obtenga el modelo circuital de estos motores.

Hay que decir que, a pesar de que a potencias mayores las diferencias de eficiencia se estrechan, la cantidad de energía neta ahorrada es mucho mayor debido a la gran potencia de estos últimos.

- Velocidad nominal

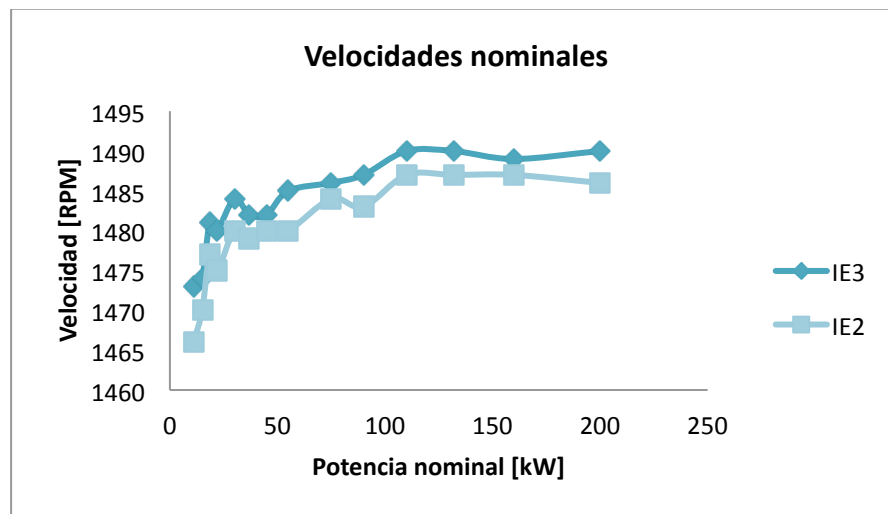


Figura 4.2: Gráfico velocidad nominal versus potencia nominal.

Con respecto a la velocidad se puede decir que los motores mas eficientes en general presentan menores deslizamientos que los de eficiencia mas baja, lo cual es equivalente a decir que alcanzan mayores velocidades de operación. Esta diferencia es más notoria en los motores de potencias nominales bajas, alcanzando en este caso una diferencia de casi 10 RPM. La operación a mayor velocidad puede ser ventajosa, en el sentido de que con mayor velocidad de giro, mayor es la cantidad de

calor disipado al ambiente, por lo tanto, el motor debería trabajar a temperaturas menores que los de eficiencia estándar, llevando con ello un menor desgaste de piezas internas y con ello una mayor robustez y vida útil.

Es necesario notar también que el aumento en la velocidad nominal puede resultar perjudicial en el caso en que se tenga una aplicación de torque cuadrático, como bombas centrífugas, ventiladores, etc., debido a un aumento cúbico de la potencia requerida en el eje con la velocidad. Es por esta razón que se recomienda analizar estos casos mas detalladamente, con el fin de estudiar la conveniencia o la posible incorporación de un variador de frecuencia.

- Factor de potencia

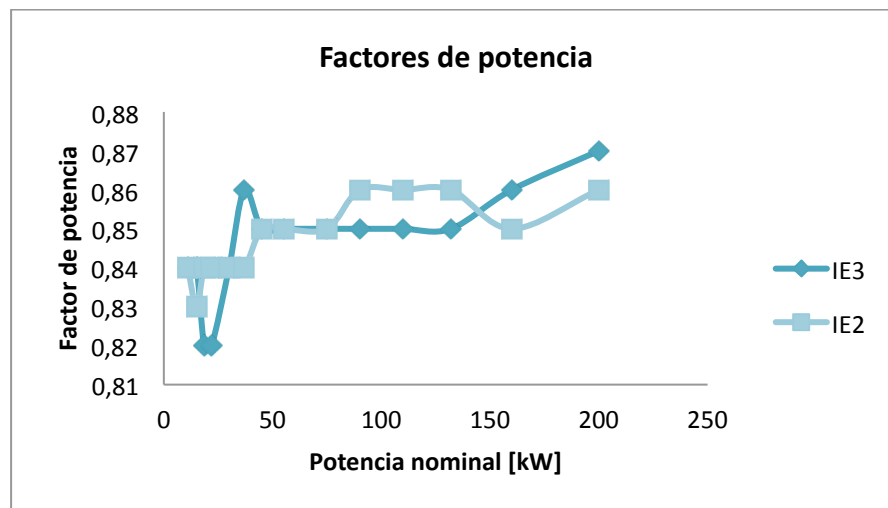


Figura 4.3: Gráfico factor de potencia nominal versus potencia nominal.

Con respecto al factor de potencia, una creencia común es que los motores de mayor eficiencia presentan menor factor de potencia que los motores de menor eficiencia. Si bien, esto tenía un grado de verdad hace algunos años, en los actuales diseños, no se tiene una clara diferencia en este ítem.

Observando la figura anterior se puede corroborar lo afirmado anteriormente, ya que no se aprecia una tendencia clara de superioridad de alguno de los dos motores. Para los motores de mayor eficiencia se tiene que el factor de potencia oscila entre 0,82 y 0,87, mientras que los de eficiencia menor varían entre 0,83 y 0,86.

Para ambos tipos de motores se tiene que el peor factor de potencia se alcanza con los motores de menores potencias y los mayores valores se tienen para motores de potencias superiores.

- Corriente de partida

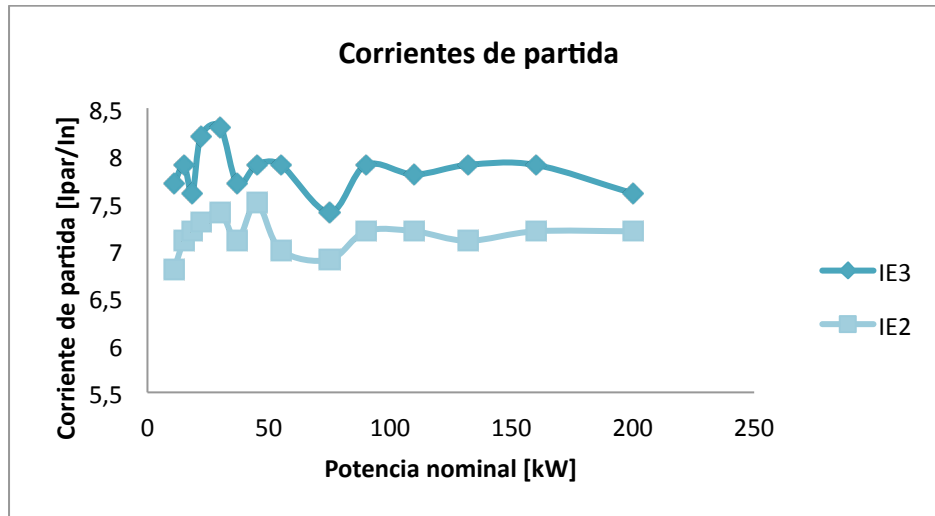


Figura 4.4: Gráfico corriente de partida versus potencia nominal.

Respecto de la corriente de partida, se puede decir que la literatura existente considera que los motores de alta eficiencia desarrollan en general una mayor corriente de partida. Este fenómeno se explica por la mayor relación X/R de los motores de alta eficiencia.

De acuerdo a la gráfica anterior, se confirma lo encontrado en la literatura del tema. Es posible establecer claramente que los motores de eficiencia superior presentan mayores corrientes de partida frente a su par de mas baja eficiencia. Los motores de eficiencia Premium presentan en promedio una corriente de partida 7,84 veces la corriente nominal, mientras que los motores de mas baja eficiencia alcanzan sólo las 7,16 veces. La mayor diferencia se tiene para los motores de 132 KW, la cual, en amperes alcanza los 185 A, llegando a ser un 12% superior.

Dicho efecto podría tener un impacto negativo en la red, ya que existe la posibilidad que se sobrepasen los límites máximos de caída de tensión.

Esta diferencia también podría influir negativamente en la capacidad de los equipos de maniobra, los cuales en algunas ocasiones podría ser necesario cambiar los elementos de protección asociados.

4.2 Análisis de circuitos equivalentes

4.2.1 Elección del modelo

La siguiente figura muestra el circuito equivalente de un motor de inducción de jaula simple. Claramente, el modelo también sirve para un motor de alta eficiencia, sin embargo, se tendrá un cambio en las magnitudes de los parámetros. La implicancia de este cambio en el comportamiento del motor, será estudiado en esta sección.

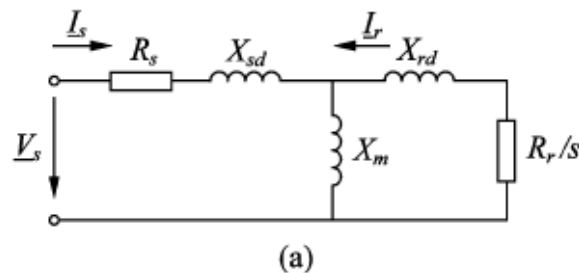


Figura 4.5: Circuito equivalente de la máquina de inducción

Donde:

- R_s representa la resistencia de estator
- X_s representa la reactancia de estator
- R_r representa la resistencia de rotor (vista en el estator)
- X_r representa la reactancia de rotor (vista en el estator)
- X_m representa la reactancia de magnetización

No se consideró el parámetro que representa a la resistencia de magnetización, ya que al agregar una ecuación al sistema, se aumenta la complejidad de éste y no se produce una ganancia significativa en términos de la precisión del modelo.

Hay que notar que el presente modelo es ampliamente usado por tener un buen comportamiento para velocidades altas, es decir, cercanas a la nominal. Si se desea

hacer un estudio a velocidades bajas o deslizamientos cercanos a 1, es necesario un análisis en régimen transitorio.

En un principio, se requiere obtener un sistema de al menos cinco ecuaciones, para obtener el valor de las cinco variables presentadas anteriormente, sin embargo es posible reducir el número total a sólo tres ecuaciones, gracias a relaciones usadas en la literatura entre las resistencias de rotor y estator y las reactancias de rotor y estator. Dichas relaciones son las siguientes [23]:

$$X_r = X_s \quad (4.1)$$

$$R_s = 0.5 * R_r \quad (4.2)$$

4.2.2 Estimación de parámetros de circuito equivalente

Dada la alta no linealidad del sistema de ecuaciones que describe el comportamiento de un motor de inducción, el problema del cálculo de estos parámetros se hace extremadamente complejo, por lo que éstos sólo se pueden estimar. En la literatura existe un gran número de investigaciones con respecto a éste tema, abordando el problema con distintas técnicas, como las que se cuentan:

- Método de elementos finitos
- Pruebas de vacío y rotor bloqueado
- Algoritmos de identificación

Un método muy usado, sobre todo académicamente, es el de las pruebas de vacío y rotor bloqueado. Este tiene el inconveniente de que es necesario contar con la disponibilidad del motor al que se le quieren calcular los parámetros para realizarle las pruebas.

El método de los elementos finitos o FEM requiere de un conocimiento de las características constructivas físicas de la máquina, su dimensionamiento, composición y de un software especializado. Además de esto, se requiere tener un avanzado conocimiento en este tipo de análisis para lograr interpretar correctamente los resultados.

Por estas razones es que finalmente se optó por estimar los parámetros a través de los datos de catálogo, y resolver las ecuaciones del comportamiento de la máquina a través de métodos numéricos, en particular, el método de Gauss-Newton.

4.2.2.1 Formulación del problema.

Para formular el problema se ocupan tres datos del fabricante: Potencia nominal (P_n), factor de potencia nominal (PF_n) y torque máximo o de breakdown (T_m). Para encontrar los cinco parámetros requeridos, se deben encontrar los x tal que $F(x) = 0$.

$$f_1(x) = P_n - P_{(S_n)} = 0 \quad (4.3)$$

$$f_2(x) = PF_n - PF_{(S_n)} = 0 \quad (4.4)$$

$$f_3(x) = T_M - T_{(S_M)} = 0 \quad (4.5)$$

Donde $F(x) = (f_1, f_2, f_3)$ y $x = (R_r, X_m, X_s)$

Hay que notar que si bien el vector x tiene sólo 3 componentes, los 2 valores faltantes para completar la solución del modelo se obtienen de las relaciones enunciadas anteriormente, entre las resistencias y reactancias de estator y rotor (4.1) y (4.2).

El set de ecuaciones descritas anteriormente se solucionó con la rutina *fsolve*, contenida en el toolbox de optimización de *MATLAB*. Este algoritmo usa el algoritmo no lineal de los mínimos cuadrados, el cual emplea el método de Gauss-Newton o el de Lavenberg-Marquardt.

La ventaja del método basado en los mínimos cuadrados es que cuando el sistema de ecuaciones no tiene un cero, el método converge a un punto, donde el error residual sea pequeño. El error residual ε , al punto de convergencia puede ser considerado como:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum_i f_i^2} \quad (4.6)$$

La selección de los valores iniciales es muy importante para que el método pueda llegar a valores satisfactorios. Los valores iniciales para R_r, X_s, X_m son calculados según las siguientes ecuaciones [23]:

$$P_n \cong \frac{3V_S^2}{\frac{R_r}{S_{FL}}} \Rightarrow R_r \quad (4.7)$$

$$Q_N \cong \frac{3V_S^2}{X_m} \Rightarrow X_m \quad (4.8)$$

$$X_s = 0.05 * X_m \quad (4.9)$$

Donde V_S es el voltaje fase neutro.

Las variables de entrada son las siguientes:

- Voltaje fase-neutro V_S
- Velocidad mecánica n_m
- Velocidad síncrona n_s
- Potencia nominal P_n
- Factor de potencia nominal PF_{nom}
- Torque máximo T_m

Es necesario calcular algunas cantidades, con el fin de que las expresiones finales resulten menos extensas:

- Frecuencia síncrona: $w_s = (2\pi n_s)/60$
- Deslizamiento nominal $S_{nom} = 1 - \frac{n_m}{n_s}$
- Impedancia de rama shunt $Z_{sh} = jX_m$
- Impedancia total estator $Z_1 = R_s + jX_s$
- Impedancia total rotor $Z_2 = \left(\frac{R_r}{S_{nom}} \right) + jX_r$
- Impedancia de entrada $Z_{in} = Z_1 + Z_{sh} // Z_2$
- Corriente de estator $I_s = \left| \frac{V_S}{Z_{in}} \right|$
- Corriente de rotor $I_r = \left| \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_2} \right| * I_s$

Con esto, las funciones de potencia nominal, factor de potencia nominal y torque máximo, quedan descritas como:

$$P_{(SN)} = 3R_r * \frac{(1-S_{nom})}{S_{nom}} * I_r^2 \quad (4.10)$$

$$PF_{(SN)} = \cos [\text{ángulo}(Z_{in})] \quad (4.11)$$

$$T_{(SM)} = \frac{3}{2w_s} * \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s^2 + (X_s + X_m)^2)}} \quad (4.12)$$

Entonces el sistema de ecuaciones a resolver numéricamente queda de la siguiente manera:

$$f_1(x) = P_n - 3R_r * \frac{(1-S_{nom})}{S_{nom}} * I_r^2 = 0 \quad (4.13)$$

$$f_2(x) = PF_n - \cos [\text{ángulo}(Z_{in})] = 0 \quad (4.14)$$

$$f_3(x) = T_M - \frac{3}{2w_s} * \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s^2 + (X_s + X_m)^2)}} = 0 \quad (4.15)$$

4.2.2.2 Programas implementados:

El siguiente código representa al programa que resuelve el sistema de ecuaciones asociado, el cual se guarda en un archivo tipo MATLAB y es llamado o ejecutado desde la ventana principal del software. El comando usado es *fsolve*, el cual recibe como parámetros, el archivo en el cual se encuentra la función a resolver y el vector del punto inicial de la iteración (valores asignados son de ejemplo).

```
function f = Parametros(x)
Rr=x(1);
Xm=x(2);
Xs=x(3);

Vs=400/sqrt(3);
nm=1460;
ns=1500;
ws=ns*2*pi/60;
snom=1-nm/ns;
Pnom=15000;
FPnom=0.82;
Tmax=333.2;
Xr=Xs;
Rs=0.5*Rr;

Zsh=i*Xm;
Zl=Rs+i*Xs;
Z2=(Rr/snom) + i*Xr;
Zin=Zl+((1/Zsh)+(1/Z2))^(-1);
```

```

Is=abs(Vs/Zin);
Ir=abs(Zsh/(Zsh+Z2))*Is;
P_snom = 3*Rr*((1-snom)/snom)*Ir^2;
FP_snom = cos(angle(Zin));
Tmax_snom = (3/(2*ws))* (Vs^2/(Rs+(Rs^2+(Xs+Xr)^2)^(1/2)));

f(1) = Pnom - P_snom;
f(2) = FPnom - FP_snom;
f(3) = Tmax - Tmax_snom;

```

Para hacer los cálculos de manera más clara, se ha programado un script para el cálculo del punto inicial de la iteración (valores asignados son de ejemplo):

```

clear all

Vs=400/sqrt(3)
nm=1460
ns=1500
snom=1-nm/ns
Pn=15000
FPnom=0.82

Qn=Pn*tan(acos(FPnom))
Rr=3*Vs^2*snom/Pn
Xm=3*Vs^2/Qn
Xs=0.05*Xm

```

Un último script programado es el encargado de graficar la curva torque velocidad del motor en cuestión, el cual se muestra a continuación (valores asignados son de ejemplo):

```

clear all

Vs=400/sqrt(3);

Rr_eff1=0.8577;
Xm_eff1=39.2012;
Xs_eff1=2.8382;

Rr_eff2=1.4458;
Xm_eff2=36.7795;
Xs_eff2=2.6794;

Rs_eff1=0.5*Rr_eff1;
Xr_eff1=Xs_eff1;
Rs_eff2=0.5*Rr_eff2;
Xr_eff2=Xs_eff2;

ns=1500;
ws=ns*2*pi/60;

```

```

for i=1:2000,
    x(i)=i;
    s(i)=1-x(i)/ns;
    y_eff1(i) = (3*Rr_eff1/(s(i)*ws))*
    (Vs^2/((Rs_eff1+Rr_eff1/s(i))^2+(Xs_eff1+Xr_eff1)^2));
    y_eff2(i) = (3*Rr_eff2/(s(i)*ws))*
    (Vs^2/((Rs_eff2+Rr_eff2/s(i))^2+(Xs_eff2+Xr_eff2)^2));
end;

plot(x,y_eff1,'LineWidth',2,'Color',[0 0.8 0.2]);
hold on

plot(x,y_eff2,'LineWidth',2,'Color',[1 0 0]);
hold on

title('Torque-velocidad')
xlabel('Velocidad (RPM)')
ylabel(['Torque',sprintf('\n'),' (Nm)'])
legend('Motor clase eff1 - 4 KW', 'Motor clase eff2 - 4 KW')

```

A partir de los scripts anteriores se desarrolló una función simplificada que puede ser ejecutada en cualquier computador con MATLAB instalado, el cual calcula de manera simple los parámetros del circuito equivalente de motores de inducción de baja tensión. Se desarrolló de manera tal de que no es necesario editar archivos de texto, si no que al ser llamado desde la ventana principal de MATLAB, éste solicitará el ingreso de algunos datos, como velocidad nominal, potencia nominal, etc; para finalmente entregar los resultados y el gráfico de torque velocidad. Screenshots del programa pueden ser encontrados en los anexos del presente documento.

Es necesario decir que varias pruebas se realizaron con el fin de validar el modelo anterior, y se pudo observar que las curvas torque-velocidad correspondían fielmente a las típicas de los motores de inducción, tanto en forma como en valores típicos como velocidad síncrona, velocidad nominal, torque máximo, etc.

4.2.3 Análisis comparativo de parámetros de motores

A continuación se mostrarán los parámetros obtenidos de motores de alta eficiencia y eficiencia estándar, de tal manera de efectuar una comparación. Los resultados se muestran en la siguiente tabla:

| Comparación de parámetros | | | | | | |
|---------------------------|-------------|--------|---------|--------|---------|--------|
| Potencia [KW] | Tipo | Rr | Xm | Xs | Rs | Xr |
| 4 | Eff1 | 0,9051 | 63,3692 | 2,8253 | 0,4526 | 2,8253 |
| | Eff2 | 1,5258 | 59,5057 | 2,6564 | 0,7629 | 2,6564 |
| | Variación % | 59,3 | 106,5 | 106,4 | 59,3 | 106,4 |
| 11 | Eff1 | 0,2501 | 30,8604 | 1,2168 | 0,12505 | 1,2168 |
| | Eff2 | 0,4087 | 26,8765 | 1,0719 | 0,20435 | 1,0719 |
| | Variación % | 61,2 | 114,8 | 113,5 | 61,2 | 113,5 |
| 18,5 | Eff1 | 0,1271 | 17,2538 | 0,6105 | 0,06355 | 0,6105 |
| | Eff2 | 0,1991 | 16,8488 | 0,6058 | 0,09955 | 0,6058 |
| | Variación % | 63,8 | 102,4 | 100,8 | 63,8 | 100,8 |
| 22 | Eff1 | 0,1261 | 13,8758 | 0,542 | 0,06305 | 0,542 |
| | Eff2 | 0,1467 | 13,5669 | 0,5185 | 0,07335 | 0,5185 |
| | Variación % | 86,0 | 102,3 | 104,5 | 86,0 | 104,5 |
| 30 | Eff1 | 0,0935 | 10,5184 | 0,3716 | 0,04675 | 0,3716 |
| | Eff2 | 0,1088 | 10,2771 | 0,3539 | 0,0544 | 0,3539 |
| | Variación % | 85,9 | 102,3 | 105,0 | 85,9 | 105,0 |
| 55 | Eff1 | 0,0259 | 7,027 | 0,2332 | 0,01295 | 0,2332 |
| | Eff2 | 0,0338 | 6,3021 | 0,2476 | 0,0169 | 0,2476 |
| | Variación % | 76,6 | 111,5 | 94,2 | 76,6 | 94,2 |
| 75 | Eff1 | 0,0189 | 5,2465 | 0,1774 | 0,00945 | 0,1774 |
| | Eff2 | 0,0188 | 4,5325 | 0,1713 | 0,0094 | 0,1713 |
| | Variación % | 100,5 | 115,8 | 103,6 | 100,5 | 103,6 |
| 90 | Eff1 | 0,0148 | 3,9707 | 0,1384 | 0,0074 | 0,1384 |
| | Eff2 | 0,0158 | 4,0179 | 0,1426 | 0,0079 | 0,1426 |
| | Variación % | 93,7 | 98,8 | 97,1 | 93,7 | 97,1 |

Tabla 4.3: Comparación de parámetros de motores eff1 y eff2.

Observando los parámetros de los motores de alta eficiencia versus eficiencia estándar, se pueden establecer ciertas relaciones y conclusiones generales.

Para las resistencias de estator y rotor, se ve que existe un decaimiento de los valores a medida que aumenta la potencia nominal. Comparativamente, existe un gran cambio en la magnitud de estos valores. Los mayores cambios se producen a potencias bajas, en el caso de motores de 4 kW, donde las resistencias de estator y rotor en un motor de alta eficiencia representan sólo el 60% de estos valores en motores de eficiencia estándar. Dicha variación va disminuyendo conforme aumenta la potencia nominal de los motores, para finalmente, a potencias relativamente grandes, hacerse muy parecidos.

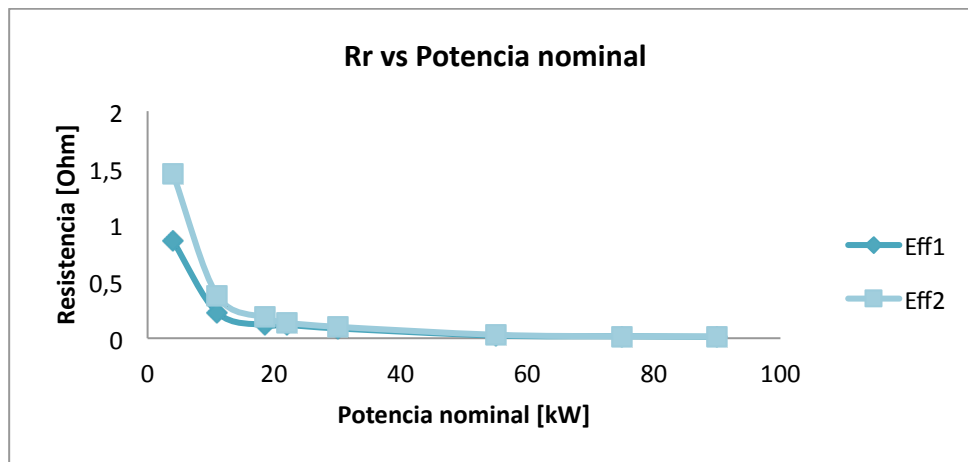


Figura 4.6: Gráfico resistencia de rotor versus potencia nominal.

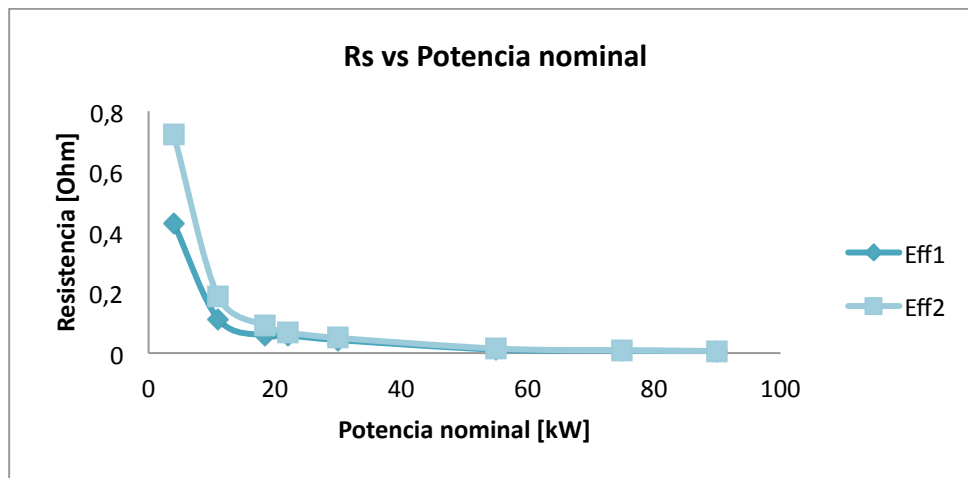


Figura 4.7: Gráfico resistencia de estator versus potencia nominal.

Con respecto de las reactancias de estator y rotor, se puede observar que al igual que en el caso anterior, se tiene una disminución progresiva de la magnitud de los valores con respecto de la potencia nominal estudiada. Comparativamente se puede decir que no existen mayores diferencias entre ambos tipos de motores. Las mayores variaciones se producen a potencias bajas, donde con motores de 11 kW se observa que las reactancias son un 13% superior para un motor de alta eficiencia. A potencias mayores, no se observa una tendencia clara, sino que el valor de dichas reactancias para un motor de alta eficiencia oscila entre el 95% y 105% del valor de dicho elemento en un motor de eficiencia normal.

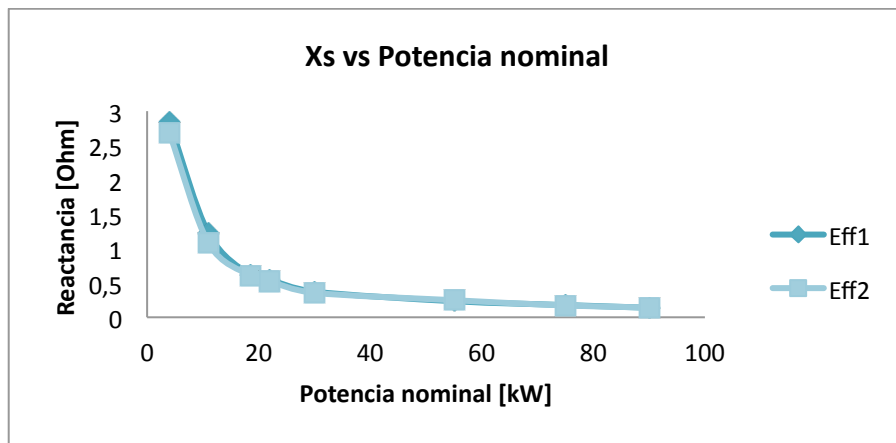


Figura 4.8: Gráfico reactancia de estator versus potencia nominal.

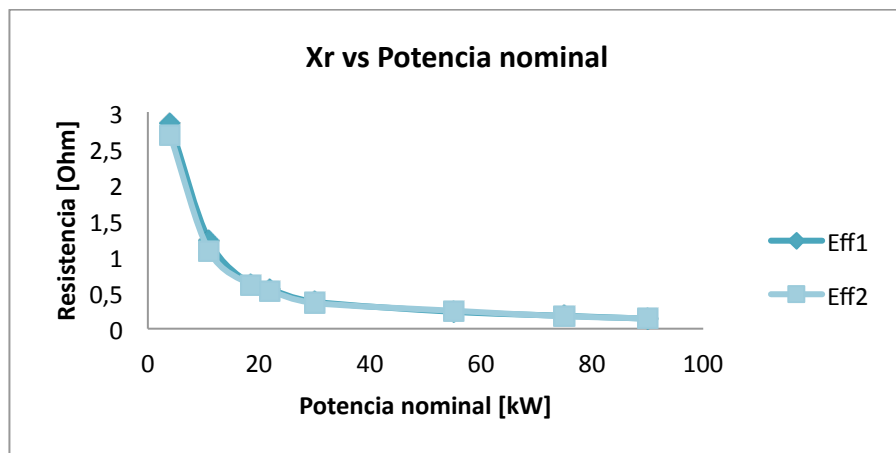


Figura 4.9: Gráfico reactancia de rotor versus potencia nominal.

Para la reactancia de magnetización se puede ver que al igual que los casos anteriores, el valor de las reactancias de ambos tipos de motores va disminuyendo a medida que aumenta la potencia nominal de éstos. También es posible observar que no existen mayores diferencias para este valor entre las clases Eff1 y Eff2. Las mayores variaciones son cercanas al 15% y se dan para los casos de motores de 11 y 75 kW.

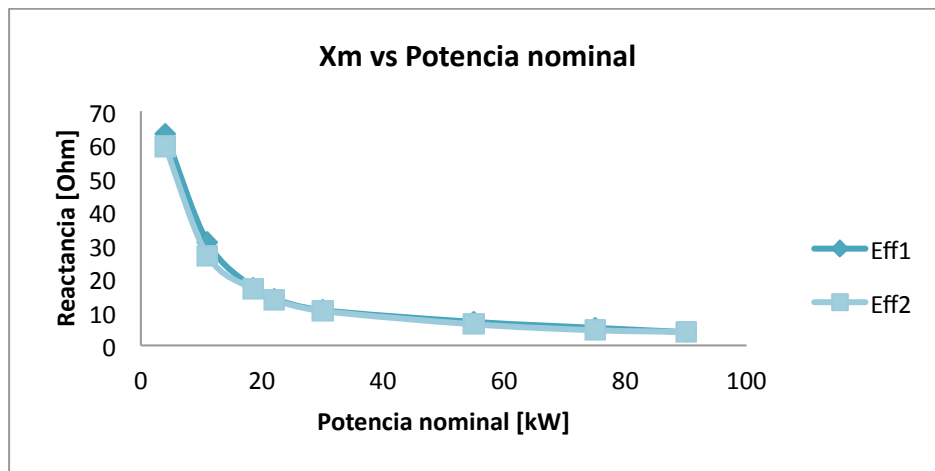


Figura 4.10: Gráfico reactancia de magnetización versus potencia nominal.

En términos generales se puede decir que los resultados obtenidos corresponden a lo esperado, ya que, como es sabido, los motores de alta eficiencia se caracterizan por consumir menos energía en el proceso de conversión de energía eléctrica a mecánica, por lo cual es natural pensar que tanto las resistencias de estator como de rotor sean de menor magnitud. Esto se debe a cambios de diseños con respecto a motores estándar, y a la incorporación de mejores materiales conductores eléctricos y magnéticos.

4.2.3.1 Curvas características

Gracias al modelo circuital obtenido, es posible obtener gráficos que representen el comportamiento de los motores tanto de alta eficiencia como de eficiencia estándar, en particular, el gráfico más importante en un motor de inducción: la curva torque-velocidad.

Se graficarán 2 curvas: en verde los motores clase Eff1 o eficientes, y en rojo los clase Eff2 o eficiencia estándar. Se mostrará el comportamiento entre las velocidades 0 y 2000 RPM.

Hay que notar que se mostrará sólo el comportamiento de 3 de los motores seleccionados previamente, ya que los otros presentan un comportamiento similar. Las curvas restantes se pueden encontrar en el anexo de este documento.

Es también necesario decir que las curvas no son válidas a bajas velocidades, sobre todo a la partida, ya que en ese momento se producen fenómenos transitorios, que son regidos por otras ecuaciones.

- 4 kW:

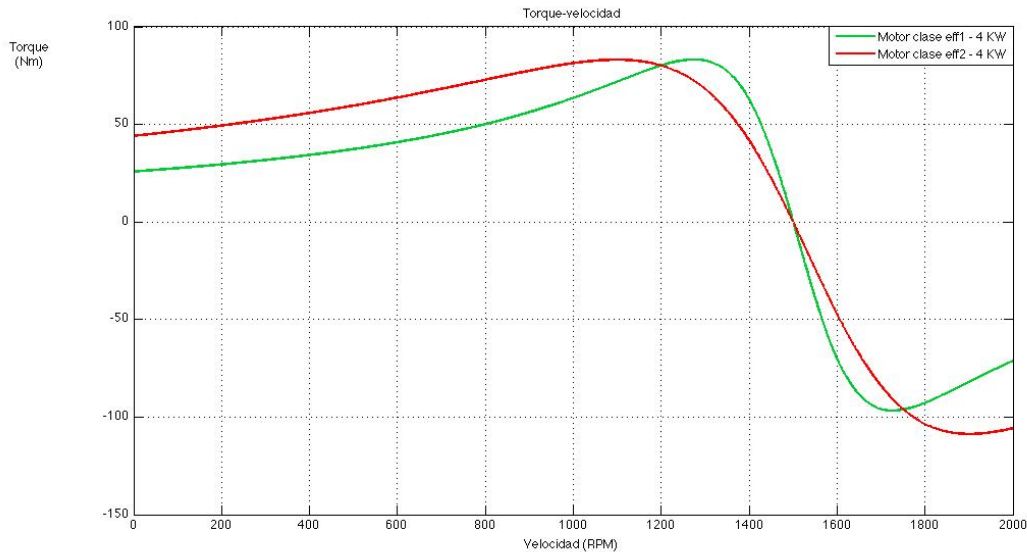


Figura 4.11: Curva característica torque-velocidad para motores eff1 y eff2 de 4 kW.

En la curva anterior se puede ver que para motores de 4 kW el comportamiento del motor eficiente es distinto al de eficiencia estándar. Se observa que el torque máximo para el motor eficiente se encuentra desplazado a la derecha, es decir, se alcanza a velocidades mayores. Se observa también que para un mismo nivel de torque, sobre los 1200 RPM el motor eficiente girará a mayor velocidad.

Esto concuerda con el análisis de los datos de catálogo hechos anteriormente, donde se encontró que los motores más eficientes tienden a girar a mayor velocidad.

- 18.5 kW:

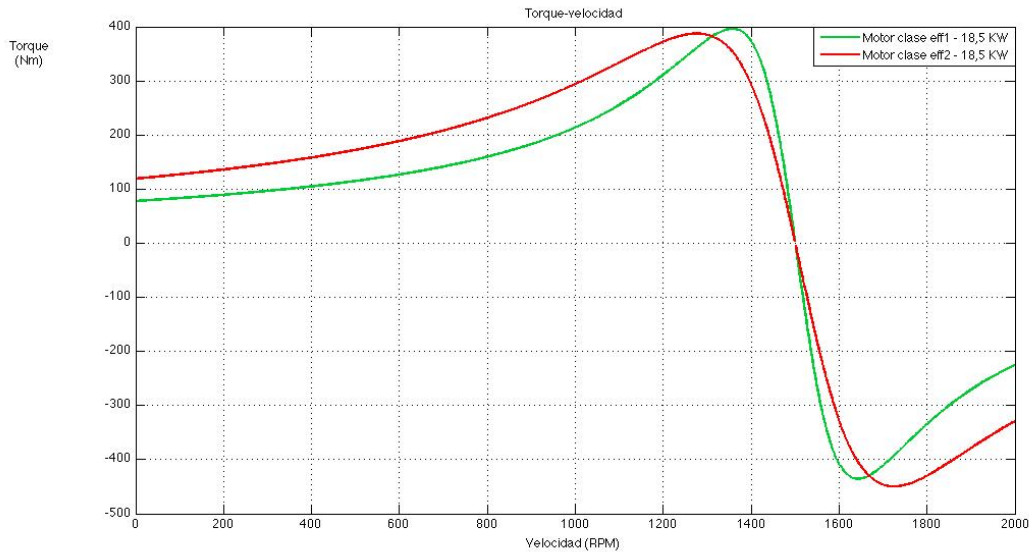


Figura 4.12 Curva característica torque-velocidad para motores eff1 y eff2 de 18.5 kW.

Para la curva de los motores de 18,5 kW se puede observar que el comportamiento sigue siendo similar para ambos tipos de motores. Al igual que en el caso anterior, también se puede notar que para el motor eficiente, el torque máximo se encuentra desplazado hacia la derecha, es decir, se alcanza a velocidades mayores. De la misma forma, el motor de alta eficiencia desarrollará mayores velocidades para mismos niveles de torque.

- 75 kW

En este caso, se puede observar que el comportamiento de ambos tipos de motores es muy similar. Esto se puede explicar ya que según se vio en la parte anterior, a medida que aumenta la potencia nominal de los motores, los parámetros para ambos tipos de motores se van pareciendo, lo cual obviamente genera curvas de torque velocidad parecidas.

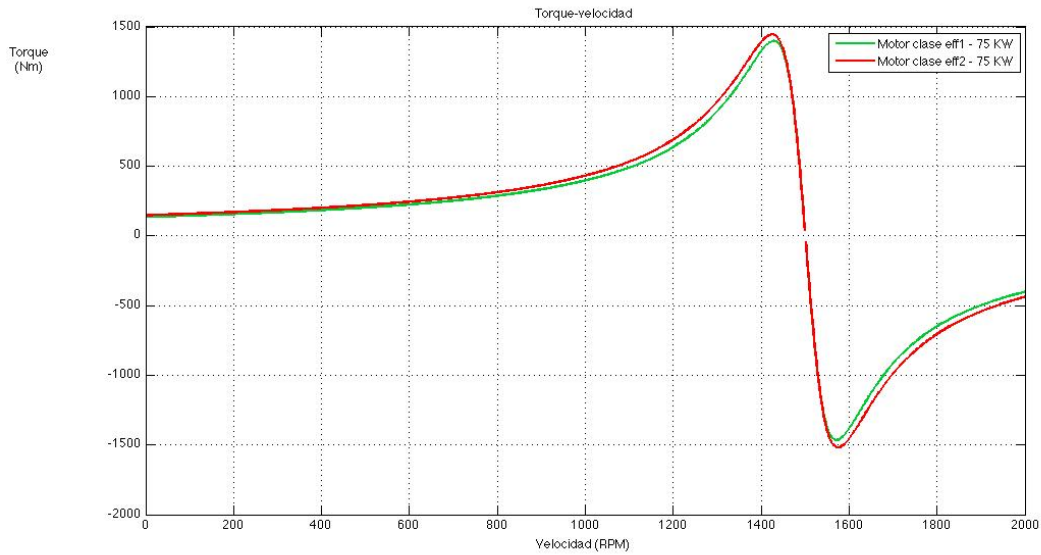


Figura 4.13: Curva característica torque-velocidad para motores eff1 y eff2 de 75 kW.

4.2.3.2 Relación X/R

La siguiente tabla muestra las relaciones reactancia-resistencia para estator y rotor de motores estándar y de alta eficiencia.

| Potencia [kW] | Eff1 | | Eff2 | |
|------------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| | X/R Estator | X/R Rotor | X/R Estator | X/R Rotor |
| 4 | 6,243 | 3,122 | 3,469 | 1,734 |
| 11 | 9,731 | 4,865 | 5,245 | 2,623 |
| 18,5 | 9,607 | 4,803 | 6,085 | 3,043 |
| 22 | 8,596 | 4,298 | 7,069 | 3,534 |
| 30 | 7,949 | 3,974 | 6,506 | 3,253 |
| 55 | 18,008 | 9,004 | 14,651 | 7,325 |
| 75 | 18,772 | 9,386 | 18,223 | 9,112 |
| 90 | 18,703 | 9,351 | 18,051 | 9,025 |

Tabla 4.4: Relaciones reactancia/resistencia para distintos motores.

Con los datos anteriores es posible obtener dos gráficos, comparativos entre los dos tipos de motores:

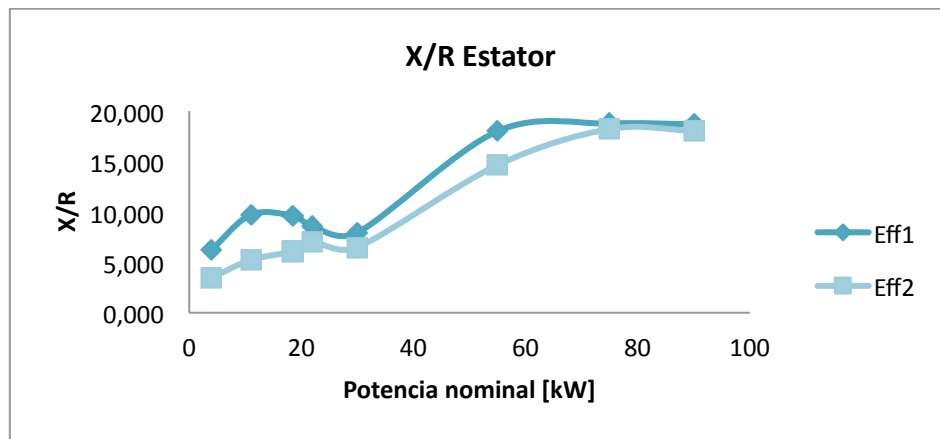


Figura 4.14: Gráfico relación X/R de estator versus potencia nominal.

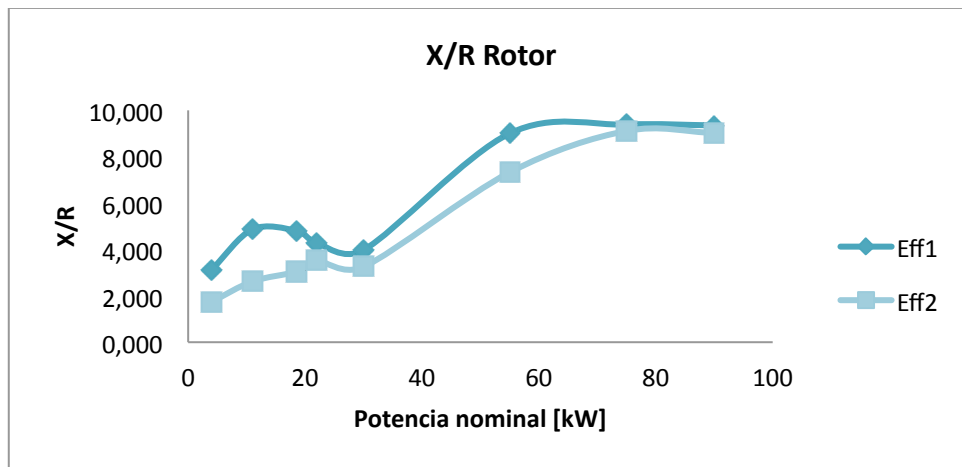


Figura 4.15: Gráfico relación X/R de rotor versus potencia nominal.

De los gráficos es posible observar con facilidad que la relación reactancia-resistencia para los motores de alta eficiencia en general es levemente mayor que para los motores estándar.

La consecuencia de esta propiedad es que la corriente de arranque se incrementa debido a la tendencia a un mayor valor de X/R. Lo anterior implica un posible disparo intempestivo del interruptor asociado al motor, por lo cual podría ser necesaria una nueva coordinación entre la protección asociada y los disparos del arranque.

Esto coincide y explica el fenómeno encontrado en el análisis de los datos de catálogo hecho en la sección 3.1 del presente documento, en relación a la corriente de partida.

4.2.4 Análisis del método de estimación usado

Esta sección tiene como objetivo verificar si las ecuaciones para encontrar los puntos iniciales de la iteración de los parámetros del circuito equivalente, tienen validez como resultado general, es decir, cuanto se alejan los resultados reales (con el algoritmo iterativo) del punto inicial. Esto se hará para comprobar que para el cálculo de parámetros se hace necesario contar con un método más sofisticado, tal como el método iterativo planteado.

Se ejecutó el algoritmo planteado anteriormente, obteniendo los 5 parámetros para cada potencia dada, en las versiones de motor eficiente y estándar. Los resultados fueron los siguientes:

| Potencia [KW] | método | Eff1 | | | | | Eff2 | | | | |
|---------------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | | Rr | Xm | Xs | Rs | Xr | Rr | Xm | Xs | Rs | Xr |
| 4 | ci | 1,007 | 55,250 | 2,763 | 0,503 | 2,763 | 1,867 | 55,250 | 2,763 | 0,933 | 2,763 |
| | alg. | 0,905 | 63,369 | 2,825 | 0,453 | 2,825 | 1,526 | 59,506 | 2,656 | 0,763 | 2,656 |
| 11 | ci | 0,291 | 23,470 | 1,174 | 0,145 | 1,174 | 0,485 | 22,518 | 1,126 | 0,242 | 1,126 |
| | alg. | 0,250 | 30,860 | 1,217 | 0,125 | 1,217 | 0,409 | 26,877 | 1,072 | 0,204 | 1,072 |
| 18,5 | ci | 0,144 | 13,955 | 0,698 | 0,072 | 0,698 | 0,231 | 13,955 | 0,698 | 0,115 | 0,698 |
| | alg. | 0,127 | 17,254 | 0,611 | 0,064 | 0,611 | 0,199 | 16,849 | 0,606 | 0,100 | 0,606 |
| 22 | ci | 0,146 | 11,259 | 0,563 | 0,073 | 0,563 | 0,170 | 11,259 | 0,563 | 0,085 | 0,563 |
| | alg. | 0,126 | 13,876 | 0,542 | 0,063 | 0,542 | 0,147 | 13,567 | 0,519 | 0,073 | 0,519 |
| 30 | ci | 0,107 | 8,606 | 0,430 | 0,053 | 0,430 | 0,124 | 8,606 | 0,430 | 0,062 | 0,430 |
| | alg. | 0,094 | 10,518 | 0,372 | 0,047 | 0,372 | 0,109 | 10,277 | 0,354 | 0,054 | 0,354 |
| 55 | ci | 0,029 | 5,133 | 0,257 | 0,015 | 0,257 | 0,039 | 4,694 | 0,235 | 0,019 | 0,235 |
| | alg. | 0,026 | 7,027 | 0,233 | 0,013 | 0,233 | 0,034 | 6,302 | 0,248 | 0,017 | 0,248 |
| 75 | ci | 0,021 | 3,764 | 0,188 | 0,011 | 0,188 | 0,021 | 3,442 | 0,172 | 0,011 | 0,172 |
| | alg. | 0,019 | 5,247 | 0,177 | 0,009 | 0,177 | 0,019 | 4,533 | 0,171 | 0,009 | 0,171 |
| 90 | ci | 0,017 | 2,996 | 0,150 | 0,008 | 0,150 | 0,018 | 2,996 | 0,150 | 0,009 | 0,150 |
| | alg. | 0,015 | 3,971 | 0,138 | 0,007 | 0,138 | 0,016 | 4,018 | 0,150 | 0,008 | 0,150 |

Tabla 4.5: Resultados de parámetros por método de condición inicial y algoritmo.

En la tabla anterior se muestran los resultados de la aproximación general de los parámetros, el cual se utiliza como condición inicial para el método numérico.

En general, se ve que la aproximación ocupada para obtener las condiciones iniciales, si bien, están dentro del orden de lo esperado para los diferentes parámetros, aumentando el criterio de error, se puede ver también que distan bastante de los valores alcanzados por los algoritmos.

Lo anterior se puede apreciar de mejor manera en las dos tablas siguientes, donde se tabularon los errores absolutos y relativos porcentuales para cada potencia y para cada parámetro.

| | | Errores parámetros motores Eff1 | | | | |
|---------------|------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Potencia [KW] | Tipo error | Rr | Xm | Xs | Rs | Xr |
| 4 | Absoluto | 0,102 | 8,120 | 0,063 | 0,051 | 0,063 |
| | Relativo | 11,222 | 12,813 | 2,223 | 11,210 | 2,223 |
| 11 | Absoluto | 0,041 | 7,390 | 0,043 | 0,020 | 0,043 |
| | Relativo | 16,313 | 23,948 | 3,559 | 16,313 | 3,559 |
| 18,5 | Absoluto | 0,017 | 3,299 | 0,087 | 0,009 | 0,087 |
| | Relativo | 13,375 | 19,118 | 14,300 | 13,375 | 14,300 |
| 22 | Absoluto | 0,019 | 2,617 | 0,021 | 0,010 | 0,021 |
| | Relativo | 15,385 | 18,857 | 3,875 | 15,385 | 3,875 |
| 30 | Absoluto | 0,013 | 1,913 | 0,059 | 0,007 | 0,059 |
| | Relativo | 14,118 | 18,184 | 15,797 | 14,118 | 15,797 |
| 55 | Absoluto | 0,003 | 1,894 | 0,024 | 0,002 | 0,024 |
| | Relativo | 12,355 | 26,950 | 10,077 | 12,355 | 10,077 |
| 75 | Absoluto | 0,002 | 1,482 | 0,011 | 0,001 | 0,011 |
| | Relativo | 12,698 | 28,251 | 6,088 | 12,698 | 6,088 |
| 90 | Absoluto | 0,002 | 0,975 | 0,011 | 0,001 | 0,011 |
| | Relativo | 12,162 | 24,545 | 8,237 | 12,162 | 8,237 |

Tabla 4.6: Errores cometidos por condiciones iniciales para motores eff1.

| | | Errores parámetros motores Eff2 | | | | |
|---------------|------------|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Potencia [KW] | Tipo error | Rr | Xm | Xs | Rs | Xr |
| 4 | Absoluto | 0,341 | 4,256 | 0,106 | 0,170 | 0,106 |
| | Relativo | 22,342 | 7,152 | 3,994 | 22,342 | 3,994 |
| 11 | Absoluto | 0,076 | 4,358 | 0,054 | 0,038 | 0,054 |
| | Relativo | 18,620 | 16,215 | 5,038 | 18,620 | 5,038 |
| 18,5 | Absoluto | 0,032 | 2,894 | 0,092 | 0,016 | 0,092 |
| | Relativo | 15,821 | 17,174 | 15,187 | 15,821 | 15,187 |
| 22 | Absoluto | 0,023 | 2,308 | 0,045 | 0,012 | 0,045 |
| | Relativo | 15,678 | 17,010 | 8,582 | 15,678 | 8,582 |
| 30 | Absoluto | 0,016 | 1,671 | 0,076 | 0,008 | 0,076 |
| | Relativo | 14,338 | 16,263 | 21,588 | 14,338 | 21,588 |
| 55 | Absoluto | 0,005 | 1,608 | 0,013 | 0,003 | 0,013 |
| | Relativo | 14,793 | 25,517 | 5,210 | 14,793 | 5,210 |
| 75 | Absoluto | 0,003 | 1,090 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| | Relativo | 13,298 | 24,053 | 0,467 | 13,298 | 0,467 |
| 90 | Absoluto | 0,002 | 1,022 | 0,007 | 0,001 | 0,007 |
| | Relativo | 12,658 | 25,431 | 5,049 | 12,658 | 5,049 |

Tabla 4.7: Errores cometidos por condiciones iniciales para motores eff2.

Se puede concluir que el parámetro que presenta mayor cambio porcentual es el de la reactancia de magnetización, donde los mayores cambios se alcanzan por encima del 25%. Los parámetros con menores cambios son las reactancias de estator y rotor, los cuales en contados casos alcanzaron el 20%.

Con esto se puede concluir que se hace necesario un método de mayor precisión como el algoritmo iterativo planteado.

4.3 Conclusiones del capítulo

El presente capítulo tuvo como objetivo principal estudiar las diferencias técnicas y de funcionamiento de los motores estándar, versus los motores de mas alta eficiencia (alta y premium). Se pudo concluir que este tipo de motores no presentan mayores dificultades técnicas de operación, y su comportamiento es muy similar a los motores tradicionales, conservando cantidades como torque máximo, torque nominal, corriente nominal, etc.

Una diferencia se presenta en la velocidad nominal de los motores de alta eficiencia, la cual para todos los casos estudiados excedió a los motores tradicionales. Esto se pudo comprobar tanto por los datos de catálogo como por la modelación en su circuito equivalente. Dicha diferencia no afectaría mayormente el comportamiento de la máquina, sin embargo se recomienda estudiar las aplicaciones de movimiento de fluido, en las cuales la ganancia en términos energéticos podría verse disminuida por la naturaleza de torque cuadrático de esta.

Otra diferencia encontrada mediante los datos de catálogo y justificada por la modelación en MATLAB se da en la corriente de partida de dichos motores, la cual es superior a la de los motores tradicionales. Si bien esto no debería ser un problema, es recomendable verificar si la protección asociada al motor es la adecuada para soportar una corriente de partida ligeramente superior y así evitar cortes de energía y disparos intempestivos.

Con respecto a otra cantidad importante para las industrias, el factor de potencia, los datos indican que no existen mayores diferencias entre ambos tipos de motores.

En relación al modelo de circuito equivalente, se puede decir que el cálculo de parámetros es un problema de gran complejidad, que no se puede resolver de manera analítica, sino que por aproximaciones numéricas.

El resultado arrojado por este modelo fue que las resistencias tanto de estator como de rotor para motores de alta eficiencia disminuyen considerablemente, y a medida que se seleccionan motores de mayor potencia, esta diferencia se va estrechando. Para las reactancias de estator y rotor no existe diferencia notable, así como tampoco

para la reactancia de magnetización. Este resultado también coincide con lo esperado, ya que la ganancia en eficiencia de estos motores se logra en gran parte, reduciendo la potencia disipada en los conductores eléctricos de rotor y estator.

5 Comparación económica de motores de alta eficiencia vs eficiencia estándar

En el presente capítulo se realizará una comparación de los motores de alta eficiencia con respecto a los de eficiencia estándar en cuanto a los factores económicos importantes se trata.

En primer lugar se mostrarán las ofertas disponibles de algunas de las marcas más conocidas del rubro, con sus precios de lista, para luego, con estos datos calcular indicadores económicos, con el fin de aclarar la decisión de compra de motores.

5.1 Factores para la corrección de la eficiencia

La eficiencia de los motores en general responde a una serie de pruebas de laboratorio aplicadas, las cuales se rigen por diferentes normas. Estas condiciones podrían y de hecho así es en la mayoría de los casos, no corresponder con las condiciones de operación reales de los motores. Es por esto que para el análisis económico se considerará el derating o reducción de la eficiencia debido a diferentes factores, con el fin de dar mayor precisión y confiabilidad al estudio.

Para cada factor de reducción se presentarán las fórmulas correspondientes al motor de alta eficiencia y de eficiencia estándar. La eficiencia corregida será calculada como el producto entre los factores y la eficiencia nominal.

5.1.1 Corrección por voltaje diferente al nominal

Este factor considera el efecto sobre el rendimiento cuando un motor es alimentado con una tensión distinta a la nominal. Esta situación se da generalmente cuando se tiene una mala regulación de voltaje, o cuando se ocupa un motor NEMA para un voltaje superior al de la red a conectar. Las expresiones son las siguientes [30]:

- **Motor estándar:**

$$K_v = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) \left[(1 + 0.6 \left(\left(\frac{V_n}{V_a} \right)^2 - 1 \right) - 0.2 \left(1 - \left(\frac{V_a}{V_n} \right)^2 \right) \right]} \quad (5.1)$$

- **Motor eficiente:**

$$K'_v = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) * \left[(1 + 0.5 * \left(\left(\frac{V_n}{V_a} \right)^2 - 1 \right) - 0.3 * \left(1 - \left(\frac{V_a}{V_n} \right)^2 \right) \right]} \quad (5.2)$$

Con η_0 = Eficiencia nominal motor.

V_n = Voltaje nominal (de placa).

V_a = Voltaje de alimentación real

5.1.2 Corrección por frecuencia distinta a la nominal

La variación de la frecuencia de alimentación afecta principalmente las pérdidas en el hierro y las mecánicas (ventilación y roce). Al igual que en el caso anterior, se tendrá que aplicar esta fórmula al operar un motor de NEMA de frecuencia nominal de 60 Hz en una red de 50, por ejemplo el sistema chileno [30].

- **Motor estándar:**

$$K_f = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) * \left[0.2 * \left(\frac{f_n}{f_a} \right) + 0.05 * \left(\frac{f_a}{f_n} \right) + 0.05 * \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^2 + 0.7 \right]} \quad (5.3)$$

- **Motor eficiente:**

$$K'_f = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) * \left[0.3 * \left(\frac{f_n}{f_a} \right) + 0.06 * \left(\frac{f_a}{f_n} \right) + 0.06 * \left(\frac{f_a}{f_n} \right)^2 + 0.58 \right]} \quad (5.4)$$

Con η_0 = Eficiencia nominal motor.

f_n = Voltaje nominal (de placa).

f_a = Voltaje de alimentación real

5.1.3 Corrección por carga distinta a la nominal

Es sabido que la corriente de entrada de un motor depende de la carga del motor. A mayor carga, mayor será la corriente requerida para mantener la velocidad y mayor será la potencia consumida por la máquina. Por otro lado, un tipo de pérdida muy importante en el motor de inducción son las pérdidas por efecto joule, las cuales son proporcionales al cuadrado de la corriente de entrada. Gracias a esos dos elementos,

es posible ver que las pérdidas y por lo tanto, la eficiencia dependerán del nivel de carga que tenga el motor.

El dato con el que generalmente se cuenta es la eficiencia a plena carga, la cual habitualmente es la máxima [30].

- **Motor estándar:**

$$K_c = \frac{fc}{fc*\eta_0+(1-\eta_0)*[0.6*fc^2+0.4]} \quad (5.5)$$

- **Motor eficiente:**

$$K'_c = \frac{fc}{fc*\eta_0+(1-\eta_0)*[0.5*fc^2+0.5]} \quad (5.6)$$

Con η_0 = Eficiencia nominal motor.

fc = Factor de carga en por unidad.

5.1.4 Corrección por temperatura distinta a la nominal

Es sabido que la temperatura de los enrollados del motor se relaciona con la temperatura del ambiente en que se encuentra operando un motor. El aumento de temperatura de los enrollados, produce un aumento en el valor de la resistividad de éste, por el cual aumentarían las pérdidas, con la consiguiente disminución de la eficiencia. Las normas internacionales exigen a los fabricantes de motores asegurar la eficiencia nominal hasta una temperatura de 40°C, a partir de esto, la ecuación que relaciona la temperatura ambiental con el cambio en la eficiencia del motor se muestra a continuación [30]:

- **Motor estándar:**

$$K_t = \frac{1}{\eta_0+(1-\eta_0)*\left[0.6*\left(\frac{234.5+T_a}{274.5}\right)+0.4\right]} \quad (5.7)$$

- **Motor eficiente:**

$$K'_t = \frac{1}{\eta_0+(1-\eta_0)*\left[0.5*\left(\frac{334.5+T_a}{374.5}\right)+0.5\right]} \quad (5.8)$$

Con η_0 = Eficiencia nominal motor.

T_a = Temperatura ambiente promedio, la cual se calcula como:

$$T_a = \frac{T_{m\acute{a}xima} + T_{m\acute{i}nima}}{2}$$

5.1.5 Corrección por altura sobre el nivel del mar

El efecto de la altura sobre la eficiencia de los motores es particularmente importante en un estudio relacionado con el área minera como éste, ya que la gran mayoría de las operaciones de este tipo son a varios miles de metros de altura sobre el nivel del mar. Esta condición se explica por la disminución de la presión atmosférica o lo que es análogo, la cantidad de aire que rodea al motor, teniendo éste menor capacidad para transferir al exterior el calor interno. Típicamente, los fabricantes de motores aseguran la eficiencia nominal hasta una altura de 1000 metros sobre el nivel del mar.

La relación entre altura y disminución de eficiencia es la siguiente [30]:

- **Motor estándar:**

$$K_h = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) * \left[\left(\frac{0.6}{a - b * \frac{h}{1000}} \right) + 0.4 \right]} \quad (5.9)$$

- **Motor eficiente:**

$$K'_h = \frac{1}{\eta_0 + (1 - \eta_0) * \left[\left(\frac{0.5}{a - b * \frac{h}{1000}} \right) + 0.5 \right]} \quad (5.10)$$

Con η_0 = Eficiencia nominal motor.

T_a = Altura sobre el nivel del mar

Si $n_s > 1200$ rpm $a = 1.087$ y $b = 0.087$

Si $n_s < 1200$ rpm $a = 1.06$ y $b = 0.06$

5.2 Ofertas de mercado disponibles

A continuación se presentará un estudio de las ofertas de mercado de algunos fabricantes de motores que ofrecen eficiencia energética. El estudio se basó sólo en catálogos que los fabricantes ofrecen a las empresas del rubro, con características técnicas y listas de precios. Si bien, los precios podrían cambiar en función del cliente, las listas obtenidas permiten efectuar una válida comparación entre motores de alta eficiencia y eficiencia estándar.

Dicha comparación constará del cálculo de diversos indicadores económicos, entre ellos, el más importante: el período de recuperación de capital, el cual indica cuánto tiempo tiene que pasar en años, para asumir el costo extra en inversión inicial que presentan los motores de alta eficiencia.

Todos los motores estudiados serán trifásicos de cuatro polos, de tipo TEFC² para baja tensión, de uso general, ya que son los más ampliamente usados en el sector industrial y minero.

5.2.1 US Motors

La marca norteamericana ofrece al público su línea de motores NEMA Premium Hostile Duty, los cuales como su nombre lo indica, cumplen con la normativa NEMA Premium de eficiencia de motores y tienen características que lo hacen más robustos y resistentes para el trabajo en condiciones poco favorables. Presentan motores de tipo TEFC; de 2, 4 y 6 polos; de potencias que van desde 1 HP hasta los 200 HP.

Están diseñados para aplicaciones como plantas de pulpa y papel, aserraderos, minas, plantas químicas y otras industrias que requieran duras condiciones de operación.

Las características principales son:

- Aislación clase F.
- Marco de hierro fundido.
- Resistente a la corrosión de molinos y plantas químicas.

² Totally enclosed, fan cooled

- Factor de servicio 1.15.
- Rodamientos de bolas reengrasables.

A continuación se muestra una tabla comparativa con precios de este tipo de motores, en comparación con motores de similares características pero de eficiencia estándar.

| Potencia [HP] | Eficiencia premium | | | Eficiencia estándar | | |
|---------------|--------------------|--------------|------|---------------------|--------------|------|
| | Modelo | Precio [USD] | Eff | Modelo | Precio [USD] | Eff |
| 1 | H1P2B | 969 | 85,5 | H1E2D | 725 | 82,5 |
| 3 | H3P2B | 1132 | 89,5 | H3E2D | 921 | 87,5 |
| 5 | H5P2B | 1195 | 89,5 | H5E2D | 1073 | 87,5 |
| 7,5 | H7P2B | 1594 | 91,7 | H7E2D | 1431 | 89,5 |
| 10 | H10P2B | 1791 | 91,7 | H10E2D | 1542 | 89,5 |
| 15 | H15P2B | 2147 | 92,4 | H15E2D | 1806 | 90,2 |
| 25 | H25P2B | 3407 | 93,6 | H25E2D | 2700 | 92,4 |
| 50 | H50P2B | 5779 | 94,5 | H50E2E | 4226 | 93 |
| 75 | H75P2B | 9730 | 95,4 | H75E2E | 7983 | 94,1 |
| 100 | H100P2B | 13788 | 95,4 | H100E2E | 9912 | 94,5 |
| 125 | H125P2S | 15746 | 95,4 | H125E2F | 13374 | 94,5 |
| 150 | H150P2S | 18447 | 95,8 | H150E2F | 15668 | 95 |
| 200 | H200P2S | 22194 | 96,2 | H200E2F | 19257 | 95,4 |

Tabla 5.1: Comparativa de precios y eficiencias de motores US motors

En general se puede apreciar que los motores eficientes energéticamente de la marca son aproximadamente un 20% más costosos que los estándar. También se puede apreciar que la mayor diferencia en eficiencia se da para el motor de 1 HP, la cual alcanza el 3%. A potencias mayores esta diferencia disminuye gradualmente, hasta estabilizarse en 0.8% a partir de los 100 HP.

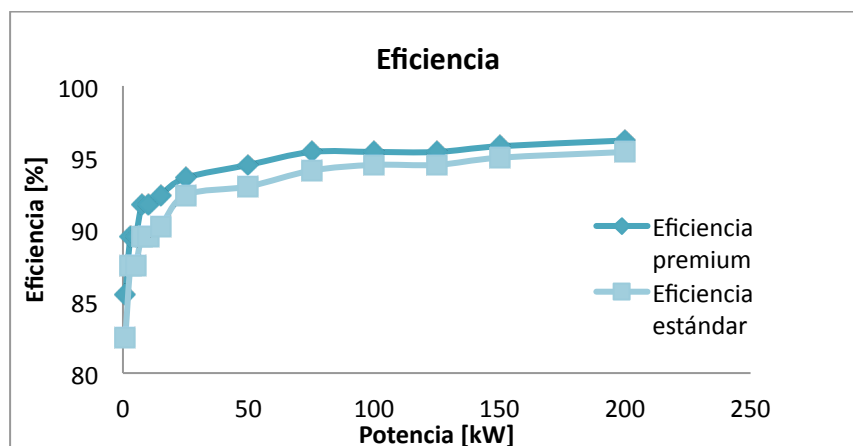


Figura 5.1: Eficiencia vs potencia nominal de motores US motors

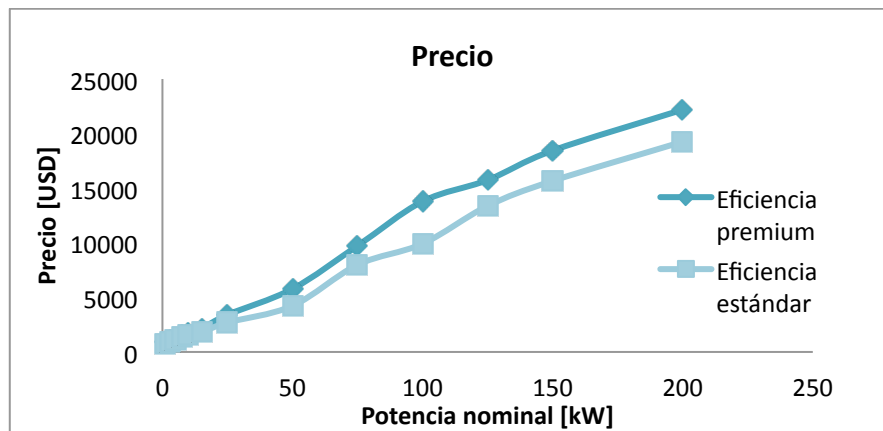


Figura 5.2: Precios vs potencia nominal de motores US motors

Del gráfico se aprecia que la relación del precio con la potencia es relativamente lineal tanto para motores eficientes y estándar, sin embargo con distintas pendientes. Dicha linealidad se ve afectada en algunos motores, lo cuales se escapan a la recta, como el motor eficiente de 100 HP, el cual tiene un costo por HP mayor que los demás.

5.2.2 Siemens

Esta conocida fábrica de origen alemán de máquinas eléctricas presenta un amplio catálogo de modelos y tamaños de motores de inducción. Se ofrecen motores tanto en norma NEMA como en IEC. Para el caso de motores NEMA la oferta es mucho más amplia que para motores IEC, ofreciéndose una gran cantidad de tipos de motores tanto de eficiencia alta como Premium, la cual cumple la norma NEMA Premium. Para el caso de los motores IEC, Siemens ofrece motores de eficiencia alta o eff2 y eficiencia Premium eff1, según la clasificación CEMEP.

Se compararán motores de la línea *Severe Duty*, ya que son los más idóneos para aplicaciones interiores o exteriores en condiciones ambientales severas. Son ampliamente usados en industrias de procesos químicos, pulpa y papel, fundiciones, manejo de desechos, y aplicaciones petro-químicas.

Los datos básicos de los modelos, precio y eficiencia son tabulados a continuación.

| Potencia [HP] | Alta eficiencia (Nema Premium) | | | Eficiencia estándar | | |
|---------------|--------------------------------|--------------|------|---------------------|--------------|------|
| | Modelo | Precio [USD] | Eff | Modelo | Precio [USD] | Eff |
| 1 | 1LE23211AB214AA3 | 381 | 85,5 | 1LE23011AB214AA3 | 336 | 82,5 |
| 3 | 1LE23211CB114AA3 | 515 | 89,5 | 1LE23011CB114AA3 | 457 | 87,5 |
| 5 | 1LE23211CB314AA3 | 602 | 89,5 | 1LE23011CB314AA3 | 531 | 87,5 |
| 7,5 | 1LE23212AB114AA3 | 816 | 91,7 | 1LE23012AB114AA3 | 726 | 89,5 |
| 10 | 1LE23212AB214AA3 | 984 | 91,7 | 1LE23012AB214AA3 | 877 | 89,5 |
| 15 | 1LE23212BB114AA3 | 1296 | 92,4 | 1LE23012BB114AA3 | 1162 | 91 |
| 25 | 1LE23212CB112AA3 | 1838 | 93,6 | 1LE23012CB112AA3 | 1828 | 93 |
| 50 | 1LE23213AB212AA3 | 3489 | 94,5 | 1LE23013AB212AA3 | 3467 | 93,6 |
| 75 | 1LE23213CB212AA3 | 6345 | 95,4 | 1LE23013CB212AA3 | 6305 | 94,1 |
| 100 | 1LE23214AB212AA3 | 7839 | 95,4 | 1LE23014AB212AA3 | 7790 | 94,5 |
| 125 | 1LE23214CB112AA3 | 10320 | 95,4 | 1LE23014CB112AA3 | 10255 | 95 |
| 150 | 1LE23214CB212AA3 | 11998 | 95,8 | 1LE23014CB212AA3 | 11922 | 95,8 |
| 200 | 1LE23214CB312AA3 | 14593 | 96,2 | 1LE23014EB312AA3 | 14501 | 95,8 |
| 250 | 1LE23214CB512AA3 | 18308 | 96,2 | 1LE23014EB512AA3 | 18192 | 95,8 |
| 300 | 1LE23214CB612AA3 | 19410 | 96,2 | 1LE23014CB612AA3 | 19288 | 95,4 |
| 350 | 1LE23214FB213AA3 | 30807 | 96,2 | 1LE23014FB212AA3 | 30612 | 95,8 |
| 400 | 1LE23214FB312AA3 | 34584 | 96,2 | 1LE23014FB312AA3 | 34365 | 95,8 |

Tabla 5.2: Comparativa de precios y eficiencias de motores Siemens

Para los precios se puede apreciar que no existen mayores diferencias entre los modelos de alta eficiencia y eficiencia Premium. La máxima variación se da en el caso de motores de 1 HP, donde el motor nema Premium alcanza casi un 114% del precio del motor de alta eficiencia. Para potencias mayores esta diferencia va disminuyendo, para ser casi iguales en motores de potencias superiores a 25 HP. Esta escasa diferencia viene explicada porque la diferencia de eficiencia es también de poca magnitud. La mayor diferencia en eficiencia se da para motores pequeños, donde alcanza los 3 puntos porcentuales. Para potencias mayores, ésta diferencia es del orden de sólo un 0.4%.

| Potencia [HP] | Variacion precio [%] | Diferencia eff [%] |
|---------------|----------------------|--------------------|
| 1 | 113,39 | 3 |
| 3 | 112,69 | 2 |
| 5 | 113,37 | 2 |
| 7,5 | 112,40 | 2,2 |
| 10 | 112,20 | 2,2 |
| 15 | 111,53 | 1,4 |
| 25 | 100,55 | 0,6 |
| 50 | 100,63 | 0,9 |
| 75 | 100,63 | 1,3 |
| 100 | 100,63 | 0,9 |
| 125 | 100,63 | 0,4 |
| 150 | 100,64 | 0 |
| 200 | 100,63 | 0,4 |
| 250 | 100,64 | 0,4 |
| 300 | 100,63 | 0,8 |
| 350 | 100,64 | 0,4 |
| 400 | 100,64 | 0,4 |

Tabla 5.3: Variación de precio y diferencia de eficiencia de motores Siemens

Con respecto de los motores IEC, Siemens ofrece una línea de motores de uso general de 50 HZ y 400 V de potencias que van desde 0.75 kW a 200 kW. Ésta línea está construida de manera tal que alcance la clase de eficiencia Eff1 de la norma IEC 60034-2-1:2007. La empresa ofrece motores de clase Eff2 o eficiencia estándar, pero sólo de bajas potencias (hasta 18.5 kW), en un esfuerzo por promover la eficiencia energética en los consumidores.

| Potencia [KW] a 50Hz | Alta eficiencia Eff1 | | |
|----------------------|----------------------|--------------|-----------------|
| | Modelo | Precio [USD] | Eff a 400V-50Hz |
| 0,75 | 1la9083-4KA10 | 430 | 81 |
| 3 | 1la9107-4KA10 | 878 | 87,5 |
| 5,5 | 1la9130-4KA60 | 1340 | 89,5 |
| 7,5 | 1la9133-4KA60 | 1700 | 90,3 |
| 11 | 1la9163-4KA60 | 2240 | 91,5 |
| 18,5 | 1lg6186-6AA60 | 3460 | 92,6 |
| 30 | 1lg6207-4AA60 | 5210 | 93,3 |
| 37 | 1lg6220-4AA60 | 6330 | 94 |
| 55 | 1lg6253-4AA60 | 9050 | 95,1 |
| 75 | 1lg6280-4AA60 | 12200 | 95,1 |
| 90 | 1lg6283-4AA60 | 14300 | 95,4 |
| 110 | 1lg6310-4AA60 | 17800 | 95,9 |
| 160 | 1lg6316-4AA60 | 25500 | 96,3 |
| 200 | 1lg6317-4AA60 | 31800 | 96,4 |

Tabla 5.4: Precios y eficiencias de motores Siemens IEC

5.2.3 General Electric

La marca de origen norteamericano ofrece al público un amplio catálogo con motores NEMA de baja tensión en 60 Hz, destinados a ser usados en Estados Unidos. Para redes de 50 Hz el catálogo es más reducido, sin embargo tienen disponibles líneas de motores IEC de propósito general tanto en eficiencias estándar como altas.

La línea de alta eficiencia lleva por nombre Energy Saver o X\$D Ultra IEC. Dicha línea de motores, de potencias que van desde los 0.55 kW hasta los 220 kW, cumple con los requerimientos de la norma NEMA Premium y clasificados IE3 de acuerdo a la clasificación de la norma IEC 60034-2-1:2007. Alternativamente, ofrece la línea X\$D IEC, los cuales tienen características similares pero más baja eficiencia, logrando sólo clasificación IE2. Algunas de las características para la línea eficiente X\$D Ultra 841 IEC son las siguientes:

- Excede requerimientos de eficiencia de norma NEMA Premium.
- Gran compatibilidad con variadores de frecuencia
- Factor de servicio 1.15

Una tabla comparativa de precios y eficiencias de ambos tipos de motores (estándar y alta eficiencia) es mostrada a continuación.

| Potencia [KW] | Alta eficiencia | | | Eficiencia estándar | | |
|---------------|-----------------|--------------|------|---------------------|--------------|------|
| | Modelo | Precio [USD] | Eff | Modelo | Precio [USD] | Eff |
| 0,75 | N404 | 680 | 84 | N204 | 559 | 81,1 |
| 3 | N417 | 788 | 88,4 | N216 | 684 | 86,3 |
| 5,5 | N427 | 1153 | 90 | N225 | 1010 | 88,2 |
| 7,5 | N430 | 1255 | 90,8 | N228 | 1031 | 89,1 |
| 11 | N433 | 1694 | 91,7 | N231 | 1418 | 90,1 |
| 18,5 | N439 | 2514 | 92,7 | N237 | 2162 | 91,4 |
| 30 | N445 | 4051 | 93,6 | N243 | 3272 | 92,4 |
| 37 | N448 | 4615 | 94 | N246 | 3836 | 92,8 |
| 55 | N454 | 7839 | 94,5 | N252 | 6977 | 93,5 |
| 75 | N457 | 9651 | 95 | N255 | 8696 | 94 |
| 90 | N459 | 12434 | 95,2 | N257 | 11440 | 94,4 |
| 110 | N461 | 14287 | 95,5 | N259 | 13310 | 94,7 |

Tabla 5.5: Comparativa de precios y eficiencias de motores General Electric

La tabla anterior permite establecer una comparación y determinar cuanto más costoso es tener un motor de alta eficiencia para la misma potencia nominal. Se ve que las mayores diferencias de eficiencia se producen para motores de menor

tamaño, la cual, para motores de 0.75 kW alcanza el valor de casi 3 puntos porcentuales de diferencia. A medida que aumenta la potencia, dicha diferencia se estrecha, y se estabiliza en torno al 1%.

Con respecto a los costos, se ve claramente que los motores eficientes, para todos los casos presentan mayor costo. La diferencia mayor se da para potencias menores, donde para motores de 0.75 kW se paga aproximadamente un 20% más que por un motor normal. A partir de los 55 kW se puede ver que la variación se estabiliza, costando los motores eficientes en promedio un 10% más que su par no eficiente.

| Potencia [kW] | Variacion precio [%] | Diferencia Eff [%] |
|---------------|----------------------|--------------------|
| 0,75 | 121,65 | 2,9 |
| 3 | 115,20 | 2,1 |
| 5,5 | 114,16 | 1,8 |
| 7,5 | 121,73 | 1,7 |
| 11 | 119,46 | 1,6 |
| 18,5 | 116,28 | 1,3 |
| 30 | 123,81 | 1,2 |
| 37 | 120,31 | 1,2 |
| 55 | 112,35 | 1 |
| 75 | 110,98 | 1 |
| 90 | 108,69 | 0,8 |
| 110 | 107,34 | 0,8 |

Tabla 5.6: Variación de precio y eficiencias para motores General Electric

Lo anterior se puede ver gráficamente en las siguientes figuras:

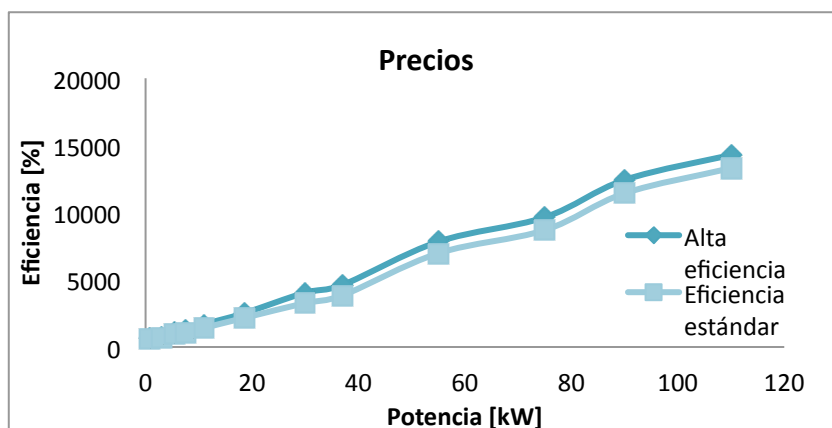


Figura 5.3: Precios en función de potencia nominal de motores General Electric

Los precios para esta marca, al igual que las anteriores, también aumentan de manera aproximadamente lineal conforme crece la potencia nominal de los motores. Como se vio en la tabla anterior, la mayor diferencia relativa entre motores de alta y

baja eficiencia se da en los motores de bajas potencias, lo cual no se aprecia claramente en la figura anterior por la escala involucrada.

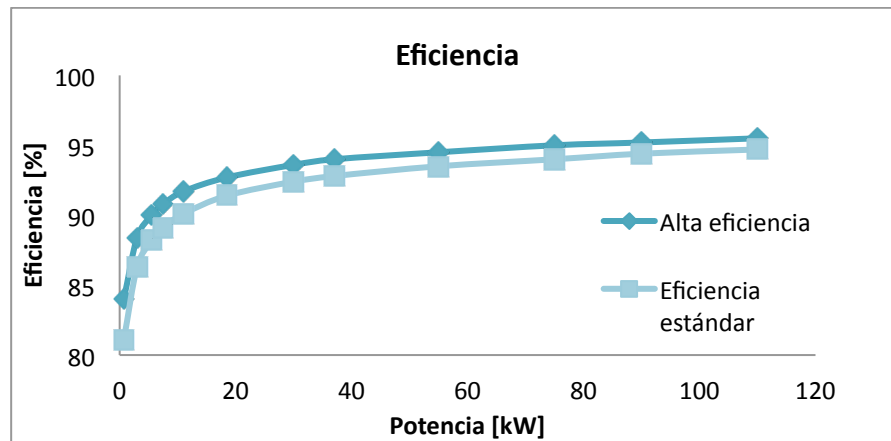


Figura 5.4: Eficiencias alcanzadas por motores General Electric

Se puede ver la típica curva del aumento de eficiencia en función de la potencia nominal. En esta misma figura también se puede ver la convergencia de los motores estándar hacia los motores eficientes.

5.3 Cálculo de indicadores económicos

En esta sección se mostrarán los índices económicos calculados para todos los motores de las 3 marcas del estudio de mercado realizado anteriormente. Por simplicidad y a modo de ejemplo, se incluirá en el desarrollo sólo los resultados obtenidos con la marca General Electric, sin embargo, los otros resultados pueden ser consultados en el anexo del presente informe.

Éstos índices pretenden dar una visión general de los beneficios a largo plazo de la adquisición de un motor eficiente versus uno de eficiencia estándar, permitiendo con esto, clarificar y optimizar el proceso de compra.

Los indicadores que se usarán como herramienta para realizar una correcta elección entre ambos tipos de motores son los siguientes:

- Ahorro energético anual
- Valor actual neto
- Tasa interna de retorno
- Período de recuperación de capital

Para el cálculo de los indicadores se considerará que los motores están operando sólo el 75% del total de horas anuales, lo cual se da en muchas industrias en la realidad. Al tener una tasa de ocupación mayor, los indicadores económicos en general mejoran, por lo que se puede decir que considerar una ocupación del 75% es en general una buena aproximación inicial.

Para mayor exactitud en los cálculos, se considerará el derating de la eficiencia por diferentes conceptos.

5.3.1 Aplicación de factores de derating

En el rubro industrial y en particular en la industria de la minería, es frecuente que los equipos no operen en situaciones ideales, sino que sean sometidos a condiciones ambientales extremas, las cuales afectan de manera importante en variables como la eficiencia de las máquinas. En esto radica la importancia de aplicar los factores que corrigen la eficiencia nominal, la cual sólo se da en condiciones de laboratorio particulares.

Otra práctica común es diseñar los proyectos de ingeniería para que los equipos y motores en particular no trabajen a plena carga, sino que a potencias considerablemente más bajas que su potencia nominal. La primera consideración que se hará es la del factor de carga: se considerará que los motores son sobredimensionados un 25%, es decir, operan con factor de carga de 0.75.

En adición a esto, las normas que siguen los fabricantes de motores, les permiten a éstos asegurar su eficiencia sólo hasta los 1000 metros sobre el nivel de mar, sin embargo, como es conocido, la gran mayoría de las faenas mineras se encuentran a una altura del orden de 3000 metros, por lo que también se aplicará el factor de reducción de la eficiencia por altura.

Se considerará que los motores se encuentran operando a su tensión y frecuencia nominales, por lo que no se considerará la reducción debido a éstos factores. Tampoco se considerará la reducción por temperatura, ya que se asumirá que la operación se produce a una temperatura ambiental menor a 40° C.

| Potencia [KW] | Eficiencias nominales | | Eficiencias corregida | |
|---------------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
| | Eficiente | Estandar | Eficiente | Estandar |
| 0,75 | 84 | 81,1 | 82,1 | 79,5 |
| 3 | 88,4 | 86,3 | 86,9 | 85,0 |
| 5,5 | 90 | 88,2 | 88,7 | 87,1 |
| 7,5 | 90,8 | 89,1 | 89,6 | 88,0 |
| 11 | 91,7 | 90,1 | 90,6 | 89,1 |
| 18,5 | 92,7 | 91,4 | 91,7 | 90,5 |
| 30 | 93,6 | 92,4 | 92,7 | 91,6 |
| 37 | 94 | 92,8 | 93,2 | 92,1 |
| 55 | 94,5 | 93,5 | 93,7 | 92,8 |
| 75 | 95 | 94 | 94,3 | 93,4 |
| 90 | 95,2 | 94,4 | 94,5 | 93,8 |
| 110 | 95,5 | 94,7 | 94,9 | 94,2 |

Tabla 5.7: Eficiencias normales y corregidas para motores seleccionados (General Electric)

Se observa una reducción de la eficiencia a potencias bajas, llegando a casi dos puntos porcentuales en el caso del motor de 0.75 kW. A potencias mayores la diferencia es menor, sin embargo no es despreciable, llegando a 0.5 puntos porcentuales, lo cual podría tener una gran importancia en los futuros ahorros energéticos.

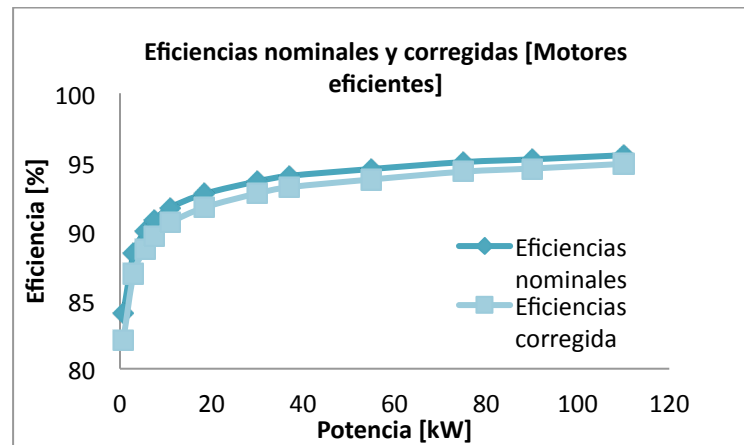


Figura 5.5: Gráfica de eficiencias nominales y corregidas para motores eficientes seleccionados

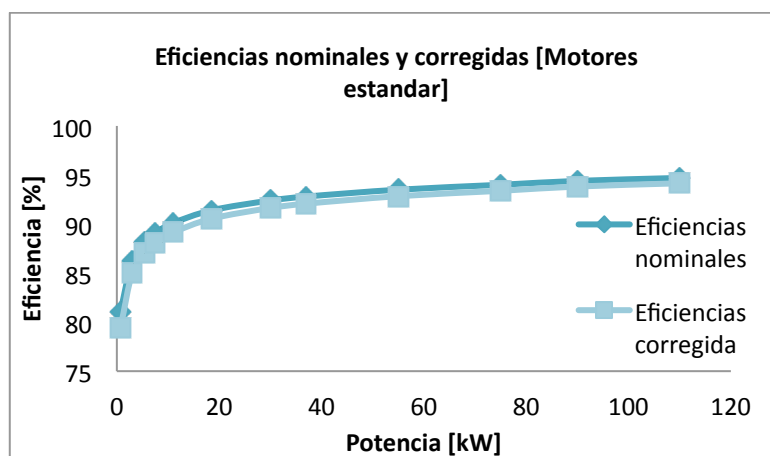


Figura 5.6: Gráfica de eficiencias nominales y corregidas para motores estándar seleccionados

5.3.2 Precio de la energía

El precio de la energía a futuro se estimó a partir del informe anual actual de la CNE, disponible en su sitio web.

El gráfico presenta los valores del precio de la energía en dólares americanos por kWh a través de los años 1982 hasta 2010. Se puede observar la gran variabilidad que ha tenido este valor, llegando a sus máximos en los años 2008 y 2009, para luego bajar hasta casi los 100 mills/kWh (0.1 USD/kWh) en agosto de 2010 tanto para el SIC como para el SING.

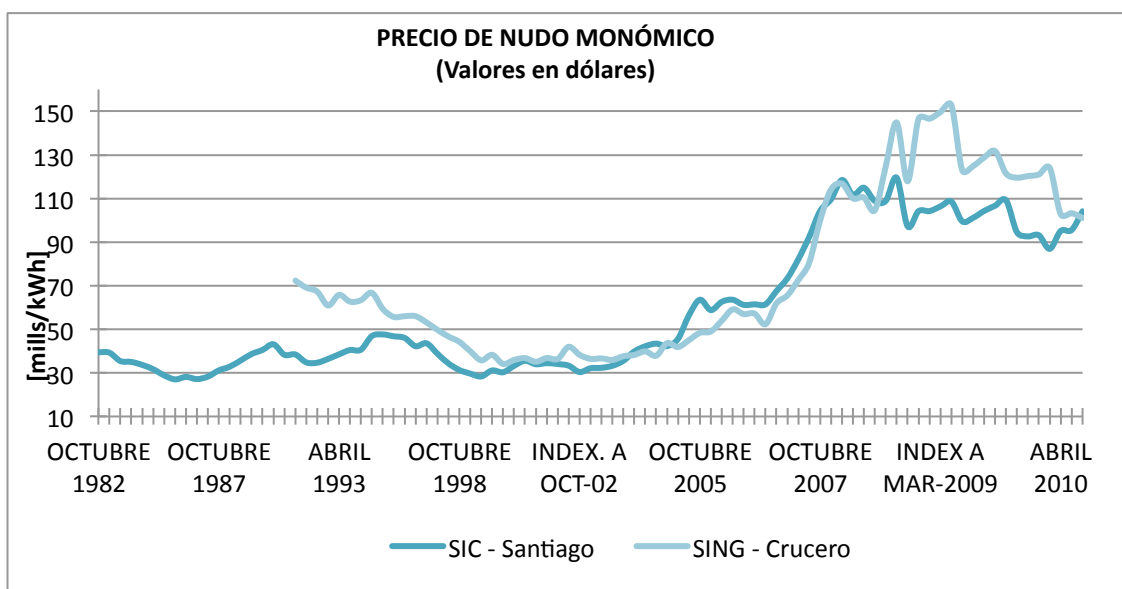


Figura 5.7: Historial de precios de energía para SIC y SING [28]

El comportamiento poco predictivo se asocia a la gran influencia que tiene el factor climatológico sobre la posibilidad de producción de energía eléctrica, así como la variación del precio de los combustibles ocupados en generación como el petróleo, carbón, etc.

Debido a este comportamiento es que se ha fijado 3 escenarios extremos posibles. Un escenario base, con un precio que se mantenga en el precio actual de 0.1 USD/kWh. Un escenario optimista, donde se fija el precio en 0.15 USD/kWh y uno pesimista, con un precio de 0.05 USD/kWh.

5.3.3 Indicadores

5.3.3.1 Ahorro energético anual.

Se refiere a la diferencia de dinero ahorrado anualmente, al tener operando un motor de alta eficiencia en vez de uno de eficiencia estándar. La expresión depende, entre otros factores, del precio de la energía, el cual se estimará, llevando el problema a tres casos o escenarios: base, optimista y pesimista.

Si bien, este no es un indicador económico propiamente tal, es una cantidad importante, ya que para todos los indicadores a obtener se deberá hacer uso de éste en sus cálculos.

Para el caso de dos motores, se tiene la siguiente expresión:

$$Ahorro\ anual = Potencia\ [HP] * 0.746 * A * B * C * \left[\left(\frac{100}{Eff_{old}} \right) - \left(\frac{100}{Eff_{new}} \right) \right] \quad (5.11)$$

Donde:

A = Carga por unidad.

B = Uso anual en horas.

C = Costo de la electricidad en USD/KWh.

Eff_{old} = Eficiencia del motor antiguo.

Eff_{new} = Eficiencia del motor nuevo.

Resultados:

| Potencia KW | Ahorro energético (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|---|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 0,75 | 14,75 | 7,38 | 22,13 |
| 3 | 37,76 | 18,88 | 56,64 |
| 5,5 | 56,75 | 28,38 | 85,13 |
| 7,5 | 71,97 | 35,98 | 107,95 |
| 11 | 97,90 | 48,95 | 146,84 |
| 18,5 | 128,08 | 64,04 | 192,11 |
| 30 | 189,47 | 94,73 | 284,20 |
| 37 | 234,43 | 117,22 | 351,65 |
| 55 | 280,96 | 140,48 | 421,43 |
| 75 | 386,04 | 193,02 | 579,06 |
| 90 | 353,98 | 176,99 | 530,97 |
| 110 | 436,05 | 218,02 | 654,07 |

Tabla 5.8: Ahorro energético anual

Como se vio en el capítulo 3 del presente documento, en general las mayores diferencias en la eficiencia de los motores se produce para potencias nominales bajas. A mayores potencias las diferencias se van estrechando, las cuales alcanzan sólo unas décimas de puntos porcentuales en la eficiencia. No obstante esto último, para los tres escenarios se observa que debido a la cantidad de potencia involucrada, los mayores ahorros energéticos se producen para potencias mayores, de acuerdo a una curva relativamente lineal, salvo ciertos puntos.

Con respecto a las diferencias entre las curvas se observa que los mayores ahorros se producen para el escenario optimista, es decir para un precio de la energía de 0.15 USD/kWh. Lo contrario sucede con el escenario pesimista. El bajo precio de la energía, hace que la cantidad de kWh anuales ahorrados sean monetariamente poco relevantes.

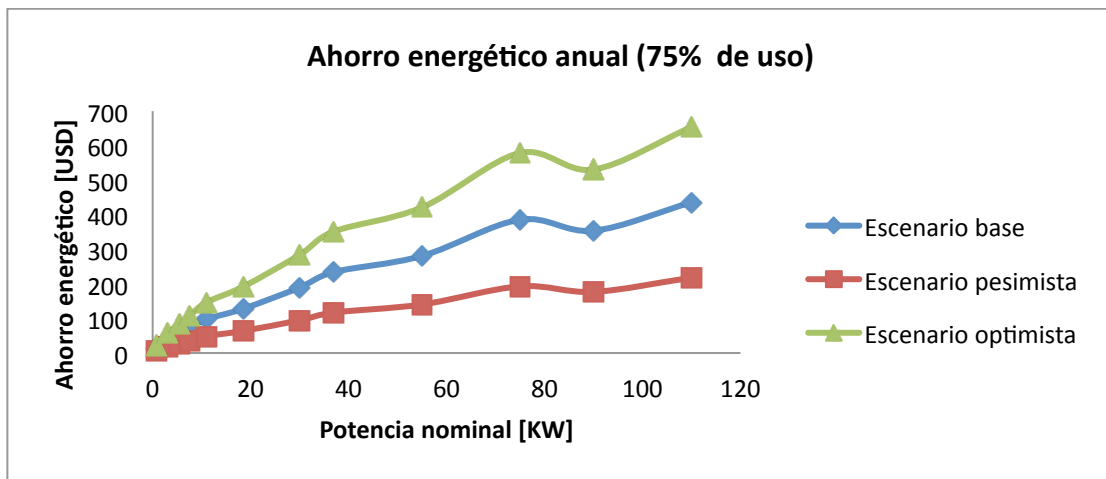


Figura 5.8: Gráfico del ahorro energético anual

5.3.3.2 Valor actual neto (VAN).

Se calculará con el fin de obtener las utilidades totales por conceptos de ahorro energético en un período determinado.

La expresión es la siguiente:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{Ahorro\ anual_t}{(1+k)^t} - \Delta Inv \quad (5.12)$$

Donde:

k = Costo de oportunidad de la empresa

t = N° de período

ΔInv = Costo motor eficiente – Costo motor estándar

Para los cálculos, se consideró una tasa de descuento del 10% y una vida útil de 5 años, que es el tiempo promedio que permanece un motor confiable sin fallar.

Resultados:

| Potencia KW | VAN (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 0,75 | -65,08 | -93,04 | -37,12 |
| 3 | 39,14 | -32,43 | 110,71 |
| 5,5 | 72,14 | -35,43 | 179,71 |
| 7,5 | 48,81 | -87,59 | 185,22 |
| 11 | 95,10 | -90,45 | 280,65 |
| 18,5 | 133,51 | -109,25 | 376,26 |
| 30 | -60,78 | -419,89 | 298,33 |
| 37 | 109,68 | -334,66 | 554,02 |
| 55 | 203,04 | -329,48 | 735,57 |
| 75 | 508,39 | -223,30 | 1240,09 |
| 90 | 347,86 | -323,07 | 1018,79 |
| 110 | 675,96 | -150,52 | 1502,44 |

Tabla 5.9: Valor actual neto de la inversión

De los resultados se desprende que para un escenario pesimista, es decir cuando la energía adquiere un precio bajo, se tiene que el valor actual neto de la inversión para todas las potencias es negativo. Esto quiere decir, que la empresa no debiera incurrir en el gasto extra de un motor eficiente, sino, elegir la alternativa de motor estándar.

Para el escenario base, o cuando el precio de la energía siga aproximadamente igual al de la actualidad (0.1 USD/kWh), se tiene que los valores actuales de la inversión son en su mayoría positivos, es decir, se debiera preferir la compra de motores eficientes. En este escenario se tienen dos valores negativos (motores de 0.75 kW y 30 kW). Para éstos casos se debiera hacer un estudio con mayor nivel de detalle, ya que podrían llegar a tener un VAN positivo, por ejemplo, si estos motores serán usados con un alto factor de carga y/o el uso anual, etc.

Con respecto al escenario optimista, se puede apreciar que 11 de 12 casos totales tienen valor actual neto positivo. Esto quiere decir que si la energía alcanza un valor de 0.15 USD/kWh, es altamente recomendable adquirir motores de alta eficiencia, en todas sus potencias. Para el caso del motor de 0,75 kW, con VAN de -37 USD, dada su cercanía al cero, se debe estudiar con un grado mayor de profundidad, ya que este valor podría ser positivo al cambiar un parámetro como la ocupación anual o el factor de carga.

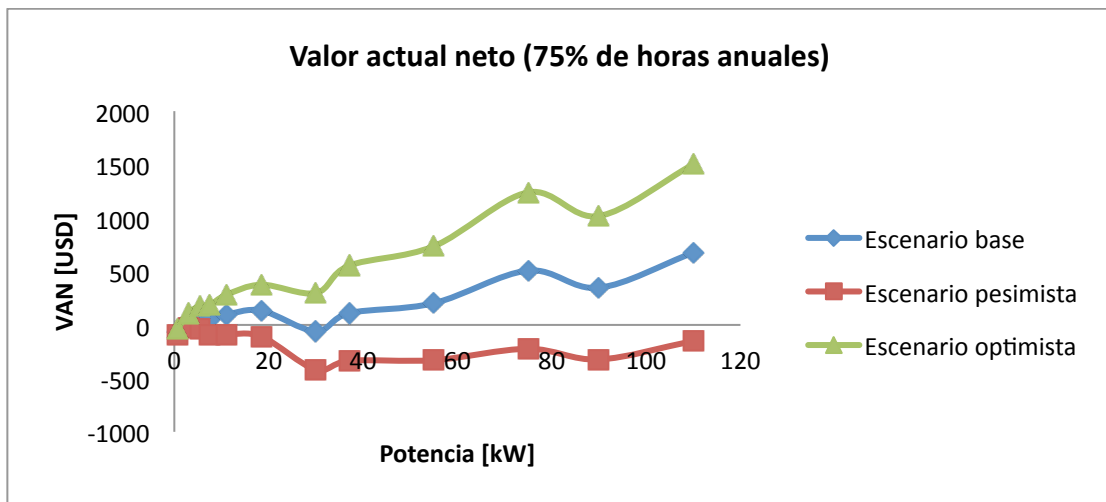


Figura 5.9: Gráficos de valor actual neto de la inversión

Hay que notar que el VAN tiene una dependencia no menor con la vida útil del proyecto. Como se dijo anteriormente, se consideró sólo los 5 primeros años de operación de los motores, puesto que esa es la cantidad promedio de tiempo que pasa un motor sin fallar. Esta cantidad de años viene a representar el peor caso, ya que si este tiempo aumenta, los ahorros energéticos se continuarían produciendo, lo que aumentaría las ganancias y por lo tanto el valor actual neto de éstas. Sobre este mismo punto hay que decir que, como se vio en el capítulo 3, en general los motores de alta eficiencia presentan menos desgaste, lo cual se relaciona con una menor cantidad de fallas respecto de los motores tradicionales, ayudando a aumentar el VAN.

5.3.3.3 Tasa interna de retorno (TIR).

Este indicador tendrá como fin entregar la tasa de interés al cual se recuperará la inversión inicial extra de un motor de alta eficiencia. Se calcula haciendo el VAN cero en la expresión anterior:

$$\sum_{t=1}^n \frac{Ahorro\ anual_t}{(1+k)^t} - \Delta Inv = 0 \quad (5.13)$$

De donde se obtiene la rentabilidad k del proyecto.

Si $TIR \geq \text{Costo de oportunidad de la empresa}$, entonces se debe preferir la compra de un motor eficiente.

En caso contrario se debe preferir el motor estándar, pues las utilidades generadas no alcanzan a cubrir los costos iniciales de buena manera.

Resultados:

| Potencia KW | TIR (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|-----------------------------|----------------|---------------|
| | Escenario | | |
| | base [%] | Pesimista [%] | Optimista [%] |
| 0,75 | -15% | no existe sol. | -3% |
| 3 | 24% | -3% | 46% |
| 5,5 | 28% | 0% | 52% |
| 7,5 | 18% | -7% | 39% |
| 11 | 23% | -4% | 45% |
| 18,5 | 24% | -3% | 46% |
| 30 | 7% | -15% | 24% |
| 37 | 15% | -9% | 35% |
| 55 | 19% | -6% | 40% |
| 75 | 29% | 0% | 54% |
| 90 | 23% | -4% | 45% |
| 110 | 34% | 4% | 61% |

Tabla 5.10: Tasa interna de retorno de la inversión

El despeje del coeficiente k de la ecuación no es posible, por lo que se utilizó la función TIR del software Microsoft Excel. Dicha función se basa en un método numérico, el cual no convergió (o existe mas de una solución) para el caso del motor de 0,75 KW, en el escenario pesimista.

En un el escenario pesimista, se pudo obtener que la tasa interna de retorno del proyecto fue negativa o a lo más cero para todas las potencias estudiadas. Esto indica que elegir motores de alta eficiencia en vez de motores estándar en un escenario en que el precio de la energía sea de 0.05 USD/kWh es una decisión incorrecta económicamente.

En el caso en que el precio de la energía se mantenga en un valor de 0.1 USD/kWh, se tiene que las TIR para todos los casos fueron positivas salvo el motor de 0,75 kW. Si se excluye este valor del análisis se encuentra que la rentabilidad promedio de todos los casos alcanza el 22%, lo cual es en general superior a la rentabilidad de los

proyectos mineros. Se puede apreciar también que la rentabilidad máxima alcanza el valor de 34% y se da en los motores de 34 kW de potencia.

En el escenario optimista se tiene un comportamiento similar al escenario base: Todas las TIR positivas salvo en el motor de 0,75 kW. Excluyendo este último valor del análisis se concluye que la tasa de rentabilidad promedio es de 44%. La mayor rentabilidad alcanza el 61% y se alcanza en los motores de 110 kW.

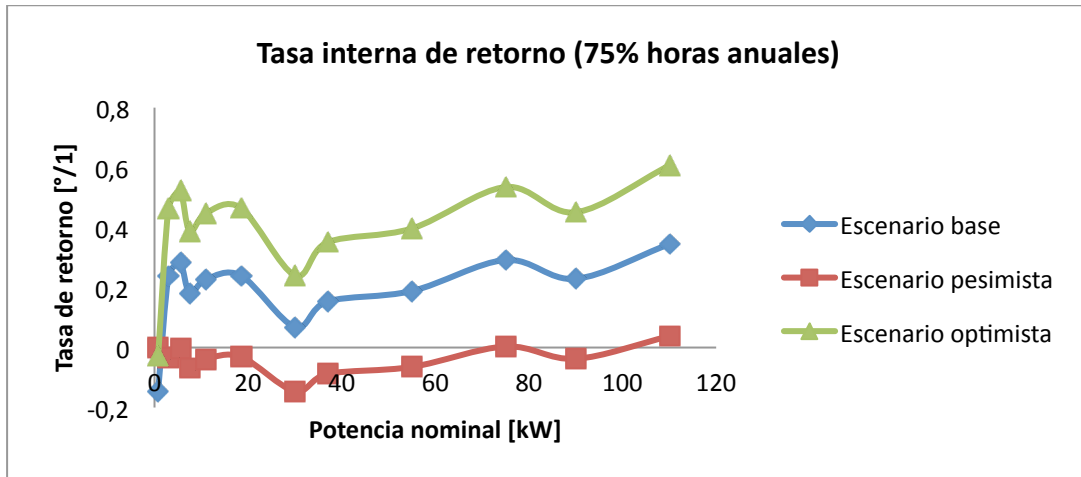


Figura 5.10: Gráfico de la tasa interna de retorno de la inversión

El indicador económico de la tasa interna de retorno sugiere que es recomendable optar por motores de alta eficiencia siempre y cuando el precio sea cercano o superior a 0,1 USD/kWh. En caso contrario, se deberá optar por motores tradicionales.

5.3.3.4 Período de recuperación de capital (PRC).

Uno de los factores económicos más importantes en la decisión de adquirir un motor eficiente o de eficiencia estándar es el período de recuperación de capital, el cual se refiere a la cantidad de tiempo en años que tiene que pasar para recuperar por completo la diferencia de inversión inicial de un motor de alta eficiencia. La expresión es la siguiente:

$$PRC = \frac{\Delta \text{Costo}}{\text{Ahorro anual}} \quad (5.14)$$

Donde:

$$\Delta \text{Costo} = \text{Costo motor alta eficiencia} - \text{Costo motor baja eficiencia}$$

Resultados:

| Potencia KW | PRC (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| | Escenario | | |
| | base [años] | Pesimista [años] | Optimista [años] |
| 0,75 | 8,2 | 16,4 | 5,5 |
| 3 | 2,8 | 5,5 | 1,8 |
| 5,5 | 2,5 | 5,0 | 1,7 |
| 7,5 | 3,1 | 6,2 | 2,1 |
| 11 | 2,8 | 5,6 | 1,9 |
| 18,5 | 2,7 | 5,5 | 1,8 |
| 30 | 4,1 | 8,2 | 2,7 |
| 37 | 3,3 | 6,6 | 2,2 |
| 55 | 3,1 | 6,1 | 2,0 |
| 75 | 2,5 | 4,9 | 1,6 |
| 90 | 2,8 | 5,6 | 1,9 |
| 110 | 2,2 | 4,5 | 1,5 |

Tabla 5.11: Período de recuperación de capital

Como en los indicadores anteriores, el caso del motor de 0,75 kW será marginado del análisis, ya que se escapa del conjunto de valores típicos.

Para el caso base, se tiene que el período de recuperación de capital ronda entre 2.2 y 4.1, con un promedio de 2.9 años. Para un proyecto con éstos costos asociados se considera que un período de recuperación de 3 años es aceptable.

En un escenario optimista, es decir con un elevado precio de la energía, el período de recuperación promedio se reduce a 1.9 años, con un máximo para el caso de 30 kW de 2.7 años, lo cual sigue siendo aceptable.

Cuando el precio de la energía baja hasta los 0.05 USD/kWh, la situación ya no es tan conveniente, ya que el período de recuperación promedio es aproximadamente de 5.8 años. El máximo período, para el caso del motor de 30 kW, alcanza los 8.2 años, lo cual es excesivo para proyectos de este tipo.

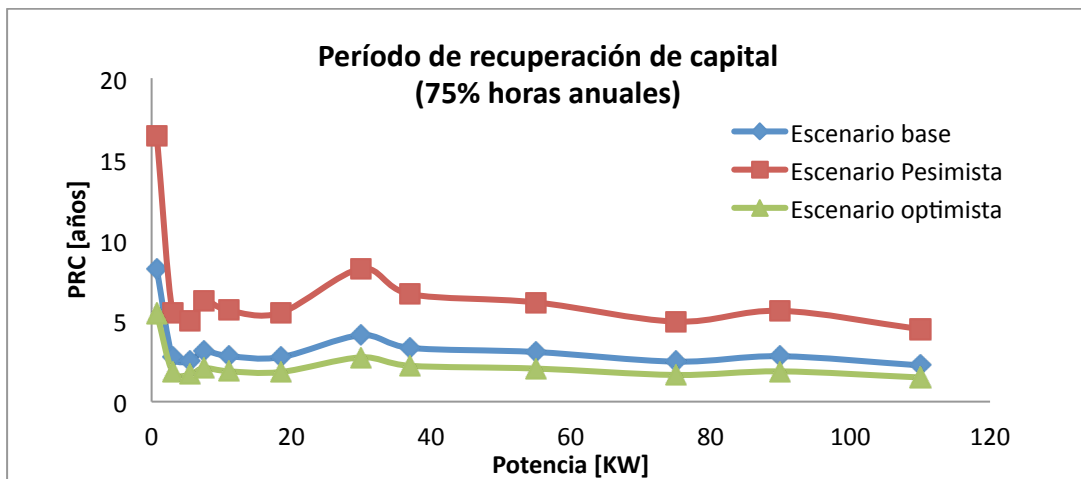


Figura 5.11: Gráfico del período de recuperación de la inversión

Basándose en el criterio de 3 años como período de recuperación de capital máximo aceptable, se tiene que la inversión en motores eficientes en vez de motores estándar, se hace conveniente cuando el precio de la energía se mantiene en el precio actual o superior, es decir, por sobre los 0.1 USD/kWh. Si la energía baja de este valor límite, en general, la inversión en este tipo de motores ya no será conveniente en las condiciones descritas.

Hay que notar que este último caso podría ser igualmente conveniente, dependiendo del criterio de los inversionistas a cargo del proyecto, por lo que no es recomendable descartar de plano la inversión en motores eficientes con un precio bajo de la energía, sino que estudiar con mayor detalle esta opción.

5.4 Conclusiones del capítulo

En el presente capítulo se realizó un estudio económico de la aplicación de motores de alta eficiencia energética comparados con los de mas baja eficiencia.

Con el objetivo de darle mayor precisión al estudio, se consideraron las condiciones típicas de operación de las faenas mineras, las cuales influyen directamente en la eficiencia de las máquinas, llegando incluso a variar en algunos puntos porcentuales, lo cual es muy significativo en términos de gasto energético anual.

En la búsqueda de ofertas de mercado se pudo concluir que todas las marcas de mayor prestigio del rubro ofrecen líneas de eficiencia energética. De éstas marcas se seleccionaron tres, a las cuales se le calcularon los indicadores económicos mas importantes y decisivos a la hora de hacer la compra de un motor.

Con respecto de los resultados de estos indicadores calculados, se puede decir que, considerando una situación normal de ocupación del motor, es decir que se use alrededor del 75% de las horas anuales, con un factor de carga de 0.75, al tener un precio de la energía de normal a alto, es decir de 0.1 USD/kWh o superior, los indicadores económicos sugieren que es conveniente hacer una inversión inicial extra y adquirir motores energéticamente eficientes, ya que dicha inversión será recuperada en el corto plazo. Por el contrario, cuando la energía baja de dicho precio, la compra de motores eficientes ya no es tan clara, y se debe estudiar con mayor detención esta decisión. En particular, con un precio de 0.05 USD/kWh, con las condiciones de carga y ocupación puestas en el problema, los indicadores apuntan a que hacer el gasto extra en motores eficientes no sería económicamente conveniente, ya que la ganancia en ahorros energéticos anuales en la operación no generaría las suficientes ganancias para cubrir la inversión extra inicial.

Es necesario decir también que si bien en el problema se ocupó la hipótesis de un factor de ocupación del 75%, existen muchos motores en la industria que no llegan a ese factor, y que se ocupan sólo en algunas ocasiones (ej. Motores stand-by). En dicho caso, los indicadores mostrarían la no conveniencia económica de motores energéticamente eficientes, en cuyo caso se aconseja la elección de un motor normal.

6 Aplicación de caso de estudio

En el presente capítulo se hará un estudio de los conceptos económicos vistos previamente. Se analizarán las ganancias producidas al reemplazar los motores correspondientes de clase IE2 por IE3. También se calcularán las disminuciones de gases de efecto invernadero al considerar tal opción.

6.1 Descripción del proyecto

El proyecto a analizar consiste en la explotación y beneficio de un yacimiento de cobre, ubicado en las cercanías del pueblo del mismo nombre en la III Región de Chile.

El proceso productivo de una faena minera, en general y en particular de este proyecto, se puede separar en tres grandes etapas, las cuales se describen a continuación:

6.1.1 Proceso productivo

- Planta de chancado

El mineral extraído se transporta en camiones de gran capacidad a una tolva de alimentación del chancador primario, a una tasa de aproximadamente 50 mil toneladas por día. Este mineral de alta ley alimenta a un chancador primario giratorio.

El material que sale desde este chancador es enviado a los chancadores secundarios, desde donde, a través de cintas transportadoras, se envía hacia el área de *stock pile*, para luego pasar al área de pre-harneoado y chancador terciario. Desde aquí, de acuerdo a su tamaño o granulometría, se selecciona el material que será derivado a pilas de lixiviación o al proceso de flotación.

- Flotación y relaves

El material fino de bajo tamaño es enviado a las celdas de flotación, donde se mezcla con agua, cal, colectores y espumantes. Esta mezcla se agita y produce burbujas que llevan a la superficie las partículas de cobre adheridas a ellas; para luego pasar a los

espesadores y por un filtro que extrae el exceso de humedad, constituyéndose en concentrado de cobre.

El material que queda de este proceso (cola o relaves) se transporta por gravedad a través de una tubería hasta el depósito de relaves, donde se produce la evaporación de agua, quedando finalmente sólo material sólido.

- Apilado y lixiviación

El mineral chancado se envía por correas transportadoras hacia el área de apilamiento, donde es depositado en una pila, para luego ser irrigado por goteo con una solución de ácido sulfúrico. Posteriormente, la solución ácida es percolada. El cobre de los minerales sulfurados se recupera por lixiviación bioquímica, utilizando bacterias naturales del mineral. La solución obtenida se lleva a una piscina (PLS) y de allí, por gravedad, hasta la planta de extracción por solventes. Una vez lixiviado el material, se retira de la pila mediante un sistema de roto-pala y es depositado en el área de pilas de ripios, donde permanecerá hasta el cierre de la faena.

- Extracción por solventes (SX) y electro-obtención

En esta etapa del proceso, y luego de pasar por tanques y filtros, el cobre es transferido desde el área de lixiviación a una solución purificada denominada electrolito, que luego pasa a la etapa siguiente de electro-obtención. El electrolito es cargado en celdas de la planta de electro-obtención, donde la corriente eléctrica que circula entre las placas de ánodos y cátodos induce al cobre a depositarse en los cátodos, obteniéndose cobre de alta pureza. Una vez fuera de la planta, los cátodos son transportados vía terrestre hacia un puerto cercano, desde donde son enviados a los destinos finales correspondientes.

6.1.2 Equipos instalados

La lista general de equipos cuenta con un total de 331 equipos, de los cuales 55 equipos son de condición Stand-by (que entran en operación sólo en condiciones especiales), es decir, se tienen 276 equipos que están operando en régimen normal de la planta.

Con respecto a la potencia instalada de los equipos no stand-by, es decir, los que operan en régimen normal, se pueden separar entre motores y otros equipos. La potencia instalada de todos los motores instalados en la planta alcanza los 19796 kW, es decir, casi 20 MW, frente a los 51 MW que representa la potencia total instalada de la planta. Esto representa un 38% del total, es decir que casi el 40% de la potencia disponible en la operación minera, se destina a energía mecánica necesaria ya sea para transporte de fluidos, transporte de sólido, molienda, etc.

| Equipos | Potencia [KW] |
|------------------|---------------|
| Motores >200 HP | 17061 |
| Motores <=200 HP | 2708 |
| Otros | 31657 |
| Total | 51426 |

Tabla 6.1: Descripción de potencia instalada

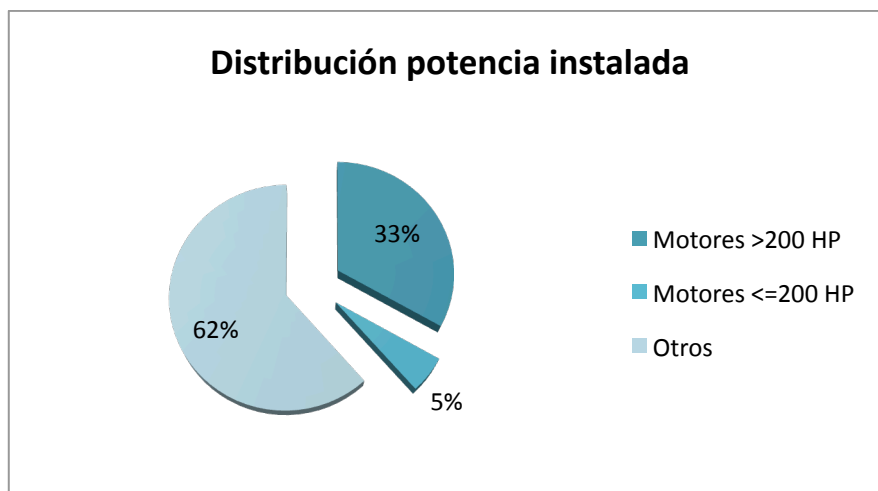


Figura 6.1: Gráfico de potencia instalada

El proyecto en total presenta 166 motores, los cuales como se dijo, representan cerca de 20 MW de potencia instalada. Si bien la potencia instalada de los motores de baja tensión representa sólo el 14 % de la potencia total de los motores, se tiene que el mayor número se encuentra en este rango, superando a los otros rangos con creces.

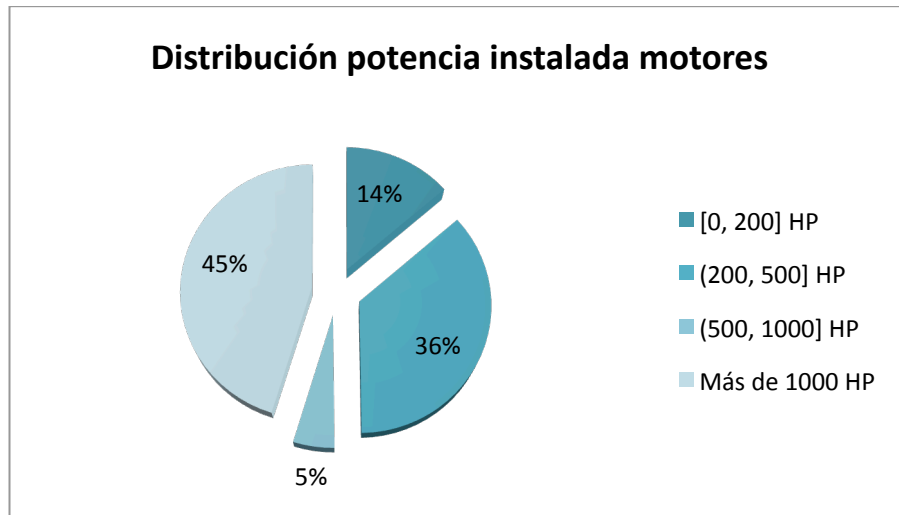


Figura 6.2: Gráfico de distribución de potencia instalada en motores

| Motores | cantidad | P instalada KW |
|----------------|-----------------|-----------------------|
| [0, 200] | 121 | 2708 |
| (200, 500] | 35 | 7139 |
| (500, 1000] | 2 | 969.8 |
| Más de 1000 | 8 | 8952 |
| Total | 166 | 19769.02 |

Tabla 6.2: Detalle de motores instalados (cantidad y potencia)

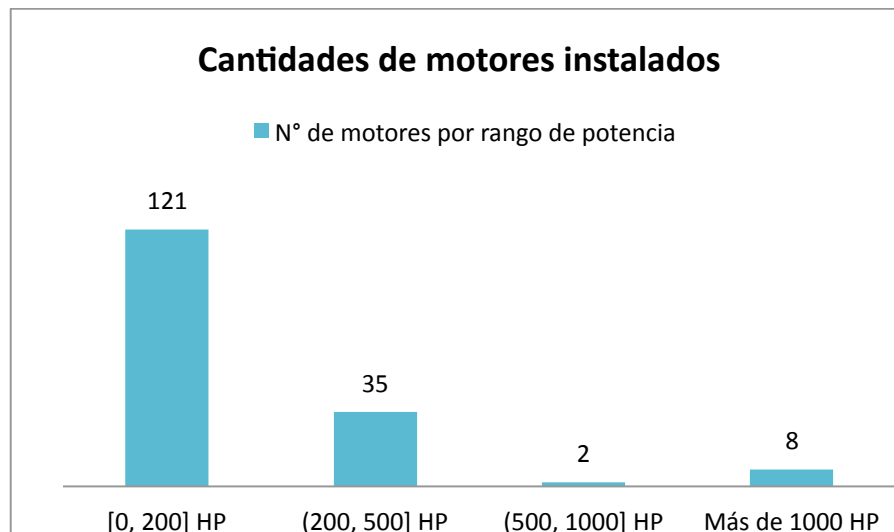


Figura 6.3: Gráfico de cantidad de motores instalados

6.2 Selección de motores a estudiar

Como se ha dicho anteriormente, generalmente los fabricantes de motores ofrecen motores de propósito general de alta eficiencia sólo hasta los 200 HP de potencia. Para potencias superiores no se hace diferencia, ya que como en estos casos la cantidad de energía involucrada es alta, se hace necesario ocupar motores de alta eficiencia, razón por la cual, las empresas no ofrecen motores de baja eficiencia. Es por esta razón, que el ahorro de energía se hace posible en el rango de potencia de motores de hasta 200 HP.

La metodología del estudio del presente capítulo es la siguiente:

Se tomará la lista general de equipos del proyecto y se seleccionarán sólo aquellos motores de potencias menores o iguales a 200 HP. Se reemplazarán dichos motores con motores de eficiencia IE2 e IE3, de la marca US MOTORS que cumplan con los requerimientos de uso, es decir, de baja tensión, de tipo TEFC, 4 polos, etc. Con los datos de catálogo de estos motores, disponibles en el anexo del presente documento, se calcularán tanto el consumo de energía, como el gasto en dinero por éste concepto, así como los ahorros posibles al ocupar motores IE3 en vez de IE2.

6.2.1 Caracterización de uso

6.2.1.1 Clasificación según factor de carga y de uso

Aparte de la eficiencia de los motores en operación, existen otros dos factores importantes en el cálculo de energía requerida por éstos: el factor de consumo (también llamado factor de carga) y el factor de utilización. El primero se refiere a la relación entre la carga a la cual estará operando generalmente el motor, con respecto a la potencia nominal para la cual está diseñado el mismo. El segundo indica el porcentaje de tiempo que el motor estará operativo durante un tiempo determinado, habitualmente un año.

Los factores que aplican al proyecto, en particular a los motores estudiados son los siguientes:

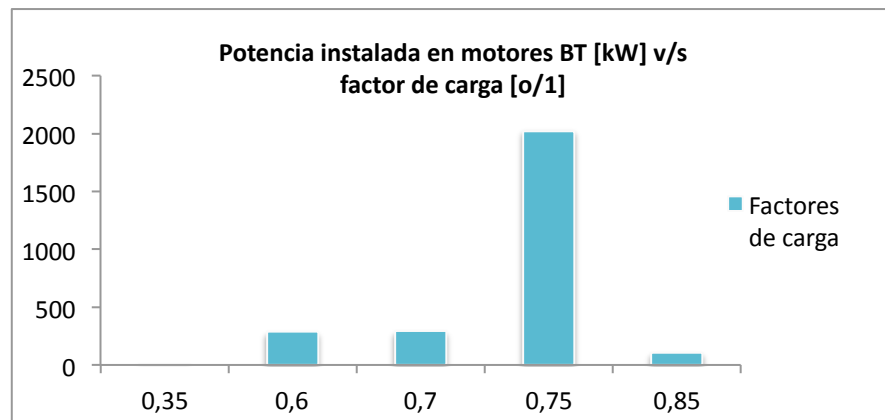


Figura 6.4: Factores de carga de los motores de baja tensión instalados

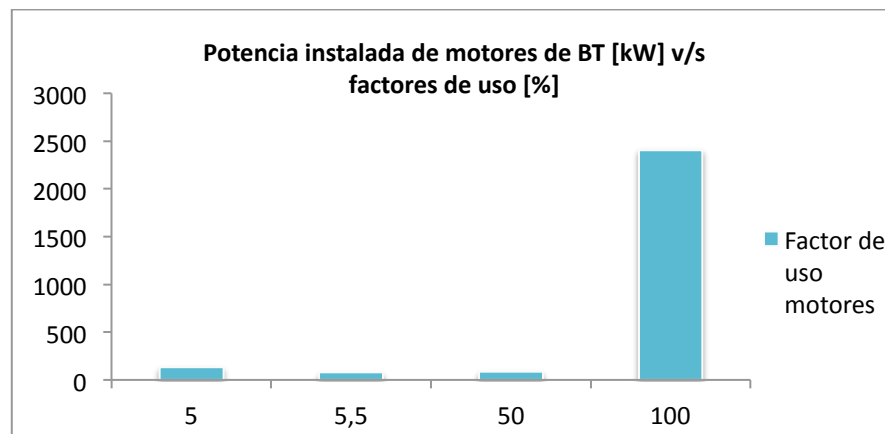


Figura 6.5: Factores de uso de los motores de baja tensión instalados

De los gráficos anteriores se puede observar que los motores en general se compran muy sobredimensionados, operando la mayor parte del tiempo al 75% de la carga para la cual están diseñados. Es por esta razón, que se ocuparán los datos de catálogo al 75% de la carga nominal, acercándose de esta manera lo más posible al comportamiento que tendrán en la práctica.

6.2.1.2 Clasificación según equipo asociado

En el caso de optar por seleccionar sólo parte de los equipos para la instalación de motores de eficiencia premium, es útil identificar cuáles son los que tienen mayor uso, es decir, cual tipo de equipo tiene mayor potencia instalada en la faena minera.

En particular, en este proyecto los dos equipos con mayor potencia instalada son las bombas y las correas, las primeras con 1118 kW y las segundas con 590 kW, lo cual representan un 41% y 22% respectivamente, del total de potencia instalada en motores de baja tensión.

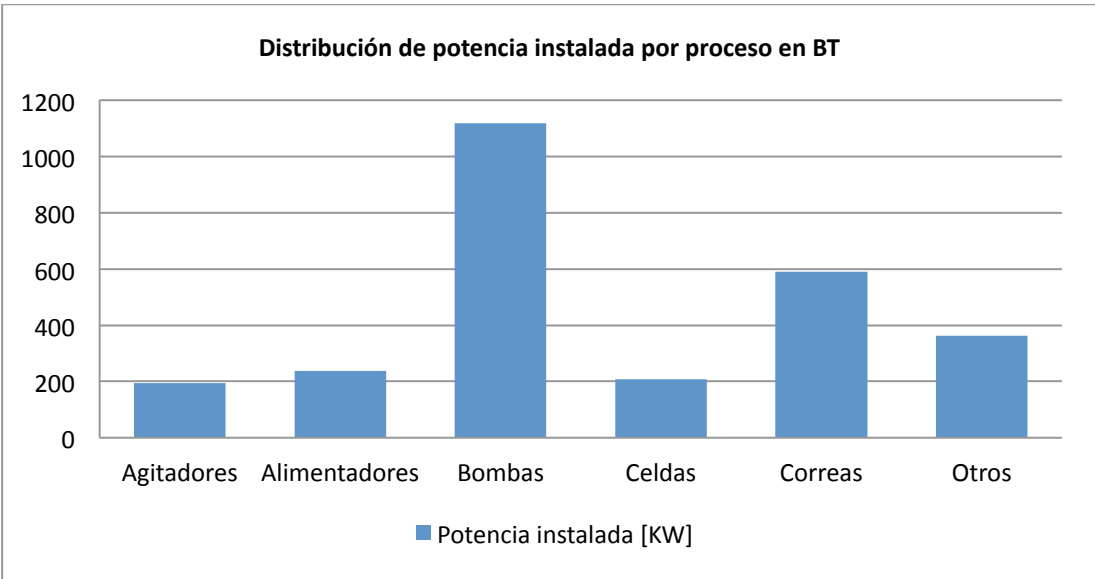


Figura 6.6: Gráfico de cantidad de potencia instalada por proceso productivo en sólo motores de baja tensión

| Equipos | Potencia [KW] |
|---------------|---------------|
| Agitadores | 193.214 |
| Alimentadores | 236.855 |
| Bombas | 1117.508 |
| Celdas | 208.88 |
| Correas | 589.713 |
| Otros | 362.183 |

Tabla 6.3: Cantidad de potencia instalada por proceso productivo en motores de baja tensión

La tendencia anterior es extrapolable a cualquier operación minera de éstas características, ya que ambos equipos están encargados de transportar grandes cantidades de sólidos o líquidos, lo cual requiere una gran cantidad de potencia mecánica.

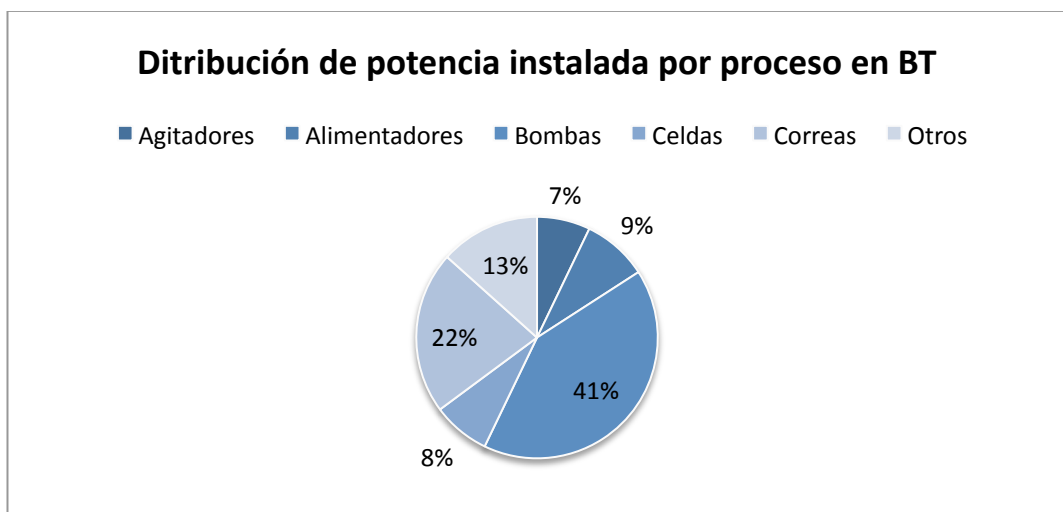


Figura 6.7: Gráfico de distribución de potencia instalada por proceso productivo en motores de baja tensión

6.3 Análisis económico

El objetivo general de este capítulo es obtener las ganancias en la operación al ocupar motores de eficiencia energética premium, en vez de otro de eficiencia más baja. Para ello, se evaluará la energía consumida en un año, ocupando motores de eficiencia IE2 (alta eficiencia) y posteriormente con motores de eficiencia IE3 (eficiencia Premium).

No se considerarán en el estudio motores de eficiencia IE1, ya que la mayoría de los fabricantes o no ofrecen esta línea o están a poco tiempo de quitarla del mercado, estableciendo los motores de clase IE2 como los de peor eficiencia.

Claramente, la potencia eléctrica consumida en un motor, en función de su potencia nominal (mecánica) es la siguiente:

$$P_{consumida} = \frac{fc * P_{nom}}{\eta} \quad (6.1)$$

Donde: fc : Factor de carga

η : Eficiencia

De esta forma, la potencia reactiva de entrada al motor está dada por la siguiente expresión:

$$Q_{consumida} = P_{consumida} * tg(\arccos(fp)) \quad (6.2)$$

Donde: fp : Factor de potencia

A partir de estos conceptos se definirán dos cantidades: GAE (gasto anual energético) y CAO (Costo anual energético). Las expresiones son las siguientes:

$$GAE = 8760 * f_{uso} * P_{consumida} \quad (6.3)$$

$$CAO = GAE * Precio_{energía} \quad (6.4)$$

Como se puede ver, el costo anual que incurrirá la compañía por conceptos de energía eléctrica depende en gran medida del precio de la energía. Es por esto, que al igual que el capítulo 4 del presente documento, se harán los cálculos respectivos para tres valores de energía: Un precio igual al actual (0.1 USD/kWh), un precio elevado (0.15 USD/kWh) y un precio bajo (0.05 USD/kWh).

Análisis de resultados:

Una vez calculadas las potencias reales de consumo de todos los motores de baja tensión menores a 200 HP, cumpliendo con los requerimientos de factores de carga y de uso, se tienen los siguientes resultados:

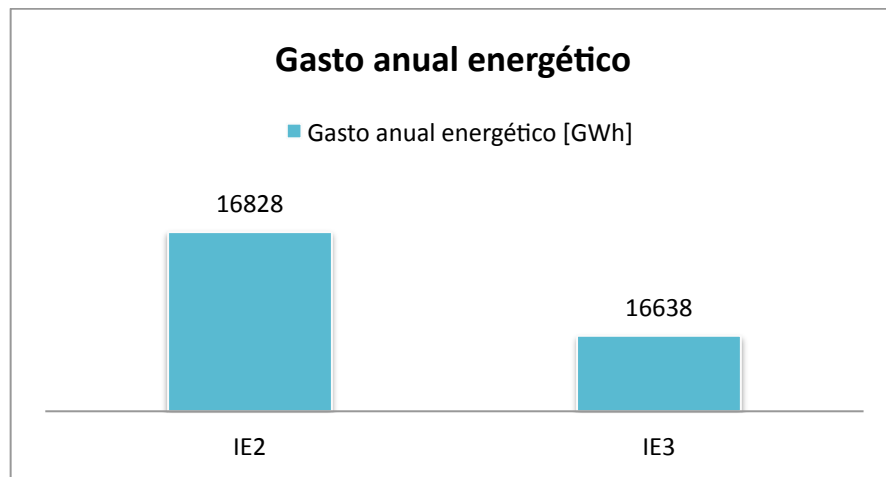


Figura 6.8: Gráfico de gasto energético anual según tipos de motores

Se puede ver que al ocupar motores de eficiencia premium en vez de motores de alta eficiencia, se tiene una disminución de la energía total consumida en el año que alcanza los 190 GWh en el año.

Dicha diferencia en consumo, se puede traducir en dinero ahorrado, conociendo el precio de la energía. Como el precio de la energía a futuro es incierto, se supondrán los mismos tres precios de energía establecidos en el capítulo anterior. Los ahorros en dinero (dólares americanos) se pueden ver en la siguiente gráfica:

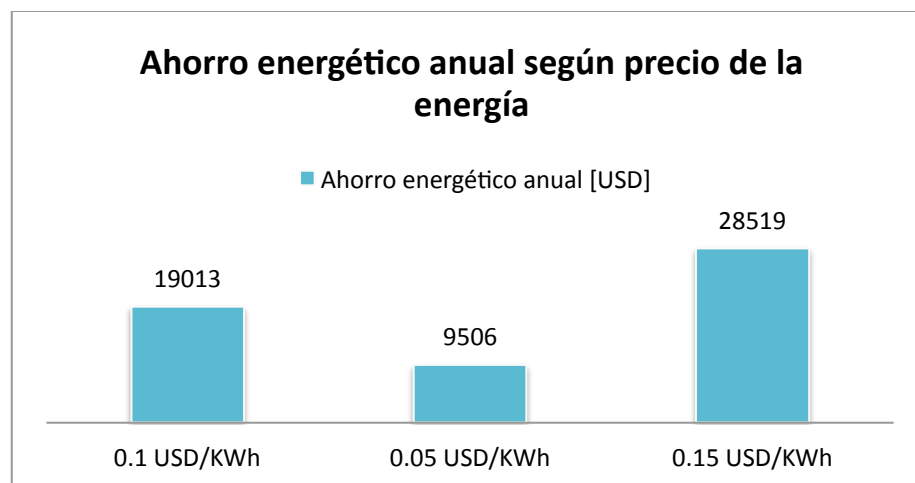


Figura 6.9: Gráfico ahorro energético anual según escenarios posibles

En el peor caso, es decir cuando se tiene un bajo precio de la energía, se tienen ganancias que se acercan a los USD 10.000. Para un valor medio de la energía, es decir 0.1 USD/kWh, los ahorros por conceptos energéticos llegan a los 19.000 USD.

En el mejor caso, cuando se tiene un alto precio de energía, los ahorros energéticos se disparan, alcanzando los 29.000 USD anuales.

Otro punto importante a mencionar es el cambio en consumo de reactivos del sistema. Esto es, ya que si se tiene un gran aumento de la potencia reactiva, el factor de potencia empeorará, lo cual podría tener como consecuencia una multa por parte de la empresa distribuidora o un posible aumento de capacidad del banco de condensadores de la planta minera, lo cual representaría un costo importante.

En el caso de este proyecto, se tiene que el consumo de reactivos totales para motores de baja tensión IE2, funcionando simultáneamente con sus respectivos factores de carga es de 1314 kVAr, mientras que para los motores IE3 llega a un valor de 1249 kVAr. Éstos valores muestran que no existen mayores diferencias respecto al consumo de reactivos de ambos tipos de motores.

Reducción de emisiones.

En la actualidad, para muchas compañías es muy importante darle valor agregado al proceso de producción de un cierto bien. Un pilar fundamental de esto es disminuir su impacto en el medio ambiente y en particular disminuir su huella de carbono. Esto último también puede tener repercusiones económicas, ya que últimamente existe la tendencia de las empresas extranjeras a comprar productos que tengan baja huella de carbono.

Según un estudio del año 2009, "Consumo de energía y gases de efecto invernadero asociadas de la minería del cobre de Chile", en el sistema interconectado del norte grande SING, la emisión de este tipo de gases por concepto de generación alcanza los 911,9 toneladas de CO₂/GWh, mientras que en el sistema interconectado central llega a los 284 toneladas de CO₂/GWh.

Como se vio anteriormente, la sustitución de motores de clase de eficiencia IE2 por IE3 genera un ahorro energético anual de 190 GWh. Con este dato, y considerando que el proyecto se encuentra en el SIC, se logra una disminución de las emisiones que alcanza las 53.960 toneladas de CO₂.

Si este mismo proyecto se localizara en el SING, la disminución de emisiones llegaría a las 173.261 toneladas de CO₂, cifra claramente superior por el hecho de que la generación en el sistema de norte es casi completamente térmica basada en el carbón, a diferencia de gran cantidad de generación hidráulica del sistema interconectado central.

Sin bien esta disminución de emisiones no genera una utilidad económica directa, la huella de carbono del proceso productivo baja en una cantidad importante, lo cual podría tomar mas importancia en un futuro cercano.

6.4 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se aplicaron los conceptos económicos en un proyecto real, para evaluar el reemplazo de motores de baja tensión de potencias menores a 200 HP, 1500 RPM, de clase IE2 por sus análogos de eficiencia premium o IE3.

El análisis de los equipos de este proyecto tuvo como conclusión que cerca del 40% de la energía eléctrica consumida por la planta es destinada a motores. De esa cantidad, cerca del 15% la consumen los motores de interés para este estudio: los de baja tensión menores a 200 HP.

En términos de cantidad se pudo concluir que 121 motores corresponden a este tipo, sobre un total de 166, lo cual representa un 73%. Dichos motores son ocupados mayoritariamente para sistemas de impulsión de agua (bombas) y transporte de material sólido (correas transportadoras) con un 41% y 22 % respectivamente.

Al elegir la alternativa de los motores IE3, se tiene que el gasto energético anual baja de 16.828 GWh a 16.638 GWh, alcanzando una diferencia de 190 GWh. Dicha diferencia en dinero depende directamente del precio de la energía, sin embargo en un caso pesimista toma el valor de USD 9.506, mientras que en el mejor caso podría llegar a ser USD 28.519. En el caso que el precio de la energía siga como en la actualidad, se tendría un ahorro anual de USD19.013.

Con respecto de la potencia reactiva se puede decir que no se obtuvieron grandes cambios, por lo que no es necesario incurrir en gastos extras como bancos de condensadores adicionales.

Una última ventaja desprendida del uso de motores de eficiencia premium se da en la reducción de gases de efecto invernadero. Dicha reducción alcanzaría en este caso las 53906 toneladas de CO2 anuales, lo cual significa una mejora en la huella de carbono del producto cobre, concepto que está tomando un factor importante en la actualidad.

7 Conclusiones

El presente trabajo de título tuvo por objetivo realizar un estudio lo mas acabado posible de la aplicación de motores energéticamente eficientes en la industria minera. Considerando esto, se desarrolló en primer lugar una detallada comparación técnica, para clarificar las dudas existentes en términos del comportamiento en planta de este tipo de motores. Posteriormente se realizó una revisión de las ofertas disponibles actualmente en el mercado de motores, para con estos datos, realizar una evaluación económica, que incluye el cálculo de indicadores económicos importantes que permitan a la empresa realizar una decisión de compra informada, y evitando así que se deje llevar por el aparente mayor costo. Por último se aplicaron estos conocimientos a un proyecto minero de explotación real, por lo que se tuvo un acercamiento mas certero de las ventajas que presentan este tipo de motores. Dicho esto se puede concluir que se ha cumplido el objetivo inicial. Los resultados del presente estudio se puede enunciar como sigue:

Con respecto del estudio de antecedentes del tema, se pudo concluir que la mayor cantidad de pérdidas de los motores de inducción se producen en los enrollados y son del tipo I2R. Es por este motivo que los diseños de motores eficientes se basan en disminuir pérdidas en este punto, incorporando conductores eléctricos con menos pérdidas. Las pérdidas en el fierro también juegan un papel importante, por lo que los fabricantes de este tipo de motores procuran usar aceros de gran calidad para la construcción del núcleo.

En el aspecto normativo, se pudo investigar que una nueva normativa está entrando en vigencia, definida en el estándar IEC 60034-30:2008, el cual define nuevas clases de eficiencia (IE1, IE2, IE3 y próximamente IE4) y nuevas metodologías para la medición de la eficiencia. Dicha normativa trae como consecuencia que los fabricantes europeos eliminarán de la venta los motores de mas baja eficiencia o IE1.

En la comparación técnica de ambos tipos de motores, se pudo concluir que no se presentan mayores inconvenientes técnicos en cuanto a la operación se trata,

teniendo un comportamiento muy similar a los motores tradicionales, manteniendo los valores típicos de torque nominal, torque máximo, corriente nominal, etc.

No obstante lo anterior, una diferencia notada es la velocidad nominal, la cual en todos los casos estudiados excedió la velocidad de los motores de mas baja eficiencia. Dicha diferencia no afectaría mayormente la operación de la máquina, sin embargo es recomendable estudiar con mayor detención las aplicaciones de movimiento de fluido (torque cuadrático), en las cuales la ganancia en términos de ahorro energético podría verse mermada por una mayor potencia desarrollada en el eje.

Otra diferencia con respecto al comportamiento se da en la corriente de partida, la cual es levemente superior en los motores mas eficientes. Si bien esto no debería ser un problema, se recomienda verificar si la protección asociada al motor es la adecuada para soportar una corriente de partida superior, de manera tal de evitar cortes de energía y disparos intempestivos.

En la búsqueda de ofertas de mercado se pudo concluir que todas las marcas de mayor importancia del rubro, ofrecen líneas de eficiencia energética. De éstas marcas se seleccionaron tres, a las cuales se le calcularon los indicadores económicos mas importantes y decisivos a la hora de hacer la compra de un motor.

Con respecto a los resultados de éstos indicadores calculados, se puede decir que considerando una situación normal de ocupación del motor, es decir que se use alrededor del 75% de las horas anuales, con un factor de carga de 0.75, al tener un precio de la energía de normal a alto, es decir de 0.1 USD/kWh o superior, los indicadores económicos sugieren que es conveniente hacer una inversión inicial extra y adquirir motores energéticamente eficientes, ya que dicha inversión será recuperada en el corto plazo. Por el contrario, cuando la energía baja de dicho precio, la compra de motores eficientes ya no es tan clara, y se debe estudiar con mayor detención esta decisión. En particular, con un precio de 0.05 USD/KWh, con las condiciones de carga y ocupación puestas en el problema, los indicadores apuntan a que hacer el gasto extra en motores eficientes no sería económicamente viable, ya que la ganancia en ahorros energéticos anuales en la operación no generaría las suficientes ganancias

para cubrir la inversión extra inicial. Dicha conclusión podría cambiar relajando algunas condiciones del problema, como factor de uso, factor de carga, etc.

También es necesario decir que existen en la industria una cantidad no menor de motores que son ocupados con un bajo factor de uso (ej. motores stand-by). Para dichos equipos no se recomienda la elección de un motor eficiente, ya que los ahorros generados tampoco serían suficientes para cubrir los gastos de inversión inicial en un tiempo aceptable.

Por último, del estudio del proyecto real se puede concluir que al elegir la alternativa de los motores IE3, se tiene que el gasto energético anual baja de 16.828 GWh a 16.638 GWh, alcanzando una diferencia de 190 GWh en el año. Dicha diferencia en dinero depende directamente del precio de la energía, sin embargo en un caso pesimista toma el valor de USD 9.506, mientras que en el mejor caso podría llegar a ser USD 28.519. En el caso que el precio de la energía siga como en la actualidad, se tendría un ahorro anual de USD 19.013.

Siguiendo en este punto, una última ventaja del uso de motores de eficiencia premium se da en la disminución de gases de efecto invernadero. Dicha reducción alcanzaría en este caso las 53.906 toneladas de CO₂ anuales, lo cual significa una mejora en la huella de carbono del producto cobre, concepto que está tomando un factor importante en la actualidad.

Bibliografía

- [1] Programa de Estudios e Investigaciones en Energía (PRIEN), *Estimación del potencial de ahorro de energía, mediante mejoramientos de la eficiencia energética de los distintos sectores*: 2008.
- [2] Ana María Ruz, Cristhian Becker, *Diseño de un subsidio para cambiar motores estándar por eficientes de potencias entre 5 HP a 50 HP*: 2008
- [3] Embajadas de Chile y Reino Unido, *Enfrentando el desafío – Cambio global y energía*: 2010.
- [4] Peer review on energy efficiency (PREE), *Energy efficiency in Chile*: 2009.
- [5] Comisión de ahorro energético empresarial AIE, *Informe de campaña Ahorra ahorra del gobierno de Chile, comisión nacional de energía*: 2008.
- [6] Programa Chile Sustentable, *Las fuentes renovables de energía y el uso eficiente*: 2002.
- [7] Mesa minera de eficiencia energética, *Memoria mesa minera de eficiencia energética 2006-2007*: 2006.
- [8] Ali Emadi, *Energy-Efficient Electric Motors*: Marcel Dekker, 2005.
- [9] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., Stephen D. Umans. *Electric Machinery*: Mc Graw Hill, 2002.
- [10] Roelof Timmer, Mikko Helinko, Ritva Eskola. *Eficiencia de motores: Optimización del rendimiento durante la vida útil de los motores*: Revista ABB, 2007.
- [11] Cip Tiravanti, *Eficiencia energética en motores eléctricos*: Artículo empresa de ingeniería Stilar, 2008.
- [12] Y. Del Valle, J. Romo, L. Vargas, *Apunte de conversión electromecánica de la energía*: 2003.
- [13] Siemens motors, *Low-voltage induction motors according to the new efficiency standard and new efficiency clases*: Publicación Siemens, 2010.
- [14] Rockwell Automation, *Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos – Motor Management*: Publicación Rockwell, 1997.
- [15] A. Muñoz, *Normas sobre niveles de eficiencia de motores eléctricos*, Santiago, 2006.

- [16] ABB, *Low voltage Process performance motors EN 04-2010; ABB LV Motors*: Publicación ABB, 2010.
- [17] General Electric Energy, *Standard motors product catalog*: GE Energy, 2010.
- [18] Lureye, *Catálogo soluciones industriales Lureye*: Lureye S.A.: 2010.
- [19] A. Muñoz, *Modelo de máquinas de inducción en condiciones transitorias y de régimen permanente*: 2007.
- [20] George Stefopoulos, *Numerical parameter estimation procedure for three phase induction motor models*: Revista Power-Tech, 2007.
- [21] V. Pappano, S. E. Lyshevski, B. Friedland, *Identification of induction motor parameters*: Proceedings of the 37th IEE Conference on Decision & Control, 1998.
- [22] Austin Bonnet, *Quality and reliability of energy-efficient motors*: IEEE Industry Applications Magazine, 1997.
- [23] J. Pedra, *On the determination of induction motor parameters from manufacturer data for electromagnetic transient programs*: IEEE Transactions on Power System, Vol. 23, 2008.
- [24] A. Zabardast, and H. Mokhatari, *Effect of high-efficient electric motor son efficiency improvement and electric energy saving*: A. Zabardast, and H. Mokhatari: International conference Deregulation and Restructuring and Power Technology, 2008.
- [25] N. Veiga, J. Palma, J. Santana, *Induction motor parameters identification from bench tests using a Newton-Raphson method*: Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines, 2008.
- [26] Emerson Motors, *Full Line Standard Motor Products Catalog FL600*: Publicación Emerson motors: 2010.
- [27] Siemens motors, *AC motors selection guide and Pricing guide 2009-2010*: Publicación Siemens motors: 2009.
- [28] Comisión nacional de energía, *Informe CNE - Datos históricos de precios de nudo sistemas eléctricos chilenos*: 2011.
- [29] General Electric, *Standard motors product catalog – Application guide*: Publicación GE Energy: 2010.

- [30] Centro de promoción de usos del cobre Pro-Cobre, *Anexo A de manual de usuario de software Evamotor*": 2006.
- [31] Comisión chilena del cobre Cochilco, *Consumo de energía y emisión de gases de efecto invernadero asociadas a la minería del cobre en Chile*: 2009.

Anexos

A. Comparación de datos de motores de eficiencia IE3 e IE2 obtenidos de fabricante General Electric

A continuación se muestran los datos obtenidos para los motores de baja tensión marca General Electric. El análisis de dichos datos se muestra en el desarrollo del capítulo 4.

| Motores IE3 | | | | | | | | | | |
|-------------|---------------|------------|------|------|----------------|-----------|----------|-------|-----------|-----------|
| Potencia | Velocidad nom | Eficiencia | | | Factor de pot. | Corriente | | | Torque | |
| KW | RPM | 100% | 75% | 50% | cos(phi) | In | lpart/In | Tn | Trbloq/Tn | Tbreak/Tn |
| 0,55 | 1435 | 82,9 | 85,2 | 84 | 79 | 1,2 | 6,7 | 3,7 | 3 | 3,6 |
| 0,75 | 1425 | 84 | 86,6 | 86,4 | 83 | 1,6 | 6,4 | 5 | 2,8 | 3,3 |
| 1,1 | 1425 | 85,3 | 87,1 | 87,1 | 83 | 2,2 | 6,7 | 7,4 | 3 | 3,4 |
| 1,5 | 1435 | 85,8 | 86,4 | 85,4 | 75 | 3,4 | 7,5 | 10 | 3,9 | 4,3 |
| 2,2 | 1465 | 87,5 | 90,1 | 89,4 | 77 | 4,7 | 6,8 | 14,3 | 2,4 | 3,2 |
| 3 | 1460 | 88,4 | 89,4 | 88,5 | 74,5 | 6,6 | 6,7 | 19,6 | 2,5 | 3,2 |
| 3,7 | 1455 | 89,2 | 90,5 | 90,3 | 79 | 7,6 | 6,7 | 24,2 | 2,4 | 3,0 |
| 4 | 1455 | 89,2 | 90,3 | 90,2 | 78,5 | 8,2 | 6,5 | 26,2 | 2,4 | 3,0 |
| 5,5 | 1470 | 90 | 91,5 | 91,2 | 80,5 | 11 | 6,6 | 35,8 | 2 | 2,8 |
| 7,5 | 1470 | 90,8 | 91,8 | 91,6 | 79,5 | 15 | 7 | 48,8 | 2,1 | 2,9 |
| 11 | 1475 | 91,7 | 93,5 | 93,5 | 85,5 | 20,3 | 6,7 | 71,2 | 2,5 | 2,9 |
| 15 | 1480 | 92,3 | 93,7 | 93,1 | 80,5 | 29,1 | 7,9 | 96,7 | 3,2 | 3,6 |
| 18,5 | 1480 | 92,7 | 93,9 | 93,6 | 82,5 | 34,9 | 7 | 119,3 | 1,9 | 2,9 |
| 22 | 1480 | 93,1 | 93,9 | 93,8 | 84,5 | 40,4 | 7,9 | 141,9 | 2,9 | 3,0 |
| 30 | 1480 | 93,6 | 95 | 94,8 | 81,5 | 56,9 | 5,5 | 193,3 | 1,8 | 2,5 |
| 37 | 1485 | 94 | 95,2 | 94,7 | 78,5 | 72,4 | 6,4 | 238 | 2,1 | 3,0 |
| 45 | 1485 | 94,3 | 95,5 | 95,1 | 81 | 85 | 6,9 | 289 | 2 | 3,1 |
| 55 | 1485 | 94,5 | 95,3 | 94,9 | 83 | 101 | 6,7 | 353,4 | 2 | 2,9 |
| 75 | 1490 | 95 | 96,5 | 96,3 | 83,5 | 136 | 5,8 | 480,8 | 1,7 | 2,6 |
| 90 | 1490 | 95,2 | 96,4 | 96,2 | 85,5 | 160 | 6,8 | 575,9 | 1,3 | 2,9 |
| 110 | 1490 | 95,5 | 96,2 | 96 | 87,5 | 190 | 6,3 | 704,3 | 1,2 | 2,6 |

Tabla 1: Datos de fabricante de motores GE clase IE3

| Motores IE2 | | | | | | | | | | |
|-------------|----------------|------------|------|------|----------------|-----------|----------|-------|-----------|-----------|
| Potencia | Velocidad nom. | Eficiencia | | | Factor de pot. | Corriente | | | Torque | |
| KW | RPM | 100% | 75% | 50% | cos(phi) | In | lpart/In | Tn | Trbloq/Tn | Tbreak/Tn |
| 0,55 | 1435 | 79,9 | 85,2 | 84,1 | 79,5 | 1,2 | 6,6 | 3,7 | 3 | 3,5 |
| 0,75 | 1425 | 81,1 | 82,7 | 81,4 | 76,5 | 1,7 | 6 | 5 | 2,8 | 3,4 |
| 1,1 | 1420 | 82,7 | 86,9 | 87,3 | 84 | 2,3 | 6,4 | 7,4 | 2,8 | 3,3 |
| 1,5 | 1410 | 83,9 | 86,2 | 86,9 | 83,5 | 3,1 | 6,2 | 10,2 | 2,8 | 3,2 |
| 2,2 | 1455 | 85,3 | 88,4 | 87,6 | 74 | 5 | 6,5 | 14,4 | 2,4 | 3,2 |
| 3 | 1460 | 86,3 | 89,4 | 88,5 | 74,5 | 6,7 | 6,7 | 19,6 | 2,5 | 3,2 |
| 3,7 | 1455 | 87,3 | 89,2 | 88,4 | 74 | 8,3 | 6,6 | 24,2 | 2,5 | 3,2 |
| 4 | 1450 | 87,3 | 88,9 | 88,6 | 75,5 | 8,8 | 6,2 | 26,3 | 2,3 | 2,9 |
| 5,5 | 1465 | 88,2 | 90,9 | 90,5 | 78,5 | 11,5 | 6,5 | 35,8 | 2 | 2,8 |
| 7,5 | 1460 | 89,1 | 90,8 | 91 | 80 | 15,2 | 5,9 | 49,1 | 1,8 | 2,5 |
| 11 | 1470 | 90,1 | 91,9 | 92 | 83,5 | 21,1 | 5,7 | 71,5 | 2,1 | 2,6 |
| 18,5 | 1480 | 91,4 | 93,1 | 92,7 | 79 | 37 | 6,8 | 119,4 | 2 | 2,9 |
| 22 | 1475 | 91,7 | 92,6 | 92,2 | 79 | 43,8 | 6,4 | 142,3 | 1,9 | 2,6 |
| 30 | 1475 | 92,4 | 94,6 | 94,6 | 82 | 57,2 | 4,8 | 193,9 | 1,5 | 2,2 |
| 37 | 1480 | 92,8 | 95 | 94,8 | 80,5 | 71,5 | 5,7 | 238,5 | 1,8 | 2,6 |
| 45 | 1480 | 93,1 | 94,9 | 95 | 83,5 | 83,5 | 5,6 | 290 | 1,6 | 2,5 |
| 55 | 1480 | 93,5 | 94,9 | 94,8 | 84 | 101 | 5,7 | 354,4 | 1,6 | 2,5 |
| 75 | 1485 | 94 | 96,1 | 96,1 | 84 | 137 | 4,8 | 482 | 1,4 | 2,2 |
| 90 | 1480 | 94,4 | 96 | 95,9 | 86 | 160 | 4,9 | 580 | 1,6 | 2,3 |
| 110 | 1490 | 94,7 | 96,4 | 96,4 | 87 | 193 | 6,1 | 704,6 | 1,2 | 2,6 |

Tabla 2: datos de fabricante de motores GE clase IE2

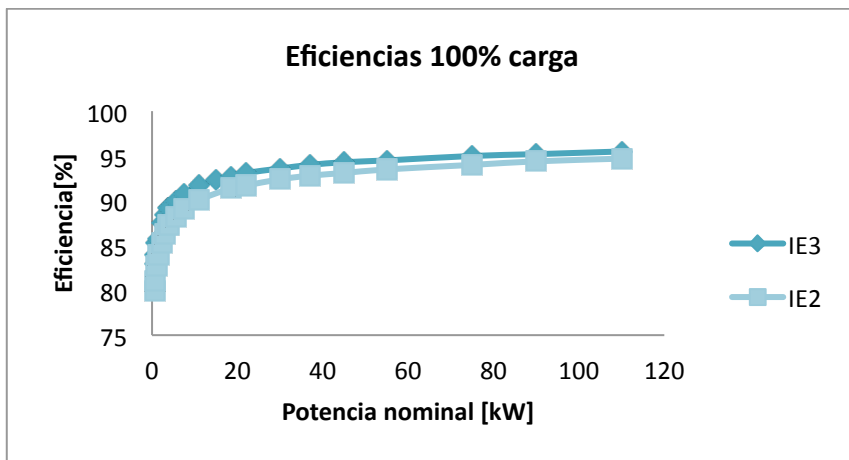


Figura 1: Gráfico comparativo de eficiencias de motores GE

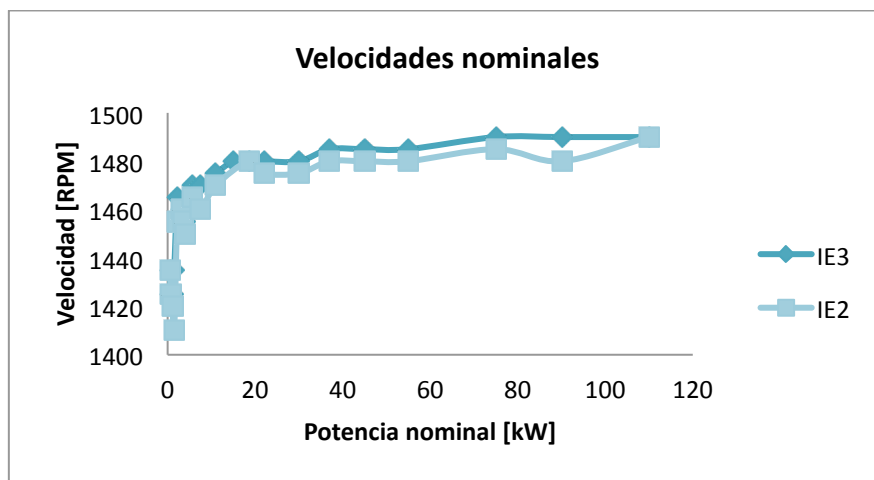


Figura 2: Gráfico comparativo de velocidades nominales motores GE

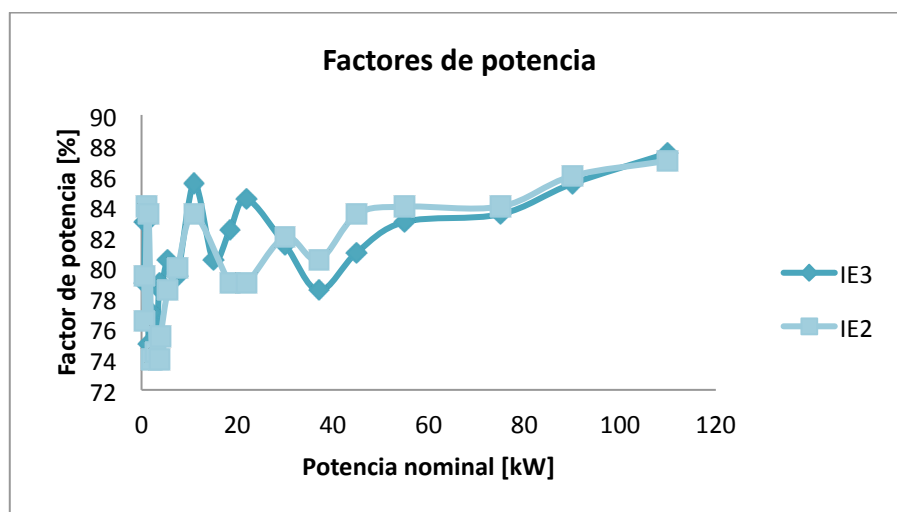


Figura 3: Gráfico comparativo de factor de potencia de motores GE

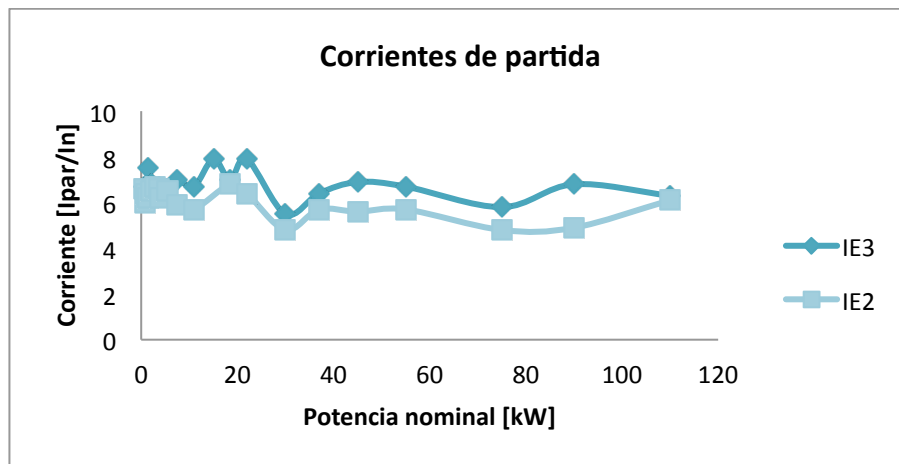


Figura 4: Gráfico comparativo de corrientes de partida de motores GE

B. Algoritmo programado para calcular parámetros de motores de inducción de baja tensión

A continuación se muestra el funcionamiento del programa desarrollado en MATLAB para el cálculo de parámetros de motores de inducción de baja tensión.

Para ejecutar el software se debe seguir las instrucciones del archivo README.TXT, del disco adjunto.

Una vez en la ventana de MATLAB, ejecutar el comando “calc_parametros”. A continuación el software responderá pidiendo algunos datos de entrada, como se muestra en la siguiente imagen:

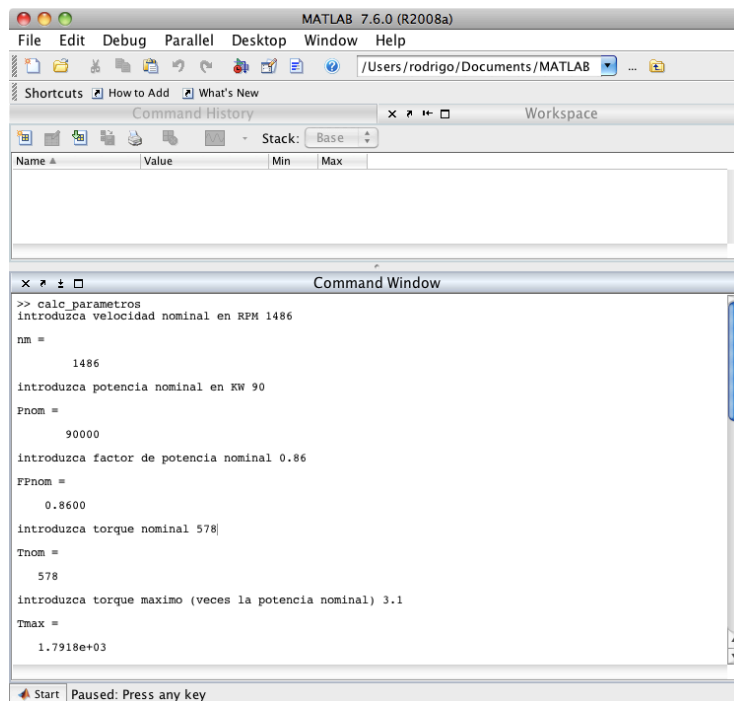


Figura 5: Entrada de datos de algoritmo de calculo de parámetros

Al hacer el ingreso de dichos datos, el programa mostrará en la ventana de salida las condiciones iniciales calculadas para dicho problema:

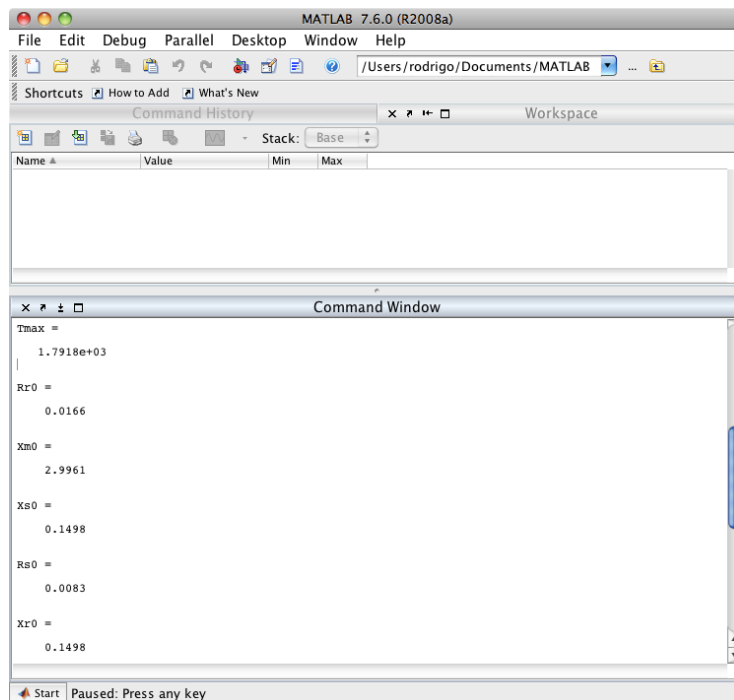


Figura 6: Entrega de punto inicial de iteración en algoritmo de cálculo de parámetros

Automáticamente comenzará el proceso de iteración. Si la solución converge, el sistema lo notificará y mostrará el resultado:

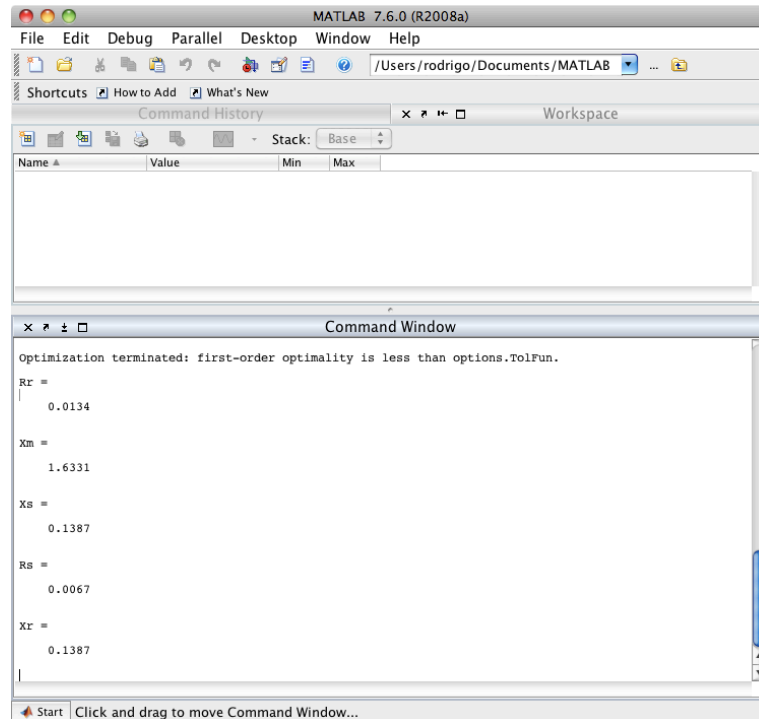


Figura 7: Entrega de resultados de algoritmo de cálculo de parámetros

Adicional a esto aparecerá una ventana con la gráfica torque velocidad de dicho motor, como se muestra en la siguiente imagen:

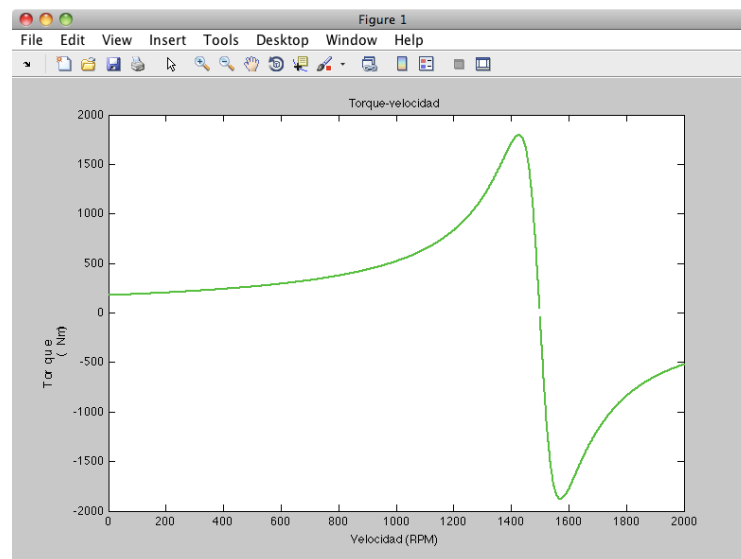


Figura 8: Entrega de curva torque-velocidad de algoritmo de cálculo de parámetros

C. Curvas de torque velocidad para motores seleccionados

Se presentan los resultados completos (motores desde 4 kW a 90 kW) de la sección de estimación de parámetros.

4 kW

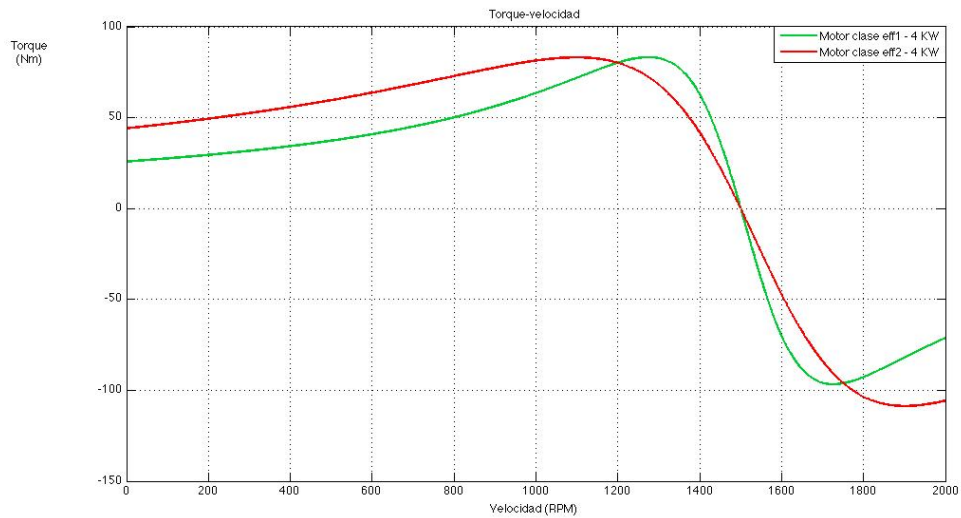


Figura 9: Curva torque velocidad de motores de 4 kW, eff1 y eff2

11 kW

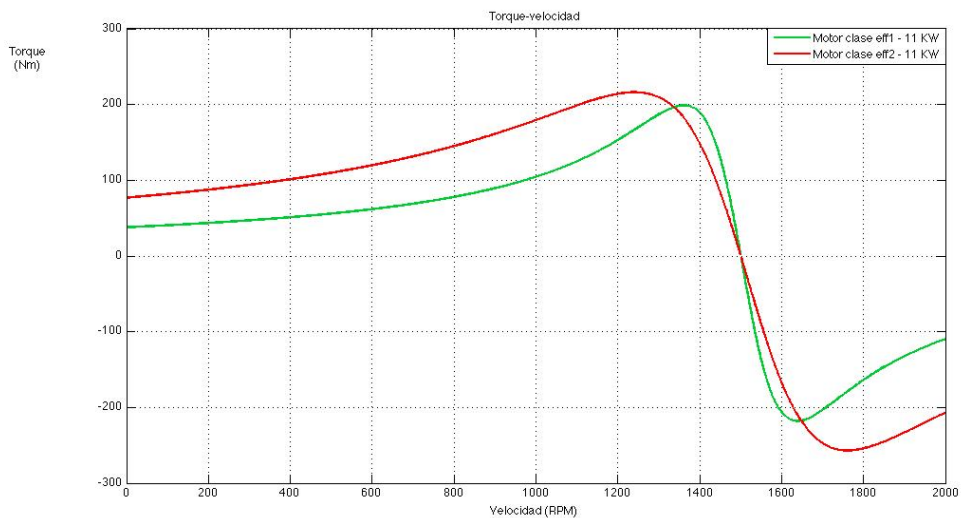


Figura 10: Curva torque velocidad de motores de 11 kW, eff1 y eff2

18,5 kW

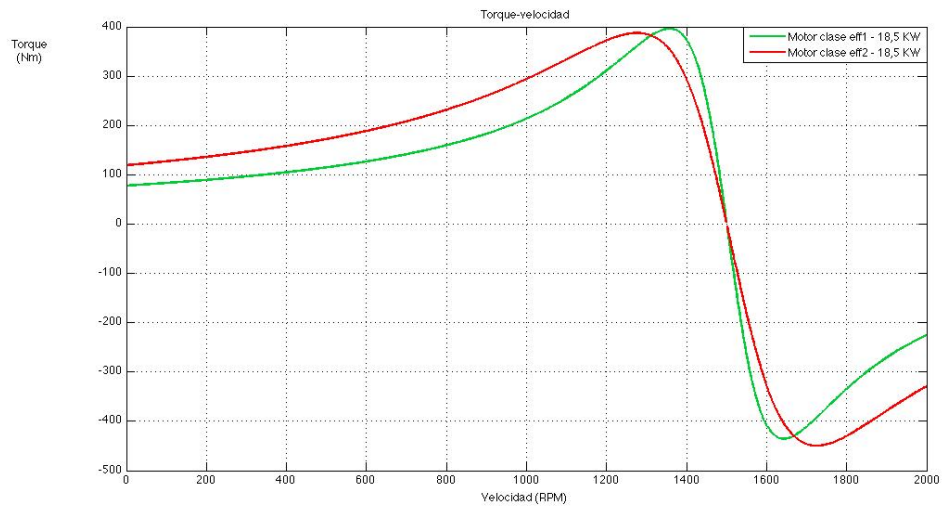


Figura 11: Curva torque velocidad para motores de 18,5 kW, eff1 y eff2

22 kW

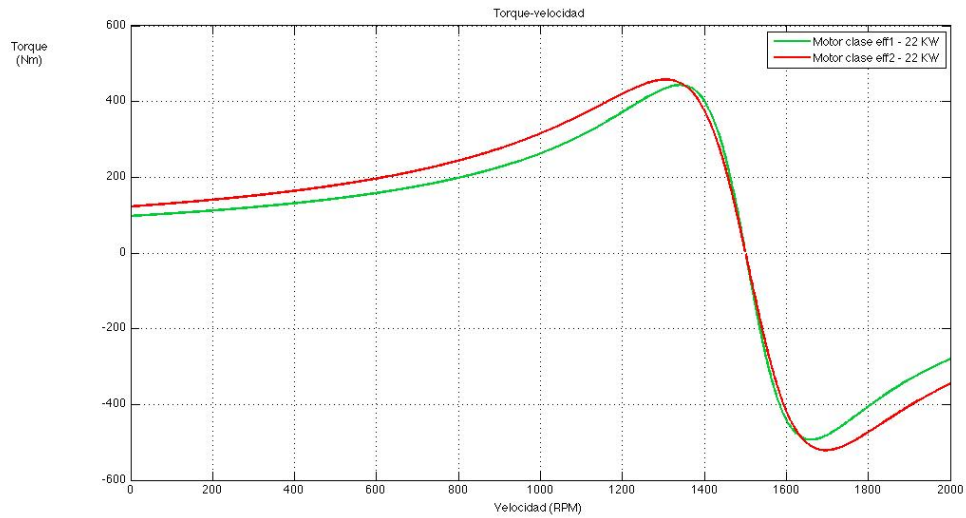


Figura 12: Curva torque velocidad para motores de 22 KW, eff1 y eff2

30 kW

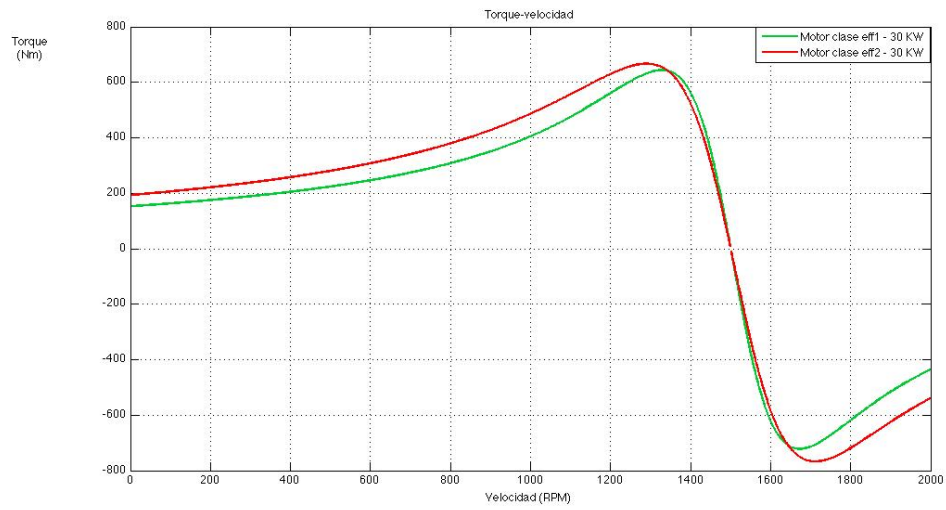


Figura 13: Curva torque velocidad para motores de 30 kW, eff1 y eff2

55 kW

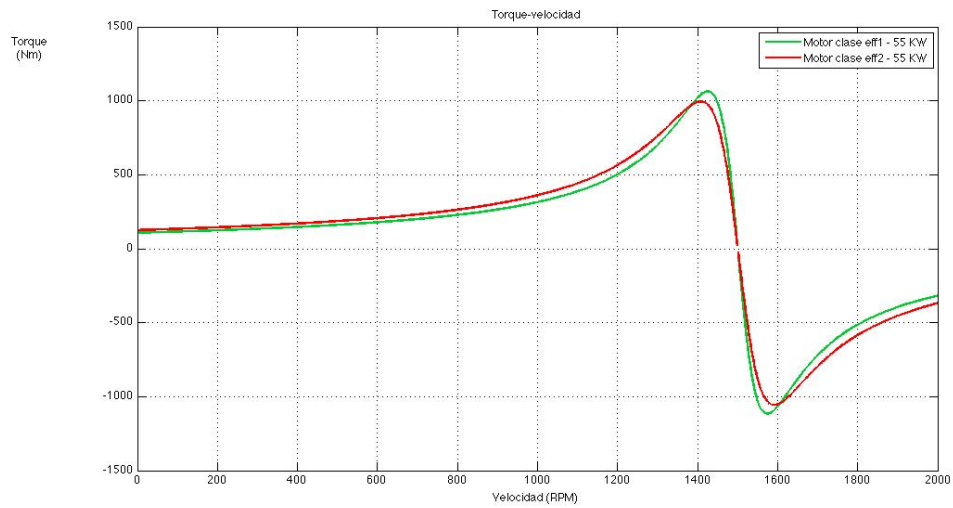


Figura 14: Curva torque velocidad para motores de 55 kW, eff1 y eff2

75 kW

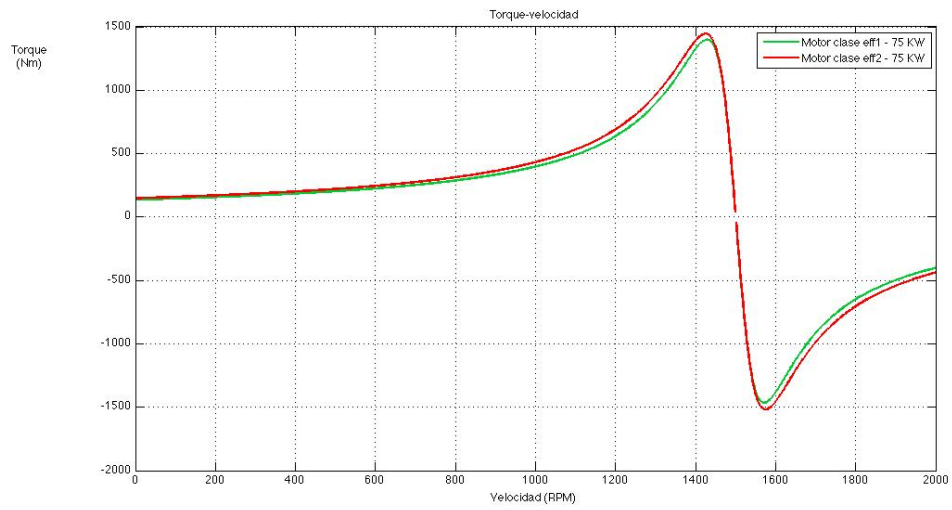


Figura 15: Curva torque velocidad para motores de 75 kW, eff1 y eff2

90 kW

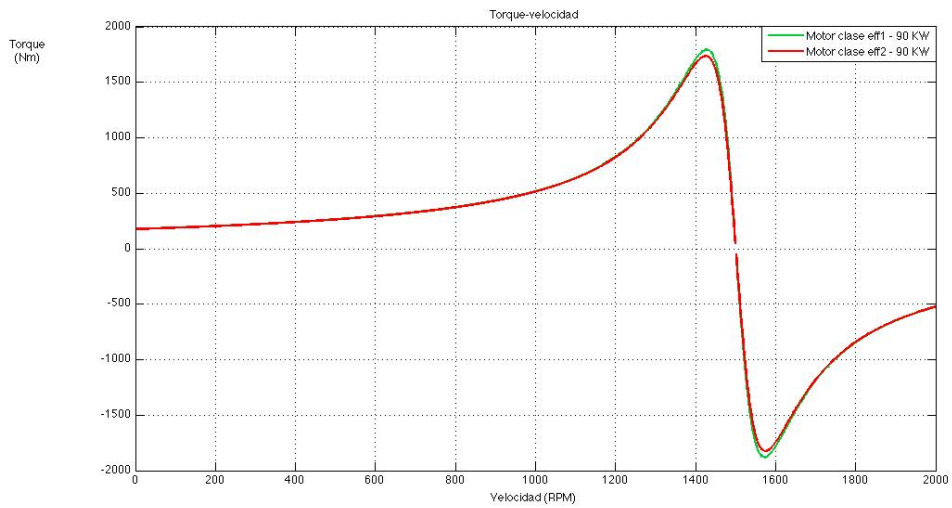


Figura 16: Curva torque velocidad para motores de 90 kW, eff1 y eff2

D. Resultados de cálculo de indicadores

A continuación se presentan los resultados de los indicadores económicos para otras marcas.

D.1 US Motors

| Potencia HP | Ahorro energético (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|---|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | Base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 1 | 14,96 | 7,48 | 22,44 |
| 3 | 26,33 | 13,17 | 39,50 |
| 5 | 43,89 | 21,94 | 65,83 |
| 7,5 | 72,55 | 36,27 | 108,82 |
| 10 | 96,73 | 48,37 | 145,10 |
| 15 | 144,34 | 72,17 | 216,51 |
| 25 | 117,78 | 58,89 | 176,68 |
| 50 | 307,79 | 153,90 | 461,69 |
| 75 | 393,02 | 196,51 | 589,53 |
| 100 | 340,57 | 170,29 | 510,86 |
| 125 | 425,71 | 212,86 | 638,57 |
| 150 | 447,02 | 223,51 | 670,54 |
| 200 | 602,12 | 301,06 | 903,18 |

Tabla 3: Ahorros energéticos para motores US motors

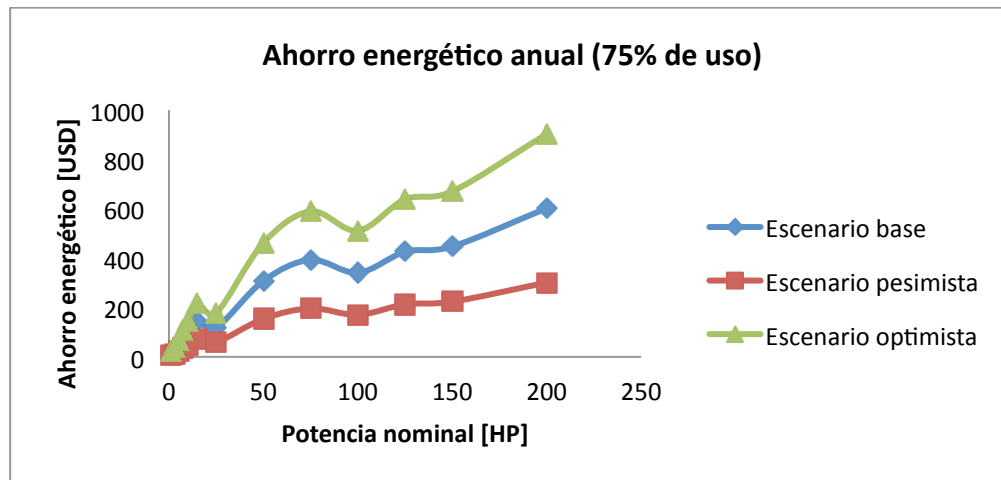


Figura 17: Gráfico de ahorros energéticos para motores US motors

| Potencia | VAN (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 1 | -187,30 | -215,65 | -158,95 |
| 3 | -111,18 | -161,09 | -61,28 |
| 5 | 44,36 | -38,82 | 127,54 |
| 7,5 | 112,02 | -25,49 | 249,53 |
| 10 | 117,69 | -65,66 | 301,03 |
| 15 | 206,16 | -67,42 | 479,74 |
| 25 | -260,51 | -483,75 | -37,26 |
| 50 | -386,23 | -969,62 | 197,15 |
| 75 | -257,15 | -1002,07 | 487,78 |
| 100 | -2584,96 | -3230,48 | -1939,45 |
| 125 | -758,21 | -1565,10 | 48,69 |
| 150 | -1084,43 | -1931,71 | -237,14 |
| 200 | -654,49 | -1795,74 | 486,77 |

Tabla 4: Valor actual de la inversión para motores US motors

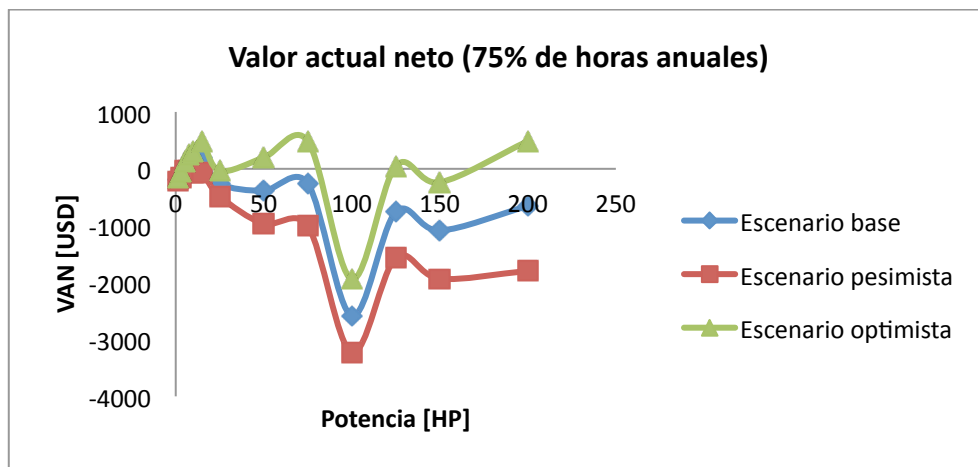


Figura 18: Gráfico del valor actual de la inversión para motores US motors

| Potencia | TIR (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------|-----------------------------|---------------|---------------|
| | Escenario | | |
| | base [%] | Pesimista [%] | Optimista [%] |
| 1 | #NUM! | #NUM! | -21% |
| 3 | -14% | #NUM! | -2% |
| 5 | 23% | -3% | 46% |
| 7,5 | 34% | 4% | 60% |
| 10 | 27% | -1% | 51% |
| 15 | 32% | 2% | 57% |
| 25 | -6% | -24% | 8% |
| 50 | 0% | -20% | 15% |
| 75 | 4% | -17% | 20% |
| 100 | -22% | #NUM! | -12% |
| 125 | -4% | -22% | 11% |
| 150 | -7% | -24% | 7% |
| 200 | 0,8% | -19% | 16% |

Tabla 5: Tasa interna de retorno de la inversión para motores US motors

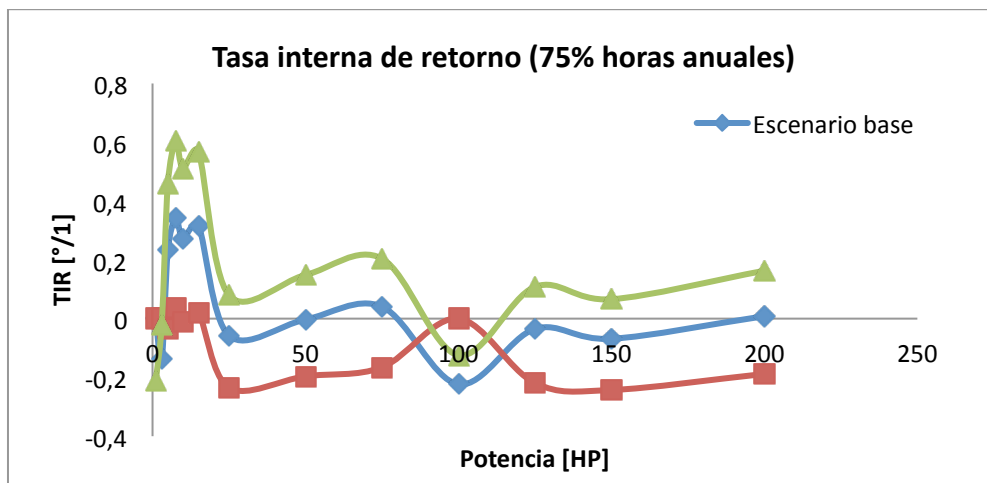


Figura 19: Gráfico de la tasa interna de retorno de la inversión para motores US motors

| Potencia HP | PRC (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| | Escenario | | |
| | base [años] | Pesimista [años] | Optimista [años] |
| 1 | 16,3 | 32,6 | 10,9 |
| 3 | 8,0 | 16,0 | 5,3 |
| 5 | 2,8 | 5,6 | 1,9 |
| 7,5 | 2,2 | 4,5 | 1,5 |
| 10 | 2,6 | 5,1 | 1,7 |
| 15 | 2,4 | 4,7 | 1,6 |
| 25 | 6,0 | 12,0 | 4,0 |
| 50 | 5,0 | 10,1 | 3,4 |
| 75 | 4,4 | 8,9 | 3,0 |
| 100 | 11,4 | 22,8 | 7,6 |
| 125 | 5,6 | 11,1 | 3,7 |
| 150 | 6,2 | 12,4 | 4,1 |
| 200 | 4,9 | 9,8 | 3,3 |

Tabla 6: Período de recuperación de capital para motores US motors

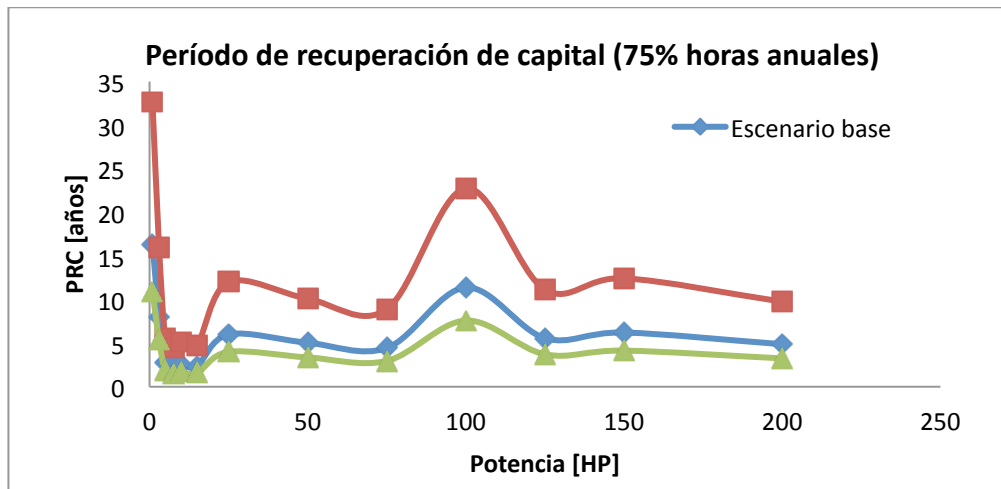


Figura 20: Gráfico del período de recuperación de capital para motores US motors

D.2 Siemens

| Potencia KW | Ahorro energético (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|---|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 0,75 | 59,21 | 29,61 | 88,82 |
| 1,1 | 79,84 | 39,92 | 119,76 |
| 1,5 | 89,34 | 44,67 | 134,01 |
| 2,2 | 109,31 | 54,66 | 163,97 |
| 3 | 127,64 | 63,82 | 191,46 |
| 4 | 146,48 | 73,24 | 219,72 |
| 5,5 | 178,88 | 89,44 | 268,32 |
| 7,5 | 204,51 | 102,25 | 306,76 |
| 11 | 274,99 | 137,50 | 412,49 |
| 15 | 323,40 | 161,70 | 485,10 |
| 18,5 | 398,50 | 199,25 | 597,75 |
| 22 | 444,72 | 222,36 | 667,08 |
| 30 | 490,00 | 245,00 | 735,00 |
| 37 | 653,47 | 326,73 | 980,20 |
| 45 | 824,38 | 412,19 | 1236,58 |

Tabla 7: Ahorro energético anual para motores Siemens

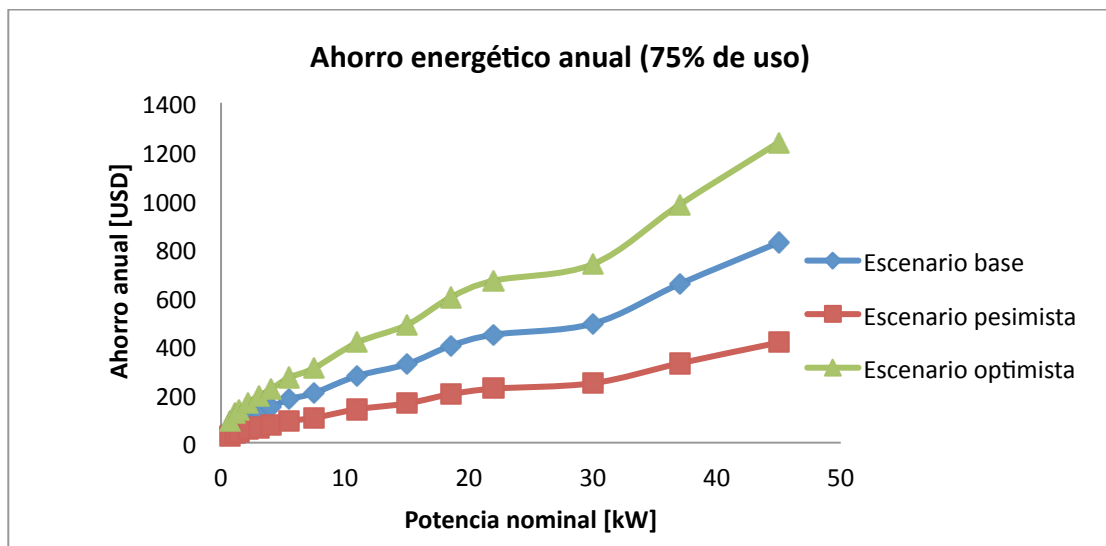


Figura 21: Gráfico del ahorro energético anual para motores Siemens

| Potencia | VAN (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------|-----------------------------|-----------------|-----------------|
| | Escenario | | |
| | base [USD] | Pesimista [USD] | Optimista [USD] |
| 0,75 | -9,83 | -122,06 | 102,41 |
| 1,1 | 1,78 | -149,54 | 153,11 |
| 1,5 | -31,27 | -200,60 | 138,06 |
| 2,2 | -20,21 | -227,41 | 186,98 |
| 3 | -28,03 | -269,96 | 213,90 |
| 4 | -34,75 | -312,39 | 242,89 |
| 5,5 | -15,76 | -354,80 | 323,29 |
| 7,5 | -197,87 | -585,49 | 189,75 |
| 11 | -82,95 | -604,17 | 438,27 |
| 15 | -457,14 | -1070,11 | 155,83 |
| 18,5 | -0,47 | -755,79 | 754,85 |
| 22 | -201,86 | -1044,78 | 641,06 |
| 30 | -743,35 | -1672,09 | 185,39 |
| 37 | -413,65 | -1652,23 | 824,93 |
| 45 | -236,92 | -1799,45 | 1325,62 |

Tabla 8: Valor actual neto de la inversión para motores Siemens

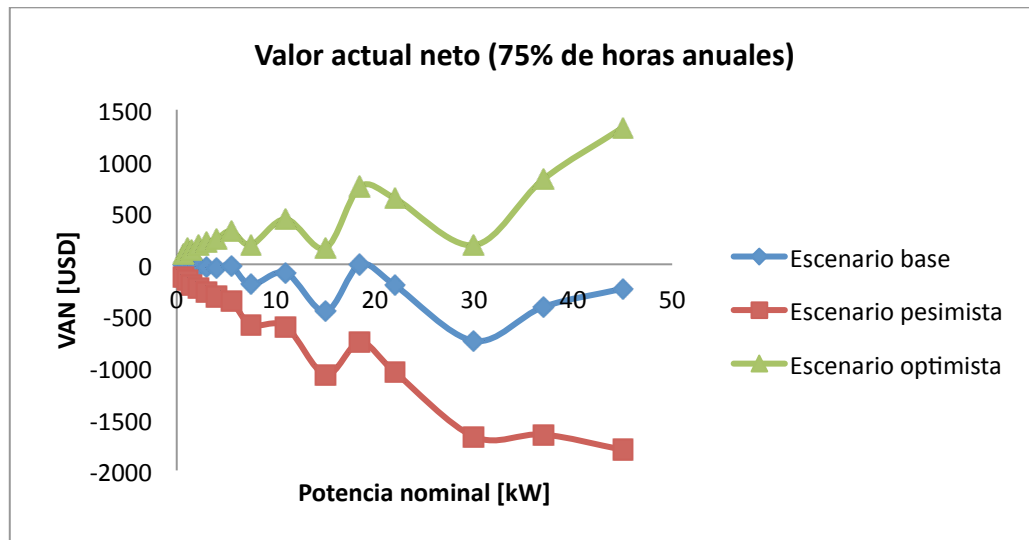


Figura 22: Gráfico del valor actual neto de la inversión para motores Siemens

| Potencia | TIR (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------|-----------------------------|---------------|---------------|
| | Escenario | | |
| KW | base [%] | Pesimista [%] | Optimista [%] |
| 0,75 | 8% | -14% | 26% |
| 1,1 | 10% | -12% | 28% |
| 1,5 | 7% | -15% | 24% |
| 2,2 | 8% | -14% | 26% |
| 3 | 8% | -14% | 25% |
| 4 | 8% | -14% | 25% |
| 5,5 | 9% | -13% | 27% |
| 7,5 | 2% | -18% | 17% |
| 11 | 7% | -14% | 24% |
| 15 | -1% | -20% | 14% |
| 18,5 | 10% | -12% | 28% |
| 22 | 6% | -15% | 23% |
| 30 | -2,0% | -21% | 13% |
| 37 | 4,2% | -16% | 21% |
| 45 | 7,2% | -14% | 24% |

Tabla 9: Tasa interna de retorno de la inversión para motores Siemens

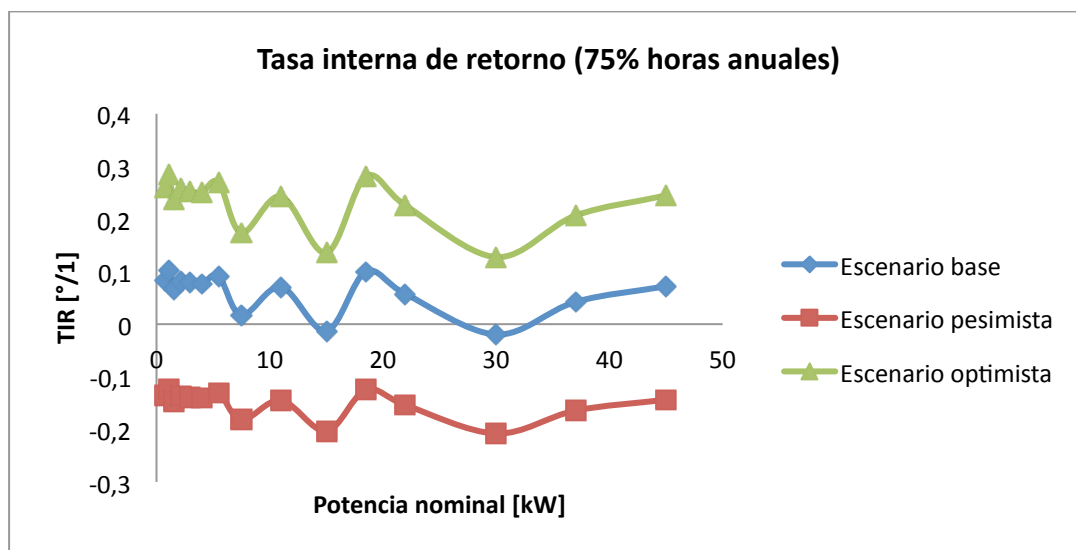


Figura 23: Gráfico de la tasa interna de retorno de la inversión para motores Siemens

| Potencia HP | PRC (Uso 75% horas anuales) | | |
|----------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| | Escenario | | |
| | base [años] | Pesimista [años] | Optimista [años] |
| 0,75 | 4,0 | 7,9 | 2,6 |
| 1,1 | 3,8 | 7,5 | 2,5 |
| 1,5 | 4,1 | 8,3 | 2,8 |
| 2,2 | 4,0 | 8,0 | 2,7 |
| 3 | 4,0 | 8,0 | 2,7 |
| 4 | 4,0 | 8,1 | 2,7 |
| 5,5 | 3,9 | 7,8 | 2,6 |
| 7,5 | 4,8 | 9,5 | 3,2 |
| 11 | 4,1 | 8,2 | 2,7 |
| 15 | 5,2 | 10,4 | 3,5 |
| 18,5 | 3,8 | 7,6 | 2,5 |
| 22 | 4,2 | 8,5 | 2,8 |
| 30 | 5,3 | 10,6 | 3,5 |
| 37 | 4,4 | 8,8 | 2,9 |
| 45 | 4,1 | 8,2 | 2,7 |

Tabla 10: Período de recuperación de capital para motores Siemens

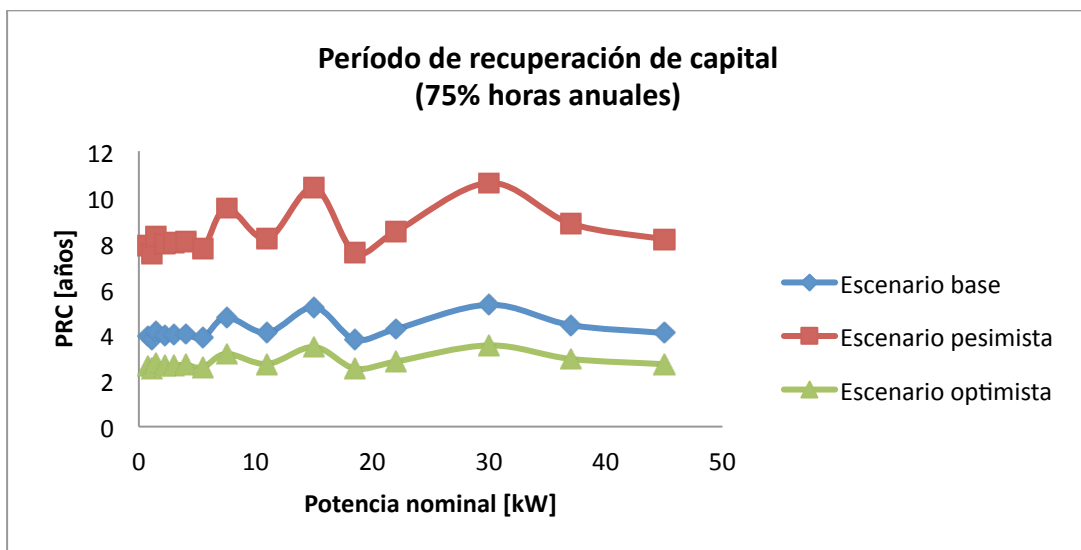


Figura 24: Gráfico del período de recuperación de capital para motores Siemens