



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÓGICA
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS DE LA ENERGÍA

**ANÁLISIS DE REEMPLAZO MOTOR ELÉCTRICO DE INDUCCIÓN
ELECTROMAGNÉTICA A MOTOR ELÉCTRICO DE IMANES
PERMANENTES EN CORREA TRANSPORTADORA DE MINERAL EN
COMPAÑÍA MINERA SPENCE S.A**

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

Profesor guía: Sr. Juan Carlos Madrigal Lobos

Carlos Gilberto Arrochet Estay

Juan Pablo Arrochet Estay

Copiapó, Chile 2022

AGRADECIMIENTOS

Gracias a nuestros padres y hermanos y en especial a Francisco que a pesar de estar lejos está siempre con nosotros. Todos ellos, fueron nuestros mayores impulsores durante todo el proceso. Sin su apoyo, esto no hubiese sido posible.

Gracias a la Universidad de Atacama (UDA), gracias por habernos permitido formarnos y en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes de este proceso, ya sea de manera directa o indirecta, gracias a todos ustedes.

Atte.

Carlos Gilberto Arrochet Estay

Juan Pablo Arrochet Estay

AGRADECIMIENTOS

Finalmente, agradezco en forma especial a mi señora María Cecilia y a mis hijos Martin y Joaquín, quienes nunca dejaron de alentarme en seguir adelante. Los amo mucho.

Atte.

Carlos Gilberto Arrochet Estay

DEDICATORIA

A nuestros padres por habernos forjados como las personas que somos en la actualidad. Sin duda que muchos de nuestros logros se los debemos a ellos, entre los que se incluye este proyecto. Nos formaron con normas y ciertas licencias, pero que al final de cuentas, nos motivaron constantemente para alcanzar nuestras aspiraciones.

Atte.

Carlos Gilberto Arrochet Estay

Juan Pablo Arrochet Estay

DEDICATORIA

A mi esposa, por su paciencia y gran apoyo....

A mis hijos, por su constante aliento en terminar este proceso....

Atte.

Carlos Gilberto Arrochet Estay

ÍNDICE

CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes Generales	1
1.2 Descripción y Justificación	4
1.3 Proyecto SGO	5
1.4 Descripción del Proyecto	10
1.5 Objetivo General	11
1.6 Objetivos Específicos.....	11
1.7 Alcance del Proyecto.....	12
1.8 Metodología	12
CAPÍTULO II	16
MARCO TEÓRICO	16
2.1 Fundamentos del motor eléctrico.....	16
2.1.1 Introducción	16
2.1.2 Magnetismo.....	16
2.1.3 Propulsión magnética del motor	18
2.1.4 Operación básica del motor de corriente alterna.....	18
2.1.5 Campo magnético de estator	19
2.1.6 Formación de campo magnético	22
2.2 Clasificación general de los motores eléctricos	24
2.3 Motor sincrónico	25
2.4 Motor asincrónico	26
2.4.1 Rotor jaula.....	27
2.5 Variador de frecuencia	28
2.6 Rectificador	29
2.7 Relación volts/hz.....	29
2.8 Inversor.	30
2.9 Principio de funcionamiento	30
2.10 Tipos de carga	31

2.11 Cargas de par constante.....	32
CAPÍTULO III.....	33
REEMPLAZO MOTOR ELÉCTRICO	33
3.1 Motor eléctrico inducción electromagnética.....	33
3.2 Principio básico de funcionamiento.....	33
3.3 Motor eléctrico imanes permanentes	35
3.4 Diseño y construcción de un motor de imanes permanentes	35
3.5 Beneficios del uso de motores de imanes permanentes	36
3.6 Suministro eléctrico	37
3.7 Suministro de la energía eléctrica a mina Spence general	38
3.8 Distribución de la energía eléctrica a la planta	39
3.9 Equipos principales que intervienen en la operación de las áreas	41
3.10 Sala eléctrica (2210-ER-001).....	41
3.11 Motores eléctricos	42
3.12 Suministro eléctrico al área de manejo de materiales	42
3.13 Descripción tecnología motor - alta eficiencia.....	43
3.14 Descripción del Proyecto	46
3.14.1 Línea base energética e información del nuevo proyecto	46
3.14.2 Potencial de ahorro energético y reducción de emisiones de GE1	47
3.15 Requerimiento de inversión	48
3.16 Análisis de riesgos técnicos, ambientales y sociales.....	49
3.17 Criterios de elegibilidad	49
3.18 Monitoreo, reporte y verificación del proyecto.....	51
CAPÍTULO IV	52
ANÁLISIS DE COSTOS	52
4.1 Inversiones y vida útil de los equipos	52
4.1.1 Vida útil de los equipos.....	52
4.1.2 El programa de inversiones	52
4.1.3 Vida económica de los equipos.....	53
4.1.4 Concepto de rendimiento	54
4.1.5 Concepto de disponibilidad y confiabilidad.....	54

4.1.6 Concepto factor de carga.....	55
4.1.7 Concepto factor de utilización	56
4.1.8 Concepto factor de servicio.....	56
4.2 Análisis técnico económico de reemplazo de motores	57
4.2.1 Estimación de la eficiencia de los motores de planta.....	58
4.2.2 Evaluación económica de reemplazo de motores	58
4.2.3 Costos de inversión	59
4.2.4 Costos de inversión	60
4.2.5 Cálculo de indicadores de la evaluación VAN y TIR	61
4.2.6 Resultados de la evaluación económica.....	61
CAPÍTULO V.....	63
ANÁLISIS DE RESULTADOS	63
5.1 Costos situación sin proyecto.....	63
5.2 Costos situación con proyecto.....	64
CAPÍTULO VI	66
CONCLUSIONES.....	66
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXO A	71
PROCEDIMIENTO DE RIESGOS BHP-BILLITON.....	71
ANEXO B.....	74
EQUIPO.....	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1.1: Proyecto SGO Minera Spence.....	2
Figura N° 1.2: Proyecto EWS - Minera.	2
Figura N° 1.3: Proyecto SGO-Minera Spence.	3
Figura N° 1.4: Consumo nacional de energía eléctrica.	7
Figura N° 1.5: Consumo eléctricos plantas concentradoras.....	8
Figura N° 1.6: Diagrama de proceso de investigación.	13
Figura N° 1.7: Proceso de gestión de riesgos – BHP.	14
Figura N° 2.1: Partes de un Motor de Corriente Alterna.....	19
Figura N° 2.2: Campo magnético de estator.	20
Figura N° 2.3: Campo Magnético en Rotación.	21
Figura N° 2.4: Formación de Campo Magnético.	22
Figura N° 2.5: Rotor Jaula de Ardilla.....	24
Figura N° 2.6: Clasificación de los Motores Eléctricos.	24
Figura N° 2.7. Motor asincrónico de rotor jaula.	27
Figura N° 2.8: Esquema de funcionamiento de un motor asíncrono.....	28
Figura N° 2.9: Esquema básico de convertor y carga.	29
Figura N° 2.10: Relación Volt/Hertz.....	29
Figura N° 2.11: Diagramas etapas VDF.....	30
Figura N° 2.12: Diagrama VDF con carga.....	31
Figura N° 3.1: Vista real del motor de inducción existente.	34
Figura N° 3.2: Placa del motor eléctrico actual.....	34
Figura N° 3.3: Planta concentradora Spence SGO.....	35
Figura N° 3.4: Vista general motor sincrónico.....	37
Figura N° 3.5: Sistema eléctrico.....	38
Figura N° 3.6: Diagrama unilineal alimentación a Mina Spence.....	39
Figura N° 3.7: Diagrama unilineal sala eléctrica N°1.	40
Figura N° 3.8: Correa Alimentación a molino SAG.	41
Figura N° 3.9: Diagrama unilineal alimentación correa (2280-CV-253A).....	43
Figura N° 3.10: Esquema de un sistema de motores.	44

Figura N° 3.11: Clasificación de la eficiencia de motores con el estándar IEC.....	45
Figura N° 3.12: Comportamiento de la eficiencia.....	45
Figura N° 3.13: Costos de inversión específica en motores de alta eficiencia.....	48
Figura N° 3.14: Criterios de elegibilidad.	50
Figura N° 4.1: Gráfico de mantenimiento y vida económica.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1.1: Predictibilidad de costos.	4
Tabla N° 1.2: Consumos eléctricos proyectados de plantas concentradores.	9
Tabla N° 2.1: Número de polos.....	27
Tabla N° 3.1: Tabla resumen de equipos.	42
Tabla N° 3.2: Información mínima requerida	47
Tabla N° 3.3: Matriz de riesgos técnicos, ambientales, financieros y sociales.	49
Tabla N° 3.4: Indicadores de monitoreo del proyecto.....	51
Tabla N° 4.1: Precio de acuerdo a potencia eléctrica.....	59
Tabla N° 4.2: Precio final incluido el transporte.....	60
Tabla N° 4.3: Cálculo de VAN y TIR.	62
Tabla N° 5.1: Costo en US\$ motor eléctrico y reductor.....	63
Tabla N° 5.2: Flujo de caja en US\$ situación sin proyecto.....	63
Tabla N° 5.3: Flujo de caja en US\$ situación con proyecto.....	64

RESUMEN

La energía eléctrica es un insumo relevante para la producción de cobre, en Chile la producción de este mineral representa un porcentaje importante del producto interno bruto, por lo que las medidas que buscan mejorar la eficiencia de los procesos mineros, especialmente los relacionados a la conminución de mineral son muy importantes, sobre todo cuando los precios de venta del cobre se reducen y la industria busca maneras de mejorar su eficiencia y disminuir los costos. En este contexto, este proyecto de título realiza un estudio del reemplazo del motor eléctrico en media tensión por inducción electromagnética asociado a la correa transportadora alimentadora del molino SAG, con la finalidad de presentar medidas de eficiencia energética obtenidas del análisis de los datos (1). Para ello se toman los datos de tres años (2019, 2020 y 2021) del material procesado, la energía consumida en el molino SAG, que serán tratadas diariamente y analizadas estadísticamente con el fin de obtener comportamientos que permitan identificar donde aplicar medidas efectivas para mejorar la eficiencia energética y el procesamiento de mineral. Una medida importante dentro del análisis será la obtención del KPI de eficiencia energética (kWh/TPD) para los procesos estudiados. Finalmente, y considerando una evaluación del potencial de ahorro en energía eléctrica y mayor procesamiento del molino SAG, se concluye que la implementación de mejoras en la confiabilidad, disponibilidad, disminución de fallas, disminución de costos de mantenimiento y adhesión a nuevas políticas de eficiencia energética) SAG, mejoran la eficiencia del proceso y permiten capitalizar beneficios económicos anuales importantes, que justifican la implementación de las medidas propuestas en este proyecto de título.

**CONMINUCIÓN - EFICIENCIA ENERGÉTICA - KPI - MOLINO SAG -
ENERGÍA ELÉCTRICA**

ABSTRACT

Electric power is a relevant input for the production of copper. In Chile, the production of this mineral represents a significant percentage of the gross domestic product, therefore, the measures that seek to improve the efficiency of mining processes, especially those related to comminution of ore are very important, especially when copper sales prices are falling, and the industry is looking for ways to improve its efficiency and reduce costs. In this context, this title project carries out a study of the replacement of the electric motor in medium voltage by electromagnetic induction associated with the feeding conveyor belt of the SAG mill, in order to present energy efficiency measures obtained from the analysis of the data (1). For this, the data of three years (2019, 2020 and 2021) of the processed material, the energy consumed in the SAG mill, which will be treated daily and statistically analyzed in order to obtain behaviors that allow identifying where to apply effective measures to improve energy efficiency and mineral processing. An important measure within the analysis will be obtaining the energy efficiency KPI (kWh/TPD) for the processes studied. Finally, and considering an evaluation of the potential for savings in electrical energy and greater processing of the SAG mill, it is concluded that the implementation of improvements in reliability, availability, reduction of failures, reduction of maintenance costs and adherence to new energy efficiency policies) SAG, improve the efficiency of the process and make it possible to capitalize important annual economic benefits, which justify the implementation of the measures proposed in this title project.

COMMINUTION - ENERGY EFFICIENCY - KPI - MILL SAG -
ELECTRIC POWER

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes Generales

La industria minera en Chile enfrenta día a día múltiples desafíos para lograr satisfacer la demanda de cobre en el mundo, menores leyes en los depósitos, baja productividad, altos costos, escases de recursos tales como el agua y la energía, entre otros. Todos estos desafíos obligan a las compañías mineras y sus colaboradores a enfocar sus esfuerzos en múltiples dimensiones, con el objetivo de ser cada día más competitivos.

El desarrollo de proyectos de infraestructura es uno de los factores claves para hacer frente a estos desafíos la construcción de nueva capacidad productiva, la renovación de infraestructura existente, así como también la inversión en infraestructura de apoyo para la producción, permite a las compañías alcanzar los objetivos de producción esperados.

En el caso particular de BHP, los desafíos para mantener los niveles de producción de sus operaciones en Chile la han llevado a invertir altas sumas de dinero. Dentro de estas inversiones se puede destacar en Minera Escondida una nueva concentradora, una planta desalinizadora de agua para contar con los requerimientos de agua necesarios para producir, entre otros. Por otra parte, actualmente se realiza una fuerte inversión en Minera Spence para incorporar una planta concentradora dentro de la operación y así asegurar continuidad del depósito.

A continuación, la figura N° 1.1 muestra las instalaciones de la compañía minera Spence.



Figura N° 1.1: Proyecto SGO Minera Spence.

Fuente: Minera Spence.

A continuación, la figura N° 1.2 muestra las instalaciones del proyecto EWS - Minera.



Figura N° 1.2: Proyecto EWS - Minera.

Fuente: Minera Escondida.

A continuación, la figura N° 1.3 muestra la distribución de las instalaciones del SGO - Minera Spence.



Figura N° 1.3: Proyecto SGO-Minera Spence.

Fuente: Minera Escondida.

En el caso de Chile, según lo reportado por el informe “Inversión en la Minería Chilena Cartera de proyectos 2017 - 2026”, emitido por La Comisión Chilena del Cobre (Cochilco), la inversión en nuevos proyectos presentó disminuciones los últimos años, lo cual es explicado principalmente por la volatilidad que existente en el mercado. Sin embargo, se observa un incremento desde el año 2017, con la incorporación de 47 iniciativas que representan un aumento de US\$ 15.648 millones, lo cual da señales de reactivación en la industria del desarrollo de proyectos.

La evidente necesidad por desarrollar y mantener las instalaciones productivas, para así enfrentar las estimaciones de demanda de cobre futuras, llevan a entender esta reactivación en los proyectos, sin embargo, estos no están exentos de desafíos en su desarrollo. El precio actual de los commodities ha llevado a las compañías a imponer restricciones de capital, lo cual las obliga a ser selectivos en sus decisiones de inversión y eficientes en su ejecución.

1.2 Descripción y Justificación

En la industria de desarrollo y ejecución de proyectos, los costos son una variable de gran importancia en la actualidad, en particular, la predictibilidad se ha vuelto una de las áreas de foco dentro de la industria, cumplir con las estimaciones de costos y evitar al máximo sus desviaciones resulta crítico.

Una gestión deficiente de costos puede generar que las inversiones aumenten y, por consecuencia, el valor agregado o rentabilidad de las mismas disminuyan.

Según algunos estudios realizados por la Corporación de Bienes de Capital (CBC) y considerando además proyecciones de empresas como Valor Experto, se estima que existe cerca de un 70 % de probabilidad de que un proyecto experimente sobre costos de aproximadamente un 15 %.

En el caso particular de BHP, se puede observar en la tabla N° 1.1 algunos de los proyectos mayores desarrollados durante los años 2012 y 2017. Estos proyectos presentaron desviaciones respecto a sus estimaciones originales, considerar los análisis de riesgos utilizados y las lecciones aprendidas en el desarrollo de cada proyecto permite realizar un análisis valioso para la administración de costos y gestión de riesgos que permita lograr mejores resultados.

Tabla N° 1.1: Predictibilidad de costos.

Proyecto	Costo Estimado	Costo Final	Desviación
OLAP	721	911	26 %
OGPI	3.800	4.200	11 %
EWS	3.430	3.700	8 %

Fuente: Elaboración propia.

Ante la importancia de este proyecto de título y en busca de hacer frente a los desafíos que se presentan, resulta importante que los proyectos utilicen la gestión de riesgos para

analizar los riesgos que se enfrentan, para luego determinar sus estrategias de control y gestión, identificar las potenciales causas que lo originan y determinar acciones que permitan disminuir la probabilidad de ocurrencia del evento y/o mitigar sus potenciales impactos resulta un factor clave en la administración de proyectos.

Considerando la relevancia que un correcto análisis de riesgos tiene para la predictibilidad de costos, el presente proyecto de título se enfoca en la estandarización del diseño del riesgo de sobre costo que pueda ser utilizado por todos los proyectos del portafolio de BHP Minerals Americas. Tomando como base la experiencia en la administración de este riesgo en proyectos pasados y las lecciones ya aprendidas en dichos procesos, esta estandarización permitirá mejorar y unificar la gestión de riesgos dentro de la Vicepresidencia de Proyectos con un análisis simple y comparable a través de la compañía.

Para dar cumplimiento a los procedimientos definidos por BHP, se utiliza la herramienta de análisis definida para identificar y determinar las principales causas que originan un sobrecosto, y se entrega una propuesta de controles preventivos y mitigadores que permita mejorar la administración de este riesgo, considerando la experiencia de otros proyectos y la industria.

1.3 Proyecto SGO

Minera Spence S.A. es una empresa de BHP Billiton Base Metals, ubicada en la Región de Antofagasta, orientada a la explotación de yacimientos mineros de metales base, específicamente cobre, cuya producción se comercializa internacionalmente en la Bolsa de Metales de Londres. Spence es una empresa altamente comprometida con una gestión que apunta al cero daño, protegiendo la integridad física de sus trabajadores, colaboradores, medio ambiente y comunidades que puedan verse afectadas por sus ejecuciones y, al mismo tiempo, preocupada de cumplir una misión que tienda a la excelencia de sus procesos y la máxima eficiencia de sus recursos, siguiendo la línea de ser una operación destacada y simple.

La compañía BHP de origen australiano, está desarrollando la expansión de la minera Spence. Ubicado en el norte de Chile, el proyecto de extracción de cobre a rajo abierto, con una inversión capital de US\$ 2.460 millones, contempla la ampliación de su vida útil a cincuenta años, donde la explotación y procesamiento de reservas de sulfuros primarios serán a través de flotación convencional, para tener un total de aproximadamente 150 mil toneladas de cobre fino al año. La construcción de una planta concentradora de sulfuros de carácter convencional, será de gran escala, tanto para el cobre como molibdeno, y que tendrá una capacidad nominal de 95.000 toneladas por día.

En los primeros diez años de operaciones, el plan permitirá incrementar la producción de SGO en 185.000 mil toneladas anuales (ktpa), de concentrado de cobre y en 4.000 toneladas anuales del subproducto del cobre, el molibdeno, cuya primera producción se espera para fines de 2021.

SGO considera la utilización de agua desalada para el 100 % de sus procesos. Para ello, se contempla la construcción de una Planta Desaladora, la que estará ubicada en la bahía de Mejillones. Esta planta tendrá una capacidad aproximada de 1.000 litros por segundo y la inversión estimada para su construcción alcanza los US\$ 1.430 millones.

A nivel mundial la producción de cobre refinado para el año 2021 fue de 28.397,7 KTM. En Chile, la actividad minera representa un sector altamente competitivo y de producción internacional, que para el caso de la producción de cobre llegó a un valor de 5.552,6 Mil Toneladas Métricas Finas (KTMF) en el año 2021. Además, representa una proporción relevante del producto interno bruto del país, de casi 10 % para el año 2014. Esto es un primer indicio de la cantidad de cobre producido para el mundo y de la destacable participación que posee Chile en este mercado y la importancia del aporte de esta industria para el estado chileno. Aun considerando los ciclos naturales de altos y bajos precios del cobre se espera que esta condición se mantenga, debido a que Chile posee aproximadamente el 30 % de las reservas mundiales y existe una demanda sostenida de este mineral impulsada actualmente por la revolución de la electromovilidad. Para el año 2021, el consumo de energía eléctrica en el sector de minería fue de un 44 % respecto al

consumo nacional (ver la figura N° 1.5), lo que corresponde al mayor porcentaje, según separación de sectores relevantes de la economía.

Adicionalmente, si consideramos procesos específicos dentro de la minería, se reportó que para el año 2021 las plantas concentradoras representaron el 48,6 % del total de energía consumida por la industria minera del cobre, lo que en primera instancia indica que es un punto de partida para analizar temas de consumo energético, ya que se focalizan los esfuerzos del estudio en áreas intensivas en consumo.

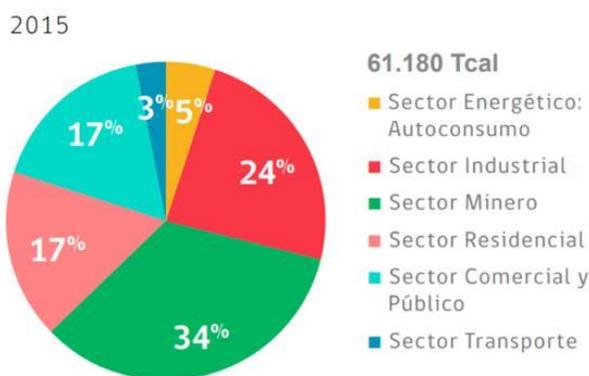


Figura N° 1.4: Consumo nacional de energía eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

En este contexto, todo lo relacionado a la energía eléctrica utilizada para los distintos procesos mineros, se vuelve relevante y se puede introducir y trabajar en el concepto de eficiencia energética y la gestión de la energía, que se vuelven vitales para el proceso minero (“Autorregulación de la Gran Minería Nacional en materia de Eficiencia Energética, sus motivaciones e implementación”).

Desarrollado en el marco del proyecto del Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) de iniciación: “Instrumentos para la elaboración de una política energética sustentable”, No. 11100288, 2010-2012. Pilar Moraga Sariego. Alumnos: Daniela Jara y Claudio Rojas. Según documento de la Comisión Chilena del Cobre titulado Construcción de Indicadores de Eficiencia Energética en Minería DE

/012/2014 define Eficiencia Energética (EE) como el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos y servicios finales obtenidos, consecuentemente, la eficiencia energética se mide a través de indicadores que, a su vez, miden la variación de consumos unitarios de energía en el tiempo. Así el aplicar medidas de eficiencia energética en procesos de planta concentradora reduciría el consumo de energía eléctrica, con el consecuente ahorro de costos.

El consumo de energía eléctrica representa aproximadamente el 11 % del costo C1 (Cash Cost, que incluye costo mina, más costo planta, más gastos generales más gastos de venta, incluyendo cargos de tratamiento y refinación, más costos de transporte y comercialización [8]), de una faena minera, por lo que posee un potencial de ahorro económico importante si se realiza gestión de la energía aplicando conceptos de eficiencia energética. Dentro de los mayores consumos eléctricos destacan las plantas concentradoras de mineral (ver la figura N° 1.5). Por ejemplo, en una faena de gran minería que llega hasta la obtención de concentrado de cobre, el consumo en energía eléctrica es cercano al 75 % en relación con el consumo total de la faena.

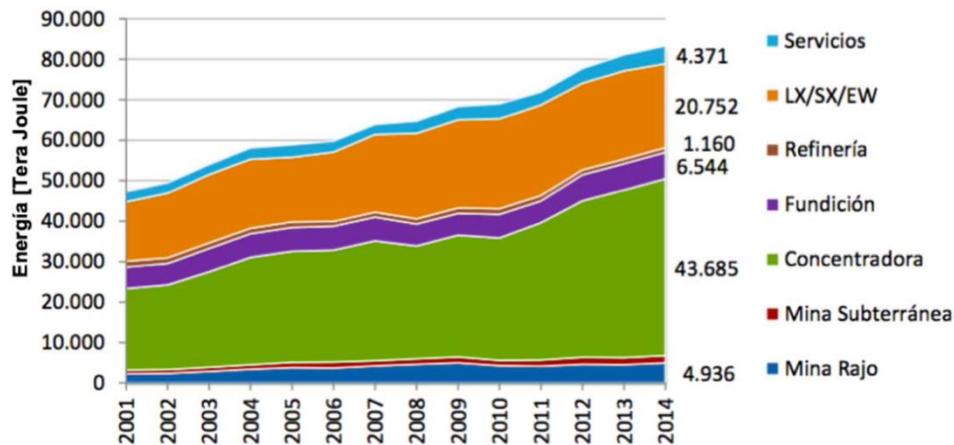


Figura N° 1.5: Consumo eléctricos plantas concentradoras.

Fuente: Comisión Chilena del cobre.

Al considerar la premisa actual de la gran minería en Chile de reducir los costos operativos a través de distintas medidas, el desafío de realizar eficiencia energética sobre el consumo eléctrico posee gran potencial y es bien recibido en estos momentos por la industria minera. Además, es de vital importancia para mantener la competitividad de este tipo de empresas en un entorno global. Por lo tanto, disminuir el consumo de energía eléctrica en procesos de planta al aplicar medidas de eficiencia energética para optimizar el proceso y reducir los costos es un desafío interesante de analizar.

Otro dato relevante de mencionar, son los consumos promedios proyectados de las plantas concentradoras de cobre en Chile, representados en la tabla N° 1.2.

Tabla N° 1.2: Consumos eléctricos proyectados de plantas concentradores.

Proceso	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Mina Rajo KWh/ TMF Cu	191	192	193	194	196	197	197	198	199	200	201	202
Mina Subterránea KWh/ TMF Cu	632	639	646	652	659	664	670	675	681	686	690	695
Concentradora KWh/TM min. Proce.	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	23	23
Fundición KWh/TM Conc. Proce.	332	332	332	333	333	333	333	333	333	333	333	333
Refinería KWh/ TMF Cu	364	365	365	366	366	367	367	368	368	368	369	369

Fuente: Cochilco, 2017.

Para el caso de estudio de una faena de la gran minería del cobre de la zona central del país, se tiene que los valores del consumo unitario de electricidad en relación con las toneladas procesadas de la planta concentradora tienen un valor promedio cercano a 23 kWh/TM, por lo que se observa un valor superior al promedio nacional, lo que justifica un análisis en mayor profundidad.

Por todo lo anteriormente señalado, se justifica la importancia de realizar el análisis de consumos de energía eléctrica para procesos de la planta concentradora, en relación a las toneladas de cobre fino producidas, en donde se posee data de 3 años de producción de una faena de la gran minería del cobre de la zona central, en las distintas unidades de proceso, para la obtención de KPI's y posterior análisis estadístico que permitirá

identificar puntos del proceso relevantes y en conjunto con la investigación se proponen medidas de eficiencia energética para ser implementadas, tanto generales, como específicas desprendidas del análisis estadístico realizado.

1.4 Descripción del Proyecto

En los últimos 20 años, la economía chilena ha experimentado un acelerado crecimiento y lo ha hecho manteniendo una estrecha correlación entre la demanda de energía y la expansión de la actividad económica del país. Incluso, la demanda de electricidad ha crecido entre 1 y 2 puntos más que el PIB. Esta situación contrasta con lo ocurrido en la mayoría de los países desarrollados, donde la intensidad energética (cociente entre el consumo de energía y el producto interno bruto), ha disminuido entre 30 % y 40 % durante los últimos 20 años.

Esta conducta energética significa, tanto a nivel país como de la industria y minería, una pérdida de recursos, baja de la competitividad, mayor contaminación y aumento de la dependencia energética, ya que del orden de un 62 % de la energía primaria consumida es de origen importado. Este patrón de consumo no es sustentable en el mediano y largo plazo, por lo que se requiere de una acción e intervención decisiva del Estado y la sociedad en su conjunto.

El porcentaje de energía eléctrica consumida por los sistemas motrices varía según los procesos propios de cada empresa minera, pero en general la fracción más importante corresponde a los motores eléctricos. Una parte de ellos puede ser sustituida por motores eléctricos de alta eficiencia. A partir de la nueva norma internacional, que armoniza los antiguos estándares europeo y norteamericano, es posible sustituir motores estándar por motores de alta eficiencia en un rango de 0,75 a 375 kW. Los motores de gran potencia, tales como los empleados en molinos u otros similares, debido a sus características ya son de alta eficiencia y quedan excluidos del alcance de este estudio.

Considerando lo anterior, se han desarrollado normas chilenas que facilitan la selección y adquisición de motores eficientes certificados, ya sea en nuevos proyectos o para sustituir los existentes.

No obstante, para la evaluación económica de la alternativa de motores eficientes versus motores convencionales, se requiere disponer de antecedentes basados en la experiencia previa de emplear motores eficientes en procesos bajo condiciones reales de funcionamiento.

La eficiencia de un motor en planta, bajo carga y condiciones de entorno distintas de aquellas empleadas en el laboratorio de certificación, puede variar significativamente y se encuentra asociada a las características de cada proceso productivo.

El uso de motores eficientes en la minería chilena constituye una innovación tecnológica. Aunque la tecnología se encuentra disponible a través de los diferentes proveedores locales y el concepto de eficiencia energética se ha divulgado ampliamente, existe poca experiencia en la evaluación del rendimiento de los motores en los diferentes procesos de la minería.

1.5 Objetivo General

Analizar el reemplazo del motor eléctrico de inducción electromagnética de la correa transportadora 2280-CV-253, por un motor eléctrico de imanes permanentes en la planta concentradora SGO de Minera Spence.

1.6 Objetivos Específicos

- ✚ Describir principios de funcionamiento y características del motor eléctrico imanes permanentes que debería reemplazar al motor eléctrico por inducción electromagnética.

- ✚ Analizar de manera técnica la factibilidad del reemplazo del motor eléctrico en la correa transportadora.
- ✚ Comparar la información de la Planta Concentradora SGO, proyectando las ventajas económicas y el costo de oportunidad del reemplazo del motor eléctrico.
- ✚ Analizar los resultados de la propuesta.

1.7 Alcance del Proyecto

El alcance de esta metodología planteada, aunque su foco es la planificación de la producción de mediano plazo, no es exclusivo para la industria minera, es también aplicable, a planes mineros de corto, largo plazo, planes estratégicos, proyectos y a toda actividad que requiere una planificación para establecer objetivos y metas.

1.8 Metodología

El desarrollo de este proyecto de título utiliza una estrategia de investigación descriptiva y explicativa, que permite caracterizar el riesgo de sobre costo, específicamente las potenciales causas que podrían generar y aquellos controles que permiten prevenir su ocurrencia o bien mitigar sus impactos.

El alcance de la propuesta de estandarización incluye:

- ✚ Unificación del nombre y alcance del riesgo.
- ✚ Identificación y normalización de causas.
- ✚ Identificación y estandarización de controles.

Para la identificación de causas y controles, se realiza un análisis comparativo utilizando la información sobre el análisis de riesgos desarrollado y las lecciones aprendidas identificadas por 3 proyectos ejecutados en los últimos 5 años por la Vicepresidencia de Proyectos de BHP Minerals Americas.

A continuación, la figura N° 1.6 muestra la secuencia bajo la cual se desarrolla el análisis y se obtienen los resultados:

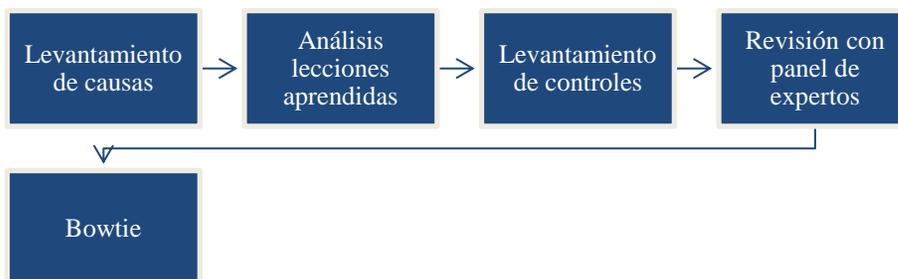


Figura N° 1.6: Diagrama de proceso de investigación.

Fuente: Elaboración propia.

- ✚ **Levantamiento de causas:** A través de los métodos del riesgo de sobre costo utilizado por cada uno de los proyectos bajo análisis, se extraen las causas identificadas en cada uno de ellos, posteriormente se agrupan aquellas comunes y se describe cada una de ellas.
- ✚ **Análisis de lecciones aprendidas:** A través de las lecciones aprendidas levantadas por cada uno de los proyectos bajo análisis se extraen aquellas asociadas al sobre costo de proyectos, se listan y posteriormente se agrupan para formar un listado consolidado que es incorporado al listado de causas identificado en el punto anterior.
- ✚ **Levantamiento de controles:** Al igual que el levantamiento de causas, se consideran los controles, preventivos y mitigadores, identificados y utilizados en la gestión de los proyectos incluidos en este análisis en los diferentes riesgos existentes, son agrupados y descritos.

- ✚ **Revisión con panel de expertos:** Se realiza una sesión la cual incluye expertos en la gestión de costos y en la administración de proyectos de BHP. En esta sesión es presentada la información obtenida en los puntos 1,2 y 3. Las causas y controles son presentadas a los asistentes quienes revisan, validan y complementan la información obtenida.
- ✚ **Consolidación de la información:** la información obtenida y validada en el panel de expertos es incluida en el respectivo bow tie, se incluye además un anexo con la descripción de cada causa y control incluido en el análisis.

La metodología de gestión de riesgos utilizada, corresponde a la definida por BHP en el documento “Risk Management - Our Requirements” (ver anexo A).

El documento mencionado define el proceso metodológico de riesgos que se debe aplicar dentro de la compañía, basado en la ISO 31000, sus principales componentes se pueden ver en la figura N° 1.7.

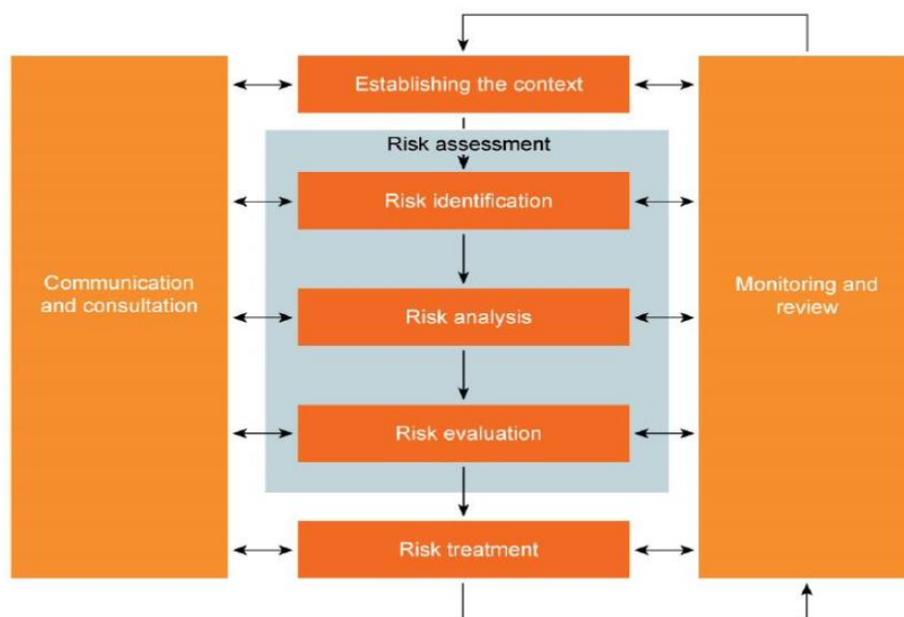


Figura N° 1.7: Proceso de gestión de riesgos – BHP.

Fuente: Risk Management – Our Requirements.

El proceso consta de varias actividades necesarias para desarrollar una gestión de riesgos adecuada, teniendo en consideración que el riesgo bajo análisis ya ha sido identificado, el desarrollo de este proyecto de título se enfoca en la actividad de análisis para el riesgo de sobre costo de un proyecto, denominada en el proceso descrito como “Risk analysis”.

La herramienta utilizada para consolidar y presentar los resultados de este análisis se denomina bow tie que mide la gestión del riesgo en base a sus causas, herramienta definida por BHP para realizar el análisis de riesgos. Se excluye de este análisis la evaluación de impactos, definición de escenarios y probabilidad de ocurrencia del evento, ya que este varía de proyecto en proyecto, por lo que a juicio se considera parte del análisis particular de cada proyecto.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos del motor eléctrico

2.1.1 Introducción

Un motor eléctrico, es una máquina eléctrica que transforma energía eléctrica en energía mecánica por medio de campos magnéticos variables; los motores eléctricos se componen en dos partes, una fija llamada estator y una móvil llamada rotor.

Estos funcionan generalmente bajo los principios de magnetismo. La clasificación de los mismos, va en el tipo de corriente utilizada, los cuales pueden ser de corriente directa o alterna. Además, se clasifican según el número de fases, los cuales pueden ser monofásicos, bifásicos y trifásicos, siendo este último el más utilizado a nivel industrial. Los motores eléctricos se hallan formados por varios elementos; las partes principales son: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes. No obstante, un motor puede funcionar solo con el estator y el rotor.

2.1.2 Magnetismo

Antes de describir los principios básicos del motor, se dará una revisión del magnetismo. Un imán permanente atraerá objetos de metal cuando el objeto está cerca o en contacto con él. El imán puede hacer esta función permanente, debido a su fuerza magnética inherente, referida como "campo magnético".

El campo magnético de dos imanes permanentes es representado por las "líneas del flujo". Estas líneas del flujo nos ayudan a visualizar el campo magnético de cualquier imán, aunque representan solamente fenómenos invisibles. El número de líneas del flujo varía a partir de un campo magnético a otro.

Cuanto más fuerte es el campo magnético, mayor es el número de las líneas del flujo que se dibujan para representar el campo magnético. Las líneas del flujo se dibujan con una dirección indicada, puesto que se debe visualizar estas líneas y el campo magnético que representan movimientos que van del polo norte al polo sur.

Un campo magnético similar, se produce alrededor de un conductor eléctrico, cuando circula corriente eléctrica a través de él. Estas líneas del flujo definen el campo magnético y están en la forma de círculos concéntricos alrededor del alambre.

La "regla de la mano izquierda" indica que si se señala con el pulgar de su mano izquierda la dirección de la corriente, sus dedos señalarán la dirección que presenta el campo magnético.

Cuando el alambre forma una bobina, todas las líneas individuales del flujo producidas por cada sección del alambre, forman un gran campo magnético alrededor de la bobina. Como con el imán permanente, estas líneas del flujo dejan el norte de la bobina y vuelven a entrar a la bobina por el polo Sur.

El campo magnético de una bobina de alambre, es mucho mayor que el campo magnético generado alrededor de un simple conductor antes de ser formada en una bobina. Este campo magnético alrededor de la bobina, puede ser consolidado aún más, colocando una base de hierro o de metal similar en el centro de la bobina. La base del metal presenta menos resistencia a las líneas del flujo que al aire, de tal modo la fuerza del campo puede aumentar. Así es como se realiza la bobina del estator, bobina de alambre con base de acero.

La ventaja de un campo magnético que sea producido por una bobina, es que cuando se invierte la corriente, los polos cambian de dirección debido al cambio de dirección del flujo magnético. Si este fenómeno magnético no se presentara, el motor de corriente alterna no existiría.

2.1.3 Propulsión magnética del motor

El principio de operación de los motores, se puede demostrar fácilmente usando dos electroimanes y un imán permanente. La corriente se pasa a través de la bobina N°1 en dirección al polo norte establecido y a través de la bobina N°2 en dirección al polo sur.

Un imán permanente con un polo norte y sur es la pieza móvil de este motor simple. El polo norte del imán permanente está frente del polo norte del electroimán. De manera semejante, los polos sur están uno frente del otro. Como los polos magnéticos iguales se rechazan, empieza a girar el imán permanente. Ocurre el mismo fenómeno cuando la fuerza de atracción entre los polos opuestos llega a ser lo suficientemente fuerte.

El imán rotativo continúa cambiando de dirección hasta que los polos opuestos se alinean. En este punto, el rotor normalmente se detendría por la atracción entre los polos diferentes (B).

Si la dirección de corrientes en las bobinas electromagnéticas fue invertida repentinamente, por consiguiente, se invierte la polaridad de las dos bobinas, entonces, los polos otra vez serían opuestos y se repelerían entre ellos. Por lo tanto, el imán permanente continuaría rotando. Si la dirección actual en las bobinas electromagnéticas fuera cambiada todo el tiempo, el imán daría vuelta 180 grados a medio camino, entonces el imán continuaría rotando.

2.1.4 Operación básica del motor de corriente alterna

Un motor de CA tiene dos partes eléctricas básicas: un "estator" y un "rotor", como se muestra en la figura N° 2.1. El estator está en el componente eléctrico estático. Consiste en un grupo de electroimanes individuales dispuestos de una manera tal que formen un cilindro hueco, con un polo de cada cara de los imanes hacia el centro del grupo. El término, "estator" se deriva de la palabra estática. El rotor es el componente eléctrico rotativo, el cual consiste en un grupo de electroimanes dispuestos alrededor de un cilindro,

haciendo frente hacia los polos del estator. El rotor, está situado obviamente dentro del estator y montado en el eje del motor. El término "rotor" se deriva de la palabra rotar.

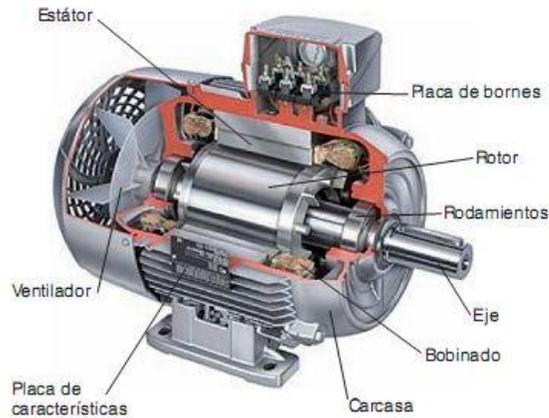


Figura N° 2.1: Partes de un Motor de Corriente Alterna.

Fuente: Manual de electricidad.

El objetivo de estos componentes del motor es hacer que el rotor gire sobre el eje del motor. Esta rotación ocurrirá debido al fenómeno magnético previamente descrito, donde los polos opuestos se atraen y los polos iguales se rechazan. Se cambiará progresivamente la polaridad de los polos del estator de una manera tal que su campo magnético combinado rote, entonces el rotor seguirá girando con el campo magnético del estator.

2.1.5 Campo magnético de estator

En la figura N° 2.2, se muestra cómo van rotando los campos magnéticos del estator, de acuerdo con la figura, el estator tiene seis polos magnéticos y el rotor tiene dos polos.

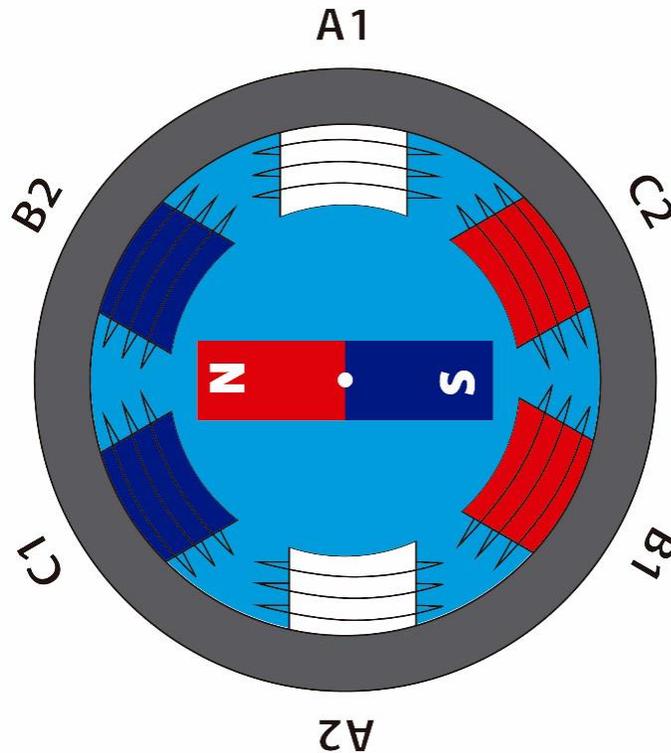


Figura N° 2.2: Campo magnético de estator.

Fuente: Manual de electricidad.

En el tiempo 1, los polos A-1 del estator y el C-2 son polos norte y los polos opuestos, A-2 y C-1, son los polos Sur. El polo sur del rotor es atraído por los dos polos norte del estator y el polo norte del rotor es atraído por los dos polos del sur del estator.

En el tiempo 2, la polaridad de los postes del estator se cambia, de modo que ahora el C-2 y B-1 son los polos norte y C-1 y B-2 son los polos sur. Entonces el rotor se ve forzado a rotar 60 grados para alinearse con los polos del estator, según lo demostrado en la figura N° 2.3.

En el tiempo 3, B-1 y A-2 son los polos norte. En el tiempo 4, A-2 y C-1 son los polos norte. Mientras que se realiza cada cambio, los polos del rotor son atraídos por los polos opuestos en el estator. Así, como el campo magnético del estator rota, el rotor se ve forzado a rotar con él.

Para producir un campo magnético que, rota en el estator de un motor de CA trifásico, se necesita que las bobinas del estator estén correctamente conectadas a la fuente de alimentación de corriente.

Cada fase de la fuente de alimentación trifásica está conectada con los polos opuestos y las bobinas asociadas se bobinan en la misma dirección. Como se recordará, la polaridad de los polos del electroimán es determinada por la dirección de la corriente que circula por la bobina. Por consiguiente, si dos electroimanes opuestos del estator se bobinan en la misma dirección, la polaridad de los polos opuestos debe de estar enfrente.

Por lo tanto, cuando el polo A1 es norte, el polo A2 es sur. Cuando el polo B1 es norte, B2 es sur y así sucesivamente (ver la figura N° 2.3).

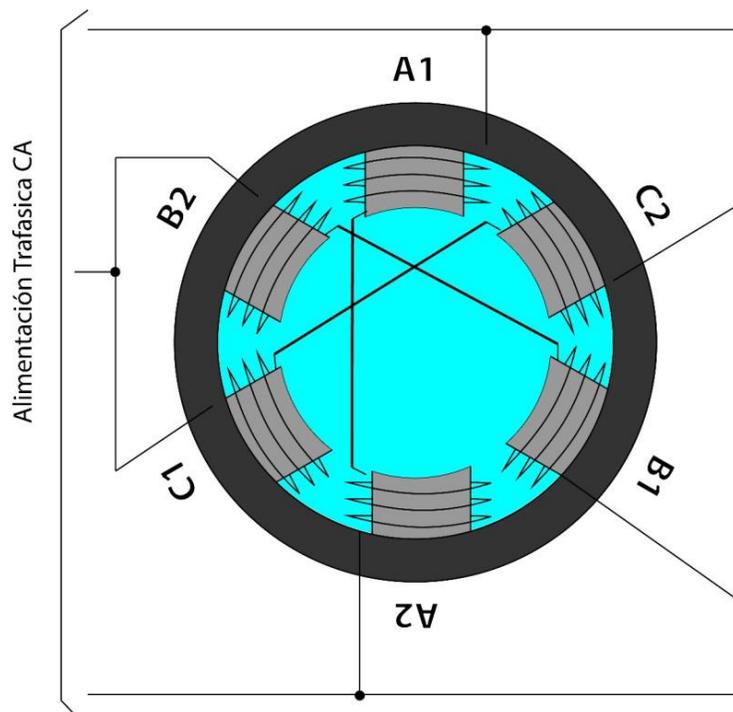


Figura N° 2.3: Campo Magnético en Rotación.

Fuente: Manual de electricidad.

La figura N° 2.4, muestra cómo se produce el campo magnético que rota.

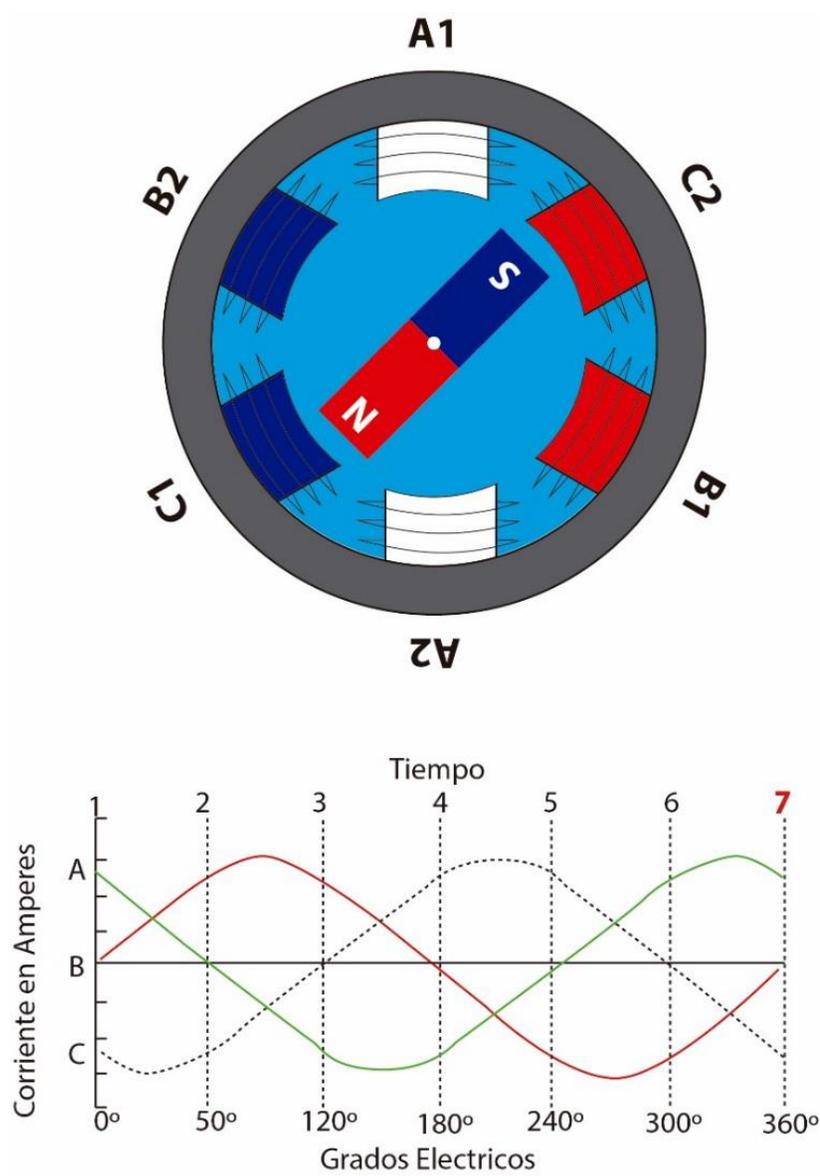


Figura N° 2.4: Formación de Campo Magnético.

Fuente: Manual de electricidad.

2.1.6 Formación de campo magnético

En el tiempo 1, el flujo actual en los polos de la fase "A" es positivo y el polo A-1 es norte. El flujo actual en los polos de la fase "C" es negativo, haciendo C-2 un polo norte y C-1 el polo sur. No hay flujo actual en la fase "B", así que estos polos no se magnetizan.

En el tiempo 2, las fases han cambiado de puesto 60 grados, haciendo los postes C-2 y B-1 N y C-1 y B-2 ambos polos sur. Así, el flujo magnético produce el cambio de polaridad en las bobinas provocando que los polos resultantes norte y sur se muevan a la derecha alrededor del estator, lo que resulta en una rotación del campo magnético. Por lo tanto, el rotor actúa como un imán de barra arrastrado por el campo magnético que rota.

Hasta este punto poco se ha dicho acerca del rotor. En los ejemplos anteriores, se ha asumido que los polos del rotor son bobinas como los polos del estator provistos con corriente continua (CC), para crear polos fijos en polaridad. Así es exactamente cómo funciona un motor de corriente alterna (CA) síncrono. Sin embargo, la mayoría de los motores de corriente alterna (CA), que son utilizados actualmente no son motores síncronos. En lugar de eso, los motores de inducción son los que prevalecen en la industria.

¿Cuál es la diferencia del motor de inducción? La gran diferencia es la manera en la que se provee la corriente al rotor. Ésta no es ninguna fuente de alimentación externa, en lugar de eso, se utiliza la técnica de inducción, la cual es un fenómeno natural que ocurre cuando un conductor (las barras de aluminio en el caso de un rotor) se mueve a través de un campo magnético existente o cuando un campo magnético se pasa a un conductor.

En cualquier caso, el movimiento relativo provoca que la corriente eléctrica circule por el conductor. Esto se refiere al flujo actual "inducido". En otras palabras, en un motor de inducción, el flujo actual del rotor no es causado por cualquier conexión directa de los conductores a una fuente de voltaje, sino por la influencia de los conductores del rotor que provocan el corte de las líneas del flujo producidas por los campos magnéticos del estator (ver la figura N° 2.5).

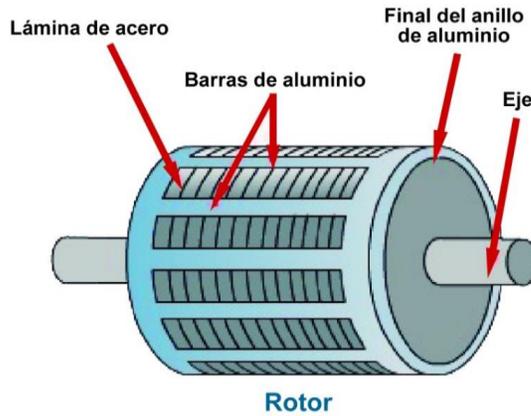


Figura N° 2.5: Rotor Jaula de Ardilla.

Fuente: Manual de electricidad.

2.2 Clasificación general de los motores eléctricos

El siguiente esquema (ver la figura N° 2.6), muestra la clasificación general de los motores eléctricos:

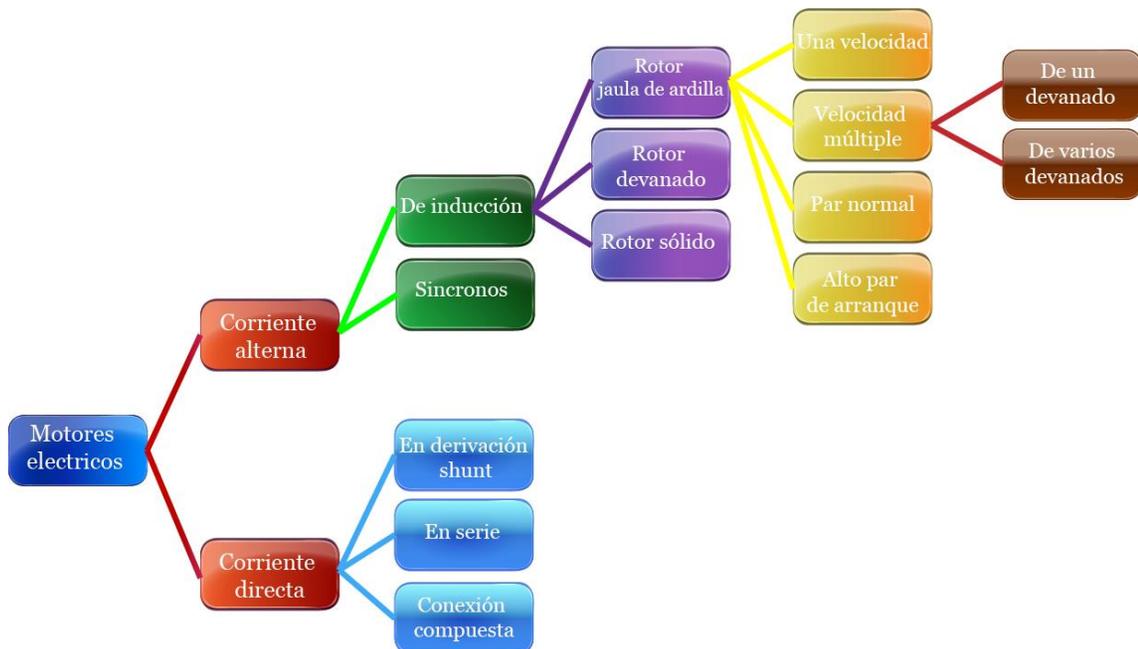


Figura N° 2.6: Clasificación de los Motores Eléctricos.

Fuente: Manual de electricidad.

2.3 Motor sincrónico

Los motores sincrónicos, son motores de velocidad constante y proporcional a la frecuencia de la red. Los polos del rotor siguen el campo giratorio impuesto al estator por la red de alimentación trifásica. Así, la velocidad del motor es la misma del campo giratorio.

Básicamente, el motor sincrónico está compuesto de un enrollamiento estatórico trifásico, que produce lo que se llama de “campo giratorio”, y de un rotor embobinado (de polos salientes o de polos lisos), que es excitado por una tensión de corriente continua (CC). Esta tensión de corriente continua (CC), de excitación genera un campo estacionario en el rotor, que interactuando con el campo giratorio producido por el enrollamiento estatórico, produce el par en el eje del motor con una rotación igual al propio campo giratorio.

El mayor par que el motor puede proveer, está limitado por la máxima potencia que puede ser cedida antes de la pérdida de sincronismo, siendo así, cuando la velocidad del rotor es distinta de la velocidad del campo giratorio, ocasionando la detención del motor. La excitación determina también los porcentajes de potencia activa y reactiva que el motor retira de la red, para cada potencia mecánica solicitada por la carga.

Este tipo de motor tiene su aplicación restringida a accionamientos especiales, que requieren velocidades invariables en función de la carga (hasta el límite máximo de par del motor). Su utilización con convertidores de frecuencia puede ser recomendada cuando se necesita una variación de velocidad a una precisión más elevada.

La rotación del eje del motor (rotación sincrónica) es expresa por:

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 2.1})$$

Dónde:

- ✚ n_s : Rotación sincrónica (rpm).
- ✚ f : Frecuencia (Hz).
- ✚ p : Número de polos.

2.4 Motor asincrónico

Los motores asincrónicos o de inducción, por ser robustos y más baratos, son los motores más ampliamente utilizados en la industria. En estos motores, el campo giratorio tiene la velocidad constante, como en las máquinas sincrónicas.

Teóricamente, para el motor girando en vacío y sin pérdidas, el rotor tendría también la velocidad síncrona. Pero al ser aplicado el par externo al motor, su rotor disminuirá la velocidad en la justa proporción necesaria para que la corriente inducida por la diferencia de rotación entre el campo giratorio (sincrónico) y el rotor, pase a producir un par electromagnético igual y opuesto al par externamente aplicado (ver la tabla N° 2.1).

La rotación del eje del motor es expresada por:

$$n_s = \frac{120 f}{2p} \times (1 - s) \quad (\text{Ec. N° 2.2})$$

Dónde:

- ✚ n_s : Rotación sincrónica (rpm).
- ✚ f : Frecuencia (Hz).
- ✚ $2p$: Número de polos.
- ✚ S : Deslizamiento.

Tabla N° 2.1: Número de polos.

N° de polos	Rotación sincrónica por minuto	
	60 Hz	50 Hz
2	3.600	3.000
4	1.800	1.500
6	1.200	1.000
8	900	750

Fuente: Elaboración propia.

Básicamente, los motores asincrónicos se subdividen en dos tipos principales, los cuales son:

- ✚ Rotor Jaula.
- ✚ Rotor Bobinado.

2.4.1 Rotor jaula

Los motores de este tipo también son comúnmente llamados motores de “jaula de ardilla”, pues su enrollamiento rotórico tiene la característica de provocar cortocircuito, asemejándose a tal elemento, como se muestra en la figura N° 2.7 y la figura N° 2.8.



Figura N° 2.7. Motor asincrónico de rotor jaula.

Fuente: Manual de electricidad.

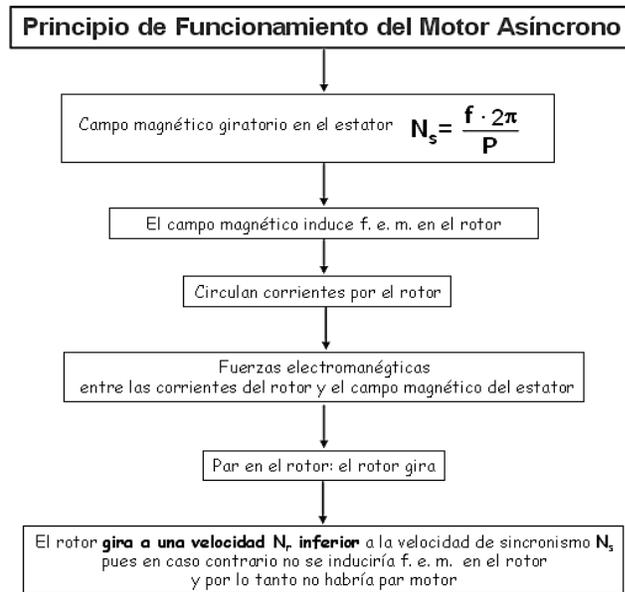


Figura N° 2.8: Esquema de funcionamiento de un motor asíncrono.

Fuente: Manual de electricidad.

2.5 Variador de frecuencia

Los controladores de frecuencia variable de estado sólido, constan de un rectificador que convierte la corriente alterna de la línea de alimentación a corriente directa y de una segunda sección llamada inversor, que convierte la corriente directa en una señal de corriente alterna de frecuencia ajustable que alimenta al motor.

En definitiva, estos dispositivos entregan voltaje y frecuencia variable conforme a la necesidad del motor y la carga a él conectada. Para tal efecto, toma la alimentación eléctrica de la red, cual tiene voltaje y frecuencia fija, la transforma en un voltaje continuo (rectificador más filtro), y luego lo transforma en voltaje alterno trifásico de magnitud y frecuencia variable por medio de un Inversor (ver la figura N° 2.9).

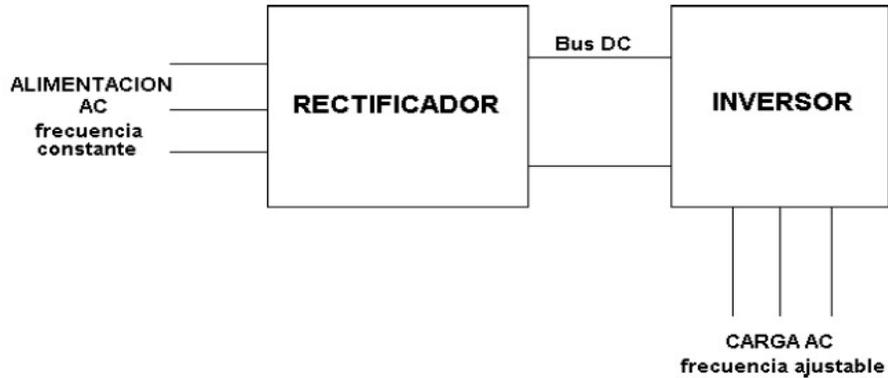


Figura N° 2.9: Esquema básico de conversor y carga.

Fuente: Manual de electricidad.

2.6 Rectificador

La función del rectificador es convertir la señal de voltaje de alimentación de CA a CD y controlar el voltaje al inversor para mantener constante la relación Volts/Hz.

2.7 Relación volts/Hz

Los motores de inducción producen el torque debido al flujo en su campo rotatorio. Cuando se opera por debajo de su velocidad base, el torque se lleva a cabo manteniendo constante la relación voltaje / frecuencia que se aplica al motor (ver la figura N° 2.10).

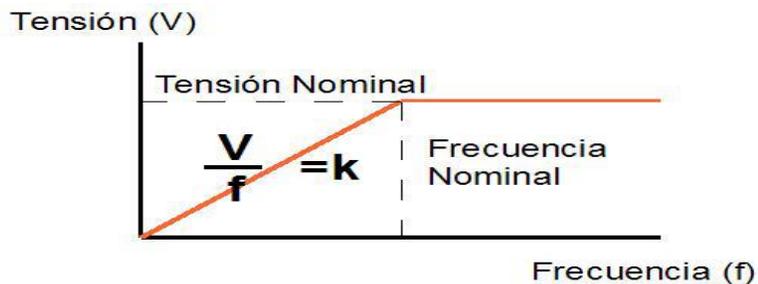


Figura N° 2.10: Relación Volt/Hertz.

Fuente: Manual de electricidad.

Si la relación Volts/Hz se incrementa al bajar la frecuencia para reducir la velocidad del motor, la corriente se incrementará llegando a ser excesiva. Si por el contrario la relación Volts/Hz se reduce al subir la frecuencia para elevar la velocidad del motor, la capacidad de torque se verá reducida.

Cuando se opera por arriba de la velocidad base, la relación Volts/Hz se reduce ya que se aplica un voltaje constante al motor, que generalmente es el voltaje nominal, por lo que las capacidades de torque se reducen.

2.8 Inversor

El inversor utiliza dispositivos de potencia de estado sólido, que son controlados por microprocesador para conmutar el voltaje del bus de CD y producir una señal de CA de frecuencia ajustable que alimenta al motor (ver la figura N° 2.11).

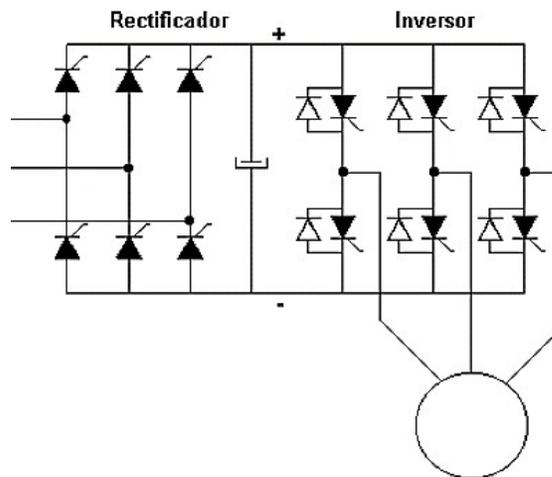


Figura N° 2.11: Diagramas etapas VDF.

Fuente: Manual de electricidad.

2.9 Principio de funcionamiento

El equipo se alimenta con un voltaje de corriente alterna (CA). Lo primero que hace es convertir el CA en CD (corriente directa). El voltaje es filtrado por un banco de capacitores

interno, con el fin de suavizar el voltaje rectificado y reducir la emisión de variaciones de señal. Posteriormente en la etapa de inversión, la cual está compuesta por transistores (IGBT), que encienden y apagan en determinada secuencia (enviando pulsos) para generar una forma de onda cuadrada de voltaje de CD a una frecuencia constante y su valor promedio tiene la forma de onda senoidal de la frecuencia que se aplica al motor.

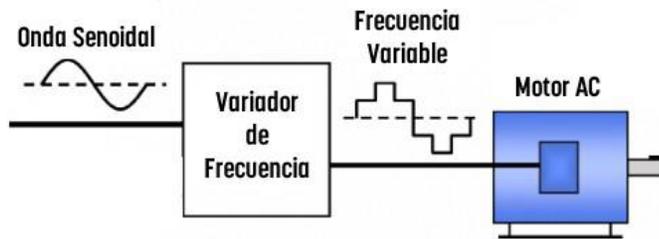


Figura N° 2.12: Diagrama VDF con carga.

Fuente: Manual de electricidad.

2.10 Tipos de carga

La primera consideración que se debe de hacer al aplicar un variador de frecuencia es determinar el tipo de carga y sus características, debiendo de conocer los requerimientos de par y velocidad.

Las cargas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- ✚ Cargas de par variable.
- ✚ Cargas de par constante.
- ✚ Cargas de potencia constante.
- ✚ Cargas de impacto.

2.11 Cargas de par constante

Son cargas en las que el par no es función de la velocidad, sino que permanece constante, mientras que la potencia varía linealmente con la velocidad.

Las aplicaciones típicas son:

- ✚ Accionamientos de tracción.
- ✚ Bandas transportadoras.
- ✚ Bombas de desplazamiento positivo.
- ✚ Grúas y malacates.

El reemplazo del motor eléctrico más reductor, se realiza por uno de imán permanente, que posee las características de cargas de par constante y bandas transportadoras.

CAPÍTULO III

REEMPLAZO MOTOR ELÉCTRICO

3.1 Motor eléctrico inducción electromagnética

El motor eléctrico, asociado al funcionamiento de la correa transportadora de mineral que alimenta con carga fresca al molino SAG 2210-MS-001, es del tipo rotor jaula ardilla, con una potencia de 746 kW en media tensión (4,16 kV). Además, cuenta con un convertidor de velocidad (VDF) de par constante, el cual tiene la función solamente de tener la acción de controlar el torque en la partida (aceleración) y en la detención (desaceleración).

3.2 Principio básico de funcionamiento

Los motores asíncronos funcionan mediante el principio de inducción mutua de la ley de Faraday. Lo que ocurre es que al aplicar una corriente alterna trifásica a las bobinas inductoras del motor asíncrono se produce un campo magnético giratorio, también conocido como campo rotante. El campo rotante genera tensiones eléctricas debido a que gira alrededor del rotor del motor (campo estatórico). Estas acaban convirtiéndose en corrientes eléctricas que circulan en el propio rotor. De manera paralela, las corrientes eléctricas inducidas por el campo rotante, acaban generando otro campo magnético con velocidad diferente en el campo rotatorio. La diferencia de estas velocidades relativas de campo estatórico y rotatorio son las que hacen que el rotor entre en movimiento.

Los motores de inducción estándar no se adaptan especialmente bien a operaciones de baja velocidad, pues su eficiencia cae con la reducción de velocidad y sólo están disponibles normalmente hasta 12 polos, limitándolos en los rangos de baja velocidad (esto normalmente se puede superar mediante una caja de reducción) (ver la figura N° 3.1).



Figura N° 3.1: Vista real del motor de inducción existente.

Fuente: BHP-Billiton.

A continuación, la figura N° 3.2 muestra la placa del motor eléctrico actual.

SIEMENS						
3 ~ Mot. 1LA4 500-4CV90-Z						
V	Hz	A	kW	cos θ	1/min	IP
4000 Y	50	130	750	0.66	1493	55

Figura N° 3.2: Placa del motor eléctrico actual.

Fuente: BHP-Billiton.

A continuación, la figura N° 3.3 muestra las instalaciones de la planta concentradora Spence SGO.



Figura N° 3.3: Planta concentradora Spence SGO.

Fuente: BHP-Billiton.

3.3 Motor eléctrico imanes permanentes

El motor de imanes permanentes es un desarrollo innovador dentro de la tecnología de motores sincrónicos. Es capaz de entregar un muy alto torque, eliminando con esto la necesidad de cajas reductoras. Este tipo de equipos requiere el suministro de un convertidor de frecuencia, que han sido especialmente modificados para operar con este tipo de motores.

3.4 Diseño y construcción de un motor de imanes permanentes

Tradicionalmente, el motor sincrónico es de una construcción más compleja que la del motor de inducción estándar. Con el nuevo tipo de motor, el diseño se ha simplificado mediante el uso de potentes imanes permanentes para crear un flujo constante en el entrehierro, eliminando así la necesidad del rotor bobinado y escobillas utilizadas normalmente para la excitación en los motores sincrónicos. Esto permite obtener el

rendimiento de un motor sincrónico, combinado con el diseño robusto y simple de un motor de inducción estándar. El motor de imanes permanentes debe ser energizado directamente en el estator por medio de un accionamiento de velocidad variable.

3.5 Beneficios del uso de motores de imanes permanentes

La nueva solución de motor de imanes permanentes proporciona un alto torque acoplado directamente con la carga a bajas velocidades. Al eliminar la caja de reducción, el usuario ahorra espacio, costos de instalación, elimina un punto de falla y, lo más importante, mejora la eficiencia y disminuye el mantenimiento del accionamiento.

La combinación de un menor número de componentes y sencilla configuración reduce los costos por hora de ingeniería, facilita la instalación, permite un uso más eficiente del espacio y reduce los inventarios de repuesto.

Es importante destacar que, en accionamientos de velocidad variable, esta solución mejora la unidad de control, pues permite que el convertidor funcione sin la necesidad de un encoder debido a que los motores sincrónicos operan sólo a la velocidad determinada por la frecuencia de alimentación.

La precisión es tan buena como la de un motor de inducción con un dispositivo de retroalimentación. Esto significa que el encoder puede ser eliminado, reduciendo aún más la necesidad de mantenimiento (ver la figura N° 3.4).



Figura N° 3.4: Vista general motor sincrónico.

Fuente: BHP-Billiton.

3.6 Suministro eléctrico

Las instalaciones y equipos de la Mina Spence requieren para la explotación de sus procesos mineros un sistema eléctrico capaz de abastecer sus requerimientos de energía presente y futura, considerando operación continua con sistemas redundantes y tolerantes a fallas.

El Sistema Eléctrico abarca desde la ampliación de la S/E Encuentro (Paño Mina Spence Encuentro) como punto de salida de la línea de 220 kV, que, en un recorrido de 70,4 km, con torres metálicas (que inicialmente alimentaba a la S/E Spence I), llega a la Subestación Spence II y de ahí sale una línea de 220 kV de 2,4 km a la Subestación Spence I, desde donde se inicia la distribución en 23 kV a las subestaciones ubicadas en los puntos clave del proceso productivo (ver la figura N° 3.5).

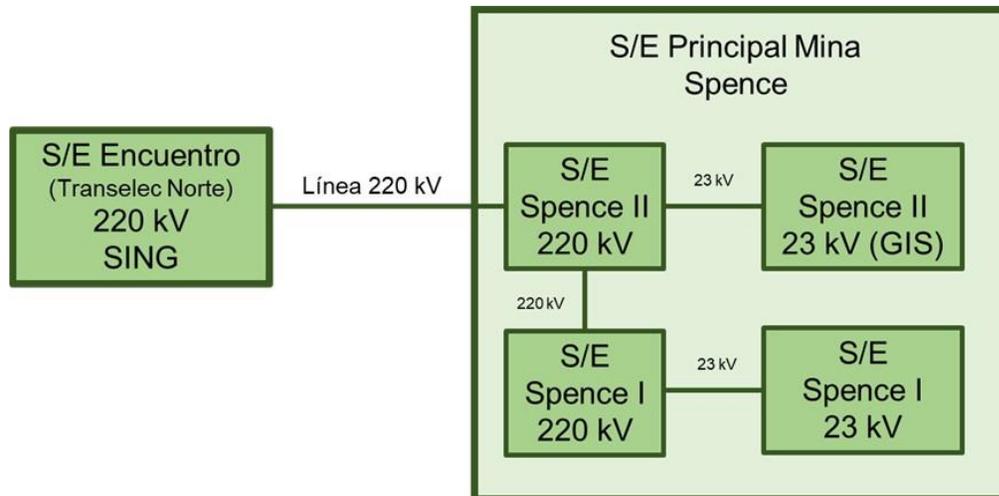


Figura N° 3.5: Sistema eléctrico.

Fuente: Minera Spence.

3.7 Suministro de la energía eléctrica a mina Spence general

El Sistema Eléctrico abarca desde la S/E Encuentro (Paño Mina Spence – Encuentro de la empresa de transmisión eléctrica “Transelec Norte”), como punto de salida de la línea de 220 kV, que, en un recorrido aproximado de 70 km con torres metálicas, llega a la Subestación Mina Spence II, desde donde se inicia la distribución en 23 kV a las subestaciones ubicadas en los puntos clave del proceso productivo (ver figura N° 3.6).

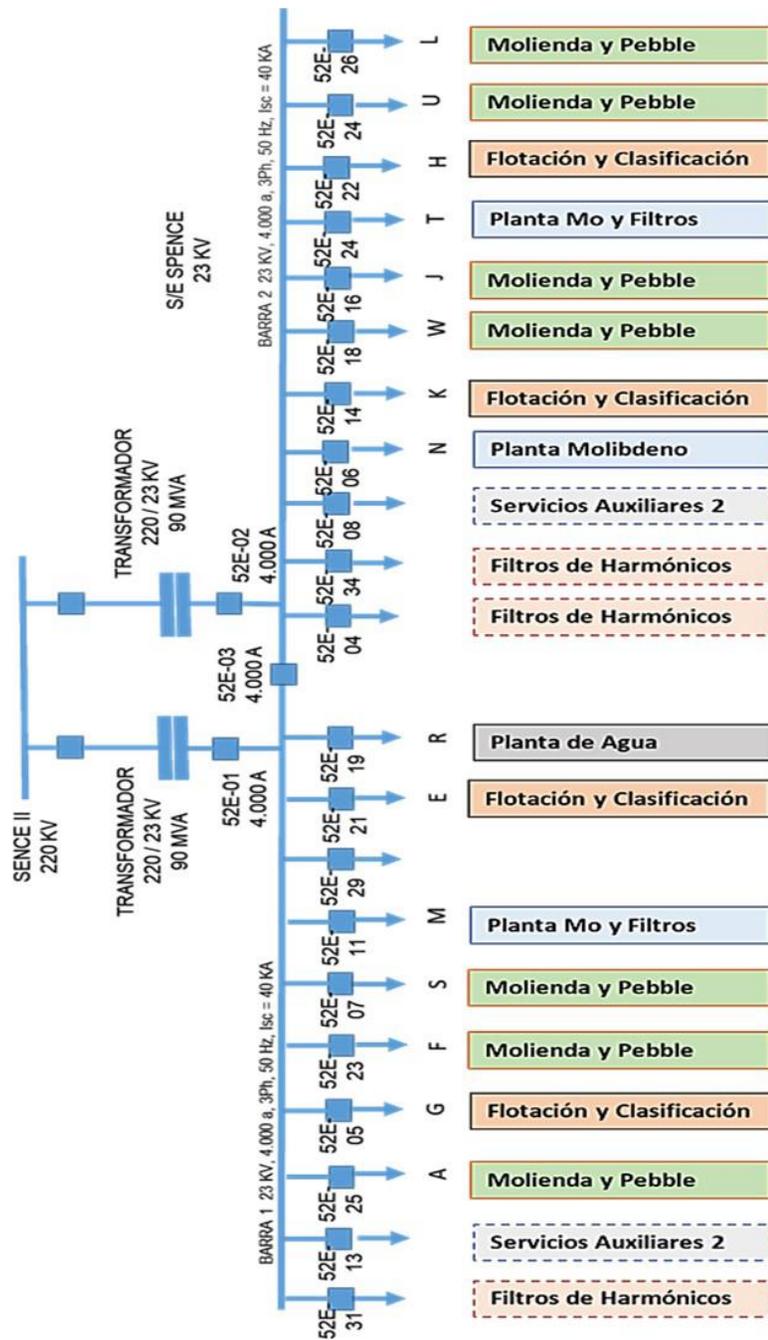


Figura N° 3.7: Diagrama unilineal sala eléctrica N°1.

Fuente: Minera Spence.

3.9 Equipos principales que intervienen en la operación de las áreas

Los equipos principales que intervienen en la operación de las áreas antes indicadas son:

- ✚ Una correa alimentadora que descargan el mineral sobre la correa transportadora (2280-CV-253) que alimenta el molino SAG.

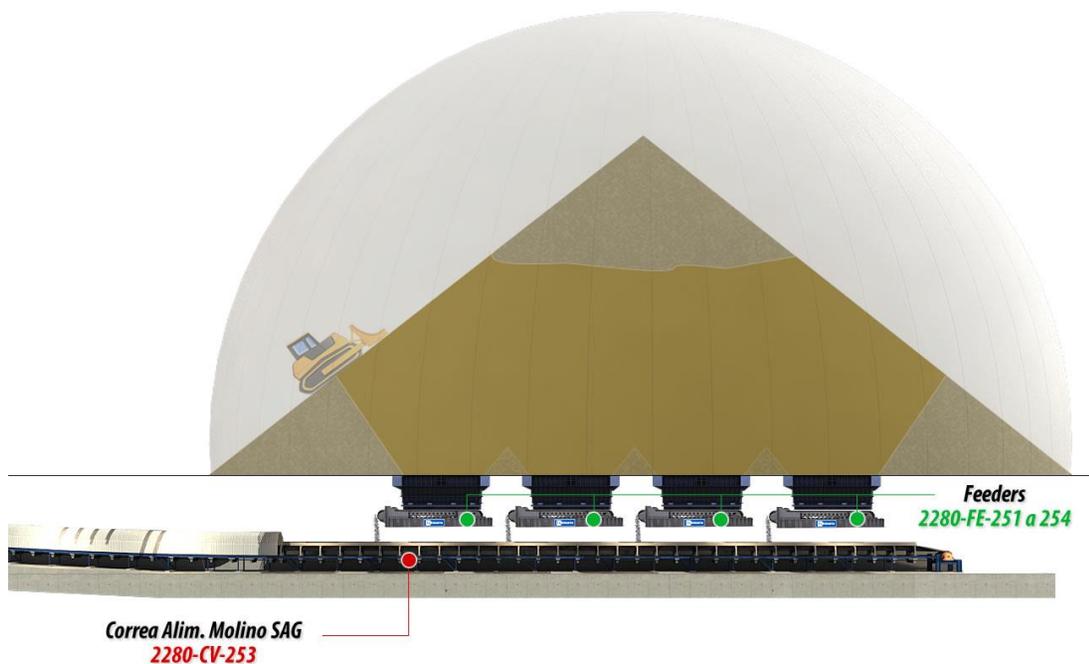


Figura N° 3.8: Correa Alimentación a molino SAG.

Fuente: Minera Spence.

3.10 Sala eléctrica (2210-ER-001)

- ✚ Switchgear (2210-SG-001).
- ✚ Dos interruptores de entrada.

- ✚ Un acoplador de barras.
- ✚ Seis interruptores de salida.
- ✚ Dos Barras de 4.16 kV, 2.500 A, 3Ph, 50 Hz, Isc 40 kA.
- ✚ 1 variador de Frecuencia que alimenta el Motor (2280-CV-253A-AF1).

3.11 Motores eléctricos

- ✚ 1 Motor de 746 KW (1.000 HP), correa alimentación Molino SAG (2280-CV-253A). (ver Anexo B).

Tabla N° 3.1: Tabla resumen de equipos.

Motor Eléctrico	Variador de Frecuencia			Equipo
2280-CV-253A	GE	2280-CV-	4,16 kV	Correa Alimentación Molino SAG (Control de Torque)
	746 kW	253A-AF1	800 kW	

Fuente: Minera Spence.

3.12 Suministro eléctrico al área de manejo de materiales

El suministro eléctrico al área de manejo de materiales se realiza como se indica en el diagrama esquemático:

La alimentación al motor de 746 KW, correa alimentación molino SAG (2280-CV-253A) se realiza a través del variador de frecuencia que alimenta el motor (2280-CV-253A-AF1) y este es alimentado desde un switchgear (2210-SG-001) en 4,16 kV.

Los interruptores 52E-23 y 52E-18 de los alimentadores de la Barra de 23 kV del Switchgear (2841-SG-001), de la Subestación Principal alimenta las Subestaciones Unitarias y de ahí en 4,16 kV se alimenta el switchgear (2210-SG-001).

Diagrama Esquemático Distribución Eléctrica Area Manejo de Materiales

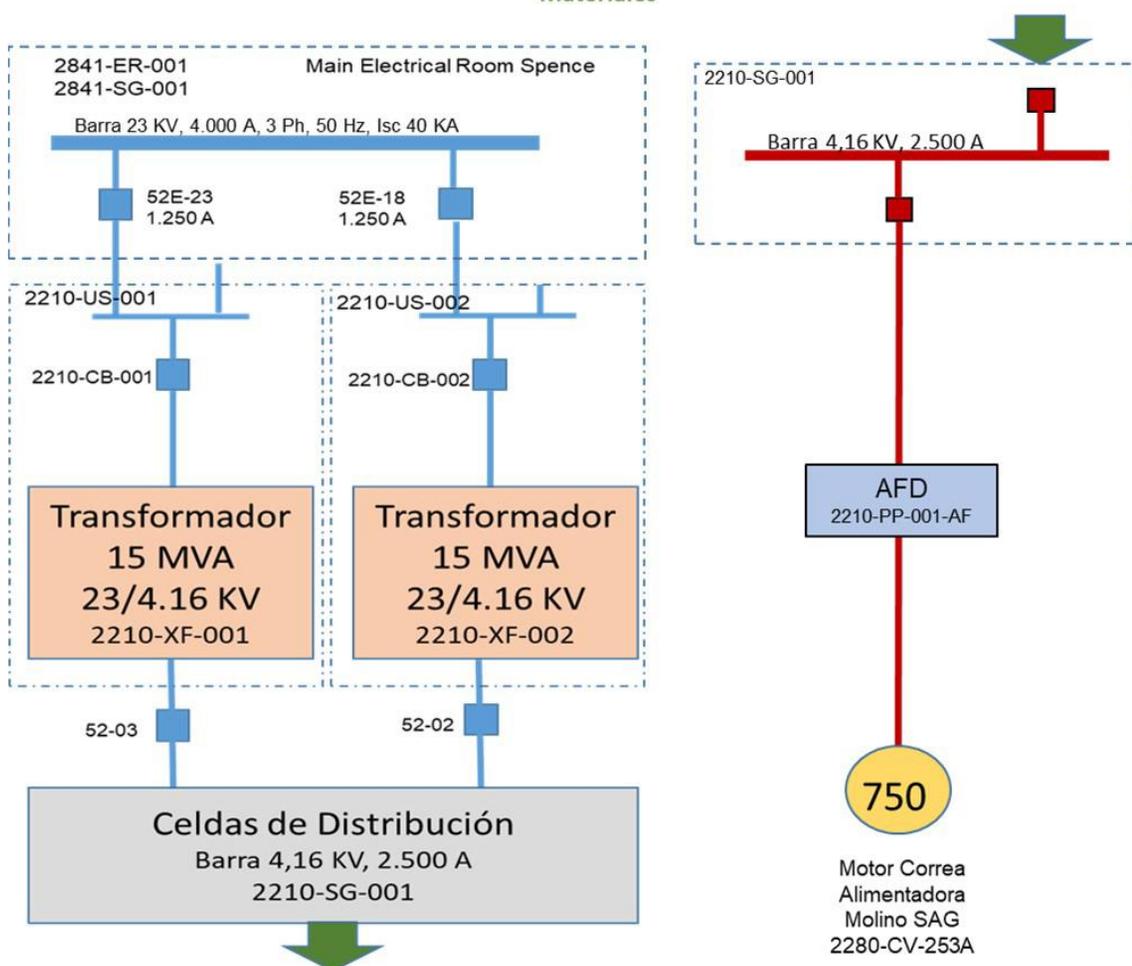


Figura N° 3.9: Diagrama unilineal alimentación correa (2280-CV-253A).

Fuente: Minera Spence.

3.13 Descripción tecnología motor - alta eficiencia

Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en trabajo mecánico y en la mayoría de los casos hacen parte de sistemas más complejos. En aplicaciones industriales, los motores hacen parte de sistemas de bombeo, aire comprimido, ventiladores, transporte de materiales y otros tipos de procesos. Aunque los motores eléctricos y sus controles usan principalmente energía eléctrica, su impacto sobre la eficiencia global donde se encuentran instalados es limitada.

Esto se debe a que las eficiencias de los demás componentes del sistema afectan tanto la energía mecánica requerida como las pérdidas que se presentan durante su operación. Por lo tanto, mejorar la eficiencia de un sistema de motores debe incluir como mínimo:

- ✚ Seleccionar el motor de alta eficiencia con la capacidad ajustada para la aplicación.
- ✚ Seleccionar los demás equipos (bombas, compresores ventiladores, etc.), de manera correcta, con la capacidad adecuada y también de alta eficiencia.
- ✚ Optimizar el diseño y la operación del sistema completo donde se encuentra instalado el motor.

A continuación, la figura N° 3.10 presenta el esquema de un sistema con motores de alta eficiencia.

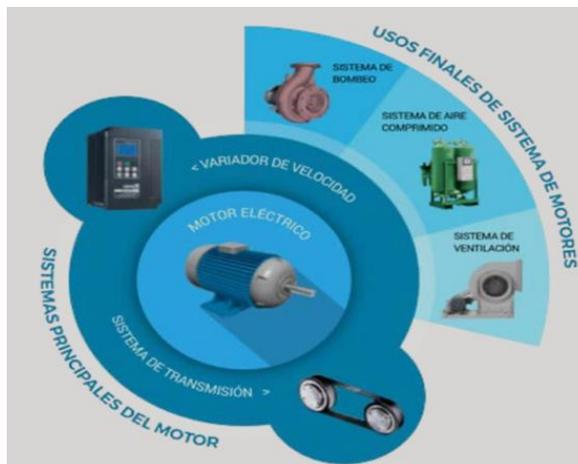


Figura N° 3.10: Esquema de un sistema de motores.

Fuente: BHP-Billiton.

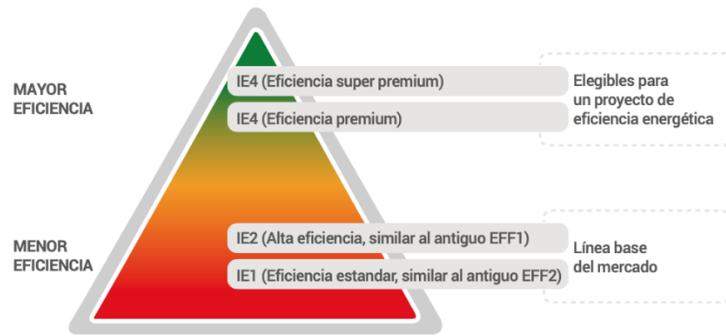


Figura N° 3.11: Clasificación de la eficiencia de motores con el estándar IEC.

Fuente: <http://ietd.iipnetwork.org/content/motor-systems#technology-resources>.

A continuación, en la figura N° 3.12 se presenta la diferencia en la eficiencia para motores de distinta potencia, de acuerdo con el estándar IEC. Como se puede observar en esta figura N° 3.12, la eficiencia nominal de un motor depende de su potencia (medida en kW o HP), un motor de mayor eficiencia o rendimiento consume menos energía para desarrollar la misma potencia mecánica.

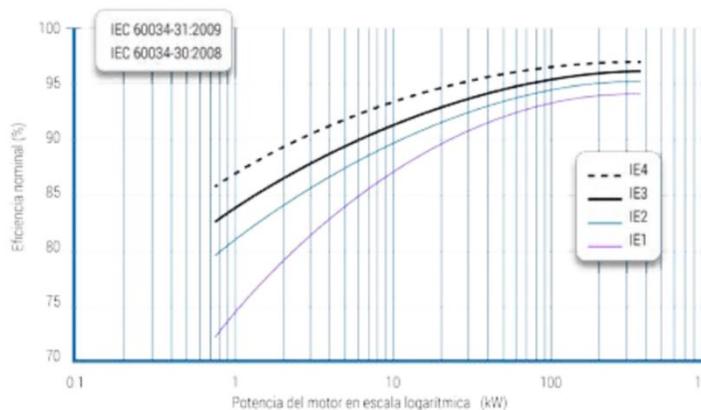


Figura N° 3.12: Comportamiento de la eficiencia de acuerdo con el estándar y la potencia.

Fuente: EC 60034-30 y IEC 60034-31, borrador 2009 (como aparece en IEA, 2011.p.23).

3.14 Descripción del Proyecto

Aproximadamente el 97 % del costo en el ciclo de vida de un motor corresponde al consumo de energía, solamente el 2 % corresponde a la inversión inicial y el 1 % al costo de mantenimiento. Esta es la razón por la cual, la adecuada selección inicial y una inversión mayor en un motor de alta eficiencia, genera ahorros importantes dada la larga vida útil que tienen este tipo de equipos (20 años o más).

Un proyecto de sustitución de motores consiste en determinar en una planta industrial o en un edificio, cuáles motores antiguos son susceptibles de ser sustituidos por motores de alta eficiencia de manera rentable, esto depende de la potencia del motor (en HP o kW), el tiempo de operación anual (h/año), el porcentaje de carga (% carga), la antigüedad, las condiciones de mantenimiento y las condiciones del proceso donde se encuentra instalado.

Adicionalmente, es posible incluir en la inversión la instalación de variadores de frecuencia para optimizar la operación del motor en aquellos procesos de operación con condiciones variables.

3.14.1 Línea base energética e información del nuevo proyecto

La línea base energética se determina teniendo en cuenta la potencia del motor, la carga promedio y las horas de operación del motor. El consumo se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) = \frac{\text{Potencia(kW)} * \% \text{carga} * \text{horas} \frac{\text{operación}}{\text{año}}}{\text{Eficiencia}} \quad (\text{Ec N}^\circ \text{ 3.1})$$

3.14.2 Potencial de ahorro energético y reducción de emisiones de GEI

El potencial de ahorro de energía y de reducción de emisiones de GEI de un proyecto nuevo o de cambio de motores, se calcula teniendo en cuenta el consumo de energía actual (línea de base) menos el consumo de energía con el nuevo motor operando en condiciones similares.

El potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de GEI depende de la potencia del motor, del número de horas de operación (para motores en stand by o con menos de 2.000 h/año de operación no resulta rentable su sustitución en la mayoría de los casos), de la variabilidad del proceso, de las condiciones de mantenimiento actuales y de la instalación de dispositivos como variadores de frecuencia. Muchos motores ya están equipados con estos dispositivos desde la fábrica. En general, el potencial de ahorro puede establecerse entre un 10 y 30 % del consumo de energía actual.

Para la evaluación energética, económica y ambiental de un proyecto de sustitución de motores, se requiere como mínimo la información contenida en la tabla N° 3.2.

Tabla N° 3.2: Información mínima requerida para evaluar un proyecto de sustitución de motores.

Parámetro	Unidad	Fuente/Formula	Parámetro	Unidad	Fuente/Formula
A. Potencia nominal del motor actual	kW	Dato de placa del motor	J. Inversión en el motor de alta eficiencia	USD	Dato de inversión
B. Porcentaje de carga del motor actual	%	Medición en campo	K. Precio de la energía eléctrica	USD/kWh	Dato de operación
C. Eficiencia nominal del motor actual	%	Dato de placa del motor	L. Ahorro de energía anual	kWh/año	E - I
D. Horas de operación promedio por año	h/año	Medición en campo	M. Ahorro económico	USD/año	L* K
E. Consumo de energía del motor actual	kWh/año	(A*B*D) /C	N. Periodo de retorno simple	Años	J/M
F. Potencia nominal del motor de alta eficiencia	kW	Dato de placa del motor	O. Factor de emisión	Kg CO ₂ /kWh	Dato Agencia Internacional de Energía o Red Nacional de Energía
G. Porcentaje de carga del motor de alta eficiencia	%	Medición en campo	P. Reducción de emisiones anuales	Kg CO ₂ /año	L* O
H. Eficiencia del motor de alta eficiencia	%	Dato de placa del motor	Q. Reducción de consumo de energía	%	(L/E) * 100
I. Consumo de energía del motor de alta eficiencia	kWh/año	(F*G*D) /H	R. Emisiones del motor actual	Ton CO ₂ /año	(E* O) / 1000
			S. Reducción de emisiones en %	%	(P/R) * 100

Fuente: (<http://www.iea.org/statistics/topics/co2emissions/>)

La reducción de emisiones de GEI, se calcula teniendo en cuenta al factor de emisión de la energía eléctrica que se usa en los motores, en caso de que se use energía de la red eléctrica, el factor de emisión se puede obtener de la base de datos de la Agencia Internacional de Energía. Si la energía que consumen los motores es autogenerada o cogenerada, el factor de emisión deberá calcularse para el caso específico.

3.15 Requerimiento de inversión

La inversión específica depende de la potencia del motor como se observa en la figura N° 3.13. Para motores de baja potencia, la inversión es considerablemente alta si se le compara con un motor estándar, por esta razón, los retornos de la inversión son mejores para motores de mayor potencia.

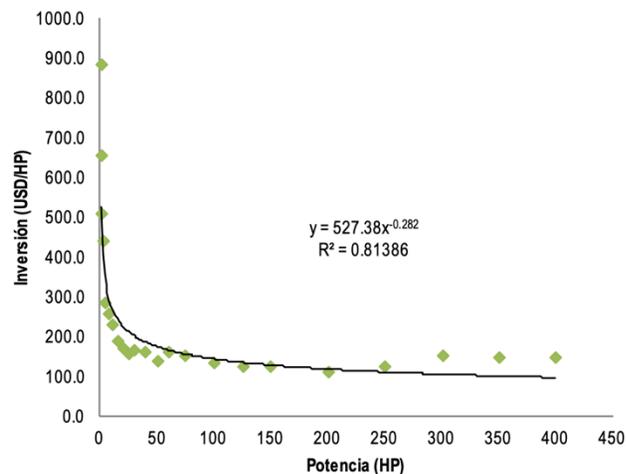


Figura N° 3.13: Costos de inversión específica en motores de alta eficiencia.

Fuente: Elaboración propia a partir de los precios de motores de Baldor.

Para motores por encima de 25 HP, el costo de inversión se mantiene por debajo de 200 USD/HP, de esta forma, la inversión en un motor de 200 HP será de aproximadamente 40.000 USD sin incluir los costos de instalación que se estiman entre el 30 y 50 % de los costos de motor dependiendo de la aplicación.

La ecuación de la figura N° 3.13 se puede usar para realizar estimativas iniciales de inversión, para la toma de decisiones de financiación se recomienda hacer estudios técnicos con precios de mercado.

3.16 Análisis de riesgos técnicos, ambientales y sociales

En la siguiente matriz (ver tabla N° 3.3), se resumen los potenciales riesgos técnicos, ambientales y sociales de un proyecto de sustitución de motores y su estrategia de mitigación.

Tabla N° 3.3: Matriz de riesgos técnicos, ambientales, financieros y sociales.

	Riesgo	Tipo	Estrategia de mitigación
	Disposición final de residuos.	Ambiental	Entregar los motores sustituidos a una compañía especializada que certifique su adecuada disposición final.
	Ahorros generados por el proyecto.	Financiero/Técnico	Realizar estudio técnico para la estructuración del proyecto.
	Vida útil de los equipos.	Técnico	Financiar equipos con certificación IE3 e IE4.

Fuente: Elaboración propia.

No se presentan riesgos sociales que requieran una estrategia de mitigación.

3.17 Criterios de elegibilidad

Los proyectos de sustitución de motores de alta eficiencia, tienen potenciales de reducción de consumo de energía entre el 10 y el 30 % en condiciones normales de operación. Al ser sistemas que consumen energía eléctrica de la red en la mayoría de los casos, los potenciales de reducción de emisiones de GEI son equivalentes al ahorro de energía generados.

Como criterio general de elegibilidad (ver la figura N° 3.14), ambiental del proyecto, se recomienda que la reducción de emisiones sea mayor al 10 % con respecto a la línea base establecida.

Para proyectos nuevos, la elegibilidad se puede establecer teniendo en cuenta que, si se hace una inversión en un nuevo proyecto con motores de alta eficiencia en lugar de motores de eficiencia estándar, el ahorro de energía puede ser del 15 % en condiciones normales de operación, comparado con una línea de base de consumo energético de motores de eficiencia estándar.

En la estructuración financiera de estos proyectos se debe considerar la posibilidad de otorgar periodos de gracia en caso de que los equipos sean importados. así mismo, el plazo del crédito debería ser mayor o igual al periodo de retorno simple de la inversión.

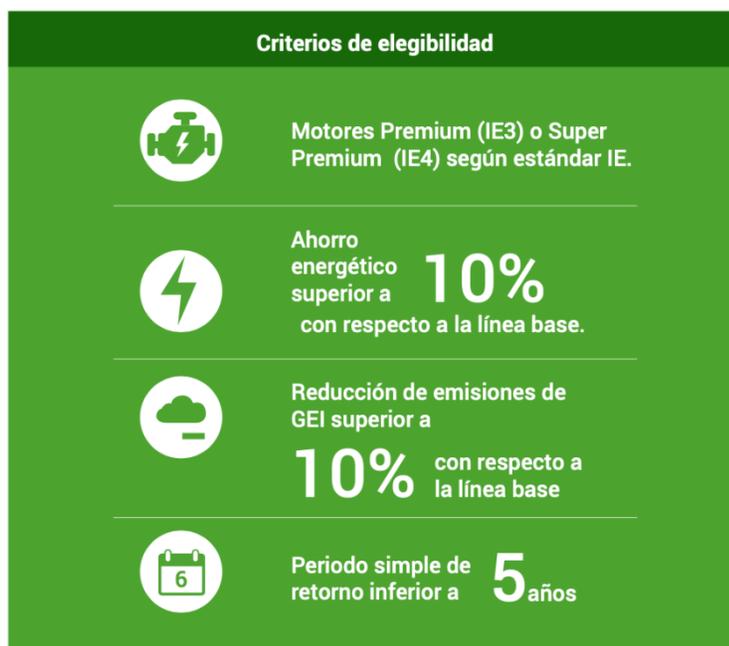


Figura N° 3.14: Criterios de elegibilidad.

Fuente: Elaboración propia.

3.18 Monitoreo, reporte y verificación del proyecto

Los proyectos de eficiencia energética son implementados generalmente por empresas de ingeniería especializadas o por los departamentos internos de mantenimiento dentro de las empresas. Estos están encargados de monitorear y verificar los resultados del proyecto. El monitoreo de un proyecto de sustitución de motores o compra de motores nuevos de alta eficiencia puede hacerse de dos maneras:

- ✚ **Monitoreo continuo:** instalación de medidores de energía en el centro de control de motores de tal forma que es posible monitorear el consumo y la operación de equipos de gran potencia de manera permanente.
- ✚ **Monitoreo puntual:** en el caso de motores de baja potencia, lo que se acostumbra es hacer una medición de voltaje y corriente en condiciones de operación normales y calcular el consumo de acuerdo con las horas de operación del motor.

Los indicadores que se pueden utilizar para el reporte, se presentan en la tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.4: Indicadores de monitoreo del proyecto.

Indicador	Unidad	Valor Exante	Valor Expost
Consumo de energía	kWh/año		
Reducción de emisiones de GEI	Ton CO ₂ /año		

Fuente: Elaboración propia.

La verificación del proyecto se puede hacer considerando las reducciones de consumo de energía reportados por la empresa en su factura, o mediante un monitoreo continuo o puntual del consumo de energía de los motores incluidos en el proyecto como se explicó arriba.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE COSTOS

4.1 Inversiones y vida útil de los equipos

4.1.1 Vida útil de los equipos

En todo equipo de mina, tanto durante los tiempos de utilización como durante los tiempos en que se encuentra ocioso, su diversidad de partes y mecanismos van sufriendo desgaste y deterioro, por lo que con cierta frecuencia deben ser sustituidos o reparados para estar en condiciones para ser ocupada y producir en forma eficiente y económica.

Sin embargo, con el transcurso del tiempo todo equipo llega a encontrarse en un estado tal de desgaste y deterioro, que su posesión en vez de ser un bien de producción pasa a ser una carga financiera para la empresa, lo cual ocurre cuando los gastos que se requieren para que el equipo produzca, exceden a los rendimientos económicos obtenidos con el mismo, es decir la posesión y operación del equipo reportan pérdidas económicas y/o riesgos no aceptables para una operación minera segura. Debido a lo anterior junto con definir la flota de equipos, se debe determinar el programa de inversiones que permitirá estimar el momento en que los equipos deberán ser reemplazados o se les podrá realizar una mejora para prolongar su vida útil.

4.1.2 El programa de inversiones

El programa de inversiones tiene como objetivo principal permitir un ordenamiento de las salidas de dinero, de tal forma de tener claro cuáles serán los futuros flujos de inversiones, cómo se realizarán, cuándo se harán efectivas y las razones por las cuáles deben realizarse.

Principales inversiones que se realizan en la mina:

- ✚ Equipos mina.
- ✚ Instalaciones de infraestructura.
- ✚ El pre-stripping o apertura de la mina se realiza al principio de la explotación, al igual que las instalaciones.

En el caso de los equipos mina se tiene un desgaste asociado a la operación, por lo que dependiendo de la duración del proyecto deberán ser cambiados o sometidos a una puesta a punto u overhaul.

Para determinar el programa de inversiones en equipos se deben tomar en cuenta los siguientes conceptos

- ✚ Valor actualizado al momento de realizar la inversión.
- ✚ Vida útil de los equipos.
- ✚ Vida económica del equipo.
- ✚ Valor del overhaul para el equipo.
- ✚ Vida útil de la faena.

4.1.3 Vida económica de los equipos

Se entiende por vida económica el periodo durante el cual este puede operar en forma eficiente, realizando un trabajo satisfactorio y oportuno desde punto de vista económico.

A medida que aumenta el tiempo y el uso del equipo, la productividad de este tiende a disminuir y sus costos de operación van en constante aumento como consecuencia de los gastos (ver la figura N° 4.1).

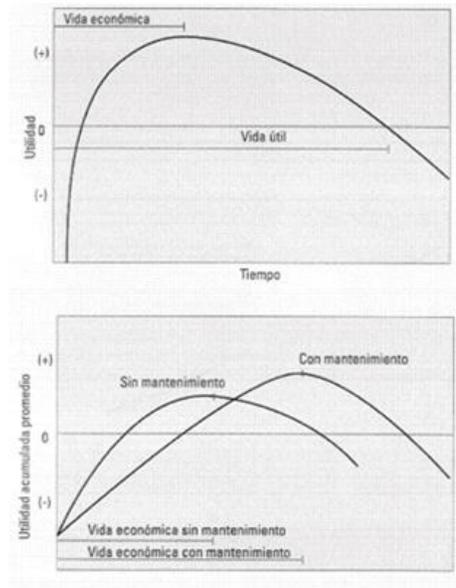


Figura N° 4.1: Gráfico de mantenimiento y vida económica.

Fuente: U.S. geological Survey “Mineral Commodity Summaries 2017”.

4.1.4 Concepto de rendimiento

Este concepto se asocia directamente a las pérdidas

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Potencia mecánica útil}}{\text{Potencia activa eléctrica}} \quad (\text{Ec. N}^\circ \text{ 4.1})$$

Como definición; es la razón entre potencia mecánica útil para realizar el trabajo y la potencia activa eléctrica suministrada para tal efecto.

4.1.5 Concepto de disponibilidad y confiabilidad

La disponibilidad de un sistema se define:

$$\text{Disponibilidad} = \frac{T.\text{serv}}{T.\text{total}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.2)$$

Dónde:

- ✚ T servicio: Tiempo con servicio con calidad adecuada.
- ✚ T total: Tiempo total de observación.

El concepto básico de confiabilidad se relaciona con la cantidad de componentes de un equipo que fallan por un período de tiempo t. Si bien la definición precisa de confiabilidad debe realizarse en función de la probabilidad de ocurrencia de fallas.

$$k\text{conf}(t) = \frac{\text{compviv}(t)}{\text{comptot}(t)} \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.3)$$

Dónde:

- ✚ compviv(t): componente que sobreviven en un buen estado en un período t.
- ✚ comptot(t): componentes probados en un período t.

4.1.6 Concepto factor de carga

Se llama factor de carga al índice que muestra el porcentaje de la capacidad del motor que está siendo utilizado. Este indica la potencia que entrega el motor cuando ya se encuentra en operación con relación a lo que puede entregar. El factor de carga se calcula dividiendo la potencia real demandada y la potencia nominal entregada de la siguiente forma:

$$\text{Factor Carga} = \frac{\text{Potencia real entregada}}{\text{Potencia placa motor}} \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.4)$$

4.1.7 Concepto factor de utilización

El índice que muestra el porcentaje de tiempo que el motor está operativo durante tiempo determinado.

4.1.8 Concepto factor de servicio

Es un indicador de la capacidad de sobrecarga que puede soportar un motor eléctrico sin exceder los límites de elevación de temperaturas establecido (WEG,2017). Available: http://www.weg.net/files/products/WEG-motor-de-induccion-trifasico-de-alta-y-baja-tension-rotor-de-anillos-11171348-manual_espanol.pdf. [Último acceso: Diciembre 2017].

Un valor 1.1 en este factor significa que el motor puede trabajar al 110 %, sin embargo, esto no quiere decir que tenga que trabajar continuamente a ese valor, sino que es una capacidad adicional que posiblemente se llegue a ocupar en ciertas ocasiones, cabe destacar que los motores sobrecargados reciben mayor corriente eléctrica que la nominal; calentándose en mayor medida, reduciendo notablemente su vida útil y bajando la eficiencia de operación.

Por ejemplo, para un motor de 50 HP y cuya eficiencia es del 90%, suponiendo un valor de compra de 5.000 USD, y con un precio estándar de energía de 100 USD/MWh, operando las 24 horas del día, 310 días al año, es decir un factor de utilización del 85 % y con un factor de carga del 70 %, se obtiene que del total del trabajo útil, hay pérdidas superiores a 14.500 USD.

Considerando esto para una planta donde hay un elevado número de motores y que operan las 24 horas del día, con paradas programadas sólo para mantención, la suma asociada a pérdidas crece proporcionalmente y se justifica que haya esfuerzos en estudiar medidas de eficiencia energética.

Los aspectos más relevantes al momento de evaluar las pérdidas o más bien los factores que influyen en la degradación de la eficiencia son:

- ✚ **Reparaciones:** Cualquier reparación que se ejecute en el motor, implica que se modifican las condiciones originales de diseño o fabricación y evidentemente no se alcanzan los estándares en los cuales fue fabricado el equipo, en el caso más típico de reparación que corresponde al rebobinado, se pierde eficiencia en promedio alrededor del 2 %.

- ✚ **Calidad de la tensión de alimentación:** Cuando la instalación es deficiente, o sencillamente por un control deficiente de la tensión, y este es más bajo que el nominal, se produce un efecto en las pérdidas de Joule. Por otra parte, el voltaje debe ser equilibrado, mientras más difieran las magnitudes de cada fase, mayor alteración sufrirán los flujos magnéticos con la consiguiente pérdida en el núcleo. Además, se desequilibran las corrientes lo que acarrea aumento de las pérdidas Joule.

- ✚ **Carga mecánica:** Las pérdidas Joule se ven afectadas cuando el motor trabaja con carga diferente de la nominal.

- ✚ **Confiabilidad del diagnóstico del estado de los motores:** Es muy importante contar con una metodología de mantención, y un diagnóstico acertado del estado de los equipos. Si el diagnóstico no se da a tiempo, o es deficiente, las correcciones no se llevarán a cabo y el equipo no podrá corregirse o sustituirse. De hecho, parte importante del diagnóstico debiera ser la determinación de cuándo es conveniente dar de baja un equipo. Finalmente, si la falla no se detecta a tiempo, el paro de planta asociado a la intervención correctiva, implicará pérdidas en la producción.

4.2 Análisis técnico económico de reemplazo de motores

Luego de todos los conceptos asociados a este capítulo y tomando en consideración que la suma de motores de menor potencia representa cerca de un 30% de toda la planta,

se realiza el análisis técnico económico con aquellos que se encuentran dentro del 70 % superior.

4.2.1 Estimación de la eficiencia de los motores de planta

El desarrollo de este cálculo se puede realizar conociendo qué norma cumple el motor de la planta. En este caso a la clase IE1. Luego, extrayendo los valores de eficiencia estándar de la norma IEC 60034-30, para el número de polos que corresponda.

Para este efecto, se toman en cuenta los motores en estudio, que corresponden a aquellos cuya potencia nominal es mayor o igual a 55 [kW].

4.2.2 Evaluación económica de reemplazo de motores

Para este análisis se tomarán en cuenta tres situaciones que corresponderán al estado base, al estado de alta eficiencia y al estado de eficiencia premium. Se usarán las eficiencias establecidas por la norma para establecer el periodo de recuperación de capital.

Los estados que se mencionan corresponden a la norma según la siguiente notación:

- ✚ **Estado Base:** Se denominan IE1, corresponden a los motores de eficiencia estándar y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

- ✚ **Estado Alta eficiencia:** Se denominan IE2, corresponden a los motores de eficiencia alta y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

- ✚ **Estado Eficiencia Premium:** Se denominan IE3, corresponden a los motores de eficiencia premium y sus eficiencias mínimas están dadas por la norma IEC 60034-30.

4.2.3 Costos de inversión

Los costos de los motores estarán dados por un valor entregado por el distribuidor de equipos, sumado a un porcentaje no menor al 10 % atribuible a montaje y puesta en marcha.

En general, una buena aproximación es suponer un costo de inversión de 1.000 USD/10 kW, aumentando el monto en un 10% para el motor de eficiencia premium, en el rango de 55 kW hasta 1.000 kW. En este rango el precio de mercado de los motores puede aproximarse linealmente, a menos que se tenga un dato certero, como efectivamente ocurre en este caso. Los precios referenciales a considerar quedan establecidos como se muestra en la tabla N° 4.1.

Para los motores de 400 kW o superior, el fabricante no dispone de motores que satisfagan la categoría premium. Para el costo de los motores IE1, se calculó un 15 % menos del equivalente IE3, (equivalente en términos de potencia nominal).

Tabla N° 4.1: Precio de acuerdo a potencia eléctrica.

Potencia kW	IE1 USD	IE2 USD	IE3 USD
55	5.227,5	-	6.150
75	6.960,65	-	8.189
110	8.494,05	-	9.993
160	19.456,5	-	22.890
400	34.340	40.400	-

Fuente: Elaboración propia.

Los valores que serán considerados en el cálculo del VAN, son ajustados con un 12 % adicional dado por el montaje. El transporte es en general cubierto por el fabricante, tal como ocurre en este caso al observar la tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2: Precio final incluido el transporte.

Potencia kW	IE1 USD	IE2 USD	IE3 USD
55	5.854,8	-	6.888
75	7.795,928	-	9.171,68
110	9.513,336	-	11.192,16
160	21.791,28	-	25.638,8
400	38.460,8	45.248	

Fuente: Elaboración propia.

No existe el costo asociado al tipo IE3 para motores iguales o superiores a 400 kW, puesto que el fabricante no cuenta con ellos.

4.2.4 Costos de inversión

Los costos de operación se definen como los costos en que se incurre para poder llevar a cabo el funcionamiento. En el caso de los motores eléctricos, corresponden a los costos de la energía utilizada y los costos de mantención y reparación. Este último no se considerará en el análisis pues la idea del estudio es reemplazar motores de eficiencia estándar por su equivalente nuevo o por motores de eficiencia Premium.

El costo de operación se calculará de la siguiente forma.

$$CO = \frac{P_{nom} \times F_c \times H_{Uanual} \times P_{energía}}{n} \quad (\text{Ec. N° 4.5})$$

Dónde:

- ✚ P_{nom}: Responde a la potencia nominal del motor en kW.
- ✚ F_c: Es el factor de carga en tanto por uno.
- ✚ H_{Uanual}: Son las horas de uso promedio al año.
- ✚ P_{energía}: Es el precio de la energía en USD/KWh.

✚ n: Corresponde a la eficiencia del motor en planta en tanto por uno.

4.2.5 Cálculo de indicadores de la evaluación VAN y TIR

Se calculará el VAN como una forma de medir cuán rentable es el proyecto, y la TIR para evaluar a qué tasa hay indiferencia con respecto a ejecutarlo o no.

El VAN se debe calcular de la siguiente forma:

$$VAN = \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} - I_0 \quad (\text{Ec. N}^\circ 4.6)$$

Dónde:

- ✚ N: El horizonte de evaluación se asume de 10 años.
- ✚ i: La tasa de descuento es de un 12 %.
- ✚ F: Costos de operación por cada año.
- ✚ I_0 : Costo de inversión inicial.

Sólo se incluyeron en el flujo de caja los costos de operación, pues como se dijo, los costos de mantención se asumen iguales y por tanto se anulan entre sí.

La TIR se calcula igualando el VAN a cero y encontrando a qué tasa eso se produce.

4.2.6 Resultados de la evaluación económica

Los resultados que se muestran en la tabla N° 4.3, corresponden a la evaluación económica de reemplazo de motores.

La tasa interna de retorno o tasa interna de rentabilidad (TIR), de una inversión es el promedio geométrico de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión, y que implica, por cierto, el supuesto de una oportunidad para “reinvertir”.

La TIR puede utilizarse como indicador de la rentabilidad de un proyecto: a mayor TIR, mayor rentabilidad; así, se utiliza como uno de los criterios para decidir sobre la aceptación o rechazo de un proyecto de inversión. Para ello, la TIR se compara con una tasa mínima o tasa de corte, el coste de oportunidad de la inversión (si la inversión no tiene riesgo, el coste de oportunidad utilizado para comparar la TIR será la tasa de rentabilidad libre de riesgo). Si la tasa de rendimiento del proyecto expresada por la TIR supera la tasa de corte, se acepta la inversión; en caso contrario, se rechaza.

Tabla N° 4.3: Cálculo de VAN y TIR.

VAN y TIR		Reducción de 5 % costo		
Motores	VAN USD	TIR Promedio	VAN USD	TIR promedio
Hasta 200 kW fcarga real	\$ 526.184	100 %	\$ 595.076	185 %
Hasta 200 kW fcarga 0,7	\$ 699.786	129 %	\$ 706.230	136 %
VAN y TIR	VAN USD	TIR Promedio	Reducción de 5% costo	
Hasta 200 kW fcarga real		-		-
Hasta 200 kW fcarga 0,7	-\$ 492.584	3,991 %	-\$ 420.258	5,1%

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, al realizar el reemplazo del motor eléctrico de inducción electromagnética a motor eléctrico de imanes permanentes en correa transportadora de mineral en compañía minera Spence S.A., se observa una reducción en un 5 % del costo, partiendo de un VAN en situación sin proyecto de 492.584 USD a un VAN en situación con proyecto de 420.258 USD, logrando finalmente una reducción de un 5 % del costo total, equivalente a 72.326 USD.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo al análisis de costos desarrollado en el capítulo IV, a continuación, en la tabla N° 5.1 se indica el costo respectivo del motor eléctrico y el del reductor mecánico.

Tabla N° 5.1: Costo en US\$ motor eléctrico y reductor.

2280-CV-253A	Motor eléctrico	Eléctrico	1LA4500-4CV90-Z	11228245	95.116	US\$
2280-CV-253	Reductor	Mecánico	B3DH17	11227552	97.868	US\$

Fuente: Minera Spence S.A.

A continuación, se desarrollará el análisis de dos escenarios que considera la situación sin proyecto y con proyecto de mejora.

5.1 Costos situación sin proyecto

A continuación, en la tabla N° 5.2 se indican los costos de operar con el motor eléctrico de inducción electromagnética y el reductor en el área de molienda de la compañía.

Tabla N° 5.2: Flujo de caja en US\$ situación sin proyecto.

Ítem/Año	0	1	2	3	4	5
Costo de la Falla		-13.883	-14.161	-14.444	-14.733	-15.027
Consumo Energía Eléctrica		-19.185	-19.569	-19.960	-20.359	-20.766
Costo Detención Molino SAG		-8.400.000	-8.400.000	-8.400.000	-8.400.000	-8.400.000
Inversión (motor eléctrico + reductor)	-192.984					
Total	-192.984	-8.433.068	-8.433.729	-8.434.404	-8.435.092	-8.435.794

Fuente: Elaboración propia.

Luego al utilizar el indicador económico del VAN declarado en el capítulo IV y una tasa de descuento de un 12 %, realizamos el cálculo.

$$VAN = \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} - I_0$$

$$VAN = -US\$ 30.596.618. -$$

Se puede observar que los costos totales de operar con el motor eléctrico de inducción electromagnética y el reductor en el área de molienda de la compañía traídos a valor presente corresponden a -US\$ 30.596.618.

5.2 Costos situación con proyecto

A continuación, en la tabla N° 5.3 se indican los costos de operar sin el reductor mecánico y el nuevo motor eléctrico de imán permanente media tensión (MT), en el área de molienda de la compañía.

Tabla N° 5.3: Flujo de caja en US\$ situación con proyecto.

Ítem/Año	0	1	2	3	4	5
Costo de la Falla		-11.106	-11.329	-11.555	-11.786	-12.022
Consumo Energía Eléctrica		-19.185	-19.569	-19.960	-20.359	-20.766
Inversión (motor imán permanente)	-280.000					
Total	-280.000	-30.291	-30.897	-31.515	-32.145	-32.788

Fuente: Elaboración propia.

$$VAN = -US\$ 393.143. -$$

Se puede observar que los costos totales de operar indican los costos de operar sin el reductor mecánico y el nuevo motor eléctrico de imán permanente media tensión (MT),

en el área de molienda de la compañía traídos a valor presente corresponden a -US\$ 393.143.

Finalmente, podemos indicar que el ahorro en los costos es de US\$ 30.203.475 equivalente a un 99 % de la situación sin proyecto, lo cual es significativo, por lo que el cambio de motor eléctrico de inducción electromagnética a motor eléctrico de imanes permanentes trae beneficios económicos a la compañía, ya que se elimina el costo de detención del molino SAG asociadas a la caja de reducción, el cual representa un costo de US\$ 350.000 por cada hora de detención y durante un mes suceden dos detenciones aproximadamente y además el costo de la falla se reduce en un 80% aproximadamente de la situación sin proyecto versus la situación con proyecto, lo anterior, se debe a los beneficios de la eficiencia energética que va de la mano con la implementación y puesta en marcha de la nueva ley y la norma ISO.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

Se concluye en base a los resultados de la evaluación económica, que el proyecto de reemplazo del motor eléctrico de inducción electromagnética por un motor eléctrico de imanes permanentes es rentable, ya que se logra una reducción de un 5 % del costo correspondiente a 72.326 USD, este ahorro trae beneficios para la compañía minera, ya que la producción emplea diversos tipos de costos los cuales deben de mantenerse controlados a través del tiempo en todos sus niveles de producción, a fin de generar una mejora continua en dicha materia.

También podemos inferir que durante la operación de los motores se produce un desgaste, propio durante su tiempo de trabajo. En base a esto, se realizó una evaluación técnico - económica de su reemplazo, donde se observan grandes beneficios económicos para la compañía ya que pasamos desde un VAN de la situación sin proyecto correspondiente a -US\$ 30.596.5618 a un VAN de la situación con el proyecto de mejora de -US \$ 393.143, es decir que se generó un ahorro en los costos de un 99%, lo que resulta beneficioso para la compañía en la gestión de los costos la implementación de dicho proyecto de título.

Este ahorro en los costos significaría que al eliminar los valores por concepto de detenciones del Molino SAG, debido a las fallas de la caja reductora, disminuiría el coste de la falla total de al menos un 80 %. Igualmente, deducir que las ventajas del motor síncrono de imanes permanentes frente al motor de inducción pueden resumirse así: mejor rendimiento, regulación de velocidad más precisa, mayor densidad de potencia y temperatura de trabajo reducida (con la consiguiente mayor vida útil para los rodamientos y el aislamiento). Con esto se asume y de acuerdo a lo anterior, que los conceptos de eficiencia energética y la norma ISO 50001 son considerados fundamentales para el desarrollo del presente proyecto, ya que optimizamos el consumo energético y el estándar para evitar pérdidas de energía durante el proceso de tratamiento de molienda.

Podemos concluir que, en muchos casos, la sustitución de un motor de inducción por un motor síncrono de imanes permanentes puede eliminar la necesidad de tener determinados elementos como reductores, por lo que se podrá incrementar el rendimiento total del sistema, además de reducir el coste inicial de la inversión, el tiempo de montaje y las necesidades de mantenimiento. Finalmente, y tomando en cuenta los precios de la energía que van en aumento, muchos inversionistas están optando por motores síncronos de imanes permanentes en la industria ya que son de bajo costo y generan ahorros permanentes en el consumo de la energía eléctrica.

GLOSARIO

- ✚ **Antiguo EFF2, EFF1:** normas anteriores que regulaban la eficiencia de los motores, estas han sido remplazadas por las normas IEC.
- ✚ **BTU:** Unidad Térmica Británica. Unidad para medir el calor, un BTU es la energía requerida para elevar la temperatura de una libra de agua un grado Fahrenheit.
- ✚ **Dióxido de carbono (CO₂):** es el principal gas de efecto invernadero, emitido principalmente a través del uso del transporte, la industria, la producción de energía eléctrica, la agricultura y la deforestación.
- ✚ **Eficiencia energética:** es la forma de gestionar y limitar el crecimiento del consumo de energía. Un proceso más eficiente puede producir más bienes o servicios con la misma o menor cantidad de energía. Por ejemplo, una bombilla fluorescente compacta (CFL) utiliza menos energía que una bombilla incandescente para producir la misma cantidad de luz.
- ✚ **Eficiencia nominal:** es la razón porcentual que sirve para medir la eficiencia productiva de la maquinaria industrial.
- ✚ **Factor de emisión:** promedio de un gran número de mediciones de emisiones de contaminantes atmosféricos que son representativas de un tipo de fuentes de emisión, por ejemplo, el factor de emisión del Sistema Interconectado Eléctrico de Colombia es 0,37 kg de CO₂ /kWh (EIA, 2012); esto quiere decir que por cada 100 kWh consumidos se emiten 37 kg de CO₂.
- ✚ **Gases de efecto invernadero (GEI):** los gases de efecto invernadero son la principal causa del calentamiento global. La mayoría de estos gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), los óxidos nitrosos(NO_x), entre otros, son liberados a la atmosfera por la actividad humana.

- ✚ **Caballo de potencia (HP):** equivalente a 746 Watts (0,746kW) es una unidad de medida de la potencia. La potencia de los aparatos eléctricos como los motores se expresa generalmente en HP.

- ✚ **kWh:** es una unidad utilizada para medir la energía eléctrica consumida o utilizada en determinado periodo de tiempo. Se utiliza comúnmente como una unidad de energía eléctrica en la ingeniería y en aplicaciones comerciales.

- ✚ **Leyes de afinidad:** expresan la relación matemática entre varias variables involucradas en el rendimiento de las maquinas como bombas y ventiladores.

- ✚ **Normas IEC:** normas específicas para motores emitidas por la International Electrotechnical Commission - IEC, organización mundial líder que publica normas internacionales globalmente aceptadas para todas las tecnologías eléctricas, electrónicas y demás relacionadas.

- ✚ **Periodo de retorno simple:** tiempo que tarda una inversión en pagarse basado en el flujo de caja del proyecto. Por ejemplo, el periodo de retorno simple de una inversión de 300 USD con ahorros anuales de 100 USD tiene un periodo de retorno simple de 3 años.

- ✚ **Porcentaje de carga:** es un índice que indica la potencia que entrega el motor cuando se encuentra en operación con relación a la potencia nominal que puede entregar. Así, un motor de potencia nominal 40 HP que trabaja entregando solo 20 HP, estará trabajando a un porcentaje de carga del 50 %.

- ✚ **RPM:** cantidad de vueltas que un cuerpo giratorio completa alrededor de su eje cada sesenta segundos.

- ✚ **Valor ex ante:** valor medido antes del cambio tecnológico en proyectos de eficiencia energética.

- ✚ **Valor ex post:** valor medido después del cambio tecnológico en proyectos de eficiencia energética.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.cochilco.cl/> “Producción de cobre mundial y Chile”
- [2] <https://www.cochilco.cl/> “Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016”
- [3] U.S. geological Survey “Mineral Commodity Summaries 2017”
- [4] www.sernageomin.cl “Anuario de la minería 2015”
- [5] Jeswiet J and Szekeres A. Energy Consumption in Mining Comminution. *Procedia CIRP*. 2016;48:140-145.
- [6] “Autorregulación de la Gran Minería Nacional en materia de Eficiencia Energética, sus motivaciones e implementación”. Desarrollado en el marco del proyecto FONDECYT de iniciación: “Instrumentos para la elaboración de una política energética sustentable”, No. 11100288, 2010-2012. Pilar Moraga Sariego. Alumnos: Daniela Jara y Claudio Rojas.
- [7] Awuah-Offei K. Energy efficiency in mining: a review with emphasis on the role of operators in loading and hauling operations. *Journal of Cleaner Production*. 2016;117:89-97.
- [8] “Competitividad de la minería chilena del cobre” DE/07/15. Comisión Chilena del Cobre.
- [9] https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20110803/asocfile/20110803121111/codelco_informa_10.pdf.
- [10] Política de eficiencia energética Corporativa de Codelco.
- [11] WEG, «Manual de Instalación, Operación y Mantenimiento de Motores Trifásicos,» Febrero 2017. [En línea]. Available: <http://www.weg.net/files/products/WEG-motor-de-induccion-trifasico-de-alta-y-baja-tension-rotor-de-anillos-11171348-manual-espanol.pdf>. [Último acceso: Diciembre 2017].

ANEXO A

PROCEDIMIENTO DE RIESGOS BHP-BILLITON



Previously GLD | 017
(printed copies are uncontrolled)
Version 5.0 (7 March 2016)

Risk Management Our Requirements

Why is this important?

The identification and management of all risks are central to achieving our purpose, strategy and business plans. By understanding and managing risk in a consistent way, we provide greater certainty and confidence to our employees, the communities in which we operate and our shareholders, customers and suppliers.

We tolerate and effectively manage risk to deliver our strategy and business plans as set out in our [risk appetite statement](#).

To achieve consistency, one risk process is required for all risks, with specific requirements for the assessment, control, monitoring and reporting of material risks.

In addition to *Our Requirements for Risk Management*, other GLDs set minimum controls for managing specific risks (e.g. Safety, Aviation, Environment, Major Capital Projects). Businesses, Group Functions and Marketing also set their own requirements to effectively manage their risks.

Who does this apply to?

- Anyone involved in assessing, controlling, monitoring or reporting risks or using this information to make decisions.
- Risk and Control Owners managing material risks.

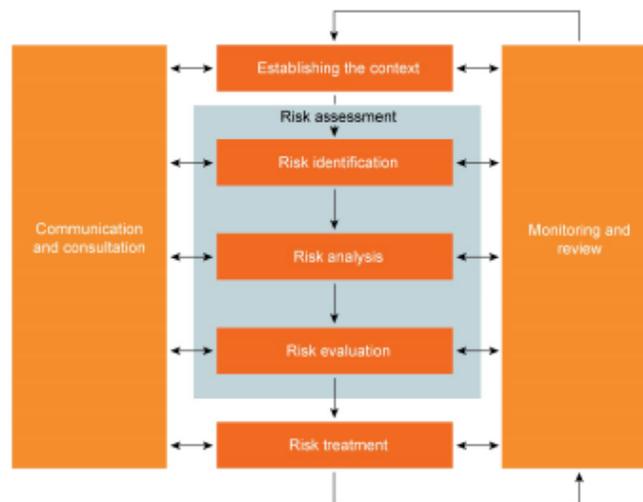
See [Our Requirements for Organisation Design](#) for functional accountabilities.

What approvals are required?

- [Material risk profile and continued tolerance of material risks](#)

Risk management process

- Implement a process for risk management that includes the elements in the diagram below and set minimum requirements for each element.



- ISO 31000 Risk management – principles and guidelines is a useful reference when managing risk.

Communication and consultation

- Make sure people with relevant subject matter and/or functional knowledge and experience are involved through the risk management process.
- Maintain data for [material risks](#) in [1SAP Governance Risk and Compliance](#) (GRC) and data for other risks in a risk register.

Establishing the context

Before doing a risk assessment:

- Identify the scope and objectives of the risk assessment including consideration of:
 - internal factors (e.g. business strategy, business or functional plans, project terms of reference);
 - external factors (e.g. emerging issues, legal requirements).

Risk assessment

When identifying risks:

- Identify risks against the scope and objectives of the risk assessment.

When analysing risks:

- For each identified risk:
 - Use [Appendix 1](#) to assess the [maximum foreseeable loss](#) (MFL) and determine which impact type has the highest [residual risk rating](#) (RRR).
 - Determine causes, existing preventative [controls](#), impacts and existing mitigating [controls](#).
 - Classify the risk as material by using the criteria: [MFL](#) is \geq level 5 impact or [RRR](#) is \geq 90.
- For each [material risk](#):
 - Use [Appendix 1](#) to assess the [MFL](#) for all impact types in the severity table.
 - Record the outcomes of the risk analysis in a 'bow tie'.
 - Identify [critical controls](#), each [critical control](#) must include:
 - a title;
 - an objective, which is a description of the intent to address causes or impacts of the [material risk](#);
 - a performance standard that sets out:
 - design criteria which must be met for the [critical control](#) to meet its objective;
 - operating activities which when implemented will show that the [critical control](#) meets the design criteria;
 - verification activities that check the [critical control](#) is implemented and operates as designed.
 - a manual test plan which describes the steps or tests to check that the [critical control](#) is in place and effective.
 - Follow [Appendix 2](#) to do a [critical control](#) assessment and material risk control assessment (MRCA).

When evaluating risks:

- For each [material risk](#), review the [RRR](#) and the results of the MRCA ([Appendix 2](#)) to determine if the [material risk](#) is tolerable by using the criteria: [RRR](#) \leq 90 and MRCA is 'well controlled'.

Risk treatment

- For each [material risk](#), implement and operate [critical controls](#) as designed.
- If a [material risk](#) is not tolerable ([RRR](#) is \geq 90 and MRCA is not 'well controlled'), implement a remediation plan (e.g. improving an existing [control](#) or creating a new [control](#)) to reduce the residual risk or improve the [controls](#).

Monitoring and review

- For each [material risk](#), verify the effectiveness of [critical controls](#) using the performance standard.
- Review the [material risk](#) profile for completeness and continued tolerance of [material risks](#) and on a biannual basis [get approval](#).

ANEXO B
EQUIPO



Figura N° B.1: Vista general correa.



Figura N° B.2: Vista general alimentación molino SAG.



Figura N° B.3: Vista general acceso a correa.

