



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERIA

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE MOTORES ELÉCTRICOS DE
IMANES PERMANENTES EN CONTRASTACIÓN CON MOTORES
ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN**

Proyecto de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título
de ingeniero de ejecución en electricidad

Profesor guía: Juan Carlos Madrigal Lobos

Roberto Carlos Candia Sills

Ismael José Luna Meneses

Copiapó, Chile 2021

DEDICATORIA

A mi familia, con quienes he contado siempre. A mi madre, mi padre y mis hermanos, quienes me han entregado amor, compañía y grandes valores.

A Melissa, que me ha acompañado en este camino desde ya muchos años, brindándome su amor incondicional haciendo de mi alguien mejor cada día. A mi hija Noelia, mi mayor desafío en la vida, quien me da fortalezas para luchar por un futuro mejor para todos.

A mis docentes quienes destacan en mi formación académica y también humana, en quienes me inspiro para ser un profesional con alto grado de excelencia, pero además con grandes valores para asumir con coraje e ímpetu los desafíos que se aproximan.

A mis amigos, en general, ya que de una u otra manera sumaron un granito de arena para mantener el ánimo siempre a tope para soportar de buena manera la carga académica y laboral.

A Ismael, mi compañero de proyecto. Un pilar sin duda importante en la compañía del proceso académico.

A todos quienes aportaron en el estudio de este proyecto.

A la vida que me ha llevado por distintos caminos, uno de tantos que hoy concluye con la finalización de un proceso que emprendí hace poco más de 3 años, y finalmente agradezco a quienes han estado presentes en este a veces corto camino llamado vida, a quienes ya no están y dejaron en mí gran fortaleza para seguir adelante a pesar de su ausencia.

Roberto Carlos Candia Sills

DEDICATORIA

Uno como persona se siente realizado en cierta parte al finalizar una etapa que la vio en algún momento como una meta. Al realizar este proyecto de título, reflexiono sobre todas aquellas personas que de alguna u otra forma influenciaron mi éxito en este periodo. Es por esto que quiero agradecer en esta oportunidad, a todas aquellas personas que hicieron esto posible.

El apoyo que me han brindados mis padres y mi hermano a lo largo de este camino está lejos de ser poco. Es por ello, que deseo agradecerles por medio de este proyecto de título todo su esfuerzo.

Agradecer a mi pareja por ser una parte importante de mi vida, puesto que más que una pareja, es una amiga, y es quien ha estado conmigo incondicionalmente en cada momento importante de mi vida.

Agradecer a mis amigos, quienes además de ser un apoyo en ciertos pasajes, influenciaron un ambiente en el cual el éxito más que una opción, tenía un aspecto de obligatoriedad.

Agradecer finalmente a cada una de las personas que, en algún momento, entregaron su tiempo para enseñarme, aconsejarme, y darme las herramientas necesarias para mi desarrollo tanto como profesional como persona.

Ismael José Luna Meneses

RESUMEN

El presente proyecto tiene contemplado un análisis comparativo de los motores eléctricos de imanes permanentes, con los más utilizados en la industria, los de inducción. Este análisis será inicialmente teórico, el cual involucrará las características cada uno, lo que establecerán sus virtudes y desventajas. Luego, se expondrá una ejemplificación de una situación en la que amerite la instalación de un motor eléctrico, el cual podrá ser tanto de inducción, como de imanes permanentes, para que, finalmente, se concluya el más idóneo, utilizando como base el análisis teórico realizado en un inicio, y un análisis de costos, tanto a nivel de mantenciones y gasto energético, como del valor comercial de cada equipo. Para lo anterior se utilizarán las herramientas entregadas por los mismos fabricantes, estas se desglosan en fórmulas (para el cálculo de eficiencia, par o torque, curvas de arranque, etc.), e información sobre las características de los equipos que se encuentran actualmente en el mercado (para así exponer situaciones reales). Además, se utilizarán los conocimientos adquiridos en la carrera de 'Ingeniería de Ejecución en Electricidad', tales como la gestión de mantenimiento, formulación y evaluación de proyectos, maquina eléctricas, redes eléctricas, y distribución eléctrica, esto con la finalidad de entregar un análisis y una conclusión coherente y veraz.

ABSTRAC

This project has contemplated a comparative analysis of the electric motors of permanent magnets, with the most used in the industry, those of induction. This analysis will initially be theoretical, which will involve the characteristics of each one, which will establish its virtues and disadvantages. Then, an example will be made of a situation in which the installation of an electric motor is merited, which may be both induction and permanent magnets, so that, finally, the most suitable electric motor will be concluded, using as a basis the theoretical analysis carried out at the beginning, and an economic analysis, both in terms of maintenance and energy expenditure, as the commercial value of each equipment. For the above, the tools supplied by the same manufacturers will be used, these are broken down into formulas (for efficiency calculation, torque, starting curves, etc.) and information about the characteristics of the equipment currently on the market (in order to expose real situations). Also, the knowledge acquired in the career of 'Execution Engineering in Electricity' will be used, such as: maintenance management, formulation and evaluation of projects, electrical machines, electrical networks and electrical distribution, this in order to give analysis coherent and truthful conclusion.

INDICE

CAPITULO I

INTRODUCCION	1
1.1. Objetivo General	1
1.2. Objetivos específicos	1
1.3. Resumen de capitulo	2
1.4. Glosario	3

CAPITULO II

MOTORES ELECTRICOS	5
2.1. Historia.....	5
2.2. Partes de un motor eléctrico.....	6
2.3. Tipos de motores eléctricos.....	8
2.4. Características de los motores eléctricos.....	10
2.4.1. Potencia	10
2.4.2. Eficiencia.....	11
2.4.2.1. Norma IEC 60034-30	12
2.4.2.2. Tarifas eléctricas presentes en Chile.....	13
2.4.2.3. Efectos de la temperatura en los motores eléctricos	15
2.4.3. Velocidades de rotación	17
2.4.4. Tipos de regímenes.....	19
2.4.4.1. Régimen permanente	20
2.4.4.2. Régimen de carga de breve duración.....	20
2.4.4.3. Régimen de carga intermitente	21
2.4.4.4. Régimen de carga periódico	21
2.4.4.5. Régimen de carga variable.....	22

CAPITULO III

MOTORES ELECTRICOS DE INDUCCION.....	23
3.1. Funcionamiento.....	23

3.2. Características constructivas	23
3.2.1. Motor eléctrico de inducción de rotor jaula ardilla	23
3.2.1. Motor eléctrico de inducción de rotor devanado.....	24
3.3. Conceptos básicos de los motores eléctricos de inducción	25
3.3.1. Deslizamiento	25
3.3.2. Frecuencia en el rotor	26
3.3.3. Rendimiento	27
3.3.3.1. Pérdidas.....	28
3.4. Versatilidad	29
3.4.1. Tipos de partida	29
3.4.1.1. Partida directa	29
3.4.1.2. Partida estrella-triángulo.....	32
3.4.1.3. Partida controlada	34

CAPITULO IV

MOTORES ELECTRICOS DE IMANES PERMANENTES.....	34
4.1. Funcionamiento y características constructivas	34
4.2. Conceptos básicos de los motores eléctricos de imanes permanentes	38
4.2.1. Deslizamiento	38
4.2.2. Frecuencia en el rotor	38
4.2.3. Rendimiento	39
4.3. Versatilidad	39

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO ENTRE MOTORES ELECTRICOS DE INDUCCION Y DE IMANES PERMANENTES	42
5.1. Usos en la industria	42
5.1.1. Usos de los motores eléctricos de inducción.....	42
5.1.1.1. Rotor jaula ardilla	43
5.1.1.2. Rotor devanado.....	44
5.1.2. Usos de los motores eléctricos de imanes permanentes	44

5.2. Comprensión de los factores utilizados para la comparación	45
5.2.1. Régimen a utilizar	46
5.2.2. Motores a utilizar.....	46
5.2.3. Tarifa eléctrica a aplicar	48
5.3. Comparativa económica.....	50
5.3.1. Costo energético	50
5.3.1.1. Costo energético del motor de inducción	51
5.3.1.2. Costo energético del motor de imanes permanentes.....	53
5.3.2. Mantenimiento.....	53
5.3.2.1. Mantenimiento del motor de inducción	54
5.3.2.1. Mantenimiento del motor de imanes permanentes	55
5.3.3. Costos comerciales referenciales.....	56
5.4. Análisis.....	57

CAPITULO VI

CONCLUSIONES	61
--------------------	----

BIBLIOGRAFIA.....	63
--------------------------	-----------

ANEXO A	64
----------------------	-----------

A.1. Costos para el cálculo de boleta de consumo de energía eléctrica.....	64
--	----

A.2. Cálculos para la estimación del consumos y costos de energía eléctrica	64
---	----

INDICE DE FIGURAS

Figura N°2.1: Partes de un motor electrico	6
Figura N°2.2: Tipos de motores electrico	8
Figura N°2.3: Niveles de eficiencia de la IEC	13
Figura N°2.4: Régimen permanente.....	20
Figura N°2.5: Régimen de breve duración.....	20
Figura N°2.6: Régimen de carga intermitente	21
Figura N°2.7: Régimen de carga periódico.....	22
Figura N°2.1: Régimen de carga variable	22
Figura N°3.1: Motor con rotor jaula de ardilla General Electric	24
Figura N°3.2: Motor con rotor devanado o anillos rozantes MagneTek	25
Figura N°3.3: Relación corriente y velocidad al momento de arranque, partida directa .	30
Figura N°3.4: Relación torque y velocidad al momento de arranque, partida directa	30
Figura N°3.5: Relación corriente y velocidad al momento de arranque, partida estrella- triangulo	32
Figura N°3.6: Relación torque y velocidad al momento de arranque, partida estrella- triangulo	33
Figura N°4.1: Representación de rotor de motor de imanes permanentes	37
Figura N°4.2: Relación par y rotacion de motores eléctricos de imanes permanentes	40
Figura N°5.1: Diferencia de costos totales de cada motor con respecto a la variante más económica	59
Figura A.1: Tabla resumen tarifa AT4.3 para la ciudad de Copiapó.	64

INDICE DE TABLAS

Tabla N°2.1: Valores de conversión de potencia	10
Tabla N°2.2: Niveles de eficiencia establecidos en la IEC 60034–30.....	12
Tabla N°2.3: Descripción de las tarifas aplicables en Chile	15
Tabla N°2.4: Niveles de aislamiento contra temperaturas	17
Tabla N°2.5: Velocidades de motores a distintos números de polos	18
Tabla N°3.1: Velocidades de motores asincrónicos a distintos números de polos	27
Tabla N°4.1: Tipos de imanes con los que se construyen los motores de imanes permanentes.....	37
Tabla N°4.2: Acción del VDF a distintas velocidades en motores eléctricos de imanes permanentes.....	40
Tabla N°5.1: Información general de motores	47
Tabla N°5.2: Resumen costo económico anual a partir del consumo energético de un motor jaula de ardilla, proyectado a 10 años.....	52
Tabla N°5.3: Resumen costo económico anual a partir del consumo energético de un motor de rotor devanado, proyectado a 10 años	52
Tabla N°5.4: Resumen costo económico a partir de consumo energético de un motor de imanes permanentes proyectado a 10 años	53
Tabla N°5.5: Valores comerciales	57
Tabla N°5.6: Costos proyectados a 10 años según tipo de motor.....	57

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación N°2.1	11
Ecuación N°2.2	11
Ecuación N°2.3	11
Ecuación N°2.4	18
Ecuación N°3.1	26
Ecuación N°3.2	26
Ecuación N°3.3	26

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos son máquinas eléctricas que satisfacen con la necesidad de movilizar cargas, y desde hace mucho tiempo, su uso se ha convertido indispensable. En ocasiones, los tipos de motores eléctricos utilizados en la industria, no son los más idóneos para ciertos procesos, y esto se debe al desconocimiento de las empresas entorno a la gama de equipos disponibles en el mercado.

Los motores eléctricos más utilizados, son los de inducción, sin embargo, en algunos casos, y tal como se expuso en un comienzo, el proceso en los que se encuentran podría tener un mejor grado de eficacia, tan solo tomando en consideración, desde un inicio, la adquisición de un motor que se adapte mejor al proceso en sí.

En el actual contexto, si bien los más utilizados en la industria son los motores eléctricos de inducción, existen otros tipos que posiblemente se adapten de mejor manera a las necesidades que se requieren, y es en esta línea, que surgen los de imanes permanentes, una tecnología capaz de implementarse en muchos de los procesos de la actualidad.

1.1 Objetivo general

Proponer la implementación de un motor eléctrico de imanes permanentes, en base a la contrastación con uno de inducción, para un proceso en particular.

1.2 Objetivos específicos

- ✚ Indicar las características fundamentales de los motores eléctricos.
- ✚ Establecer un contraste teórico entre los motores eléctricos de inducción y de imanes permanentes.

- ✚ Dimensionar en base a un análisis de costos, el posible ahorro de los equipos, proyectado a mediano y largo plazo, con respecto a un proceso ejemplificado.
- ✚ Determinar el motor eléctrico más idóneo entre los equipos contrastados, para un proceso ejemplificado, basado en un análisis teórico y de costos.

1.3 Resumen de capítulos

CAPITULO I: Introducción: Es el encargado de prever una noción preliminar del proyecto, en donde se inducen las causas que llevaron a la realización del mismo. Además, se establecen los respectivos objetivos y se proporciona un glosario para una mejor comprensión del lector.

CAPITULO II: Motores eléctricos: Se incluye una breve historia de los inicios de los motores, además de sus conceptos básicos y la respectiva clasificación actual de su universo. Lo anterior proporciona una noción básica del funcionamiento e importancia de los motores eléctricos para comprender de una mejor manera la posterior comparación.

CAPITULO III: Motores eléctricos de inducción: Se establecen las características que predominan en este tipo de motores, y las que son relevantes para posteriormente establecer la comparativa.

CAPITULO IV: Motores eléctricos de imanes permanentes: Se establecen las características que predominan en este tipo de motores, y las que son relevantes para posteriormente establecer la comparativa.

CAPITULO V: Análisis comparativo entre motores eléctricos de inducción y de imanes permanentes: Se establecen los usos de los motores, su plan de mantenimiento, y su costo energético y comercial, con el fin de establecer las ventajas de un motor sobre el otro para un proceso ejemplificado.

CAPITULO VI: Conclusiones: Se indica al motor más idóneo para el proceso ejemplificado con anterioridad, haciendo alusión a cada uno de los objetivos establecidos

1.4 Glosario

- ✚ Maquina eléctrica: Se trata de un equipo capaz de transformar cualquier energía en energía eléctrica, o viceversa. Un motor eléctrico que transforma la energía eléctrica en mecánica, es una maquina eléctrica.

- ✚ Corriente continua (C.C): Flujo continuo de carga eléctrica que no cambia de sentido, es decir, que fluye en una sola dirección. También se le conoce como corriente directa.

- ✚ Corriente Alterna (C.A): Flujo de carga eléctrica a través de un conductor que fluye en dos sentidos, alternando cíclicamente.

- ✚ Watt: Unidad de medida que representa el nivel de potencia de un equipo, maquinaria o instalación.

- ✚ Consumo: Cantidad de energía demandada desde el suministro eléctrico (medido en kWh).

- ✚ Eficiencia eléctrica: Reducción de la energía demandada (consumo) desde el suministro eléctrico sin afectar la operación normal del equipo o proceso para la cual se utiliza.

- ✚ Caballos de fuerza (HP): Medida de potencia que indica la fuerza que aplica un equipo o maquinaria.

- ✚ Corriente trifásica: Es aquella que se compone de tres frases de corriente alterna generalmente de igual magnitud de potencia.

- ✚ Corriente monofásica: Es aquella que se compone de una única fase de corriente alterna.
- ✚ Frecuencia: Número de ciclos por segundo de una onda sinusoidal de corriente alterna, su unidad de medida es el Hz. En Chile, la frecuencia utilizada es de 50 Hz.
- ✚ Nominal: Término utilizado para referirse a los parámetros normales o estándar de un equipo, maquina o instalación.
- ✚ Variador de frecuencia: Equipo utilizado para variar la frecuencia con la que trabaja una maquina eléctrica. Al realizar esta acción, se ve afectada la velocidad con la cual trabaja la máquina.
- ✚ Armónicos: Son frecuencias que se acoplan a la onda fundamental (la que proviene de la red), produciendo distorsiones en el sistema eléctrico.
- ✚ Corrientes parásitas: También llamadas corrientes de foulcault, son corrientes que son inducidas hacia una pieza de metal por la cual no está contemplado que circule aquella energía, produciendo alteraciones en los equipos en los que se presenten.

CAPITULO II

MOTORES ELÉCTRICOS

2.1 Historia

Los motores eléctricos son máquinas que transforman la energía eléctrica en movimiento, su principio fue investigado durante muchos periodos a lo largo del tiempo y por distintos científicos. Uno de los más relevantes, fue el británico Michael Faraday, que en 1821 demostró, por medios electromagnéticos, el principio que involucra la conversión de energía eléctrica en energía mecánica.

Faraday sumergió un extremo de alambre de hierro en un envase lleno de mercurio en donde de igual manera se encontraba un imán. El alambre comenzó a rotar alrededor del imán en cuanto se le suministró una corriente eléctrica desde una batería por el otro extremo. Este experimento fue la base que sirvió para el avance de la tecnología en aquella época.

El primer motor eléctrico construido para fines comerciales, fue de corriente continua en 1837, por el americano Thomas Davenport, pero no fue hasta 1887, que el austriaco Nicola Tesla, presentó un pequeño prototipo de motor de inducción bifásico con rotor en cortocircuito, impresionando a la firma norteamericana Westinghouse, quienes pagaron un millón de dólares por la patente, además de comprometerse al pago de un dólar por cada HP que produjera en el futuro, sin embargo, el bajo rendimiento del motor inviabilizó económicamente su producción, y tres años más tarde las investigaciones fueron abandonadas.

Persistiendo en la investigación de los motores de corriente alterna, fue el ingeniero Dobrowolsky, de la firma AEG, que, en 1889, solicitó la patente de un motor trifásico con rotor de jaula. Este tenía una potencia de 80 watts y un rendimiento aproximado de un 80%, además de un excelente par de arranque.

Cabe mencionar, que, desde aquella época, y hasta la fecha, las ventajas de un motor de corriente alterna con respecto a uno de corriente continua siguen siendo significativas, lo que se profundizará en los siguientes capítulos.

2.2 Partes de un motor eléctrico

Todos los motores eléctricos siguen un mismo principio, el cual es que una parte fija induzca a una parte giratoria mediante un campo magnético, produciendo así, el movimiento. En la figura N° 2.1, se ilustra un esquema de un motor eléctrico, en el cual se descomponen sus partes.

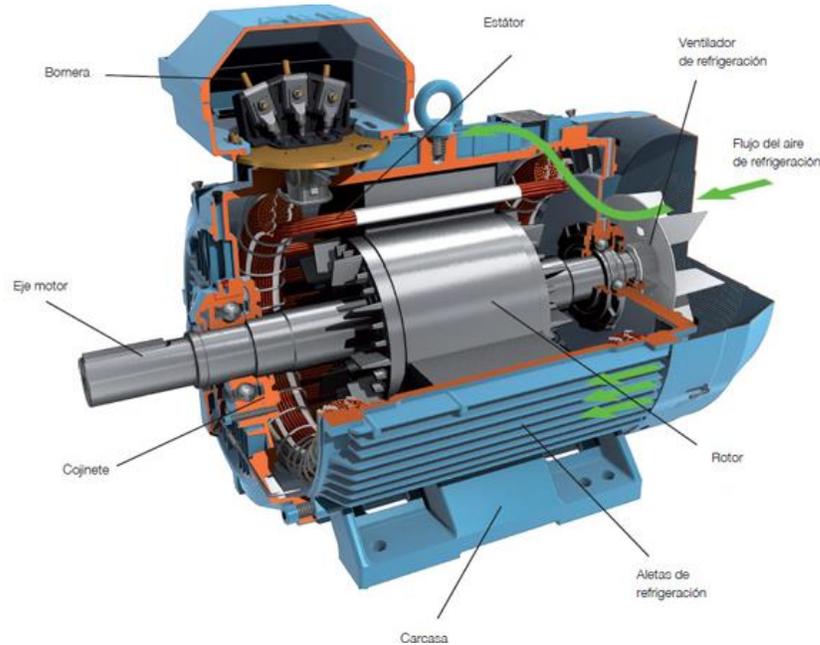


Figura N° 2.1: Partes de un motor eléctrico.

Fuente: Electrotec.

- ✚ Estator: Los motores eléctricos cuando se energizan, en el estator (parte fija del equipo), se crea un campo magnético que induce al rotor (parte móvil), haciendo que este gire. Dependiendo del uso y aplicación del equipo, existirán distintos tipos de estator.

- ✚ Rotor: El rotor es la parte del motor que es inducida por el estator, haciendo que gire. Está acoplado al eje, el cual gira junto a él. Al igual que el estator, dependiendo del uso y aplicación del equipo, existirán distintos tipos de rotor.
- ✚ Eje: Es la pieza que gira junto al rotor debido al campo magnético que induce el estator. Esta parte es la que se acopla a las distintas maquinarias que necesitan de una fuerza mecánica.
- ✚ Bornera: Es donde se conecta el motor a la fuente de alimentación, para que este la transforme en energía mecánica. Suelen estar en una caja de conexión, la cual es la responsable de proteger a los conductores, resguardándolos de cualquier elemento que pueda dañarlos.
- ✚ Cojinetes o rodamientos: Se utilizan en el acople de ciertas partes giratorias del motor con el fin de reducir la fricción que hay entre ellas. Existen distintos tipos de cojinetes, los cuales depende de la aplicación que se le dé al motor.
- ✚ Carcaza: Es la parte exterior, la cual cubre y protege al motor. Su diseño, fabricación, y ante que protegerá, dependerá del uso que se le dará al equipo.
- ✚ Ventilación: La ventilación incluye partes que se encargan de que el motor mantenga una temperatura apropiada a la admitida para su normal funcionamiento. Estas partes son las ranuras de ventilación, y el propio ventilador en la parte posterior. Adicionalmente, si lo anterior no es suficiente, será posible acoplarle un ventilador adicional, obteniendo así una mejor refrigeración del equipo, aunque eso conllevará un mayor consumo. A esta última pieza se le denomina ventilación forzada.
- ✚ Placa: Es donde se presentan las características del motor eléctrico, y debe estar en una zona visible de su carcaza.

2.3 Tipos de motores eléctricos

Los motores eléctricos tienen una basta división con el fin de satisfacer muchos de los procesos existentes en la industria. Su universo se refleja en la figura N° 2.2.

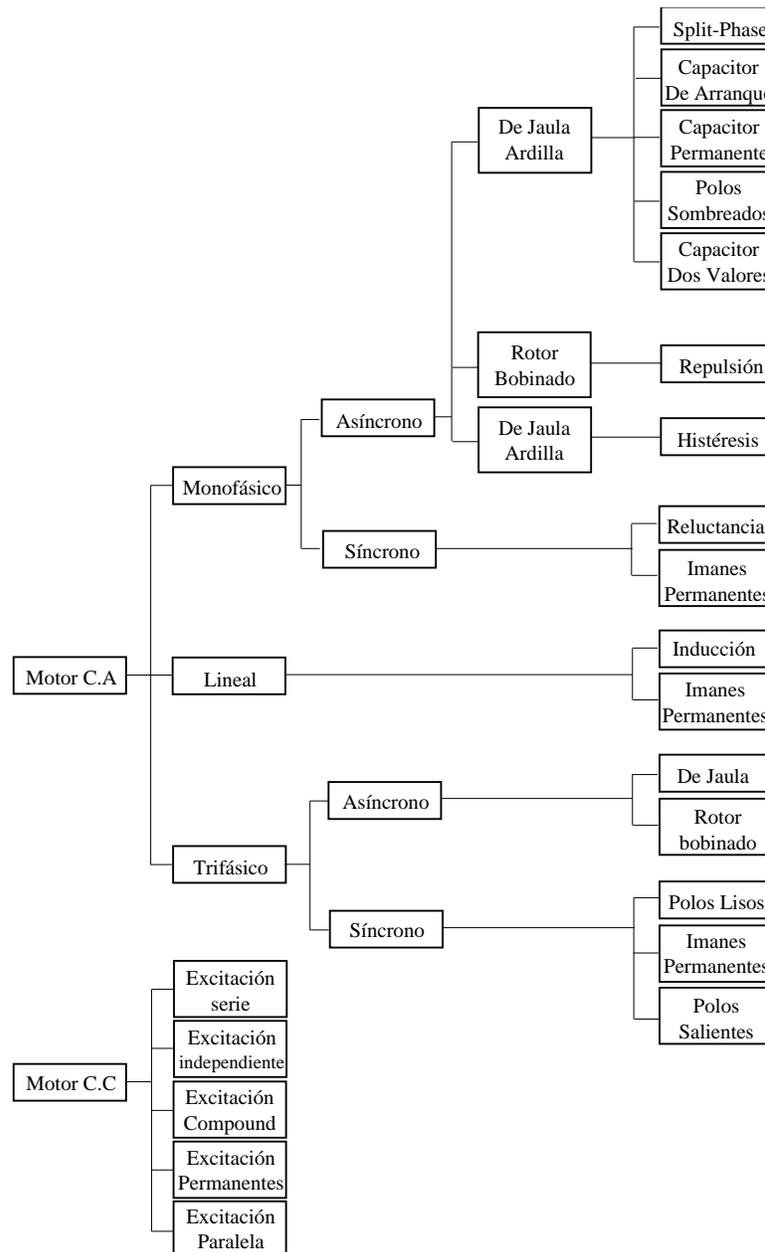


Figura N° 2.2: Tipos de motores eléctricos.

Fuente: WEG Chile.

Tal como se aprecia en la figura N° 2.2, los motores eléctricos se pueden diferenciar principalmente en motores eléctricos de corriente continua y de corriente alterna. Estos últimos tienen considerables beneficios con respecto a uno de corriente continua, sin embargo, cada uno se implementa en distintas situaciones.

✚ **Motores eléctricos de corriente continua:** La velocidad con la que trabajan estos motores es altamente variable, y se pueden utilizar para aplicaciones generalmente de baja potencia. Sin embargo, debido a que su diseño es más complejo, tienen un costo más elevado. Además, su uso se limita en que necesita de una fuente de corriente continua, o de un dispositivo que convierta la corriente alterna proveniente de la red en corriente continua.

✚ **Motores eléctricos de corriente alterna:** Dado que la distribución de la energía eléctrica es de corriente alterna, y que cuentan con un diseño mucho más simple que el de los motores de corriente continua (por lo cual su costo generalmente es menor), este tipo de motores son los más utilizados en las industrias. Además, pueden trabajar a altas potencias, aunque con una velocidad generalmente poco variable.

En la misma línea, los motores eléctricos de corriente alterna pueden ser alimentados con una red monofásica o trifásica, y tener un comportamiento síncrono, o asíncrono. Estos últimos son igual llamados motores de inducción.

✚ **Síncronos:** En este tipo de motores, el rotor girará a la misma velocidad que el campo magnético generado entre el estator y el rotor. Estos tendrán una velocidad constante, independiente de la potencia con la que trabaje.

✚ **Asíncronos:** En los motores asíncronos, o de inducción, el rotor girará levemente más despacio que el campo magnético generado entre el estator y el rotor, y dependerá totalmente de la potencia con la que trabaje.

Desde la subdivisión en síncronos y asíncronos, los motores eléctricos contemplan más divisiones aún más específicas, sin embargo, estas dependerán del tipo de fabricación para los distintos usos en la industria, tales como distintos tipos de rotor, estator, etc. En un punto de estas divisiones, se encuentran los motores de imanes permanentes, los cuales se harán mención en el presente proyecto.

2.4 Características de los motores eléctricos

Los motores eléctricos cumplen funciones esenciales en la industria, es por ello que deben cumplir con ciertas características que permitan diferenciarse entre sí, tales como la fuerza con la que hace rotar cierta maquinaria, su tamaño, su resistencia a temperaturas, o su grado de eficiencia.

2.4.1 Potencia

La potencia (par), es la fuerza que ejerce el motor en su eje, con el fin de mover una carga a una cierta velocidad. Esta fuerza, se mide en HP (Horse Power), CV (caballo vapor), o en kW (kilo Watt). En la tabla N°2.1, se muestran los valores de conversión de HP y CV a kW.

Tabla N° 2.1: Valores de conversión de potencia.

Unidad de medida unitaria	Equivalencia en kW
HP	0.736
CV	0.746

Será necesario ver la placa del motor para conocer la potencia del mismo, que generalmente está en HP. La potencia que refleja la placa es la disponible en el eje, pero no es la potencia absorbida desde la fuente de alimentación, debido a que el equipo presenta pérdidas en el proceso de conversión, y estas irán variando dependiendo del tipo

de motor, y del uso que se le dé. Para obtener la potencia consumida por hora (kWh), habrá que dividir la potencia reflejada en la placa por la eficiencia del motor.

2.4.2 Eficiencia

La eficiencia presenta un rol muy relevante entorno a la utilización de cualquier maquina eléctrica. Generalmente, la potencia disponible en el eje de un motor eléctrico, equivale al 90 % de la consumida desde la fuente de alimentación, pero, ¿qué sucede con el otro 10 %?

Desde que la energía eléctrica ingresa al motor por medio de la bornera, esta pasa por distintas partes hasta llegar en forma de energía mecánica al eje. En el proceso, existen perdidas que dependen del tipo de motor, y del uso que se le dé. Para calcular la eficiencia (en porcentaje) de un motor, es decir, la potencia útil, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de Salida}}{\text{Potencia de Entrada}} \cdot 100\% \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

Sin embargo,

$$\text{Potencia de Salida} = \text{Potencia de Entrada} - \text{Pérdidas} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.2})$$

Por lo que,

$$\text{Eficiencia} = \frac{\text{Potencia de Entrada} - \text{Pérdidas}}{\text{Potencia de Entrada}} \cdot 100\% \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.3})$$

Observando y analizando la ecuación N° 2.3, se deduce que, para obtener una mayor eficiencia, será necesario disminuir las perdidas.

Existen normas a nivel mundial que rigen el correcto desarrollo de los motores eléctricos en el mundo, incluyendo en estas los parámetros de eficiencia. Las series que determinan estas normas son tres: las primeras son las de la IEC (International

Electrotechnical Commission), las cuales recopilan la información de la línea europea; las de la NEMA (National Electrical Manufacturers Association), que son las que siguen los avances y propuestas de la línea norteamericana; y las del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), que es una asociación que rige aquel desarrollo a nivel mundial.

Si bien cada organización tiene sus normas en cuanto a la eficiencia de las distintas máquinas eléctricas, en Chile se comúnmente se rige por las de la IEC, y son aquellas las que se utilizarán para este proyecto.

2.4.2.1 Norma IEC 60034-30

La norma IEC 60034-30, define y categoriza las clases de rendimiento de los motores eléctricos. Creada en el 2008, busca armonizar la tipificación de los motores eléctricos a nivel mundial.

En su creación, existían cuatro niveles de eficiencia, sin embargo, esto fue revocado por su actualización en el año 2014, incluyendo un nivel más. En la tabla N° 2.2, se muestran los cinco niveles de la norma de la IEC, incluyendo su nomenclatura, y su comparación con la norma de la NEMA.

Tabla N° 2.2: Niveles de eficiencia establecidos en la IEC 60034–30.

IEC	NEMA
IE1	Standard
IE2	High
IE3	Premium
IE4	Super Premium
IE5	Ultra Premium

Cada uno de los niveles de la tabla N° 2.2, se hallan en el mercado, y se solicitan dependiendo de la aplicación, y de los resultados que se espera obtener.

En la actualidad, son muchas las empresas que ofrecen en sus motores un estándar de eficiencia de IE2 o IE3, y es casi nula la utilización de una categoría más alta, esto es debido a su posible alto costo, aunque, aquello podría contrastarse con los beneficios que aquel nivel de eficiencia brindaría. En el grafico que se muestra en la figura N° 2.3, se observa la diferencia que se obtiene con cada una de los niveles de la IEC.

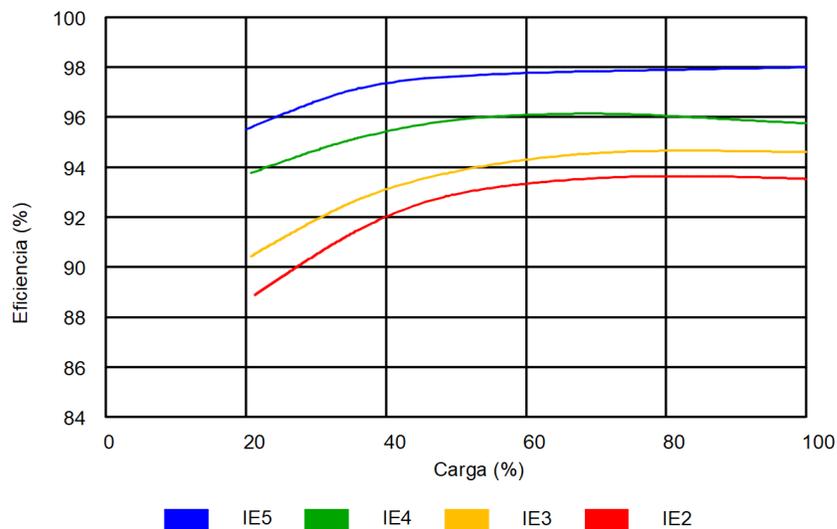


Figura N° 2.3: Niveles de eficiencia de la IEC.

Fuente: Weg Chile.

Teniendo números tangibles, sería posible cuantificar cuanto es el ahorro anual que se obtiene con la utilización de un motor eléctrico de mayor eficiencia. Para ello bastaría tan solo conocer el grado de utilización que se le dará al motor, la potencia consumida, y el costo de la energía proveniente de la empresa distribuidora.

2.4.2.2 Tarifas eléctricas presentes en Chile

Un aspecto relevante para determinar el ahorro que posibilita cierta maquina eléctrica, es tener conocimiento de las tarifas eléctricas aplicables en la actualidad. En Chile, existen distintas tarifas, las que se descomponen en ítems que van dependiendo de la condición de cada cliente.

En primera instancia hay que determinar el tipo de cliente que consume la energía, dentro de los cuales se encuentran los regulados y los no regulados. Los regulados corresponden a los que consumen energía eléctrica, y se rigen por los precios establecidos por la comisión nacional de energía (CNE), en cada una de las tarifas disponibles. Mientras que, los no regulados, o también llamados clientes libres, son los que no se rigen por los precios establecidos en las tarifas eléctricas, sino que tratan los precios con la distribuidora, o directamente con la generadora. En el contexto anterior, pueden optar por ser o no ser clientes libres aquellos clientes que tienen un consumo por sobre los 500 kW, mientras que, los que tienen un consumo sobre 5.000 kW, deberán ser clientes libres por obligación.

Para determinar el tipo de tarifa eléctrica de cada cliente, este debe cumplir con ciertas condiciones, las cuales son estipuladas por la CNE (cabe recordar que aquellas tarifas son aplicables para clientes con un consumo inferior a 5.000 kW), en donde se encuentra entre otras cosas, su nivel de voltaje y de potencia.

Los clientes que tengan un voltaje inferior, o igual a 400 V, son considerados como baja tensión (BT), mientras que, por sobre aquel valor, serán considerados como alta tensión (AT). En cualquiera de ellas se aplican cargos que van variando dependiendo de la clasificación, existiendo tarifas en las que se factura solo el consumo, y otras en la que se cobra según la potencia contratada por el cliente. Existe la posibilidad de tener recargos en algunas tarifas por consumir potencia en horario presente en punta (PP) (de 18:00 a 23:00, aplicando condiciones), y en horario parcialmente presente en punta (PPP) (de 23:01 a 17:59), mientras que, en todas se cobran los respectivos cargos administrativos y de transporte de energía.

Así, dado lo anterior, las tarifas eléctricas se clasifican en baja y alta tensión, las que se especifican en la tabla N° 2.3.

Tabla N° 2.3: Descripción de las tarifas aplicables en Chile.

Baja tensión	Descripción	Alta tensión	Descripción
BT1	Consumos domiciliarios, con potencia máxima de 10 kW. Se cobra lo consumido	AT1	Consumos domiciliarios, con potencia máxima de 10 kW. Se cobra lo consumido
BT2	Tarifa en baja tensión con potencia contratada. Los consumidores podrán utilizar la potencia contratada sin restricción.	AT2	Tarifa en alta tensión con potencia contratada. Los consumidores podrán utilizar la potencia contratada sin restricción.
BT3	Se cobra por potencia máxima leída (aplica condiciones) y bajo FP. Se aplican cargos por PP y PPP.	AT3	Opción de tarifa en alta tensión con demanda máxima de potencia leída (aplica condiciones)
BT4	Se subdivide en 3 tipos de tarifas. Pueden ser facturadas las demandas contratadas o leídas. Aplican cargos por PP y PPP.	AT4	Se subdivide en 3 tipos de tarifas. Pueden ser facturadas las demandas contratadas o leídas. Aplican cargos por PP y PPP.

La tabla N° 2.3 describe parcialmente a cada una de las tarifas, de las cuales se obtienen ventajas y desventajas por sobre las otras, por lo que, es el cliente el encargado de determinar cuál es la mejor tarifa que se adapte a sus necesidades.

2.4.2.3 Efecto de la temperatura en los motores eléctricos

Los motores eléctricos generalmente trabajan en condiciones no aptas, debido a que, considerando la temperatura ambiente, sumado a los devanados al interior de la máquina que estarán sometidos a temperaturas mucho mayores producto del confinamiento, el

motor puede alcanzar e inclusive superar fácilmente los 140 °C, a esto se le denomina temperatura de operación, pero, ¿Por qué se produce?

La temperatura de operación se debe a que existe constantemente flujo de energía eléctrica entre los componentes del motor, y aquello siempre producirá calor, eso es lo que se denomina 'efecto Joule'. Cuando lo anterior ocurre, produce pérdidas que van dependiendo de la potencia con la que trabaja el motor, y de la capacidad que tengan las resistencias internas del motor para transportar la energía. Cabe mencionar, que este es el motivo más relevante del porque el motor no mantiene en su salida lo absorbido desde la red eléctrica.

El sistema de ventilación logra mitigar el problema anterior, dado que expulsa el exceso de calor desde el interior de la maquina hacia el ambiente, por otro lado, si lo anterior no es suficiente, será posible incorporarle al motor un sistema de ventilación forzada. Sin embargo, a pesar de que aquello ayudará al motor a regular la temperatura, afectaría considerablemente la eficiencia, dado que el sistema de ventilación original ya equivale un porcentaje importante de las perdidas presentadas por el equipo.

Otra acción mitigativa es adquirir el motor con cierto grado de protección en los componentes del mismo, estableciendo antes el uso que se le va a dar, y el lugar donde estará, para así determinar la temperatura máxima de operación a la que podría llegar. Los niveles de protección se categorizan por letras, y su temperatura máxima admisible está proyectada para que el equipo trabaje desde el nivel del mar, hasta los mil metros, luego de eso, aquella temperatura disminuirá cinco grados Celsius por cada mil metros adicionales. Estos niveles están reflejados en la tabla N° 2.4, siendo los más utilizados los motores de clase B, F y H.

Tabla N° 2.4: Niveles de aislamiento contra temperaturas.

Clase de aislamiento	Temperatura máxima admisible
Clase Y	90°
Clase A	105°
Clase E	120°
Clase B	130°
Clase F	150°
Clase H	180°
Clase C	Más de 180°

El consumo de un motor eléctrico es alto, y si a aquello se le suma el tener una alta temperatura de funcionamiento (y más aún si esta sobrepasa la nominal), este incrementaría exponencialmente, dado que existe una relación directa entre el aumento de la resistividad del metal conductor del equipo y la temperatura. Si a lo anterior, se le suma el trabajo que realizará el sistema de ventilación de la máquina, el consumo sería aún más elevado, dado que habrá una mayor carga térmica que liberar.

2.4.3 Velocidad de rotación

La velocidad de rotación se refiere al número de vueltas que desarrolla el eje en cierta unidad de tiempo, en el que influye la velocidad de sincronismo del motor (campo magnético inducido en el rotor). Aquellas velocidades se expresan comúnmente en rpm (revoluciones por minuto), y dependerá de la frecuencia, y de la cantidad de polos que contenga el motor.

Los polos corresponden al número de juegos de bobinados electromagnéticos que tiene un motor eléctrico (se establecen por pares, norte y sur, por lo que el número mínimo de polos de un motor son dos), los cuales son de tres vías. En los motores, a medida que incrementan el número de polos, irá decreciendo su velocidad. La velocidad de sincronismo de un motor se determina con la ecuación N° 2.4.

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (\text{Ec. N}^\circ 2.4)$$

Donde,

✚ n_s = velocidad de rotación (rpm).

✚ p = número de polos.

✚ f = frecuencia (Hz).

Con la ecuación N° 2.4 presentada, se puede realizar una tabla resumen (tabla N° 2.5), con la que se ilustra las velocidades de sincronismo de un motor para las frecuencias de 50 Hz y 60 Hz, para distintos números de polos.

Tabla N° 2.5: Velocidades de motores a distintos números de polos.

Número de polos	Rotación a 50 Hz	Rotación a 60 Hz
2 polos	3000 rpm	3600 rpm
4 polos	1500 rpm	1800 rpm
6 polos	1000 rpm	1200 rpm
8 polos	750 rpm	900 rpm

El termino de deslizamiento, se define como la diferencia entre la velocidad sincrónica del motor y la velocidad real en su eje, y es allí donde estos equipos se dividen en síncronos y asíncronos.

En el deslizamiento de un motor pueden influir muchos factores, tales como la carga con la que trabaja el motor, o la variación de tensión de alimentación a la cual es sometido.

2.4.4 Tipos de regímenes

Los regímenes representan valores de consumo de carga eléctrica de un equipo en un determinado tiempo. Es importante señalar que existen diversos regímenes dependiendo del proceso en el que se utilice la máquina, y esta de igual manera, deberá estar diseñada para soportar los requerimientos que impone cada régimen.

Otro aspecto relevante es que, los regímenes de carga en conjunto con otras características del proceso, permiten proyectar los cálculos de protecciones y alimentadores, los que serán previamente validados y utilizados en el montaje y conexionado de los equipos.

Es llamada carga nominal, cuando se alcanzan los valores de carga para la cual la máquina fue fabricada. Se conoce como carga en vacío, cuando al estar conectada a la red esta no tiene conectada una carga, es decir, no entrega potencia útil. Cuando la carga que se utiliza es mayor a la que el fabricante del equipo indica como nominal, esta se conoce como sobrecarga.

Para la ejemplificación gráfica de este subcapítulo se describen las siguientes variables gráficas:

- ✚ Carga: carga consumida en un determinado tiempo 't'.
- ✚ t: Tiempo de duración del régimen de carga presentado.
- ✚ N: Comportamiento de la carga bajo condiciones nominales.
- ✚ P: Pausa cíclica entre los periodos de funcionamiento de un equipo.
- ✚ SC: Comportamiento de la carga bajo condiciones sin carga o en vacío.
- ✚ T de un ciclo: Período en el que ocurre un ciclo, contempla la sumatoria del tiempo que componen 'N' y 'P' o 'N' y 'SC'.

2.4.4.1 Régimen permanente

Se aplica en procesos o requerimientos de inyección de carga constante y de larga duración. Las pausas suelen ser breves o programadas y atribuidas generalmente a ciclos de mantenimiento del equipo. Lo anterior queda expresado en la figura N° 2.4.

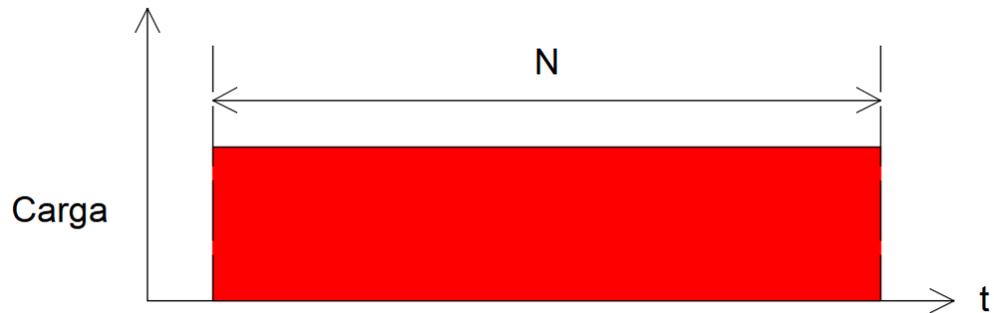


Figura N° 2.4: Régimen permanente.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

2.4.4.2 Régimen de carga de breve duración

Se aplica en procesos o requerimientos cuya inyección de carga se genera en periodos de breve duración o instantáneos. Suelen tener pausas de larga duración entre una activación u otra. Lo anterior queda expresado en la figura N° 2.5.

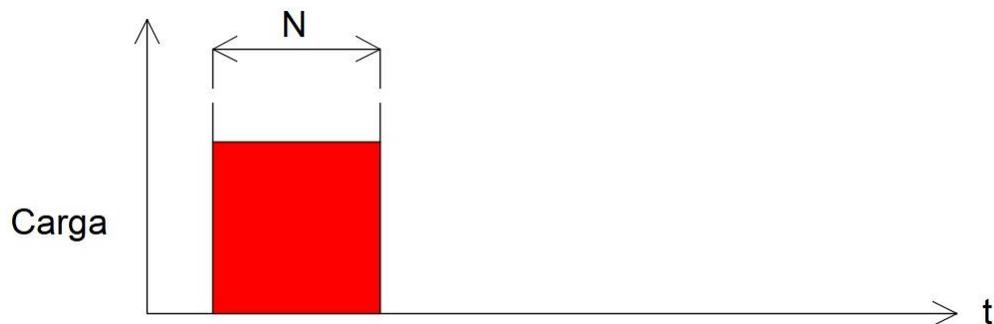


Figura N° 2.5: Régimen de breve duración.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

2.4.4.3 Régimen de carga intermitente

Se aplica generalmente en procesos que requieren pausas periódicas entre momentos de carga también periódicos. Un ejemplo de esto es la fabricación de productos en donde debe existir una pausa entre el desarrollo de una actividad y el desplazamiento de este a través de una cinta transportadora. Lo anterior queda expresado en la figura N° 2.6.

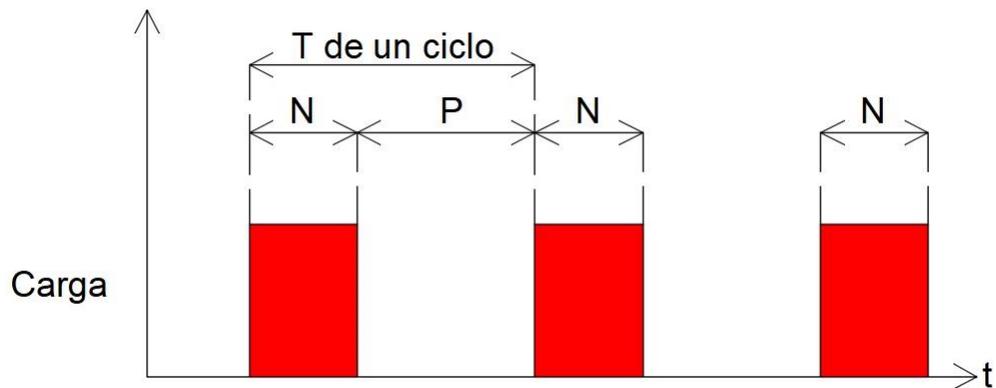


Figura N° 2.6: Régimen de carga intermitente.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

2.4.4.4 Régimen de carga periódico

Este régimen tiene ciclos de trabajo idénticos en donde la carga nominal puede existir en ciertos periodos del funcionamiento, sin embargo, el equipo no se detiene.

A lo anterior se le conoce como carga en vacío, en donde existe un consumo de potencia no útil. Lo anterior queda expresado en la figura N° 2.7.

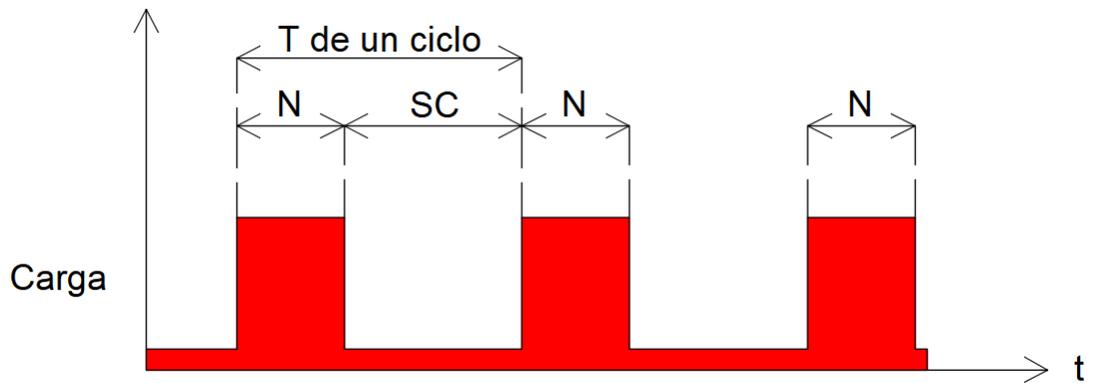


Figura N° 2.7: Régimen de carga periódico.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

2.4.4.5 Régimen de carga variable

Este régimen presenta consumos de carga no definidos, ni cíclicos, pudiendo ser estos consumos de carga fija, fluctuante o de picos instantáneos entre pausas de breves o largos períodos de duración para cada uno de estos. Lo anterior queda expresado en la figura N° 2.8.

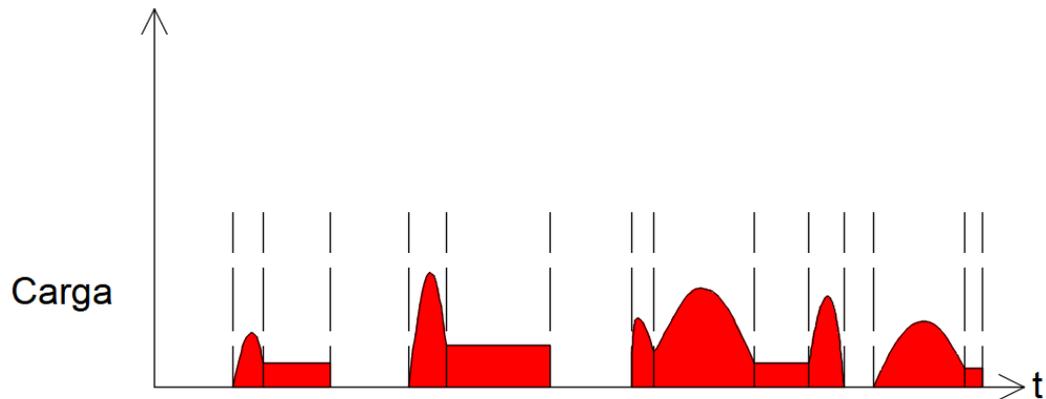


Figura N° 2.8: Régimen de carga variable.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

CAPÍTULO III

MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

3.1 Funcionamiento

Los motores eléctricos de inducción, también conocidos como motores asíncronos, son las máquinas eléctricas más comúnmente utilizadas en la industria, debido a su bajo costo y su sólida construcción. Estos tienen como característica principal que su rotor gira a una velocidad diferente e inferior a la del campo magnético inducido por el estator.

3.2 Características constructivas

Dependiendo del tipo de rotor, los motores de inducción se pueden clasificar en dos grupos: motores de rotor jaula de ardilla, y motores con rotor devanado (bobinado) o de anillos rozantes. Los motores de inducción poseen características de construcción similares a cualquier tipo de motor eléctrico, dado que se componen de carcasa, bornera de conexión, sistema de refrigeración, rodamientos, estator y rotor.

Para su construcción en grandes cantidades, las series industriales tienen en cuenta las normas internacionales señaladas previamente en el capítulo 2 del presente proyecto, sin embargo, adicionalmente a estas, se establecen igualmente: las dimensiones unificadas de las máquinas, las dimensiones de las escobillas, las dimensiones de porta escobillas, entre otras. También se establecen los grados de protección mecánica, métodos de conservación de temperatura de operación (o refrigeración) y la marcación de bornes.

3.2.1 Motor eléctrico de inducción de rotor jaula ardilla

Estos motores cuentan con un rotor que tiene una serie de barras conductoras dispuestas dentro de ranuras con cortes en la cara del rotor, las cuales se encuentran en cortocircuito en algunos de sus extremos a través de grandes anillos de cortocircuito.

Cabe señalar, que las barras conductoras están recubiertas por unas chapas de hierro aisladas entre sí para conducir mejor el campo magnético. A este diseño se le llama rotor de jaula de ardilla, debido a que sus componentes están dispuestos de forma que simula las ruedas de ejercicio de las ardillas. La figura N° 3.1 muestra un motor jaula de ardilla de alta potencia.

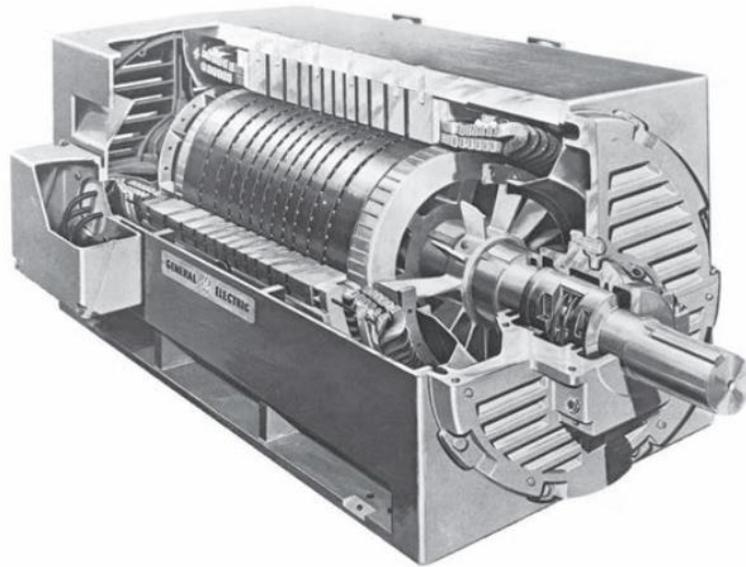


Figura N° 3.1: Motor con rotor jaula de ardilla General Electric.

Fuente: Maquinas eléctricas, Stheven Chapman.

3.2.2 Motor eléctrico de inducción de rotor devanado

También llamado rotor devanado, ya que cuenta con un conjunto de devanados trifásicos. Por lo general, las tres fases de los devanados del rotor están conectadas en conexión estrella y los extremos de los tres conductores del rotor se encuentran unidos a los anillos rozantes en el eje del rotor. Los devanados del rotor están en cortocircuito mediante escobillas montadas en los anillos rozantes. Por lo anterior, los rotores devanados de los motores de inducción tienen corrientes en el rotor accesibles en las escobillas del estator. Un aspecto importante es que los devanados del rotor están en disposición oblicua para minimizar el efecto de los armónicos de ranura. La figura N° 3.2 muestra un motor de rotor devanado.

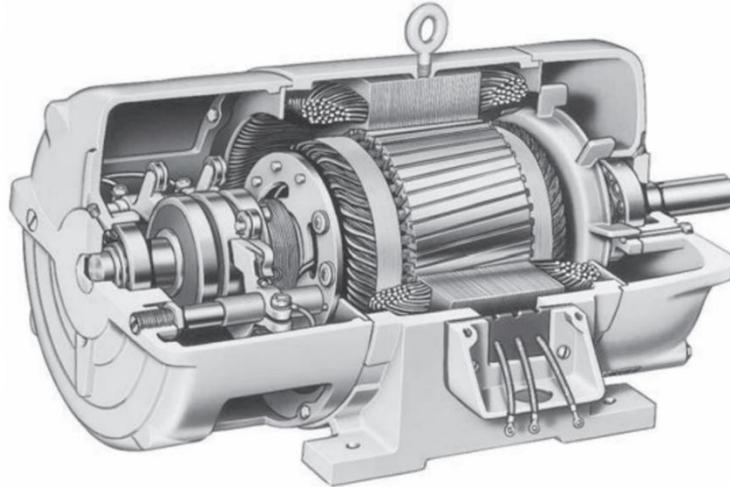


Figura N° 3.2: Motor con rotor devanado o anillos rozantes MagneTek.

Fuente: Maquinas eléctricas, Stheven Chapman.

3.3 Conceptos básicos de los motores eléctricos de inducción

Los motores eléctricos de tipo industrial poseen semejanzas en múltiples principios eléctricos, pues basta con señalar que una gran parte de estos son alimentados eléctricamente con fuentes de alimentación trifásica de C.A, por lo que, la mayoría de los conceptos básicos se mencionan en el subcapítulo 2.4. Sin embargo, existen ciertas diferencias que, desde lo constructivo implican que características como el deslizamiento, frecuencia, entre otros, se vean afectados.

3.3.1 Deslizamiento

Si el motor gira a una velocidad diferente a la de sincronismo, es decir, diferente a la velocidad del campo, el devanado del rotor corta las líneas de fuerza magnética del campo y por el circularán corrientes inducidas. Cuanto mayor sea una carga, mayor tendrá que ser el par necesario para mover dicha carga, y para obtener un mayor par, tendrá que ser mayor la diferencia de velocidad, para que las corrientes inducidas y los campos producidos sean mayores, por lo tanto, a medida que la carga aumenta, la rotación del motor disminuye.

Cuando la carga es cero (motor en vacío), el rotor alcanzara prácticamente una velocidad de sincronismo.

La diferencia entre la velocidad del motor (n) y la velocidad síncrona (n_s) se llama deslizamiento (s), que puede ser expresado en revoluciones por minuto (rpm), como una fracción de la velocidad síncrona, o incluso como un porcentaje de esta. Lo anterior queda expresada en las ecuaciones N° 3.1 y N° 3.2 respectivamente.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{Ec. N}^\circ 3.1)$$

$$s (\%) = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \quad (\text{Ec. N}^\circ 3.2)$$

Por lo tanto, para un deslizamiento s (%) dado, la velocidad del motor queda expresada en la ecuación 3.3:

$$n = n_s \cdot \left(1 - \frac{s (\%)}{100}\right) \quad (\text{Ec. N}^\circ 3.3)$$

3.3.2 Frecuencia en el rotor

Existe una relación directa entre el deslizamiento de un motor de inducción y su frecuencia de salida, la cual se manifiesta en una disminución de velocidad a causa del asincronismo de este tipo de máquinas. Lo anterior se ejemplifica con lo siguiente: a diferencia de la tabla N° 2.4, en la cual se considera únicamente la velocidad de sincronismo del motor, la tabla N° 3.1, en cambio, es posible observar que existe una disminución de velocidad (en rpm). Aquella última tabla es una referencia de valores de velocidad en rangos típicos para motores de inducción, considerando su número de polos, su frecuencia de alimentación, y un deslizamiento a plena carga del 5 %.

Tabla N° 3.1: Velocidades de motores asincrónicos a distintos números de polos.

Número de polos	Rotación a 50 Hz	Rotación a 60 Hz
2 polos	3420 rpm	2850 rpm
4 polos	1710 rpm	1425 rpm
6 polos	1140 rpm	950 rpm
8 polos	855 rpm	713 rpm

3.3.3 Rendimiento

Con el paso del tiempo, se ha logrado conseguir una mayor eficiencia en los motores eléctricos en la industria, y se han logrado obtener muchos avances debido a los diversos métodos que se han ido implementando, tanto en operación de los mismos como en su desarrollo y construcción, empleando para ello diversas normas que establecen los lineamientos y métodos para poder medir el rendimiento de los motores eléctricos.

Entre los factores que destacan en el rendimiento de los motores, se encuentra el dimensionamiento. Esto se refiere a que si se sobre dimensiona el equipo en potencia para cierto proceso o aplicación, en este podrían verse disminuido su rendimiento. Los fabricantes y vendedores de diversas marcas de motores de inducción recomiendan el uso a plena carga, es decir, que el motor trabaje al 100 % de su capacidad, o en caso mínimo en valores que rondan el 75 %, dado que, bajo esa cifra, la eficiencia del motor desciende considerablemente.

Los valores de eficiencia y rendimiento son entregados por los fabricantes quienes, para la construcción de motores de inducción, se basan de acuerdo a las normas internacionales que se señalan a continuación:

- ✚ IEC 60034-2-1.
- ✚ IEEE 112.
- ✚ IEC 61972.

3.3.3.1 Pérdidas

El rendimiento en los motores eléctricos tiene directa relación con evitar y/o disminuir las pérdidas provocadas por los fenómenos eléctricos y de conversión electromecánica de la energía, y que, en un motor de inducción, son diversas:

- ✚ **Pérdidas en el núcleo:** Debido a corrientes parasitas e histéresis la energía es disipada en el núcleo, las cuales se generan a partir de las propiedades magnéticas del material. Físicamente estas afectaciones tienen directa relación con el recubrimiento y espesor de las láminas que conforman el núcleo.

- ✚ **Pérdidas por efecto Joule en el estator:** Generadas por la circulación de corriente eléctrica en los devanados de cobre en el estator, esto se manifiesta en forma de generación de energía calórica, la cual dependerá de la resistencia óhmica de los devanados.

- ✚ **Pérdidas por efecto Joule en el rotor:** Es una energía disipada en forma de calor, debida al flujo de corriente a través de las barras que forman el rotor. Este tipo de pérdidas tiene directa relación y está en función del deslizamiento del motor.

- ✚ **Pérdidas por fricción y ventilación:** Son aquellas perdidas debidas a la resistencia que oponen los dispositivos tales como ventiladores y rodamientos al movimiento mecánico en el eje del motor.

- ✚ **Pérdidas indeterminadas o misceláneas:** Son provocadas por diversos fenómenos y características constructivas de sus componentes, destacan los flujos de dispersión, número de ranuras en el estator, la geometría de los dientes, entre otras.

- ✚ **Potencias de entrehierro:** El concepto de potencia de entrehierro tiene que ver con la potencia de paso entre el estator y la que finalmente llega al rotor para realizar el movimiento del eje de un motor. Es importante destacar que independiente del tipo de

eficiencia con el que haya sido construido un motor, siempre se generaran perdidas de entrehierro. Los fabricantes de motores, y en especial sus equipos de diseño e ingeniería buscan distintas soluciones para minimizar las diversas perdidas que puedan estar relacionadas con los aspectos constructivos. En específico, las perdidas en potencia de entrehierro pueden ser minimizadas disminuyendo la distancia del entrehierro, es decir, la distancia que existe entre los devanados y conjuntos del estator y del rotor.

3.4 Versatilidad

Los motores de inducción, presentan ciertas limitaciones dependiendo del proceso, sin embargo, a pesar de lo anterior, son los que entregan una mayor versatilidad en cuanto al empleo que se le pueda dar, como por ejemplo, su trabajo en régimen permanente y sus tipos de partida (cada tipo de partida son necesarias para ciertas aplicaciones).

3.4.1 Tipos de partida

Durante el momento de partida de estos tipos de motores, pueden verse afectados algunos elementos de la instalación, dependiendo del tipo de partida que se utilice, y de si se hicieron bien los cálculos de protecciones y alimentadores.

En la industria, se utilizan principalmente tres distintos tipos de partida de los motores eléctricos de inducción: arranque directo, arranque estrella triangulo, arranque controlado (utilizando algún dispositivo adicional).

3.4.1.1 Partida directa

Es la forma más sencilla de hacer partir un motor de inducción, y se trata de que el equipo sea energizado, y arranque sin ningún tipo de control previo que haga estabilizar los valores tanto de corriente como de torque.

La corriente y el torque, al momento de la partida, oscilan entre 6 a 8, y de 0,5 a 2 veces lo nominal respectivamente, en donde cada valor dependerá del instante en el que sea evaluado. Esto se grafica en la figura N° 3.3 en el caso de la corriente y en la figura N° 3.4 para el caso del torque.

Lo que se puede apreciar en la figura N° 3.3 (entiéndase al valor unitario como el valor nominal y permanente del motor), es cómo se comporta la corriente a medida que aumenta la velocidad al momento de partida, en donde en el instante de velocidad 0, la corriente tiene un valor de 6 veces la nominal, el cual irá disminuyendo progresivamente hasta que el motor alcance la velocidad establecida como normal para su funcionamiento.

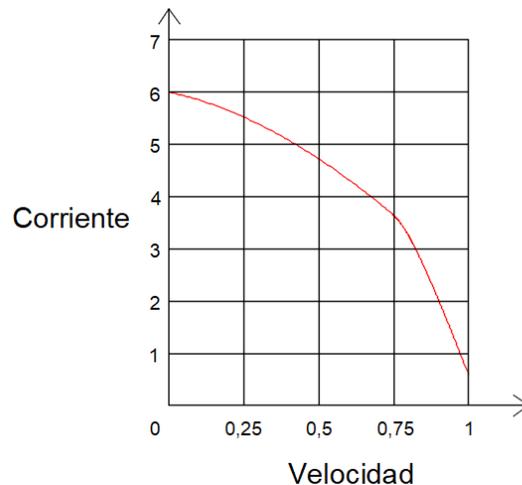


Figura N° 3.3: relación corriente y velocidad al momento de arranque, partida directa.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

En el caso de la figura N° 3.4 (entiéndase igualmente al valor unitario como el valor nominal y permanente del motor), se aprecia como la línea continua (línea roja), la cual representa el torque ejercido por el motor, alcanza valores por sobre los nominales, y es debido a que el equipo tiene que aplicar una mayor fuerza para salir del reposo en el que se encuentra. Mientras que, la línea segmentada (línea azul), es el torque recibido por la carga, la cual es menor al ejercido por el equipo, al menos, en el momento de partida.

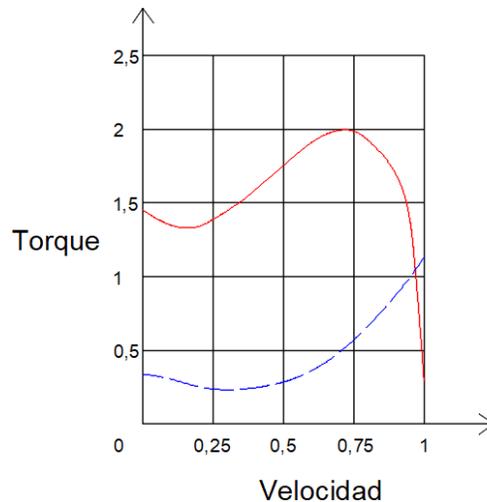


Figura N° 3.4: Relación torque y velocidad al momento de arranque, partida directa.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

Los principales beneficios que se obtiene con respecto a este tipo de partida, son: el bajo costo (no se requiere equipo de control adicional, tan solo energizarlo), su sencillez (es la forma de partida más simple que existe), su torque elevado (para mover cargas pesadas), y el rápido arranque que se obtiene (el tiempo de partida del motor es menor a las otras formas).

Por otro lado, la principal desventaja es la corriente de arranque excesivamente elevada, la cual (como ya se ha señalado en este subcapítulo), puede dañar a algún componente de la instalación si no se proyectan adecuadamente las protecciones y alimentadores, y en este contexto, será necesaria la implementación de un equipo capaz de absorber a aquel exceso. Además, el uso de este tipo de arranque disminuirá en parte la vida útil de motor.

3.4.1.2 Partida estrella-triangulo

Este es un tipo de partida muy recurrente, puesto que, con tan solo una simple configuración en la bornera del motor, permite reducir considerablemente la corriente de arranque, y optimizar la partida. Esta configuración permite arrancar el motor en estrella

desde la tensión de la red, así, el voltaje inicial del equipo será el cuociente de lo que resulte entre el voltaje de entrada con $\sqrt{3}$, lo que conlleva a que el torque de arranque se reduzca a un tercio de lo que se disponía en la partida directa. Así, en el momento de arranque, la corriente sería de 1,2 a 1,6 veces la nominal, y el torque, de 0,2 a 0,5 veces.

La configuración del arranque en estrella continúa hasta que el equipo se estabilice, y esto ocurre cuando alcanza el 75 y 85 % de la velocidad nominal, que es donde se equilibran el par del motor y el par resistente, luego, los devanados se acoplan en triángulo, permitiendo así que el motor empiece a trabajar con sus valores nominales, lo que se ilustra en las figuras N° 3.5 y N° 3.6.

En la figura N° 3.5, se aprecia en la línea roja (línea 1) la corriente de arranque que tiene el motor por defecto (partida directa), mientras que, la línea azul (línea 2), representa el curso que sigue el arranque ante la partida en configuración estrella, en donde desde su 75 %, el motor retoma a la configuración triángulo.

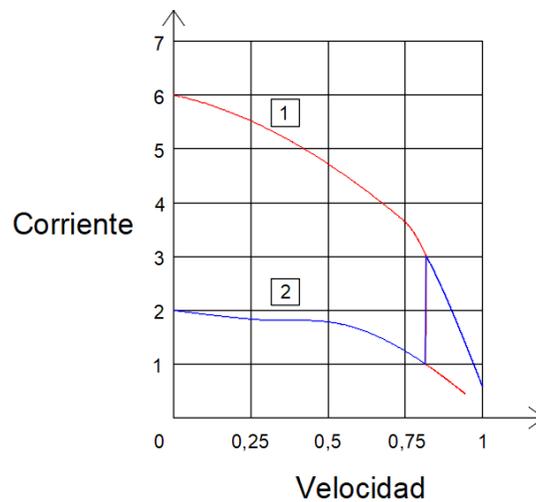


Figura N° 3.5: Relación corriente y velocidad al momento de arranque, partida estrella-triángulo.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

Lo mismo ocurre para la figura N° 3.6, en donde la línea azul (línea 1), refleja el torque de un arranque directo, mientras que, la roja (línea 2) y verde (línea 3), indican las curvas de torque en configuración de estrella de la partida (desde el 75 % cambia a la configuración triángulo), y de la carga (el cual es menor a la ejercida por el motor) respectivamente.

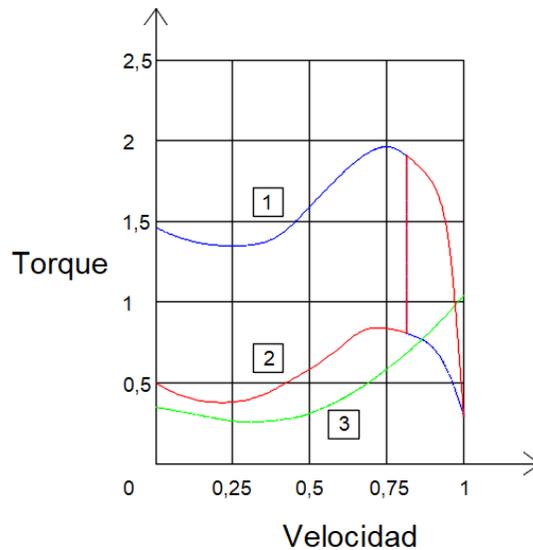


Figura N° 3.6: Relación torque y velocidad al momento de arranque, partida estrella-triángulo.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

El principal beneficio de este tipo de partida, es que se obtiene una reducción considerable de la corriente de partida, sin embargo, merma en parte el torque inicial que ejerce el motor.

3.4.1.3 Controlada

El uso de cualquier dispositivo externo al motor, para que este realice su partida, será una partida controlada. Estos dispositivos son utilizados para ciertos requerimientos que se necesite del motor, como, por ejemplo, cambios de velocidades. Antiguamente, originaba ciertas limitaciones y restricciones, ya que para una cierta fuente de alimentación (frecuencia y voltaje) y motor (potencia y número de polos), este último giraba a una velocidad prácticamente fija, por tal razón, se preferían otros tipos de motores, pudiendo ser menos eficientes y a su vez más caros.

Lo anterior se soluciona en parte con los variadores de Frecuencia (VDF), dispositivos que se encuentran entre la alimentación y el motor, y que son capaces de poder manejar los motores a velocidades variables, sin mermar e inclusive en ocasiones aumentar su eficiencia. Es por ello que ahora los motores de inducción permiten ser usados en aplicaciones especiales, aunque siguen con ciertas limitaciones y desventajas considerables dependiendo del proceso, tales como la derivación de ruidos e interferencias (armónicos) en la red eléctrica. A pesar de que estas perturbaciones son mitigables, su nulo cuidado se puede traducir en posibles sobrecalentamientos en los conductores (inclusive del neutro) y accionamiento de las protecciones en el caso de la instalación, además de sobrecalentamiento de componentes, corrientes parasitas, y otros problemas que acarrearán fallas a corto, mediano, y largo plazo en el caso de los motores eléctricos. Por otro lado, los VDF tienen un impacto positivo en el consumo energético del motor, dado que el VDF mide, regula y posteriormente entrega la energía que el equipo requiere para la realización del proceso.

Se suele asociar a los VDF a un grupo de accionamientos en C.A (AC Drives), en donde se incluyen de igual manera los partidores suaves, los cuales son utilizados solo para la gradualidad en la partida y parada de los motores, y no para modificar la velocidad en régimen permanente.

Lo anterior se consigue recortando la señal de onda sinusoidal tanto en su media onda positiva como en la negativa, lo cual genera que se reduzca el valor R.M.S del voltaje, lo que puede ser una característica no muy favorable dado que a medida que disminuye el valor de voltaje a la mitad, su par disminuirá a un cuarto de su valor nominal, lo cual podría imposibilitar en algunos casos el arranque del motor.

Otro equipo a utilizar, y que controlan tanto la partida como el régimen permanente de los motores, son los reductores, los cuales son utilizados para controlar y variar las revoluciones por minuto (rpm) de los motores eléctricos. Estos, a diferencia de los VDF, se acoplan al motor de manera mecánica,

La diferencia entre el uso de reductores y de VDF será, la versatilidad que cada uno le posibilite al motor. Si bien los VDF son equipos completos capaces de cumplir muchas funciones, los reductores al trabajar de manera acoplada, es decir, de manera mecánica, permite una mayor variación de velocidad del motor, inclusive a valores por debajo de los 240 rpm, lo que no ocurre con un variador de frecuencia, el cual permite al motor llegar tan solo a aquellos 240 rpm. Por otro lado, a la diferencia anterior, se le debe sumar el costo, en donde los reductores se alzan por sobre los VDF, y aunque existen más dispositivos en cuanto a la partida controlada, los mencionados son los más usados.

CAPITULO IV

MOTORES ELECTRICOS DE IMANES PERMANENTES

Los motores eléctricos de imanes permanentes, son un tipo de motor síncrono capaz de ser muy eficiente en los procesos en los cuales es requerido, dado que su manera de fabricación no se presenta en ningún otro, y esto conlleva beneficios y desventajas con respecto a, por ejemplo, un motor eléctrico de inducción.

4.1 Funcionamiento y características constructivas

Este tipo de motores se basa en la utilización del campo magnético que generan los propios imanes con los cuales es construido, por lo tanto, no hay necesidad de inducir un flujo eléctrico en el rotor.

Una virtud de estos motores, es que la velocidad con la que gira el rotor, será igual al campo magnético que genera los imanes, por lo tanto, independiente de la carga, no habrá deslizamiento.

Esto se debe a las características de los mismos imanes, los que, para la fabricación de este tipo de motores, se conocen cuatro tipos, los que se exhiben en la tabla N° 4.1, y que se diferencian entre su grado de remanencia, que es la capacidad de un material para retener el magnetismo que le ha sido inducido.

Así, los imanes más utilizados en la actualidad para este tipo de motores son los compuestos por Neodimio, hierro, y boro, los que cuentan con una alta remanencia, es decir, que sus componentes internos girarán con mayor facilidad e igualarán al campo magnético generado. Por su parte, los motores que cuentan con imanes compuestos por samario y cobalto, cuentan con una mayor remanencia, y soportan temperaturas mayores, pero su alto costo hace limitar su uso en la industria.

Tabla N° 4.1: Tipos de imanes con los que se construyen los motores de imanes permanentes.

Imán	Composición	Descripción
Alnico	Aluminio, níquel, cobalto	Usado en el pasado, fácil desmagnetización
Ferrita:	Cerámico (varios elementos)	Baja remanencia. Usado en motores de baja potencia (electrodomésticos).
NdFeB:	Neodimio, hierro, boro	Alta remanencia. Es usado en motores de alta performance (motores de uso industrial, servomotores, etc.). Su costo es mucho mayor que el imán ferrita.
SmCo:	Samario, cobalto	Alta remanencia, soporta temperaturas mayores que el NdFeB, y tiene un precio mayor.

La fabricación es similar a la de un motor eléctrico de inducción, e inclusive, su estator es bobinado, sin embargo, lo que varía es el rotor, dado que cuenta con ranuras para insertar los imanes, y es gracias a aquellos imanes, que no es necesaria su magnetización mediante un flujo eléctrico, dado que son estos los que originan el campo magnético. Lo anterior se ilustra en la figura N° 4.1, en donde se aprecian las ranuras del rotor en las que están insertos los imanes.

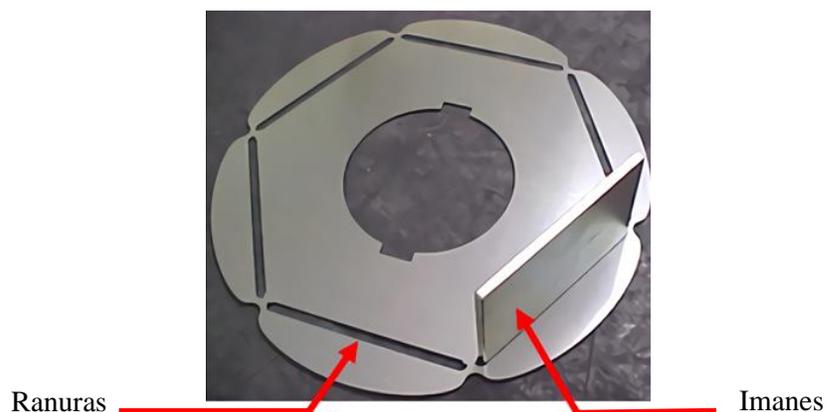


Figura N° 4.1: Representación de rotor de motor de imanes permanentes.

Fuente: Weg.

4.2 Conceptos básicos de los motores eléctricos de imanes permanentes

Los motores eléctricos de tipo industrial poseen semejanzas en múltiples principios eléctricos, pues basta con señalar que una gran parte de estos son alimentados eléctricamente con fuentes de alimentación trifásica de C.A, por lo que, la mayoría de los conceptos básicos se mencionan en el subcapítulo 2.4. Sin embargo, existen ciertas diferencias que, desde lo constructivo implican que características como el deslizamiento, frecuencia, entre otros, se vean afectados.

4.2.1 Deslizamiento

El deslizamiento se define como la diferencia de velocidades entre el campo magnético y el rotor, y en el caso de los motores eléctricos de imanes permanentes, esta es cero. Lo anterior, conlleva una serie de beneficios que van desde un aumento de la eficiencia, hasta un mayor control de la velocidad. Así, la fórmula para determinar el sincronismo del equipo queda representada por la ecuación N° 2.4.

4.2.2 Frecuencia en el rotor

La frecuencia tiene una directa relación con el deslizamiento, y este, al ser cero, no hay una disminución de velocidad, obteniendo para un mismo consumo de energía, una mayor velocidad de rotación que si hubiese deslizamiento.

Si bien un motor sincrónico puede estar construido con distintos números de polos, obteniendo distintas velocidades a distintas frecuencias (lo que se ilustra en la tabla N° 2.5), en el caso de los motores de imanes permanentes, lo anterior no es así, debido a que estos se componen de 6 polos magnéticos insertados en el rotor (figura N° 4.1), los que originan cierta velocidad, la cual, se puede regular a la requerida gracias al VDF excluyente inserto en el proceso.

4.2.3 Rendimiento

Dado a que no existe un flujo de corriente eléctrica para la movilización del rotor, no generarán el calor (efecto Joule) que, si lo hace, por ejemplo, un motor eléctrico de inducción. Lo anterior ocasionará a que se aproveche de mejor manera la energía absorbida desde la red, debido a que, de igual forma, el equipo tampoco expulsará un gran calor por medio de su sistema de ventilación, teniendo a este como un medio de seguridad más que de necesidad.

El rendimiento caracteriza a este tipo de motor, dado que, por las razones recién expuestas, las pérdidas del equipo son casi inexistentes, alcanzando un nivel IE5, el cual es el grado más alto de la IEC en cuanto a eficiencia.

4.3 Versatilidad

Cada uno de los tipos de motores eléctricos son diseñados para ciertos usos en la industria, y en el caso de los de imanes permanentes, son para su utilización en sistemas que necesitan de una gran variabilidad de velocidades. Esto hace referencia a que el motor eléctrico de imanes permanentes es capaz de no solo trabajar a grandes velocidades, sino a que unas extremadamente bajas que no todo tipo de motor puede, lo que lo convierte en un equipo versátil.

A velocidad nominal, los motores eléctricos síncronos alimentados con 60 Hz, trabajan a 3000 RPM, lo que se explica con la ecuación N° 2.4, pero, en el caso de aumentar esta velocidad, el motor sufrirá una caída progresiva de su par, algo que en todo motor eléctrico se producirá. Por otro lado, la mayoría de los motores no pueden trabajar a velocidades más bajas que 240 RPM, debido a que se pueden producir daños permanentes en sus componentes, sin embargo, si podrán hacerlo los motores eléctricos de imanes permanentes, manteniendo inclusive su par, que es lo que se refleja en la figura N° 4.2.

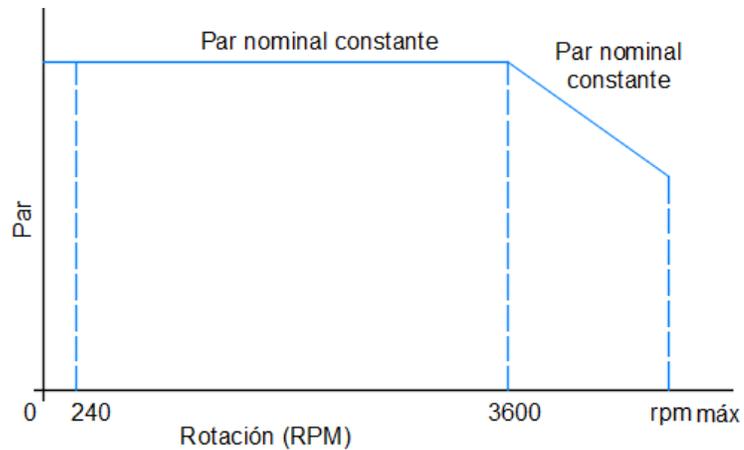


Figura N° 4.2: Relación par y rotación de motores eléctricos de imanes permanentes.

Fuente: Propia, en base a conocimientos adquiridos en la carrera universitaria.

Lo anterior es posible dado que será necesaria la utilización obligatoria de un variador de frecuencia (VDF) para el accionamiento del motor, debido a que estos, cuentan con un software dedicado que incorpora la tecnología del control vectorial para el accionamiento de motores de imanes, lo que se explica en la tabla N°4.2. Cabe mencionar, que se debe utilizar un encoder para que el motor trabaje a velocidades inferiores a 240 RPM, el cual es un equipo que convierte el movimiento en una señal eléctrica que puede ser leída por algún tipo de dispositivo, que en este caso será un VDF.

Tabla N° 4.2: Acción del VDF a distintas velocidades en motores eléctricos de imanes permanentes.

Bajas velocidades (240 RPM o menos)	Velocidades nominales o superiores (desde 240 RPM)
El VDF suministra una onda portadora de alta frecuencia para estimar la posición del rotor (ruido de alta frecuencia).	El VDF identifica la posición del rotor a través de la variación de las inductancias del motor.

Otra característica que apunta a la versatilidad, es la reducción del tamaño y del ruido, los que, de este equipo en particular, son inferiores al estándar, debido al sincronismo del equipo y a la reducción significativa de su calor interno, además, debido igualmente a lo anterior, se disminuyen considerablemente las mantenciones programadas dado a un menor desgaste del equipo en general, alargando posibles cambios de piezas, y, por ende, de la vida útil del motor. Estos son puntos importantes si se considera que de aquello puede depender la incorporación o no del equipo.

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO ENTRE MOTORES ELECTRICOS DE INDUCCION Y DE IMANES PERMANENTES

Cada motor eléctrico, corresponde a un sinnúmero de soluciones para ciertos procesos de la industria, y en este contexto, las comparativas para entender cuando utilizar cada uno, son necesarias. Es por lo anterior, que se realizará una comparativa en base a tres tipos de motores: rotor devanado y jaula ardilla en el caso de los asíncronos (o inducción), y de imanes permanentes en el caso de los síncronos.

5.1 Usos en la industria

Los aspectos más relevantes de los motores eléctricos están descritos en sus capítulos correspondientes (capítulo tres y cuatro para los de inducción e imanes permanentes respectivamente), sin embargo, determinar los usos que se le da a cada uno ayuda a comparar de mejor manera a ambos tipos de motores.

5.1.1 Usos de los motores eléctricos de inducción

Hay que diferenciar entre los de rotor jaula ardilla, y rotor devanado, los cuales, si bien ambos son de inducción, los dos tienen una fabricación diferente, usos diferentes y, por ende, costos diferentes, los que se detallan en el presente proyecto.

Cabe mencionar, que los motores de inducción, para el mercado internacional, el Comité Electrotécnico Internacional (IEC) establece 3 categorías de motores en su estándar IEC 34 (los que no corrigen los usos generales que se presentan en los siguientes subcapítulos), estos son:

- ✚ **Categoría N:** Par de arranque normal, corriente en el arranque normal, bajo deslizamiento.

✚ **Categoría H:** Par de arranque alto, corriente de arranque normal, bajo deslizamiento.

✚ **Categoría D:** Par de arranque alto, corriente de arranque normal, alto deslizamiento (más 5 %).

5.1.1.1 Rotor jaula ardilla

En el caso de los de rotor de jaula ardilla, su utilización se basa principalmente, además de su bajo costo comercial, en su simpleza y capacidad de movilizar cargas pesadas. Asimismo, son ideales para movilizar cargas que no necesiten una alta gradualidad en la velocidad del eje, y en este aspecto, se pueden tomar como ejemplo a los cargadores y las bombas.

Sin embargo, de igual manera, será posible implementarles dispositivos de control de velocidad con el fin de darle más versatilidad, y cumplir con los requerimientos de otros procesos, pues en esa línea, se asoman los reductores y los variadores de frecuencia (VDF).

Los reductores son utilizados de manera acoplada al motor, y varían las revoluciones por minuto del equipo (inclusive por debajo de los 240 rpm) con el fin de que se adapten de la mejor manera al proceso. Lo anterior no afecta la potencia de arranque, y en algunos casos, esta puede ser aumentada, por lo que se convierte en una excelente opción en caso de necesitar un alto torque en la partida. Un ejemplo de donde se utilizan estos equipos, son en los molinos de baja capacidad (los motores de rotor de jaula ardilla no son aptos para molinos de alta capacidad), en donde es necesaria la progresión de velocidad, y una alta potencia tanto en el arranque como en lo nominal.

Los variadores de frecuencia, en cambio, son dispositivos que se encuentran entre la alimentación y el motor, y controlan la potencia del equipo intervenido, lo que se traduce en un aumento o una disminución de la velocidad.

El uso de los VDF es para cargas en las que se requiere un control de velocidad en todo momento, no inferiores a 240 rpm, tales como puentes de grúa, elevadores industriales, etc.

5.1.1.2 Rotor devanado

Los motores de rotor devanado, o bobinado, a diferencia de los de rotor de jaula ardilla, cuentan con una estructura de fabricación más compleja, lo cual hace disminuir su uso en la industria por su alto costo. Sin embargo, existen aplicaciones en las que este tipo de motor es necesario.

Este tipo de motor se utiliza cuando tanto el torque de arranque, como el nominal, debe ser extremadamente alto, algo que no se consigue con un motor eléctrico de rotor de jaula ardilla. En aquel caso, deberá utilizarse un dispositivo que controle la corriente de arranque, tales como reóstatos líquidos, o partidores de resistencia, dado que, para este tipo de aplicación, el motor deberá arrancar en partida directa. Un ejemplo de lo anterior, son los molinos de alta capacidad.

Por otro lado, este tipo de motor, de igual manera permite el uso con controladores de velocidad, como lo son los reductores y los variadores de frecuencia, teniendo los mismos beneficios y desventajas que uno de rotor de jaula ardilla.

5.1.2 Usos de los motores eléctricos de imanes permanentes

Si bien este tipo de motores es de un costo elevado, la utilización de este tipo de motores se basa principalmente en su eficacia al momento de su utilización en un amplio rango de velocidades (inclusive menor a los 240 RPM, velocidad que se conseguía anteriormente con los motores eléctricos de corriente continua), y de su eficiencia, la cual corresponde según la norma IEC a un I4, llegando inclusive a un I5.

Para utilizar los motores de imanes permanentes, será necesaria la implementación de un variador de frecuencia (excluyente), consiguiendo así un mayor control en su accionamiento, funcionamiento, y costo energético.

Dado que este equipo logra una alta versatilidad de velocidad, su uso es idóneo para torres de enfriamiento, filtros manga, máquinas de papel, rebobinadoras de papel, cintas transportadoras, etc.

5.2 Comprensión de los factores utilizados para la comparación

Un punto sustancial, es entender la metodología a aplicar para la comparación entre los motores eléctricos.

En este contexto, se tomará como referencia el uso de una maquinaria vital para la industria del norte de Chile, un molino, el cual requerirá ciertas características que ambos tipos de motores (de inducción y de imanes permanentes) pueden desempeñar, dado que la potencia del molino a trabajar es de 402 HP, lo que se cataloga como uno de baja capacidad.

La aplicación, requerirá un alto torque, y dado que, a mayor torque, menor es la velocidad, esta última tendrá que ser disminuida. Para conseguir lo anterior, se establecerán en 4 los números de polos en el caso de los motores de inducción, mientras que, para los motores de imanes permanentes, se establecerán en 6.

Los aspectos más relevantes para la respectiva comparación se detallarán en los siguientes subcapítulos.

5.2.1 Regímenes a utilizar

En virtud de ejemplificar de mejor manera la comparativa de los motores, se decidió por aplicar un régimen permanente de un periodo de 12 horas diarias, durante 10 años.

Aquel régimen permanente, se utilizó debido a su uso en muchas de las industrias presentes actualmente, en donde el uso del establecimiento (y, por ende, el encendido de las maquinarias), comienza en un momento de la mañana, y finaliza en un momento de la tarde. Como, por ejemplo, un horario de 8:00 a 20:00 hrs.

5.2.2 Motores a utilizar

Para utilizar cualquier motor en una aplicación, la fuerza de su eje, la cual sale reflejada en la placa del motor, debe ser igual o superior a la necesaria por la aplicación. Es en este contexto, que se establecerán para los tres tipos de motores a comparar una potencia de salida equivalentes a **300 kW** (402 HP).

Por lo demás, los tres motores serán trifásicos, y dada su forma de fabricación, estos tendrán diferente factor de potencia, y eficiencia. Esto, significará diferente consumo para cada uno, y, por ende, un mayor o menor gasto en aquel concepto.

Así, la información más relevante correspondiente a cada uno de los tres motores (motor de inducción con rotor de jaula ardilla y rotor devanado, y de imanes permanentes), se ilustran en la tabla N° 5.1.

Tabla N° 5.1: Información general de motores.

Motor de inducción, rotor jaula ardilla	Potencia: 300 kW
	Voltaje: 380 V
	Polos: 4
	Factor de potencia: 0.81
	Eficiencia: 96 % al 100 % de su potencia
	Corriente: 586 A
Motor de inducción, rotor devanado	Potencia: 300 kW
	Voltaje: 380 V
	Polos: 4
	Factor de potencia: 0,87
	Eficiencia: 94.6 % al 100 % de su potencia
	Corriente: 553.8
Motor de imanes permanentes	Potencia: 300 kW
	Voltaje: 380 V
	Polos: 6
	Factor de potencia: 0.9
	Eficiencia: 96.8 % al 100 % de su potencia
	Corriente: 523,2 A

Cabe mencionar, que los motores de imanes permanentes se componen de 6 polos magnéticos insertados en el rotor, pudiendo regular la velocidad con el variador de frecuencia para obtener la velocidad requerida. Además, si bien en el caso del motor de rotor de jaula ardilla, es ideal el uso de uno de clase H, se utilizará uno de clase N, pudiendo controlar su potencia con el variador de frecuencia. Esto último se debe a que no se tiene registro económico alguno de un motor de rotor de jaula ardilla clase H, y es posible utilizarlo en la aplicación debido a que el molino a utilizar es de baja capacidad.

5.2.3 Tarifa eléctrica a aplicar

El presente proyecto contempla un análisis de costos que diferenciará el gasto energético que producen los motores revisados, y se realizará en base a una tarifa eléctrica coherente con un posible uso en la industria. En este aspecto, se excluyen preliminarmente la tarifa BT1 (dado que por lo general las industrias superan un consumo superior a los 10kW), y cualquier tarifa que sea fijada a un cliente libre (puesto que no se tiene conocimiento de los patrones que puedan regir a esta clase de tarifa).

Por ende, tomando en consideración el mercado actual de la industria, se realizarán los respectivos cálculos del gasto energético en base la tarifa AT4.3, la cual es una subdivisión de la AT4. La AT4.3, se caracteriza por tener los siguientes cargos, los cuales se explican en los párrafos siguientes:

- ✚ Administración del servicio.
- ✚ Transporte de electricidad.
- ✚ Electricidad consumida.
- ✚ Cargo mensual por demanda máxima leída de potencia en horas de punta.
- ✚ Cargo mensual por demanda máxima de potencia suministrada.

En el caso de la **administración del servicio**, será un cargo fijo que lo determina la misma tarifa, el **transporte de electricidad**, es un ítem que depende de la energía transportada, la que se multiplicará por su valor unitario en kW. En lo que respecta de la **electricidad consumida**, esta se calculará de igual manera, en base a los kW consumidos en el mes, los que se multiplicarán por su valor unitario.

En el caso del **cargo mensual por demanda máxima leída por potencia en horas de punta** (de 18:00 a 23:00 horas), se aplicará todo el año dependiendo del mes actual:

- ✚ Los meses entre abril y septiembre (ambos inclusive), son los únicos en los que las horas punta son contempladas. Durante estos meses, se aplicará un cargo por la potencia máxima consumida en horas de punta efectivamente leída en cada mes.
- ✚ Durante los meses que no contengan horas de punta, es decir, entre octubre y marzo (ambos inclusive), se aplicará el precio unitario correspondiente al promedio de las dos mayores demandas máximas de potencia en horas de punta, registradas durante los meses del período de punta inmediatamente anterior.

Finalmente, el **cargo mensual por demanda máxima de potencia suministrada**, se facturará aplicando el precio unitario correspondiente, al promedio de las dos más altas demandas máximas de potencia registradas en los últimos 12 meses, incluido el mes que se facture.

La tarifa escogida se empleó debido a que, en parte, las tarifas en baja tensión están aplicadas mayoritariamente a negocios de bajos niveles de potencia, en donde no son necesarios voltajes superiores a los 220 V, mientras que, para el funcionamiento de un motor eléctrico, podrían ser necesarios otros niveles de voltaje, como 380, o 600v. En este aspecto, una tarifa en alta tensión se adapta a lo requerido para la clase de motores a comparar.

De igual manera, la tarifa AT4.3, a diferencia de otras, comprende solo cargos que dependen del consumo del cliente, mientras que, en otras, se pueden aplicar otros cargos, como por ejemplo, la potencia contratada, en la que se factura una potencia fija aunque esta no sea utilizada por completo, lo que se traduce que, al querer comparar el ahorro de un motor frente a otro, no habría mucha fluctuación en la boleta, puesto que no mediría por completo el consumo de los equipos. Lo anterior corresponde un aspecto relevante del porque se escogió esta tarifa.

El costo por cada ítem, se comprende en el anexo 1, el cual especifica los valores tanto para cargos fijos, como de los valores unitarios por kW.

5.3 Comparativa económica

Este aspecto es relevante para decidir la incorporación de uno u otro equipo, debido a que determina si un equipo es viable, y si existe algún retorno de la inversión realizada.

En este contexto, se consideraron dos puntos, uno a nivel de mantenciones (que, si bien no es cuantificable en este proyecto, hay que tenerlo en consideración para cualquier incorporación), y otro a nivel de consumo energético (el cual fue descrito con anterioridad).

5.3.1 Costo energético

En el caso del costo energético, es importante mencionar que solo se aplicarán los cargos descritos en el subcapítulo 5.2.3, siendo los siguientes puntos tan solo alcances de los cálculos a realizar:

- ✚ No se consideran descuentos por nivel de tensión del cliente, esto es, descuento del 9 % de la boleta para clientes con tensión de suministro de 110 kV, o un descuento del 7 % de la boleta para clientes con tensión de suministro de 44 o 66 kV. En cualquier caso, dependiendo del tipo de cliente y comprendiendo los bloques de potencia solicitados, el cliente podrá negociar el precio final de su tarifa con la distribuidora y así obtener mejores precios.
- ✚ No se consideran recargos por bajo factor de potencia. Por ende, no se considera el recargo de un 1% por cada centésima que dicho factor baje de 0,93.
- ✚ No se considera un recargo de 3,5% por medición en baja tensión, dado que se entiende que la medición se realiza en alta tensión, y esto eliminaría el recargo.
- ✚ Se consideran consumos de energía constantes para todo el período de evaluación, es decir, se asume que el equipo medidor no integrara valores de potencia mayores

a los nominales debido a su breve duración (oscilaciones bruscas y partidas de motor), en comparación al periodo de utilización. Esto facilita el cálculo tarifario, debido a que no existen (para este caso) periodos prolongados con potencias variables. Con lo anterior, la demanda existente fuera del horario de punta y en horario de punta es la misma.

- ✚ Se consideran para todos los cálculos el tarifario eléctrico actualizado a diciembre de 2020.
- ✚ Respecto a la tarifa y para efectos del cálculo, se considera que esta se congela en los próximos 10 años (periodo de evaluación del presente proyecto) y se utilizan los valores asignados para la ciudad de Copiapó respecto a la tarifa AT 4.3.
- ✚ No estarán considerados los costos de montaje para este cálculo.

El costo energético, se regirá por medio de la energía consumida por el motor en un tiempo definido, el cual estará determinado por el tipo de régimen previamente definido. La energía consumida que se evaluará para determinar aquel costo, será la sumatoria de toda la potencia diaria del equipo, por los días efectivamente operados en el mes.

Obtenido aquel consumo, se utilizará como base la tarifa eléctrica descrita para determinar finalmente el costo real mensual por energía.

5.3.1.1 Costo energético del motor de inducción

El costo económico anual, proyectado a 10 años, a partir del consumo energético de los motores de inducción de jaula de ardilla y de rotor devanado quedan expresados en la tabla N° 5.2 y tabla N° 5.3, respectivamente. Cabe mencionar, que los cálculos realizados se encuentran en una planilla Excel disponible en el anexo N°2.

Tabla N° 5.2: Resumen costo económico anual a partir del consumo energético de un motor jaula de ardilla, proyectado a 10 años.

Sumatorias boletas 2020	\$ 173.446.330
Sumatorias boletas 2021	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2022	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2023	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2024	\$ 173.446.330
Sumatorias boletas 2025	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2026	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2027	\$ 173.061.292
Sumatorias boletas 2028	\$ 173.446.330
Sumatorias boletas 2029	\$ 173.061.292
Costo total (10 años)	\$ 1.731.768.033

Tabla N° 5.3: Resumen costo económico anual a partir del consumo energético de un motor de rotor devanado, proyectado a 10 años.

Sumatorias boletas 2020	\$ 176.057.270
Sumatorias boletas 2021	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2022	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2023	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2024	\$ 176.057.270
Sumatorias boletas 2025	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2026	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2027	\$ 175.666.435
Sumatorias boletas 2028	\$ 176.057.270
Sumatorias boletas 2029	\$ 175.666.435
Costo total (10 años)	\$ 1.757.836.856

5.3.1.2 Costo energético del motor de imanes permanentes

Para el caso del costo económico anual, a partir del consumo energético del motor de imanes permanentes, queda expresado en la tabla N° 5.4. Cabe mencionar, que los cálculos realizados se encuentran en una planilla Excel disponible en el anexo N°2.

Tabla N° 5.4: Resumen costo económico a partir de consumo energético de un motor de imanes permanentes proyectado a 10 años.

Sumatorias boletas 2020	\$	172.065.228
Sumatorias boletas 2021	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2022	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2023	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2024	\$	172.065.228
Sumatorias boletas 2025	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2026	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2027	\$	171.683.256
Sumatorias boletas 2028	\$	172.065.228
Sumatorias boletas 2029	\$	171.683.256
Costo total (10 años)	\$	1.717.978.480

5.3.2 Mantenimiento

El mantenimiento tiene como finalidad alargar la vida útil de los equipos, y en este caso, la de los motores. Este ítem en la industria es relevante, dado que su inadecuada o nula realización, podría desencadenar fallas inesperadas, las que serían las causales de una eventual avería de la máquina, y de pérdidas por no producción. Además, el mantenimiento corresponde a un costo fijo periódico, el que debe ser considerado para determinar un posible retorno de inversión de alguna adquisición de uno u otro motor.

5.3.2.1 Mantenimiento del motor de inducción

Con respecto al mantenimiento de un motor de inducción, este debe ser programado y establecido por el usuario dependiendo del proceso, sin embargo, contempla acciones regidas por el fabricante, lo que puede acercar el comportamiento a nivel de mantenciones que se tendrá en un mediano y largo plazo.

Un motor de rotor devanado cuenta con una cantidad superior de componentes mecánicos, lo que lo hace más complejo, y, por ende, más costoso a nivel de mantenciones, sin embargo, en ambos se deben realizar acciones generales. Con respecto a lo anterior, periódicamente en los motores de inducción, se debe realizar una inspección tanto visual como de los parámetros establecidos como nominales. Dentro de la inspección visual se encuentran:

- ✚ Inspección visual general del motor y del acoplamiento, su alineamiento, señales de desgastes, oxidación y piezas deterioradas.
- ✚ Mantener la carcasa limpia, eliminando toda acumulación de aceite o de polvo en la parte externa del motor, para así facilitar el intercambio de calor con el medio ambiente.
- ✚ Verificar la condición del ventilador y de las entradas y salidas de aire, asegurando un libre flujo del aire.
- ✚ Verificar el apriete de las borneras, y verificar la conexión de los cables de alimentación, respetando las distancias de aislamiento entre partes vivas no aisladas entre sí y entre partes vivas y partes puestas a tierra.

Muchas de las inspecciones que anteriormente se describen, se deben a que el motor en muchas ocasiones se comporta de manera inadecuada.

Es por lo anterior, que, de igual manera, se debe realizar una inspección de los parámetros en los que debe actuar el motor, en los que se establecen:

- ✚ Monitorear los niveles de ruido y de la vibración.
- ✚ Verificar el estado de los cojinetes, observando la aparición de ruidos y niveles de vibración no habituales.
- ✚ Verificar la temperatura de los cojinetes, el nivel del aceite, la condición del lubricante y el monitoreo de las horas de operación en comparación con la vida útil informada.

Lo expuesto se contempla como un procedimiento proactivo por parte del usuario con el fin de evitar posibles fallas, sin embargo, hay partes del equipo que cuenta con horas máximas de funcionamiento, las que luego de aquel tiempo, deberán entrar en un proceso de mantención por obligatoriedad. Lo anterior hace mención a los cojinetes de rodamiento, los cuales cada ciertas horas de trabajo, deberán ser lubricados con grasa. Aquel tiempo oscila entre las 11.900 y 20.000 horas de trabajo, tiempo con el cual se puede deducir la vida útil del motor en sí.

5.3.2.2 Mantenimiento del motor de imanes permanentes

Tal como se dijo en el subcapítulo anterior, las mantenciones deben ser programadas y establecidas por el usuario, dependiendo del proceso en donde se utilice el equipo. En el caso de los motores de imanes permanentes, las inspecciones y mantenimiento son en menor periodicidad, debido a que la fabricación de este tipo de motores es tal, que no presentan un mayor desgaste mecánico, ni tampoco funcionan con una temperatura elevada. Es por lo anterior, que las inspecciones relacionadas con aquellos parámetros no se contemplan en el plan de mantenimiento, reduciendo significativamente el costo del mismo, por lo demás, esto es un argumento de venta de las marcas que comercializan este tipo de motor, catalogándolos como ‘libres de mantenimiento’.

Sin embargo, por otro lado, y al igual que en todos los motores, hay piezas que cuentan con un tiempo de utilización máxima, medida en horas de funcionamiento, las que luego de aquel tiempo, se le deberá hacer la mantención correspondiente.

Una pieza importante de este y de la mayoría de los motores, son los cojinetes de rodamiento, los cuales, en los motores de imanes permanentes, su tiempo máximo de funcionamiento sin mantención son de 100.000 horas.

La vida útil de un motor dependerá de la forma de uso, de la aplicación en la cual se esté utilizando, y del lugar donde se encuentre. Sin embargo, el tiempo máximo de utilización de los cojinetes ayuda a evaluar un posible patrón con respecto a la vida útil de los motores, y en el caso de los de imanes permanentes, existe una preponderancia con respecto a la estándar.

5.3.3 Costos referenciales comerciales

El uso de un motor influye en su costo final, dado que será fabricado con ciertas características idóneas para el proceso.

En este contexto, para los tres tipos de motores utilizados en el proyecto, se establecen sus valores comerciales referenciales, a los que se le suman los equipos recomendados para su utilización, en los que se encuentran: VDF en el caso del motor de rotor de jaula ardilla, dado que administra el torque necesario para la aplicación, y elimina la excesiva corriente de arranque; banco de resistencia para el caso del rotor devanado, debido a que, a pesar de no necesitar un VDF o equipo similar, si requiere un elemento que controle la corriente que se genera en el arranque; mientras que, para el caso del motor de imanes permanentes, requerirá por obligatoriedad el uso de un VDF, obteniendo de igual manera los mismos beneficios que el motor de rotor de jaula ardilla.

Lo anterior se refleja en la tabla N° 5.5.

Tabla N° 5.5: Valores comerciales.

Equipos	Valor en CLP
Motor de rotor jaula ardilla + variador de frecuencia	\$33.234.616
Motor de rotor devanado + banco de resistencias	\$73.330.900
Motor de imanes permanentes + variador de frecuencia	\$38.073.832

5.4 Análisis

Los antecedentes descritos en el presente capítulo, ayudarán a establecer un respectivo análisis de las variables a considerar para la incorporación del motor eléctrico.

Tomando en consideración el costo energético de cada equipo, el cual está proyectado a 10 años (subcapítulo 5.3.1), y su valor comercial referencial (tabla N° 5.5) (el que, cabe mencionar, está estrictamente relacionado con su uso y aplicación), se determinan los costos totales, los que se reflejan en la tabla N° 5.6, en donde se aprecia que el motor de imanes permanentes, tiene un costo final menor a las otras dos alternativas.

Tabla N° 5.6: Costos proyectados a 10 años según tipo de motor.

Motor	Costo de compra de equipos	Costo de consumo energético (10 años)	Costo Total
Jaula de Ardilla	\$ 33.234.616	\$ 1.731.768.033	\$ 1.765.002.649
Rotor devanado	\$ 73.330.900	\$ 1.757.836.856	\$ 1.831.167.756
Imanes permanentes	\$ 38.073.832	\$ 1.717.978.480	\$ 1.756.052.312

Así, la figura N° 5.1 refleja las diferencias de los gastos acumulados en el tiempo de cada uno de los motores (las que considera, la compra del equipo en el año 0, y el consumo energético desde el primer al décimo año), con respecto a la variante más económica en el instante evaluado. Inicialmente, el motor de rotor devanado es la opción más costosa, mientras que, la más económica, es el de rotor jaula ardilla, dado que su precio de compra es menor.

En este contexto, con la incorporación del motor de rotor jaula ardilla, se obtiene instantáneamente (año 0) una diferencia a favor de aproximadamente \$ 4.8 millones con respecto al de imanes permanentes.

Sin embargo, aquella diferencia entre estos dos últimos equipos disminuye a lo largo del tiempo, debido al ahorro energético que brinda el motor de imanes permanentes, consiguiendo que, por este último, al cuarto año de operación se haya gastado menos dinero, lo que equivale a un ahorro de aproximadamente \$ 0.675 millones con respecto al de rotor de jaula ardilla.

De este modo, al año 10, con el motor de imanes permanentes se habrá obtenido un ahorro de aproximadamente \$8.9 millones con respecto al de rotor de jaula ardilla, y de aproximadamente \$75 millones con respecto al de rotor devanado.

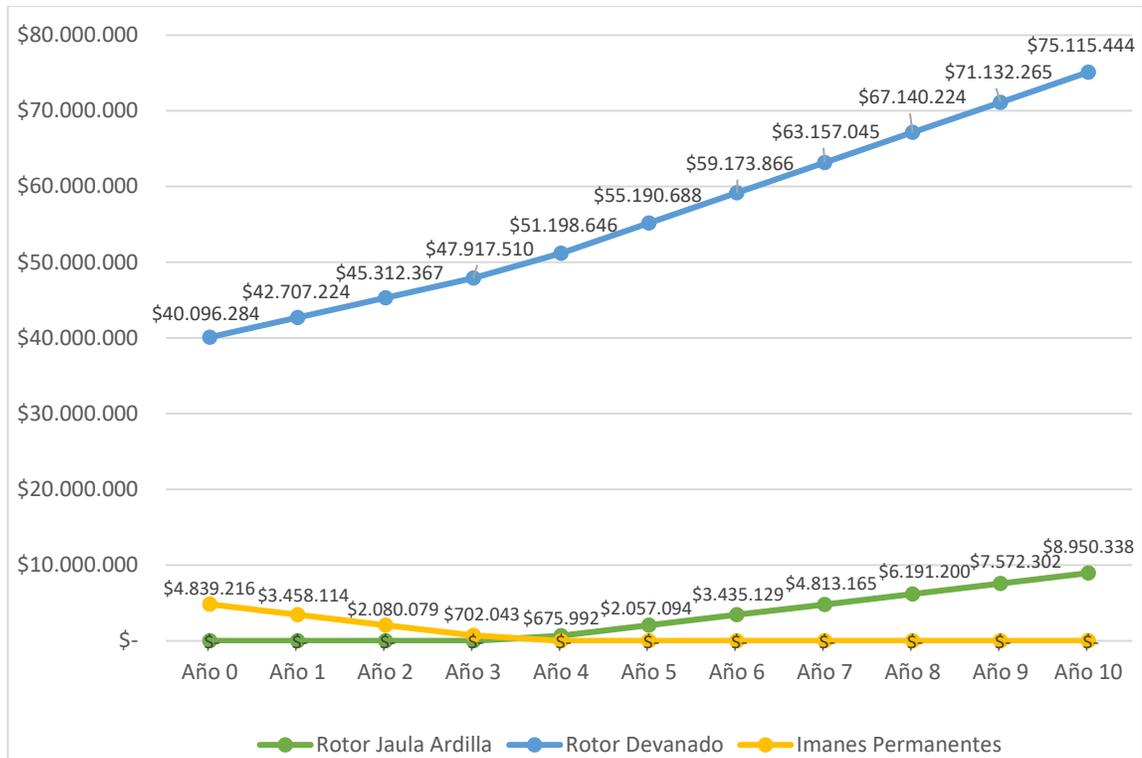


Figura N° 5.1: Diferencia de costos totales de cada motor con respecto a la variante más económica.

Fuente: Propia, en base al valor de compra y costo energético, evaluado a 10 años.

Con respecto a las mantenciones, el presente análisis no contempla un aspecto de costos, dado que depende de cada empresa el respectivo presupuesto que se le dé a aquella área.

Sin embargo, lo descrito en el subcapítulo 5.3.2, da cabida a proyectar un posible plan de mantención para cada uno de los motores, en donde, el de imanes permanentes, es el que requerirá una menor cantidad de mantenciones a lo largo de su vida útil, la que oscila entre 3 a 5 veces más que la de los otros dos motores restantes, mientras que, dada su complejidad y componentes mecánicos, el de rotor devanado es el que contempla una mayor cantidad de mantenciones, y una menor vida útil.

Los de rotor de jaula ardilla, por su parte, durante su vida útil, la cual es mayor que la de un motor de rotor devanado, pero menor que la de imanes permanentes, tiene una cantidad de mantenciones estándar, la cual se contempla en la mayoría de las industrias.

Por otro lado, es relevante señalar, que lo expuesto el subcapítulo 5.1 debe tenerse en consideración, dado que, cada motor tiene su área de aplicación, y para el uso de molinos en general, el de rotor devanado es el ideal debido a su alto torque de arranque.

Sin embargo, el molino ejemplificado es considerado de baja potencia, por lo cual, cualquiera de las tres variantes expuestas es válida, lo que no quiere decir que siempre sea así.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

El actual proyecto da pie para establecer, que los distintos tipos de motores eléctricos son utilizados según sus características, las que son fijadas al momento de la respectiva fabricación para un fin determinado, ya sea para aplicaciones de bajo o alto torque de arranque, bajas o altas velocidades, u otras propiedades que diferencien sus usos. Lo anterior se rige según distintas estandarizaciones, las que, generalmente, son aplicadas por diversas organizaciones a nivel mundial, las cuales, si bien no están todas definidas en este proyecto, las presentes ayudan a entender y orientar al lector hacia aquel universo.

De este modo, ya definidos los usos y características de los distintos motores eléctricos en un plano general, el proyecto busca clarificar específicamente el de los de inducción (los que, cabe recordar, se subdividen en los de rotor de jaula ardilla y rotor devanado), y el de los de imanes permanentes, estableciendo entre ellos, una comparativa tanto a nivel teórico como económico. Con respecto a esto, se determina que, si bien ambos tipos de motores pueden ser utilizados para procesos en común, estos son fabricados para aplicaciones específicas, las cuales son, de par de arranque alto o normal, velocidades limitadas, y consumo estándar para el caso de los de inducción, y de par de arranque normal, amplio rango de velocidades, y bajo consumo para el caso de los motores de imanes permanentes.

Lo anterior son diferencias que, llevadas al plano económico bajo las condiciones establecidas en el presente proyecto, marcan presencia: el motor de rotor devanado es un equipo complejo, de mayores componentes mecánicos, y utilizado para aplicaciones de alto torque, lo que origina, un mayor costo de compra y de mantenciones, a lo que se le suma su elevado consumo, el cual, si bien cumple con el estándar de la norma IEC, la adquisición de este motor con un mayor grado de eficiencia, incrementaría de manera exponencial aquel costo comercial, lo que lo convertiría en una opción totalmente inviable; el motor de rotor de jaula ardilla, en cambio, es un equipo sencillo, con menores componentes mecánicos y con un consumo estándar, ideal para aplicaciones de torque

normal, lo que lo convierte en un equipo económico frente a las otras variantes; el motor de imanes permanentes, por su parte, es un equipo complejo, pero de muy poca mantención, ideal para aplicaciones de torque normal, y si bien tiene un costo de compra mayor que el de jaula ardilla (y menor que el de rotor devanado), según lo expuesto en la figura N° 5.1, con respecto a este último, su bajo consumo hace que se obtenga al cuarto año un retorno de la inversión realizada, esto basado en la tarifa eléctrica AT4.3.

De este modo, se precisa que los motores eléctricos más económicos, considerando tan solo su costo de compra y consumo, son los de rotor de jaula ardilla y de imanes permanentes, siendo este último el más viable siempre que haya una proyección a mediano plazo superior a los cuatro años, dado a que, si se proyecta en un periodo menor, el de jaula ardilla es el que resultará más económico. Por otro lado, en el aspecto de mantenciones, el presente proyecto permite proyectar un posible plan de mantención, considerando lo evaluado en el subcapítulo 5.3.2, en el que, el de imanes permanentes, se asoma como el más conveniente dado a que requerirá una menor cantidad de mantenciones a lo largo de su uso, además, con respecto a su vida útil, esta oscila entre 3 a 5 veces más que la de los otros dos motores restantes, lo que conllevaría de igual manera a un ahorro significativo a largo plazo.

Con respecto a lo anterior, si bien teóricamente el equipo más adecuado para el proceso en cuestión es el motor de rotor devanado debido a su alto torque de arranque, para este caso en particular, el molino a utilizar es considerado de baja capacidad, por lo cual, cualquiera de las tres variantes expuestas en el presente proyecto será útil. Así, se establece que, tras el análisis comparativo instaurado entre cada una de las opciones, y bajo las condiciones y periodos establecidos, el motor eléctrico más factible para el proceso ejemplificado es el de imanes permanentes, tomando en consideración aspectos tanto técnicos como económicos, los que se establecen principalmente en el capítulo 5 del proyecto.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Education, 205 - 371.
- [2] Enríquez, G. (1997). *Control de motores eléctricos* (1.^a ed.). Editorial Limusa, 19 - 148.
- [3] Mora, J. F. (2003). *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill Education, 259 – 477.
- [4] Gallardo, S. (2013). *Estudio comparativo del rendimiento de un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla utilizando las normas IEC y NEMA* (Tesis de pregrado, USACH), código: TUS-ICELE2013; G163es.
- [5] Álvarez, F. (2014). *Ensayo del método Eh-star para obtener las pérdidas adicionales en un motor trifásico de inducción tipo jaula de ardilla* (Tesis de pregrado, USACH), código: TUS-IEELE2014; A4731e.
- [6] Diseño y Categoría en Motores Eléctricos. (2014). *Motortico*. Recuperado de: https://drive.google.com/file/d/1MyIZgNdKRkZi8LWjB39_VJipJHXMtV9j/view?usp=sharing
Link acortado: <https://acortar.link/ulUhIO>
- [7] *Catálogo comercial, motor de imanes permanentes*. WEG. Recuperado de: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hd8/h31/WEG-W22-magnet-drive-system-permanent-magnet-motors-50085095-brochure-english-web.pdf>
Link acortado: <https://acortar.link/sRcc7Z>
- [8] *Guía de especificación de motores eléctricos*. WEG. Recuperado de: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
Link acortado: <https://acortar.link/zZGNZk>

ANEXO A

TARIFAS ELÉCTRICAS

A.1 Costos para el cálculo de boleta de consumo de energía eléctrica

Los costos mensuales asociados a las boletas de servicio por consumo de energía eléctrica se obtienen a partir de la figura A.1.

Empresa	Comuna	Sector Tarifario	Aéreo o Subterráneo	Administración del servicio	Transporte de electricidad		Electricidad consumida	Cargo por demanda máxima de potencia contratada o suministrada (\$/kW/mes)	Cargo por demanda máxima de potencia contratada o leída en horas de punta (\$/kW/mes)
				Cargo fijo mensual AT4.3 (\$/cliente)	Cargo por uso del sistema de transmisión (\$/kWh)	Cargo por servicio público (\$/kWh)	Cargo por energía (\$/kWh)		
EMELAT	Copiapó	STxB-1-A	Aéreo	1.617,48	24,205	0,487	78,014	2.287,70	6.382,20

Figura N° A.1: Tabla resumen tarifa AT4.3 para la ciudad de Copiapó.

Fuente: CGE

La figura N° A.1. corresponde la tabla resumen del tarifario de suministro de energía eléctrica para la ciudad de Copiapó en el mes de diciembre de 2020 de la empresa distribuidora CGE. La versión completa de todas las tarifas de la empresa CGE para todos los sectores tarifarios donde se encuentra la distribuidora se encuentra disponible en el siguiente enlace de sitio web:

 <https://www.cge.cl/wp-content/uploads/2020/12/Tarifas-de-Suministro-CGE-Diciembre-2020.pdf>

A.2. Cálculos para la estimación del consumos y costos de energía eléctrica

El desarrollo de los cálculos para el análisis de costos (capítulo V) del presente proyecto fue realizado a través de hojas de calculo en el software Excel de Microsoft Office Profesional Plus 2016 en su versión de prueba gratuita.

La hoja de cálculo previamente mencionada se encuentra disponible para su descarga y revisión de cálculos en el siguiente enlace acortado de Google drive:

✚ <https://acortar.link/Pswnym>

O bien, en el enlace original, el cual redirige al mismo sitio que el enlace anterior:

✚ https://drive.google.com/file/d/1kS2SK_HYGyuTd3xzOvLJ0m-4rGv1EEbv/view?usp=sharing