



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**MEDIDA DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA PARA MOTORES
ELÉCTRICOS SOBREDIMENSIONADOS EN PLANTA SAN JOSÉ DE
PUCOBRE**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Ingeniero de Ejecución en Electricidad

Profesor guía: Sr. Juan Carlos Madrigal Lobos

Oscar Milkhov Garay Valenzuela

Copiapó, Chile 2025

AGRADECIMIENTOS

A mi madre Sandra, quien me incentivó a continuar mis estudios, gracias por confiar en mis capacidades. Este logro es tanto suyo como mío.

A mi hijo Salvador, por ser un pilar para mí. Todo este esfuerzo es para darte un mejor futuro y bienestar.

A mis compañeros de trabajo, quienes me facilitaron información y brindaron su apoyo para continuar con este proyecto.

Al profesor Juan Madrigal, por el compromiso adquirido para ayudarme a terminar este proceso.

A mi padre Óscar Garay, Daniela, Renata y la familia Gajardo Ríos por ser parte de mi crecimiento como persona.

RESUMEN

Los problemas ambientales existentes, provocaron en la población una mayor conciencia y una nueva actitud social frente al cuidado del medio ambiente. Por esta razón, el gobierno se muestra cada vez más preocupados por el uso responsable de la energía, impulsando programas de eficiencia energética dirigidos tanto al sector residencial como al industrial. Al mismo tiempo, las empresas buscaron nuevas formas de disminuir la demanda energética. En este contexto surgieron los equipos energéticamente eficientes, entre ellos los motores eléctricos. El objetivo de este proyecto es proponer medidas de mejora de eficiencia energética en motores sobredimensionados en la planta san José de Pucobre, logrando tener una idea más clara de las desviaciones al trabajar con este tipo de estos motores. En este proyecto se recopiló la información entregada por los fabricantes de motores con el propósito de comparar el comportamiento de los motores eficientes con el de aquellos de menor eficiencia. Asimismo, se programó un software que permitió estimar los parámetros de motores eléctricos de inducción de baja tensión, con el fin de elaborar modelos más precisos y obtener información respecto de su operación. Una vez finalizada la investigación, se concluyó que, en general, los motores de mayor eficiencia se comportaron 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.

MOTOR ELÉCTRICO - EFICIENCIA ENERGÉTICA - MINERÍA

ABSTRACT

Existing environmental problems have led to greater public awareness and a new social attitude toward environmental protection. For this reason, governments are increasingly concerned with the responsible use of energy, promoting energy efficiency programs aimed at both the residential and industrial sectors. At the same time, companies sought new ways to reduce energy demand. In this context, energy-efficient equipment emerged, including electric motors. The overall objective of this project is to propose energy efficiency improvement measures for oversized motors at the Pucobre San José plant, gaining a clearer understanding of the deviations when working with these types of motors. This project involved compiling information provided by motor manufacturers to compare the performance of efficient motors with that of less efficient ones. Additionally, software was programmed to estimate the parameters of low-voltage induction electric motors, in order to develop more accurate models and obtain information regarding their operation. Once the investigation was completed, it was concluded that, in general, the more efficient motors behaved very similarly to the less efficient ones. Both the manufacturer's data and the modeling revealed two differences: higher rotational speeds and higher starting currents for the efficient motors. These differences could have some repercussions in specific cases discussed in more detail in the document.

ELECTRIC MOTOR - ENERGY EFFICIENCY - MINING

INDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Motores eléctricos en minera Planta san José de Pucobre	1
1.2 Objetivo general.....	2
1.3 Objetivos específicos	2
1.4 Alcances	2
1.5 Resumen de capítulos.....	3

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Los motores eléctricos.....	6
2.2 Fundamento de los motores eléctricos	6
2.3 Tipos de motores eléctricos	6
2.3.1 Motores DC.....	7
2.3.2 Motores AC.....	9
2.4 Principios de funcionamiento de motores eléctricos.....	14
2.5 Características de funcionamiento de los motores eléctricos	14
2.6 Control de velocidad de motores eléctricos.....	16
2.6.1 Instrumentación y sensores	17
2.6.2 Sistemas de control.....	19

CAPÍTULO III

MOTORES EN LA PLANTA SAN JOSÉ DE PUCOBRE

3.1 Procesos utilizados en la planta San José	22
3.1.1 Proceso de chancado.....	22
3.1.2 Proceso de flotación y relaves	23
3.2 Equipos instalados en planta san José.....	23
3.3 Selección de los motores a analizar	25
3.4 Clasificación según equipo utilizado	26

CAPÍTULO IV

MOTORES SOBREDIMENSIONADOS EN PROCESOS INDUSTRIALES

4.1 Tipo de motores según su eficiencia	30
4.2 Ventajas e inconvenientes del sobredimensionamiento de motores	31

CAPÍTULO V

MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

5.1 Concepto de eficiencia	34
5.2 Plan nacional de eficiencia energética	34
5.2.1 Sectores productivos industriales y de minería	36
5.2.2 Sectores de transporte	36
5.2.3 Sectores de edificación	37
5.2.4 Sectores de ciudadanía.....	37
5.3 Normas sobre niveles de eficiencia de motores eléctricos	38
5.4 Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos	38
5.4.1 Pérdidas en los conductores	38
5.4.2 Pérdidas en el núcleo magnético	39
5.4.3 Pérdidas por fricción y ventilación.....	40
5.4.4 Pérdidas adicionales en carga.....	40
5.5 Incremento de la eficiencia.....	41

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 Motores a estudiar	45
6.2 Análisis de datos	48
6.2.1 Eficiencia	48
6.2.2 Velocidad nominal.....	49
6.2.3 Factor de potencia.....	50
6.2.4 Corriente de partida	51

CAPÍTULO VII

MODELAMIENTO

7.1 Análisis de circuito equivalente.....	54
---	----

7.1.1 Estimación de parámetros de circuito equivalente	54
7.1.2 Formulación del problema	55
7.1.3 Programas implementados	58
7.1.4 Algoritmo programado para calcular parámetros de motores de inducción	61
7.2 Análisis comparativo de parámetros de motores	64
7.3 Curvas de torque velocidad para motores seleccionados	70
7.4 Motores General Electric disponibles en el mercado.....	74
7.5 Rentabilidad de la migración, de motores de eficiencia estándar a alta eficiencia.	78
7.6 Reducción de emisiones	78
CAPÍTULO VIII	
CONCLUSIONES	79
Bibliografía.....	81

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Motor DC	7
Figura N° 2.2: Motor AC.	10
Figura N° 2.3: Motor asincrónico.....	11
Figura N° 2.4: Motor sincrónico.....	13
Figura N° 2.5: Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga	15
Figura N° 2.6: Sensores de corriente para motores AC.	18
Figura N° 2.7: Sistema de control HMI - motor AC.	20
Figura N° 3.1: Gráfico de distribución de potencia instalada en motores.....	25
Figura N° 3.2: Gráfico de cantidad de motores instalados.....	25
Figura N° 3.3: Gráfico de cantidad de potencia instalada por proceso productivo en sólo motores de baja Tensión, en motores menores a 200 HP	27
Figura N° 4.1: Rendimiento motor de inducción a diferentes potencias y cargas	32
Figura N° 6.1: Grafica de eficiencia versus potencia nominal.....	48
Figura N° 6.2: Gráfica de velocidad nominal versus potencia nominal	49
Figura N° 6.3: Grafica de factor de potencia versus potencia nominal	51
Figura N° 6.4: Gráfica de corriente de partida versus potencia nominal.....	52
Figura N° 7.1: Circuito equivalente de un motor de inducción.....	53
Figura N° 7.2: Entrada de datos de algoritmo de calculo de parámetros.....	62
Figura N° 7.3: Entrega de punto inicial de iteración en algoritmo de cálculo de parámetros.	63
Figura N° 7.4: Entrega de resultados de algoritmo de cálculo de parámetros.	64
Figura N° 7.5: Gráfico resistencia de rotor versus potencia nominal.	66
Figura N° 7.6: Gráfico resistencia de estator versus potencia nominal.	67
Figura N° 7.7: Gráfico reactancia de rotor versus potencia nominal.....	68
Figura N°7.8: Gráfico reactancia de magnetización versus potencia nominal.....	68
Figura N° 7.9: Curva torque velocidad de motores de 4 kW, eff1 y eff2.	70
Figura N°7.10: Curva torque velocidad de motores de 11 kW, eff1 y eff2	71

Figura N° 7.11: Curva torque velocidad para motores de 18,5 kW, eff1 y eff2.	71
Figura N° 7.12: Curva torque velocidad para motores de 22 KW, eff2 y eff2.	72
Figura N° 7.13: Curva torque velocidad para motores de 30 KW, eff2 y eff2.	72
Figura N° 7.14: Curva torque velocidad para motores de 55 KW, eff2 y eff2.	73
Figura N° 7.15: Curva torque velocidad para motores de 75 KW, eff2 y eff2.	73
Figura N° 7.16: Curva torque velocidad para motores de 90 KW, eff2 y eff2.	74
Figura N° 7.17: Eficiencia versus potencia nominal de motores General Electric.	77
Figura N° 7.18: Precio versus potencia nominal de motores General Electric.	77

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 3.1: Descripción de la potencia instalada.....	24
Tabla N° 3.2: Detalle de motores instalados (cantidad y potencia).....	24
Tabla N° 3.3 Cantidad de potencia instalada por proceso productivo en motores de baja tensión	27
Tabla N° 4.1: Tolerancias admisibles para motores de inducción	30
Tabla N° 5.1: Relación entre aumento de eficiencia y disminución de pérdidas	41
Tabla N° 6.1: Información del catálogo de la marca la marca General Electric para motores eficiencia alta.....	46
Tabla N° 6.2: Información del catálogo de la marca la marca General Electric para motores eficiencia standar.	47
Tabla N° 7.1: Comparación de parámetros de motores eff1 y eff2.	65
Tabla N° 7.3: Comparativa de precios y eficiencia de motores General Electric	76
Tabla N° 7.4: Variación de precio y eficiencia para motores general electric.	76

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, la búsqueda de alternativas para mejorar la eficiencia energética y reducir el consumo eléctrico se ha convertido en una prioridad tanto a nivel nacional como internacional.

La eficiencia energética se ha convertido en un tema prioritario en la agenda gubernamental, reflejado en políticas y programas orientados a fomentar el uso de tecnologías más eficientes.

En el amplio panorama industrial, los motores eléctricos juegan un papel crucial, sobre todo en la minería. La selección adecuada de un motor eléctrico es fundamental para garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente de los sistemas en los que se integran.

Sin embargo, en algunos casos, los motores pueden terminar siendo sobredimensionados, es decir, tener una capacidad nominal que excede los requerimientos reales de la aplicación específica.

El sobredimensionamiento de motores eléctricos puede ocurrir por diversas razones y puede tener importantes implicaciones en términos de eficiencia energética, costos operativos y mantenimiento a largo plazo. A menudo el sobredimensionamiento en los motores eléctricos puede afectar la eficiencia energética y la rentabilidad de los sistemas eléctricos, cómo a su vez la selección adecuada de equipos puede optimizar el rendimiento y reducir los costos operativos a lo largo del ciclo de vida del sistema.

1.1 Motores eléctricos en minera Planta san José de Pucobre

Este trabajo considera el estudio de los motores eléctricos utilizados en el procedimiento de refinamiento de materiales mineros.

La instalación donde se encuentran los motores a estudiar son de la propiedad de la planta san José de la minera Pucobre, estos equipos se encuentran ubicados en la comuna de Tierra Amarilla, en la Región de Atacama.

1.2 Objetivo general

Proponer medidas de mejora de eficiencia energética en motores sobredimensionados en la planta san José de Pucobre, que permita cumplir con el Plan Nacional de Eficiencia Energética y mejorar la eficiencia de la planta.

1.3 Objetivos específicos

- ✚ Describir el uso de motores en los procesos industriales de la planta san José de Pucobre.

- ✚ Identificar los motores que están sobredimensionados en los procesos industriales de la planta san José de Pucobre.

- ✚ Diseñar las medidas de mejora de eficiencia energética para los motores sobredimensionados en la planta san José de Pucobre.

1.4 Alcances

El presente trabajo se enfocará en dar a conocer las recomendaciones para elegir el motor adecuado en las implementaciones que lo requieren en planta San José de Pucobre.

Los alcances de la investigación se enfocarán en la revisión y análisis de datos de motores eléctricos.

Asimismo, se considerará la revisión de documentos técnicos, normativas y reglamentaciones aplicables en el contexto nacional.

1.5 Resumen de capítulos

Capítulo II: Marco Teórico El marco teórico de este proyecto abarca los principios y fundamentos principales que rigen en el funcionamiento de los motores eléctricos, como también sus aplicaciones más comunes.

En este capítulo se informará acerca de los motores eléctricos más utilizados en el sector industrial y sus características técnicas más relevantes

Capítulo III: Motores en a planta San José de Pucobre En este capítulo se hará énfasis a los procesos productivos más relevantes y con mayor consumo energético de la planta San José de Pucobre, además se informará la cantidad de motores que se encuentran operando y en condición stand by en la planta, como también los datos técnicos de mayor relevancia de estos equipos.

En base a esa información se analizarán tablas con información acerca a la distribución de la potencia en la planta san José y la cantidad de potencia instalada por proceso productivo en motores de baja tensión.

Capítulo IV: Motores Sobredimensionados en Procesos Industriales En este capítulo se profundizará en la acción de utilizar motores con una potencia superior a la requerida para una aplicación específica. Se explican las razones detrás de esta práctica, y como esta acción va acompañado a la necesidad de asegurar una mayor fiabilidad de los motores eléctricos.

Se hablará sobre las ventajas y desventajas del sobredimensionamiento, y también de como aumenta el consumo de energía, ya que un motor sobredimensionado funciona a una carga menor a su capacidad óptima.

Capítulo V: Medidas de Mejora de Eficiencia Energética Para entender la eficiencia eléctrica hay que tener en consideración conceptos básicos, como por ejemplo las pérdidas de energía de los motores al momento de su operación. En ese capítulo se explicarán los tipos de perdidas más comunes que se encuentran en los motores de corriente alterna. En este capítulo se encontrará también el plan nacional de eficiencia energética, y las medidas que este plan busca en implementar, enfocados siempre en el sector minero.

Capítulo VI: Análisis de resultados El objetivo de este capítulo es hacer un contraste entre el comportamiento de motores de alta eficiencia frente a motores de eficiencia premium (ya que son los más comunes en la industria).

Con toda esta información se realizará una comparativa de los motores de eficiencia estándar con respecto a los motores de eficiencia premium.

Capítulo VII: Modelamiento: En este capítulo se realizara el modelamiento de circuitos eléctricos mediante software MATLAB. Este modelamiento de circuitos eléctricos con software consiste en la representación matemática y computacional de sistemas eléctricos para analizarlos, simular su comportamiento. Esto permite estudiar fenómenos complejos sin necesidad de construir físicamente el circuito, lo que ahorra tiempo, recursos y reduce errores de diseño.

Capítulo VIII: Conclusiones. Este proyecto analiza la viabilidad del uso de motores de una alta eficiencia en la planta san José propiedad de PUCOBRE. Se inició con una comparación técnica entre motores de baja y alta eficiencia.

Migrar a motores de eficiencia alta no genera problemas técnicos relevantes, la inversión inicial en motores eficientes puede recuperarse a mediano plazo todo esto serviría para reducir significativamente las emisiones de CO₂, mejorando la huella de carbono.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El sobredimensionamiento de motores eléctricos es una práctica común en la industria, esta implica la selección de motores con una capacidad nominal mayor que la requerida por la carga específica a la que están destinados. Esta estrategia puede garantizar un funcionamiento confiable y eficiente del sistema, así como para proporcionar márgenes de seguridad y capacidad de respuesta frente a variaciones en las condiciones de carga.

2.1 Los motores eléctricos

Un motor eléctrico es un dispositivo que convierte la energía eléctrica en energía mecánica de rotación por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor.

2.2 Fundamento de los motores eléctricos

Los principios fundamentales de funcionamiento incluyen la ley de Amper, que describe la interacción entre corrientes eléctricas y campos magnéticos y la ley de Faraday, que establece que un conductor eléctrico en movimiento en un campo magnético experimenta una fuerza electromotriz (FEM).

2.3 Tipos de motores eléctricos

Existen varios tipos de motores eléctricos, los más utilizados en la industria actual y los que se estudiarán en este trabajo son los motores de corriente continua (DC), motores de corriente alterna (AC), motores síncronos y motores asíncronos. Cada tipo de motor tiene sus propias características y se utiliza para diferentes aplicaciones.

2.3.1 Motores DC

Los motores eléctricos de corriente continua (DC), son dispositivos que convierten energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de un campo magnético con una corriente eléctrica continua.

Son utilizados en una amplia variedad de aplicaciones que van desde juguetes eléctricos hasta sistemas de propulsión de vehículos eléctricos y robots industriales.

Estos motores son populares debido a su alta eficiencia, su capacidad de generar un torque constante y su control preciso de la velocidad.

En la figura N° 2.1 se puede ver un motor DC y los componentes que lo constituyen.

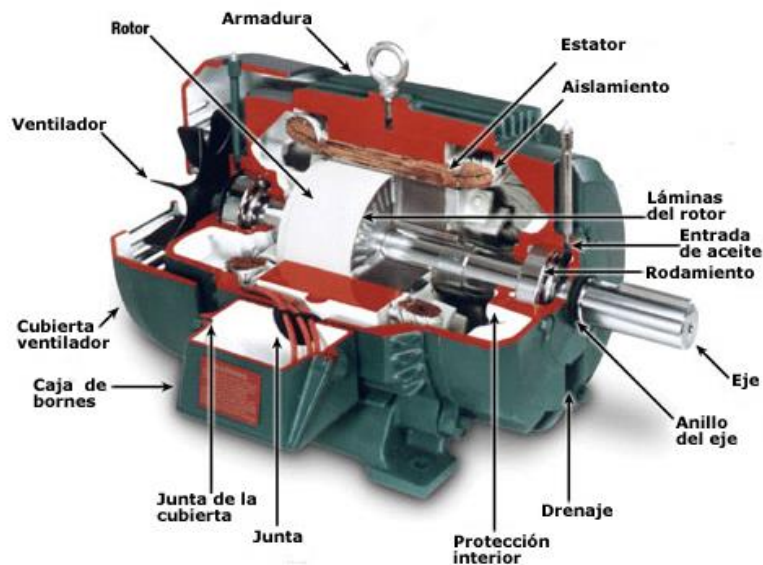


Figura N° 2.1: Motor DC

Los motores eléctricos DC son ampliamente utilizados en la industria debido a su capacidad para proporcionar un control de velocidad preciso y constante, así como una alta eficiencia energética. A continuación, se describen las características, componentes y aplicaciones de los motores eléctricos DC.

2.3.1.1 Características de los motores DC

Los motores de corriente continua (DC), son dispositivos electromecánicos que convierten energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de campos magnéticos. Utilizan corriente continua para alimentar el rotor (parte móvil), y el estator (parte fija) del motor.

Las principales características de este tipo de motores son:

- ✚ **Control de velocidad preciso:** Los motores eléctricos DC tienen una velocidad constante que puede ser controlada mediante un controlador de velocidad. Esto permite que los motores eléctricos DC sean utilizados en aplicaciones donde se requiere un control de velocidad preciso.
- ✚ **Alta eficiencia energética:** Los motores eléctricos DC tienen una alta eficiencia energética debido a su diseño y construcción. Esto los hace ideales para su uso en aplicaciones donde se requiere una alta eficiencia energética.
- ✚ **Bajo nivel de ruido:** Los motores eléctricos DC tienen un nivel de ruido relativamente bajo en comparación con otros tipos de motores eléctricos.
- ✚ **Buena capacidad de arranque:** Los motores eléctricos DC tienen una buena capacidad de arranque y pueden arrancar con carga.

2.3.1.2 Componentes de los motores DC

Los principales componentes de los motores de corriente continua son:

- ✚ **Rotor:** El rotor es la parte móvil del motor eléctrico DC y está formado por un eje y un conjunto de bobinas de alambre de cobre.

- ✚ **Estator:** El estator es la parte fija del motor eléctrico DC y está formado por un conjunto de imanes permanentes o por una serie de electroimanes que generan un campo magnético.

- ✚ **Escobillas:** Las escobillas son componentes que hacen contacto con el conmutador y permiten que la corriente eléctrica fluya a través de las bobinas del rotor.

- ✚ **Conmutador:** El conmutador es un componente esencial del motor eléctrico DC y está formado por una serie de segmentos de cobre que están aislados entre sí. El conmutador permite que la corriente eléctrica fluya en la dirección correcta a través de las bobinas del rotor.

2.3.2 Motores AC

Los motores eléctricos de corriente alterna (AC), son una de las tecnologías más utilizadas en la industria debido a su eficiencia, fiabilidad y facilidad de mantenimiento.

En general, estos motores funcionan al convertir la energía eléctrica en energía mecánica mediante la interacción de los campos magnéticos generados por la corriente alterna que fluye a través de las bobinas del motor.

Existen diferentes tipos de motores de corriente alterna, entre ellos los motores asíncronos o de inducción, los motores síncronos y los motores de reluctancia conmutada.

En la figura N° 2.2 se puede ver un motor AC y los componentes que lo constituyen.

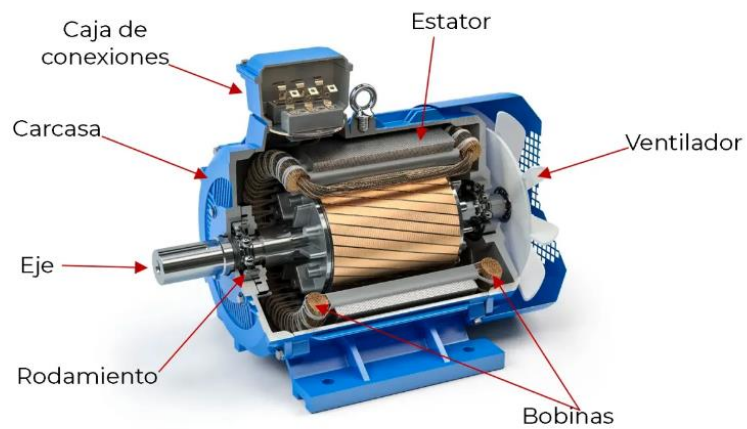


Figura N° 2.2: Motor AC.

Fuente: SE (2022).

2.3.2.1 Motores asincrónicos

Los motores asíncronos, también conocidos como motores de inducción, son uno de los tipos más comunes de motores eléctricos. Funcionan mediante la inducción electromagnética, donde la corriente alterna en el estator crea un campo magnético giratorio que induce corrientes en el rotor, generando así el torque necesario para la rotación.

Hay dos tipos principales de motores asíncronos:

✚ **Motor Asíncrono de rotor cortocircuitado (también conocido como motor jaula de ardilla):** En este diseño, el rotor está formado por barras conductoras cortocircuitadas entre sí, que forman una estructura similar a una jaula de ardilla. Cuando se aplica corriente al estator, se crea un campo magnético giratorio que induce corrientes en las barras del rotor, generando el torque necesario para la rotación.

✚ **Motor Asíncrono de rotor bobinado:** En este diseño, el rotor tiene bobinas de alambre enrolladas en sus ranuras en lugar de una jaula de ardilla. Las bobinas están conectadas a través de anillos deslizantes y escobillas al sistema eléctrico externo. Este tipo de motor permite un control más preciso de la velocidad y el torque, pero es más complejo y costoso de fabricar que el motor de jaula de ardilla.

Los motores asíncronos son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones industriales y comerciales debido a su simplicidad, robustez, bajo costo y facilidad de mantenimiento.

Son adecuados para una variedad de cargas y pueden funcionar en una amplia gama de condiciones ambientales.

En la figura N° 2.3 se puede ver un motor asíncrono y los componentes que lo constituyen.

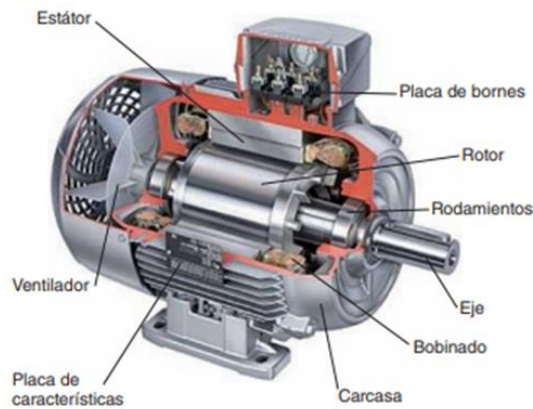


Figura N° 2.3: Motor asíncrono.

Fuente: UNLP (2022).

2.3.2.2 Motores sincrónicos

Los motores síncronos son otro tipo común de motor eléctrico. A diferencia de los motores asíncronos, en los cuales la velocidad de rotación del rotor tiende a ser ligeramente inferior a la velocidad del campo magnético rotativo del estator, en los motores síncronos la velocidad del rotor está sincronizada con la frecuencia del campo magnético del estator. Esto significa que la velocidad del rotor y la velocidad del campo magnético giratorio son idénticas, lo que da lugar al nombre "síncrono".

Hay varios tipos de motores síncronos, entre los cuales se incluyen:

- ✚ **Motores sincrónicos de imanes permanentes (PMSM):** Estos motores utilizan imanes permanentes en el rotor para generar el campo magnético. Son conocidos por su eficiencia y rendimiento constante a lo largo de una amplia gama de velocidades y cargas. Se utilizan en aplicaciones que requieren un control preciso de la velocidad, como en sistemas de tracción de vehículos eléctricos y en aplicaciones industriales.
- ✚ **Motores sincrónicos de reluctancia variable:** En estos motores, la reluctancia magnética del rotor es ajustable, lo que permite un control más fino sobre la velocidad y el torque. Son eficientes y pueden ofrecer un buen rendimiento a velocidades variables. Se utilizan en aplicaciones que requieren un control de velocidad preciso, como en sistemas de control de velocidad de maquinaria industrial y en vehículos eléctricos.
- ✚ **Motores síncronos de excitación eléctrica:** Estos motores tienen un devanado de excitación en el rotor que se alimenta con corriente continua para crear un campo magnético. Son utilizados en aplicaciones que requieren un alto par de arranque y una alta eficiencia a velocidades constantes, como en generadores y motores de tracción de trenes.

Los motores síncronos son adecuados para aplicaciones que requieren un control preciso de la velocidad y el torque, así como un rendimiento eficiente a lo largo de una variedad de condiciones de operación. Sin embargo, tienden a ser más costosos y complejos que los motores asíncronos. En la figura N° 2.4 se puede ver un motor síncrono y los componentes que lo constituyen.

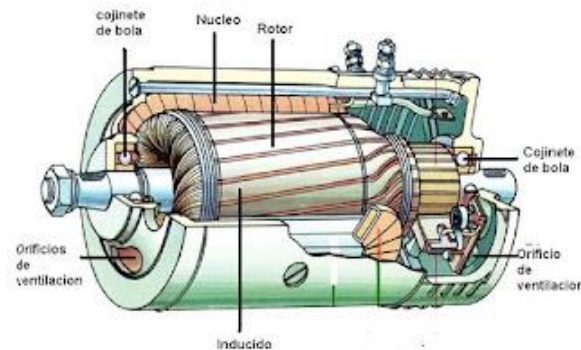


Figura N° 2.4: Motor síncrono.

Fuente: UNLP (2022).

La selección del tipo de motor AC dependerá de las características específicas de la aplicación, como el tipo de carga, la velocidad y el control de la velocidad requerido. Además, la eficiencia energética es un factor cada vez más importante en la selección del motor adecuado.

En resumen, los motores eléctricos AC son una tecnología clave en la industria y están disponibles en diferentes tipos y tamaños para adaptarse a diferentes aplicaciones. Su selección adecuada es crucial para garantizar una operación eficiente y confiable en una amplia gama de procesos industriales.

2.4 Principios de funcionamiento de motores eléctricos

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica, lo que los hace esenciales en la manufactura y en la vida diaria. Su uso se ha popularizado en gran medida debido a su eficiencia energética, bajo costo de mantenimiento y facilidad de operación.

Para comprender mejor los principios del funcionamiento de los motores eléctricos, es importante revisar la teoría electromagnética que los fundamenta.

En un motor eléctrico, se produce un campo magnético rotativo que interactúa con un conjunto de bobinas conductoras para generar un movimiento mecánico. Esto se logra mediante la interacción entre un campo magnético estacionario y un campo magnético rotativo que se produce a través de un electroimán. El electroimán es un conjunto de bobinas enrolladas alrededor de un núcleo de hierro, que se magnetizan mediante la corriente eléctrica que circula por ellas.

La interacción entre los campos magnéticos se rige por la ley de Lorentz, que establece que una carga eléctrica en movimiento dentro de un campo magnético experimenta una fuerza perpendicular a su dirección de movimiento y al campo magnético.

En un motor eléctrico, las bobinas del rotor están alimentadas con corriente eléctrica, lo que genera un campo magnético que interactúa con el campo magnético del estator, generando un movimiento mecánico en el rotor.

2.5 Características de funcionamiento de los motores eléctricos

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 N° 2.5 muestra el comportamiento y el funcionamiento de un motor de inducción típico en relación a la carga con la cual está trabajando.

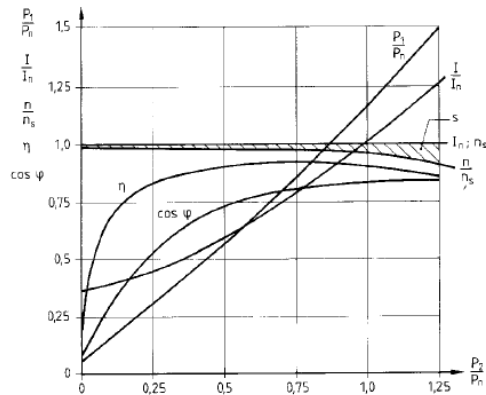


Figura N° 2.5: Características de funcionamiento de un motor de inducción en función de la carga

Fuente: UNLP (2022).

En donde:

- ✚ **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 ϕ** 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.

2.6 Control de velocidad de motores eléctricos

El control de velocidad de los motores eléctricos es un tema crucial en la ingeniería eléctrica y la automatización industrial. El control de velocidad es importante para optimizar la eficiencia energética, mejorar la precisión del control de movimiento y reducir el desgaste y la fatiga del motor.

Por lo tanto, los diseñadores de sistemas de control eléctrico deben seleccionar el método de control de velocidad adecuado para cada aplicación.

Uno de los métodos más comunes para controlar la velocidad del motor es el control de voltaje. Este método implica variar la tensión aplicada al motor para ajustar la velocidad. Sin embargo, el control de voltaje tiene limitaciones debido a la resistencia interna del motor y la caída de voltaje en los circuitos de control.

El control de frecuencia implica variar la frecuencia de la fuente de alimentación para controlar la velocidad del motor, y es más eficiente que el control de voltaje para motores de alta potencia.

Otro método de control de velocidad es el control de retroalimentación. En este método, se utiliza un sensor para medir la velocidad real del motor y se compara con la velocidad deseada para ajustar el controlador.

El control de retroalimentación es más preciso que los métodos de control de voltaje y frecuencia, pero también es más complejo. En resumen, el control de velocidad de los motores eléctricos es un aspecto importante del diseño de sistemas de control. Los diseñadores de sistemas eléctricos deben seleccionar cuidadosamente el método de control de velocidad adecuado para cada aplicación en función de la eficiencia energética, la precisión y la complejidad del sistema.

2.6.1 Instrumentación y sensores

La instrumentación y los sensores son elementos fundamentales en el monitoreo y control de los motores eléctricos.

La instrumentación se refiere a los dispositivos que se utilizan para medir y controlar las variables que afectan el rendimiento del motor eléctrico, mientras que los sensores son los dispositivos que se utilizan para detectar y medir las variables físicas que son relevantes para el funcionamiento del motor eléctrico.

La medición de variables como la velocidad, la corriente y la temperatura, son cruciales para el diseño de sistemas de control efectivos. Por ejemplo, la velocidad es una variable importante ya que indica el rendimiento del motor eléctrico, y por lo tanto, la eficiencia del sistema en el que se está utilizando.

De manera similar, la corriente y la temperatura son indicadores importantes del funcionamiento del motor eléctrico, y pueden ayudar a detectar cualquier problema antes de que se convierta en una falla mayor.

En la figura N° 2.6 se encuentra un diagrama de control con sus respectivos sensores medidores de corriente para motores de corriente alterna.

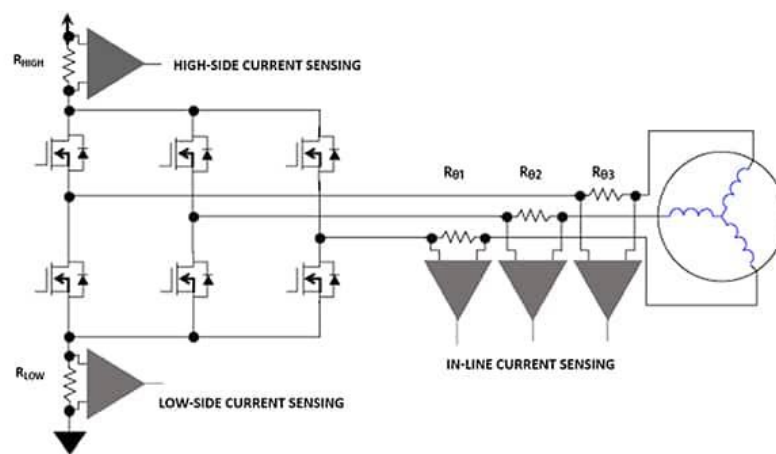


Figura N° 2.6: Sensores de corriente para motores AC.

Fuente: Digikey (2022)

La instrumentación y los sensores también son importantes para garantizar la seguridad del sistema eléctrico en el que se utiliza el motor.

Si las variables se salen de los límites seguros, se pueden producir fallos y daños en el sistema, así como también poner en peligro a las personas que están trabajando en él. En resumen, la instrumentación y los sensores son componentes clave en el monitoreo y control de motores eléctricos.

La medición de variables como la velocidad, la corriente y la temperatura, son esenciales para el diseño de sistemas de control efectivos y para garantizar la seguridad del sistema eléctrico. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la calidad de la instrumentación y los sensores utilizados en un sistema eléctrico, para garantizar su eficiencia y seguridad.

2.6.2 Sistemas de control

Los sistemas de control para motores eléctricos en procesos industriales son herramientas esenciales para garantizar la eficiencia y seguridad en la operación de estos. Estos sistemas están compuestos por diferentes componentes, tales como controladores de velocidad, variadores de frecuencia, relés de protección y sistemas de monitoreo remoto.

En la figura N° 2.7 hay un sistema de control HMI para motores de corriente alterna con todos los componentes que lo constituyen.

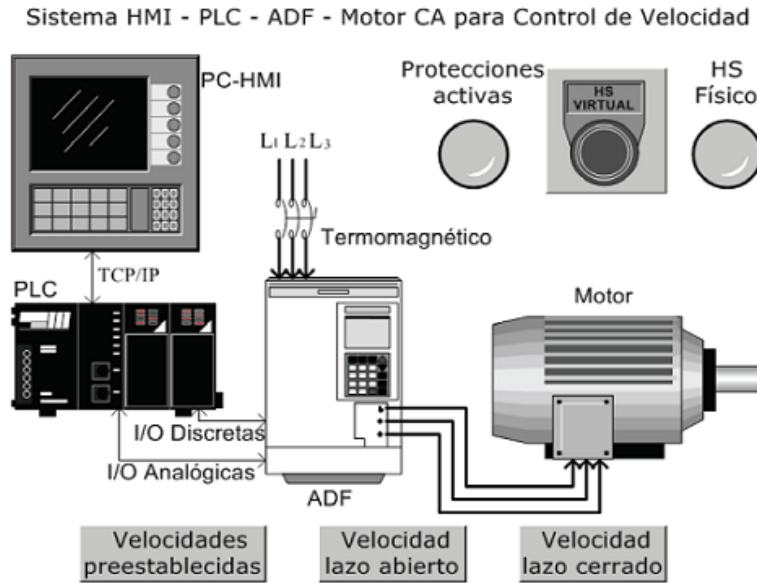


Figura N° 2.7: Sistema de control HMI - motor AC.

Fuente: Scielo (2018).

Los controladores de velocidad permiten ajustar la velocidad del motor eléctrico, lo que es esencial en procesos industriales que requieren un control preciso de la velocidad para garantizar la calidad del producto final. Por otro lado, los variadores de frecuencia permiten ajustar la frecuencia de la alimentación eléctrica al motor, lo que puede ayudar a reducir el consumo de energía y prolongar la vida útil del motor.

Los relés de protección son dispositivos que se encargan de detectar cualquier anomalía en el funcionamiento del motor, como sobrecalentamiento, sobreintensidad o cortocircuitos, y desconectarlo automáticamente para evitar daños mayores.

Por último, los sistemas de monitoreo remoto permiten supervisar el funcionamiento del motor desde una ubicación remota, lo que puede ser especialmente útil en procesos industriales que requieren una supervisión constante.

El diseño de estos sistemas de control debe tener en cuenta las características específicas del motor y del proceso industrial en el que se utilizará. Esto implica considerar factores como la potencia del motor, el tipo de carga a la que estará sometido, las condiciones ambientales en las que se encuentra y los requerimientos específicos del proceso. En resumen, los sistemas de control para motores eléctricos en procesos industriales son fundamentales para garantizar la eficiencia y seguridad en la operación de estos. La selección adecuada de los componentes y el diseño cuidadoso del sistema son cruciales para asegurar un funcionamiento confiable y eficiente del motor eléctrico.

CAPÍTULO III

MOTORES EN LA PLANTA SAN JOSÉ DE PUCOBRE

Los motores eléctricos son componentes esenciales para la mayoría de los procesos productivos en la minería, en Pucobre esto no es excepción y estos juegan un papel fundamental para que las metas operacionales se cumplan.

Los motores analizados en este proyecto son de la propiedad de la planta concentradora de cobre San José (PSJ), y están ubicada a 2 km de la localidad de Tierra Amarilla.

3.1 Procesos utilizados en la planta San José

En esta planta san José se realiza el procesamiento de minerales sulfurados de cobre mediante la aplicación del proceso convencional de concentración por flotación. Su capacidad actual de procesamiento es de 10 kt (kilo tonelada) de mineral promedio diario anual.

El proceso productivo de la planta san José, se puede separar en dos grandes etapas, las cuales se describen a continuación:

3.1.1 Proceso 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 de 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-harneado y chancador terciario.

Desde aquí, de acuerdo con su tamaño o granulometría, se selecciona el material que será derivado a pilas de lixiviación o al proceso de flotación.

3.1.2 Proceso de 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.

3.2 Equipos instalados en planta san José

La lista general de equipos instalados cuenta con un total de 166, de los cuales 33 equipos son de condición Stand-by (que entran en operación sólo en condiciones especiales), es decir, se tienen 133 equipos que están operando en régimen normal de la planta.

Con respecto a la potencia instalada de los equipos 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 11844 kW, es decir, casi 12 MW, frente a los 30 MW que representa la potencia total instalada de la planta.

Esto representa un 40 % 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, chancado etc.

En la tabla N° 3.1 se puede observar la potencia utilizada por los motores eléctricos en la planta San José.

Tabla N° 3.1: Descripción de la potencia instalada

EQUIPOS	POTENCIA MW
Motores > 200 HP	10 MW
Motores <=200 HP	2 MW
Otros	18 MW
Total	30 MW

En este proyecto en total se presentan 166 motores, los cuales como se dijo anteriormente, representan cerca de 30 MW de potencia instalada de la planta.

En la tabla N° 3.2 se puede ver el detalle de la distribución de las cargas según su potencia y la cantidad de motores.

Tabla N° 3.2: Detalle de motores instalados (cantidad y potencia).

DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA INSTALADA MOTORES		
Motores	Numero de motores por rango de potencia	Potencia instalada KW
[0-200] HP	121	922 KW
[200-500] HP	35	4.139 KW
[500-1000] HP	2	1.233 KW
Mas de 1000 HP	8	5.550 KW
Total	166	11.844 KW

A raíz de la tabla N° 3.2 se realizó una gráfica con la distribución de las potencias de los motores instalados en la planta san José, esta información servirá también para realizar una gráfica con la cantidad de motores utilizados en la planta.

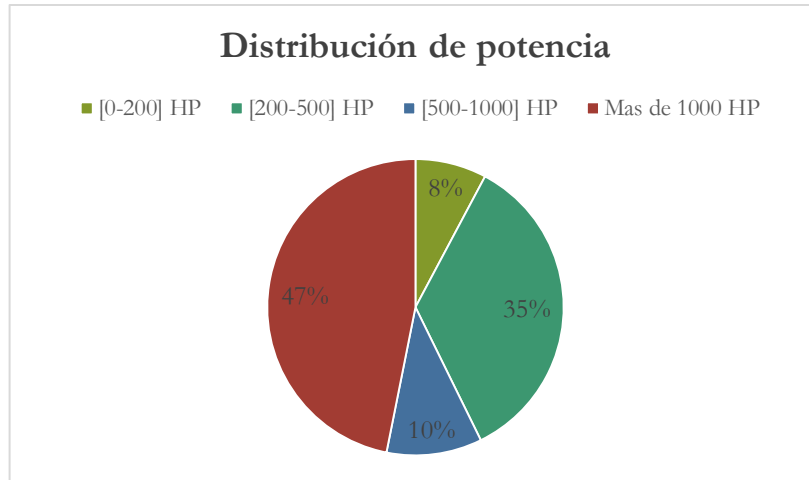


Figura N° 3.1: Gráfico de distribución de potencia instalada en motores.

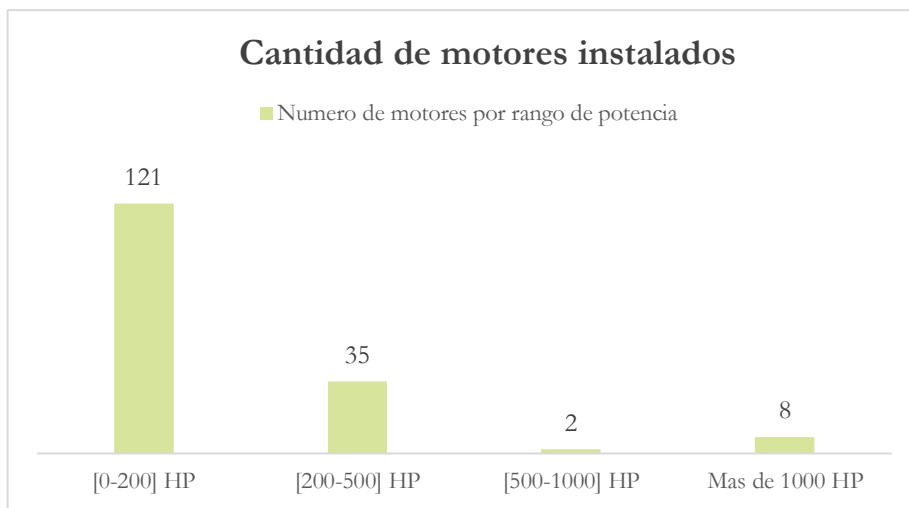


Figura N° 3.2: Gráfico de cantidad de motores instalados.

3.3 Selección de los motores a analizar

Los fabricantes de motores, por lo general ofrecen motores de 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 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, se calcularán tanto el consumo de energía, como el gasto en dinero por este concepto, así como los ahorros posibles al ocupar motores IE3 en vez de IE2.

3.4 Clasificación según equipo utilizado

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 planta san José.

En particular, en este proyecto los equipos con mayor potencia instalada son los chancadores, los molinos, las bombas y las correas estos consumos representan un 80 % del total de potencia instalada en motores de baja tensión.

En la figura N° 3.3, se refleja la potencia utilizada por los equipos con mayor consumo en baja tensión de la planta San José.

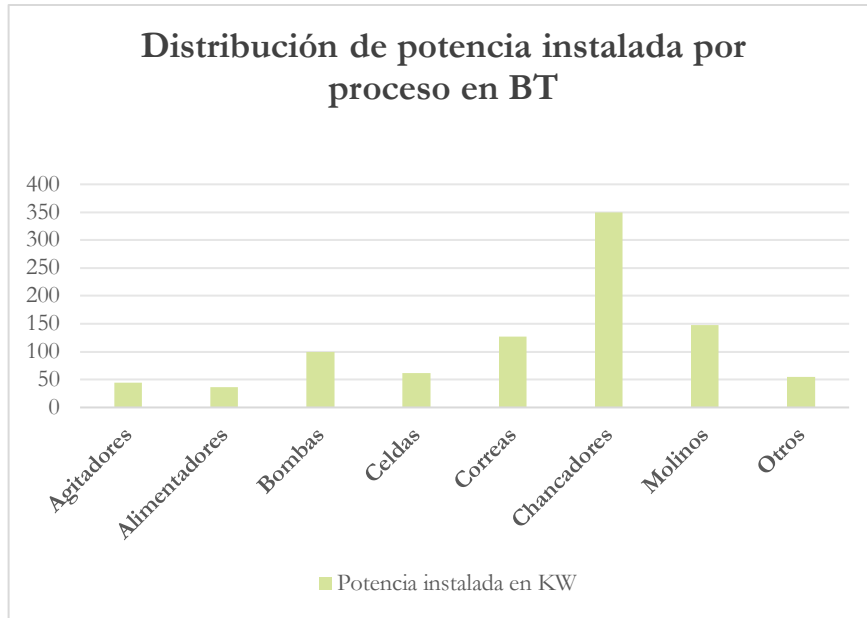


Figura N° 3.3: Gráfico de cantidad de potencia instalada por proceso productivo en sólo motores de baja tensión, en motores menores a 200 HP

Los datos obtenidos para realizar el gráfico de la figura N° 3.3 se obtuvieron de la tabla N° 3.3, en esta tabla se da a conocer la potencia que consumen los equipos de producción menores a 200 HP en la planta san José.

La tendencia anterior es extrapolable a cualquier operación minera de estas características, ya que los chancadores y los molinos son los equipos más grandes y más robustos de la planta. El alto consumo de potencia de las correas y de las bombas se debe a que ambos equipos están encargados de transportar grandes cantidades de sólidos o líquidos, lo cual requiere una gran cantidad de potencia mecánica. 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 8 % 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), transporte de material sólido (correas transportadoras), chancado y molienda.

Tabla N° 3. 3: Cantidad de potencia instalada por proceso productivo en motores de baja tensión.

Distribución de potencia instalada por proceso en BT	
Equipos	Potencia instalada en kW
Agitadores	44 kW
Alimentadores	36 kW
Bombas	100 kW
Celdas	62 kW
Correas	127 kW
Chancadores	350 kW
Molinos	148 kW
Otros	55 kW
Total	922 kW

CAPÍTULO IV

MOTORES SOBREDIMENSIONADOS EN PROCESOS INDUSTRIALES

El sobredimensionamiento de un motor no es más que la utilización de un motor de más potencia a la mínima potencia nominal necesaria. Existen una serie de factores causantes del sobredimensionamiento de motores. Los factores principales son los siguientes:

- ✚ **Diseño de un sistema conservador:** A la hora de elegir un motor normalmente se suele enfocar en base a dos criterios. Estos criterios son el criterio estático del caso más desfavorable o del criterio térmico. Por un lado, el criterio estático consiste en determinar la potencia nominal mediante una potencia que garantice que el motor nunca estará sobrecargado. Por lo tanto, esto garantiza que la temperatura siempre sea menor a la temperatura máxima. Por otro lado, en el criterio térmico, se determina la potencia nominal mediante una potencia que garantice que el calentamiento o la temperatura no exceda los límites del aislamiento.
- ✚ **Factores de seguridad:** Debido a la incertidumbre de la carga, siempre se opta por dimensionar en un tanto por ciento la potencia necesitada.
- ✚ **Potencia discreta:** En numerosas ocasiones, se realiza una serie de cálculos para decidir sobre la instalación de un motor. Sin embargo, en el catálogo de motores solo hay unos valores de potencias nominales estandarizadas. Por lo tanto, se tiene que optar por elegir la potencia nominal del catálogo inmediatamente superior a la potencia calculada. Por esto, actualmente el factor de carga medio se encuentra en torno al 60 %. Típicamente, los valores de la carga mecánica que hacen un motor funcione con su máxima eficiencia (mínimas pérdidas), se producen con un factor de carga entre un 60 % y 100 %, dependiendo de la potencia nominal, la clase de eficiencia y la marca. También cabe destacar cómo los valores del motor pueden variar con respecto al valor que aparece en su placa de características. Para evitar

dificultades, la normativa IEC 60034-1 definió la tolerancia. La tolerancia es la desviación máxima permitida entre el resultado de la prueba y el valor declarado en la placa de características. En la tabla N° 4.1 se resumen los valores o porcentajes en los cuales puede variar esas características.

Tabla N° 4.1: Tolerancias admisibles para motores de inducción

	Eficiencia	Factor de potencia	Intensidad rotor bloqueado	Par rotor bloqueado	Par mínimo	Momento de inercia	Nivel de ruido
Pn(kW)<150	-15%	-1/6	+20% de la corriente	(-15% + 25%)	-15% de su valor	+10% de su valor	3dB

4.1. Tipo de motores según su eficiencia

Los motores son máquinas que convierten energía eléctrica en mecánica. Al ser máquinas no son perfectas, por lo tanto, tienen pérdidas en la conversión de energía. La potencia eléctrica absorbida por el motor, no se transforma completamente en potencia mecánica, debido a una serie de factores tanto mecánicos, eléctricos y magnéticos.

En los países desarrollados, mediante acciones políticas el mercado de motores se está moviendo paulatinamente a las clases de alta eficiencia. Sin embargo, en los países menos desarrollados y emergentes esas acciones no se están produciendo, debido a barreras financieras y otras. Por lo que, en ausencia de política que apuesten por la energía eficiente, se está produciendo que en los países menos desarrollados se usen los motores más baratos y antiguos, es decir, los motores de baja eficiencia.

Actualmente en el mercado hay cuatro clases de eficiencia.

Tres de ellas, se definieron en IEC/EN 60034-30:2008 y la última, la clase con mayor eficiencia en el IEC/TS 60034-31 para motores trifásicos de inducción con una sola velocidad. Los rendimientos de estos motores se determinan mediante complejos métodos de ensayo descritos por IEC/EN 60034-2-1:2007. Sin entrar en mayor detalle de las normativas anteriormente mencionadas, las clases de eficiencia para motores son las siguientes:

- ✚ IE1: Eficiencia estándar.
- ✚ IE2: Alta eficiencia.
- ✚ IE3: Eficiencia Premium.
- ✚ IE4: Eficiencia Super Premium.

Siendo IE1 la clase de eficiencia con menor rendimiento y la IE4 la de mayor eficiencia.

4.2 Ventajas e inconvenientes del sobredimensionamiento de motores

Se definió el sobredimensionamiento de un motor como la utilización de un motor de más potencia a la mínima potencia nominal necesaria. Esto provoca una serie de ventajas y por supuesto, una serie de inconvenientes. Entre los inconvenientes del sobredimensionamiento se destacan los siguientes:

- ✚ Un mayor costo de adquisición, instalación y puesta en marcha del motor.
- ✚ Mayor costo de equipamiento de protección de circuito.
- ✚ Peor rendimiento debido al funcionamiento con carga parcial.
- ✚ Menor factor de potencia, debido al funcionamiento con carga inferior a la nominal.
- ✚ Mayores costos de operación, producto del funcionamiento con peor rendimiento (mayores pérdidas) y peor factor de potencia.

Sin embargo, estos inconvenientes pueden llegar a ser compensados por las ventajas, ya que, en las curvas de los motores, se da el caso que el rendimiento sea mayor para un factor de carga menor al 100 %.

Como se observa en la figura N° 4.1 a medida que aumenta la potencia nominal, es menos visible la diferencia del sobredimensionamiento llegando en muchos casos a tener el mayor rendimiento cuando el motor no opera a plena carga. Por lo tanto, en esos casos los inconvenientes son totalmente compensados con las grandes ventajas de sobredimensionar un motor desde el punto de vista técnico.

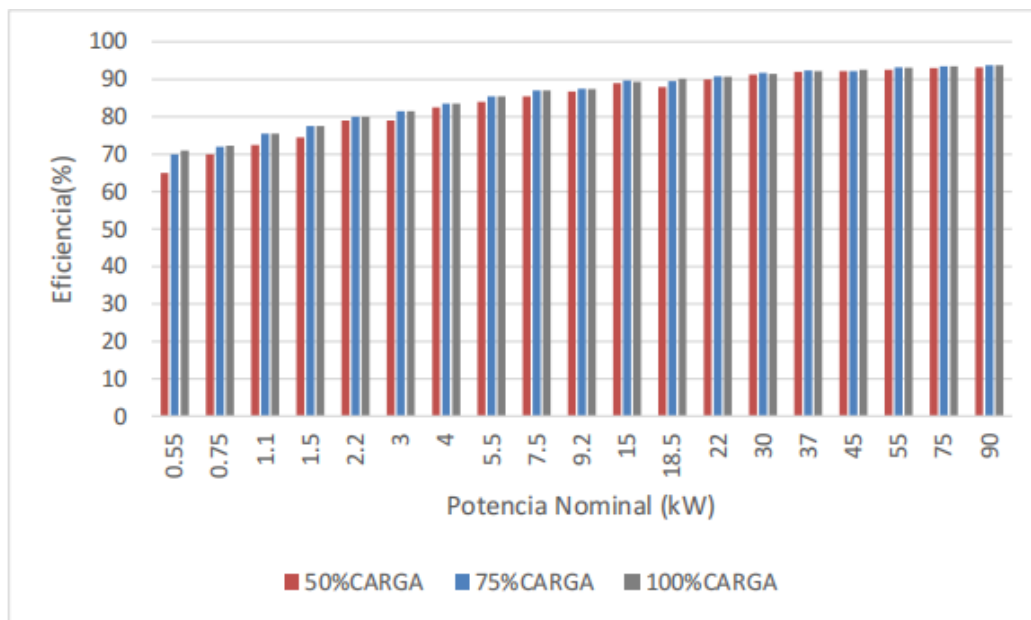


Figura N° 4.1: Rendimiento motor de inducción a diferentes potencias y cargas

Otra gran ventaja de sobredimensionar un motor es la temperatura de operación, ya que esta es menor, por lo que aumenta la vida útil del motor.

El principal problema de mantenimiento que sufre un motor se centra en el desgaste de los cojinetes, y en el estator, estos problemas son puramente mecánicos y producidos por el uso.

Por otro lado, es importante conocer cuál es el propósito de uso del motor, ya que para algunas aplicaciones de arranque-parada, aplicaciones de aceleración y desaceleración constantes y/o aplicaciones que tengan ciclos de inversión de dirección de rotación entre otras, si el motor está sobredimensionado se puede aprovechar la mayor inercia del rotor.

Otra característica destacable, es que para una curva de carga par-velocidad dada, cuanto mayor sea la potencia nominal del motor, mayor será la potencia mecánica del eje debido a que tendrá un deslizamiento inferior.

CAPÍTULO V

MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

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 motores NEMA diseño B.

5.1 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.

Al hacer la conversión, el mismo motor absorbe cierta cantidad de energía, es decir, se pierde energía.

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

5.2 Plan nacional de eficiencia energética

La eficiencia energética implica una reducción en la cantidad de energía utilizada para proporcionar bienes o servicios. El ahorro de energía está en el centro de los múltiples beneficios de la eficiencia energética y está vinculado a muchos otros beneficios económicos, sociales y ambientales.

La Ley 21.305 sobre Eficiencia Energética, primera en su tipo en nuestro país, fue publicada en el Diario Oficial el día 13 de febrero de 2021.

En su primer artículo, la ley mandata al Ministerio de Energía a elaborar el primer plan Nacional de Eficiencia Energética, que se actualizará cada cinco años. La preparación de este plan, indica la ley, se debe realizar en colaboración con otros ministerios y contar con participación ciudadana.

Este plan ha sido desarrollado con un amplio proceso participativo, y cubre todos los aspectos indicados por la ley, que entre ellos destacan: la definición de metas de reducción de intensidad energética en el corto, mediano y largo plazo, así como también medidas para los distintos sectores que consumen energía en el país y que nos permitirán alcanzar dichas metas.

Por ello, el Plan Nacional de Eficiencia Energética toma aun mayor relevancia, y se inserta en los planes para combatir el cambio climático.

El PAEE 22-26 (Plan Nacional de eficiencia energética), se dividen en 3 sectores: Industrial y minería (38%), Transporte (36%) y residencia, público y comercial (22%) consumo que en su conjunto generan la emisión de 303.153 toneladas de Co2 aproximadamente, una cifra altamente preocupante, más frente a los esfuerzos que se están llevando a cabo para poder disminuirlas.

Debido al significativo aumento que ha tenido el consumo final de energía entre 2010 y 2019 (+21%) es que con el lanzamiento de la Ley se estableció que el primer plan que se generara en el país contemplara una meta de reducción de intensidad energética de al menos un 13% al 2030, sin embargo, esta meta aumentó a un 30% para el año 2050.

Si bien Chile ha mantenido una intensidad energética por debajo del promedio mundial, aún existe una brecha importante, entre un 45 % y un 55 % para alcanzar la intensidad energética que logran países de la OCDE o países que forman parte de la Unión Europea (UE). Por lo anterior el Plan contempla las siguientes metas de reducción de intensidad: 4,5% para el año 2026, 13 % para el año 2030 y 25 % para el año 2050.

Para poder llevar a cabo este Plan de la manera más expedita y ordenada posible es que se ha dividido en cuatro sectores, para los cuales se definió un conjunto de medidas y metas específicas a alcanzar.

5.2.1 Sectores productivos industriales y de minería

En primer lugar se encuentran los sectores productivos, para el cual se han establecido 4 medidas, entre las que se encuentran la implementación de sistemas de gestión de energía en grandes consumidores, la facilitación de implementación de sistemas de gestión de energía en pequeñas y medianas empresas, la actualización del estándar mínimo de eficiencia energética para motores eléctricos y el fortalecimiento de la formación de especialistas en eficiencia energética para los sectores productivos.

Con estas medidas se pretende lograr la reducción de un 4% en la intensidad energética de los grandes consumidores al 2026 y un 25 % para el año 2050, esto respecto al año 2021.

5.2.2 Sectores de transporte

Para el sector de transporte también se han establecido 4 medidas, entre las que destacan: la aceleración del despliegue de medios de transporte sustentable y eficientes, el establecimiento de estándares de eficiencia energética para vehículos livianos, medianos y pesados, impulsar a la industria nacional mediante el fomento de la

investigación e innovación en el transporte eficiente y cero emisiones y el desarrollo de condiciones habilitantes para la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

Con esto se pretende duplicar el rendimiento de los vehículos nuevos que entran al país al año 2050, esto respecto al año 2019 y cuadruplicar el rendimiento de los vehículos livianos nuevos que entran al país al 2050, respecto al año 2019.

5.2.3 Sectores de edificación

El sector de edificaciones también cuenta con 4 medidas, entre las que se encuentran: el impulso a la renovación energética del sector edificación, la actualización de estándares de eficiencia energética de las edificaciones, el fomento al reacondicionamiento térmico de viviendas existentes y la implementación de eficiencia energética en edificios públicos.

El objetivo de estas medidas aspira a que las nuevas viviendas logren un ahorro promedio de 30 % en su demanda de energía térmica al año 2026 y un 50 % al año 2050

5.2.4 Sectores de ciudadanía

Para este sector se han establecido 4 medidas, entre las que se encuentran: el fortalecimiento del programa educativo energía y sostenibilidad, la difusión de información ciudadana sobre la relevancia del buen uso de la energía para la ciudadanía, la actualización y ampliación del etiquetado de artefactos y la actualización y ampliación de estándares mínimos de eficiencia energética para artefactos.

Estas medidas pretenden que el 70 % de las principales categorías de artefactos y equipos que se venden en el mercado correspondan a equipos energéticamente eficientes al año 2035, mientras que correspondan al 100 % para el año 2050.

5.3 Normas sobre niveles de eficiencia de motores eléctricos

La norma NEMA (National Electrical Manufacturers Association) es una organización que establece estándares para la fabricación y rendimiento de equipos eléctricos y electrónicos.

Los estándares NEMA son ampliamente reconocidos y utilizados en la industria eléctrica y electrónica de los Estados Unidos y en otros lugares del mundo. Estos estándares pueden cubrir aspectos como dimensiones físicas, características de funcionamiento, requisitos de seguridad y eficiencia de motores eléctricos.

La norma NEMA desempeña un papel fundamental en la estandarización de los equipos eléctricos, asegurando su compatibilidad, seguridad y eficiencia. Su reconocimiento internacional la convierte en una referencia clave para fabricantes y usuarios, facilitando la calidad y el desempeño uniforme de los motores eléctricos y otros dispositivos en diversas aplicaciones industriales.

5.4 Naturaleza de las pérdidas en los motores eléctricos

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 4 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.

5.4.1 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). Estas 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.

✚ **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.

5.4.2 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, estas pérdidas dependen del flujo máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

5.4.3 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.

5.4.4 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 estas 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.

5.5 Incremento de la eficiencia

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 tabla N° 5.1

Tabla N° 5.1: Relación entre aumento de eficiencia y disminución de pérdidas

HP	Eficiencia original %	Incremento de eficiencia %	Disminución de las pérdidas requeridas %
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

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 estas 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.

CAPÍTULO VI

ANÁLISIS DE RESULTADOS

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 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.

En general, el comportamiento detallado de un motor, está dado por los parámetros de su 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 más precisos.

Es por este motivo, que en el capítulo VI también se desarrollará un script en el software MATLAB, que permita calcular de manera fácil dichos parámetros.

6.1. Motores a estudiar

El estudio pretende establecer una comparación técnica y detallada entre el rendimiento de motores eléctricos de eficiencia estándar y motores de alta eficiencia. Este contraste se realiza con el fin de evidenciar las diferencias en desempeño, consumo energético y características técnicas relevantes entre ambos tipos de motores.

Para llevar a cabo esta comparación, se recopilaron datos técnicos a partir de diversos catálogos oficiales pertenecientes a la reconocida marca General Electric. La elección de esta marca se fundamenta en su prestigio internacional, así como en la disponibilidad y calidad de la información técnica, lo que permite una base de análisis confiable y representativa.

Dentro del universo de motores disponibles, se seleccionó un grupo de 14 modelos que cumplen con criterios específicos de potencia, comprendida entre un mínimo de 11 kW y un máximo de 200 kW. Esta gama de potencias se eligió debido a que abarca un espectro comúnmente utilizado en aplicaciones industriales presentes en faenas mineras.

Los datos recopilados se presentan en dos tablas que permiten una comparación directa. La tabla N° 6.1 contiene la información técnica correspondiente a los motores de alta eficiencia, por otro lado, la tabla N° 6.2 presenta las características de los motores de eficiencia estándar, que representan el nivel básico de rendimiento exigido por la normativa, sin incorporar mejoras adicionales en diseño o materiales que optimicen su eficiencia.

Estas tablas incluyen parámetros como la potencia nominal, eficiencia energética, corriente de operación, factor de potencia, velocidad nominal, entre otros, permitiendo así un análisis detallado de las diferencias entre ambos grupos de motores. Esta información será fundamental para evaluar los beneficios técnicos y económicos de adoptar motores de alta eficiencia en procesos industriales críticos.

Tabla N° 6.1: información del catálogo de la marca la marca General Electric para motores eficiencia alta.

Potencia KW	Velocidad nominal RPM	Eficiencia			Factor de potencia	Corriente		Torque		
		100%	75%	50%		I nom	I part/In	Tn	Tpar/Tn	Tmax/Tn
11	1470	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	94.9	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	781	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	887	7.9	1024	2.7	3
200	1490	96.5	96.5	96.3	0.87	343	7.6	1281	2.5	2.9

Tabla N° 6.2: información del catálogo de la marca la marca General Electric para motores de eficiencia estándar.

Potencia KW	Velocidad nominal RPM	Eficiencia			Factor de potencia	Corriente		Torque		
		100%	75%	50%		I nom	I part/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	91.4	92.9	92.	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	1497	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	91.4	95	94.7	0.85	98.9	6.9	354	2.6	2.9
75	1484	94.5	94.5	93.9	0.85	134	7.2	482	2.5	2.8
90	1493	94.7	94.8	94.9	0.86	159	7.2	579	2.5	2.7
110	1497	95.1	95.1	94.3	0.86	197	7.1	706	2.3	2.5
132	1497	95.4	95.4	94.7	0.86	232	7.1	847	2.4	2.7
160	1497	95.6	95.6	95.1	0.85	284	7.2	1027	2.5	2.9
200	1486	95.6	95.6	95.3	0.86	351	7.2	1285	2.5	2.9

6.2 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:

6.2.1 Eficiencia

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 N° 6.1, 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 con diversos estudios, pueden alcanzar varias veces el costo de un motor.

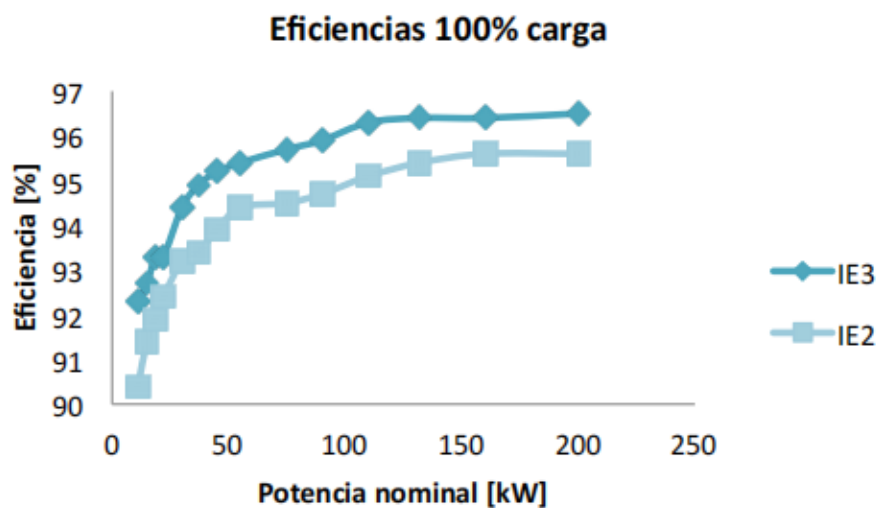


Figura N° 6.1: Gráfica de eficiencia versus potencia nominal.

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 del circuito 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.

6.2.2 Velocidad nominal

Con respecto a la velocidad se puede decir que los motores más eficientes en general presentan menores deslizamientos que los de eficiencia más 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 y se ve reflejado en la figura N° 6.2, alcanzando en este caso una diferencia de casi 10 RPM.

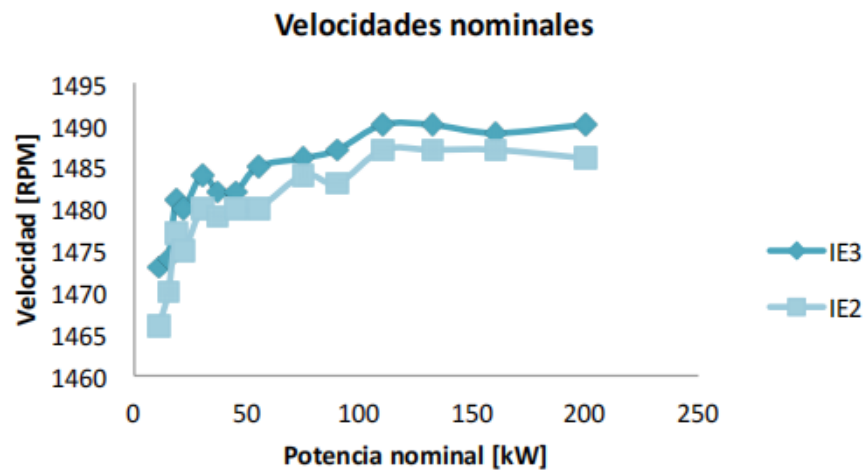


Figura N° 6.2: Gráfica de velocidad nominal versus potencia nominal.

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 más detalladamente, con el fin de estudiar la conveniencia o la posible incorporación de un variador de frecuencia.

6.2.3 Factor de potencia

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.

En la figura N° 6.3 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.

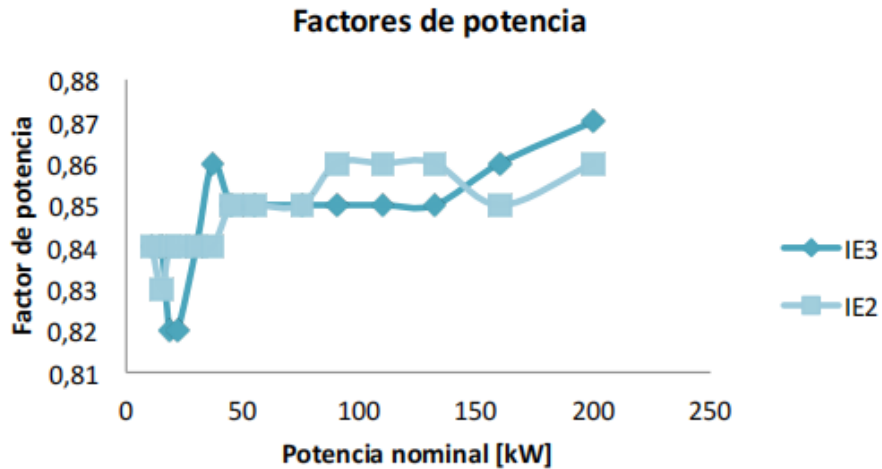


Figura N° 6.3: Grafica de factor de potencia versus potencia nominal

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.

6.2.4 Corriente de partida

Es posible establecer claramente que los motores de eficiencia superior presentan mayores corrientes de partida frente a su par de más baja eficiencia, esto queda reflejado en la figura N° 6.4.

Los motores de eficiencia Premium presentan en promedio una corriente de partida 7,84 veces la corriente nominal, mientras que los motores de más 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.

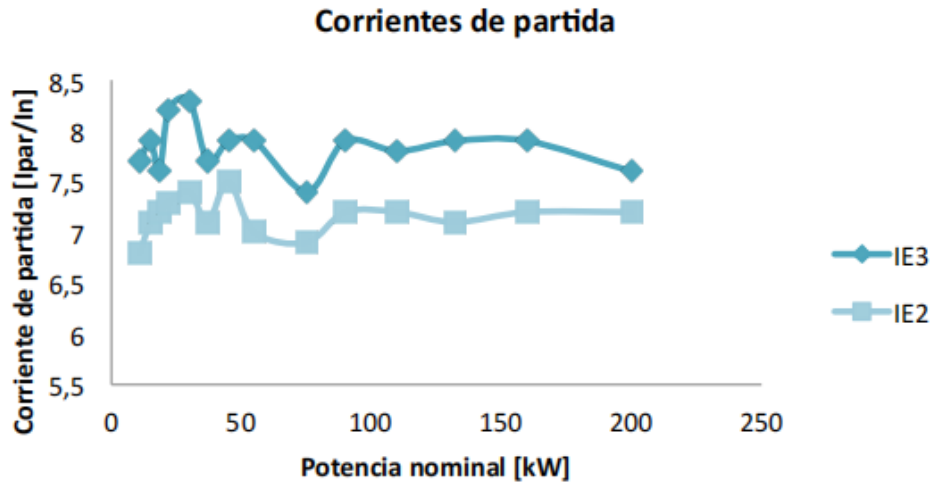


Figura N° 6.4: Gráfica de corriente de partida versus potencia nominal

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.

CAPÍTULO VII

MODELAMIENTO

El modelamiento de circuitos eléctricos y electrónicos mediante software constituye una práctica esencial en el ámbito de la ingeniería, ya que permite analizar, diseñar y optimizar sistemas sin necesidad de recurrir de manera inmediata a la construcción física de prototipos. A través de entornos de simulación, es posible representar matemáticamente el comportamiento de los componentes y las interacciones entre ellos, obteniendo resultados confiables que facilitan la verificación previa de un diseño.

De igual forma, el uso de software de simulación contribuye a favorecer la comprensión de fenómenos eléctricos a través de representaciones gráficas y análisis comparativos que resultan difíciles de obtener en un laboratorio convencional.

7.1 Análisis de circuito equivalente

En la figura N° 7.1 se muestra el circuito equivalente de un motor de inducción simple. Este 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 estudiada en esta sección.

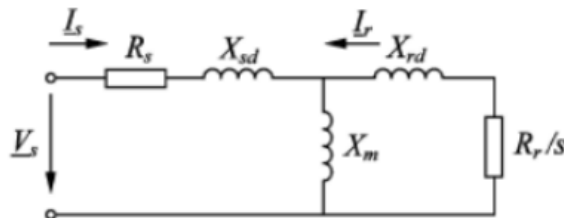


Figura N° 7.1: Circuito equivalente de un motor de inducción.

Donde:

- ✚ R_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.

El presente modelo es ampliamente usado por tener un buen comportamiento para velocidades altas, es decir, cercanas a la nominal.

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:

$$X_r = X_s$$
$$R_s = 0,5 * R_r$$

7.1.1 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. Existe un gran número de investigaciones con respecto a este 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, 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.

7.1.2 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 $F(x) = 0$.

$$f_1(x) = P_n - P_{sn} = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 7.1})$$

$$f_2(x) = PF_n - PF_{sn} = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 7.2})$$

$$f_3(x) = T_m - T_{sm} = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 7.3})$$

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.

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 de este 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:

$$\varepsilon = \sqrt{\sum ifi^2} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.4)$$


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_m, X_s) , son calculados según las siguientes ecuaciones:

$$P_n \cong \frac{3Vs^2}{\frac{R_r}{S_{FL}}} \Rightarrow R_r \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.5)$$

$$Q_n \cong \frac{3Vs^2}{X_m} \quad X_m \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.6)$$

$$X_s = 0.05 * X_m \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.7)$$

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 FP_{nom} .
- ✚ Torque máximo T_m .

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

- Frecuencia síncrona: $\omega_s = (2\pi n_s)/60$ **(Ec. N° 7.8)**
- Deslizamiento nominal: $S_{nom} = 1 - \frac{n_m}{n_s}$ **(Ec. N° 7.9)**
- Impedancia de rama shunt: $Z_{sh} = jX_m$ **(Ec. N° 7.10)**
- Impedancia total estator: $Z_1 = R_s + jX_s$ **(Ec. N° 7.11)**
- Impedancia total rotor: $Z_2 = \frac{R_r}{S_{nom}} + jX_r$ **(Ec. N° 7.12)**
- Impedancia de entrada: $Z_{in} = Z_1 + \frac{Z_{sh}}{Z_2}$ **(Ec. N° 7.13)**
- Corriente de estator: $I_s = \frac{V_s}{Z_{in}}$ **(Ec. N° 7.14)**
- Corriente de rotor: $I_r = \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_2} * I_s$ **(Ec. N° 7.15)**

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

$$P_{sn} = 3 R_r * \frac{(1 - S_{nom})}{S_{nom}} * I_r^2 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.16)$$

$$PF_{sn} = \cos [\text{ángulo } (Z_{in})] \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.17)$$

$$T_{sm} = \frac{3}{2W_s} * \frac{V_s^2}{\sqrt{R_s^2 + ((X_s + X_m)^2)}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.18)$$

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

$$f_1(x) = P_n - 3R_r \frac{(1 - S_{nom})}{S_{nom}} * I_r^2 = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.19)$$

$$f_2(x) = PF_n - \cos [\text{ángulo } (Z_{in})] = 0 \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.20)$$

$$f_3(x) = T_m - \frac{3}{2W_s} * \frac{V_s^2}{\sqrt{R_s^2 + ((X_s + X_m)^2)}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 7.21)$$

7.1.3 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 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;
Z1=Rs+i*Xs;
Z2=(Rr/snom) + i*Xr;
Zin=Z1+((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. 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.

7.1.4 Algoritmo programado para calcular parámetros de motores de inducción

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

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 figura N° 7.2.

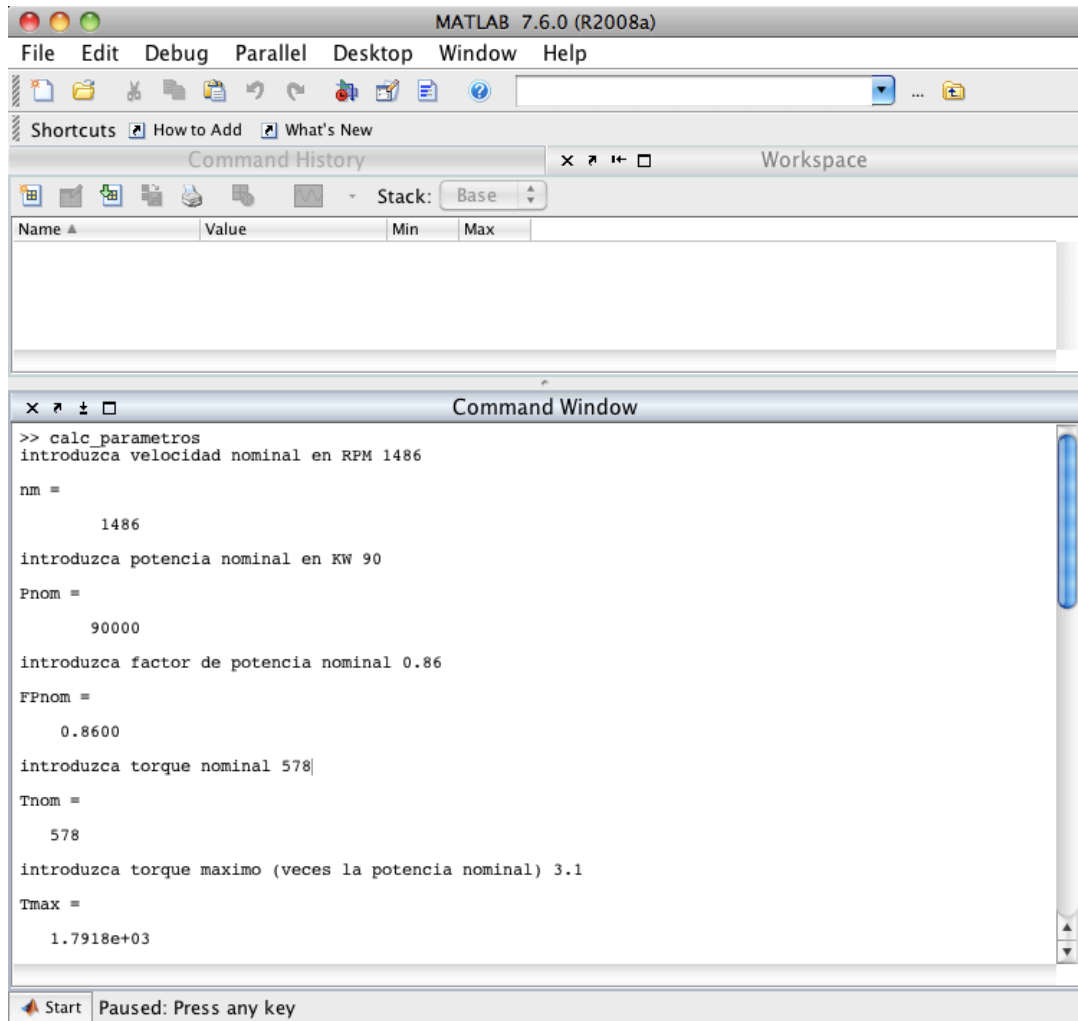


Figura N° 7.2: Entrada de datos de algoritmo de cálculo de parámetros.

Al hacer el ingreso de dichos datos, el programa mostrará en la ventana de salida las condiciones iniciales calculadas para dicho problema, tal como lo muestra la figura N° 7.3.

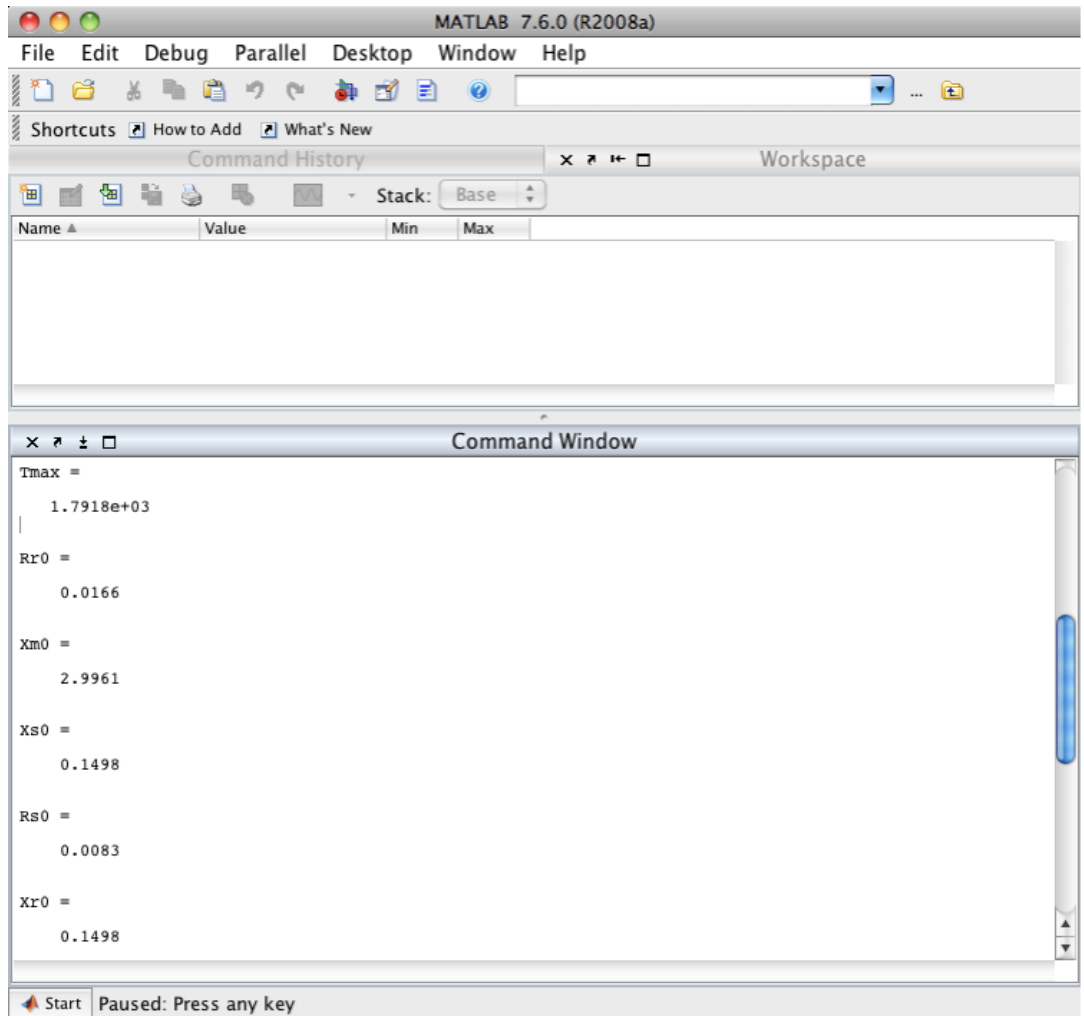


Figura N° 7.3: Entrega de punto inicial de iteración en algoritmo de cálculo de parámetros.

Automáticamente comenzará el proceso de iteración. Si la solución converge, el sistema lo notificará y mostrará el resultado, como lo muestra la figura N° 7.4.

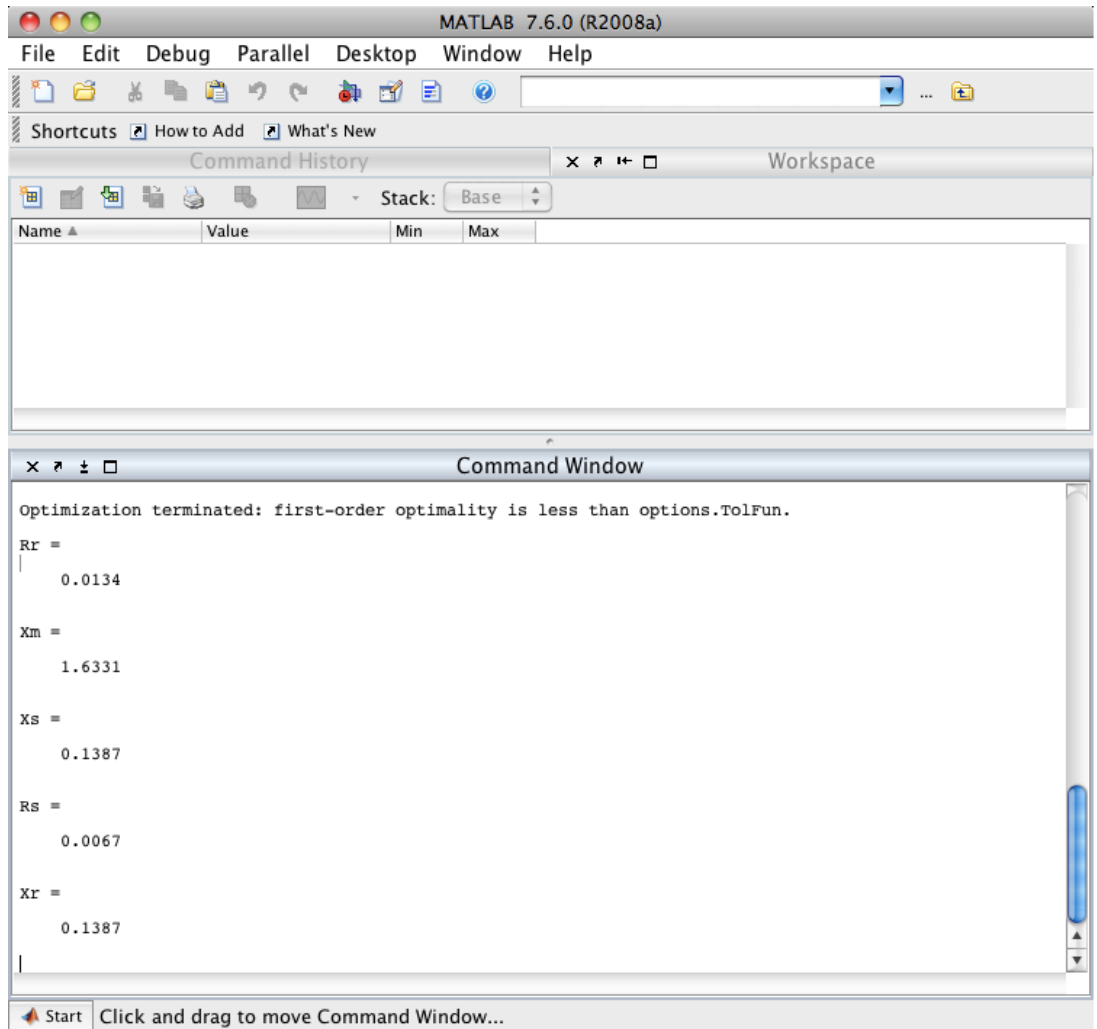


Figura N° 7.4: Entrega de resultados de algoritmo de cálculo de parámetros.

7.2 Análisis comparativo de parámetros de motores

A continuación, en la tabla N° 7.1 se mostrarán los parámetros obtenidos de motores de alta eficiencia y lo de eficiencia estándar, de tal manera de efectuar una comparación de ambos

Tabla N° 7.1: Comparación de parámetros de motores eff1 y eff2.

Comparacion de parámetros						
Potencia	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	102,3	104,5	86	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	85,9	105
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

Observando los parámetros de los motores de alta eficiencia versus eficiencia standar, obtenidos de la tabla N° 7.1 se pueden establecer ciertas relaciones y conclusiones generales.

Para la resistencias de rotor, se ve en la figura N° 7.5 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.

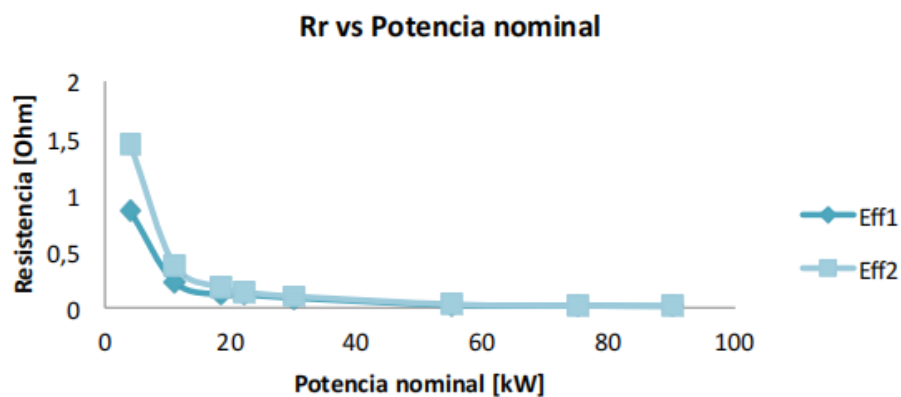


Figura N° 7.5: Gráfico resistencia de rotor versus potencia nominal.

Con respecto de las resistencias de estator, se puede observar en la figura N° 7.6 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.

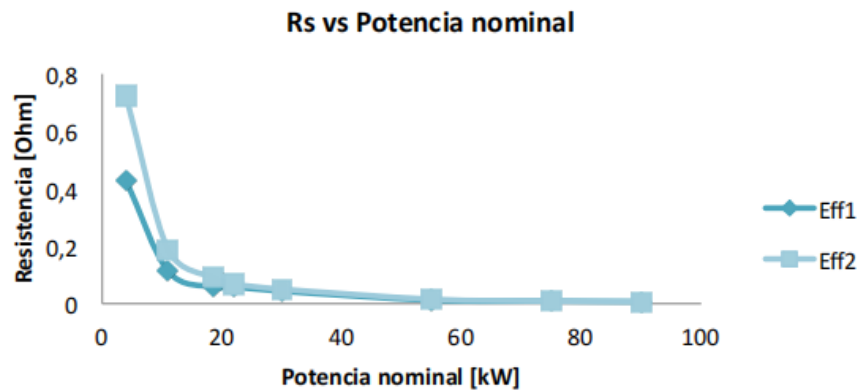


Figura N° 7.6: Gráfico resistencia de estator versus potencia nominal.

Para las reactancias de magnetización y de rotor se puede ver en la figura N° 7.7 y en la figura N° 7.8 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.

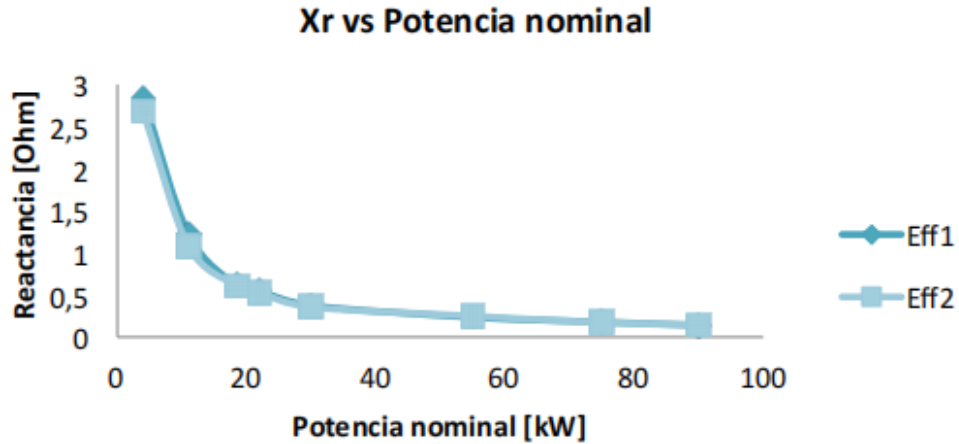


Figura N° 7.5: Gráfico reactancia de rotor versus potencia nominal.

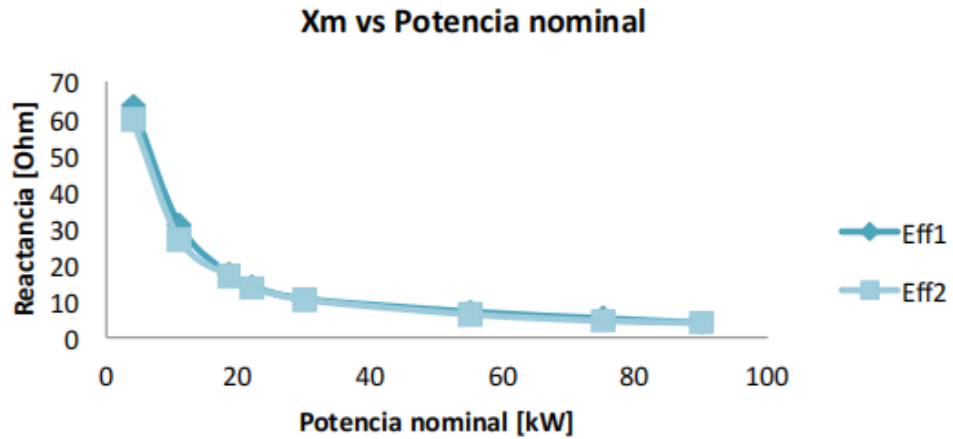


Figura N° 7.8: Gráfico reactancia de magnetización versus potencia nominal.

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.

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. Se puede 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.

Otra diferencia encontrada 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.

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.

7.3 Curvas de torque velocidad para motores seleccionados

A continuación, se presentan los resultados de las curvas de torque para la eff1 y eff2 de los motores seleccionados para este estudio (motores desde 4 kW a 90 kW)

4 kW

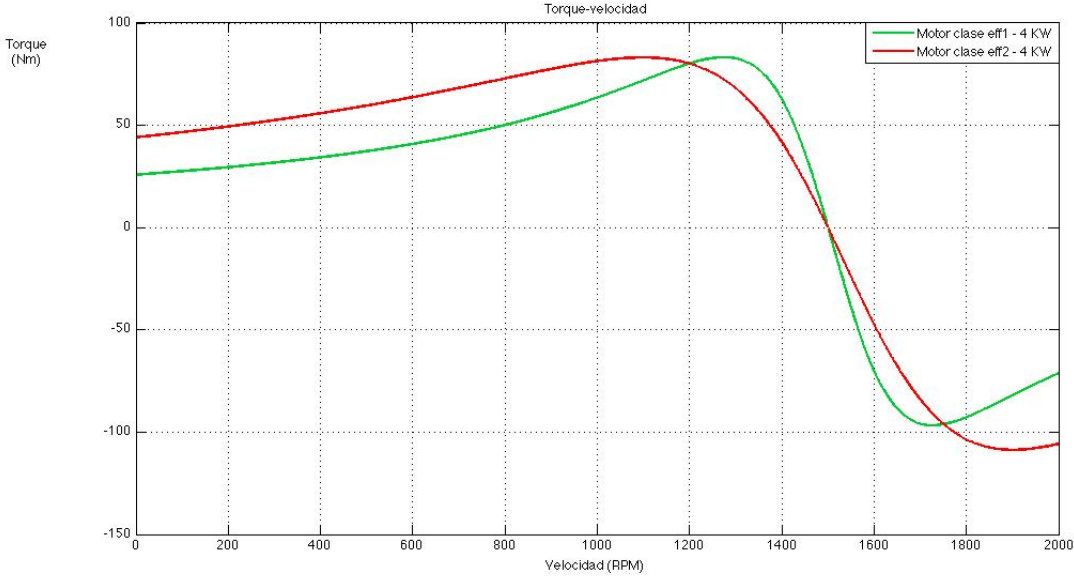


Figura N° 7.9: Curva torque velocidad de motores de 4 kW, eff1 y eff2.

11 kW

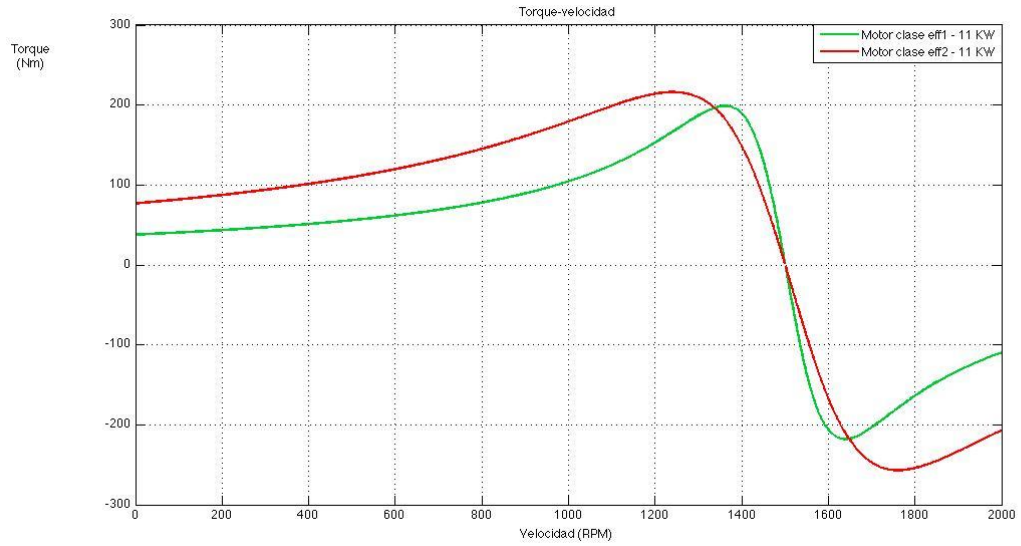


Figura N° 7.11: Curva torque velocidad de motores de 11 kW, eff1 y eff2

18.5 kW

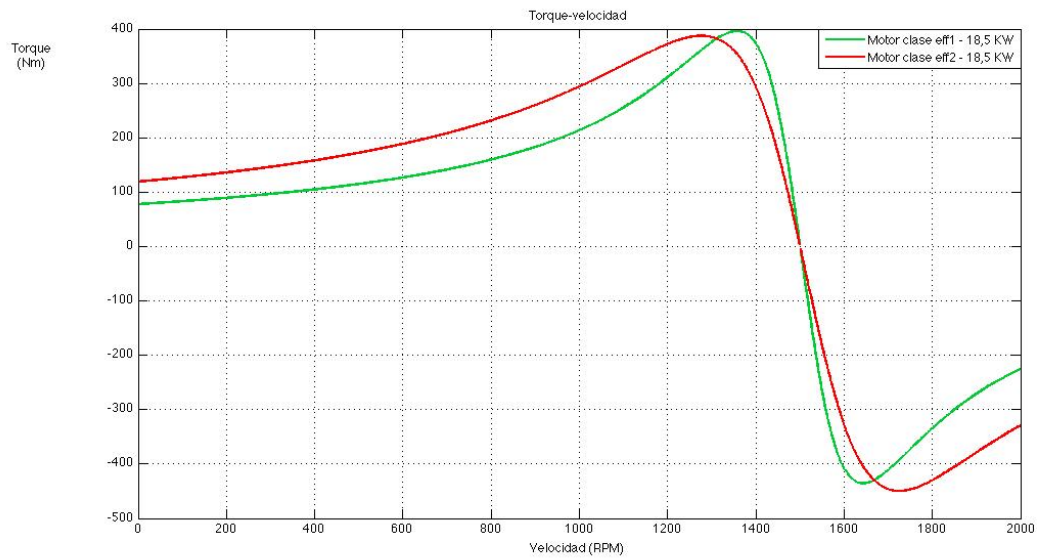


Figura N° 7.12: Curva torque velocidad para motores de 18,5 kW, eff1 y eff2.

22 kW

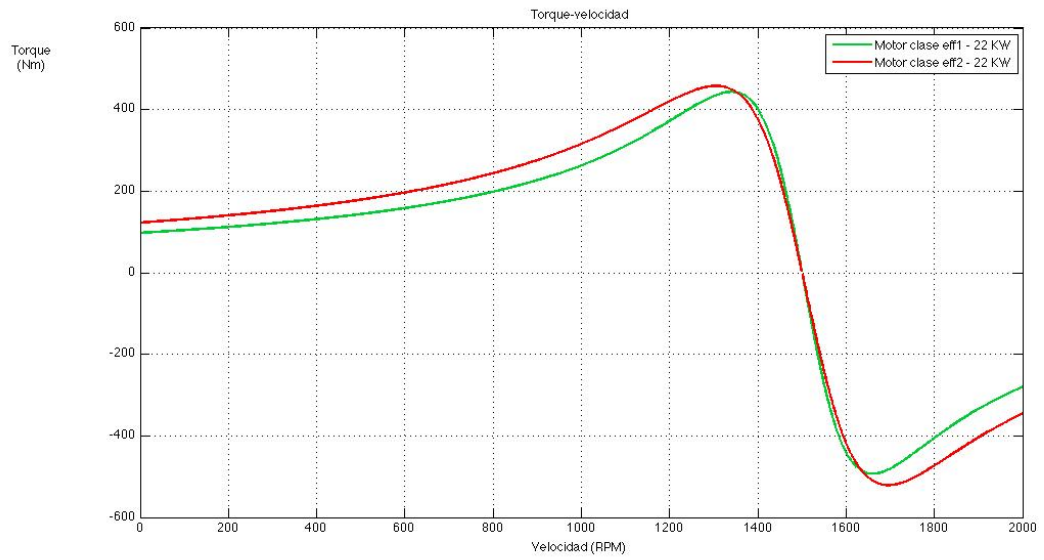


Figura N° 7.6: Curva torque velocidad para motores de 22 KW, eff2 y eff2.

30 kW

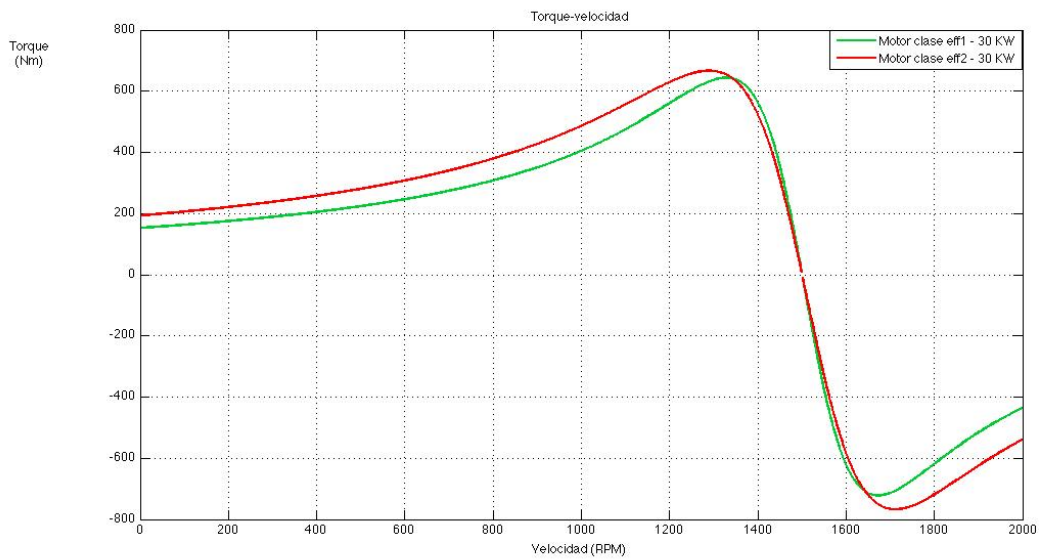


Figura N° 7.7: Curva torque velocidad para motores de 30 KW, eff2 y eff2.

55 kW

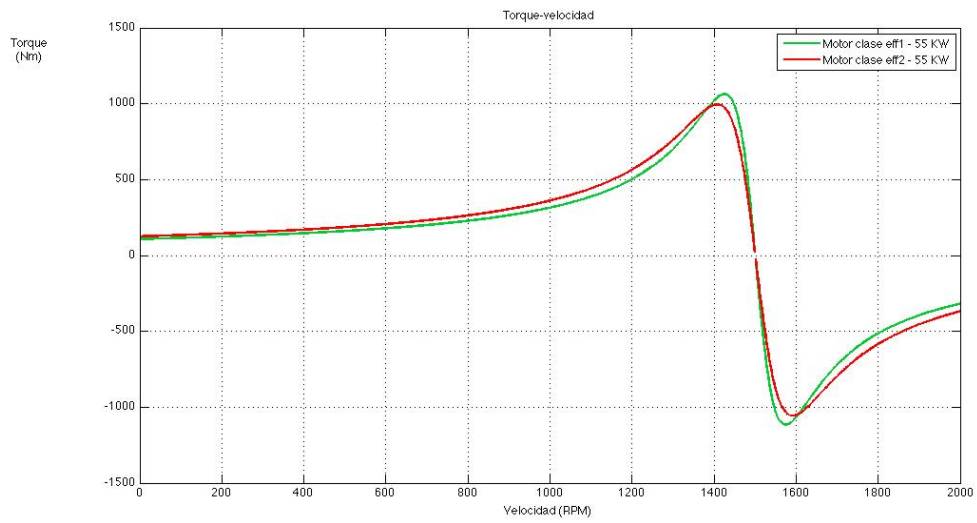


Figura N° 7.8: Curva torque velocidad para motores de 55 KW, eff2 y eff2.

75 kW

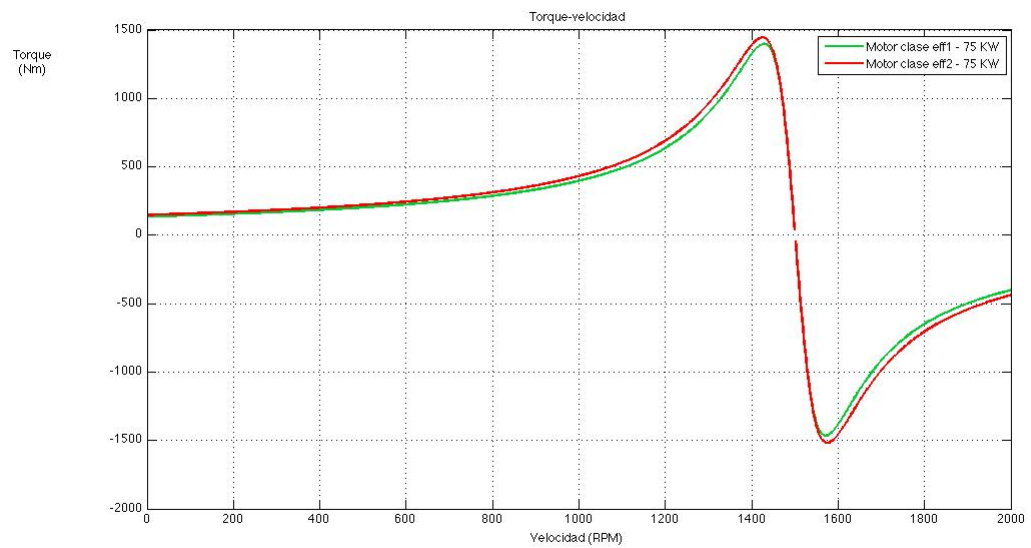


Figura N° 7.9: Curva torque velocidad para motores de 75 KW, eff2 y eff2.

90 kW

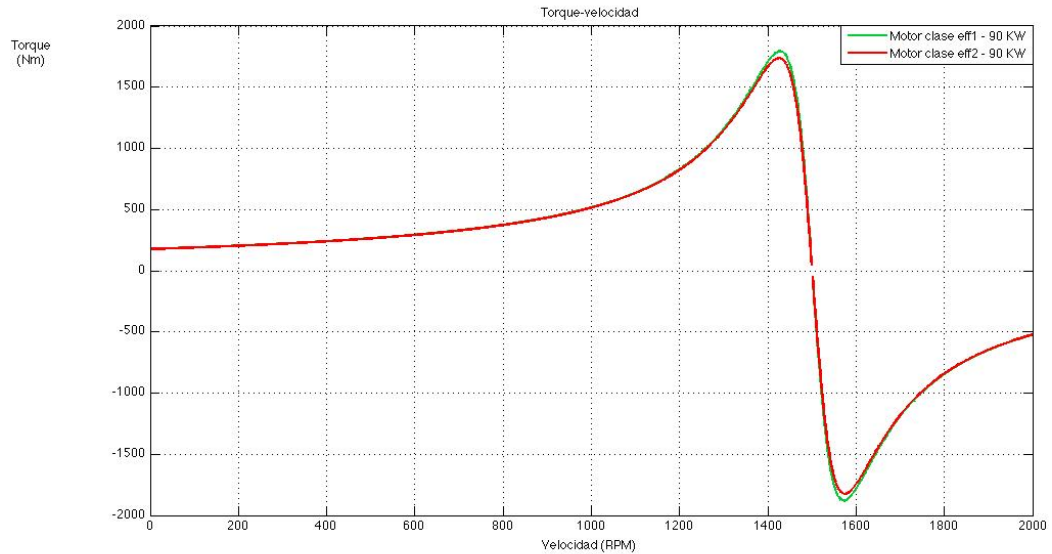


Figura N° 7.17: Curva torque velocidad para motores de 90 KW, eff2 y eff2.

7.4 Motores General Electric disponibles en el mercado

A continuación, se presentará un estudio de la oferta de mercado de los motores General Electric. El estudio se basó sólo en catálogos que el fabricante ofrece 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.

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.

General Electric es una marca de origen norteamericano y esta 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, este 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.

La tabla N° 7.2 corresponde a una comparativa con precios de este tipo de motores, en comparación con motores de similares características, pero de eficiencia estándar.

La tabla N° 7.2 permite establecer una comparación y determinar cuánto 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.

Tabla N° 7.2: Comparativa de precios y eficiencia de motores General Electric

Potencia KW	Eficiencia premium			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	6684	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

La variación entre el precio de los motores y la eficiencia de estos mismos, se ve reflejado en la tabla N° 7.3

Tabla N° 7.3: Variación de precio y eficiencia para motores General Electric.

Potencia (KW)	Variación Precio (USD)	Diferencia EFF (%)
0.75	121	2.9
3	115	2.1
5.5	114	1.8
7.5	121	1.7
11	119	1.6
18.5	116	1.3
30	123	1.2
37	120	1.2
55	112	1
75	110	1
90	108	0.8
110	107	0.8

Con las tablas anteriores se puede establecer que la relación de la potencia con la eficiencia es relativamente lineal tanto para motores eficientes y estándar de la marca General Electric, esta relación se ve reflejada en la gráfica de la figura N° 7.18.

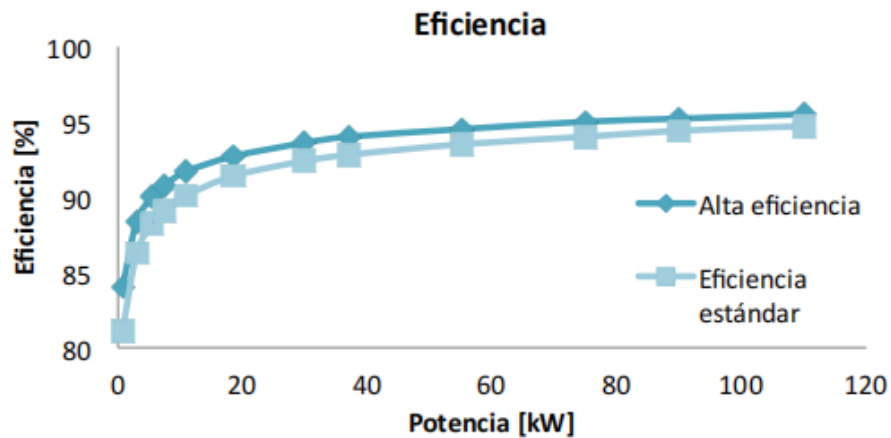


Figura N° 7.18: Eficiencia versus potencia nominal de motores General Electric.

Con respecto a los precios para la marca General Electric, estos aumentan de manera aproximadamente lineal conforme crece la potencia nominal de los motores, esto se ve reflejado en la figura N° 7.19.

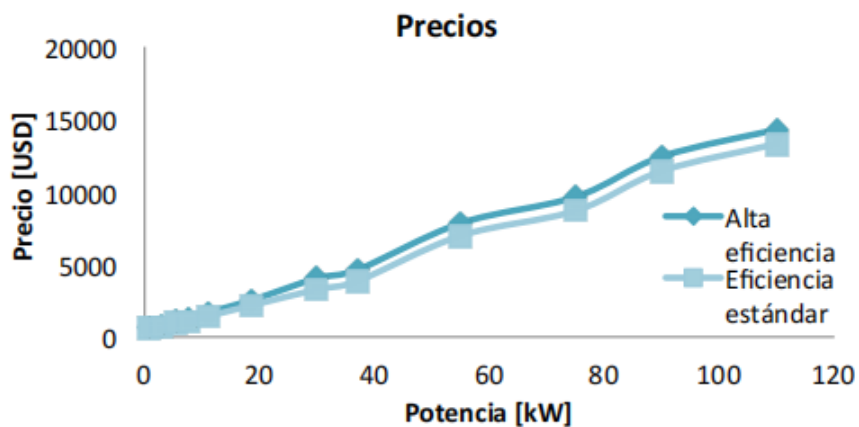


Figura N° 7.19: Precio versus potencia nominal de motores General Electric.

7.5 Rentabilidad de la migración, de motores de eficiencia estándar a alta eficiencia

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

En la búsqueda de ofertas de mercado se pudo concluir que los motores analizados de la marca General Electric nos ofrece una línea de eficiencia energética.

7.6 Reducción de emisiones

En la actualidad, para muchas compañías es muy importante darle valor agregado al proceso de producción. 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 existe la tendencia de que las empresas extranjeras a compran cobre, a las compañías que tengan baja huella de carbono en su proceso.

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 las 911,9 toneladas de CO₂/GWh, mientras que en el sistema interconectado central llega a las 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. Con este dato, y considerando que el proyecto se encuentra en el SEN, se logra una disminución considerable de las emisiones de toneladas de CO₂.

CAPÍTULO VIII

CONCLUSIONES

El presente proyecto de título tuvo por objetivo realizar un estudio de la aplicación de motores energéticamente eficientes en la industria minera.

Considerando esto, se desarrolló en primer lugar una comparación técnica, para clarificar las dudas existentes en términos del comportamiento en este tipo de motores. Posteriormente se realizó una revisión de la oferta disponible en el mercado de la reconocida marca de motores Genera Electric, con estos datos, se realiza una evaluación de los indicadores más importantes que permitan a la empresa PUCOBRE realizar una decisión de compra informada

Con respecto del estudio de antecedentes, se pudo concluir que la mayor cantidad de pérdidas de los motores de inducción se producen en los enrollados, 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 la nueva normativa de eficiencia energética en el país está entrando en vigencia, definida en el estándar IEC 60034-30:2008, el cual define nuevas clases de eficiencia (IE1, IE2, IE3 y IE4) y nuevas metodologías para la medición de la eficiencia. Dicha normativa trae como consecuencia que los fabricantes eliminarán de la venta los motores de más baja eficiencia o IE1.

Con estos antecedentes se buscó la forma de migrar a motores de eficiencia estándar, a motores de alta eficiencia. 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, ambos tienen un comportamiento muy similar, 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 más baja eficiencia. Dicha diferencia no afectaría mayormente la operación de la máquina.

Otra diferencia con respecto al comportamiento se da en la corriente de partida, la cual es levemente superior en los motores más 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.

La marca General Electric que es una de las más importantes del rubro de motores, ofrece una línea de motores con eficiencia energética. Con esta información se recomienda hacer una inversión inicial para adquirir motores energéticamente eficientes, dicha inversión será recuperada en el mediano plazo. 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.

Siguiendo en este punto, una última ventaja del uso de motores de eficiencia alta 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.

BIBLIOGRAFIA

- Comisión de ahorro energético empresarial AIE, Informe de campaña ahora ahorra del gobierno de Chile, comisión nacional de energía: 2020.
- Diario oficial Número 43.525, aprobación y promulgación del plan nacional de eficiencia energética
- General Electric, AC motors selection guide and Pricing guide 2011-2021: Publicación General electric: 2021.
- General Electric, Standard motors product catalog – Application guide: Publicación GE Energy: 2023.
- Normas sobre niveles de eficiencia de motores eléctricos, Alvaro Muñoz Santiago, 2019
- Plan nacional de eficiencia energética 2020-2026
- Programa Chile Sustentable, Las fuentes renovables de energía y el uso eficiente: 2022.
- Rockwell Automation, Conceptos básicos sobre el uso de los motores de inducción trifásicos – Motor Management: Publicación Rockwell, 1997.
- Roelof Timmer, Mikko Helinko, Ritva Eskola. Eficiencia de motores: Optimización del rendimiento durante la vida útil de los motores: Revista ABB, 2021