



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

**CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE
EFECTO INVERNADERO ASOCIADAS A PROYECTOS DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA
MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SERGIO ALEJANDRO ALMENDRA PÉREZ

**PROFESOR GUÍA:
ALFREDO MUÑOZ RAMOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
NELSON MORALES OSORIO
DIEGO LIZANA ROJAS**

**SANTIAGO DE CHILE
2014**

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TITULO DE: Ingeniero Civil Electricista
POR: Sergio Alejandro Almendra Pérez
FECHA: Mayo 2014
PROFESOR GUÍA: Alfredo Muñoz Ramos**

CONSTRUCCIÓN DE CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADAS A PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

El siguiente trabajo muestra la construcción de las curvas de costo marginal de abatimiento de gases de efecto invernadero (CCMA de GEI) asociadas al área de Molienda de la Planta Concentradora de Sulfuros de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC). El objetivo es determinar el potencial de ahorro de emisiones de CO₂e de Molienda a través de la implementación de proyectos de eficiencia energética detectados.

El procedimiento de construcción de estas curvas se basa en la implementación del Sistema de Gestión de Energía (SGE), basado en la norma ISO 50.001, desarrollada durante el año 2013 por la Superintendencia Eficiencia Energética (SEE). Esto permite obtener un perfil energético detallado por equipo y zona de producción, con el que logra definir una línea base de consumo de electricidad.

El resultado de la auditoría permitió detectar 217 motores eléctricos auxiliares en Molienda, que consumieron un total de energía de 63.9 [GWh] el año 2012. Dentro de estos se encuentran equipos definidos como críticos en consumo, liderados por las bombas de hidrociclones, compresores, bombas de alta presión, lubricación y de sistemas de enfriamiento, y distintas correas transportadoras.

Una vez definida la línea base (año 2012), la construcción de las CCMA se vinculan a tres proyectos de eficiencia energética: reemplazo de motores de inducción de eficiencia estándar (IE1) por motores de eficiencia Premium (IE3), implementación de variadores de frecuencia (VDFs) en los motores de inducción críticos, e implementación conjunta de VDFs y motores IE3 sólo en los motores de inducción críticos en consumo de energía eléctrica y alta variabilidad de carga.

Los resultados muestran que el potencial de ahorro de energía es mucho más beneficioso (energética y económicamente) al llevar a cabo los proyectos de eficiencia energética en motores de determinadas características nominales y operacionales. Sólo implementando estos proyectos, cuyos retornos económicos son positivos para la empresa, se permiten reducir 1.369 toneladas de CO₂e al año, con un beneficio económico de 413.248 [USD].

Dedicado con todo mi cariño y amor para las personas más importantes en mi vida y han sido el pilar fundamental para que yo pueda seguir adelante y no rendirme en alcanzar mis metas.

Papá, mamá y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a todas y cada una de las personas que han hecho posible este trabajo de memoria, ya sea en lo académico como en lo personal, y que han permitido no sólo convertirme hoy en un ingeniero profesional al servicio de mi país, sino que en una persona íntegra para esta sociedad.

En primer lugar agradezco a mi familia: padre, madre, hermano y hermana, ya que son el motivo y pilar fundamental para no rendirme en cumplir mis metas. Todo lo que he logrado ha sido posible gracias a ustedes, y por sobre todo a mis padres, que han entregado su vida para dar, tanto a mí y a mis hermanos, valores fundamentales para enfrentar de mejor manera a la vida.

A continuación quisiera dar gracias a todas las personas que han estado y se mantienen aún en mi vida: abuelos, tíos, primos, amigos y compañeros, ya que siempre recibí su ayuda y apoyo incondicional cuando más lo necesité.

También quisiera agradecer a mi facultad de ingeniería, a mis compañeros y profesores de carrera y fútbol. Además quisiera dar mi gratitud al profesor Alfredo Muñoz Ramos, quien aceptó ser el profesor guía para mi trabajo de memoria y colaboró con su gran conocimiento y experiencia durante todo este tiempo.

Finalmente quisiera agradecer a la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de titulación en esta gran compañía. Se agradece en especial a mis compañeros memoristas y equipo de la Superintendencia Eficiencia Energética por todo el apoyo, compañerismo y buena onda que recibí durante mi estadía y trabajo en Faena Cordillera, Puerto Patache e Iquique.

CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	12
1.1	FUNDAMENTACIÓN.....	12
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	OBJETIVO GENERAL	13
1.2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
1.3	ALCANCES Y RESTRICCIONES.....	14
1.4	METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	15
1.5	ESTRUCTURA DE CAPITULOS	16
2	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y SISTEMAS DE GESTIÓN DE ENERGÍA	18
2.1	EL CAMBIO CLIMÁTICO	18
2.2	TIPOS DE EMISIONES DE GEI.....	19
2.3	NORMA ISO 50.001 Y EL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA DE CMDIC 19	
3	EFICIENCIA ENERGÉTICA VINCULADA A MOTORES ELÉCTRICOS.....	24
3.1	EFICIENCIA ENERGÉTICA	24
3.2	MOTORES ELÉCTRICOS	24
3.2.1	PÉRDIDAS DE EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS	25
3.2.2	MOTORES ESTANDAR, EFICIENTES Y PREMIUM.....	27
3.3	VARIADORES DE FRECUENCIA	29
3.3.1	TIPOS DE CARGA EN MOTORES ELÉCTRICOS	29
3.3.2	PRINCIPIO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA	31
4	CURVAS DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CCMA DE GEI).....	34
4.1	FUNDAMENTO DE LAS CCMA DE GEI.....	34
4.2	METODOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN DE CCMA DE GEI	36
5	ANTECEDENTES ESPECÍFICOS	39
5.1	COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI.....	39
5.2	PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS	40
5.3	SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA EN ÁREA DE MOLIENDA	41

5.4	CONSUMO ENERGÉTICO Y PRODUCCIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES DEL ÁREA DE MOLIENDA.....	42
5.5	FACTOR DE EMISIÓN DE CO ₂ e DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE CMDIC46	
6	LINEA BASE Y PERFIL ENERGÉTICO DE MOLIENDA.....	47
6.1	LINEA BASE DE MOLIENDA.....	47
6.2	PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO DE MOTORES DE EQUIPOS AUXILIARES EN ÁREA DE MOLIENDA	48
6.2.1	PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO DE MOTORES POR TIPO DE EQUIPO O APLICACIÓN EN MOLIENDA	48
6.2.2	PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO POR RANGO DE POTENCIA EN MOLIENDA	51
6.2.3	PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO POR HORAS DE USO ANUAL EN MOLIENDA.....	53
6.2.5	PERFIL DEL CONSUMO ELÉCTRICO VS PRODUCCIÓN	56
6.3	PROYECCIÓN BUSINESS AS USUAL (BAU)	57
7	PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	60
7.1	REEMPLAZO DE MOTORES DE EFICIENCIA ESTANDAR (IE1) POR MOTORES DE EFICIENCIA PREMIUM (IE3).....	60
7.2	IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EQUIPOS DE CONSUMO CRÍTICO Y CARGA VARIABLE	61
7.3	IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y MOTORES IE3 EN EQUIPOS DE CONSUMO CRÍTICO DE MOLIENDA	64
8	EVALUACIÓN TECNICO-ECONÓMICA DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	65
8.1	CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA .	65
8.2	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TECNICO-ECONÓMICA DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA	68
8.2.1	REEMPLAZO DE MOTORES DE EFICIENCIA IE1 POR EFICIENCIA IE3.	68
8.2.2	IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EQUIPOS DE ALTA VARIABILIDAD DE CARGA.....	69
8.2.3	USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN BOMBAS Y CORREAS.....	70
9	ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
9.1	ANALISIS DE PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN	71

9.1.1	ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA.....	72
9.1.2	ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO	73
9.1.3	ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO VS RANGO DE POTENCIA.....	74
9.2	ANÁLISIS DE PROYECTO DE IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN BOMBAS Y CORREAS DE MOLIENDA.....	75
9.2.1	ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA.....	76
9.2.2	ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO	77
9.2.3	ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO VS RANGO DE POTENCIA.....	78
9.3	ANÁLISIS DE IMPLEMENTAR VARIADORES DE FRECUENCIA Y REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN EQUIPOS CRÍTICOS	79
9.4	RESUMEN DE ANÁLISIS DE PROYECTOS	80
10	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA.....	82
10.1	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL CRECIMIENTO DE CONSUMO ELÉCTRICO EN MOLIENDA CON RESPECTO AL BUDGET 2013-2017	85
10.2	SENSIBILIDAD EN EL PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES.....	85
10.3	SENSIBILIDAD EN EL PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES.....	86
10.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD DE MOTORES USANDO VDFs	86
10.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL PRECIO DE LOS EQUIPOS EN LA INDUSTRIA	88
10.6	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELECTRICA DE COLLAHUASI.....	89
10.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL PRECIO INTERNACIONAL DEL DOLAR	91
11	CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE CURVAS DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	94
11.1	CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADO A PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA.....	95
11.2	CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADO A PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA FAVORABLES	98
11.3	PROYECCIÓN DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	102

12	CONCLUSIONES.....	104
13	BIBLIOGRAFÍA.....	106
14	ANEXOS.....	111
14.1	CÁLCULO DE PÉRDIDAS INTERNAS EN MOTORES	111
14.2	CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN.....	112
14.3	CÁLCULO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA	114
14.4	ESQUEMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO DE COBRE COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI.....	118
14.5	LINEAS DE PRODUCCIÓN L1, L2 Y L3 DE PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS DE COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI.....	119
14.5.1	LINEA 1	119
14.5.2	LINEA 2	119
14.5.3	LINEA 3	120
14.6	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA GENERAL 120	
14.6.1	RESULTADO TECNICO-ECONÓMICO DE REEMPLAZO DE TOTALIDAD DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.....	120
14.6.2	RESULTADO TECNICO-ECONÓMICO DE IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS.....	121
14.6.3	RESULTADO TÉCNICO-ECONÓMICO DE REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 E IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS	121
14.7	TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICO- ECONÓMICA GENERAL	122
14.7.1	TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN	122
14.7.2	TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN	125
14.8	RESUMEN DE TOTALIDAD DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE CMDIC 127	
14.9	LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS MOTORIZADOS OBTENIDOS EN AUDITORÍA ENERGÉTICA EN LA ZONA DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.	127
14.10	FACTOR DE CARGA Y SOBREDIMENSIONAMIENTO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN EN BASE A AUDITORÍA ENERGÉTICA 2013	135

FIGURAS

Figura 1: Alcance de Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda de CMDIC	23
Figura 2: Porcentaje de Eficiencia vs Porcentaje de Carga de Motores de Diferente Potencia Nominal.....	26
Figura 3: Curva de Carga Par-Velocidad de Motor en Condiciones de Voltaje y Frecuencia Nominales	29
Figura 4: Esquemático Interno del Variador de Frecuencia	31
Figura 5: Voltaje Inducido Debido a un Flujo Magnético en una Bobina.....	32
Figura 6: Curva de Costo Marginal de Abatimiento de GEI en Molienda y Clasificación de CMDIC, 2013	35
Figura 7: Líneas de Producción de Sulfuros y Óxidos de CMDIC.....	39
Figura 8: Porcentaje de Consumo de Energía Eléctrica en Planta Concentradora, Año 2012	40
Figura 9: Línea Base 2012 de Molienda y Clasificación	47
Figura 10: Perfil de los 64 [GWh] de consumo eléctrico por tipo de equipo en Molienda	49
Figura 11: Cantidad de Motores [%] auxiliares Por Tipo de Equipo en Molienda.....	50
Figura 12: Energía Consumida [%] Por Motores Auxiliares, Por Rango de Potencia, en Molienda de CMDIC (2012)	51
Figura 13: Cantidad de Motores Auxiliares [%] por Rango de Potencia en Molienda de CMDIC.....	52
Figura 14: Perfil de Consumo Energético por Horas de Uso en Molienda.....	53
Figura 15: Cantidad Equipos Auxiliares [%], por Rango de Horas de Uso Anual, en Molienda, durante el 2012.....	54
Figura 16: Pareto de Consumo de Energía Eléctrica de Molienda y Clasificación, año 2012	55
Figura 17: Consumo eléctrico y producción de Molienda y Clasificación 2012	56
Figura 18: Eficiencia de Producción de Molienda y Clasificación, 2012	57
Figura 19: Proyección BAU de emisiones de CO ₂ e - Molienda y Clasificación 2013-2017	58
Figura 20: Proyección de CO ₂ e por Material procesado 2013-2017, Molienda y Clasificación.....	59
Figura 21: Variabilidad de Carga de Correa de Alimentación L1, Para Cuatro Días de Octubre 2013, en Molienda de CMDIC	61
Figura 22: Variabilidad de Carga de Bomba de Hidrociclón 1 L1, Para Cuatro Días de Octubre 2013, en Molienda de CMDIC	63
Figura 23: Crecimiento del Consumo Eléctrico de Molienda para 2013-2017	83
Figura 24: Crecimiento del Costo Marginal del SING en la Barra Crucero 220kV	84
Figura 25: Crecimiento del Precio del Dolar [\$/USD] Utilizado por el CDEC-SING	85

Figura 26: Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero Asociado a Totalidad de Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda y Clasificación de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia.....	96
Figura 27: Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero Asociado a Proyectos de Eficiencia Energética Con Retornos Económicos Positivos en Molienda y Clasificación de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia.....	99
Figura 28: Comparación de Emisiones de Toneladas de CO ₂ e de Implementación de Proyectos de EE vs Proyección BAU en Molienda de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia.	102
Figura 29: Esquema General de Proceso de Producción de Concentrado de Cobre - Línea Sulfuros	118
Figura 30: Esquema de Línea de Producción L1 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS.....	119
Figura 31: Esquema de Línea de Producción L2 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS.....	119
Figura 32: Esquema de Línea de Producción L3 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS.....	120

TABLAS

Tabla 1: Contribución relativa de los Gases de Efecto Invernadero	18
Tabla 2: Tabla de equivalencia de GEI a CO ₂ e	19
Tabla 3: Eficiencias de motores según norma IEC 60034-30 (2008)	28
Tabla 4: Porcentaje de ahorro energético en equipos utilizando VDFs.....	33
Tabla 5: Datos Económicos para el futuro análisis	34
Tabla 6: Perfil Energético de Equipos con Motores de Inducción, por tipo de Equipo.....	42
Tabla 7: Perfil Energético de Equipos con Motores de Inducción, por Rango de Potencia [kW]	42
Tabla 8: Perfil Energético por Horas de Uso Anual de los Equipos con Motor de Inducción [hrs]	43
Tabla 9: Equipos de Motores de Inducción Críticos del 2012 de Molienda y Clasificación, CMDIC	43
Tabla 10: Material procesado y producido en Molienda, 2012.....	44
Tabla 11: Consumo de energía eléctrica de Molienda por motores de equipos auxiliares de molinos, 2012.....	45
Tabla 12: Factores de Emisión de GEI por unidad de energía consumida [CO ₂ e/MWh] en el SING 2012.....	46
Tabla 13: Proyección de Material Procesado y Consumo Eléctrico Equipos Auxiliares de Molienda 2013-2017.....	58
Tabla 14: Proyección de Emisión Toneladas CO ₂ e Emitido en Molienda por Equipos Auxiliares de Molienda.....	58
Tabla 15: Listado de VDF en zona de Molienda y Clasificación.....	62

Tabla 16: Datos Económicos para el futuro análisis	65
Tabla 17: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Reemplazo de Motores de Eficiencia IE1 por IE3.....	68
Tabla 18: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Implementación de VDFs en Equipos Críticos	69
Tabla 19: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Reemplazo de Motores de Eficiencia IE1 por IE3 e Implementación de VDFs en Equipos Críticos de Molienda y Clasificación	70
Tabla 20: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por rango de potencia y horas de uso.....	72
Tabla 21: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por horas de uso y tipo de equipo.....	73
Tabla 22: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por rango de potencia y tipo de equipo.....	74
Tabla 23: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por rango de potencia y horas de uso.....	76
Tabla 24: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por horas de uso y tipo de equipo.....	77
Tabla 25: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por tipo de equipo y rango de potencia.....	78
Tabla 26: Resumen de características de equipos a los que se recomienda cambiar el motor de eficiencia IE3 y/o implementar un VDF	80
Tabla 27: Viabilidad de los proyectos dependiendo de equipos considerados en cada uno de ellos.....	81
Tabla 28: Crecimiento Anual del Consumo de Energía Eléctrica en Molienda de CMDIC proyectado para los años 2013-2017	82
Tabla 29: Sensibilidad de Evaluación Técnico-Económica de Proyecto de Implementación de VDFs en equipos críticos por Variación en Reducción de Velocidad	87
Tabla 30: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación del Precio de los Equipos en las Industria	88
Tabla 31: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación de Costo de Energía Eléctrica de CMDIC.....	90
Tabla 32: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación del Precio del Dólar Internacional.....	92
Tabla 33: Resumen de Costo de Abatimiento, Potencial de Abatimiento y Costo Anual de Totalidad de Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda, CMDIC	94
Tabla 34: Costo de Abatimiento, Potencial de Abatimiento y Costo Anual de Proyectos de Eficiencia Energética Con Retornos Económicos Positivos en Molienda, CMDIC	95
Tabla 35: Comparación entre Costo de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero y Tasa Interna de Retorno, Para Proyectos de EE en Molienda y Clasificación de CMDIC	97

Tabla 36: Pérdidas para motores NEMA-B bajo 1 HP.....	111
Tabla 37: Pérdidas para motores NEMA-B entre 25 y 250 HP.....	112
Tabla 38: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Reemplazo de Motores, considerando el total de motores	120
Tabla 39: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Instalación de VDFs, considerando el total de motores evaluados.....	121
Tabla 40: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Reemplazo de Motores e Instalación de VDFs, considerando el total de motores evaluados.....	121
Tabla 41: Análisis Completo por Horas de Uso vs Rango de Potencia de Reemplazo de Motores en Molienda.....	122
Tabla 42: Análisis Completo por Horas de Uso vs Tipo de Equipo de Reemplazo de Motores en Molienda.....	123
Tabla 43: Análisis Completo por Tipo de Equipo vs Rango de Potencia de Reemplazo de Motores en Molienda	124
Tabla 44: Análisis Completo por Horas de Uso vs Rango de Potencia en proyecto Instalación de VDFs en Molienda	125
Tabla 45: Análisis Completo por Horas de Uso vs Tipo de Equipos en proyecto Instalación de VDFs en Molienda	126
Tabla 46: Análisis Completo por Tipo de Equipos vs Rango de Potencia en proyecto Instalación de VDFs en Molienda	126
Tabla 47: Resumen Total de Reemplazo de Motores y/o Instalación de VDFs en Molienda y Clasificación	127
Tabla 48: Levantamiento de Motores en Molienda y Clasificación de CMDIC, en base al año 2012.	127
Tabla 49: Factor de Carga, por Mes, en Molienda de CMDIC	135
Tabla 50: Sobredimensionamiento General de Molienda Mensual 2012.....	135

1 INTRODUCCIÓN

1.1 FUNDAMENTACIÓN

Hoy en día el panorama mundial respecto al consumo de energía mantiene en constante preocupación a la comunidad internacional. Esto se debe principalmente al sostenido aumento de la demanda energética durante las últimas décadas, que ha incrementado considerablemente la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) a la atmósfera, el que ha sido aportado principalmente por el crecimiento del sector industrial a nivel global.

Es por ello que la comunidad internacional y diversas organizaciones mundiales han planteado, en diversas ocasiones, compromisos y medidas para atenuar el excesivo consumo de energía en los principales sectores industrializados. Estas medidas implican, entre otros aspectos, fomentar e implementar conjuntamente proyectos de mejora de eficiencia energética y sistemas de gestión del uso y consumo de la energía en sus procesos productivos.

Es así como, en el año 2011, la Organización Internacional de Normalización (ISO de acuerdo a sus siglas en inglés) aprobó la norma ISO 50.001 con el fin de fijar y estandarizar los requisitos para que las diferentes empresas puedan implementar un Sistema de Gestión de Energía (SGE) que busque alinear esfuerzos y así mejorar la utilización y eficiencia de la energía en sus procesos productivos.

Es por ello que la Superintendencia Eficiencia Energética, perteneciente a la Vicepresidencia de Sustentabilidad de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), ha definido como uno de sus objetivos implementar el Sistema de Gestión de Energía basado en la norma ISO 50.001 en las diversas áreas que componen la compañía.

Actualmente la Superintendencia Eficiencia Energética ha implementado este Sistema de Gestión de Energía en las áreas de Lixiviación (2012) y Puerto Patache (2013), y se ha propuesto el objetivo de implementarlo para el año 2013-2014 en la principal área de consumo de energía eléctrica de la compañía: la Planta Concentradora de Sulfuros.

Sin embargo, dado el tamaño y la cantidad de equipos que componen la planta, se ha decidido comenzar por el estudio de consumo de energía por la sub-área de Molienda y Clasificación, principal área de consumo eléctrico de la planta y la compañía.

Tomando en consideración lo anterior, el siguiente trabajo de memoria busca sentar una base para la implementación del Sistema de Gestión de Energía, a través de la construcción de curvas de costo marginal de abatimiento de gases de efecto

invernadero (CCMA de GEI) asociado a proyectos de eficiencia energética, mediante un estudio y creación de una línea base y perfil de consumo energético en la zona de Molienda y Clasificación de la CMDIC.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este trabajo de título es construir las Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero (CCMA de GEI) asociados a proyectos de eficiencia energética, que permitan reducir el consumo de energía y la Huella de Carbono asociado a la producción de concentrado de cobre del área de Molienda y Clasificación de la Planta Concentradora de Sulfuros, y además, sentar un fundamento sólido para la implementación del Sistema de Gestión de Energía, en la planta, basado en la norma ISO 50.001.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para poder cumplir el objetivo general, se han fijado los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un levantamiento de la totalidad de los equipos consumidores de energía eléctrica de la zona de Molienda y Clasificación de CMDIC. Así, se debe obtener un perfil de consumo energético detallado del área y de cada uno de los equipos identificados.
- Construir un perfil y línea base de consumo energético para un año determinado en la zona de Molienda y Clasificación, con tal de obtener un punto de referencia que permita comparar los distintos escenarios que se pretendan evaluar.
- Identificar oportunidades de mejora en el ámbito de la eficiencia energética. De esta manera, se busca poder estudiar alternativas que permitan proponer, y levantar proyectos de eficiencia energética en Molienda y Clasificación.
- Realizar el estudio y análisis técnico-económicos de los proyectos de eficiencia energética identificados, y así construir sus respectivas Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de emisión de Gases de Efecto Invernadero.

1.3 ALCANCES Y RESTRICCIONES

Para este estudio es desarrollado desde la Superintendencia de Eficiencia Energética de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, y tiene como objetivo (entre otros) sentar la base de la implementación del Sistema de Gestión de Energía en la Planta Concentradora de Sulfuros. Esto permite, previo a una revisión energética, identificar, proponer y levantar proyectos que permitan fomentar la eficiencia energética, disminuir el consumo de energía y reducir el aporte de CO₂ de la empresa al medio ambiente.

Para el siguiente estudio, sólo se considerarán los consumos de carácter eléctrico (Alcance II¹), y no de otro tipo, ya que la electricidad representa prácticamente la totalidad del consumo energético de la Planta Concentradora (98.6% [11]), a diferencia de otras áreas de la empresa que el mayor consumo energético es a base de combustible, como lo es Mina Rosario o Mina Ujina (87.8% y 74.7% corresponde a consumo energético a base de combustible, respectivamente). Además, para poder identificar proyectos de eficiencia energética de carácter no eléctrico, se deben tomar acciones en conjunto con grupos contratistas y proveedores de CMDIC.

El área de estudio contempla la zona de Molienda y Clasificación de la Planta Concentradora de Sulfuros de CMDIC. Esta considera todos los equipos de consumo eléctrico que participan en el proceso de reducción y clasificación de concentrado de cobre, esto es, que se encuentran entre las correas transportadoras que trasladan el material proveniente desde el Stock Pile de Ujina, y los hidrociclones que alimentan las celdas del área de Flotación.

En este sector se pudo identificar diversos equipos motorizados, como bombas, alimentadores, correas transportadoras, molinos, sistemas hidráulicos, compresores, harneros, cintas magnéticas y motores varios. No se discriminó por nivel de tensión, corriente, potencia o ningún otro parámetro, sino que se realizó un catastro completo de todos los equipos consumidores de energía eléctrica que se utilizan en los diferentes procesos involucrados. Se debe mencionar que la implementación de los proyectos de eficiencia energética no consideran los motores principales de los molinos SAG y BOLA, debido a su gran tamaño y criticidad en el proceso de producción de concentrado de cobre, es decir, los molinos forman parte del levantamiento de equipos de la planta, pero no en los proyectos de eficiencia energética a evaluar. Tampoco se considera motores eléctricos por sobre los 500 [kW], ya que su tamaño implica desde ya un alto nivel de eficiencia constructiva.

¹ Véase la definición de Alcance II en punto 2.2

Por otra parte, este análisis no consideró la iluminación de las oficinas y otros espacios, sino que sólo se concentró el trabajo en los procesos productivos, dado que representan el mayor porcentaje de gasto energético eléctrico de la planta.

1.4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

La metodología de trabajo para realizar el estudio propuesto y cumplir los objetivos, se basó en la siguiente estructura:

1. Realizar un estudio del proceso de producción de concentrado de cobre y principales equipos involucrados en la zona de Molienda y Clasificación.
2. Hacer un levantamiento de los equipos de Molienda y Clasificación, a través de una auditoría energética interna, para determinar las características de uso y el consumo energético mensual de cada uno de estos equipos durante el año 2012.
3. Identificar un número de equipos motorizados críticos que correspondan a la mayor parte de toda la energía consumida en Molienda y Clasificación (Pareto de Energía).
4. Evaluar cuantitativamente el uso de la energía eléctrica de los equipos identificados anteriormente, a través de la realización de un perfil de consumo eléctrico de la planta.
5. Identificar las oportunidades de mejora de eficiencia energética a partir del perfil energético creado, que permitan proponer proyectos de mejora de eficiencia energética.
6. Evaluar, técnica y económicamente, los proyectos de eficiencia energética identificados en la zona de Molienda y Clasificación. También se debe hacer un análisis de sensibilidad del resultado obtenido.
7. Determinar la reducción de emisiones de CO₂e que se dejan de emitir al implementar los proyectos, así como su costo de abatimiento de CO₂e y costo total anual asociado.
8. Construir las Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero y analizar los resultados obtenidos.

1.5 ESTRUCTURA DE CAPITULOS

El siguiente trabajo de memoria se estructura de la siguiente forma:

1. Introducción

Se introduce al trabajo realizado, dando a conocer su fundamento y objetivos. También se detalla el alcance, restricciones y metodologías adquiridas para cumplir con estos objetivos.

2. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y Sistemas de Gestión de Energía

Se pone en contexto al lector sobre los Gases de Efecto Invernadero y el Sistema de Gestión de Energía que desea implementar la Superintendencia Eficiencia Energética de la CMDIC.

3. Eficiencia Energética Vinculada a Motores Eléctricos

Se detalla el fundamento teórico, identificando al motor como equipo eléctrico fundamental que define la eficiencia energética en la minería.

4. Construcción de Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero

Se define las curvas de costo marginal de abatimiento y su metodología de construcción, las que permiten evaluar proyectos de eficiencia energética.

5. Antecedentes Específicos

Se presenta el estado de consumo de energía eléctrica de la Planta Concentradora, base a la auditoría energética realizada el año 2013.

6. Línea Base y Perfil de Molienda y Clasificación

Se define la Línea Base, detallando sus características a través de un perfil del consumo eléctrico del área de Molienda y Clasificación.

7. Proyectos de Eficiencia Energética

De describen los proyectos de mejora escogidos en la zona de Molienda y Clasificación que serán evaluados.

8. Evaluación Económica de Proyectos de Eficiencia Energética

Se define las consideraciones, escenarios y casos a analizar en la evaluación económica, para finalmente mostrar los resultados de cada proyecto de eficiencia energética.

9. Análisis de Resultados

Se hace el análisis correspondiente de los resultados mostrados en el capítulo anterior.

10. Análisis de Sensibilidad de Resultados

S hace un análisis de sensibilidad de la evaluación técnico-económica ante la variación de distintos parámetros.

11. Construcción y Análisis de las CCMA de GEI de Proyectos de Eficiencia Energética

Se construye y analiza las CCMA de GEI de los proyecto de eficiencia energética.

12. Conclusiones

Se analizan las conclusiones del trabajo expuesto.

13. Bibliografía

Se presenta la base bibliográfica del trabajo de memoria.

14. Anexos

Se detalla el cálculo de índices económicos y otras variables utilizadas en capítulos anteriores. Además se muestran planos y esquemas utilizados como referencia.

2 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y SISTEMAS DE GESTIÓN DE ENERGÍA

2.1 EL CAMBIO CLIMÁTICO

El Panel Intergubernamental en Cambio Climático (IPCC, *Intergovernmental Panel on Climate Change*) define el **Efecto Invernadero** como el fenómeno natural de la Tierra que retiene la energía emitida por el sol (en forma de radiación solar) en la atmósfera debido a la presencia de ciertos gases que se encuentran en ésta, llamados **Gases de Efecto Invernadero (GEI)**. El fenómeno anterior se produce debido a que los GEI poseen una alta capacidad de absorber energía reflejada de la Tierra y retenerla en esta en forma de energía térmica.

La fuente de los GEI puede ser tanto natural (emitida por procesos naturales del planeta) como de origen humano (teoría antropogénica). El primero de estos es quién permite buenas condiciones para la formación de vida, sin embargo los que son aportados por el hombre (mayormente gases industriales) generan un exceso de GEI que hacen aumentar aún más la temperatura global del planeta, produciendo el llamado **Calentamiento Global**.

Los principales GEI que producen este efecto, con el nivel de porcentaje que aportan al Efecto Invernadero natural y Calentamiento Global, se pueden apreciar en la Tabla 1.

Tabla 1: Contribución relativa de los Gases de Efecto Invernadero

Contribución relativa de los GEI			
TIPO DE GAS	Fórmula	% Efecto Invernadero Natural	% de Calentamiento Global
Vapor de Agua	H ₂ O (g)	88.9	0.0
Dióxido de Carbono	CO ₂ (g)	7.5	65
Humos Negros	C (s)	0.2	0
Metano	CH ₄ (g)	0.5	20
Óxido Nitroso	N ₂ O (g)	1.5	5
CFC's	CFCI ₃ y CF ₂ Cl ₂ (g)	0.0	10
Ozono troposférico	O ₃ (g)	1.1	0
Otros	Otros	0.3	0.1

Fuente: Climate Change 1995, IPCC, 1996 [18]

Debido a la mayor contribución del CO₂ en el Calentamiento Global, las emisiones de los otros gases se expresan en función de CO₂ equivalente (CO₂e). Por lo tanto se puede medir la contribución de GEI de una empresa o proceso por medio de la medición de CO₂e emitido. La Tabla 2 muestra la equivalencia de los gases de efecto invernadero más relevantes.

Tabla 2: Tabla de equivalencia de GEI a CO2e

Gases de Efecto Invernadero	Composición Química	Equivalencia en CO2e
Dióxido de Carbono	CO2	1
Metano	CH4	21
Oxido Nitroso	N2O	310
Hidrofluorocarbonos	HFC	740
Perfluorocarbonos	PFC	1300
Hexafluoruro de Azufre	SF6	23900

Fuente: Climate Change 1995, IPCC, 1996 [18]

El IPCC definió así el término **Cambio Climático** como una “variación del estado del clima identificable (por ejemplo, mediante pruebas estadísticas) en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante largos períodos de tiempo, generalmente en decenios o períodos más largos” [20].

2.2 TIPOS DE EMISIONES DE GEI

Las emisiones de GEI se pueden clasificar en tres tipos, según como se midan, de Alcance I, II y III [17]:

- **Emisiones directas o de Alcance I:**
Emisiones de GEI resultantes de actividades directamente relacionadas con la quema de combustibles, como leña, diesel, petróleo o gas natural.
- **Emisiones indirectas o de Alcance II:**
Emisiones de GEI resultantes de la generación de energía (vapor, calor o electricidad) fuera de los límites de la compañía. Un ejemplo es la emisión por concepto de consumo de energía eléctrica proveniente del SIC o SING.
- **Otras emisiones indirectas o de Alcance III:**
Emisiones de GEI que se vinculan a actividades de terceros, tales como empresas que presten servicio de transporte, producción de insumos estratégicos u otras empresas con servicios contractuales.

De esos tipos de emisiones, son las de alcance I y II las que aportan en mayor cantidad al total de gases de efecto invernadero. Es por ello que para contribuir a la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero por parte de una empresa, es fundamental tener un mecanismo de gestión del consumo de energía eléctrica y promover proyectos de eficiencia energética que permitan reducir el consumo de energía.

2.3 NORMA ISO 50.001 Y EL SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA DE CMDIC

La Organización Internacional de Normalización (ISO) aprobó durante el año 2011 la norma ISO 50.001, en donde se establecen los requisitos para implementar un sistema de gestión de energía en cualquier tipo de empresa.

De este modo, la norma ISO 50.001 explicita los requerimientos para implementar y mantener en el tiempo un sistema de gestión del consumo de energía de tal manera que exista una alineación sistemática entre el mejoramiento del desempeño energético y la correcta utilización de la energía. Es por ello que esta norma se basa en una metodología caracterizada por 4 puntos: Planificar, Hacer, Chequear y Actuar:

- **Planificar:** Definir un plan estratégico acorde a una planificación de acciones concretas y con objetivos claros para mejorar el uso de la energía y la política energética de la empresa.
- **Hacer:** Implementar diversas acciones, establecidas por la empresa en el proceso de planificación, que permitan cumplir los objetivos definidos
- **Chequear:** Realizar un constante chequeo de los resultados obtenidos con la implementación del programa, identificando el nivel de cumplimiento de los objetivos y la planificación original. Así se puede valorar los resultados reales e identificar falencias en la planificación original
- **Actuar:** Los resultados del chequeo y monitoreo se analizan, con el objetivo de tomar acciones de corrección que permitan mejorar continuamente el sistema de gestión

La Superintendencia de Eficiencia Energética (SEE) de CMDIC, perteneciente a la Vicepresidencia de Sustentabilidad, se ha planteado el objetivo de implementar el Sistema de Gestión de Energía (SGE) basado en la norma ISO 50.001 en toda la compañía, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de la compañía y reducir la Huella de Carbono asociado a la producción de sus principales productos (concentrado de cobre, cátodos de cobre y concentrado de molibdeno).

La estructura de este Sistema de Gestión de Energía, definido en la Superintendencia Eficiencia Energética, se basa en la siguiente estructura:

1. Realización de una Revisión Energética

En primer lugar se hace un levantamiento de todos los equipos de consumo energético en cada área de la compañía, identificando su potencia nominal de estos equipos, número de identificación o TAG, y área la cual pertenece.

2. Determinación de Consumo Energético

Se estima el consumo de energía de cada equipo levantado en la revisión energética, a través de su potencia nominal y medición de horas de uso de los equipos (este último a través de la instalación de horómetros). En el caso de no

poder instalar un horómetro, se estima las horas de uso en base a uso promedio diario, horómetros de equipos similares, o estimaciones de operadores o mantenedores del área.

3. Ajuste y Línea Base

Una vez determinado el consumo de energía de cada equipo en el área definida, se hace un ajuste del consumo de acuerdo a la medición de consumo energético que registra el medidor principal, ubicado en la sala eléctrica de cada área. De este modo, y teniendo el consumo de cada área, se define una línea base o año que será el punto de comparación para posibles implementaciones de mejora de eficiencia energética.

4. Monitoreo de Eficiencia Energética

A través de la línea base y el consumo energético de cada área, se monitorea el consumo de energía por unidad de material tratado y/o procesado (dependiendo del área) a través de indicadores de desempeño energético (IDE's) emitidos mensualmente a través del Reporte del Sistema de Gestión de Energía. De este modo se deja a cargo de este nuevo indicador al jefe directo del área, de modo de verificar que el consumo de energía por unidad de material tratado no sobrepase los límites máximos (definidos previamente) y, además, que cumpla con una meta acordada previamente con la SEE.

5. Identificación y Evaluación de Mejoras de Eficiencia Energética

Finalmente se identifican alternativas u oportunidades que impliquen mejorar la eficiencia energética de algún proceso o subproceso del área estudiada. Esto se hace a través de una evaluación técnico-económica de cada proyecto propuesto y la construcción de Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero (CCMA de GEI).

Actualmente la Superintendencia Eficiencia Energética ha implementado un Sistema de Gestión de Energía (SGE) en dos áreas de la compañía: Lixiviación (año 2012) y Puerto Patache (2013). Este último fue certificado por una empresa internacional externa durante el año 2013.

Para el año 2013-2014 se ha definido implementar el SGE en la Planta Concentradora de Sulfuros, lugar en que el 98% del consumo de energía se asocia al consumo de energía eléctrica, principalmente debido al uso de motores eléctricos dado que no existen procesos de electro-obtención, ni camiones en base a la electricidad de la red eléctrica, ni otros consumos de electricidad relevantes. Luego, para el 2015 se buscará llevar este SGE a la zona de las minas (Rosario y Ujina).

Dado el gran tamaño de la Planta Concentradora, esta se separa en las siguientes áreas para la implementación del SGE: Chancado y Correas, Pebbles, Molienda, Flotación, Tranque Relaves, Espesado y Acumulación, y Planta de Cal y Reactivos. Como Molienda representa el mayor porcentaje del consumo energético de la planta, se decidió comenzar la implementación del SGE en esta sub-área. El nombre oficial de esta área, a nivel interno de la compañía y en la Planta Concentradora de Sulfuros es “Molienda y Clasificación”, por lo que a partir de este momento, se hablará en este trabajo, de igual manera, los términos de “Molienda” como “Molienda y Clasificación”.

Es por ello que éste trabajo de título lleva por nombre *“Construcción de Curvas de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero Asociados a Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda y Clasificación de CMDIC”*, ya que de esta manera no sólo permite identificar y evaluar proyectos de eficiencia energética con sus respectivas curvas de abatimiento, sino que sienta base para la implementación del Sistema de Gestión de Energía en la principal área de consumo energético de la compañía.

La evaluación de los proyectos de eficiencia energética considera todos los motores eléctricos de inducción de Molienda, es decir, se descarta considerar los motores síncronos de los Molinos (SAG y BOLA). Además no se consideran los motores eléctricos por sobre los 500 [kW] de potencia nominal, ya que estos, dado su tamaño, ya se consideran eficientes con respecto al rendimiento de consumo de energía eléctrica. El alcance, de acuerdo a la potencia nominal de los motores, se ilustra en la Figura 1, en donde se aprecia el Pareto de potencia nominal de los primeros 20 motores eléctricos de Molienda.

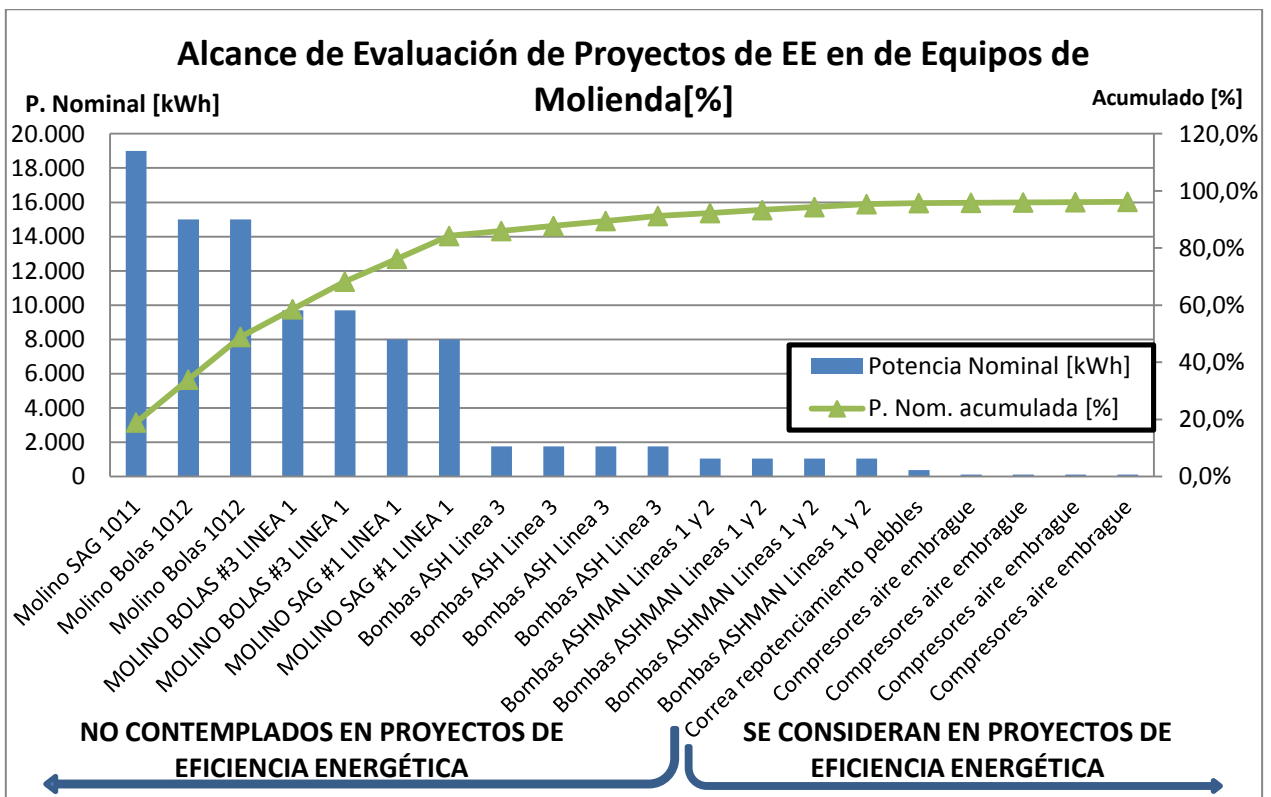


Figura 1: Alcance de Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda de CMDIC
Fuente: Elaboración Propia

Se puede adelantar que de los proyectos de eficiencia energética identificados en el área de Molienda, uno de estos es el reemplazo de motores eléctricos de inducción de Molienda clasificados como ineficientes (definidos como IE1 por la norma IEC 60034-30 del año 2008) por motores de eficiencia Premium (IE3 definidos por la misma norma). Los demás proyectos a evaluar son la implementación de variadores de frecuencia (VDF) en los equipos críticos en consumo energético de molienda y clasificación, principalmente motores de bombas auxiliares a los molinos.

Es por ello que, en el capítulo siguiente, se caracteriza la eficiencia de los motores de inducción en base a la norma IEC 60034-30 (2008). Además se identifican los tipos de pérdidas de eficiencia energética, funcionamiento y ahorro de energía mediante variadores de frecuencia en función de distintos tipos de carga acoplada en el motor de inducción correspondiente². Adicionalmente se muestra la definición de las Curvas de Costo Marginal de Abatimiento y su metodología de construcción.

² Definición de tipos de carga en capítulo 3.3.1

3 EFICIENCIA ENERGÉTICA VINCULADA A MOTORES ELÉCTRICOS

3.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA

Se entiende por eficiencia energética a los mecanismos y procedimientos destinados a disminuir la cantidad de energía utilizada en cierto proceso manteniendo el nivel de material tratado o producido, o en su defecto, aumentar la cantidad del material tratado manteniendo el consumo energético del proceso.

De este modo, la eficiencia energética se puede desarrollar mediante la implementación de nuevas herramientas tecnológicas, cambios de comportamiento de personal, mejoramiento en procedimientos operativos de procesos productivos, prevención de fallas, entre otros, que permitan de esta manera reducir el consumo energético sin afectar el nivel productivo del sector en que se aplica la medida de eficiencia energética.

Sin embargo es importante mencionar que la implementación de estos mecanismos de mejora de la eficiencia energética implica inversiones y otros costos, que incluso podrían superar los beneficios económicos percibidos por el ahorro de energía. Dentro de los costos se encuentran los de los equipos, los de los materiales, costos de personal (horas-hombre), costos de transporte, entre otros. Es por ello que es fundamental hacer una evaluación económica para poder identificar qué mecanismos de mejora de eficiencia energética son más rentables y atractivos para las empresas, y por ende, su factibilidad de llevarlos a cabo.

3.2 MOTORES ELÉCTRICOS

El motor eléctrico es un equipo que permite convertir la energía eléctrica que se le entrega (de la red) en energía mecánica. Su eficiencia o rendimiento (η) viene definida por el cociente entre la energía (o potencia) eléctrica y la mecánica, así, la diferencia de estas define las pérdidas internas del motor.

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elect}} = \frac{P_{elect} - P_{perd}}{P_{elec}}$$

Es este tipo de equipo, el motor eléctrico, la principal fuente de consumo eléctrico del sector industrial nacional, abarcando cerca del 70% [40] del consumo de electricidad de la industria y minería. Por tanto, gestionar el mejoramiento la eficiencia de ellos implica una reducción directa en el consumo eléctrico y costos operacionales de una planta o proceso industrial. Para el caso de la Planta Concentradora de CMDIC, el consumo de energía eléctrica asociados a motores eléctricos representa cerca del 98%³ del total del

³ Para mayor detalle, ver documento “Reporte de Huella de Carbono de CMDIC 2012” [11]

consumo de energía, debido a que esta área se procesa exclusivamente el concentrado de cobre de la compañía sólo con motores eléctricos, es decir, en ella no se encuentran procesos tales como electro-refinación, tratado de cátodos de cobre ni movimiento de camiones u otros vehículos de transporte de mineral que usen energéticos como diesel o gasolina. La planta concentradora trabaja exclusivamente con motores eléctricos de bombas, compresores, molinos, correas transportadoras, tecles, sistemas hidráulicos, electroimanes, etc.

3.2.1 PÉRDIDAS DE EFICIENCIA EN MOTORES ELÉCTRICOS

Las pérdidas de energía a los cuales está sometido un motor eléctrico, y que reducen su eficiencia energética, son las siguientes:

3.2.1.1 PÉRDIDAS INTERNAS EN MOTORES ELÉCTRICOS

En los motores eléctricos, dadas sus características constructivas y el tipo de material de sus partes internas, parte de la energía eléctrica entregada se pierde y disipa en forma de calor o por efectos magnéticos. De este modo, las pérdidas se pueden diferenciar según su naturaleza en distintos tipos⁴.

- **Pérdidas en los conductores:**

Las principales pérdidas referidas a la disipación de calor en los cableados se producen en la zona de los conductores del bobinado del estator y rotor (el que a veces en lugar de bobinado es construido con barras conductoras), y son de la forma I^2R (proporcional al cuadrado de la corriente y a la resistencia del conductor).

- **Pérdidas magnéticas en el núcleo**

Las pérdidas que se presentan en el núcleo magnético se pueden clasificar en dos tipos: pérdidas por el efecto de histéresis, y pérdidas por las llamadas corrientes eléctricas de Eddy o Foucault que circulan por materiales distintos de los conductores eléctricos.

Las **pérdidas por histéresis** se deben al efecto de remanencia de los materiales magnéticos al ser influenciados por un flujo magnético que cambia de dirección constantemente. Las **pérdidas por corrientes de Eddy**, o corrientes parásitas, se deben a las corrientes eléctricas inducidas por los flujos magnéticos, corrientes que circulan por las láminas del núcleo de estator y rotor.

- **Pérdidas por fricción y ventilación**

⁴ Mayor detalle de cálculo en Anexo 14.1

Estas pérdidas se producen por el roce en los rodamientos y la resistencia que pone el aire al giro de los elementos rotatorios del motor, como ventiladores, rotores y otros.

- **Pérdidas adicionales en carga**

Estas pérdidas se les atribuyen a otras pérdidas distintas a las mencionadas anteriormente que se vinculan con pérdidas en el hierro de alta frecuencia (superior a la frecuencia de la red), corrientes inducidas en la carcasa del motor, torques oscilatorios, por ejemplo.

3.2.1.2 PÉRDIDAS POR OPERACIÓN DE CARGA NO NOMINAL

Todo motor eléctrico es construido para funcionar en un punto cercano a sus valores nominales, ya sea voltaje, corriente, temperatura, frecuencia, etc. Al operar fuera del rango de carga nominal su eficiencia disminuye, tal como lo muestra la figura siguiente.

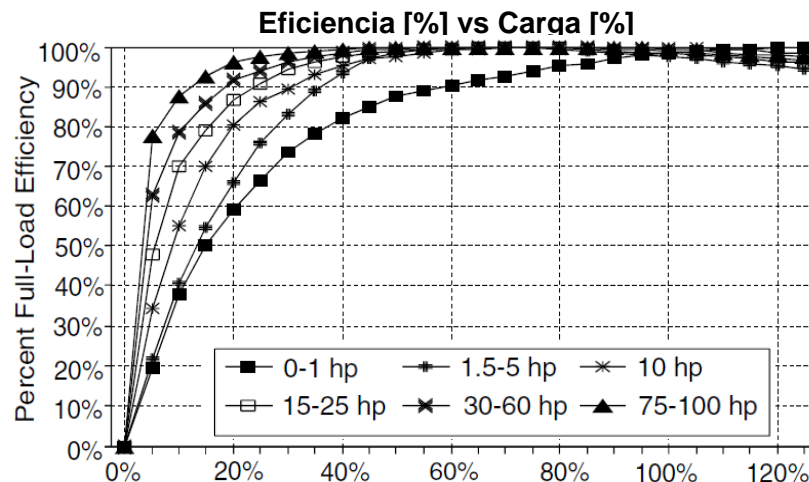


Figura 2: Porcentaje de Eficiencia vs Porcentaje de Carga de Motores de Diferente Potencia Nominal
Fuente: Quantum-Controls⁵

Por ejemplo, se aprecia que si un motor menor a 1 HP opera a un 50% de su carga nominal, cerca del 11% de la energía suministrada no está siendo aprovechada. Por el contrario, un motor de 10 HP que opera al 50% de carga no trabaja a una eficiencia demasiado diferente a la nominal (cerca de 2% de pérdidas). Sin embargo, dado que un motor de mayor potencia consume una mayor cantidad de energía (asumiendo que tiene un alto funcionamiento durante el año), esta pequeña disminución de la eficiencia puede significar una pérdida considerable de energía. En efecto, un motor de 10 HP que funciona al 50% de carga por 7.000 horas al año implican cerca de 1.050 [W] de

⁵ <http://www.quantum-controls.co.uk/blog/tech-zone/motors-tech-zone/what-design-should-i-consider-when-choosing-a-new-motor/>

pérdidas de energía (2% de pérdidas⁶), mayor a las pérdidas del motor de 1 HP funcionando en las mismas condiciones y tiempo al año, que serían igual a 578 [W] (11% de pérdidas).

3.2.1.3 PÉRDIDAS POR OTRAS CONDICIONES OPERACIONALES DISTINTAS A LAS NOMINALES

Existen otras pérdidas que reducen la eficiencia de los motores eléctricos que también dependen de las condiciones a las que opera el motor.

La eficiencia real del motor se puede obtener al multiplicar la eficiencia nominal por los factores de corrección asociados a los distintos tipos de operación que producen ineficiencia, como por ejemplo operación no nominal de frecuencia, voltaje, temperatura óptima, altura geográfica, entre otras. De este modo, la eficiencia real de un motor se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\eta_{real} = \eta_o * \prod_{i=1}^N K_i$$

Donde η_o es la eficiencia nominal del motor en por unidad, y los K_i son los factores de corrección asociados a N condiciones de operación fuera de los rangos nominales o acciones que afecten la eficiencia final del motor. Estos factores se calculan según lo muestra el Anexo 14.2.

3.2.2 MOTORES ESTANDAR, EFICIENTES Y PREMIUM

Para poder estandarizar y unificar criterios a la hora de determinar las pérdidas que afectan el rendimiento de los motores de la industria, la norma IEC 60034-30 (2008) propone una guía para determinar estas fugas de energía de máquinas eléctricas rotativas.

La norma IEC 60034-30 (2008) sustituyó a la IEC 60044-2 (1972), sus futuras correcciones 1 y 2 (1995 y 1996 respectivamente) y a la versión 2007 (IEC 60034-2-1), elaboradas por el comité técnico del IEC (*International Electrotechnical Commission*). Se prefiere utilizar esta norma en nuestro país ya que otras normas, como la NEMA, utilizan frecuencias industriales de 60 [Hz] y la IEC utiliza frecuencias industriales de estándar europeo de 50 [Hz].

⁶ Ver Detalle de Análisis de eficiencia en función de grado de carga en Anexo 14.2

De este modo, la IEC define según su nivel de rendimiento la clasificación de motores como: **Eficiencia Estándar (IE1)**, **Alta Eficiencia (IE2)** y **Eficiencia Premium (IE3)**. El nivel de rendimiento de cada uno se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3: Eficiencias de motores según norma IEC 60034-30 (2008)

kW	HP	IE-1 - Standard efficiency						IE2 - High efficiency						IE3 - Premium efficiency					
		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole		2 pole		4 pole		6 pole	
		50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.75	1	72.1	77.0	72.1	78.0	70.0	73.0	77.4	75.5	79.6	82.5	75.9	80.0	80.7	77.0	82.5	85.5	78.9	82.5
1.1	1.5	75.0	78.5	75.0	79.0	72.9	75.0	79.6	82.5	81.4	84.0	78.1	85.5	82.7	84.0	84.1	86.5	81.0	87.5
1.5	2	77.2	81.0	77.2	81.5	75.2	77.0	81.3	84.0	82.8	84.0	79.8	86.5	84.2	85.5	85.3	86.5	82.5	88.5
2.2	3	79.7	81.5	79.7	83.0	77.7	78.5	83.2	85.5	84.3	87.5	81.8	87.5	85.9	86.5	86.7	89.5	84.3	89.5
3		81.5	-	81.5	-	79.7	-	84.6	-	85.5	-	83.3	-	87.1	-	87.7	-	85.6	-
3.7	5	-	84.5	-	85.0	-	83.5	-	87.5	-	87.5	-	87.5	-	88.5	-	89.5	-	89.5
4		83.1	-	83.1	-	81.4	-	85.8	-	86.6	-	84.6	-	88.1	-	88.6	-	86.8	-
5.5	7.5	84.7	86.0	84.7	87.0	83.1	85.0	87.0	88.5	87.7	89.5	86.0	89.5	89.2	89.5	89.6	91.7	88.0	91.0
7.5	10	86.0	87.5	86.0	87.5	84.7	86.0	88.1	89.5	88.7	89.5	87.2	89.5	90.1	90.2	90.4	91.7	89.1	91.0
11	15	87.6	87.5	87.6	88.5	86.4	89.0	89.4	90.2	89.8	91.0	88.7	90.2	91.2	91.0	91.4	92.4	90.3	91.7
15	20	88.7	88.5	88.7	89.5	87.7	89.5	90.3	90.2	90.6	91.0	89.7	90.2	91.9	91.0	92.1	93.0	91.2	91.7
18.5	25	89.3	89.5	89.3	90.5	88.6	90.2	90.9	91.0	91.2	92.4	90.4	91.7	92.4	91.7	92.6	93.6	91.7	93.0
22	30	89.9	89.5	89.9	91.0	89.2	91.0	91.3	91.0	91.6	92.4	90.9	91.7	92.7	91.7	93.0	93.6	92.2	93.0
30	40	90.7	90.2	90.7	91.7	90.2	91.7	92.0	91.7	92.3	93.0	91.7	93.0	93.3	92.4	93.6	94.1	92.9	94.1
37	50	91.2	91.5	91.2	92.4	90.8	91.7	92.5	92.4	92.7	93.0	92.2	93.0	93.7	93.0	93.9	94.5	93.3	94.1
45	60	91.7	91.7	91.7	93.0	91.4	91.7	92.9	93.0	93.1	93.6	92.7	93.6	94.0	93.6	94.2	95.0	93.7	94.5
55	75	92.1	92.4	92.1	93.0	91.9	92.1	93.2	93.0	93.5	94.1	93.1	93.6	94.3	93.6	94.6	95.4	94.1	94.5
75	100	92.7	93.0	92.7	93.2	92.6	93.0	93.8	93.6	94.0	94.5	93.7	94.1	94.7	94.1	95.0	95.4	94.6	95.0
90	125	93.0	93.0	93.0	93.2	92.9	93.0	94.1	94.5	94.2	94.5	94.0	94.1	95.0	95.0	95.2	95.4	94.9	95.0
110	150	93.3	93.0	93.3	93.5	93.3	94.1	94.3	94.5	94.5	95.0	94.3	95.0	95.2	95.0	95.4	95.8	95.1	95.8
132		93.5	-	93.5	-	93.5	-	94.6	-	94.7	-	94.6	-	95.4	-	95.6	-	95.4	-
150	200	-	94.1	-	94.5	-	94.1	-	95.0	-	95.0	-	95.0	-	95.4	-	96.2	-	95.8
160		93.8	-	93.8	-	93.8	-	94.8	-	94.9	-	94.8	-	95.6	-	95.8	-	95.6	-
185	250	-	94.1	-	94.5	-	94.1	-	95.4	-	95.4	-	95.0	-	95.8	-	96.2	-	95.8
200		94.0	-	94.0	-	94.0	-	95.0	-	95.1	-	95.0	-	95.8	-	96.0	-	95.8	-
220	300	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
250	350	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
300	400	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
330	450	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8
375	500	94.0	94.1	94.0	94.5	94.0	94.1	95.0	95.4	95.1	95.4	95.0	95.0	95.8	95.8	96.0	96.2	95.8	95.8

Fuente: ABB, Technical note IEC 60034-30 standard on efficiency classes for low voltage AC motors, 2010

Es por ello que hoy en día se recomienda a las empresas industrializadas con elevando número de motores eléctricos preferir equipos de mejor eficiencia (IE2 o IE3), ya sea para reemplazar los motores existentes, con alto índice de falla o para nuevos proyectos de expansión, previo a un estudio y evaluación técnico-económica.

Este cálculo del potencial de ahorro de energía se calcula mediante la cantidad de energía eléctrica consumida anual y la eficiencia tanto actual (IE1) como a evaluar (por ejemplo, IE3). Este valor esta dado por:

$$E_{\text{ahorrada}} = E_{\text{consumida}} \left(1 - \frac{\eta_{\text{IE1}}}{\eta_{\text{IE3}}} \right)$$

Donde las eficiencias (η_{IE1} y η_{IE3}) debe ser evaluada de acuerdo a los factores de corrección de las condiciones operacionales de cada uno de los equipos, descritos en el párrafo 3.2.1.3, en particular el grado de carga y horas de funcionamiento del motor.

3.3 VARIADORES DE FRECUENCIA

Existen diversos mecanismos que permiten reducir la velocidad de giro de un motor eléctrico (sistemas de control mecánicos, hidráulicos, eléctricos, etc.). Uno de estos es instalar un variador de frecuencia (VDF) entre el motor eléctrico y la red de alimentación, cuyo objetivo es reducir la frecuencia (y voltaje) de operación del motor a través del un control de electrónica de potencia.

Sin embargo la reducción de velocidad de operación de un motor no implica la misma reducción de consumo eléctrico, ya que depende del tipo de carga acoplada a este. Es por ello que a continuación se identifican los tipos de carga a los que puede estar sometido un motor eléctrico.

3.3.1 TIPOS DE CARGA EN MOTORES ELÉCTRICOS

La curva de torque-velocidad de un motor eléctrico se comporta de manera similar a la curva que se muestra en la figura 3.

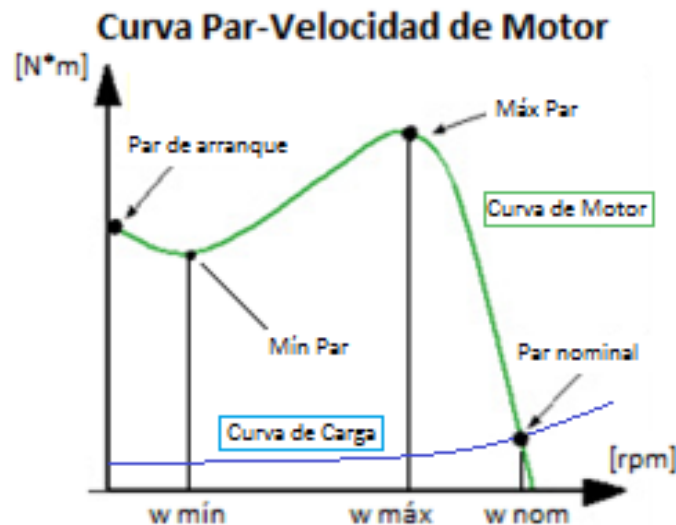


Figura 3: Curva de Carga Par-Velocidad de Motor en Condiciones de Voltaje y Frecuencia Nominales
Fuente: Elaboración Propia

En esta figura (w_{nom} , Par nominal T_{nom}) es el punto de operación nominal del motor, es decir, la intersección con la curva par-velocidad de la carga, siendo este el valor máximo de torque (o par) que se puede suministrar el motor en condiciones de voltaje y frecuencia nominales. Este punto define la velocidad nominal a la cual debe funcionar el motor y el rango de operación nominal.

Es por ello que el rango de operación se puede encontrar en distintos puntos de la zona de su curva par-velocidad, de acuerdo al tipo de carga al cual se ve enfrentado. En

estas zonas el comportamiento torque-velocidad se puede aproximar a funciones analíticas paramétricas (cuadrática, lineal, constante o asintótica). Así, las cargas a la cual se somete un motor eléctrico se pueden clasificar en los siguientes tipos⁷:

- **Par Cuadrático**

Para el caso de bombas y ventiladores, el rango de operación se encuentra dentro de una zona de la curva en donde el torque se comporta aproximadamente como una función cuadrática en función de la velocidad, es decir:

$$T(w) = k_T * w^2 \quad , \quad P(w) = k_P * w^3$$

Por lo tanto, cualquier porcentaje de reducción de velocidad (que no salga mayormente de la zona de operación del motor) implica una reducción cúbica en la potencia consumida.

- **Par Lineal**

Para el caso de correas transportadoras y principales compresores, el rango de operación de estas se encuentra principalmente en donde el torque varía de manera lineal con la velocidad, es decir:

$$T(w) = k_T * w \quad , \quad P(w) = k_P * w^2$$

Por lo tanto, una reducción de velocidad del motor (sin salir mayormente del rango de operación típico del motor) implicaría reducir el consumo de energía proporcional al cuadrado de la velocidad.

- **Par Constante**

En este caso, como lo son grúas, elevadores, bombas de desplazamiento positivo y mezcladores, el torque no tiene mayor variación ante cambios de velocidad dentro del rango de operación, es decir,

$$T(w) = k_T \quad , \quad P(w) = k_P * w$$

De este modo, una reducción de velocidad del motor implica una reducción de consumo de potencia en la misma proporción.

- **Potencia Constante**

Para el caso de cargas de alto momento de inercia, como molinos o embobinadoras mayores, la potencia que consume no varía mayormente ante cambios de velocidad dentro del rango de operación nominal del motor.

⁷ Fuente: Véase Bibliografía [35]

$$T(w) = \frac{k_T}{w} \quad , \quad P(w) = k_P$$

Es por ello que en estos casos no se suele realizar una reducción de velocidad para reducir el consumo de energía y se buscan otras alternativas.

3.3.2 PRINCIPIO DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

El objetivo principal de un variador de frecuencia es transformar la energía eléctrica suministrada por la red a frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable, y por ende, cambiar la velocidad de funcionamiento del motor acoplado.

Para ello, se realizan 2 etapas de conversión dentro del variador: una etapa **rectificadora** que convierte la señal de entrada (de la red) de alterna a continua, y luego una etapa **inversora** que convierte la señal continua a una señal alterna pero de distinta frecuencia a la de entrada.

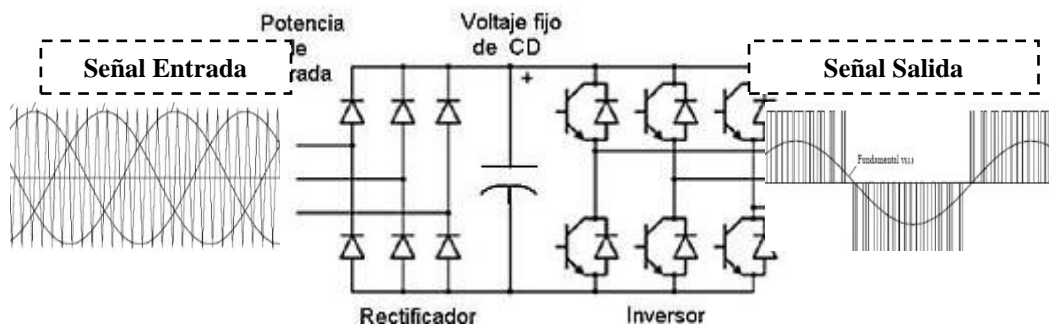


Figura 4: Esquemático Interno del Variador de Frecuencia

Fuente: FRAILE MORA, JESUS (2008). MÁQUINAS ELÉCTRICAS (6ª Edición). MCGRAW-HILL / INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S.A

El condensador intermedio es un mecanismo de protección durante el frenado del motor, ya que debido a que la velocidad del eje es mayor a la síncrona (de la red), el motor actúa en ese intervalo de tiempo como generador. Esta energía, que no puede ser devuelta a la red, es cargada en el condensador para luego ser disipada mediante la conexión de una resistencia.

Cuando se reduce la velocidad de operación del motor bajando la frecuencia de operación, es necesario reducir en la misma proporción el voltaje en el estator. Este proceso, conocido como degradación (*derating*), es necesario ya que si no se baja el voltaje el núcleo del motor se satura debido al excesivo flujo de saturación, y por ende, elevadas corrientes de magnetización. Esto se justifica, matemáticamente, por la Ley de Faraday-Lenz, según la cual el voltaje en los terminales de la bobina del motor es el que señala en la Figura 5:

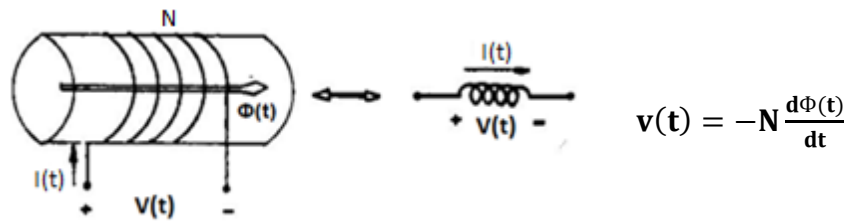


Figura 5: Voltaje Inducido Debido a un Flujo Magnético en una Bobina
Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 5, N es el número de vueltas de la bobina, $\phi(t)$ el flujo magnético inducido por la corriente $I(t)$ y el signo negativo se le atribuye al aporte de la Ley de Lenz⁸. Por lo tanto, y considerando que el voltaje es alterno (sinusoidal de frecuencia w_{red}) se tiene que el flujo magnético es:

$$\phi(t) = -\frac{1}{N} \int v(t) dt = -\frac{1}{N} \int V_{max} \text{sen}(w_{red}t) dt = -\frac{V_{max} \cos(w_{red}t)}{w_{red} N}$$

De este modo, para mantener el flujo magnético máximo $\left(\frac{V_{max}}{w_{red} N}\right)$ constante en el motor se debe manejar de manera proporcional la relación entre voltaje (V_{max}) y frecuencia (w_{red}), dado que el número de bobinado (N) del estator es un valor constante.

El ahorro energético al implementar variadores de frecuencia depende del tipo de carga, grado de carga y el nivel de reducción de velocidad que se impondrá. De esta manera, para diferentes tipos de cargas se tiene el siguiente ahorro [35]:

$$E_{ahorrada} = E_{consumida} * (1 - f(w_2))$$

Donde:

$$f(w_2) = \begin{cases} (w_2/w_{nom})^1 & \text{para ascensores y cargas constantes} \\ (w_2/w_{nom})^2 & \text{para correas y compresores} \\ (w_2/w_{nom})^3 & \text{para bombas, ventiladores y extractores} \end{cases}$$

En la fórmula anterior, el valor de w_2 es la velocidad nueva del motor al usar el variador de velocidad.

Para el caso de correas transportadoras, el nivel de ahorro de energía no sólo depende de la reducción de velocidad, sino que también el nivel de carga del motor. Es más, Es

⁸ Lenz atribuye el signo a que el voltaje inducido es tal que se opone al cambio del flujo magnético inducido en la bobina.

posible que, para nivel de cargas sobre el 70% una reducción de la velocidad implique un aumento del consumo de energía, debido que a medida que aumenta el nivel de carga la correa sufre deformaciones que contribuyen a un incremento del roce, y por ende, el consumo de energía. Esta afirmación fue desarrollada y verificada por Lauhoff en su trabajo publicado y titulado como “Variadores de Velocidad en Correas Transportadoras - ¿Realmente Ahorran Energía?” [25]. Por lo tanto, la fórmula anterior se puede aplicar en correas con un nivel de inclinación mínimo (horizontales) y con niveles de factor de carga constantes y menores al 70%.

De este modo, y en consideración con lo mencionado, se puede llegar a tener los siguientes ahorros energéticos en los distintos equipos que utilizan motores eléctricos:

Tabla 4: Porcentaje de ahorro energético en equipos utilizando VDFs

Tipo de Equipo	Rango de Ahorro Energético [%]
Bombas Centrífugas	20 a 50%
Bombas Alternativas	10 a 30%
Ventiladores/Extractores	20 a 50%
Correas Transportadoras y Compresores	10 a 30%

Fuente: Presentación “Eficiencia Energética en aplicaciones de motores eléctricos”, WEG [47]

4 CURVAS DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO (CCMA DE GEI)

4.1 FUNDAMENTO DE LAS CCMA DE GEI

Las curvas de costo de abatimiento de GEI (CCMA de GEI) permiten obtener una base cuantitativa para tomar buenas decisiones sobre qué acciones serían las más efectivas en reducir las emisiones y su costo monetario de implementación. Proporcionan un mapa global de las oportunidades para reducir las emisiones de GEI a través de sectores y regiones.

Se define el costo de abatimiento como los costos adicionales, o en su defecto beneficios percibidos, de reemplazar una tecnología de referencia, metodología de operación o gestión que permita reducir las emisiones.

Es importante también mencionar, que las CCMA de este tipo están muy influenciadas por factores externos como el precio del dólar, precio de la energía, escenarios de crecimiento, tasas de descuento. Por tanto es importante realizar un análisis de sensibilidad de emisiones ante distintos factores que puedan cambiar completamente los parámetros del estudio. Para este trabajo de memoria se consideran los siguientes valores señalados en la Tabla 5.

Tabla 5: Datos Económicos para el futuro análisis

Parámetro	Valor	Unidad
Precio de Energía Eléctrica	113	[USD/MWh] ⁹
Costo de Mantenimiento anual	3%	[c/r a costo de operación] ¹⁰
Valor Dólar Utilizado	478	[CLP/USD] ¹¹
Factor de Emisión SING	0.806	[tonCO2e/MWh] ¹²

Fuente: Elaboración propia

Una vez obtenida las CCMA de GEI de una zona determinada, se puede realizar un estudio del total de emisiones de CO2e a futuro si se implementan o no los proyectos.

⁹ Valor utilizado por Samir Farah G., "Metodología para la determinación de CCMA de GEI para CMDIC", 2012 [14]

¹⁰ Fuente: "Eficiencia Energética en Motores Eléctricos", U. del Atlántico y U. Autónoma del Occidente (Colombia) [6]

¹¹ Se considera el valor del dólar referente al año base considerado para la construcción de las CCMA de GEI, es decir, el del año 2012 (también utilizado por Samir Farah G. en su estudio) [15]

¹² Referente al publicado por el Ministerio de Energía de Chile en su página oficial

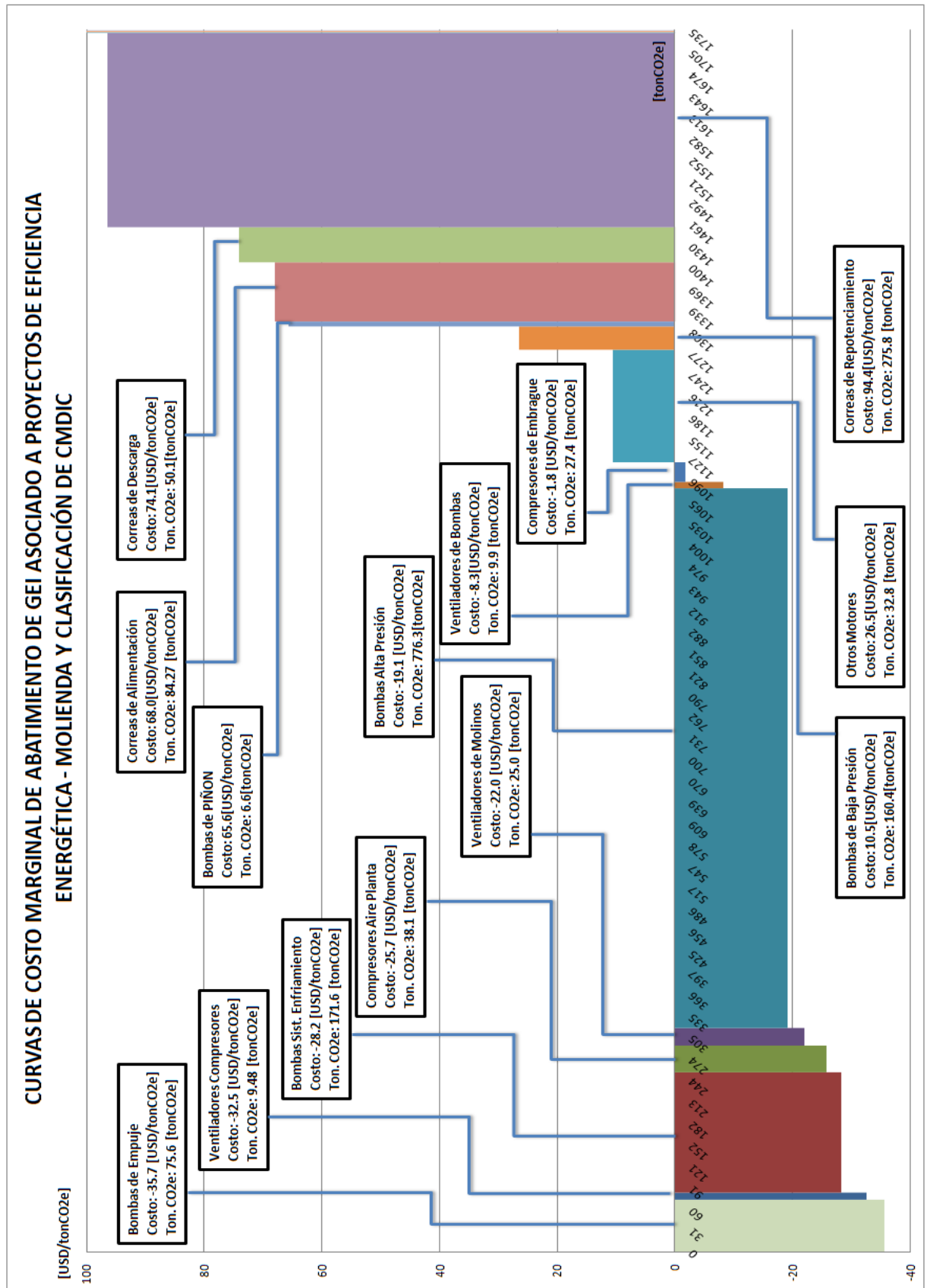


Figura 6: Curva de Costo Marginal de Abatimiento de GEI en Molienda y Clasificación de CMDIC, 2013
Fuente: Superintendencia de Eficiencia Energética, CMDIC, 2013

Un ejemplo es la figura 6, donde se aprecia la curva de abatimiento desarrollada por la Superintendencia Eficiencia Energética de CMDIC durante el año 2013 para el área de Molienda de la Planta de Concentradora de Sulfuros.

El eje vertical muestra el costo promedio de abatimiento, medido en dólares, por unidad de toneladas de CO₂e abatidos y el eje horizontal representa el potencial de abatimiento, medido en toneladas de CO₂e por año. Por lo tanto, el área que abarca cierto proyecto representado en la curva equivale al costo (o beneficio) económico de implementarlo, de modo que naturalmente los proyectos más atractivos se encuentran en la zona izquierda de la curva. En efecto, si el proyecto tiene un costo de abatimiento negativo implica que la empresa obtiene beneficios económicos al implementar esta medida y hace mucho más atractiva ponerla en marcha.

La curva de costo muestra el rango de acciones técnicas para reducir las emisiones que es posible conseguir con las tecnologías ya sea disponibles hoy en día, u ofrecen un alto grado de certeza sobre su potencial en un horizonte de tiempo determinado. Estas curvas, sin embargo, no pueden determinar otros beneficios (o desventajas) difíciles de cuantificar, como salud de personal involucrado, beneficios sociales, impacto visual del sector, etc.

4.2 METODOLOGÍAS DE CONSTRUCCIÓN DE CCMA DE GEI

Si bien hoy en día no existe un mecanismo técnico explícito para la creación de las CCMA, hay autores que recomiendan algunas prácticas para su construcción [27] [28]. La mayoría son para la creación de CCMA de otros ítems, como energía o insumos, pero que son practicables para reducir las emisiones de GEI. Las metodologías que se describen especifican siete pasos importantes:

1. Determinación del Caso Base

En primer lugar hay que tener un punto de referencia para poder hacer las futuras evaluaciones de implementación de proyectos. Para ello hay que determinar un caso base en cierto año, calculando el consumo de energía con la tecnología existente y caracterizar estas tecnologías y metodologías que se implementen. El año base puede ser el año actual de estudio, o se puede realizar con respecto a un año anterior en particular, por ejemplo, un año en el que se inició algún proyecto en específico de interés.

2. Proyección Business as Usual (BAU)

A continuación se debe proyectar la cantidad de consumo de energía en el área si se mantiene la tecnología existente sin implementar ningún tipo de propuesta de mitigación. Esto permite más adelante comparar los resultados al poner en marcha un proyecto versus si no se hace.

3. Levantamiento de proyectos

Luego lo que se procede a hacer es identificar oportunidades de mejora en el área de estudio de tal manera que permitan reducir el consumo de energía (y por ende la emisión de GEI), dependiendo del alcance definido (alcance I, II, y/o III). Los proyectos pueden ser obtenidos de diversas fuentes, por ejemplo por observaciones realizadas en visitas a terreno del área, comentarios o sugerencias de personal u observaciones realizadas en estudios previos (como evaluaciones o auditorías, informes de operación, reportes de producción, etc.).

4. Evaluación técnico-económica de proyectos

A partir de la lista de propuestas de proyectos para mitigar GEI, se debe realizar un estudio de viabilidad. Para ello se utilizan indicadores económicos, como el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y el período de recuperación del capital (PayBack), por lo que es importante realizar un flujo de caja para poder estudiar en términos de costo cada uno de los proyectos¹³.

Aquí es clave la fuente de datos tomada y la sensibilidad del estudio con respecto a estas, tales como costo de la energía, costos operacionales y mantenimiento, precio del dólar con respecto a la moneda local, escenarios de crecimiento, costo de determinada tecnología, etc.

También en el estudio de factibilidad hay que tener en cuenta las políticas de la empresa con el medio ambiente u otros que afectan a la viabilidad de cierto proyecto de mitigación.

5. Determinación de la reducción de CO₂e para proyectos

Si bien es fundamental estimar el costo del proyecto a evaluar, el punto clave es determinar la cantidad de CO₂e que se deja de emitir al implementar cierta propuesta ya que es el objetivo principal de realizar un estudio y construcción de las CCMA de GEI.

Para determinar la cantidad de toneladas de CO₂e mitigadas se utilizan factores de conversión conocidos, generados por organismos internacionales. Estos determinan la cantidad promedio de CO₂e emitidos por unidad de energía o combustible utilizado, por ejemplo [tonCO₂e/kWh], [tonCO₂e/tonCarbón], [tonCO₂e/lts diesel], etc. De este modo, se puede calcular cuantas toneladas de CO₂e se deja de emitir si se utiliza una tecnología que consume menos toneladas de combustible o [kWh] de energía, teniendo así un perfil del potencial de mitigación del proyecto. Para el caso de este estudio, se considerará el factor de emisión del SING publicado en el sitio oficial del Ministerio de Energía el año 2012, y se considerará un factor

¹³ Ver Anexo 14.3 para cálculo de los distintos indicadores

constante en el tiempo debido a que modelar la variación del factor a través de la estación del año y a futuro implica un estudio de proyección del crecimiento de la matriz energética del Norte Grande de Chile. Para simplificar la estimación de este, se considera el promedio del factor de emisión de CO₂e del SING del año 2012 mostrado por el Ministerio de Minería, igual a 0.806 [tonCO₂e/MWh].

6. Construcción de Curvas de Abatimiento de GEI

Finalmente, con todos los parámetros y estudios realizados, se procede finalmente a construir las Curvas de Abatimiento. Para ello se debe hacer primero una lista de de proyectos ordenada según su costo de implementación por tonelada de CO₂e mitigada en orden creciente. Así se ponen en un gráfico de costo de abatimiento anual unitario versus cantidad de toneladas de CO₂e mitigada al año, teniendo finalmente la CCMA de GEI para la zona o área de estudio

5 ANTECEDENTES ESPECÍFICOS

5.1 COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) es una sociedad contractual de extracción de minerales, perteneciente a Angloamerican (44%), Glencore (44%) y Mitsui & Co. (12%). Su negocio se basa en la producción de concentrado de cobre, cátodos de cobre y concentrado de molibdeno desde los rajos abiertos de Rosario, Ujina y Huinquintipa.

Estos yacimientos mineros se encuentran en la comuna de Pica (II Región), a 185 [kms] al sureste de la ciudad de Iquique y a 10 [km] de la frontera de Bolivia, y a una altura que varía desde los 3.500 a los 4.500 metros sobre el nivel del mar.

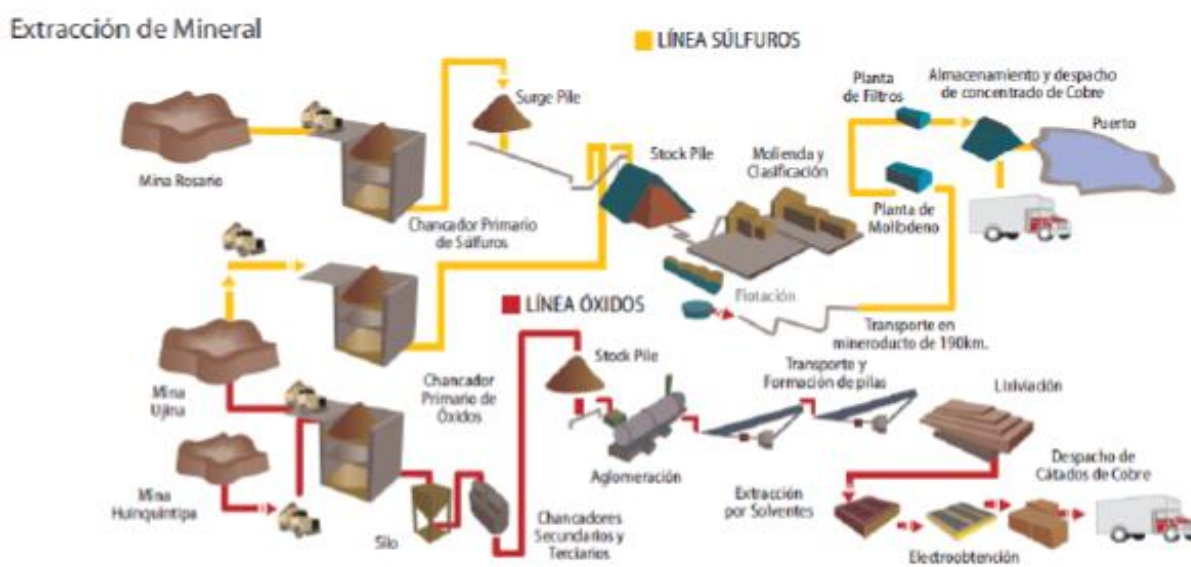


Figura 7: Líneas de Producción de Sulfuros y Óxidos de CMDIC

Fuente: Página Oficial de CMDIC

El proceso de extracción de mineral se produce por dos líneas de producción: la línea de Óxidos y la línea de Sulfuros (ver figura anterior). En la primera, la línea de óxidos, se realiza todo el proceso de producción de cátodos de cobre, es decir, se encuentran los procesos de chancado de óxidos, aglomeración, extracción por solventes, lixiviación, electroobtención, entre otros.

Por otro lado, en la Línea de Sulfuros, se produce el material de concentrado de cobre y molibdeno, por lo que concentra el mayor potencial de producción de la compañía (el 87% de la producción de cobre corresponde a concentrado de cobre¹⁴). En esta se destacan las áreas de Planta Concentradora, Planta de Filtrado, Planta de Molibdeno y

¹⁴ Respecto a estadísticas de producción del 2012, Reporte de Sustentabilidad 2012 de CMDIC

Puerto Patache. El restante 13% se atribuye a la producción de cátodos de cobre que se obtiene de la línea de producción de óxidos.

La Superintendencia Eficiencia Energética definió como objetivo comenzar la implementación del SGE en la Planta Concentradora, dado que es la principal área de consumo energético eléctrico de la compañía (cerca del 67% del consumo eléctrico de la compañía se le atribuye a esta zona¹⁵). Es por ello que las demás áreas no son consideradas en el siguiente trabajo de memoria.

5.2 PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS

La Planta Concentradora de Sulfuros tiene como objetivo tomar el material mineralizado sacado del proceso de extracción de las minas de Ujina y Rosario, para facilitar el procesado de concentrado de cobre en las siguientes fases de producción.

De este modo el proceso de producción de concentrado de cobre en la planta se puede separar principalmente en cinco etapas: Chancado Primario, Molienda y Clasificación, Flotación y Remolienda, Espesado y Acumulación y Tranque de Relaves, siendo el segundo el que presenta mayor consumo eléctrico presenta. En total, la Planta Concentradora consumió 942.5 [GWh] de electricidad durante el año 2012

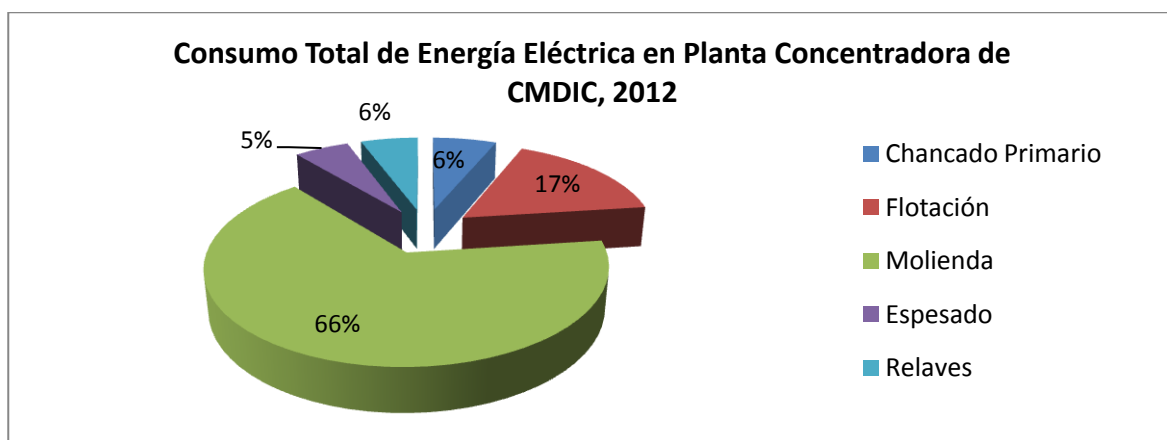


Figura 8: Porcentaje de Consumo de Energía Eléctrica en Planta Concentradora, Año 2012

Fuente: Informe Interno de Consumo Eléctrico de la Compañía, GSO, 2012 [17]

El siguiente trabajo de construcción de curvas de abatimiento de GEI se aplica exclusivamente para el área de Molienda y Clasificación, perteneciente a la Planta Concentradora de Sulfuros, es decir, sólo considera los equipos de consumo de energía eléctrica que se encuentran entre las correas alimentadoras del Stock Pile y los hidrociclones que bombean material al sub-área de Flotación. No se encuentran, en esta área, los chancadores previos a los molinos, ya que estos se consideran parte del área de Chancado Primario.

¹⁵ Informe de Consumo de Energía Eléctrica enviado por la Gerencia de Servicios Operacionales (GSO)

El trabajo de producción de Molienda se separa de acuerdo a los 3 molinos SAG existentes, definiendo así sus tres líneas de producción: **Línea 1**, asociado al SAG 1, **Línea 2**, asociado al molino SAG 2 y BOLA 2, y la **Línea 3**, asociada a el SAG 1011 y los molinos BOLA 1012 Y 1013 (más detalle en Anexo 14.5).

Sin embargo, no considera implementar proyectos de eficiencia energética en los motores síncronos de molinos SAG y BOLAS debido a su tamaño (ya eficientes desde su fase de diseño y construcción) y criticidad del proceso. Es decir, sólo considera los motores de inducción del área de Molienda, correspondiente a bombas, correas transportadoras, ventiladores, compresores, entre otro, y cuya potencia no sobrepase los 500 [kW] de potencia nominal.

5.3 SISTEMA DE GESTIÓN DE ENERGÍA EN ÁREA DE MOLIENDA

Con el objetivo de concretar la implementación del Sistema de Gestión de Energía (SGE) tomando en consideración lo sugerido por la norma ISO 50.001, se realizó durante el primer semestre del 2013 una revisión energética interna en la zona de Molienda, cuyo objetivo es obtener una línea base y perfil energético detallado del área, considerando el consumo energético de todos los motores que interfieren en el proceso de producción.

Esta revisión permitió obtener un levantamiento de la totalidad de los equipos motorizados consumidores de energía eléctrica en la zona de Molienda, además de obtener una estimación detallada de cada uno de sus consumos mensuales de energía eléctrica durante el año 2012 (año base). Esta estimación se realizó a través de la determinación de las potencias nominales y horas de uso de cada uno de los equipos.

Las potencias nominales se obtuvieron a partir de listados y registros de equipos, manuales y catálogos de diversas áreas de la Gerencia Mantenimiento Planta, Gerencia de Energía Planta, Gerencia de Servicios Operacionales, Salas de Control y el Sistema de Control Distribuido de la planta (DCS). Las potencias nominales que no pudieron ser obtenidas de estas fuentes, se obtuvieron desde las placas de equipos durante visitas a terreno realizadas en conjunto con mantenedores y operadores de la planta. En el caso de no tener acceso a las placas de estos, se estimaron de acuerdo al criterio del personal de mantenimiento y operación.

Las horas de uso se obtuvieron desde el software de control de datos PI System, que dentro de sus aplicaciones posee un registro histórico de las horas de funcionamiento de los equipos (horómetros). Los que no poseían horómetros en el PI System, se estimaron en base a diferentes criterios como: conocimiento de operadores y

mantenedores de la planta, existencia de equipos homólogos o de características operacionales similares (equipos en paralelo).

Los resultados obtenidos de la revisión energética, que se muestra a continuación, fueron utilizados para construir un perfil y año base para el área de Molienda y Clasificación de la Planta Concentradora, y que permiten sentar base para el SGE y la construcción de curvas de costo marginal de abatimiento de GEI.

5.4 CONSUMO ENERGÉTICO Y PRODUCCIÓN DE EQUIPOS AUXILIARES DEL ÁREA DE MOLIENDA

Los resultados de la revisión energética interna realizada muestran que existen cerca de 232 motores eléctricos que corresponden al área de Molienda y Clasificación.

Si sólo se consideran los equipos cuyos motores eléctricos auxiliares, es decir, que apoyan el trabajo de los molinos, el nivel de consumo de energía, por tipo de equipo, nivel de potencia y funcionamiento anual, además de identificar los equipos de consumo eléctrico crítico en Molienda, se resume a continuación:

- **Perfil de Consumo Energético de Motores Auxiliares por Tipo en Molienda**

Tabla 6: Perfil Energético de Equipos con Motores de Inducción, por tipo de Equipo

PERFIL POR EQUIPO				
Equipo	Cantidad	E total [MWh]	% Cantidad	% Energía
Bomba	105	82.650	46,7%	91,6%
Ventilador	48	700	21,3%	0,8%
Correa	21	2.773	9,3%	3,1%
Feeder	10	1	4,4%	0,0%
Compresor	5	3.443	2,2%	3,8%
Harnero	8	114	3,6%	0,1%
Ciclón	8	-	3,6%	0,0%
Motor	7	408	3,1%	0,5%
Ud. Hidráulica	6	62	2,7%	0,1%
Electroimán	7	94	3,1%	0,1%
TOTAL	225	90.246	100%	100%

Fuente: Elaboración propia

- **Perfil Energético de Motores Auxiliares por Rango de Potencia en Molienda**

Tabla 7: Perfil Energético de Equipos con Motores de Inducción, por Rango de Potencia [kW]

PERFIL POR RANGO DE POTENCIA [kW]						
[min	Máx.)	P media [kW]	Cantidad	E total [MWh]	% Cantidad	% Energía
-	1	0,52	37	62	16,4%	0,1%
1	5	2,26	57	463	25,3%	0,5%
5	10	7,15	31	409	13,8%	0,5%
10	25	17,27	51	2.472	22,7%	2,7%
25	50	39,27	11	1.217	4,9%	1,3%
50	100	79,82	21	5.239	9,3%	5,8%

100	500	140,93	9	4.873	4,0%	5,4%
500	1.000	-	0	-	0,0%	0,0%
1.000	2.500	1.395,22	8	75.511	3,6%	83,7%
TOTAL		-	225	90.246	100%	100%

Fuente: Elaboración propia

- **Perfil Energético por Horas de Uso Anual de los Equipos en Molienda**

Tabla 8: Perfil Energético por Horas de Uso Anual de los Equipos con Motor de Inducción [hrs]

PERFIL POR RANGO DE HORAS DE USO ANUAL [hrs]						
Mín.	Máx.	Hrs uso Media [hrs]	Cantidad	E total [MWh]	% Cantidad	% Energía
-	1,000	108	91	146	40,4%	0,2%
1,000	2,000	1714	14	802	6,2%	0,9%
2,000	3,000	2925	14	1.112	6,2%	1,2%
3,000	4,000	3751	14	5.222	6,2%	5,8%
4,000	5,000	4396	10	1.422	4,4%	1,6%
5,000	6,000	5877	11	7.569	4,9%	8,4%
6,000	7,000	6782	21	3.926	9,3%	4,4%
7,000	8,000	9791	37	68.957	16,4%	76,4%
8,000	8,784 ¹⁶	10283	13	1.089	5,8%	1,2%
Total		-	217	225	90.246	100,0%

Fuente: Elaboración propia

- **Equipos Críticos**

Los primeros 25 equipos que consumieron más energía eléctrica en Molienda y Clasificación durante la operación del año 2012 son los siguientes:

Tabla 9: Equipos de Motores de Inducción Críticos del 2012 de Molienda y Clasificación, CMDIC

N	Equipo	Potencia [kW]	Energía [MWh]	Energía [%]	Acumulado [%]
1	Bombas ASH Línea 3	1.752	13.340	14,8%	14,8%
2	Bombas ASH Línea 3	1.752	12.924	14,3%	29,1%
3	Bombas ASH Línea 3	1.752	12.325	13,7%	42,8%
4	Bombas ASH Línea 3	1.752	12.293	13,6%	56,4%
5	Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	1.038	7.840	8,7%	65,1%
6	Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	1.038	7.443	8,2%	73,3%
7	Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	1.038	5.427	6,0%	79,3%
8	Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	1.038	3.919	4,3%	83,7%
9	Compresores aire Planta	112	916	1,0%	84,7%
10	Compresores aire Planta	112	836	0,9%	85,6%
11	Compresores aire embrague	112	710	0,8%	86,4%
12	Compresores aire Planta	112	690	0,8%	87,2%
13	Bomba Sist. Enfriamiento Línea # 3	112	631	0,7%	87,9%

¹⁶ Año 2012 fue año con 366 días (año bisiesto), es decir, 8.784 hrs en total.

14	Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	75	536	0,6%	88,5%
15	Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	75	526	0,6%	89,0%
16	Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	93	518	0,6%	89,6%
17	CORREA STACKER	112	493	0,5%	90,2%
18	Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	75	486	0,5%	90,7%
19	Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	74,5	484	0,5%	91,2%
20	Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	93,0	468	0,5%	91,8%
21	BOMBA DE PISO MOLIENDA	111,9	396	0,4%	92,2%
22	Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	93,0	326	0,4%	92,6%
23	Compresores aire embrague	55,0	291	0,3%	92,9%
24	Correa transportadora	41,8	275	0,3%	93,2%
25	Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	93,0	270	0,3%	93,5%

Fuente: Elaboración propia

Es muy importante destacar que los primeros 8 equipos auxiliares de la tabla 9 corresponden a bombas de hidrociclones que no utilizan motores de inducción, sino que motores síncronos. Debido a esta característica y que su nivel de potencia implica un nivel de eficiencia elevado, no serán considerados para los proyectos de eficiencia energética posteriores.

• Producción y Consumo Total

Durante el año 2012, Molienda y Clasificación proceso en total más de 43.6 millones de toneladas de material, donde cerca del 0.76% corresponde a concentrado de cobre que fue enviado a la zona de Flotación. El resumen de producción por mes se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 10: Material procesado y producido en Molienda, 2012

2012	Total Material [ton]	Total Concentrado Cu [Ton]	Concentrado Cu [%]
Enero	4,290,293	36,239	0.84%
Febrero	3,369,225	25,139	0.75%
Marzo	3,286,952	26,029	0.79%
Abril	4,241,529	34,806	0.82%
Mayo	3,699,925	29,621	0.80%
Junio	3,404,961	24,789	0.73%
Julio	4,024,534	29,169	0.72%
Agosto	3,255,860	22,965	0.71%
Septiembre	3,254,305	21,216	0.65%
Octubre	3,331,517	22,888	0.69%

Noviembre	3,459,768	24,324	0.70%
Diciembre	3,999,701	32,502	0.81%
Total	43,618,571	329,685	0.76%

Fuente: Reporte EXHIBIT 3.2.1.1 : CONCENTRATE PRODUCTION, CMDIC

Con respecto al consumo eléctrico, los registros obtenidos de la Gerencia de Servicios Operacionales (GSO) del área de Molienda y Clasificación durante el año 2012 son los siguientes:

Tabla 11: Consumo de energía eléctrica de Molienda por motores de equipos auxiliares de molinos, 2012

2012	Energía Consumida [MWh]	Porcentaje del Total [%]
Enero	5.888	9,21%
Febrero	4.802	7,52%
Marzo	5.179	8,10%
Abril	5.786	9,05%
Mayo	5.187	8,12%
Junio	5.030	7,87%
Julio	5.589	8,75%
Agosto	4.939	7,73%
Septiembre	5.295	8,29%
Octubre	5.372	8,41%
Noviembre	5.202	8,14%
Diciembre	5.632	8,81%
Total	63.900	100,00%

Fuente: Informe Interno Consumo de Energía Eléctrica 2012, GSO, CMDIC

La tabla 11 considera el consumo de energía de los motores de las bombas de los hidrociclones, cuya potencia se encuentra por sobre los 500 [kW] (1.038 y 1.752 [kW] para las líneas 1-2 y 3, respectivamente), es decir, sin considerar solamente los molinos. Esto se debe a que la GSO hace una medición de consumo de energía total de todos los equipos auxiliares de las líneas 1, 2 y 3, sin discriminar por nivel de potencia.

En cambio, las tablas 6, 7 y 8, para poder hacer la estimación del cálculo de consumo de energía por tipo de equipos, rango de potencia y horas de uso, se calculó la energía consumida a través de la potencia nominal (de placa) y las horas de uso registradas por el software PI System.

Nótese que el consumo de energía eléctrica es prácticamente constante a través del tiempo. Esto se debe principalmente a que el funcionamiento de motores de inducción que apoyan el trabajo principal de Molienda, que es el de los molinos y bombas de hidrociclones, deben permanecer operativos constantes en el tiempo para poder asegurar la continuidad del proceso. De igual manera, a partir de esto se puede tener un indicador de unidad de energía utilizada por cada tonelada de material tratado, es decir, un indicador de desempeño energético de la planta.

5.5 FACTOR DE EMISIÓN DE CO₂e DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE CMDIC

El factor de emisión de CO₂e relacionados con el consumo eléctrico de la compañía, denominado Alcance II (correspondiente a emisiones resultantes de la generación de energía fuera de los límites de la compañía), se basa en el publicado el Ministerio de Energía con respecto al SING. El factor representa al equivalente de emisión de todas las empresas generadoras que componen el SING.

Tabla 12: Factores de Emisión de GEI por unidad de energía consumida [CO₂e/MWh] en el SING 2012

Factores de Emisión Promedio Mensual 2012 del SING [tonCO ₂ e/MWh]												
Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom
0.802	0.828	0.833	0.778	0.798	0.788	0.803	0.816	0.802	0.815	0.828	0.777	0.806

Fuente: Página Oficial del Ministerio de Energía, Chile

El valor promedio, y utilizado en adelante para el cálculo de emisión de Gases de Efecto Invernadero por CMDIC y los estudios siguientes de este documento, es de 0.806 [tonCO₂e/MWh]. Se considera este valor¹⁷ para la proyección de consumo de los años siguientes ya que, además que la variación dentro de los meses es siempre menor al 3.6%, intentar predecir cómo variará este factor implica hacer un estudio y pronóstico de la variación del parque de generación del SING, tema que se escapa del estudio de este trabajo.

¹⁷ Validado por la empresa externa internacional AENOR por 2 años consecutivos (2012 y 2013).

6 LINEA BASE Y PERFIL ENERGÉTICO DE MOLIENDA

6.1 LINEA BASE DE MOLIENDA

La línea base nos permite tener un perfil de referencia para poder evaluar los futuros escenarios energéticos de Molienda y Clasificación al implementar o no proyectos de mejora de eficiencia energética. Esta línea base se fija en el 2012, año en el cual se basó la auditoría energética realizada durante el 2013.

Las distintas áreas de Molienda, que se muestran en la figura siguiente, corresponden a las zonas en donde se hace la medición de energía eléctrica y se reporta a la Gerencia de Servicios Operacionales (GSO). Estas se realizan mediante medidores exclusivos para los molinos SAG 1, 2 y 3 (o 1011), molinos BOLA 1, 2, 3 (o 1012), 4 (o 1013), y el consumo eléctrico de los motores eléctricos auxiliares que apoyan el funcionamiento de estos (bombas, correas, ventiladores, etc.) para cada línea de producción. Se debe recordar que los motores síncronos (molinos) no se considerarán al momento de hacer la evaluación técnico-económica de proyectos de eficiencia energética, ni motores de equipos que no se encuentren en el área de Molienda (como chancadores, camiones de transporte, pilas de lixiviación, etc.)

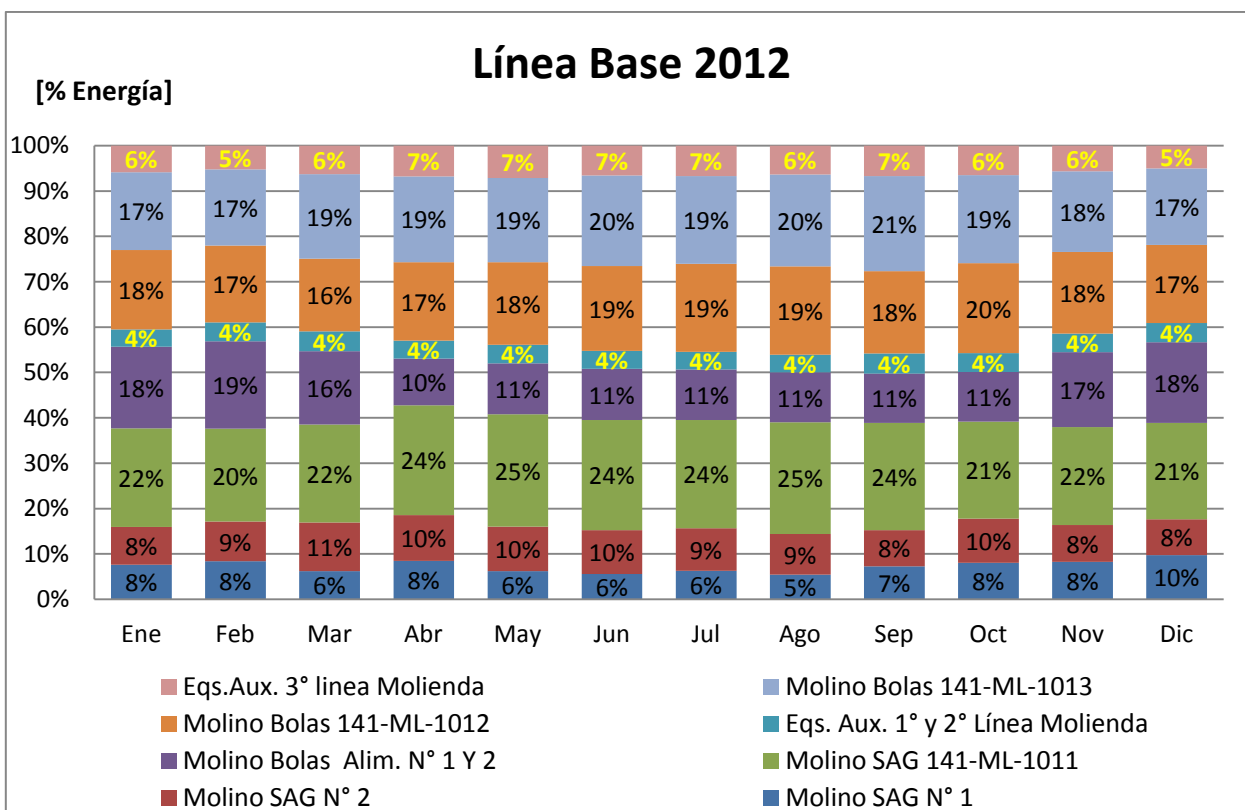


Figura 9: Línea Base 2012 de Molienda y Clasificación
Fuente: Elaboración propia

El consumo eléctrico total de Molienda el año 2012 fue más de 621.7 [GWh] de energía, en donde los molinos consumieron el 89.7% del total de Molienda (557.7 [GWh]) y los equipos auxiliares consumieron el 10.3% de energía (64 [GWh]). Es efectivamente este 10,3% al cual se ocupará el estudio y evaluación de proyectos de eficiencia energética, correspondiente a consumo energético de motores eléctricos de inducción que prestan apoyo al proceso de molienda del área.

El ajuste o cociente entre la energía consumida real (medida por la GSO) y la auditada, para los equipos auxiliares de Molienda, fue de un 72%. Esto quiere decir que, en promedio, los motores eléctricos asociados a los equipos de bombas, correas, alimentadores, compresores, etc., funcionan al 72% de la potencia nominal que se identifica en su placa.

Son estos últimos (marcados en amarillo en la figura 9), los motores auxiliares, quienes presentan mayores oportunidades de identificar e implementar proyectos de eficiencia energética y así construir las curvas de costo marginal de abatimiento de GEI.

Es por ello que de los 621.7 [GWh] de energía consumida, sólo se considerarán para el estudio de proyectos de eficiencia energética los 64.0 [GWh] consumidos por los motores eléctricos de inducción que apoyan el trabajo de los molinos, es decir, correas transportadoras, bombas, ventiladores, alimentadores, entre otros.

El desglose y análisis más detallado del consumo de energía eléctrica de los motores de equipos auxiliares de Molienda se presenta en el siguiente perfil de consumo de energía eléctrica de la planta.

6.2 PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO DE MOTORES DE EQUIPOS AUXILIARES EN ÁREA DE MOLIENDA

6.2.1 PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO DE MOTORES POR TIPO DE EQUIPO O APLICACIÓN EN MOLIENDA

El siguiente perfil de consumo eléctrico se separa en la cantidad de energía consumida por cada tipo de equipo motorizado, y la cantidad de motores auxiliares existentes en Molienda.

A partir de la tabla 6, y sólo considerando los motores auxiliares de Molienda (es decir, descartando los molinos), el porcentaje de consumo eléctrico de los motores de Molienda por tipo de aplicación o equipo se resume en la figura 9.

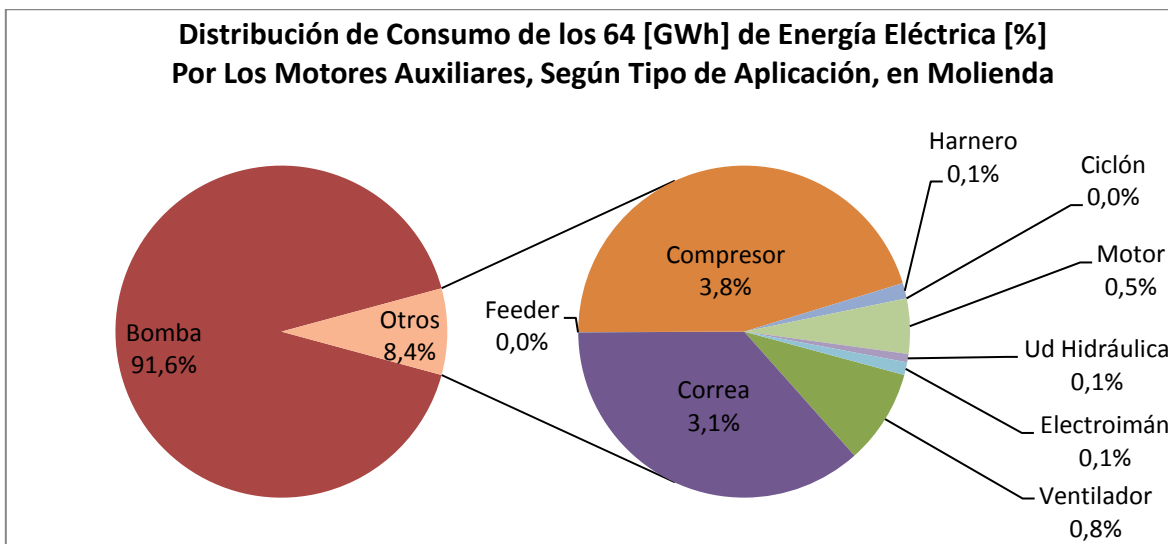


Figura 10: Perfil de los 64 [GWh] de consumo eléctrico por tipo de equipo en Molienda
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar de la figura 10 que, de la totalidad de los motores auxiliares identificados en la zona de Molienda, el 91.6% del consumo de energía eléctrica se debe al funcionamiento de equipos de bombeo (correspondiente a 58.5 [GWh] de los 64 [GWh]), en donde se destacan principalmente las bombas de los hidrociclones, y las bombas auxiliares de los molinos (bombas de lubricación, de alta presión, de baja presión, de sistemas de enfriamiento, etc.).

Lo sigue en segundo lugar el funcionamiento de compresores y correas con un 3.1 y 2.5 [GWh] respectivamente (3.8 y 3.1%), en donde se destacan compresores de alta presión, compresores de embrague, correas alimentadoras, de descarga y de repotenciamiento, entre otras.

El resto del consumo eléctrico, que corresponde al 0.2% (1.3 [GWh]), se le atribuye al funcionamiento de equipos de ventilación, alimentadores (o llamados *feeders*), harneros, unidades hidráulicas (principalmente grúas), entre otros. Es este grupo el que menos potencial de ahorro energético tiene debido a su poco impacto en el consumo eléctrico de Molienda.

Al hacer ahora un análisis de la cantidad de motores auxiliares que existen de acuerdo al tipo de aplicación, se puede apreciar que se distribuyen de la siguiente manera:

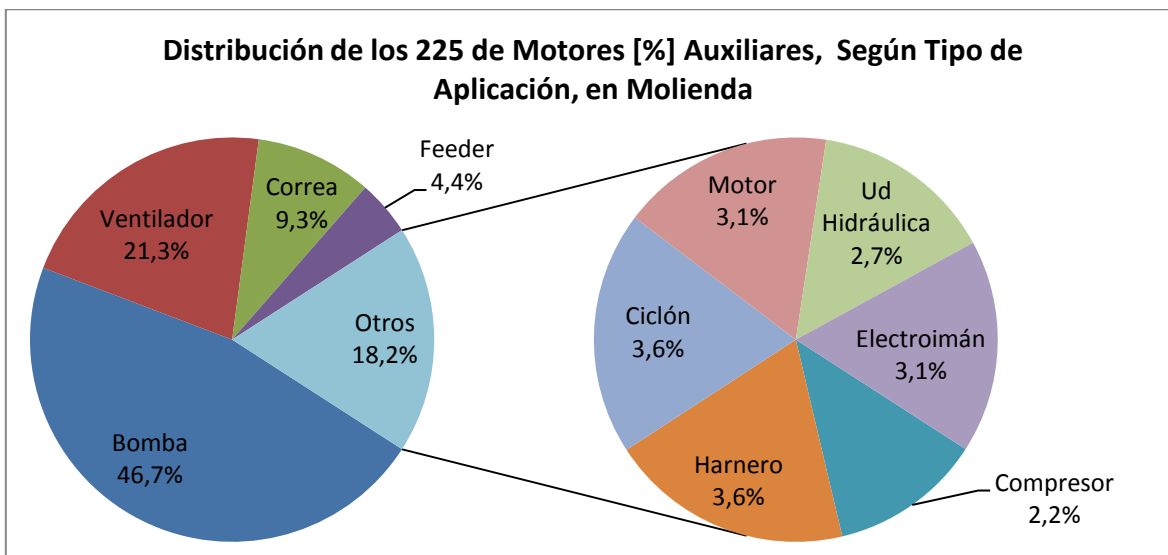


Figura 11: Cantidad de Motores [%] auxiliares Por Tipo de Equipo en Molienda
Fuente: Elaboración propia

Nótese que en cantidad, de los 225 motores auxiliares existentes, 105 de estos (46.7%) corresponden a bombas, seguido por 48 ventiladores (21.3%) y 21 correas (9.3%). Más atrás lo siguen equipos alimentadores (4.4%), 8 harneros y ciclones (3.6%), 7 motores varios (3.1%), 7 electroimanes (3.1%), 6 unidades hidráulicas (2.7%) y 5 compresores (2.2%).

Es muy importante destacar que a pesar que la menor cantidad de equipos existentes en Molienda son los compresores (5 en total), consumen cerca del 3.8% de la energía asociada a motores de inducción en Molienda (mostrado en la figura 10). Por el contrario, a pesar de la gran cantidad de ventiladores existentes en el área (48), estos sólo consumen el 0.8% de la energía. Por lo tanto, a pesar que los compresores no son el principal consumidor de energía eléctrica en Molienda, gestionar el consumo de energía eléctrica de sólo estos 5 equipos implica gestionar inmediatamente el 3.8% del total de consumo eléctrico del área.

De este modo es relevante considerar a los compresores, al igual que las bombas y correas, como los principales equipos motorizados donde se pueden aplicar mejoras que permitan aumentar la eficiencia energética de la planta. Por el contrario, atacar a otros motores asociados, por ejemplo, a la ventilación, tendría una alta dificultad de implementación, debido a la gran cantidad de equipos existentes con un bajo impacto la reducción del consumo eléctrico de la planta.

6.2.2 PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO POR RANGO DE POTENCIA EN MOLIENDA

Se plantea a continuación analizar la cantidad de energía consumida y cantidad de motores auxiliares existentes en Molienda, de acuerdo al rango de potencia de estos (a partir de los datos auditados de la tabla 9).

Si sólo se considera la cantidad de energía eléctrica consumida, el perfil energético por rango de potencia de los motores auxiliares es el que se muestra en la Figura 12.

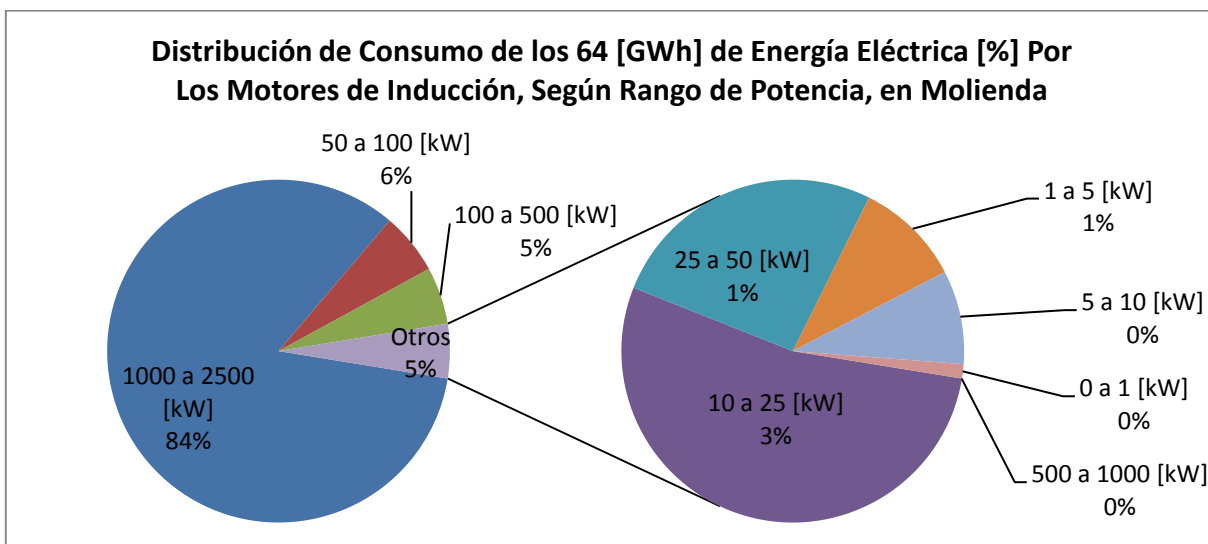


Figura 12: Energía Consumida [%] Por Motores Auxiliares, Por Rango de Potencia, en Molienda de CMDIC (2012)

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que el mayor consumo eléctrico por parte de los motores de auxiliares son los que se encuentran en el rango de potencia entre los 1.000 a 2.500 [kW], consumiendo más de 53.4 [GWh] de energía eléctrica (84% del total). Estos corresponden principalmente a las bombas de los hidrociclones (o llamadas bombas ASHMAN), que tienen una potencia nominal de 1.039 [kW] (4 en total) y 1.752 [kW] (4 en total) y no son motores eléctricos de inducción. Sin embargo, dado su tamaño y criticidad en el proceso de producción de concentrado de cobre, interferir en estos es mucho menos probable y más riesgoso que los motores de menor rango de potencia.

En segundo lugar se encuentra el consumo de energía por parte de los motores de inducción que tienen potencias nominales entre los 50 y 500 [kW], corresponden a equipos de bombas de los molinos, correas transportadoras y compresores de aire y embrague de Molienda. Estos consumen cerca de 11.2% en total, correspondiente a 7.2 [GWh] de energía eléctrica.

Para equipos menores a los 50 [kW], el consumo eléctrico total es menor al 5% del total de los motores de inducción de la planta, por lo que no es muy eficaz gestionar el consumo de energía eléctrica en estos equipos. Estos corresponden principalmente a ventiladores, unidades hidráulicas, harneros, entre otros, que consumen cerca de 3.3 [GWh] (5.1 %).

Ahora, si consideramos la cantidad de motores de inducción existentes en Molienda, de acuerdo al rango de potencia al cual pertenecen, el perfil sería el siguiente:

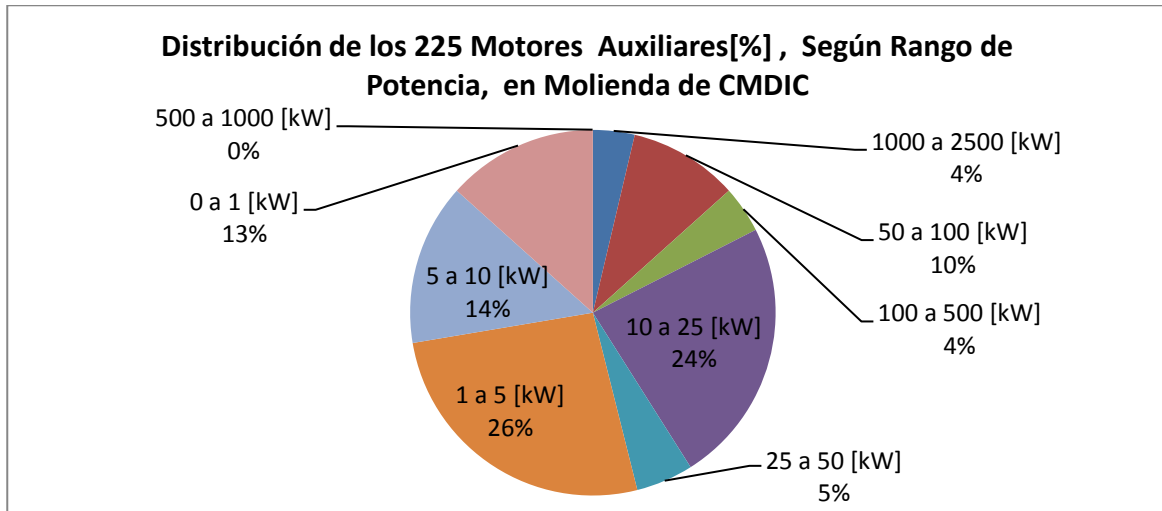


Figura 13: Cantidad de Motores Auxiliares [%] por Rango de Potencia en Molienda de CMDIC
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que la distribución de cantidad de equipos de acuerdo al rango de potencia es liderado por motores auxiliares que se encuentran entre los 1 a 5 [kW] (26%, igual a 57 equipos), seguidos por los del rango de 10 a 25 [kW] (24%, igual a 51 equipos). Por el contrario, los equipos con una potencia nominal sobre los 50 [kW] sólo abarcan el 18% de los 225 motores de inducción.

Es decir, el mayor porcentaje de motores auxiliares de Molienda tiene una potencia nominal entre 0 y 25 [kW] (74.7%), pero que consume sólo el 3.8 % de la energía eléctrica de los motores auxiliares de Molienda. Por el contrario, sólo el 17 % de los equipos, pertenecientes a motores con potencia nominal sobre los 50 [kW], consumen cerca del 95% del total de energía eléctrica.

Por lo tanto, al proponer los proyectos de eficiencia energética, el mayor impacto en el ahorro de consumo de energía, y por ende en la reducción de emisiones de GEI, se efectuará en los equipos de potencia nominal sobre los 50 [kW] y bajo los 500 [kW] (ya que estos no corresponden a motores de inducción), a pesar que estos son mucho más eficientes que los que se encuentran bajo este rango. Esto se debe a que dado que son menos en cantidad, su implementación será mucho más factible y eficaz que gestionar

el consumo de una gran cantidad de equipos que impactan en menor medida al ahorro de energía eléctrica en Molienda.

De este modo, se puede justificar que los esfuerzos para reducir el consumo eléctrico de la planta se deban concentrar en proyectos de eficiencia energética direccionados a las correas transportadoras, ventiladores mayores, compresores y bombas que se encuentran entre los 50 y 500 [kW]. Equipos por bajo esos rangos no tienen mayor influencia en la cantidad de energía de Molienda por lo que los esfuerzos implicarían beneficios mínimos.

Los equipos por sobre los 500 [kW] y menores a 2.500 [kW] no serán considerados en potenciales proyectos, debido a que la factibilidad operacional de acceder a ellos es mínima debido a que son equipos sumamente críticos en la línea de producción de concentrado de cobre. Además, estos no corresponden a motores de inducción, sino que del tipo sincrónicos.

6.2.3 PERFIL DE CONSUMO ELÉCTRICO POR HORAS DE USO ANUAL EN MOLIENDA

Ahora, si se realiza un perfil energético de acuerdo al nivel de uso de los motores de auxiliares en Molienda, es decir, clasificarlos según su consumo de electricidad de acuerdo al nivel de horas de uso anual que tuvieron durante el año 2012, se obtiene el perfil de consumo de energía eléctrica que se muestra en la Figura 14.

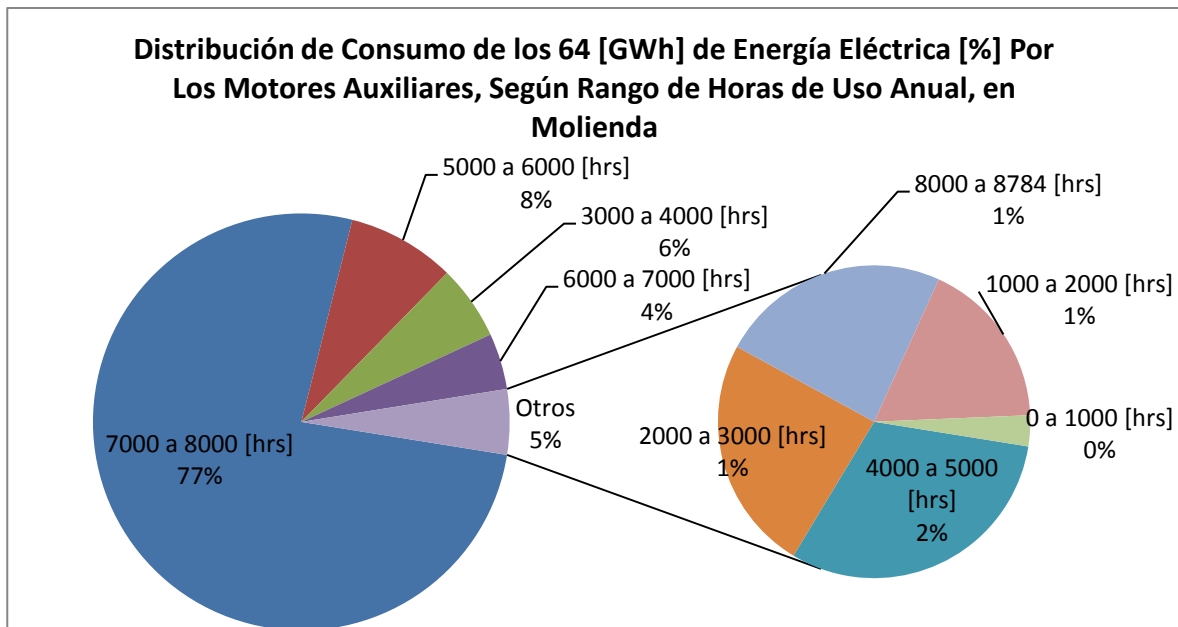


Figura 14: Perfil de Consumo Energético por Horas de Uso en Molienda
Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que, por lo general, y como es de esperar, los motores auxiliares con más horas de funcionamiento son quienes consumen la mayor porción energía eléctrica en Molienda. En efecto, quienes funcionan entre las 7,000 y 8,000 horas de uso al año consumen cerca del 77% de la energía eléctrica de Molienda.

Sin embargo, es muy interesante el hecho que los equipos que funcionan sobre las 8,000 horas al año se encuentran entre los rangos de menos consumo de energía eléctrica (1%). Esto se debe a que, a pesar de que funcionaron mayor tiempo durante el 2012, son mucho menos en cantidad que los equipos que funcionan en otros rangos de horas de operación anual, y/o su potencia nominal son menores. En efecto, esto se puede apreciar en la siguiente figura del perfil de cantidad de motores auxiliares, por horas de uso:

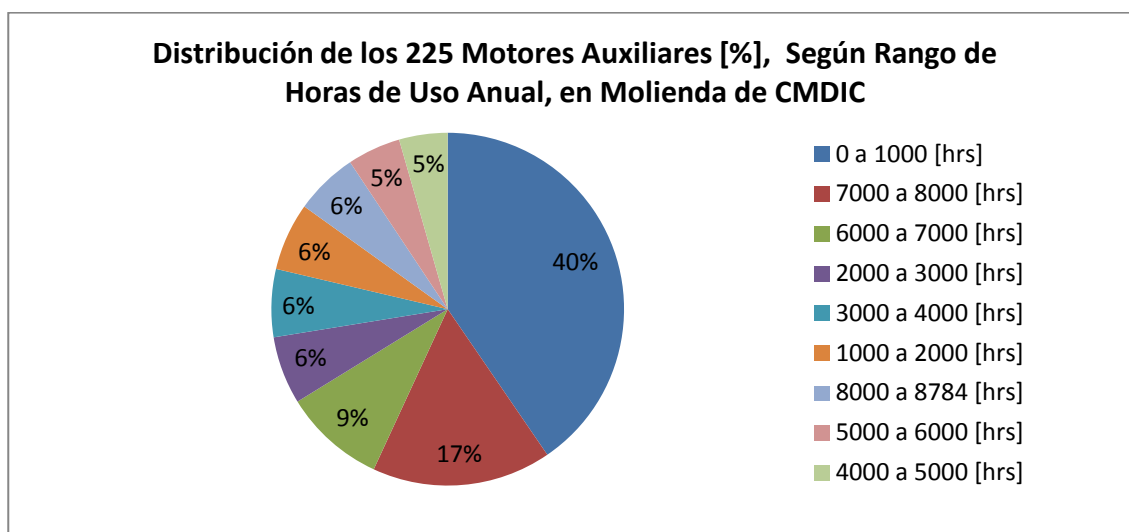


Figura 15: Cantidad Equipos Auxiliares [%], por Rango de Horas de Uso Anual, en Molienda, durante el 2012
Fuente: Elaboración propia

Nótese que los equipos que funcionan entre las 2,000 y 3,000 horas al año son mucho más en cantidad que los equipos que funcionan en los rangos de [3000-4000], [4000-5000], [5000-6000] y sobre las 8,000 horas anuales.

Se visualiza además que existen una gran cantidad de motores de auxiliares (91 en total, igual al 41% del total), que funcionan menos de 1,000 horas al año. Estos corresponden a equipos de apoyo a motores de mayor impacto en el proceso de producción, fuera de uso o que se encuentran en “Stand-By”. Claramente estos equipos prácticamente no afectan en gran medida al consumo de energía eléctrica en el proceso de producción de concentrado de cobre.

Es por ello que se puede afirmar que los equipos que presentan mayor potencial para implementar opciones de ahorro de eficiencia energética son los equipos que impactan, en mayor cantidad, el consumo de energía de Molienda. Estos equipos corresponden a

Por lo tanto, nuevamente se identifica que los compresores son equipos en que es altamente factible implementar mejoras de eficiencia energética debido a su alto consumo energético y que no impactan directamente en la continuidad del proceso de producción (sólo asisten y apoyan el funcionamiento de los equipos principales). También se deben considerar los equipos que siguen a continuación de estos, que corresponden a bombas de enfriamiento y bombas de baja y alta presión.

Esto se corrobora con los resultados del perfil energético por equipo, área y rango de potencia, que mostraron que los principales equipos con un mayor potencial para ser mejorados en términos de eficiencia energética son equipos de compresión de aire de la planta y de bombeo de equipos auxiliares (del sistema de enfriamiento, y de lubricación de alta y baja presión).

Se definen como los **equipos críticos** en consumo de energía a los que abarcan prácticamente el total del consumo de la energía de los motores de inducción (95%), donde se destacan las bombas de hidrociclones y bombas de lubricación, sistema de enfriamiento y otras de los molinos, compresores y correas transportadoras de alta potencia. Estos corresponden a los principales motores eléctricos que poseen un alto potencial para implementar proyectos que permitan reducir el consumo de energía eléctrica, y por ende, la Huella de Carbono de la compañía.

6.2.5 PERFIL DEL CONSUMO ELÉCTRICO VS PRODUCCIÓN

Si se analiza el consumo energético de los motores auxiliares de los molinos de Molienda y la cantidad de material procesado en ella, se puede apreciar que (y como era de esperar) efectivamente el consumo eléctrico sigue a la producción durante cada mes del 2012.

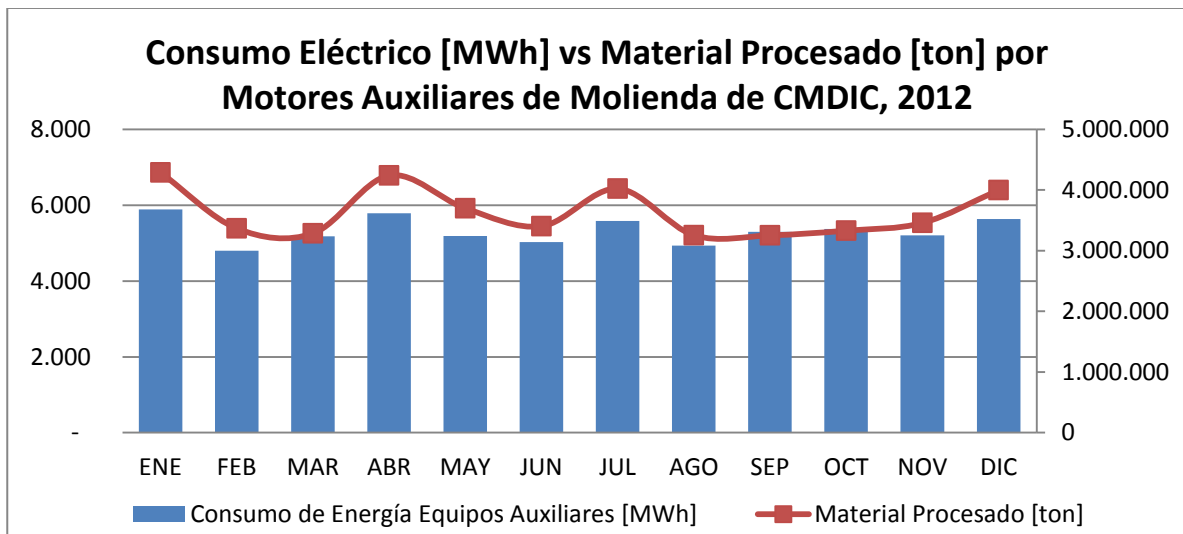


Figura 17: Consumo eléctrico y producción de Molienda y Clasificación 2012

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, es importante destacar la magnitud de la eficiencia del procesamiento de material de los motores auxiliares de Molienda (es decir, concentrado de cobre). Si se grafica la cantidad de toneladas de material procesado por unidad de energía utilizada, es decir, sin considerar el consumo de energía de molinos SAG y BOLAS, se puede tener una estimación del aprovechamiento energético de los motores auxiliares de planta en cada mes.

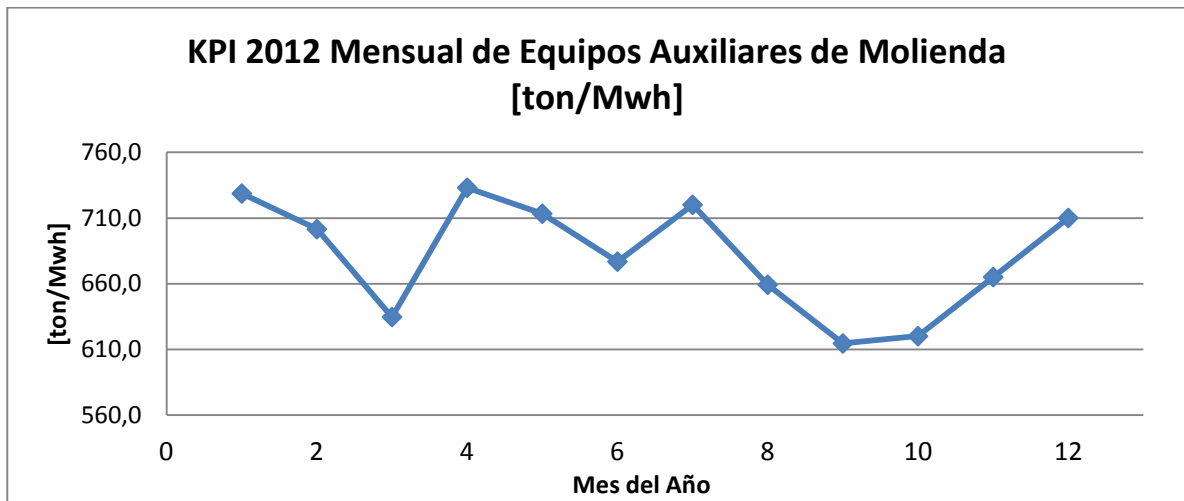


Figura 18: Eficiencia de Producción de Molienda y Clasificación, 2012
Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que durante los meses de Marzo, Septiembre y Octubre del 2012, la eficiencia de procesamiento de material cayó llegando hasta su mínimo en el mes de Noviembre (614 [ton/MWh]). Estos meses presentan bajos niveles, debido principalmente a la baja de producción que sufrió CMDIC ese año, llevándolo a producir cerca de un 37% menos que el 2011.

El promedio del año fue de 681.5 [ton/MWh], por lo que los meses de buen rendimiento (sobre el promedio) fueron los meses de Enero, Febrero, Abril, Mayo y Julio, llegando a su máximo en Abril con un 733.1 [ton/MWh].

6.3 PROYECCIÓN BUSINESS AS USUAL (BAU)

La proyección “Business as Usual” de emisiones de CO₂e por parte del área de Molienda y Clasificación se realizará tomando como año base el 2012, año en el cual se realizó la auditoría energética de la Planta Concentradora.

El cálculo de las emisiones de CO₂e sólo considerará el consumo energético eléctrico de la planta (Alcance 2) y no de consumos de combustible ni otros insumos (Alcance 1 y 3). Esto se debe a que la auditoría energética sólo consideró consumo de electricidad, que es la principal fuente de emisiones de CO₂e de la Planta Concentradora.

Para proyectar a futuro la energía que se consumirá y la cantidad de material procesado por el área de Molienda, se utilizará la proyección realizada por el área de Control de Gestión de CMDIC a través del reporte de proyección 2013-2017(Budget 2013-2017). Estos datos son los siguientes:

Tabla 13: Proyección de Material Procesado y Consumo Eléctrico Equipos Auxiliares de Molienda 2013-2017

Molienda y Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Material procesado [k ton]	43,619	50,237	52,350	52,834	55,518	55,056
Consumo Eléctrico [MWh]	63,896	70,077	74,674	75,852	78,908	75,251

Fuente: Budget 2013-2017 de Compañía, CMDIC 2012

De este modo, la cantidad de toneladas de CO₂e emitidos, usando en factor de emisión del SING, por Molienda durante los próximos años es la siguiente:

Tabla 14: Proyección de Emisión Toneladas CO₂e Emitido en Molienda por Equipos Auxiliares de Molienda

Molienda y Clasificación	2012	2013	2014	2015	2016	2017
K ton CO₂e emitido (Alcance II)	51.500	56.482	60.187	61.137	63.600	60.652
K ton CO₂e acumulado (Alcance II)	51.500	107.982	168.169	229.306	292.905	353.558

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar, en la siguiente figura, que hay una directa relación entre la cantidad de material procesado en Molienda y la cantidad de toneladas de CO₂e emitidos por el concepto de consumo eléctrico.

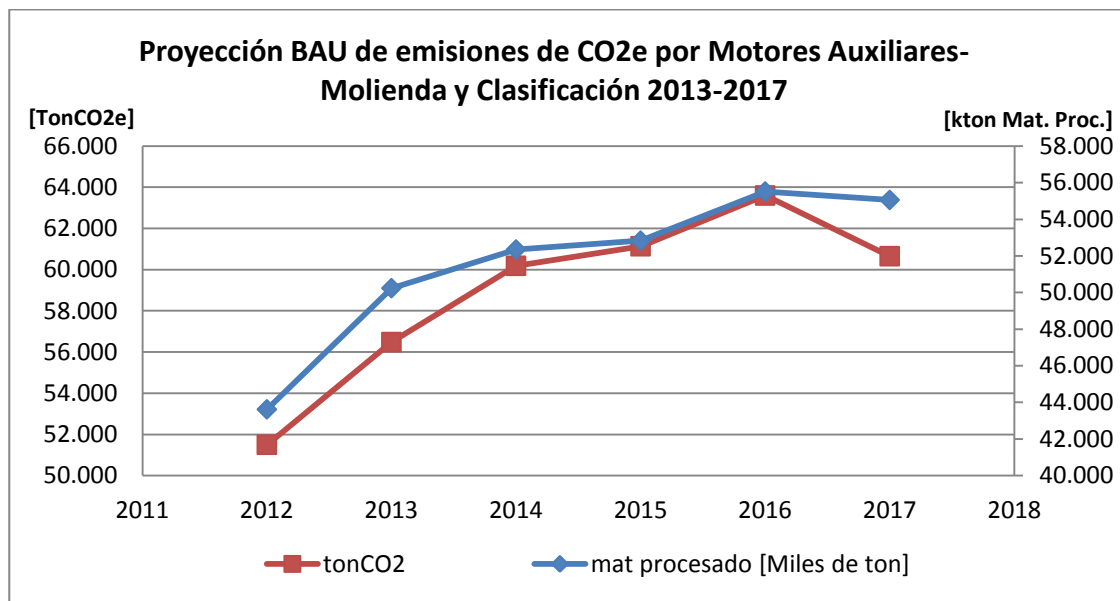


Figura 19: Proyección BAU de emisiones de CO₂e - Molienda y Clasificación 2013-2017

Fuente: Elaboración propia

Este elevado aumento, tanto del material procesado como del consumo eléctrico, se explica por el proceso de expansión que se está llevando a cabo en CMDIC. La Fase II, que finalizará a fines del segundo semestre del 2013, contempla el aumento de nivel de

material procesado por un cambio y mejoramiento de los equipos de procesamiento de concentrado de cobre.

Si evaluamos el nivel de emisión de CO₂e por cantidad de material procesado, se tiene la siguiente figura:

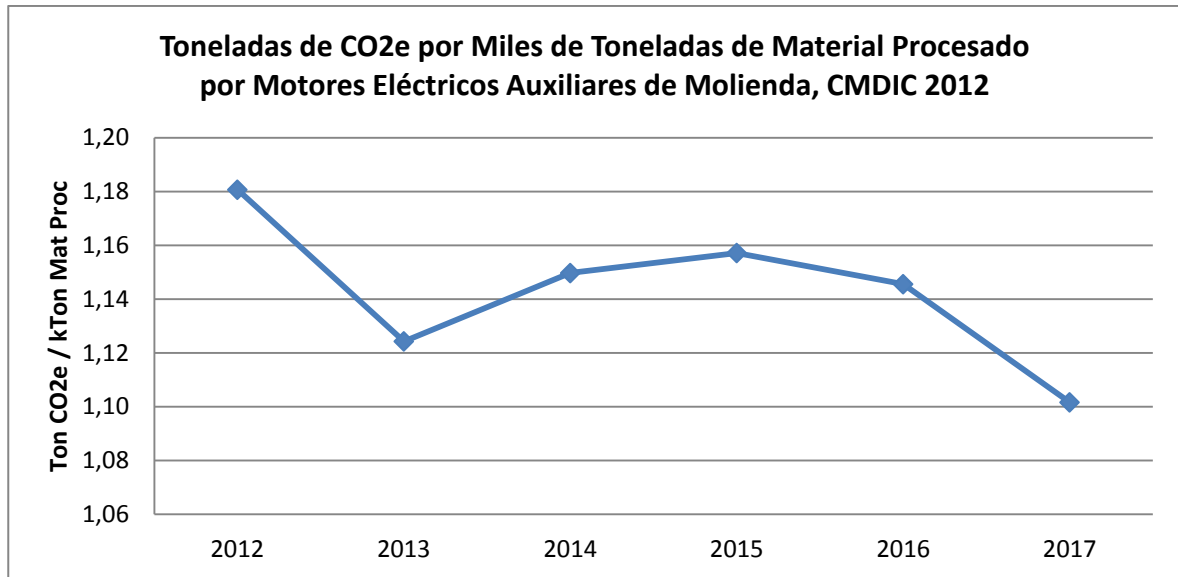


Figura 20: Proyección de CO₂e por Material procesado 2013-2017, Molienda y Clasificación
Fuente: Elaboración propia

Nótese que el nivel de eficiencia mejora considerablemente con respecto al año base (2012), ya que se emite menos toneladas de CO₂e a la atmósfera por cada mil toneladas procesadas por los motores eléctricos auxiliares de Molienda. El bajo índice de eficiencia durante el 2013 se explica por el mejoramiento de nivel de producción realizado en el área de Molienda (la línea de producción 3) durante el mes de Abril del 2013, lo que implica aumentar la cantidad de material procesado utilizando la misma cantidad de energía eléctrica de los motores del área.

De este modo, se puede prever que si los motores eléctricos auxiliares del área de Molienda y Clasificación de la compañía sigue consumiendo y procesando la misma cantidad de energía y material proyectado por el Budget 2013-2017, los niveles de eficiencia energética incrementarán debido al considerable aumento de la cantidad de material procesado en comparación al aumento de la energía utilizada, permitiendo reducir la emisión de CO₂e por concepto de consumo de energía eléctrica en los motores eléctricos auxiliares de Molienda. En efecto, el crecimiento anual promedio del material procesado es de un 4.91%, mayor al crecimiento de consumo de electricidad que es de un 3.44%.

7 PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

De acuerdo a los resultados de la auditoría energética, presentados en la línea base y perfil de consumo eléctrico de Molienda (capítulo anterior), además del trabajo en conjunto con el personal de la Gerencia de Energía de la Planta Concentradora y la Superintendencia de Eficiencia Energética, se escogieron los proyectos que se describen en los párrafos siguientes para poder construir las CCMA de GEI (Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero).

7.1 REEMPLAZO DE MOTORES DE EFICIENCIA ESTANDAR (IE1) POR MOTORES DE EFICIENCIA PREMIUM (IE3)

Los principales equipos consumidores de energía eléctrica de la zona de Molienda y Clasificación, tales como, compresores, correas y bombas fueron diseñados y puestos en operación hace más de 15 años (a comienzos de 1998). Para ese entonces no se hicieron estudios de la eficiencia de la operación de motores eléctricos, sino que más bien, se diseñó la planta en base al menor costo de inversión. Es por ello que los valores de eficiencia de los motores eléctricos no superan a los catalogados como Estándar (IE1) de la norma IEC 60034-30 (2008).

Otro antecedente importante es que los resultados de la auditoría energética realizada muestran que los equipos auxiliares del área de Molienda están sobredimensionados, en promedio, en un 39.35% respecto al consumo de potencia versus la potencia nominal¹⁸, lo que evidencia que los equipos no operan (en general) cerca de sus condiciones nominales empeorándose, por esta razón, su eficiencia. Por lo tanto, al ser además equipos no eficientes, la caída del rendimiento es mayor en comparación con motores IE2 o IE3¹⁹.

De este modo, y considerando el alto consumo energético del área, se evaluará reemplazar los motores existentes por tecnología de eficiencia Premium (IE3), de tal manera de reducir el consumo energético eléctrico de estos equipos al mejorar la eficiencia del uso de la energía eléctrica. No se considerará la evaluación de utilización de motores eficientes en nuevos proyectos ni fases de expansión, ya que la compañía no tiene como objetivo, durante los próximos años, invertir en el proyecto de expansión Fase III (aumentar al doble la producción) ya que dirigirá todos los recursos a estabilizar la operación y producción de la planta.

El objetivo del estudio es documentar el resultado de implementar un proyecto de recambio de motores ineficientes por motores de eficiencia Premium (IE3) en la

¹⁸ Fuente: Auditoría Energética del área de Molienda y Clasificación, CMDIC, 2013.

¹⁹ Ver Anexo 14.2 la reducción de eficiencia por carga no nominal de motor eficiente vs motor no eficiente

planta de tal manera que permita a las áreas de planificación y proyectos tomar decisiones de inversión y desarrollo técnico que sean económicamente viables y sustentables con el medio ambiente.

7.2 IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EQUIPOS DE CONSUMO CRÍTICO Y CARGA VARIABLE

La utilización de un convertidor de frecuencia, o también llamado variador de velocidad, puede llegar a reducir el consumo energético de una bomba o ventilador en un 50%, simplemente cambiando la velocidad del motor a la que realmente se requiere. Lo anterior implica que, a voltaje, frecuencia y velocidad nominal, el motor estaría entregando más potencia y girando a mayor velocidad que la requerida por el proceso.

Las principales bombas, correas y equipos auxiliares de la zona de Molienda presentan un alto nivel de variabilidad de carga. A modo de ejemplo, se muestra la figura 20 la variabilidad de carga, en toneladas transportadas por hora, de la correa transportadora de la Línea 1, para cuatro días distintos del mes de Octubre del 2013.

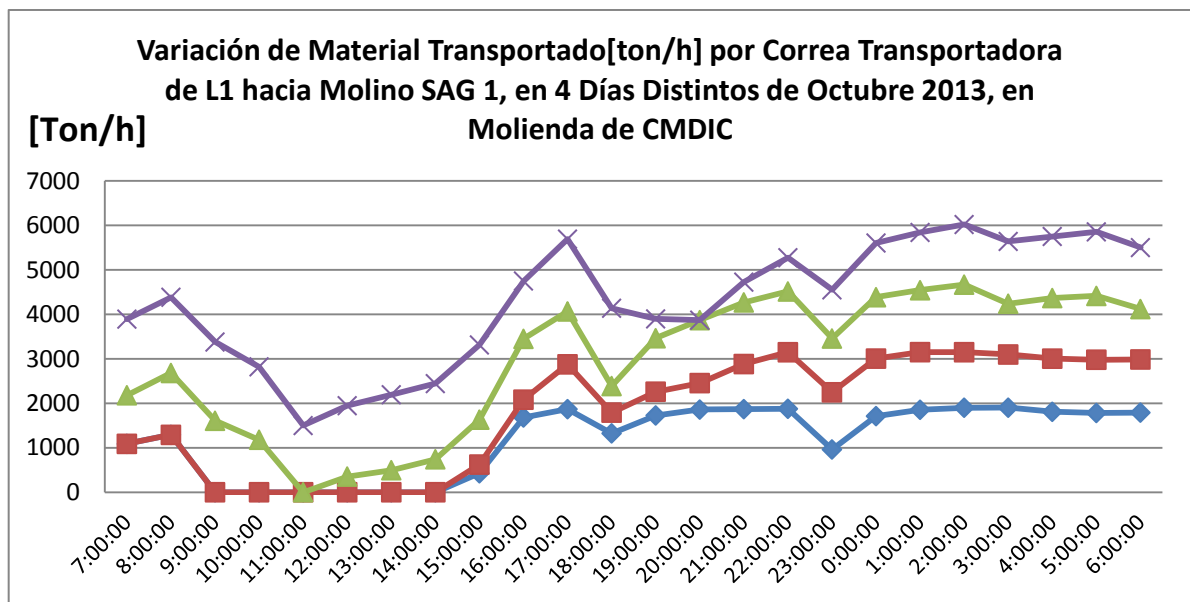


Figura 21: Variabilidad de Carga de Correa de Alimentación L1, Para Cuatro Días de Octubre 2013, en Molienda de CMDIC

Fuente: Software PI System y Elaboración Propia

Se puede apreciar claramente que el nivel de carga del material tratado, para los cuatro días mostrados en el gráfico anterior, varía considerablemente entre cada hora del día. En el mes de Octubre, se llegó incluso a una desviación estándar diaria del material transportado de 789.8 [ton/h], con una media para ese mes de 258.7 [ton/h].

Sin embargo, hay que tener en consideración que el ahorro de energía en correas transportadoras depende no sólo de la variabilidad de carga en esta. Hans Lauhoff, en su paper titulado “Control de Velocidad en Correas Transportadoras - ¿Realmente Ahorran Energía?” [25] evidencia que, dependiendo de las características del material transportado, inclinación de correa, poleas utilizadas, entre otras, podrían incluso implicar un aumento del consumo de energía al controlar su velocidad mediante el uso de VDF. Hans mostró, utilizando el método de resistencia única, que el requerimiento de consumo de energía de una correa transportadora, al variar su velocidad, disminuye si se mantiene constante el nivel de llenado o factor de carga entre el 60 y 70%. Es más, cuando el nivel de carga supera el 70%, un aumento de la velocidad de la correa implica un menor nivel de consumo de energía debido a que la energía utilizada para vencer otros tipos de resistencias (como resistencia de gradientes, de flexión de correa, de indentación de correa, etc.) cae sustancialmente. Incluso esto se da más cuando las correas transportadoras poseen un grado de inclinación mayor.

Para el caso de las correas transportadoras de la zona de Molienda y Clasificación, datos tan precisos para poder hacer una simulación similar a la de Lauhoff no son posibles de obtener (o son de muy difícil acceso). Sin embargo, se considera que el uso de VDFs en estas correas del área de Molienda es efectivo ya que la inclinación de estas es prácticamente nula (horizontales), con una capacidad por hora de llega hasta los 5000 t/h (con una media aproximadamente de 2000 t/h), dimensiones constructivas similares a las usadas en la simulación de Lauhoff, y su factor de carga se mantiene constante e igual a 63% para la mayor parte de los motores auxiliares de molienda (Véase Anexo 14.10), estimándose constante a través del tiempo.

También hay que tener en consideración que, en Molienda y Clasificación, existen algunos equipos que ya tienen implementado variadores de frecuencia. Estos corresponden a las ocho bombas de los ocho hidrociclones de las tres líneas de producción, mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 15: Listado de VDF en zona de Molienda y Clasificación

FABRICANTE	MODELO	HP	EQUIPO ASOCIADO
ROCKWELL	1557	1391	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 1
ROCKWELL	1557	1391	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 1
ROCKWELL	1557	1391	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 2
ROCKWELL	1557	1391	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 2
ROCKWELL	POWER FLEX 7000	2350	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 3
ROCKWELL	POWER FLEX 7000	2350	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 3
ROCKWELL	POWER FLEX 7000	2350	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 3
ROCKWELL	POWER FLEX 7000	2350	BOMBA DE CICLON MOLIENDA LINEA 3

Fuente: Listado de Equipos de Automatización de Planta Concentradora, CMDIC.

Estos variadores de frecuencia funcionan debido a la alta variabilidad de material, proveniente de los molinos BOLA de cada línea, que es bombeado por los motores de los hidrociclones hacia los ciclones respectivos. Nuevamente, a modo de ejemplo, se puede apreciar en la siguiente figura la variabilidad horaria de concentrado de cobre bombeado por el hidrociclón 1 de la línea 1 para cuatro días distintos del mes de Octubre del 2013.

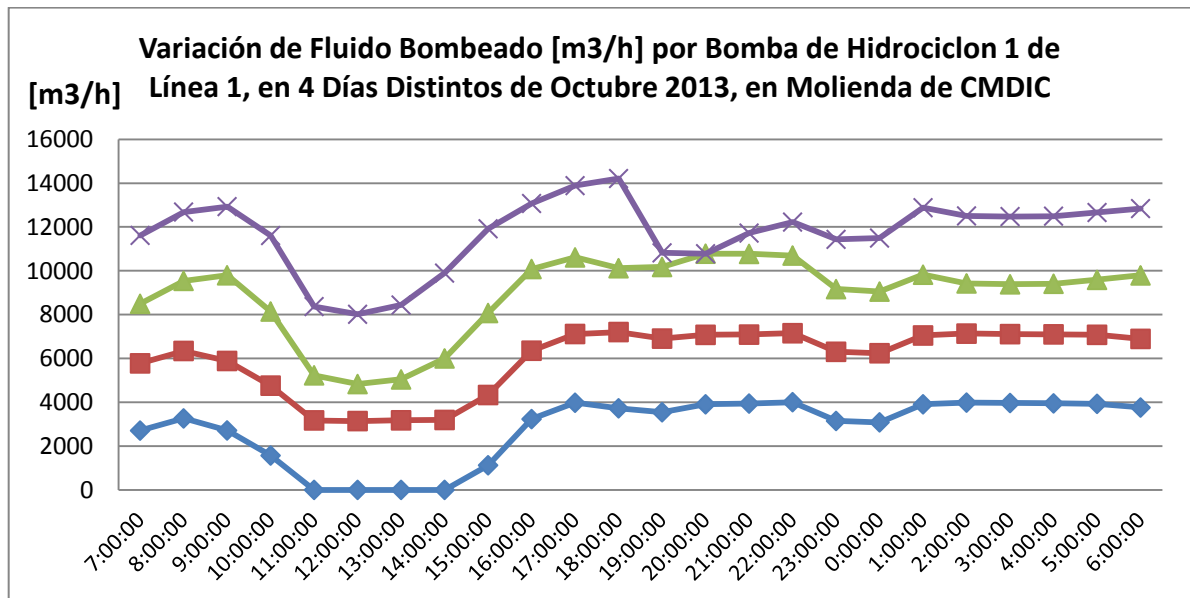


Figura 22: Variabilidad de Carga de Bomba de Hidrociclón 1 L1, Para Cuatro Días de Octubre 2013, en Molienda de CMDIC
Fuente: PI System y Elaboración Propia

La desviación estándar de bombeo de material para la bomba 1 de la línea 1 de los hidrociclones llegó como nivel máximo a 1,861 [m3/h] en un día, con un promedio de 538.4 [m3/h].

Por lo tanto, para los equipos de alto consumo energético que no tienen ningún mecanismo de control de velocidad, como correas, y bombas auxiliares (bombas de lubricación, sistema de enfriamiento, etc.) que apoyan el funcionamiento de los molinos, se estudiará el potencial de ahorro energético al implementarle un VDF, dado su alta variabilidad de carga.

Los equipos considerados para el estudio de implementación de variadores de frecuencia son aquellos que poseen una potencia sobre los 18.5 [kW], donde 40 corresponden a equipos de 4 polos, 2 de 2 polos y 8 de 6 polos, y que (en su mayor proporción) pertenecen a las zonas de elevado sobredimensionamiento estimado por la auditoría realizada (línea 3).

7.3 IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y MOTORES IE3 EN EQUIPOS DE CONSUMO CRÍTICO DE MOLIENDA

Adicionalmente se realizará una evaluación económica de implementar en los equipos críticos anteriormente nombrados los dos mecanismos de ahorro de energía propuestos, es decir, recambiar la tecnología de motores de eficiencia estándar (IE1) por motores catalogados como eficiencia Premium (IE3) y además acoplar un VDF que permita hacer un seguimiento de la potencia necesaria en estos equipos.

Esto permitirá que el ahorro energético potencial en estos equipos sea analizado considerando dos opciones, cambio de motor y control de velocidad, a pesar que aquello implique un mayor costo de inversión. De este modo se reduce su consumo energético, permitiendo reducir más las emisiones de CO₂e que se emiten durante la operación del área, producto de la implementación de las dos opciones antes citadas.

Tanto los costos, inversiones, consideraciones y otros supuestos que se utilizarán serán los mismos que en los proyectos anteriores, es decir, los que se obtienen de las cotizaciones realizadas a empresas calificadas en estos tipos de equipos.

8 EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

8.1 CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

Para el estudio el siguiente estudio se consideró los siguientes elementos:

a. Parámetros Económicos

Los parámetros utilizados para evaluar los tres proyectos son:

Tabla 16: Datos Económicos para el futuro análisis

Parámetro	Valor	Unidad
Precio de la Energía	113	[USD/MWh] ²⁰
Costo de Mantenimiento anual	3%	[c/r a costo de operación] ²¹
Tasa de descuento	10%	[%]
Vida útil	10	[años]

Fuente: Elaboración propia

El precio de la energía utilizado se basa en el precio de referencia para evaluar proyectos de eficiencia energía en la Superintendencia Eficiencia Energética, y corresponde al valor medio que paga Collahuasi por concepto de consumo de energía eléctrica en sus contratos de energía al año 2012. Este valor se encuentra entre los valores elevados en relación al costo marginal real del SING, el que en Diciembre del 2013 fluctuaba ente los 43 y 368 [USD/MWh], con un promedio de 99.8 [USD/MWh]²².

La tasa de descuento utilizada, 10%, es un valor conservador y recomendado por los mismos proveedores a los cuales se le realizaron la cotizaciones de los equipos considerados.

La vida útil de los proyectos corresponde a la vida útil de los equipos propuestos en los mismos proyectos de eficiencia energética, y que fue entregado por el proveedor correspondiente al cual le fue realizado la cotización de precio de equipos.

²⁰ Valor utilizado por Samir Farah G., "Metodología para la determinación de CCMA de GEI para CMDIC", 2012 [15]

²¹ Fuente: "Eficiencia Energética en Motores Eléctricos", U. del Atlántico y U. Autónoma del Occidente [6]

²² Fuente: Valores reales en barra Crucero 220 [kV], desde página oficial del CDEC-SING

b. Pérdidas de eficiencia en motores

Se consideró, aparte de la eficiencia nominal de los motores, la pérdida de eficiencia por concepto de factor de carga real, altura geográfica de la planta y temperatura media de la zona (Anexo 14.2).

c. Costos

- **Costo del Equipo:** Viene dado por el valor entregado por una empresa de prestigio internacional y experta en eficiencia energética en motores (se reserva el nombre).
- **Costo de Instalación y Logística:** Contempla los costos de horas-hombre (HH), costos de alojamiento de personal, traslado, alimentación, etc. Todos estos datos son referenciados tanto por el mismo proveedor como por costos que contempla CMDIC.
- **Costo de Traslado de Equipos:** El costo de traslado de equipos, desde Santiago hasta la zona de Ujina (faena), es cotizado por una empresa de alto prestigio en traslado de cargas en todo Chile (se reserva el nombre).

Este costo de traslado utilizado se estima de acuerdo al precio de traslado cotizado por un camión de la empresa versus la capacidad de traslado de ese camión (volumen), teniendo así un precio de traslado unitario, en [USD/m³]. De este modo, y con las dimensiones de cada uno de los equipos obtenidas desde la ficha técnica del proveedor de equipos eléctricos, se tiene un precio estimado de traslado por cada equipo cotizado.

- **Costos de Inversión Total:** Corresponde a la suma total de los costos del equipo, instalación, logística y traslado.

d. Indicadores Económicos de Evaluación Técnico-económica

Con respecto a los resultados, se utilizarán los principales índices económicos recomendados en la evaluación de proyectos de eficiencia energética [38]. Estos son: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Tiempo de Recuperación o PayBack (Anexo 14.3).

e. Evaluación técnico-económica

La evaluación técnico económica de los proyectos considera mostrar los indicadores económicos propuestos para cada grupo de motores y proyectos con respecto a los tres escenarios de crecimiento definidos.

Para el caso de los variadores de frecuencia (VDFs), se considerará una reducción de velocidad del 10% con respecto a la nominal e implementados sólo en motores definidos como críticos en consumo energético.

f. Análisis de Resultados

Al momento de analizar los resultados obtenidos, se incluirán las siguientes consideraciones para cada proyecto:

- **Reemplazo de motores:** Se incluirá, fijando el escenario normal, un análisis de resultados separando los motores de acuerdo a las siguientes características:
 - Tipo de motor v/s Rango de potencia
 - Tipo de Motor vs/ Horas de uso
 - Rango de Potencia v/s Horas de uso

De este modo, se podrá identificar, con mayor detalle, el rango de potencia y las características de operación, de los motores de eficiencia estándar que se sugiere reemplazar por motores de eficiencia Premium.

- **Implementación de Variadores de Frecuencia:** Fijando una reducción general de velocidad de operación en un 10%, se hará un análisis de la factibilidad y rentabilidad de la implementación citada, separando nuevamente por tipo de motor, rango de potencia y horas de uso.
- **Implementación de Variadores de Frecuencia y Reemplazo de Motores en equipos críticos:** Para la evaluación de la implementación conjunta de motores Premium y controladores de velocidad en equipos críticos, se considerará una reducción de velocidad del 10% en los tres escenarios anteriormente definidos.

8.2 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

8.2.1 REEMPLAZO DE MOTORES DE EFICIENCIA IE1 POR EFICIENCIA IE3

Los resultados de la evaluación económica de este proyecto, para cada grupo de equipos, se muestra en la tabla 35 (Anexo 14.6.1). El resumen de este se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 17: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Reemplazo de Motores de Eficiencia IE1 por IE3

Tipo	Rango Potencia	Velocidad	Inversión Total	VAN		TIR medio	PayBack medio
	[kW]	[rpm]	[USD]	[USD]	[%]	[años]	
Ventiladores	1-20	1500	34,929	4,784	9.4%	7.8	
	1.5-7.5	3000					
Correas	5.6-112	1500	251,948	-	126,155	5.7%	13.2
Bombas	75	1000	339,827	-	191,885	-2.6%	26.3
	1-112	1500					
	22	3000					
Compresores	55-112	1500	49,245	7,435	13%	8.5	
Otros Motores	0.37-4.7	1500	34,680	-	6.304	5.8%	13.4

Fuente: Elaboración Propia

La tabla 17 muestra el resumen del análisis técnico económico del proyecto de reemplazo de motores de eficiencia IE1 por motores de eficiencia IE3, de acuerdo al tipo de aplicación del motor. Se muestra en esta tabla el rango de potencia y velocidad de operación de cada grupo de motores correspondientes, con el valor de la inversión total y el VAN, TIR y PayBack medio de cada uno de estos.

La fila “otros motores”, incluye los motores utilizados en otras aplicaciones que no se encuentran en las anteriores, tales como uso de harneros, sistemas hidráulicos, chutes móviles, electroimanes, etc.

Nótese que para la mayor parte de los casos, y como era de esperar, realizar un recambio a nivel general en los motores ineficientes del área de Molienda implica un VAN negativo, y con TIRs muy desfavorables. Es por ello que es fundamental, al momento de escoger los equipos para hacer el recambio de tecnología del motor, hacer una evaluación técnico-económica de acuerdo a rangos de potencia, nivel de horas de uso de los equipos y tipo de aplicación al cual se ve enfrentado el motor eléctrico. De este modo, se puede identificar que motores y con qué características específicas de

operación y constructivas tienen mayor potencial de producir un ahorro energético (y monetario) para la empresa.

El único caso de recambio de motores en donde se tiene un retorno económico positivo y una TIR aceptable, a nivel general, es para los compresores de aire de Molienda, con valores de 7,435 [USD] y 13% respectivamente. Estos corresponden a motores de inducción de potencias nominales entre los 90 y 112 [kW], con un nivel de horas de uso superior a las 7.000 horas al año.

El desglose de este resultado, de acuerdo a la clasificación de motores según rango de potencia, tipo de aplicación y horas de uso, se encuentra en el capítulo siguiente denominado “Análisis de Resultados”.

8.2.2 IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN EQUIPOS DE ALTA VARIABILIDAD DE CARGA

Del mismo modo, los resultados obtenidos de la evaluación económica de este proyecto, para cada grupo de equipos se muestran en la tabla 36 (Anexo 14.6.2). Su resumen de este se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 18: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Implementación de VDFs en Equipos Críticos

Tipo	Rango Potencia	Velocidad	Inversión	VAN	TIR	Pay Back
	[kW]	[rpm]	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Correas	19-373	1500	323,928	- 80,098	1,8%	21.7
Bombas	19-112	1500	545,673	360,055	22,2%	6

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que para las bombas, equipos que varían la potencia con respecto a la variación de velocidad de manera cuadrática (par cuadrático, definido en el capítulo 3.3.1), se ven claramente que el beneficio de utilizar variadores de velocidad es muy recomendable. Sin embargo, al igual que el comentario del párrafo anterior, es indispensable hacer un desglose de la evaluación económica de acuerdo a las características de potencia nominal y horas de uso del motor, que se encuentra en el capítulo siguiente.

Sin embargo, es muy importante aclarar que en la evaluación del ahorro energético mediante el control de velocidad, el nivel de carga sobre motor en cuestión. Debido a que no existe una medición de la carga o el consumo de energía real por equipo, lo que se utiliza es el nivel medio de carga de la línea de producción asociada, calculado con la energía total consumida en dicha zona versus la energía consumida, estimada con la

potencia nominal y las horas de uso de los equipos. Para el caso de las bombas y correas pertenecientes a la línea 1 y 2, su nivel de carga corresponde al 79%, y las correas y bombas de la línea 3 tienen un nivel de carga de un 63%. El detalle del cálculo del factor de carga, para cada zona línea de producción, se especifica en el Anexo 14.7.

8.2.3 USO DE VARIADORES DE FRECUENCIA Y REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN BOMBAS Y CORREAS

Finalmente, los resultados de la evaluación económica de este proyecto, para cada grupo de equipos, se muestra en la tabla 37 (Anexo 14.6.3). Igualmente, el resumen de este se puede apreciar en la siguiente tabla:

Tabla 19: Resumen de Resultado de Análisis Técnico-Económico de Proyecto de Reemplazo de Motores de Eficiencia IE1 por IE3 e Implementación de VDFs en Equipos Críticos de Molienda y Clasificación

Tipo	Rango Potencia	Velocidad	Inversión	VAN	TIR	Pay Back
	[kW]	[rpm]	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Correas	19-373	1500	591,374	- 267,088	-1.9	27
Bombas	19-112	1500	842,431	149,546	14.6%	8.1

Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar en la tabla 19, en comparación con la tabla 18 anterior, que al incorporar un recambio de motores en los mismos equipos a los cuales se les instalaría un variador de velocidad, que el VAN es considerablemente menor. Esto se debe a que el reemplazo de motores de estos equipos es un proyecto que, económicamente hablando, no se sustenta pues el tamaño del equipo y la inversión asociada a este nuevo motor supera considerablemente el ahorro monetario obtenido al reducir el consumo de energía eléctrica.

Por lo tanto, para este tipo de equipos, sólo se recomienda la implementación de variadores de velocidad en motores que funcionen acoplados a bombas, tales como las bombas de lubricación de alta y baja presión, y bombas del sistema de enfriamiento de los molinos.

9 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de la evaluación técnico-económica, tanto desde las tablas anteriores (Tablas 17, 18, 19) como de las tablas completas con la evaluación completa (véase en Anexo 14.6), el análisis correspondiente es el siguiente:

9.1 ANALISIS DE PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

Se pudo observar que el recambio de motores a nivel general no es económicamente atractivo para la empresa, evidenciado por la gran cantidad de VAN negativos y bajo nivel de TIRs. Los períodos de recuperación de inversión (PayBacks) superan, para la mayoría de los casos, las vidas útiles de los proyectos (10 años), por lo que realizar este recambio tecnológico de motores a nivel global en Molienda y Clasificación no es una opción económicamente recomendable para la compañía.

Sin embargo se puede apreciar algunas excepciones, como es el recambio de motores en equipos compresores y algunos de ventilación.

Apreciando la tabla 38 del Anexo 14.6.1, el que presenta mayor VAN es el recambio de motores en los **compresores de aire de la planta**, con 7.085 [USD], pero con un retorno de la inversión en 7 años (muy alto). Este VAN positivo, a diferencia de los demás, se debe principalmente a la gran cantidad de horas de uso anual de estos equipos (promedio 7.270 [hrs] al año), lo que genera un alto ahorro de consumo de energía que permite recuperar la inversión realizada antes de los 10 años de vida útil.

El otro equipo favorable para recambiar sus motores son los **ventiladores de molinos y compresores** con un VAN de 3.977 y 2.232 [USD] respectivamente. Sin embargo el periodo de recuperación de capital supera los 6 años, lo que para un proyecto de este tipo tampoco es muy atractivo. A diferencia de los anteriores, los motores de **ventiladores de bombas** simplemente no se consideran viables para el recambio de su motor ya que el retorno de inversión es en casi 10 años (prácticamente igual a su vida útil), a pesar de que presentan un VAN positivo (589 [USD]).

Para el caso de los motores de **compresores de embrague** el panorama es similar al de los ventiladores de bombas. Su VAN positivo (351 [USD]) no es suficiente para considerarlos como un proyecto favorable, ya que el tiempo de retorno de inversión también es prácticamente 10 años.

Sin embargo hay que tener en cuenta que los resultados obtenidos sólo muestran la evaluación conjunta de motores de un tipo de aplicación similar, sin separarlos por otras características. Es por ello que a continuación se hace un análisis de la evaluación de

recambio de motores de acuerdo a sus rangos de potencia, tipo de aplicación y horas de uso anual. Es por ello que a continuación, en los siguientes párrafos, se desglosa esta evaluación económica de acuerdo a la clasificación por el nivel de horas de uso anual, rango de potencia y tipo de aplicación al cual está asociado el motor.

9.1.1 ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA

Si se separan los equipos por las horas de uso anual que tuvieron el año 2012 (registrado por el PI System) versus el rango de potencia, y se evalúa el recambio de motores en un escenario normal, los resultados con VAN positivo son los que se muestran en la tabla 20:

Tabla 20: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por rango de potencia y horas de uso.

Horas de uso		Rango de Potencia [kW]		Inversión	VAN	TIR	PayBack
min	Max	Min	Max	[USD]	[USD]	[%]	[años]
6000	7000	1	5	9,143	587	11%	9.2
		10	25	8,333	3,429	18%	6.4
		100	500	25,858	3,429	13%	8.5
7000	8000	1	5	9,625	1,224	13%	8.5
		5	10	9,662	4,729	20%	6
		10	25	12,899	4,582	17%	6.7
		25	50	5,631	1,913	17%	6.8
		100	500	12,929	4,566	17%	6.7
8000	8784	1	5	5,099	1,977	18%	6.5
		5	10	1,560	1,015	23%	5.3
		10	25	3,229	2,772	26%	4.6

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que, y comparando con los resultados de la tabla 41 (Anexo 14.7.1.1), el recambio de motores es mucho más viable para los equipos que se encuentran en rangos de potencia entre los 1 y 500 [kW], a excepción de motores con sobre 8.000 horas de uso y que posean potencias sobre los 100 [kW]. Estos últimos corresponden a equipos que, debido a su gran tamaño y potencia, no permiten obtener ahorros económicos suficientes para recibir beneficios antes de los 10 años.

Se puede apreciar que incluso se puede alcanzar a TIRs que bordean el 26% con un tiempo de retorno de inversión de 4.6 años (motores entre 10 y 25 [kW] de más de 8.000 horas de uso), es decir, recambiar motores de equipos específicos y con determinadas características de operación es mucho más beneficioso que hacerlo de manera global para un conjunto de equipos que operan en aplicaciones similares. Esto

se debe a que las horas de uso de los motores son un parámetro importante en el cálculo del payback de la sustitución de motores poco eficientes.

Por lo tanto, bajo la evaluación por horas de uso y rango de potencia, se recomienda tener en carpeta los proyectos de reemplazo de motores de Molienda y Clasificación para equipos de altas horas de uso anual (sobre las 6.000) y con potencias nominales entre 1 y 500 [kW], a excepción de motores sobre los 100 [kW] con más de 8.000 horas de uso.

9.1.2 ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO

Ahora, para determinar qué tipo de equipos son los que tienen mejores retornos al recambiar sus motores estándar por motores de eficiencia Premium, se hace un análisis de acuerdo a las horas de uso versus el tipo de aplicación de estos. Los resultados, considerando nuevamente los casos con VAN positivos, son los siguientes:

Tabla 21: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por horas de uso y tipo de equipo.

Horas de uso		Tipo	Inversión	VAN	TIR	PayBack
Min	Max	-	[USD]	[USD]	[%]	[años]
6000	7000	Correa	3,229	1,182	17%	6.7
		Bomba	7,422	2,119	16%	7.2
		Compresor	25,858	3,429	13%	8.5
		Electroimán	1,856	513	16%	7.3
7000	8000	Otros Motores	3,120	1,817	22%	5.6
		Ventilador	16,813	3,688	15%	7.7
		Correa	3,968	2,257	21%	5.6
		Bomba	17.238	3,990	15%	7.6
		Compresor	12,929	4,566	17%	6.7
8000	8784	Motor	1,560	1,015	23%	5.3
		Ventilador	7,937	3,908	20%	6
		Compresor	12,929	6,230	20%	6
		Electroimán	928	697	25%	4.9

Fuente: Elaboración Propia

De igual manera se aprecia que, comparando con la tabla 42 (Anexo 14.1.1.2), en los motores de compresores y electroimanes, los que funcionan sobre las 6.000 horas anuales son quienes presentan beneficios económicos positivos. Estos incluso pueden llegar a tener una TIR de 20 y 25% respectivamente, haciéndolo mucho más rentables que hacer el recambio de motores a nivel general.

Del mismo modo, para el caso de ventiladores y otros motores de Molienda es necesario que al menos funcionen 7.000 horas al año para percibir retornos, de tal manera se puede obtener incluso un TIR del 22 y 23% respectivamente.

En las correas transportadoras se aprecia que a partir de las 8.000 horas de uso, su recambio de motor se hace inviable económicamente ya que ahí se encuentra el funcionamiento las correas de repotenciamiento de Pebbles (373 [kW]), donde la inversión necesitada también supera al beneficio económico obtenido por el ahorro de electricidad consumida.

9.1.3 ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO VS RANGO DE POTENCIA

Considerando los análisis anteriores, lo que se desea ahora es determinar que rango de potencia y para qué tipo de aplicación de motores se recomienda hacer una actualización de tecnología. Para ello se analizó considerando el tipo de equipo versus el rango de potencia, obteniendo los siguientes equipos con beneficios económicos positivos:

Tabla 22: Resultado económico de reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda con VAN positivo, por rango de potencia y tipo de equipo

Tipo	Potencia		Inversión	VAN	TIR	PayBack
	Min	Max	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Motor	5	10	4,680	2,832	22%	5.5
	10	25	6,458	389	11%	9.2
Ventilador	1	5	15,060	2,933	14%	7.9
	5	10	3,422	568	14%	8.1
	10	25	12,334	558	11%	9.4
Correa	5	10	3,120	2,345	25%	4.9
Compresor	100	500	51,716	14,225	16%	7.3

Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente se corrobora que al comparar con la totalidad de los casos (Tabla 43, Anexo 14.1.1.3), exceptuando algunos motores de compresores, ventiladores y correas, el recambio de tecnología del motor a nivel general no entrega beneficios económicos en términos generales.

Ahora, para el caso de los motores de compresores se aprecia que tanto el VAN como TIR es favorable para equipos con potencias entre los 100 y 500 [kW]. Estos corresponden a los compresores de aire, que tienen una potencia nominal de 112 [kW] y con un promedio de uso de 7.270 horas/año.

En el caso de los ventiladores, los que presentan más beneficios son los que tienen potencias entre los 1 y 5 [kW], correspondientes a equipos auxiliares de ventilación de equipos principales. Entre los 5 y 25 [kW], a pesar de tener un retorno positivo, no se compara con el rango anterior debido a su bajo VAN.

También existen correas y otros motores entre 5 y 10 [kW], que tienen un VAN entre los 2.300 y 2.900 [USD] con un retorno de la inversión en cerca de 5 años. En el caso de las correas corresponden a las que alimentan y descargan los molinos BOLA con potencias de 5.6 y 7.5 [kW], y con un nivel de uso entre las 7.100 y 7.300 horas al año respectivamente. Para los otros motores (catalogados simplemente como motores), corresponden a chutes móviles de potencias de 5.6 [kW] y casi 7.800 horas de uso anual.

De este modo, considerando este y los dos análisis anteriores, se puede afirmar que es mucho más recomendable hacer un reemplazo de motores de eficiencia estándar (IE1) por motores de eficiencia Premium (IE3) de aquellos que funcionen de acuerdo a ciertas características de operación, tamaño y aplicación específicas que de manera general.

Así, si sólo se implementan recambios de motores que entregan beneficios económicos, el VAN total asciende los 30.364 [USD] con un período de recuperación de 6.6 años y una tasa interna de retorno que bordea el 17%, al contrario de que si se implementan en todos los equipos, ya que implican costos de 312.124 [USD].

9.2 ANALISIS DE PROYECTO DE IMPLEMENTACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA EN BOMBAS Y CORREAS DE MOLIENDA

Los resultados de implementar variadores de frecuencia en los motores de equipos críticos de Molienda y Clasificación, reduciendo en un 10% su velocidad de operación, y dejando los motores existentes, muestran mucho más beneficios en comparación con el proyecto anterior, con excepción de las correas de alimentación, descarga y repotenciamiento.

Se aprecia, de la tabla 39 (Anexo 14.6.2), que para el caso de las bombas de Molienda, son el grupo de bombas de alta presión, bombas de sistema de enfriamiento y bombas de empuje (y piso) las que presentan mejores retornos económicos (273.199, 56.771 y 28.232 [USD] respectivamente) y con un tiempo de recuperación de inversión cerca de los 4-5 años. Esto se debe principalmente a que dichos equipos corresponden a cargas del tipo “par cuadrático”, es decir, varía la potencia consumida con el cubo de la reducción de velocidad de operación. De este modo, reduciendo al 90% su velocidad de operación con respecto a la nominal permite un ahorro de energía en un 27% aproximadamente.

Por el contrario, para las bombas de baja presión el retorno se logra casi a los 10 años, por lo que no se considera aceptable a pesar de su VAN positivo (1.854 [USD]). Esto se debe a su menor potencia y cantidad de horas de uso al año que las anteriores (2.793 horas anuales promedio), lo que implica un menor ahorro energético, y por ende, mayor retraso para recuperar la elevada inversión realizada.

En cambio las correas, tanto de alimentación, descarga y repotenciamiento, presentan altos costos económicos si se les regula la velocidad, ya que la inversión se paga en mucho más años que su vida útil (TIR negativa). Por lo tanto, estos equipos no son de recomendación para implementar un VDF a nivel general. Recordar también que esto depende sólo si el nivel de carga se mantiene constante y entre el 60% y 70%, tal como lo afirmó Lauhoff en su paper [25], debido a que a mayor nivel de carga el nivel de pérdidas por el roce aumenta considerablemente.

Sin embargo, y al igual que en el análisis anterior, la evaluación de implementación de VDFs en equipos críticos se realizó en grupos de motores de iguales características aplicación, sin diferenciar su cantidad de horas de uso y potencias nominales. Es por ello que a continuación se separará nuevamente el análisis de acuerdo a las horas de uso anual, rango de potencia al que pertenecen y tipo de aplicación del motor.

9.2.1 ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA

Si se hace un análisis de la implementación de VDFs en equipos críticos separado por horas de uso y rango de potencia del motor, con una reducción del 10% de velocidad, los resultados de quienes permiten beneficios económicos son los siguientes:

Tabla 23: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por rango de potencia y horas de uso.

Horas de uso		Potencia		VAN	TIR	PayBack
min	Max	Min	Max	[USD]	[%]	[años]
2,000	3,000	100	500	11,107	18%	6.5
3,000	4,000	50	100	64,617	23%	5.2
		100	500	53,675	28%	4.4
4,000	5,000	10	25	3,029	13%	8.5
		50	100	10,740	15%	7.4
5,000	6,000	10	25	6,776	22%	5,4
		50	100	183,736	44%	2.7
7,000	8,000	10	25	31,006	35%	3.5
		25	50	32,826	49%	2.5
8,000	8,784	100	500	16.387	113%	8.3

Fuente: Elaboración Propia

Para equipos con un rango de potencia entre los 10 y 25 [kW], es necesario que funcionen al menos 7.000 horas al año para recomendar una implementación de VDF, teniendo un TIR hasta de un 35% y recuperación de la inversión en 3 años. No se considera viable los equipos de este rango de potencia que operan entre las 4.000 y 5.000 horas al año, ya que a pesar de su VAN positivo su PayBack es casi de 9 años.

Para equipos que pertenecen al rango de potencia de 25-50 y 50-100 [kW], es necesario que funcionen al menos 7.000 y 3.000 horas al año respectivamente. De este modo, se pueden percibir beneficios económicos ya a partir del segundo y tercer año, con TIR que llegan incluso a un 49% y 44% respectivamente.

Para motores de equipos con potencias sobre los 100 [kW], basta que se encuentren funcionando sobre las 2.000 horas al año para obtener beneficios al implementar un VDF. Sin embargo los retornos de inversión ocurren mucho más tarde que los equipos con menor potencia, ya que el costo del variador aumenta considerablemente. Así, el TIR máximo que se obtienen en estos motores apenas alcanza el 28%, muy por debajo al que obtienen equipos entre los 25 y 100 [kW].

Por lo tanto se puede afirmar que a un mayor nivel de horas de operación de los equipos implica más posibilidades de que la implementación de un VDF sea aceptada. Sin embargo, no ocurre lo mismo con respecto al nivel de potencia nominal del motor, ya que si este aumenta demasiado la inversión, el VAN y la TIR asociados comienzan a bajar debido al alto costo del equipo de controlador de velocidad.

9.2.2 ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO

Si ahora se desea identificar qué tipo de equipo crítico en consumo de energía tiene mejores ventajas económicas al implementar VDFs en su motor, dado un cierto nivel de funcionamiento anual, el resultado de quienes tienen un VAN positivo es el que se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 24: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por horas de uso y tipo de equipo.

Rango Horas de uso		Tipo de Aplicación	VAN	TIR	PayBack
Min	Max		[USD]	[%]	[años]
2000	3000	Bomba	9,244	15%	7.6
3000	4000	Bomba	128,684	28%	4.4
4000	5000	Bomba	22,059	20%	6.0
6000	7000	Bomba	190.512	42%	2.9
7000	8000	Bomba	63,831	41%	3.0
8000	8784	Correa	16,387	13%	8.3

Fuente: Elaboración Propia

Claramente se aprecia, tanto de la tabla anterior como de las tablas 20 como de la 41 (Anexo 14.6.2), que en motores de bombas, sobre las 2.000 y 7.000 horas de uso anual respectivamente, se observan mejores retornos ya que son del tipo de carga “par cuadrático” (más detallan capítulo 3.3.1), es decir, reducir el 10% la velocidad implica cerca de un 27% del ahorro de energía que consumen en el año. El promedio del periodo de recuperación de la inversión es de 4-5 años.

Para el caso de los correas, debe haber un funcionamiento de al menos 8.000 horas al año respectivamente para que pueda recomendarse implementar el control de velocidad. Sin embargo la inversión se recupera entre los 8 años desde la implementación del proyecto (alto).

De este modo se puede afirmar que son en equipos del tipo de carga “par cuadrático” los que perciben mejores retornos económicos si a su motor se le aplica un control de velocidad con un VDF. Estos equipos corresponden a las bombas auxiliares de los molinos del área, correspondiente a bombas de alta y baja presión, bombas de empuje y bombas del sistema de enfriamiento de los molinos.

9.2.3 ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO VS RANGO DE POTENCIA

Finalmente, para determinar el rango de potencia de cada equipo al cual se le propone mejorar su rendimiento a través de un VDF, se hace un análisis en donde en la siguiente tabla se muestran los casos favorables (VAN positivo):

Tabla 25: Resultado económico de implementación de VDFs en equipos críticos con VAN positivo, por tipo de equipo y rango de potencia

Tipo	Potencia		VAN	TIR	PayBack
	Min	Max	[USD]	[%]	[años]
Correa	100	500	7,387	11%	9.3
Bomba	10	25	13,032	12%	8.7
	25	50	325	10%	9.9
	50	100	254,223	27%	4.5
	100	500	64,782	25%	4.9

Fuente: Elaboración Propia

Se observa claramente que para los correas (cargas de par constante) sobre los 100 [kW] recién permiten percibir ganancias a la compañía. Sin embargo para el caso de las bombas (cargas de par cuadrático), no hay un rango específico de potencia. Es decir, es necesario que para cargas del tipo “par constante” el rango de potencia sea elevado, ya que así existirá una mayor cantidad de energía ahorrada por utilizar un VDF en su motor, y por ende, recuperar más rápidamente la inversión realizada.

Por lo tanto, y considerando los dos análisis anteriores se afirma que es recomendable y beneficioso para la compañía realizar una regulación electrónica de velocidad con VDFs en equipos de carga “par cuadrático” por sobre equipos de carga “par constante” y que funcionen un número elevado de horas al año.

Los motores de cargas de “par cuadrático” mejores evaluados al implementar un VDF corresponden a las bombas (sobre las 2.000 horas de uso) que tienen un VAN de 333.362 [USD] y un TIR promedio del 19%. Para el caso de las cargas de “par constante”, corresponden a correas sobre los 100 [kW] (sobre las 7.000 horas de uso) que implican un VAN de 7.387 [USD] y una TIR del 11%.

Así, el VAN al implementar VDFs en la totalidad de los motores de alta variabilidad de carga, y potencia sobre los 18.5 [kW] en Molienda y Clasificación, asciende los 279.958 [USD], con un TIR de 17% y retorno de la inversión en 7 años. Sin embargo si sólo se implementan los recomendados anteriormente, el beneficio será de 451.168 [USD] con un 28.3% de TIR media y retorno en 4 años.

9.3 ANALISIS DE IMPLEMENTAR VARIADORES DE FRECUENCIA Y REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN EQUIPOS CRÍTICOS

Si a los equipos que fueron definidos críticos no sólo se le implementa un equipo de control de velocidad, sino que además se recambia la tecnología del motor por uno de eficiencia Premium para obtener un mayor ahorro de energía, se obtiene una reducción general en el beneficio económico de cada grupo de sub-proyectos.

Esto se evidencia en el decaimiento general del VAN y TIR de la tabla 19 con respecto a la tabla 40 (Anexo 14.6.3), debido a que la relación ahorro/inversión de reemplazar motores IE3 en los equipos motorizados Molienda y Clasificación es muy desfavorable (evidenciado anteriormente) en términos generales.

Para el caso de las **bombas**, la caída (diferencia) del VAN va desde los 7.748 (bombas de empuje y piso) hasta los 167.179 [USD] (bombas de alta presión). Es más, para el caso de las bombas de baja presión, el decaimiento del beneficio económico (13,900 [USD]) hace que el proyecto sea inviable, implicando costos (VAN negativo) de -12.046 [USD]. El TIR en el caso de las bombas cae en promedio 8 puntos porcentajes, acentuado en mayor parte por la caída en las bombas de alta presión (25,6% a 14%) y las bombas de empuje y piso (28.8% a 20%).

En el caso de las **correas** (alimentación, descarga y repotenciamiento), el decaimiento del beneficio económico es mucho mayor, dejando su VAN mucho menos beneficioso que antes. Para el total de las correas, las pérdidas llegan a 260.253 [USD]. Esto se debe a que tanto el proyecto de recambio de motores e implementar VDFs por separado ya eran inviables económicamente.

Hacer un análisis detallado por horas de uso, tipo de equipo y rango de potencia, como se hizo anteriormente en los proyectos anteriores, no es necesario ya que correspondería a hacer una superposición lineal de contemplar ambos proyectos. Esto se debe a que el VAN total sería, al considerar tanto el reemplazo de motores como los VDFs, una ponderación lineal de estos.

El VAN total de implementar la totalidad de los equipos críticos es de -117.542[USD] con un TIR del 8.2%, es decir, está lejos de ser rentable. Sin embargo, si sólo se implementan los proyectos de VAN positivo, el beneficio sería de 269.547 [USD] con un TIR sería de 16.5% y un retorno de inversión sobre los 7 años, a diferencia del 24% si sólo se implementan los VDFs.

9.4 RESUMEN DE ANÁLISIS DE PROYECTOS

Finalmente, resumiendo los tres análisis anteriores, se puede decir que el beneficio económico percibido es mucho mayor si se implementan los proyectos en equipos específicos y de ciertas características en vez de implementarlos de manera global en Molienda y Clasificación.

A continuación se presenta una tabla resumen de los motores de Molienda que se recomiendan reemplazar por uno de eficiencia IE3, y si es necesario también instalarle un variador de velocidad para reducir aún más el consumo energético.

Tabla 26: Resumen de características de equipos a los que se recomienda cambiar el motor de eficiencia IE3 y/o implementar un VDF

Rango de Horas de Uso Anual	Rango de Potencias Nominales [kW] de motores					
	1-5	5-10	10-25	25-50	50-100	100-500
2000-3000	-	-	-	-	-	• Bombas (sólo VDF)
3000-4000	-	-	-	-	• Bombas (+ VDF)	• Bombas (+ VDF)
4000-5000			• Bomba (sólo VDF)		• Bombas (sólo VDF)	
5000-6000	-	-	-	-	• Bombas (+ VDF)	-
6000-7000	-	• Correa	-	-	-	• Compresor
7000-8000	• Ventilador	• Ventilador • Correa • Otros Motores	• Ventilador • Bomba (sólo VDF) • Otros Motores	• Bomba (sólo VDF)	• Bombas (sólo VDF)	• Compresor • Bomba (+VDF)
8000-8784	• Ventilador	• Ventilador • Otros Motores	• Ventiladores • Otros varios		-	• Correas (sólo VDF) • Compresor

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que, evidentemente, se aprecia una mayor cantidad de equipos con viabilidad de ahorro de energía a medida que aumenta las horas de usos de este. Solo para las bombas, y con un variador de frecuencia, se tiene que son viables cuando las horas de uso anuales son menores. Esto se debe a que, las bombas son cargas del tipo “par cuadrático”, es decir, por cada porcentaje de reducción de velocidad, el ahorro energético que se tiene es cúbico.

De esta manera, la diferencia de los beneficios económicos percibidos respecto a un escenario normal y 10% en reducción de velocidad con VDFs es la que se muestra en la tabla 27.

Tabla 27: Viabilidad de los proyectos dependiendo de equipos considerados en cada uno de ellos

PROYECTO	Indicador Económico	EQUIPOS CONSIDERADOS	
		TODOS	Sólo los recomendados
Reemplazo de Motores IE1 por IE3 en Molienda	VAN [USD]	-312,124	30,364
	TIR [%]	-1,1%	17%
	PayBack [años]	27.8	6.6
Instalación de VDFs en equipos críticos	VAN [USD]	279,958	451,168
	TIR [%]	16.6%	28.3%
	PayBack [años]	6.9	4.3
Reemplazo de Motores IE1 por IE3 + Instalación de VDFs en bombas y correas	VAN [USD]	-117,542	269.547
	TIR [%]	8.2%	21%
	PayBack [años]	11.3	5.7
Totalidad de Proyectos propuestos	VAN [USD]	-116,618	413.248
	TIR [%]	8.4%	20.7%
	PayBack [años]	11.1	5.8

Fuente: Elaboración Propia

Estas evaluaciones económicas, sin embargo, están sujetas a parámetros y variables que pueden sufrir cambios en el tiempo, como lo son el precio de la energía, nivel de consumo de energía en los siguientes años, tasa de descuento, etc. Algunos de estos incluso son agentes externos, es decir, que CMDIC no tiene como intervenir para que se mantengan, como lo son el precio del dólar, costos de los equipos en la industria, etc.

En el siguiente capítulo se presenta un análisis de sensibilidad de la evaluación económica ante distintas variables y parámetros técnicos y económicos.

10 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RESULTADOS DE EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

A continuación se propone, a partir de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores, analizar la sensibilidad de los resultados ante la variación de parámetros y variables externos (que no dependen de la empresa) e internos (que dependan del funcionamiento de la planta). Para este capítulo, sólo se considerarán los proyectos que se tengan beneficios económicos mostrados en el capítulo anterior, es decir, que su VAN final sea mayor a cero.

Los análisis propuestos son los que se describen en los siguientes párrafos.

- **Sensibilidad ante la variación del consumo de energía en Molienda respecto al Budget 2013-2017**

El crecimiento del consumo de energía, presupuestado por el Budget 2013-2017 por parte de Collahuasi, y sólo considerado para el área de Molienda, es el que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 28: Crecimiento Anual del Consumo de Energía Eléctrica en Molienda de CMDIC proyectado para los años 2013-2017

Año	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Budget [MWh]	621,745	681,892	726,620	738,092	767,821	732,241
Crecimiento anual [%]	-	9,67%	6,56%	1,58%	4,03%	-4,63%

Fuente: Budget 2013-2017, CMDIC

El crecimiento anual promedio, hasta el año 2017 es de 3.44%. Por lo tanto, se propone analizar la sensibilidad de los proyectos de eficiencia energética propuestos en el caso de que el aumento de consumo de energía varíe en un +-20%, es decir, si el consumo de energía en Molienda es de un 2.75% y un 4.13% anual. La figura 23 muestra los tres escenarios posibles:

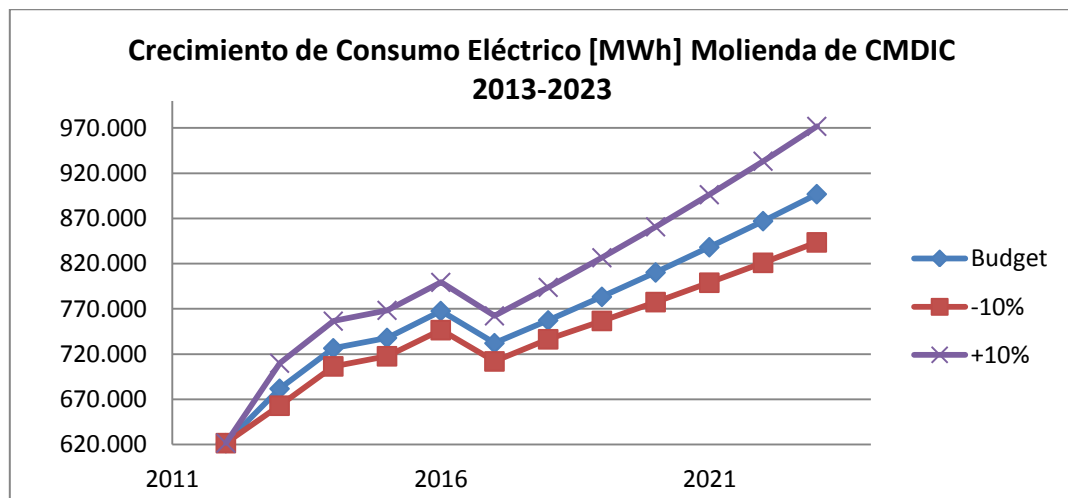


Figura 23: Crecimiento del Consumo Eléctrico de Molienda para 2013-2017
Fuente: Budget 2013-2017, CMDIC

- **Sensibilidad ante la variación del porcentaje de reducción de velocidad en motores que usarían VDFs**

En este caso se propone hacer un análisis de sensibilidad ante la variación del porcentaje de reducción de velocidad de los motores eléctricos a los que se les propuso implementar un VDF. Como se mencionó anteriormente, el análisis técnico económico consideraba una reducción de un 10% en la velocidad de las bombas y correas de motores por sobre los 18.5 [kW] de potencia nominal. Por lo tanto se propone, variar la velocidad de funcionamiento a un +-5% con respecto a la reducción propuesta, es decir, si la velocidad funciona al 85 y 95% de la velocidad nominal del motor.

- **Sensibilidad ante la variación de los costos de equipos en la industria**

Los equipos considerados en los proyectos de eficiencia energética evaluados anteriormente son cotizados en dólares [USD] ya que son traídos de proveedores que trabajan a nivel internacional. Por lo tanto, los costos de inversión de los proyectos están sujetos a variaciones del mercado internacional, políticas nacionales de cada país, etc.

Por lo tanto se propone hacer un análisis de sensibilidad con respecto al aumento y caída del precio de la inversión de los proyectos. Se propone variar entre un -10% y +10% del costo de los equipos con respecto al precio cotizado y considerado en la evaluación económica de los capítulos anteriores.

- **Sensibilidad ante variación de costo de la energía que paga Collahuasi**

Del mismo modo que los costos de inversión pueden ser afectados por agentes externos a los de la empresa, los costos de operación, es decir, los costos de la energía eléctrica, pueden cambiar o verse afectado ante diversos estímulos. Estos pueden ser, agentes externos como el costo marginal del SING, o agentes internos como el precio de contratos de consumo de energía eléctrica con empresas generadoras del SING.

El costo marginal real, en la barra Crucero 220kV del SING, evidencia el sostenido aumento del costo de la energía eléctrica a nivel global en el Norte Grande de nuestro País.

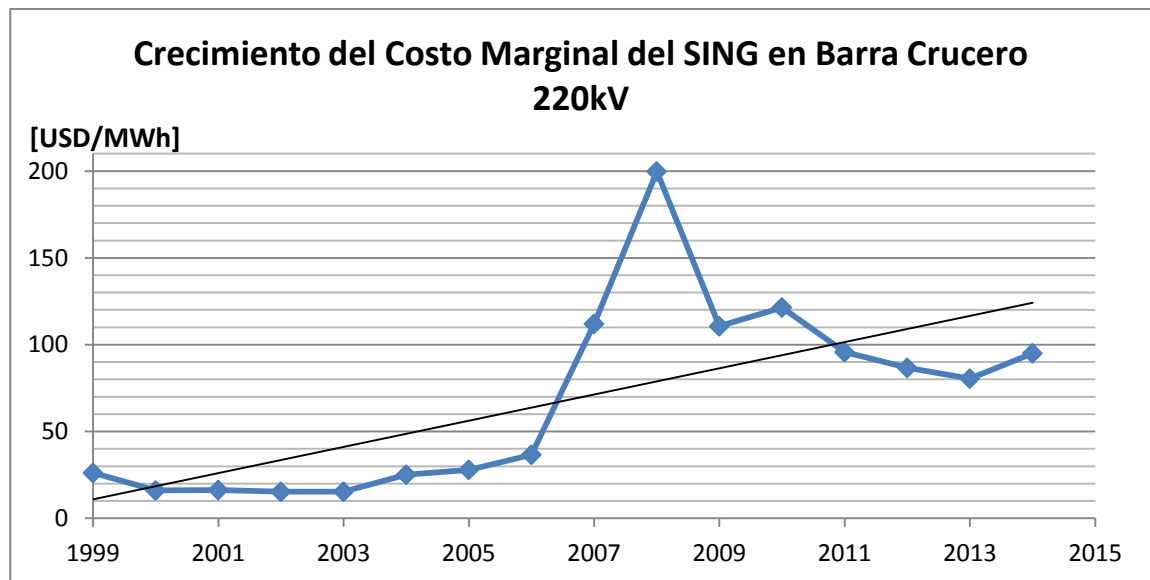


Figura 24: Crecimiento del Costo Marginal del SING en la Barra Crucero 220kV
Fuente: Página Oficial del CDEC-SING

Por lo tanto, se contempla variar los costos de operación, correspondiente al costo de la energía eléctrica, en un -10% y +10% del precio de la energía considerado. Es decir, como el costo de la energía usado en el análisis anterior es de 113 [USD/MWh], se considerarán ahora precios de 101.7 y 124.3 [USD/MWh] para hacer nuevamente la evaluación técnico-económica.

- **Sensibilidad ante variación del precio del dólar**

El precio del dólar es una variable que influye directamente en la evaluación técnico-económica, ya que tanto los costos de inversión como los costos de operación se encuentran en esta moneda.

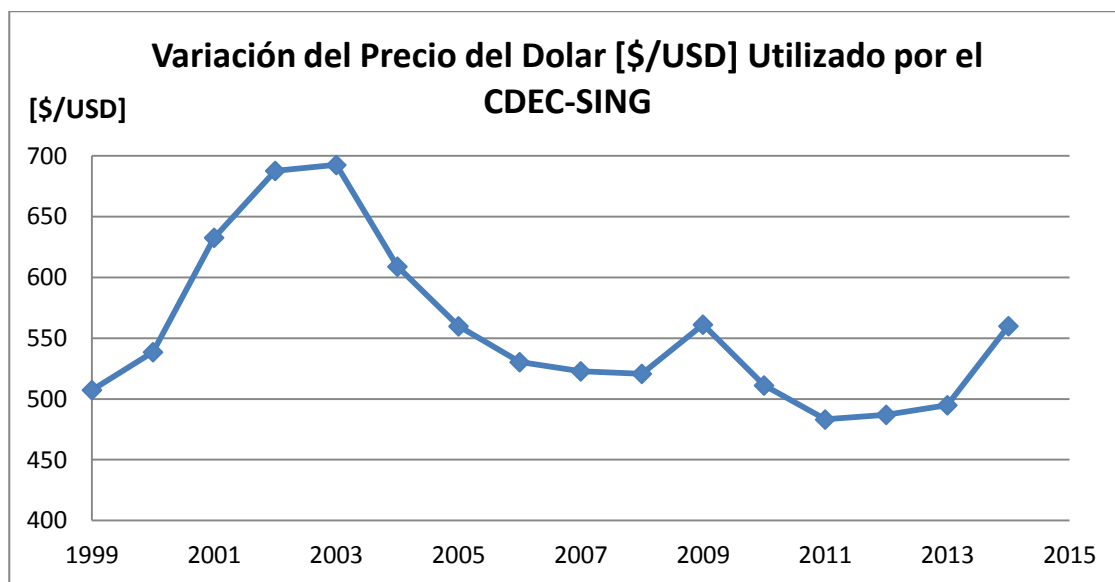


Figura 25: Crecimiento del Precio del Dólar [\$/USD] Utilizado por el CDEC-SING
Fuente: Página Oficial del CDEC-SING

El costo del dólar el año 2012, y utilizado en la evaluación técnico-económica de los capítulos anteriores es de 478 [CLP/USD]. A finales del año 2012, el costo de este superó los 527 [CLP/USD], y se espera que siga subiendo durante el 2014.

Por lo tanto, se propone hacer un análisis de sensibilidad en el caso de que el dólar aumente en un 10% y 20% su precio con respecto al año 2012, es decir, que llegue hasta los 525.8 y 573 [CLP/USD].

10.1 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL CRECIMIENTO DE CONSUMO ELÉCTRICO EN MOLIENDA CON RESPECTO AL BUDGET 2013-2017

10.2 SENSIBILIDAD EN EL PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES

Nótese que, si se considera el escenario de reducción de un 20% del crecimiento de consumo de energía en Molienda, es decir, un crecimiento de consumo de energía de un 2.75%, el recambio de compresores de aire de la planta y sus ventiladores siguen entregando a la compañía un beneficio económico positivo, pero menor que antes. La disminución del VAN cae a valores de 6.010 y 1.965 [USD], y sus TIRs bajan a 15 y 17 [%] respectivamente. Esto implica también, tanto para compresores y ventiladores, un aumento en el periodo de recuperación de la inversión a más de 6 años.

Por el contrario, si se prevé un crecimiento del consumo de energía de un 4.14%, el beneficio económico en general que resulta de reemplazar motores ineficientes aumenta, pero no lo suficiente. Nuevamente los que mayor posibilidad de implementación tienen son el recambio de motores que presentan mayor nivel en su

TIR, que corresponden a los ventiladores de compresores y molinos (18.4% y 15.5%), seguidos por los compresores de aire (16.5%) y de embrague (11.1%). El resto de los equipos sigue retornando beneficios negativos o muy bajos, por lo que no deben ser considerados por la empresa.

Por lo tanto, si bien el escenario es un factor que afecta el nivel de viabilidad de los proyectos de recambio de tecnología de motores, no genera un mayor impacto en la elección de los equipos que resultan preferibles recambiar. A pesar que existen posibilidades en el que al implementar motores IE3 tienen retornos positivos, el tiempo de retorno de inversión es muy elevado (más de 6 años), por lo que puede afirmarse que un proyecto de recambio de motores de este tipo probablemente no sea aceptado al proponer su implementación a nivel general en la zona de Molienda.

10.3 SENSIBILIDAD EN EL PROYECTO DE RECAMBIO DE MOTORES

Con respecto a los tres escenarios de crecimiento del consumo energético en Molienda y Clasificación (crecimiento de un 2.75%, 3.44% y un 4.14%), la variabilidad del TIR de los distintos proyectos fluctúa cerca de 0.8%, y su retorno de inversión permanece prácticamente constante (7 años).

Por lo tanto el escenario de crecimiento del consumo de energía en Molienda y Clasificación no es considerablemente clave en la decisión de implementar o no VDFs en los motores de consumo crítico en dicha área. Sin embargo, en grupos de equipos que tienen una TIR cercana a la tasa de descuento al implementar VDFs (como en las bombas de baja presión) la diferencia del escenario implica percibir costos u obtener beneficios económicos. De este modo, se recomienda sólo implementar VDFs en aquellos grupos de equipos donde la TIR tenga valores elevados de tal manera que el escenario no afecte de mayor manera la viabilidad del proyecto.

10.4 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD DE MOTORES USANDO VDFs

Haciendo el análisis de sensibilidad con respecto a la reducción de velocidad a un 5% y un 15, para el caso de los proyectos de eficiencia energética que implican la utilización de VDFs, los resultados que se obtienen son los señalados en la tabla siguiente:

Tabla 29: Sensibilidad de Evaluación Técnico-Económica de Proyecto de Implementación de VDFs en equipos críticos por Variación en Reducción de Velocidad

Implementación de VDF en	85% Velocidad Nominal			90% Velocidad Nominal			95% Velocidad Nominal		
	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back
	[USD]	[%]	[año]	[USD]	[%]	[año]	[USD]	[%]	[año]
Bombas de Alta Presión	537,117	38.6%	3.2	273,199	25.6%	4.8	-39,619	7.3%	12.0
Bombas de Baja Presión	44,393	18.8%	6.3	1,854	10.4%	9.8	-49,550	-2.6%	37.0
Bombas de Empuje	52,682	42.7%	2.8	28,232	28.8%	4.2	-634	9.5%	10.3
Bombas Sistema de Enfriamiento	116,972	36.4%	3.4	56,771	23.8%	5.1	-13,359	6.1%	13.0
Correas de Alimentación	4.500	11.2%	9.3	-34,540	-0.8%	26.3	-68,867	-	-
Correas de Descarga	2.358	11.1%	9.4	-20,167	-0.8%	26.5	-39,935	-	-
Correas de Repotenciamiento	87.418	18.1%	6.5	-25.390	7.1%	12.2	-153.437	-14.6%	-

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que la variación del porcentaje de reducción de velocidad impacta considerablemente la evaluación económica del proyecto. Para una reducción de sólo el 5%, implementar variadores en los equipos definidos como críticos y de alta variabilidad de carga se vuelven inviables para la totalidad de proyectos. El TIR total llega a -0.5%, costos de 365.401 [USD] y Payback casi de 2.5 veces la vida útil de los proyectos.

Por el contrario, si se reduce la velocidad en un 15% de la nominal, la TIR de los proyectos aumenta a un 28% y se reducen los tiempos de pago de la inversión en 4 años. Nuevamente son las bombas de alta presión y del sistema de enfriamiento los que permiten un mejor beneficio (537.117 y 116.972 [USD]) al controlarse su velocidad de operación, llegando a un TIR cerca del 36-37% y PayBack de 3 años. Así, el total de beneficios económicos de todos los equipos críticos al reducir este porcentaje de la velocidad es de 845.441[USD] con un TIR del 28%.

Por lo tanto, es muy importante al incorporar estos proyectos en carpeta, determinar el verdadero porcentaje de reducción de velocidad. Esto debe hacerse a través de un riguroso estudio, de preferencia por especialistas en este tema, debido a la alta sensibilidad de la viabilidad del proyecto con respecto al porcentaje de reducción de la velocidad de operación.

Este cálculo que se propone hacer teniendo una estadística, historial o registro de la curva de carga específica para cada motor al cual se desea implementar un control de velocidad (registro que hoy no existe), ya que así se puede determinar con clara precisión el porcentaje de ahorro energético y la velocidad de operación al cual se debe operar.

También se debe hacer un riguroso análisis del impacto que tiene esta medida sobre la red eléctrica de Molienda. Para ello es necesario realizar un modelo eléctrico de la

planta, analizar alternativas de distribución de cargas, cambio en el factor de potencia, el impacto de los armónicos inyectados a la red (a pesar de que los VDFs poseen filtrado de armónicos internos), etc.

10.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL PRECIO DE LOS EQUIPOS EN LA INDUSTRIA

La variación de los costos de los equipos, por parte de los proveedores o influenciado por situaciones externas a la empresa, impacta directamente en la evaluación económica de los proyectos y en la prioridad de llevarlos a cabo.

Los resultados que se obtienen, al subir o bajar los precios de los equipos considerados en los proyectos que sólo tienen VAN positivo, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 30: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación del Precio de los Equipos en las Industrias

Reemplazo de Motores IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en	Caso BASE (sin variación de costos de equipos)			Aumento Costos Equipos +10%			Reducción Costos Equipos -10%		
	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back
	[USD]	[%]	[años]	[USD]	[%]	[años]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	247.769	25,1%	4,8	216.134	22,2%	5,4	279.403	28,5%	4,3
Bombas de Baja Presión	18.360	16,7%	6,9	12.683	14,3%	7,8	24.037	19,5%	6,1
Bombas de Empuje	20.484	20,0%	6,0	16.361	17,4%	6,7	24.606	23,0%	5,3
Bombas Sistema de Enfriamiento	50.641	22,3%	5,4	42.528	19,6%	6,1	58.754	25,5%	4,8
Compresores de Embrague	9.046	14,6%	7,7	4.924	12,3%	8,7	13.168	17,3%	6,7
Compresores de Aire Planta	25.675	16,4%	7,0	17.430	14,1%	7,9	33.920	19,2%	6,2
Ventiladores de Bombas	443	12,1%	8,8	-12	9,9%	10,0	897	14,6%	7,7
Ventiladores de Compresores	1.451	22,0%	5,5	1.212	19,3%	6,1	1.689	25,2%	4,8
Ventiladores de Molinos	6.578	19,2%	6,2	8.020	22,2%	5,4	5.135	16,7%	6,9
Correas de Alimentación	1.290	25,9%	4,7	1.446	29,3%	4,2	1.134	22,9%	5,3
Correas Descarga	1.227	25,2%	4,8	1.383	28,6%	4,3	1.071	22,3%	5,4
Correa Repotenciamiento	6.835	20,5%	5,8	8.128	23,6%	5,1	5.542	17,9%	6,5
Otros Motores	3.069	22,9%	5,3	3.537	26,1%	4,7	2.601	20,1%	5,9

Fuente: Elaboración Propia

En el caso de un aumento general de los precios de los equipos, considerados en el reemplazo de motores IE3 por IE1 y la instalación de variadores de velocidad en bombas y correas, el VAN cae, en total, cerca de a un 18%. El TIR general cae desde un 20.7% a un 18.1%, aumentando en tiempo de retorno de la inversión en aproximadamente un año. El que presentó mayor caída en el VAN, es el reemplazo de los ventiladores en las bombas, en donde la caída del VAN fue de un 103%, dejando con retornos negativos al implementar este proyecto. Por el contrario, quien resistió de mejor manera el aumento de los costos de los equipos fue el proyecto de recambio de motores e instalación de VDFs en las correas de alimentación y descarga de material, en donde sólo se apreció de una caída de un 12% en su VAN.

En el caso de que el mercado internacional de equipos eléctricos asociados a los proyectos de eficiencia energética descritos y evaluados caiga en un 10%, el aumento del VAN y TIR es exactamente el mismo porcentaje de la subida del VAN en el caso anterior. Es decir, los proyectos asociados a el recambio de los motores de los ventiladores de bombas son quienes presentan un mayor aumento en VAN, aumentando desde 443 a 897 [USD]. Sin embargo, esto se debe a que el VAN de este proyecto es muy bajo, por lo que cualquier baja o subida en la inversión, el impacto porcentual en el VAN es notorio.

Quien presenta un mejor aumento del VAN, considerando sólo numéricamente el aumento del VAN, son las bombas de alta presión de los molinos. El VAN crece 31.634 [USD], incrementando su TIR en un 3.4% y mejorando en casi un año el PayBack.

10.6 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL COSTO DE LA ENERGÍA ELECTRICA DE COLLAHUASI

La CMDIC posee actualmente contratos, con las empresas de GASATACAMA y CELTA, por compra de energía eléctrica. La potencia suministrada es de cerca de 180 [MW], y quien suministra cerca de 118 [GWh].

Si bien el precio exacto de lo que paga la empresa a cada una de estas empresas es un valor confidencial, dado que es un dato estratégico, se puede estimar que el precio que se paga, por concepto de consumo de energía es de 113 [USD/MWh]. En base a este valor, se analizará la sensibilidad de los proyectos para los casos de un aumento y caída en el precio de la energía en un 10%.

Los resultados obtenidos, para los proyectos que presentan un VAN positivo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 31: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación de Costo de Energía Eléctrica de CMDIC

Reemplazo de Motores IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en	Caso BASE (Precio de 113 [USD/MWh])			Aumento 10 % (Precio de 124 [USD/MWh])			Caída del 10 % (Precio de 102 [USD/MWh])		
	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back
	[USD]	[%]	[año]	[USD]	[%]	[año]	[USD]	[%]	[año]
Bombas de Alta Presión	247.769	25,1%	4,8	196.486	22,2%	5,4	310.448	28,5%	4,3
Bombas de Baja Presión	18.360	16,7%	6,9	11.530	14,3%	7,8	26.707	19,5%	6,1
Bombas de Empuje	20.484	20,0%	6,0	14.874	17,4%	6,7	27.340	23,0%	5,3
Bombas Sistema de Enfriamiento	50.641	22,3%	5,4	38.662	19,6%	6,1	65.282	25,5%	4,8
Compresores de Embrague	9.046	14,6%	7,7	4.476	12,3%	8,7	14.632	17,3%	6,7
Compresores de Aire Planta	25.675	16,4%	7,0	15.846	14,1%	7,9	37.689	19,2%	6,2
Ventiladores de Bombas	443	12,1%	8,8	-11	9,9%	10,0	997	14,6%	7,7
Ventiladores de Compresores	1.451	22,0%	5,5	1.102	19,3%	6,1	1.877	25,2%	4,8
Ventiladores de Molinos	6.578	19,2%	6,2	4.668	16,7%	6,9	8.911	22,2%	5,4
Correas de Alimentación	1.290	25,9%	4,7	1.031	22,9%	5,3	1.607	29,3%	4,2
Correas de Descarga	1.227	25,2%	4,8	974	22,3%	5,4	1.537	28,6%	4,3
Correa Repotenciamiento	6.835	20,5%	5,8	13.559	12,4%	8,7	43.910	17,3%	6,7
Otros Motores	3.069	22,9%	5,3	2.364	20,1%	5,9	3.930	26,1%	4,7

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que el impacto, tanto en el VAN como en el TIR es mucho mayor que el caso anterior estudiado, en donde sólo se variaba el costo de inversión de los equipos utilizados en cada proyecto de eficiencia energética.

Quien presenta mayor sensibilidad ante el cambio del precio de la energía eléctrica es el recambio de las bombas de alta presión de los molinos. La diferencia en el VAN, tanto para un aumento como una caída de la energía, es de 51.283 [USD], con cambios en la TIR y PayBack de 3.4% y un año aproximadamente. Por el contrario, el proyecto con mayor resistencia ante un cambio del precio de la energía eléctrica contratada es nuevamente las correas de alimentación y descarga de los molinos, en donde la diferencia en el VAN sólo llega a los 259 y 253 [USD] respectivamente.

Es importante mencionar que, si bien el precio de la energía es un valor que está dado por un contrato en un período de tiempo fijo, este puede verse no sólo influido por

agentes externos (como aumento del costo marginal del SING), sino que por políticas energéticas internas de Collahuasi.

A finales del 2013, se finalizó la construcción de la planta solar Pozo Almonte con el trabajo y acuerdo mutuo entre Collahuasi y SolarPack, que inyectará cerca de 60 [GWh] al año en base a un nuevo contrato, quien venderá esta energía a un precio mucho menor al contratado con las empresas de GASATACAMA y CELTA. En este acuerdo, la empresa SolarPack es quién realiza la inversión de construcción e instalación de la planta solar, quién recuperará dicho monto a través del contrato de la venta de energía a Collahuasi por un precio fijo. Del mismo modo, Collahuasi se verá beneficiado por el ahorro de más de 20 [MMUSD] anuales por consumo de energía eléctrica, debido a que el costo de compra de electricidad baja sustancialmente. Por lo tanto, la adopción y ejecución de este tipo de políticas energéticas de Collahuasi implican bajar el coste de la energía eléctrica, a pesar del sostenido aumento del costo marginal en el SING.

Es por esto que no sólo se debe evaluar el escenario ante el aumento sostenido del precio de la energía eléctrica, percibido a nivel mundial y nacional por diferentes factores, sino que también debe considerarse la caída de este coste en base a la búsqueda de fuentes de energía limpias como la construcción de plantas solares fotovoltaicas o termosolares.

10.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD ANTE LA VARIACIÓN DEL PRECIO INTERNACIONAL DEL DÓLAR

Tanto los costos de los equipos (inversión) como el precio de la energía eléctrica (ahorros anuales) se encuentran en la moneda dólar. Por lo tanto, la variación de la caída o aumento del precio internacional del dólar afecta directamente tanto la inversión y el ahorro monetario anual de cada uno de los proyectos de eficiencia energética descritos anteriormente.

El precio del dólar, durante los últimos meses, ha aumentado considerablemente, llegando a precios de 570 [\$/USD] durante el mes de Marzo del 2014, es decir, un aumento de un 13.3% con respecto al del 2013, y se espera que siga en aumento.

La respuesta de la evaluación económica de cada uno de estos proyectos, ante la subida de un 10 y 20% del precio internacional del dólar con respecto al utilizado (478 [\$/USD]), es la siguiente:

Tabla 32: Sensibilidad de Resultados de Evaluación Económica Ante Variación del Precio del Dólar Internacional

Reemplazo de Motores IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en	Caso BASE (478 [\$/USD])			Aumento 10 % (526[\$/USD])			Aumento 20 % (574 [\$/USD])		
	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back	VAN	TIR	Pay Back
	[USD]	[%]	[años]	[USD]	[%]	[años]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	247.769	25,1%	4,8	225.244	25,1%	4,8	206.474	25,1%	4,8
Bombas de Baja Presión	18.360	16,7%	6,9	16.691	16,7%	6,9	15.300	16,7%	6,9
Bombas de Empuje	20.484	20,0%	6,0	18.621	20,0%	6,0	17.070	20,0%	6,0
Bombas Sistema de Enfriamiento	50.641	22,3%	5,4	46.037	22,3%	5,4	42.201	22,3%	5,4
Compresores de Embrague	9.046	14,6%	7,7	8.224	14,6%	7,7	7.538	14,6%	7,7
Compresores de Aire Planta	25.675	16,4%	7,0	23.341	16,4%	7,0	21.396	16,4%	7,0
Ventiladores de Bombas	443	12,1%	8,8	402	12,1%	8,8	369	12,1%	8,8
Ventiladores de Compresores	1.451	22,0%	5,5	1.319	22,0%	5,5	1.209	22,0%	5,5
Ventiladores de Molinos	6.578	19,2%	6,2	5.980	19,2%	6,2	5.481	19,2%	6,2
Correas de Alimentación	1.290	25,9%	4,7	1.173	25,9%	4,7	1.075	25,9%	4,7
Correas Descarga	1.227	25,2%	4,8	1.115	25,2%	4,8	1.022	25,2%	4,8
Correa Repotenciamiento	6.835	20,5%	5,8	24.743	14,6%	7,7	22.681	14,6%	7,7
Otros Motores	3.069	22,9%	5,3	2.790	22,9%	5,3	2.557	22,9%	5,3

Fuente: Elaboración Propia

Se puede apreciar que un aumento en el precio del dólar implica que, para [MWh] de energía eléctrica ahorrado a través de la implementación de motores de eficiencia Premium e instalación de variadores de velocidad en bombas y correas de alta variabilidad de carga, el incremento del ahorro monetario será mayor. Para todos los proyectos, el incremento del VAN supera el 9%. Se destaca el gran ahorro de energía en proyectos de bombas de alta presión, en donde se incrementa el VAN en 22.524 [USD].

Es muy importante apreciar que tanto el TIR como el PayBack, para todos y cada uno de los proyectos, se mantiene constante. Esto se debe a que tanto la inversión (o costos de los equipos involucrados) como los ahorros monetarios anuales (dados por el precio de la energía eléctrica) aumentan en la misma proporción.

Por lo tanto, sólo el VAN es sensible ante la variación del precio del dólar, por lo que este valor sólo influye en la decisión de aumentar o no la cantidad de beneficios económicos percibidos al final de la vida útil de los proyectos.

11 CONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS DE CURVAS DE COSTO MARGINAL DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

El análisis técnico- económico realizado para todos y cada uno de los proyectos de eficiencia energética descritos anteriormente, nos permite determinar la cantidad de energía eléctrica ahorrada y el costo asociado a esta medida. Si se considera que el factor de emisión de gases de efecto invernadero asociado al consumo de energía eléctrica es de 0.806 [tonCO₂/MWh], se puede obtener el potencial de ahorro de emisiones de CO₂e para cada uno de los proyectos de eficiencia energética.

A continuación se presenta el total de proyectos de eficiencia energética para Molienda, con su respectivo costo de abatimiento de CO₂e, cantidad total del potencial de mitigación de CO₂e y el costo anual asociado para cada proyecto.

Tabla 33: Resumen de Costo de Abatimiento, Potencial de Abatimiento y Costo Anual de Totalidad de Proyectos de Eficiencia Energética en Molienda, CMDIC

Reemplazo de motor IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en motor de	Costo de Abatimiento [USD/tonCO ₂ e]	Toneladas de CO ₂ e abatidas [tonCo ₂ e/año]	Costo anual de implementar proyecto [USD/año]
Bombas de Empuje	-35,7	75,62	-2.698
Ventiladores de Compresores	-32,5	9,48	-308
Bombas de Sistema de Enfriamiento	-28,2	171,60	-4.845
Compresores de Aire Planta	-25,7	38,06	-978
Ventiladores de Molinos	-22,0	24,99	-549
Bombas de Alta Presión	-19,1	766,26	-14.638
Ventiladores de Bombas	-8,3	9,85	-81
Compresores de Embrague	-1,8	27,43	-48
Bombas de Baja Presión	10,5	160,40	1.677
Otros Motores	26,5	32,78	870
Bombas de PIÑÓN	65,6	6,63	435
Correas de Alimentación	68,0	84,27	5.732
Correas de Descarga	74,1	50,12	3.714
Correas de Repotenciamiento	96,4	275,82	26.586
Ventiladores de Correas	177,9	1,56	278
Bombas ASHMAN	275,9	1538,84	424.593
Bombas de Descanso Levante	293,8	1,84	540
Bombas de Pistones	625,6	0,66	415

Fuente: Elaboración Propia

Sin embargo, si sólo se consideran los proyectos con los cuales se obtienen beneficios económicos (VAN>0), es decir, sólo el reemplazo de motores ineficientes y la instalación de VDFs en bombas y correas de alta variabilidad de carga, el costo de

abatimiento, toneladas de CO2e mitigadas y costo anual del proyecto se resume en la siguiente tabla.

Tabla 34: Costo de Abatimiento, Potencial de Abatimiento y Costo Anual de Proyectos de Eficiencia Energética Con Retornos Económicos Positivos en Molienda, CMDIC

Reemplazo de motor IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en motor de	Costo de Abatimiento [USD/tonCO2e]	Toneladas de CO2e Abatidas [tonCo2e/año]	Costo anual de Implementación de Proyecto [USD/año]
Correas de Alimentación	-54,1	3,29	-178
Correas de Descarga	-52,6	3,22	-169
Bombas de Alta Presión	-52,5	651,75	-34.209
Otros Motores	-47,3	8,95	-424
Bombas de Sistema de Enfriamiento	-45,9	152,24	-6.992
Ventiladores de Compresores	-45,2	4,43	-200
Bombas de Empuje	-39,7	71,29	-2.828
Ventiladores de Molinos	-37,4	24,27	-908
Bombas de Baja Presión	-29,2	86,80	-2.535
Compresores de Aire Planta	-28,4	124,92	-3.545
Correas de Repotenciamiento	-21,6	173,58	-3.758
Compresores de Embrague	-21,5	58,08	-1.249
Ventiladores de Bombas	-10,6	5,76	-61

Fuente: Elaboración Propia

De este modo, a partir de tanto la tabla 33 como la tabla 34, se procede a construir las curvas de costo marginal de abatimiento de gases de efecto invernadero asociado a proyectos de eficiencia energética en la zona de Molienda de la Planta Concentradora de la CMDIC.

11.1 CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADO A PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Considerando solamente los datos obtenidos de la tabla 33, la curva de abatimiento de gases de efecto invernadero asociados tanto a los proyectos de recambio de motores ineficientes por motores de eficiencia Premium y la instalación de VDFs en equipos críticos es la siguiente:

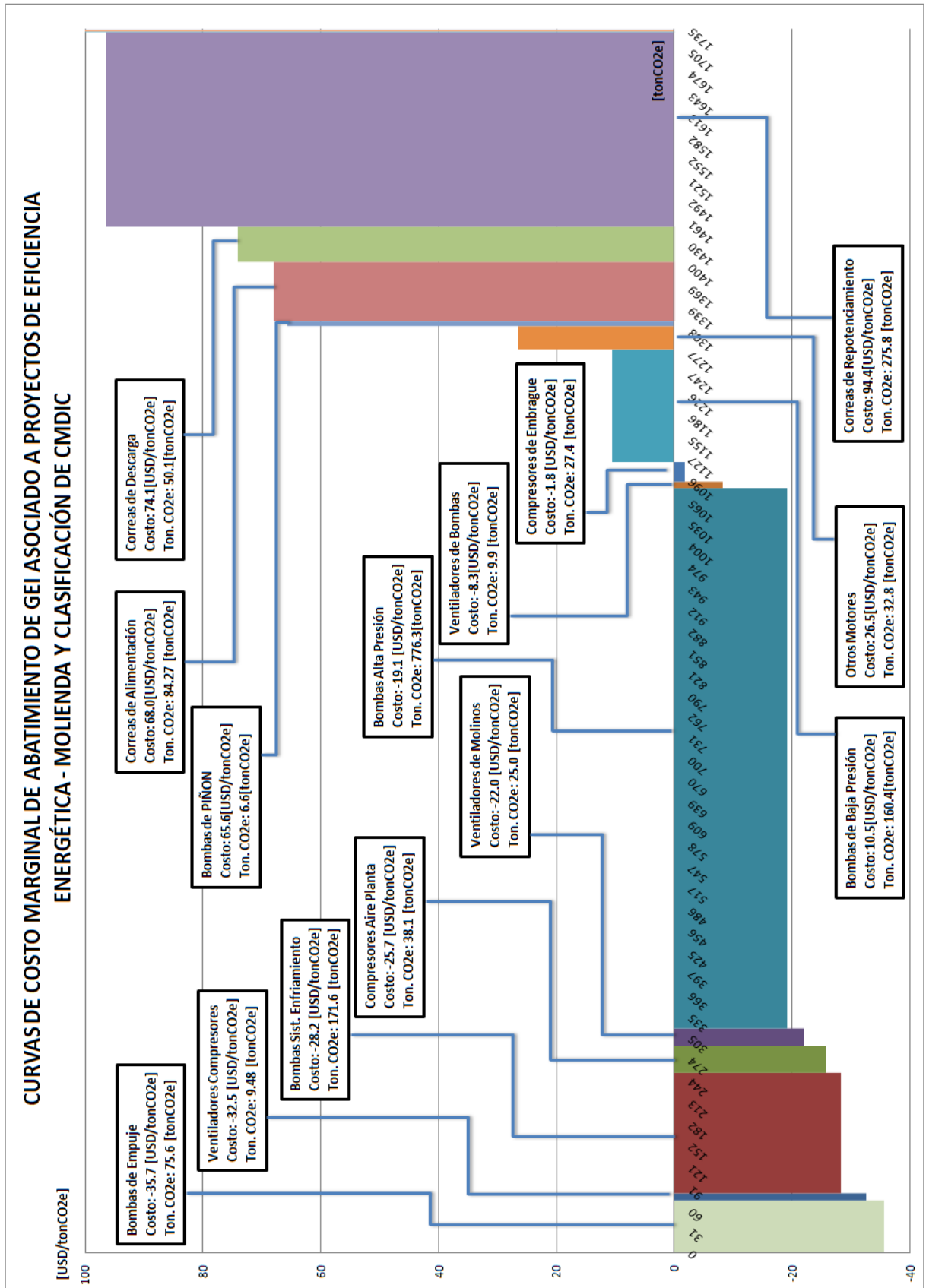


Figura 26: Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero Asociado a Totalidad de Proyectos de Eficiencia Energética en Molinde y Clasificación de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia

En primer lugar hay que mencionar que la CCMA de GEI invernadero mostrada en la figura 26 anterior no muestra los proyectos de reemplazo de motores e instalación de variadores de velocidad de los últimos ítems de la tabla 33, que corresponden a los proyectos de eficiencia energética asociados a bombas ASHMAN (o de los hidrociclones), de descanso de levante y de pistones. Esto se debe a que el área de potencial de ahorro de CO₂e de los proyectos asociados a estos equipos es mucho más grande que las otras áreas, y no permite visualizar de manera correcta la curvas construida.

Esta CCMA de GEI muestra un potencial total de 1.737 toneladas de CO₂e que se pueden mitigar si se implementan la totalidad de los proyectos de eficiencia energética descritos. Sin embargo, el costo de implementarlos asciende los 16.101 [USD] al año, es decir, un costo de abatimiento total de 9.27 [USD] por cada tonelada de CO₂e abatida.

Es muy importante evidenciar que al ordenar los proyectos de eficiencia energética de acuerdo al costo (o beneficio) de abatimiento implícitamente reordena los proyectos de acuerdo al TIR percibido por estos. En efecto, la tabla siguiente muestra los proyectos de eficiencia energética con beneficios económicos mostrados en la figura anterior.

Tabla 35: Comparación entre Costo de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero y Tasa Interna de Retorno, Para Proyectos de EE en Molienda y Clasificación de CMDIC

Reemplazo de motor IE1 por IE3 y/o instalación de VDF en motor de	Costo de Abatimiento [USD/tonCO ₂ e]	Tasa Interna de Retorno (TIR) [%]
Bombas de Empuje	-35,7	18,6%
Ventiladores de Compresores	-32,5	17,6%
Bombas de Sistema de Enfriamiento	-28,2	16,4%
Compresores de Aire Planta	-25,7	15,7%
Ventiladores de Molinos	-22,0	14,7%
Bombas de Alta Presión	-19,1	14,0%
Ventiladores de Bombas	-8,3	11,6%
Compresores de Embrague	-1,8	10,3%

Fuente: Elaboración Propia

Nótese que, del mismo modo que los proyectos se ordenan de acuerdo al menor costo de abatimiento, se ordenan de acuerdo a la tasa interna de retorno (TIR) obtenida en la evaluación técnico-económica de los capítulos anteriores. Por lo tanto la construcción de las curvas de abatimiento es una forma implícita de priorizar los proyectos de eficiencia energética de acuerdo al TIR de estos, pero permite visualizar el potencial de ahorro económico de manera gráfica

De este modo, los equipos a quienes se les puede asociar proyectos de eficiencia energética que perciban un costo de abatimiento negativo (o beneficio de abatimiento)

son a los motores de las bombas de empuje, ventiladores de compresores y bombas del sistema de enfriamiento de los molinos. Estos poseen un beneficio de abatimiento de 35.7, 32.5 y 28.2 [USD/tonCO₂e] respectivamente. Sin embargo, quien presenta una mayor cantidad de toneladas de CO₂e abatidas y mayor retorno monetario es el reemplazo de motores ineficientes e instalación de variadores de velocidad en las **bombas de alta presión** del sistema de lubricación de los molinos. Esto se evidencia, en la figura 26, por el mayor tamaño del rectángulo o área asociada a este proyecto, que tiene un beneficio económico de 14.638 [USD] al año, a pesar de que su beneficio de abatimiento sea de 19.1 [USD/tonCO₂e].

Por lo tanto, si bien el potencial de CO₂e que se puede mitigar al llevar a cabo los proyectos de eficiencia energética asociados a el reemplazo de motores de eficiencia IE1 por motores de eficiencia Premium, y la implementación de variadores de velocidad en equipos de variabilidad de carga elevada, el costo es altísimo. Sin embargo, si sólo se implementan los proyectos que se encuentran bajo la abscisa de la figura anterior (sólo quienes presentan beneficios económicos), el potencial de ahorro sería de 1.123 [tonCO₂e], con un retorno monetario de 24.5 [USD/tonCO₂e]. Esto equivale a un ahorro monetario anual de 24.146 [USD] al año.

Es muy importante también mencionar que los principales proyectos de eficiencia energética que se encuentran bajo el eje x de la figura anterior lo componen proyectos asociados al uso de VDFs en motores de inducción de correas y bombas. Si bien en los proyectos de motores de bombas se encuentran bien justificado debido a su característica del tipo “par cuadrático”, en las correas se debe hacer un análisis de cálculo mucho más detallado y exhaustivo, por sobre todo si el factor de carga esta por sobre el 70% descrito por Lauhoff [25]. Esto se debe a que el ahorro energético en correas transportadoras utilizando VDFs ha sido muy cuestionado durante los últimos años por diversos estudios, debido a que al reducir la velocidad de las correas transportando la misma cantidad de carga puede implicar un aumento en el gasto de energía cuando la correa deja de mantenerse tensa y recta.

11.2 CURVAS DE ABATIMIENTO DE GASES DE EFECTO INVERNADERO ASOCIADO A PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA FAVORABLES

Si ahora sólo se considera los proyectos de eficiencia energética recomendados en la tabla 33 del capítulo 11, es decir, de quienes tienen VAN positivo, la curva de costo marginal de abatimiento sería de la siguiente forma:

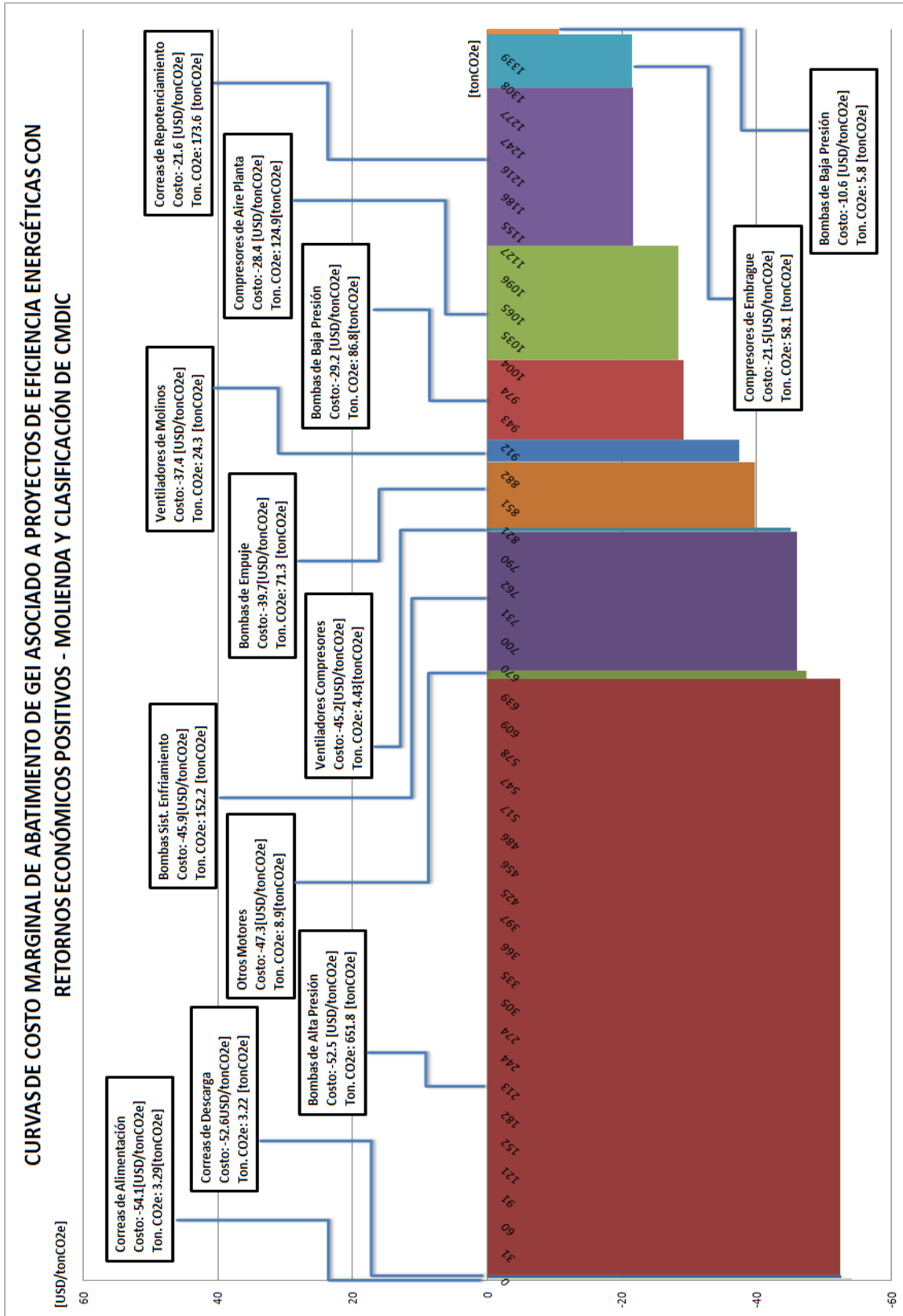


Figura 27: Curvas de Costo Marginal de Abatimiento de Gases de Efecto Invernadero Asociado a Proyectos de Eficiencia Energética Con Retornos Económicos Positivos en Molienda y Clasificación de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia

Nótese que, en comparación con la curva de costo marginal de abatimiento de gases de efecto invernadero mostrado con la totalidad de los proyectos de eficiencia energética, el total de potencial de ahorro de emisiones de CO₂e es mucho menor. En este caso, la cantidad de toneladas de gases de efecto invernadero cae a 1.369 [tonCO₂e], es decir, casi al 42%. Sin embargo, el retorno o beneficio económico por implementar estos proyectos asciende a 57.057 [USD/año], es decir, se recomienda mucho más priorizar en primer lugar proyectos de eficiencia energética que tienen VAN positivo, ya que estos no sólo le permiten a la empresa reducir el consumo energético y disminuir la huella de carbono a nivel compañía, sino que percibirán beneficios económicos positivos dado por 41.7 [USD] por cada tonelada de CO₂e que se mitiga.

Para este caso, los principales proyectos de eficiencia energética que permiten un menor costo de abatimiento se restringen al uso de variadores de velocidad en correas (de alimentación y descarga) y bombas de alta presión, con un beneficio de abatimiento de 54.1 y 52.5 [USD/tonCO₂e] respectivamente. Sin embargo, el mayor potencial de reducción de emisiones de CO₂e y retorno económico lo lidera el reemplazo de motores de bombas de alta presión de los molinos. Su potencial de abatimiento es de 651 [tonCO₂e/año], con un retorno económico anual de 34.209 [USD].

Nuevamente, es muy importante considerar para tener un cálculo del ahorro energético mucho más detallado, se tiene que entrar en detalle, y equipo por equipo, a un cálculo del potencial de ahorro de energía eléctrica al reemplazar los motores de categoría IE1 y la instalación de variadores de velocidad en bombas y correas. Como se comentó en párrafos anteriores, son esos últimos, las correas transportadoras, los que se deben justificar detallada y precisamente el nivel de ahorro de energía debido al gran cuestionamiento que existe hoy en día en la industria por el verdadero potencial de ahorro energético en correas transportadoras.

También es muy importante tener en consideración la sensibilidad de los proyectos de eficiencia energética realizado en el capítulo anterior, ya que ante un estímulo externo o interno en factores como precio de la energía, costos de inversión de los equipos, aumento del valor del dólar, crecimiento del consumo energético real con respecto al presupuestado por el Budget 2013-2017, u otros, podría hacer que proyectos de eficiencia energética pasen desde el lado inferior de la curva de costo marginal (los que perciben beneficios económicos) al lado superior de esta curva (quienes perciben costos para la empresa).

Por lo tanto, se afirma que si la compañía o superintendencia de eficiencia energética tiene como prioridad la reducción de la huella de carbono a través de la reducción de consumo de energía eléctrica en Molienda, se recomienda hacer la totalidad de los proyectos descritos ya que tienen un mayor potencial de mitigación de toneladas de CO₂e. Sin embargo si se prioriza el nivel de beneficio económico que percibirá la

empresa con estos proyectos de eficiencia energética, situación que será la más probable, se recomienda sólo implementar los proyectos de eficiencia energética descritos en la tabla 34 y en la curva de costo marginal de abatimiento de la figura 27.

11.3 PROYECCIÓN DE MITIGACIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Comparando el nivel de toneladas de CO₂e emitidas por concepto de consumo de energía eléctrica en Molienda definido por el caso BAU (Business as Usual), con respecto a la implementación de los proyectos de eficiencia energética, el resultado es el siguiente:

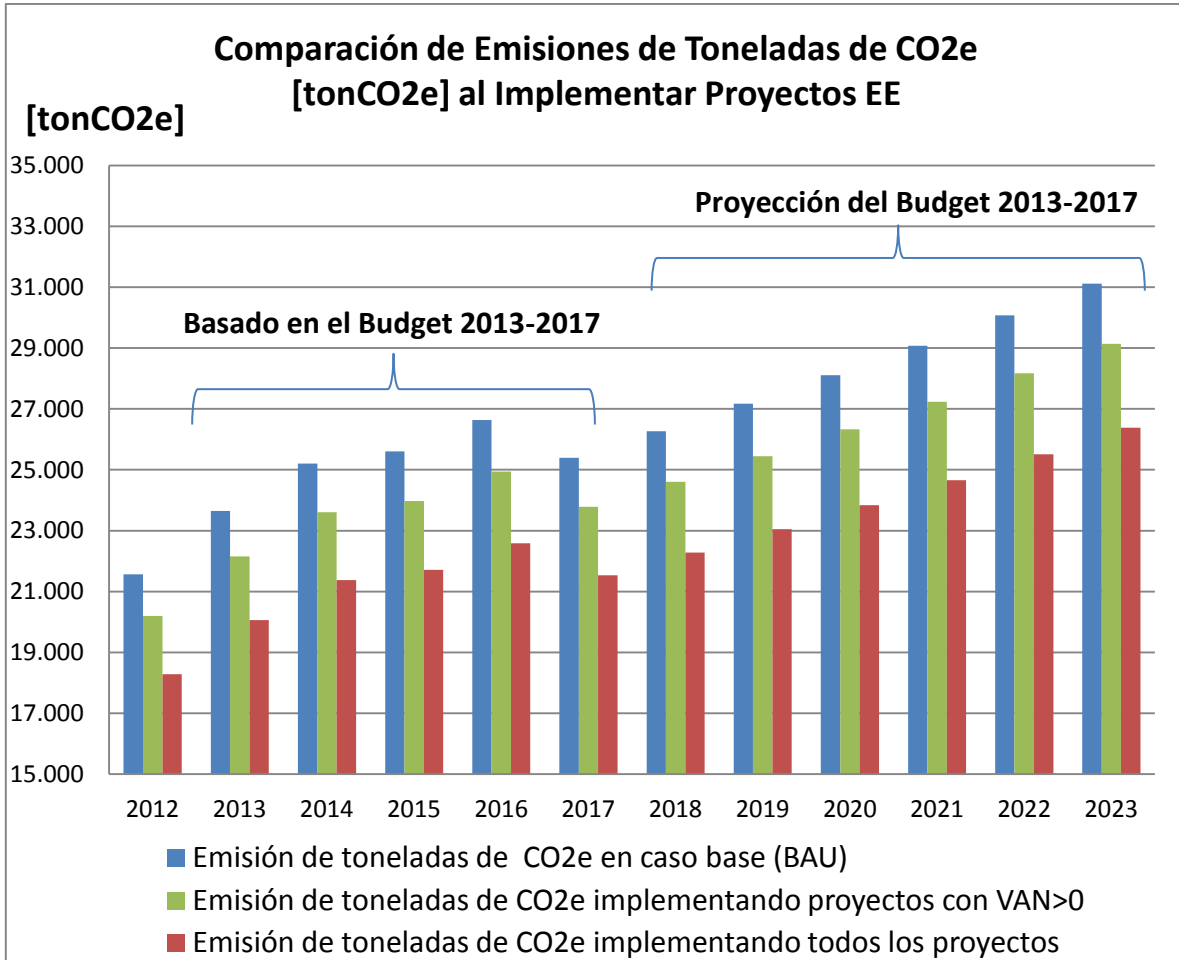


Figura 28: Comparación de Emisiones de Toneladas de CO₂e de Implementación de Proyectos de EE vs Proyección BAU en Molienda de CMDIC. Fuente: Elaboración Propia.

El crecimiento de las emisiones de CO₂e hasta el año 2017 tienen una variación igual al Budget 2013-2017 de consumo de energía eléctrica presupuestado por Collahuasi. Esto se debe a que el consumo de energía eléctrica está directamente ligado, a través del factor de emisión de CO₂e, a la emisión de gases de efecto invernadero por concepto de Alcance II.

Para el resto de los años, hasta el 2023, momento en que la vida útil de los proyectos se alcanza, se proyecta a través del promedio de crecimiento de consumo de energía

eléctrica entre los años 2012 y 2017. Este crecimiento, como se consideró y nombró anteriormente, es de un 3.44% año a año.

Para el caso de la reducción de toneladas de CO₂e al considerar la totalidad de los proyectos, el 45% se le atribuye a proyectos asociados con el reemplazo de motores de inducción de eficiencia IE1 por motores de eficiencia IE3. Por el contrario, si se considera sólo los proyectos que perciben beneficios económicos para la empresa, el 91% corresponde únicamente a proyectos de instalación de variadores de velocidad en equipos de alta variabilidad de carga. Por lo tanto, son los proyectos de control de velocidad de motores de variabilidad de carga elevada los que permiten efectivamente mayores retornos económicos para la empresa, y únicamente el 9% de la reducción de CO₂e viables económicamente se les atribuye a proyectos de reemplazo de motores ineficientes por motores de alta eficiencia.

Para el año 2023, la diferencia de reducción de CO₂e acumulado entre el escenario BAU y el caso en que se escoja implementar la totalidad de los proyectos de eficiencia energética es de 48.597 toneladas de CO₂e. Sin embargo, como es de suponer, esto es prácticamente imposible, dado que los recursos necesitados para realizar todos los proyectos son elevados e implica al final de la vida útil de los proyectos un costo económico (VAN) de 116.618 [USD].

Por el contrario, a pesar que la reducción acumulada de toneladas de CO₂e al implementar únicamente los proyectos de eficiencia energética económicamente recomendados cae a 20.300 (casi al 42%), de modo que llevar estos a la práctica es mucho más viable y permite obtener, al transcurrir los 10 años de vida útil, 413.248 [USD].

12 CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente trabajo y estudio, es importante mencionar que efectivamente existe un potencial de ahorro energético y de reducción de emisiones de CO₂e en la zona de Molienda y Clasificación asociado fundamentalmente a dos proyectos de eficiencia energética: el recambio de motores ineficientes por motores de eficiencia Premium y la implementación de variadores de velocidad en equipos críticos del área.

La rentabilidad de estos proyectos es mucho más atractiva si se implementa en equipos de determinadas características de operación, tipo de aplicación y nivel de potencia, y no de manera general en la zona de Molienda. Para el caso del recambio de motores, se recomienda que tengan por lo menos 6.000 horas de utilización al año y que posean una potencia nominal entre ciertos rangos. Sin embargo, al implementar variadores de velocidad en los equipos críticos se recomienda que sean en equipos de carga “par cuadrático” (bombas) y con al menos 2.000 horas de uso al año.

Es por ello que se recomienda previamente hacer un análisis económico separando los motores por la cantidad de horas de uso, rango de potencia de los equipos y el tipo de aplicación (o tipo de carga) de estos, de tal manera de no sólo determinar qué tipos de equipos pueden maximizar el ahorro energía y emisión de toneladas de CO₂e al incluirlos en el recambio de motor o uso de un VDF, sino que obtener un mayor beneficio económico para Collahuasi por el ahorro de la facturación eléctrica.

Ahora, si bien hacer un recambio de motores en los equipos nombrados anteriormente permite ahorros energéticos y económicos, no se compara con el beneficio que se obtiene al implementar variadores de frecuencia en los equipos de consumo energético crítico y que no tengan ya un control de velocidad implementado. Estos corresponden a las principales bombas y correas de Molienda y Clasificación, liderados por las bombas de empuje y alta presión.

No se recomienda, en el caso de querer un mayor beneficio económico, agregar paralelamente un recambio de motores en los equipos críticos a aquellos que se le implementen variadores de velocidad (a excepción de los compresores de embrague), a menos que el objetivo sea obtener un mayor ahorro energético. En este caso, y sacrificando un porcentaje del beneficio obtenido, se obtendrá una mayor reducción en las emisiones de CO₂e por parte de los equipos críticos del área de Molienda y Clasificación.

Sin embargo es muy importante, al momento de determinar de manera precisa los beneficios económicos, dimensionar la cantidad de reducción de velocidad que se implementará a cada motor al utilizar un variador de frecuencia. Esto se debe a que la sensibilidad del proyecto con respecto al porcentaje de reducción de velocidad de los

equipos impacta significativamente el VAN, TIR y PayBack, y por ende, la forma de las curvas de costo marginal de abatimiento a través del cambio de el costo de abatimiento y totalidad de reducción de CO₂e anual.

De este modo, se propone al equipo de Eficiencia Energética de CMDIC realizar un estudio detallado y preciso para determinar el potencial de ahorro energético implementando este tipo de mecanismo de control de velocidad, mediante el estudio y registro de las curvas de cargas de bombas de las diferentes áreas de la compañía. Los beneficios de estos, si se implementan en los equipos de mayor nivel de factor de carga (variabilidad de carga) podrían incluso lograr ahorros de energía por sobre el 30%. Con mayor razón, se solicita que el estudio de implementación de VDFs en correas transportadoras sea muy cuidadoso, puesto que si se dan ciertas condiciones operacionales o características del mecanismo de transporte de material, puede que el aumento de velocidad implique mayor consumo de energía, evidenciado por el trabajo de Lauhoff [26].

Respecto a las curvas de costo marginal de abatimiento de gases de efecto invernadero, se puede concluir que estas permiten no sólo priorizar los proyectos en relación a su costo de abatimiento, sino que además de manera implícita se prioriza, en este caso en particular, por su tasa interna de retorno (tabla 44). Sin embargo, estas curvas no permiten visualizar el periodo de retorno ni otras externalidades que puedan generar la implementación de estos proyectos, como factores de salud ocupacional de operadores, contaminación acústica o visual, etc.

Para el caso de los proyectos estudiados, el porcentaje de reducción de CO₂e con respecto al total de CO₂e emitido por Molienda y la Compañía es muy bajo. Sin embargo hay que destacar que este estudio sólo se redujo a equipos que pertenecen a esta área, y que perfectamente puede ser extrapolado a motores de diversas áreas de la compañía. Así, se podría aumentar el potencial de reducción de CO₂e si se hace un correcto trabajo en conjunto con las gerencias de las principales áreas de producción de la compañía: Mina Rosario y Planta Concentradora de Sulfuros.

De esta manera, y para cerrar la idea principal de este estudio, la factibilidad de implementación de nuevos proyectos en el sector minero depende fundamentalmente de los beneficios económicos que se recibirán y el tiempo de retorno la inversión requerida, y por sobre todo en una empresa como CMDIC en donde se ha estado buscando mejorar los bajos índices de producción y elevados costos de operación registrados durante los últimos dos años

Así, el estudio de proyectos de eficiencia energética es imprescindible para la minería y esta empresa, ya que permite no sólo reducir costos de operación, sino que mejorar el sistema de producción y mejorar su imagen corporativa a través de la reducción de gases de efecto invernadero al medio ambiente.

13 BIBLIOGRAFÍA

- [1] ALZATE DUBERNEY ALONSO, 2011, Speed Control Using Voltage-Frequency Relation, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia,
- [2] AUDITORIA SUPERIOR DE LA FEDERACION (ASF), Métodos Cuantitativos y Cualitativos Aplicados s las Auditorías, España
- [3] BANCO MUNDIAL, VERGARA WALTER, 2006, Respuesta al Cambio Climático: Un Plan de Acción para el Banco Mundial en América Latina y el Caribe
- [4] BP, 2013, Statistical Review of World Energy [en línea], <<http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013.html>> [consulta 04 Mayo 2013]
- [5] CADIU UBILLA, PABLO IGNACIO, 2010, Determinación de la Huella de Carbono de Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. Tesis para optar al título de Ing. Civil en Minas. Santiago. USACH.
- [6] CAMPOS AVELLA. JUAN CARLOS, QUISPE OQUEÑA, ENRIQUE CIRO , et als, Eficiencia Energética en Motores Eléctricos, Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia (UPME) e Instituto Colombiano Para el Desarrollo de la Ciencia y LA Tecnología (COLCIENCIAS).
- [7] CENTRO DE CAMBIO GLOBAL (CCG), 2010, Estimaciones de Costo y Potencial de Abatimiento de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero para Diferentes Escenarios Futuros”, Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC)
- [8] CODELCO, 2006, Manual de Eficiencia Energética en Proyectos de Inversión, Vicepresidencia Corporativa de Excelencia Operacional, Promoción y Sustentabilidad CODELCO
- [9] COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA (CNE), 2008, Balance Nacional de Energía.
- [10] COMISION NACIONAL DE ENERGÍA, 2009, Modelo de Proyección Demanda Energética Nacional de Largo Plazo, Santiago, Chile
- [11] COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI, 2012, Reporte de Huella de Carbono y Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 2011.

- [12] CORTES MUÑOZ, CLAUDIO ALEJANDRO, 2012 Planta Minera Quellaveco: Desarrollo de un sistemas de eficiencia energética, Trabajo para optar al título de ingeniero civil electricista, Universidad de Chile.
- [13] DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA USACH, 2009, Proyecto Piloto de Reemplazo de Motores Eléctricos en la Minería del Cobre-Chile, Universidad de Santiago de Chile
- [14] FARAH GODOY, SAMIR, 2012, Metodología para la determinación de curvas de reducción de gases de efecto invernadero para compañía minera doña Inés de Collahuasi, trabajo de memoria para optar al título de Ing. civil, UTFSM, Valparaíso, Chile
- [15] FIDE, 2002, Procedimiento de evaluación para la sustitución de motores eléctricos estándar por motores de alta eficiencia
- [16] GERENCIA DE SERVICIOS OPERACIONALES CMDIC, 2013, Informe Interno Final Consumo de Energía Eléctrica Compañía Minera Collahuasi
- [17] GHG PROTOCOL and WRI, 2008, A Corporate Accounting and Reporting Standard, GHG, 25p
- [18] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 1996, Climate Change 1995, Mitigation of Climate Change
- [19] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007, Climate Change 2007, Mitigation of Climate Change
- [20] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2007, “Cambio Climático 2007 – Informe de Síntesis”, 77P,
- [21] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA), 2012, World Energy Outlook 2012, Francia
- [22] KESICKI F. 2010, Marginal Abatement Cost Curves for Policy Making – Expert-Based vs. Model-Derived Curves.
- [23] KESICKI F. 2010, Marginal Abatement Cost Curves: Combining Energy System Modelling and Decomposition Analysis

- [24] KIUILA O. RUTHEFORD T. 2011, Piecewise smooth approximation of step marginal cost curve for decreasing returns to scale technology.
- [25] LAUHOFF HANS, 2005, Control de Velocidad en Correas Transportadoras - ¿Realmente Ahorra Energía?, Conferencia Beltcon 13, Randburg, Rep. De Sudáfrica
- [26] MCKINSEY & COMPANY, 2007, "Pathways to a Low-Carbon Economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve", McKynsey & Company. Alemania
- [27] MCKINSEY & COMPANY, 2007. Costs and Potentials of Greenhouse Gas Abatement in Germany, Alemania
- [28] MEIER A.K. 1982, Supply Curves of Conserved Energy. Lawrence Berkeley National Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- [29] MINISTERIO DE ENERGÍA, 2012, Guía de Asistencia Técnica de EE en Sistemas de Tratamiento de Materiales, 2012
- [30] MORAN D. et al", 2010, Marginal Abatement Cost Curves for UK Agricultural Greenhouse Gas Emissions, Gran Bretaña
- [31] MUÑOZ RAMOS, ALFREDO, 2010, Apunte de Clases "Máquinas operando a velocidad variable: Bombas de fluido y correas transportadoras", Universidad de Chile
- [32] MUÑOZ RAMOS, ALFREDO, 2010, Apunte de curso EL6007 "Confiabilidad y uso eficiente de la energía: Análisis predictivo de fallas en la industria y la minería y el uso confiable de equipos de electrónica de potencia", Universidad de Chile, 2012.
- [33] MUÑOZ RAMOS, ALFREDO, 2010, Apunte de curso EL6007 "Eficiencia de los Motores de Inducción en función del grado de carga", Universidad de Chile
- [34] MUÑOZ RAMOS, ALFREDO, 2010, Apunte de curso EL6007 "Métodos para orientar la adquisición de motores eléctricos en la industria y la minería.", Universidad de Chile
- [35] OMRON, 1999, "Guía del Usuario :Convertidores de Frecuencia: Ahorro Energético en el uso de motores eléctricos", Guía del Usuario, OMRON

- [36] PEREZ LORENZANA, MICHAEL, 2009, El ahorro de la energía con un variador de frecuencia y las diferentes aplicaciones, en la industria con equipo Mitsubishi, Universidad de Guatemala
- [37] PIMENTEL SARA I. y CONTRERAS PEDRO S., 2008, “Emisiones de Gases de Efecto Invernadero de la Minera del Cobre de Chile. 2001 – 2007”, Santiago, Chile
- [38] PORTAL MINERO, 2006, “Guía de Ingeniería en Operaciones Mineras: Tecnologías y Procesos Productivos Chile 2005/2006”
- [39] PROCOBRE, 2006, Manual del Uso Eficiente de la Energía Eléctrica
- [40] PROGRAMA DE ESTUDIOS E INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA (PRIEN), 2007, Proyecto “Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile”, Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile
- [41] PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE CAMBIO CLIMÁTICO, 1997, Durban, Sudáfrica.
- [42] QUISPE, ENRIQUE, 2005, Métodos Para el Uso Eficiente de Energía en la Aplicación Industrial de Motores Eléctricos, Curso Tutorial XII CONEIMERA, Trujillo, Perú.
- [43] RAMOS CID, RICARDO, 2008, Trabajo de Titulación “Análisis técnico económico de motores energéticamente eficientes y su aplicación en la industria minera”, Universidad de Chile, Santiago
- [44] US. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATIO (EIA), 2006, International Energy Outlook 2005”, Estados Unidos.
- [45] VALLEJOS VILLAGRA, RODRIGO JAVIER, 2008, Trabajo de Titulación “Sistema de Evaluación técnico económica de uso eficiente de energía eléctrica en parque de motores de una planta concentradora de cobre”, Universidad de Chile, Santiago
- [46] Vicepresidencia Legal, “Reporte de Desarrollo Sustentable 2011 Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi”, Reporte Externo, Santiago, Chile, 2012.

[47] WEG, 2010, Guía Técnica “Motores de inducción alimentados por convertidores de frecuencia PWM”, Santiago, Chile.

[48] WRI, WBCSD, 2001, Protocolo de Gases de Efecto Invernadero. Estándar Corporativo de Contabilidad y Reporte, Edición Revisada

14 ANEXOS

14.1 CÁLCULO DE PÉRDIDAS INTERNAS EN MOTORES

- **Pérdidas en conductores del estator**

Las pérdidas por el estator se calcula como:

$$P_{perdidas\ estator} = I_L^2 * R = \left(\frac{P_{mec}}{\sqrt{3} * V * fp * \eta} \right)^2 * R$$

Donde P_{mec} es la potencia mecánica de la carga, V es el voltaje de la red, fp es el factor de potencia y η el rendimiento del motor

- **Pérdidas en conductores del rotor**

Las pérdidas por el rotor se calcula como:

$$P_{perdidas\ rotor} = (P_{mec} + P_{fric} + P_{vent}) * \frac{s}{1 + s}$$

Donde P_{mec} es la potencia mecánica de la carga, P_{fric} y P_{vent} son las pérdidas por fricción y ventilación en el motor, y s es el deslizamiento.

- **Tabla de distribución de pérdidas para motores NEMA-B**

Tabla 36: Pérdidas para motores NEMA-B bajo 1 HP

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

Fuente: Ali Emadi, Energy-Efficient Electric Motors: Marcel Dekker, 2005.

Tabla 37: Pérdidas para motores NEMA-B entre 25 y 250 HP

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

Fuente: Ali Emadi, *Energy-Efficient Electric Motors*: Marcel Dekker, 2005.

14.2 CÁLCULO DE FACTORES DE CORRECCIÓN

- **Factor de Corrección por Voltaje distinto al Nominal**

Este valor se calcula como:

$$K_V = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) \left[1 + 0.5 * \left(\left(\frac{V_{nom}}{V_{real}} \right)^2 - 1 \right) - 0.3 * \left(1 - \left(\frac{V_{real}}{V_{nom}} \right)^2 \right) \right]}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor en por unidad

V_{nom} : Voltaje Nominal del Motor, en [V]

V_{real} : Voltaje real aplicado al motor, igual a $\frac{V_a+V_b+V_c}{3}$, en [V]

V_a, V_b, V_c : Voltajes reales de las fases A, B y C respectivamente, en [V]

- **Factor de Corrección por Frecuencia distinta a la Nominal**

Este valor se calcula como:

$$K_f = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) \left[a * \left(\frac{f_{nom}}{f_{real}} \right) + b * \left(\frac{f_{real}}{f_{nom}} \right) + c * \left(\frac{f_{real}}{f_{nom}} \right)^2 + d \right]}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor, en por unidad

f_o : Frecuencia Nominal del Motor, en [hz]

f_{real} : Frecuencia real de la red, en [hz]

$$a = \begin{cases} 0.2 & \text{para motores estándar} \\ 0.3 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad b = \begin{cases} 0.05 & \text{para motores estándar} \\ 0.06 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

$$c = \begin{cases} 0.05 & \text{para motores estándar} \\ 0.06 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad d = \begin{cases} 0.70 & \text{para motores estándar} \\ 0.58 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

- **Factor de Corrección por Carga (o Potencia) distinta a la Nominal**

Este valor se calcula como:

$$K_c = \frac{f_c}{f_c * \eta_o + (1 - \eta_o) * (a * f_c^2 + b)}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor en por unidad

f_c : Factor de carga en por unidad

$$a = \begin{cases} 0.6 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad b = \begin{cases} 0.4 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

- **Factor de Corrección por altura sobre el nivel del mar**

Este valor se calcula como:

$$K_h = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) * \left[\left(\frac{a}{a' - b' * \left(\frac{h}{1000} \right)} \right) + b \right]}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor en por unidad

$$a = \begin{cases} 0.6 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad b = \begin{cases} 0.4 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

$$a' = \begin{cases} 1.087 & \text{si } w_{nom} \geq 1200 \text{ [rpm]} \\ 1.060 & \text{si } w_{nom} < 1200 \text{ [rpm]} \end{cases}, \quad b' = \begin{cases} 0.087 & \text{si } w_{nom} \geq 1200 \text{ [rpm]} \\ 0.060 & \text{si } w_{nom} < 1200 \text{ [rpm]} \end{cases}$$

w_{nom} : Velocidad nominal del motor en [rpm]

h : Altura del motor sobre el nivel del mar, en [mts]

- **Factor de Corrección por temperatura distinta a la nominal**

Este valor se calcula como:

$$K_t = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) * \left[a * \left(\frac{234.5 + T_{real}}{274.5} \right) + b \right]}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor, en por unidad

$$a = \begin{cases} 0.6 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad b = \begin{cases} 0.4 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

T_{real} : Temperatura ambiente promedio, igual a $\frac{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}}{2}$, en [°C]

$T_{\text{máx}}, T_{\text{mín}}$: Temperatura ambiente máxima y mínima respectivamente, en [°C]

- **Factor de Corrección por desbalance de corriente y voltaje**

Este valor se calcula como:

$$K_d = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) \left[a * \left[1 + \left(\frac{2}{3} \right) * fdes_I^2 \right] + b * \left[1 + \left(\frac{2}{3} \right) * fdes_V^2 \right] + 0.1 \right]}$$

Donde η_o : Eficiencia Nominal del Motor

$fdes_I$: Desbalance de corriente, = $\frac{\max\{|I_{\text{real}} - I_a|, |I_{\text{real}} - I_b|, |I_{\text{real}} - I_c|\}}{I_{\text{real}}}$, en [pu]

I_a, I_b, I_c : Corrientes reales de la fase A, B y C respectivamente, en [A]

$fdes_V$: Desbalance de voltaje, = $\frac{\max\{|V_{\text{real}} - V_a|, |V_{\text{real}} - V_b|, |V_{\text{real}} - V_c|\}}{V_{\text{real}}}$, en [pu]

V_a, V_b, V_c : Voltajes reales de la fase A, B y C respectivamente, en [V]

$I_{\text{real}} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3}$ [A], $V_{\text{real}} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}$ [V]

$$a = \begin{cases} 0.6 & \text{para motores estándar} \\ 0.5 & \text{para motores eficientes} \end{cases}, \quad b = \begin{cases} 0.3 & \text{para motores estándar} \\ 0.4 & \text{para motores eficientes} \end{cases}$$

- **Factor de corrección por deterioro de rebobinados**

Este valor, sólo aplicado al motor instalado, se calcula como:

$$K_r = \begin{cases} 1 & \text{si } N_r = 1 \\ 0.985^{N_r} & \text{si } N_r \neq 1 \end{cases}$$

Donde N_r : Número de rebobinados en la vida del motor

14.3 CÁLCULO DE HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN ECONÓMICA

- **Cálculo del Valor Actual Neto (VAN)**

Si un proyecto de inversión tiene una vida útil de “n” años, en los cuales se obtendrán beneficios A_i para cada año “i” con una inversión I a una tasa de descuento “d”, se tiene que el Valor Actual Neto (VAN) del proyecto de inversión es:

$$VAN = -I + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1+d)^i}$$

- Caso beneficios anuales constantes ($A_i = A$)

$$VAN = -I + \sum_{i=0}^n \frac{A_i}{(1+d)^i} = -I + A \sum_{i=0}^n \frac{1}{(1+d)^i} = -I + A \frac{(1+d)^n - 1}{d(1+d)^n}$$

- Caso beneficios de crecimiento anual constante ($A_i = A_{i-1} * (1+C)$)

$$VAN = -I + \sum_{i=0}^n \frac{A_{i-1}(1+c)}{(1+d)^i} = -I + A_0 \sum_{i=0}^n \frac{(1+c)^i}{(1+d)^i} = -I + A_0 \frac{(1+d_2)^n - 1}{d_2(1+d_2)^n}$$

Donde $d_2 = \left(\frac{1+d}{1+c} - 1\right)$, que corresponde a la tasa de descuento equivalente.

- **Cálculo del Factor de Recuperación de Capital (FRC)**

Se define el factor de recuperación de capital al inverso multiplicativo (que depende de la tasa de descuento d) que acompaña al valor de A , es decir

$$VAN = -I + A * (FRC(d))^{-1}$$

- Caso beneficios anuales constantes ($A_i = A$)

$$FRC(d) = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1}$$

- Caso beneficios de crecimiento anual constante ($A_i = A_{i-1} * (1+C)$)

$$FRC(d_2) = \frac{d_2(1+d_2)^n}{(1+d_2)^n - 1}, \quad \text{usando } d_2 = \left(\frac{1+d}{1+c} - 1\right)$$

- **Cálculo de la Tasa interna de Retorno (TIR)**

La tasa interna de retorno (TIR) representa la tasa de descuento a la cual cualquiera de las dos opciones de inversión entregan un igual VAN. Es decir, el TIR es la tasa de descuento “ d ” tal que se tiene la siguiente igualdad de valores:

$$-I_{est} + \sum_{i=1}^n \frac{PE * E_{est,i}}{(1+d)^i} = -I_{efi} + \sum_{i=1}^n \frac{PE * E_{est}}{(1+d)^i}$$

Donde I_{est} y I_{efi} son las inversiones de los equipos estándar y eficientes respectivamente

- **Cálculo del PayBack (o retorno de inversión)**

El PayBack, o periodo de recuperación de capital (o inversión) corresponde a la cantidad de años que debe durar el proyecto para que el VAN sea 0, es decir, es el valor de “n” tal que:

$$-I + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{(1+d)^i} = 0$$

Donde I es la inversión del proyecto ($I > 0$).

- Si consideramos que $A_i = A$ constante en cada año, entonces usando las propiedades de suma geométrica nos queda que el valor de “n” debe cumplir:

$$A * \left[\frac{\left(\left(\frac{1}{1+d} \right)^{n+1} - \left(\frac{1}{1+d} \right)^1 \right)}{\left(\frac{1}{1+d} \right) - 1} \right] = I$$

Despejando el valor de n, y utilizando propiedades algebraicas y logaritmo, se tiene que n es:

$$n = \log_{\frac{1}{1+d}} \left[\left(\frac{1}{1+d} \right) * \left(1 - d * \left(\frac{A}{I} \right)^{-1} \right) \right] - 1$$

- Para el caso de crecimiento anual del C [%], el tiempo de retorno para un proyecto donde el ahorro tiene un crecimiento anual de un C [%] (con el ahorro inicial igual a $A_1 = A_0 * (1 + C)$), cumple que:

$$-I + \sum_{i=1}^n \frac{A(1+C)^i}{(1+d)^i} = 0$$

Despejando del mismo modo que antes, el retorno de inversión en años será de:

$$n = \log_{\frac{1+C}{1+d}} \left[\left(\frac{A}{I} \right)^{-1} \cdot \left(\frac{1+C}{1+d} - 1 \right) + \frac{1+C}{1+d} \right] - 1$$

- **Costo del Ahorro de Energía (CAE)**

El costo de ahorro de energía (CAE) muestra el equivalente de costo de energía del proyecto, es decir, permite compararlo con otras fuentes de energía a distinto costo de energía. El cálculo del CAE se realiza de la siguiente manera:

$$CAE = \frac{FRC(d) * (I_{efi} - I_{est}) + (M_{efi} - M_{est})}{E_{est} - E_{efi}}$$

14.4 ESQUEMA DEL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE CONCENTRADO DE COBRE COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

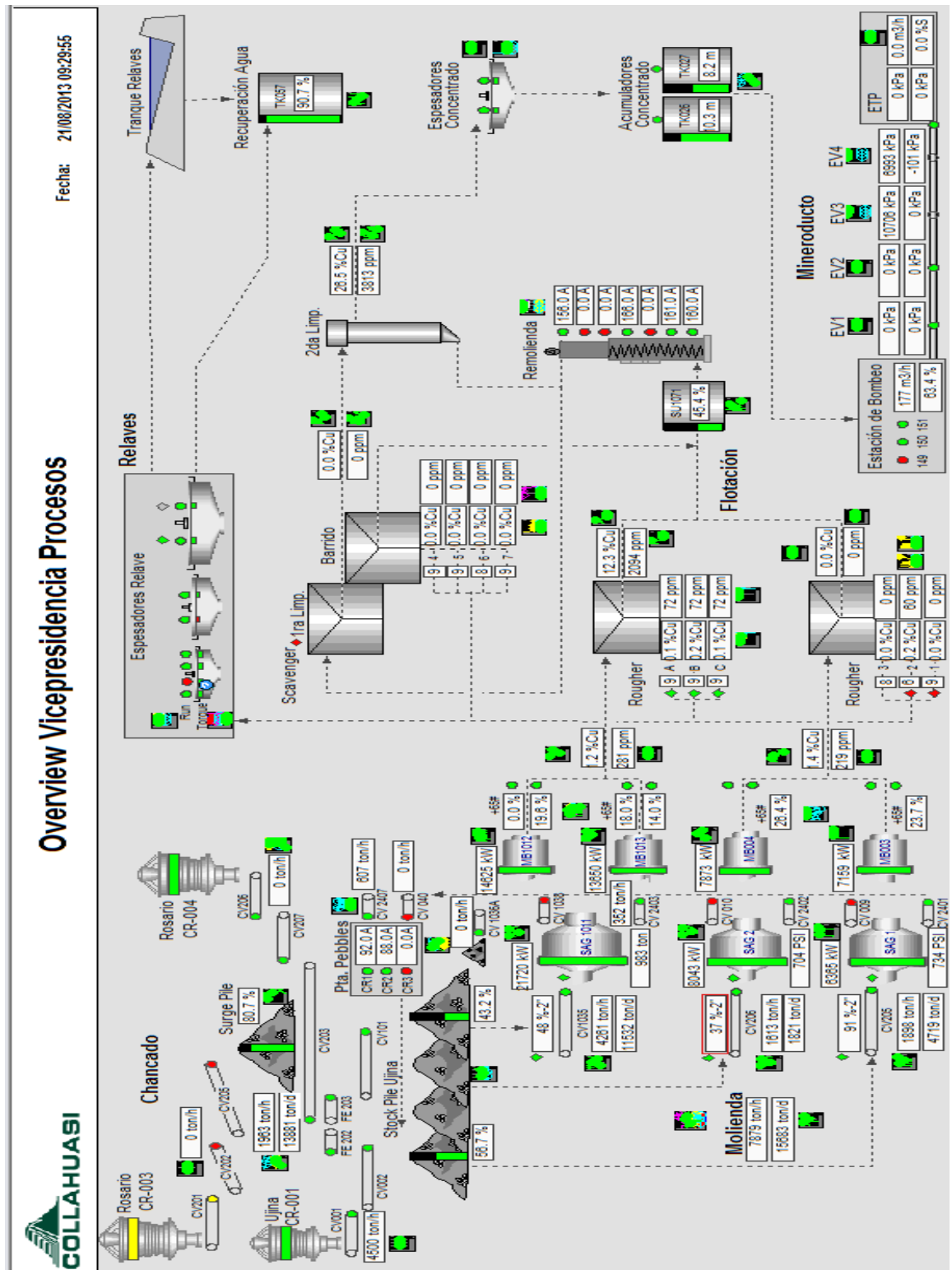


Figura 29: Esquema General de Proceso de Producción de Concentrado de Cobre - Línea Sulfuros

Fuente: PI System

14.5 LINEAS DE PRODUCCIÓN L1, L2 Y L3 DE PLANTA CONCENTRADORA DE SULFUROS DE COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

14.5.1 LINEA 1

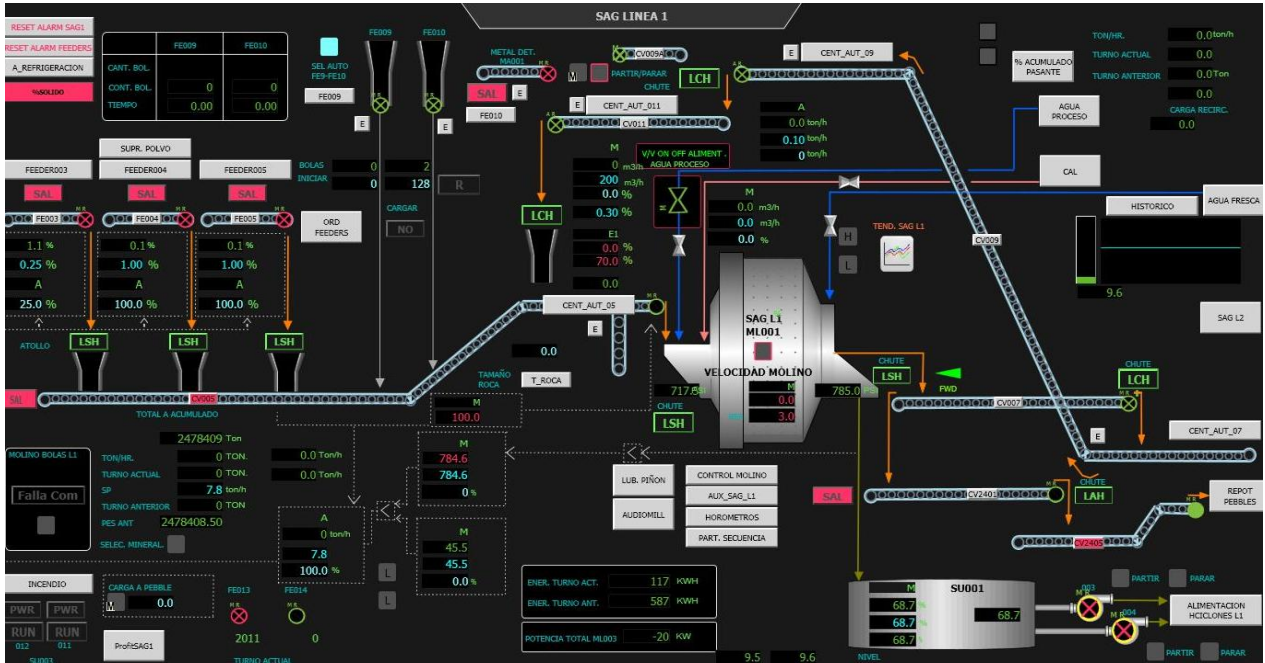


Figura 30: Esquema de Línea de Producción L1 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS

14.5.2 LINEA 2

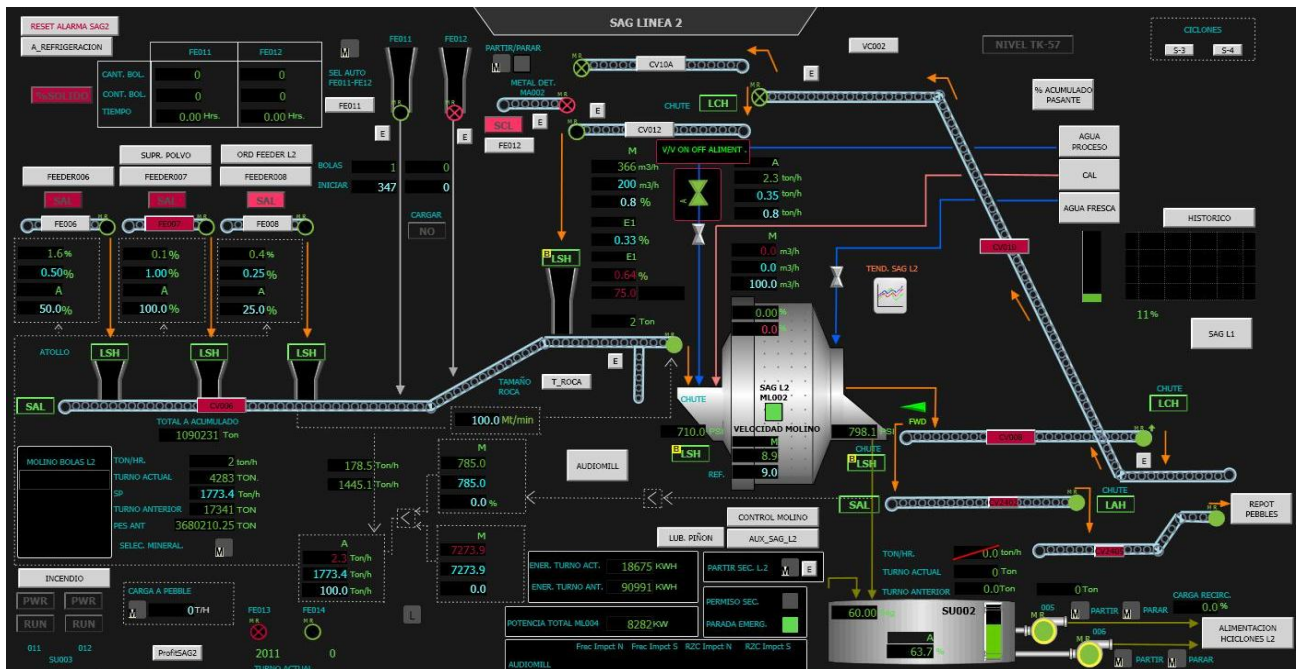


Figura 31: Esquema de Línea de Producción L2 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS

14.5.3 LINEA 3

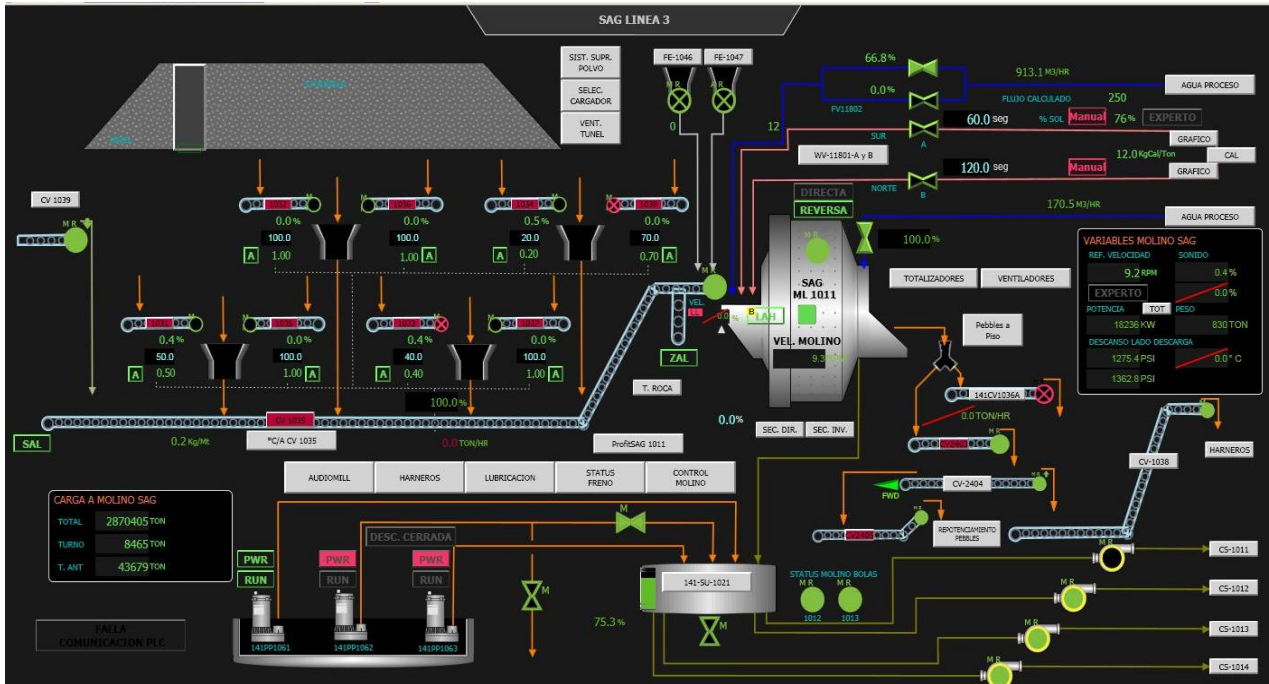


Figura 32: Esquema de Línea de Producción L3 de Planta de Sulfuros de CMDIC, obtenido del DCS

14.6 RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA GENERAL

14.6.1 RESULTADO TECNICO-ECONÓMICO DE REEMPLAZO DE TOTALIDAD DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

Tabla 38: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Reemplazo de Motores, considerando el total de motores

Equipos asociados al proyecto	Inversión Inicial	VAN	TIR	PayBack
	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	\$ 221.132	-149.513	-9,5%	-
Bombas de Baja Presión	\$ 49.477	-8.258	6,2%	13,0
Bombas de Empuje	\$ 17.609	-6.590	0,8%	21,5
Bombas de Freno Hidráulico	\$ -	0	-	-
Bombas de Pistones	\$ 3.582	-3.007	-	-
Bombas de Acumulador	\$ -	0	-	-
Bombas de Sistema de Enfriamiento	\$ 33.636	-17.456	-3,6%	50,3
Bombas ASHMAN	\$ -	0	-	-
Bombas de PIÑÓN	\$ 8.891	-3.151	1,3%	20,2
Bombas de Descanso Levante	\$ 5.500	-3.910	-11,0%	-

Compresores de Embrague	\$ 23.387	351	10,3%	9,8
Compresores de Aire Planta	\$ 25.858	7.085	15,7%	7,3
Ventiladores de Bombas	\$ 7.937	589	11,6%	9,1
Ventiladores de Compresores	\$ 5.970	2.232	17,6%	6,6
Ventiladores de Correas	\$ 3.368	-2.015	-6,4%	-
Ventiladores de Molinos	\$ 17.654	3.977	14,7%	7,6
Correas de Alimentación	\$ 33.600	-3.954	7,3%	12,0
Correas de Descarga	\$ 23.280	-5.145	4,8%	14,5
Correas de Repotenciamiento	\$ 195.068	-117.056	-6,4%	-
Otros Motores	\$ 34.680	-6.304	5,8%	13,4

14.6.2 RESULTADO TÉCNICO-ECONÓMICO DE IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS

Tabla 39: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Instalación de VDFs, considerando el total de motores evaluados

Equipos asociados al proyecto	Inversión Inicial	VAN	TIR	PayBack
	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	\$ 336.071	273.199	25,6%	4,8
Bombas de Baja Presión	\$ 101.504	1.854	10,4%	9,8
Bombas de Empuje	\$ 28.295	28.232	28,8%	4,2
Bombas de Sistema de Enfriamiento	\$ 79.803	56.771	23,8%	5,1
Correas de Alimentación	\$ 80.857	-34.540	-0,8%	26,3
Correas de Descarga	\$ 46.997	-20.167	-0,8%	26,5
Correas de Repotenciamiento	\$ 196.074	-25.390	7,1%	12,2

14.6.3 RESULTADO TÉCNICO-ECONÓMICO DE REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 E IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS

Tabla 40: Resultado Completo de Evaluación Técnico Económica de Reemplazo de Motores e Instalación de VDFs, considerando el total de motores evaluados

Equipos asociados al proyecto	Inversión Inicial	VAN	TIR	PayBack
	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	\$ 557.203	106.020	14,0%	7,9
Bombas de Baja Presión	\$ 130.565	-12.046	7,9%	11,5
Bombas de Empuje	\$ 41.224	20.484	20,0%	6,0
Bombas de Sistema de Enfriamiento	\$ 113.439	35.088	16,4%	7,0
Correas de Alimentación	\$ 112.897	-42.809	0,6%	21,9

Correas de Descarga	\$ 68.717	-28.125	-0,2%	24,4
Correas de Repotenciamiento	\$ 409.760	-196.154	-2,3%	34,6

14.7 TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA GENERAL

14.7.1 TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE3 EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

14.7.1.1 TABLA DE ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA

Tabla 41: Análisis Completo por Horas de Uso vs Rango de Potencia de Reemplazo de Motores en Molienda

Horas de uso		Potencia		Inversión	VAN	TIR	PayBack
min	Max	Min	Max	[USD]	[USD]	[%]	[años]
0	1.000	1	5	4.776	-3.802	-	-
		10	25	5.781	-4.517	-15%	-
		25	50	11.262	-10.937	-	-
1.000	2.000	1	5	6.139	-4.703	-14%	-
		5	10	1.560	-774	-3%	39,5
		10	25	18.697	-12.690	-10%	-
		25	50	12.653	-9.258	-12%	-
		50	100	67.424	-59.251	-21%	-
2.000	3.000	10	25	22.228	-13.321	-6%	-
		50	100	28.803	-19.728	-10%	-
		100	500	12.929	-7.856	-7%	-
3.000	3.000	0	1	778	-614	-	-
		1	5	1.468	-839	-5%	-
		10	25	14.209	-4.334	3%	17,6
		50	100	61.599	-40.239	-9%	-
		100	500	25.858	-11.661	-1%	29,4
4.000	5.000	0	1	778	-669	-	-
		5	10	1.560	-251	6%	12,9
		10	25	9.010	-1.069	7%	12,0
		25	50	11.262	-2.279	5%	13,9
		50	100	27.314	-16.412	-6%	-
		100	500	12.929	-4.149	2%	18,3
5.000	6.000	1	5	2.616	-543	5%	14,1
		5	10	1.560	236	13%	8,3
		10	25	9.687	845	12%	8,9
		25	50	12.653	-2.362	6%	13,5

	50	100	76.050	-36.888	-3%	36,2
6.000	0	1	721	-595	-	-
	1	5	9.143	587	11%	9,2
	10	25	8.333	3.429	18%	6,4
	100	500	25.858	3.429	13%	8,5
7.000	0	1	3.322	-697	5%	14,2
	1	5	9.625	1.224	13%	8,5
	5	10	9.662	4.729	20%	6,0
	10	25	12.899	4.582	17%	6,7
	25	50	5.631	1.913	17%	6,8
	100	500	12.929	4.566	17%	6,7
8.000	0	1	3.252	-1.052	2%	18,5
	1	5	5.099	1.977	18%	6,5
	5	10	1.560	1.015	23%	5,3
	10	25	3.229	2.772	26%	4,6
	100	500	137.781	-83.835	-7%	-

14.7.1.2 TABLA DE ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO

Tabla 42: Análisis Completo por Horas de Uso vs Tipo de Equipo de Reemplazo de Motores en Molienda

Horas de uso		Tipo	Inversión	VAN		TIR	PayBack
min	Max		[USD]	[USD]	[%]	[años]	
0	1000	Ventilador	3.229	-	2.620	-	-
		Bomba	18.590	-	16.579	-	-
1000	2000	Correa	7.022	-	5.025	-11%	-
		Bomba	94.754	-	78.763	-	-
		Electroimán	4.697	-	3.207	-10%	-
2000	3000	Correa	34.002	-	22.249	-9%	-
		Bomba	19.370	-	12.063	-7%	-
		Harnero	10.588	-	6.592	-7%	-
3000	4000	Ventilador	2.647	-	1.462	-5%	-
		Correa	18.644	-	9.009	-2%	35,7
		Bomba	81.153	-	46.376	-5%	-
		Electroimán	1.468	-	839	-5%	-
4000	5000	Correa	34.649	-	10.991	2%	18,2
		Bomba	28.204	-	13.838	-3%	37,7
5000	6000	Motor	6.458	-	389	11%	9,2
		Ventilador	1.194	-	63	11%	9,3
		Correa	12.653	-	2.362	6%	13,5
		Bomba	70.381	-	33.901	-2%	35,3
		Compresor	10.458	-	2.294	5%	14,4

	Ud. Hidráulica	1.422	-	606	-1%	26,2
6000	Motor	1.159	-	87	8%	11,2
	Ventilador	3.109	-	10	10%	10,0
	Correa	3.229		1.182	17%	6,7
	Bomba	7.422		2.119	16%	7,2
	Compresor	25.858		3.429	13%	8,5
	Ud. Hidráulica	1.422	-	297	5%	14,1
7000	Electroimán	1.856		513	16%	7,3
	Motor	3.120		1.817	22%	5,6
	Ventilador	16.813		3.688	15%	7,7
	Correa	3.968		2.257	21%	5,6
	Bomba	17.238		3.990	15%	7,6
8000	Compresor	12.929		4.566	17%	6,7
	Motor	1.560		1.015	23%	5,3
	Ventilador	7.937		3.908	20%	6,0
	Correa	124.852	-	90.065	-11%	-
	Bomba	2.715	-	909	2%	19,1
8784	Compresor	12.929		6.230	20%	6,0
	Electroimán	928		697	25%	4,9

14.7.1.3 TABLA DE ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO DE USO VS RANGO DE POTENCIA

Tabla 43: Análisis Completo por Tipo de Equipo vs Rango de Potencia de Reemplazo de Motores en Molienda

Tipo	Potencia		Inversión	VAN	TIR	PayBack
	Min	Max	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Motor	1	5	1.159	-87	8%	11,2
	5	10	4.680	2.832	22%	5,5
	10	25	6.458	389	11%	9,2
Ventilador	0	1	4.113	-491	7%	12,0
	1	5	15.060	2.933	14%	7,9
	5	10	3.422	568	14%	8,1
	10	25	12.334	558	11%	9,4
Correa	0	1	848	-88	8%	11,7
	5	10	3.120	2.345	25%	4,9
	10	25	14.209	-2.863	5%	13,9
	25	50	30.937	-9.665	2%	17,9
	50	100	52.124	-31.750	-7%	-
	100	500	137.781	-94.214	-10%	-
Bomba	0	1	3.890	-3.041	-15%	-
	1	5	14.083	-7.270	-4%	48,5
	5	10	4.680	-1.054	5%	14,6

	10	25	57.255	-13.735	4%	15,1
	25	50	22.524	-13.258	-6%	-
	50	100	198.608	-138.447	-10%	-
	100	500	38.787	-19.516	-3%	42,0
Compresor	50	100	10.458	-2.294	5%	14,4
	100	500	51.716	14.225	16%	7,3
Harnero	10	25	10.588	-6.592	-7%	-
Ud. Hidráulica	1	5	2.844	-898	2%	18,1
Electroimán	1	5	5.721	-777	7%	12,3
	10	25	3.229	-2.059	-8%	-

14.7.2 TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS DE IMPLEMENTACIÓN DE VDFs EN EQUIPOS CRÍTICOS DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

14.7.2.1 TABLA DE ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS RANGO DE POTENCIA

Tabla 44: Análisis Completo por Horas de Uso vs Rango de Potencia en proyecto Instalación de VDFs en Molienda

Horas de uso		Potencia		Inversión	VAN	TIR	PayBack
min	Max	Min	Max	[USD]	[USD]	[%]	[años]
0	1.000	25	50	28.862	-26.829	-	-
1.000	2.000	10	25	45.687	-26.840	-6%	-
		25	50	30.825	-18.737	-7%	-
		50	100	90.761	-22.661	4%	15,4
2.000	3.000	10	25	11.606	-1.863	6%	12,9
		50	100	46.896	-24.503	-4%	53,1
		100	500	28.295	11.107	18%	6,5
3.000	4.000	10	25	21.736	-6.529	3%	17,4
		50	100	93.793	64.617	23%	5,2
		100	500	56.590	53.675	28%	4,4
4.000	5.000	10	25	23.212	3.029	13%	8,5
		25	50	28.862	-12.698	-1%	27,9
		50	100	40.824	10.740	15%	7,4
		100	500	28.295	-9.001	2%	18,2
5.000	6.000	10	25	10.868	6.776	22%	5,4
		25	50	30.825	-14.765	-2%	34,7
		50	100	93.793	183.736	44%	2,7
6.000	7.000	10	25	10.868	-4.771	-1%	27,8
7.000	8.000	10	25	22.474	31.006	35%	3,5

		25	50	14.431	32.826	49%	2,5
8.000	8.784	100	500	110.093	16.387	13%	8,3

14.7.2.2 TABLA DE ANÁLISIS POR HORAS DE USO VS TIPO DE EQUIPO

Tabla 45: Análisis Completo por Horas de Uso vs Tipo de Equipos en proyecto Instalación de VDFs en Molienda

Horas de uso		Tipo	Inversión		VAN		TIR	PayBack
min	Max		[USD]	[USD]	[USD]	[USD]	[%]	[años]
0	1000	Bomba	28.862	-	26.796	-	-	-
1000	2000	Correa	16.394	-	13.065	-	-	-
		Bomba	150.879	-	55.173	1%	20,9	
2000	3000	Correa	46.896	-	24.503	-4%	53,1	
		Bomba	39.901	-	9.244	15%	7,6	
3000	4000	Correa	33.558	-	16.921	-3%	42,4	
		Bomba	138.561	-	128.684	28%	4,4	
4000	5000	Correa	75.292	-	29.989	0%	23,4	
		Bomba	45.903	-	22.059	20%	6,0	
5000	6000	Correa	30.825	-	14.765	-2%	34,7	
		Bomba	104.661	-	190.512	42%	2,9	
6000	7000	Correa	10.868	-	4.771	-1%	27,8	
7000	8000	Bomba	36.906	-	63.831	41%	3,0	
8000	8784	Correa	110.093	-	16.387	13%	8,3	

14.7.2.3 TABLA DE ANÁLISIS POR TIPO DE EQUIPO VS RANGO DE POTENCIA

Tabla 46: Análisis Completo por Tipo de Equipos vs Rango de Potencia en proyecto Instalación de VDFs en Molienda

Tipo	Potencia		Inversión [USD]	VAN [USD]	TIR [%]	PayBack [años]
	Min	Max				
Correa	10	25	21.736	-12.193	-5%	-
	25	50	76.082	-40.528	-4%	66,0
	50	100	87.721	-42.228	-2%	35,3
	100	500	138.388	7.387	11%	9,3
Bomba	10	25	124.716	13.032	12%	8,7
	25	50	57.725	325	10%	9,9
	50	100	278.346	254.223	27%	4,5
	100	500	84.886	64.782	25%	4,9

14.8 RESUMEN DE TOTALIDAD DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE CMDIC

Tabla 47: Resumen Total de Reemplazo de Motores y/o Instalación de VDFs en Molienda y Clasificación

Equipos asociados al proyecto	Inversión Inicial	VAN	TIR	PayBack
	[USD]	[USD]	[%]	[años]
Bombas de Alta Presión	\$ 557.203	106.020	14,0%	7,9
Bombas de Baja Presión	\$ 150.981	-12.149	8,2%	11,3
Bombas de Empuje	\$ 45.904	19.544	18,6%	6,3
Bombas de Freno Hidráulico	\$ -	0	-	-
Bombas de Pistones	\$ 3.582	-3.007	-	-
Bombas de Acumulador	\$ -	0	-	-
Bombas de Sistema de Enfriamiento	\$ 113.439	35.088	16,4%	7,0
Bombas ASHMAN	\$ -	0	-	-
Bombas de PIÑON	\$ 8.891	-3.151	1,3%	20,2
Bombas de Descanso Levante	\$ 5.500	-3.910	-11,0%	-
Compresores de Embrague	\$ 23.387	351	10,3%	9,8
Compresores de Aire Planta	\$ 25.858	7.085	15,7%	7,3
Ventiladores de Bombas	\$ 7.937	589	11,6%	9,1
Ventiladores de Compresores	\$ 5.970	2.232	17,6%	6,6
Ventiladores de Correas	\$ 3.368	-2.015	-6,4%	-
Ventiladores de Molinos	\$ 17.654	3.977	14,7%	7,6
Correas de Alimentación	\$ 114.457	-41.518	1,1%	20,7
Correas de Descarga	\$ 70.277	-26.898	0,5%	22,2
Correas de Repotenciamiento	\$ 431.288	-192.553	-1,3%	28,8
Otros Motores	\$ 34.680	-6.304	5,8%	13,4

14.9 LEVANTAMIENTO DE EQUIPOS MOTORIZADOS OBTENIDOS EN AUDITORÍA ENERGÉTICA EN LA ZONA DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN.

Tabla 48: Levantamiento de Motores en Molienda y Clasificación de CMDIC, en base al año 2012.

NOMBRE DEL EQUIPO	Tipo Equipo	Potencia [kW]	Horas de Uso el 2012 [hrs]
Electroimán	Electroimán	1.5	6627

Electroimán	Electroimán	1.5	8772
Electroimán	Electroimán	5.0	3246
Tecele Monorriel Mantención Pulpa	Motor	2.4	6168
Compresores aire embrague	Compresor	112.0	6338
Clutch Air Compressor	Ventilador	3.7	6338
Compresores aire embrague	Compresor	55.0	5285
Clutch Air Compressor	Ventilador	3.7	5285
Compresores aire Planta	Compresor	112.0	7468
Clutch Air Compressor	Ventilador	3.7	7468
Compresores aire Planta	Compresor	112.0	8179
Clutch Air Compressor	Ventilador	3.7	8179
Compresores aire Planta	Compresor	112.0	6164
Clutch Air Compressor	Ventilador	3.7	6164
Correa 140 CV 007 y 140 CV 008, descarga molinos SAG 140ML001 y 002.	Correa	37.3	4331
Correa 140 CV 007 y 140 CV 008, descarga molinos SAG 140ML001 y 002.	Correa	37.3	4083
Correa 140 CV 009 y 140 CV 010, capachos	Correa	75.0	3141
Correa traspaso	Ventilador	11.2	3141
Ventilador reductor correa 140CV09	Ventilador	0.2	3141
Correa 140 CV 009 y 140 CV 010, capachos	Correa	75.0	2922
Correa traspaso	Correa	11.2	2922
Ventilador reductor correa 140CV009 Y 140CV011	Ventilador	0.2	6065
Correa 140 CV 011 y 140 CV 012, retorno SAG 140ML001 y 002.	Correa	15.0	3017
Correa 140 CV 011 y 140 CV 012, retorno SAG 140ML001 y 002.	Correa	15.0	2800
Correa Descarga BOLAS	Correa	5.6	7165
Correa Transferencia de BOLAS	Correa	1.0	7203
Correa Alimentación BOLAS	Correa	5.6	7327
Correa transportadora	Correa	18.6	3487
Correa transportadora	Correa	18.6	6168
Correa repotenciamiento pebbles	Correa	372.9	8760
Alimentador BOLAS 4" y 5" a Molino SAG	Feeder	0.8	128
Alimentador BOLAS 4" y 5" a Molino SAG	Feeder	0.8	55
Alimentador BOLAS 4" y 5" a Molino SAG	Feeder	0.8	140
Alimentador BOLAS 4" y 5" a Molino SAG	Feeder	0.8	47
Alimentador BOLAS 3" a Molino SAG	Feeder	0.8	679
Alimentador BOLAS 3" a Molino SAG	Feeder	0.8	118
Alimentador	0	-	0
Unidad Hidráulica Chute 140ST2410	Ud. Hidráulica	4.7	6168
Trampa Magnética	Electroimán	1.5	0
Trampa Magnética	Electroimán	1.5	6168
MOLINO SAG #1 LINEA 1	Molino	8000.0	6246

Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	6104
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	2280
Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	Bomba	93.0	5242
Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	Bomba	93.0	3121
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	2.2	6593
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	2.2	1756
Ventilación motores molino SAG 140ML001 y 140ML002	Ventilador	19.0	834
Ventilación motores molino SAG 140ML001 y 140ML002	Ventilador	19.0	7065
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	342
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	342
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	365
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	365
MOLINO SAG #2 LINEA 2	Molino	8000.0	7330
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	1955
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	6474
Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	Bomba	93.0	5029
Bombas de ALTA PRESION Sist. Lubricación principal molino SAG 140ML001/002	Bomba	93.0	3315
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	2.2	1563
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	2.2	6926
Ventilación motores molino SAG 140ML001 y 140ML002	Ventilador	19.0	8213
Ventilación motores molino SAG 140ML001 y 140ML002	Ventilador	19.0	0
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	378
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	378
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	404
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	404
MOLINO BOLAS #3 LINEA 1	Molino	9698.0	2824
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos	Bomba	15.0	4925

SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004			
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	3495
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003/004	Bomba	19.0	1042
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003/004	Bomba	19.0	7347
Bombas ALTA PRESIÓN Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003 y 140ML004	Bomba	37.0	1320
Bombas ALTA PRESIÓN Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003 y 140ML004	Bomba	37.0	7122
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/008	Bomba	2.2	1238
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/009	Bomba	2.2	7191
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	168
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	168
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	164
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	163
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	3791
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	4172
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	7679
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	279
MOLINO BOLAS #4 LINEA 2	Molino	9698.0	7990
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	7500
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molinos SAG 140ML001/002 y de RECIRCULACION molinos BOLAS 140ML003/004	Bomba	15.0	961
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003/004	Bomba	19.0	5044
Bombas BAJA PRESION Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003/004	Bomba	19.0	3362
Bombas ALTA PRESIÓN Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003 y 140ML004	Bomba	37.0	150
Bombas ALTA PRESIÓN Sist. Lubricación principal molino BOLAS140ML003 y 140ML004	Bomba	37.0	157
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/010	Bomba	2.2	0
Bombas Sist. Lubricación PIÑON molino SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/011	Bomba	2.2	8465
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	38
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG	Bomba	1.1	38

140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004			
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	38
Bomba de LEVANTE motores síncronos molinos SAG 140ML001/002 y BOLAS 140ML003/004	Bomba	1.1	38
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	0
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	8340
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	0
Sistema descanso levante motores	Bomba	0.6	8340
Ventilador Reductor Bomba Alimentación Ciclones	Ventilador	1.0	8388
Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	Bomba	1038.0	3776
Ventilador Reductor Bomba Alimentación Ciclones	Ventilador	1.0	8339
Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	Bomba	1038.0	5228
Ventilador Reductor Bomba Alimentación Ciclones	Ventilador	1.0	7918
Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	Bomba	1038.0	7171
Ventilador Reductor Bomba Alimentación Ciclones	Ventilador	1.0	7861
Bombas ASHMAN Líneas 1 y 2	Bomba	1038.0	7553
Bomba de piso área molienda líneas 1 y 2	Bomba	93.2	0
Bomba de piso área molienda líneas 1 y 2	Bomba	93.2	0
Bombas agua enfriamiento Sist. Lubricación Molinos SAG 140ML001 Y 140ML002, Molinos BOLAS 140ML003 Y 140ML004	Bomba	22.0	7155
Bombas agua enfriamiento Sist. Lubricación Molinos SAG 140ML001 Y 140ML002, Molinos BOLAS 140ML003 Y 140ML004	Bomba	22.0	2510
motor harnero	Motor	18.5	0
Tecla Monorriel Mantención Pulpa	Motor	19.9	5241
Tecla Monorriel Mantención Pulpa	Motor	19.9	5241
Ciclón 1 línea 3	Ciclón	0.0	0
Ciclón 2 línea 3	Ciclón	0.0	0
Ciclón 3 línea 3	Ciclón	0.0	0
Ciclón 3 línea 3	Ciclón	0.0	0
Correa 141 CV 1036, descarga molino SAG 141ML1011A	Correa	55.9	4403
CORREA STACKER	Correa	111.9	4403
Correa 141 CV 1037 y 141 CV 1038 de capacho	Correa	93.2	18
Correa 141 CV 1037 y 141 CV 1038 de capacho	Correa	93.2	2758
Correa 141 CV 1039, rechazo pebbles a planta pebbles por 133CV040	Correa	44.7	1849
Correa transportadora	Correa	41.8	5241
Correa transportadora	Correa	33.3	5316
Alimentador	Feeder	0.7	0
Alimentador	Feeder	0.7	241
Alimentador	Feeder	0.7	86
Alimentador	Feeder	0.7	368
Unidad Hidráulica Chute 141ST2402	Ud. Hidráulica	4.7	5241

Electroimán	Electroimán	5.0	1930
CINTA MAGNETICA ELECTROIMAN CORREA 141CV1039A	Electroimán	18.5	1930
Molino SAG 1011	Molino	19000.0	7708
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino SAG 1011	Bomba	22.0	0
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino SAG 1012	Bomba	22.0	1817
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino SAG 1011	Bomba	74.5	0
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino SAG 1012	Bomba	74.5	1817
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino SAG 1013	Bomba	74.5	1817
Bomba Empuje Sistema lubricación Molino SAG 1011	Bomba	5.6	85
Bomba Empuje Sistema lubricación Molino SAG 1012	Bomba	5.6	85
Bomba Pistón Sistema lubricación Molino SAG 1011	Bomba	3.8	0
Bomba Pistón Sistema lubricación Molino SAG 1012	Bomba	3.8	1817
Bomba Acumulador Sistema lubricación Molino SAG 1011	Bomba	22.0	0
Bomba Acumulador Sistema lubricación Molino SAG 1012	Bomba	22.0	0
Bomba Freno Hidráulico Molino SAG 1011	Bomba	15.0	24
Ventilador convertidor de excitación molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	0.6	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	7708
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	7708
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	7708
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	7708
Molino Bolas 1012	Molino	15000.0	7657
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	1449
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	4070
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	5509
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	3993
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	1518
Bomba Empuje Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	5.6	1448
Bomba Empuje Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	5.6	4070
Bomba Pistón Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	3.8	427
Bomba Pistón Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y	Bomba	3.8	428

1013			
Bomba Acumulador Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	0
Bomba Acumulador Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	3
Bomba Freno Hidráulico Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	15.0	84
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventilador convertidor de excitación molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	0.6	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	7657
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	7657
Molino Bolas 1013	Molino	15000.0	8014
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	4141
Bomba Baja Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	1492
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	4112
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	1560
Bomba Alta Presión Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	74.5	5374
Bomba Empuje Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	5.6	5584
Bomba Empuje Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	5.6	0
Bomba Pistón Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	3.8	552
Bomba Pistón Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	3.8	551
Bomba Acumulador Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	3
Bomba Acumulador Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	22.0	5
Bomba Freno Hidráulico Sistema Lubricación Molino BOLAS 1012 y 1013	Bomba	15.0	68
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventilador convertidor de excitación molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	0.6	0

Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores estator molino 141ML1011	Ventilador	7.5	0
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	8014
Ventiladores de sobrepresión estator molinos 141ML1011, 1012 y 1013.	Ventilador	1.5	8014
Ventilador reductor bombas ASH	Ventilador	1.5	7033
Bombas ASH Línea 3	Bomba	1752.4	7033
Ventilador reductor bombas ASH	Ventilador	1.5	7015
Bombas ASH Línea 3	Bomba	1752.4	7015
Ventilador reductor bombas ASH	Ventilador	1.5	7375
Bombas ASH Línea 3	Bomba	1752.4	7375
Ventilador reductor bombas ASH	Ventilador	1.5	7612
Bombas ASH Línea 3	Bomba	1752.4	7612
BOMBA DE PISO MOLIENDA	Bomba	111.9	3538
BOMBA DE PISO MOLIENDA	Bomba	44.7	0
BOMBA DE PISO MOLIENDA	Bomba	44.7	0
Bomba Sist. Enfriamiento Línea # 3	Bomba	111.9	3582
Bomba Sist. Enfriamiento Línea # 3	Bomba	111.9	2544
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	2548
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	2548
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	2548
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	2548
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	0
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	0
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	0
Harneros 141 SC 1001 y 141 SC 1002	Harnero	11.2	0
CHUTE MOVIL ALIMENTACION MOLINO BOLAS 141ML1012	Motor	5.6	7708
CHUTE MOVIL ALIMENTACION MOLINO BOLAS 141ML1012	Motor	5.6	7657
CHUTE MOVIL ALIMENTACION MOLINO BOLAS 141ML1012	Motor	5.6	8014
SIST. HIDRAULICO MOVIMIENTO COMPUERTAS DESC.141CV1037 - 1038	Ud. Hidráulica	2.2	18
MOTOR SIST. HIDRAULICO MOV. COMPUERTAS CORREAS CAPACHOS	Ud. Hidráulica	2.2	18
SIST. HIDRAULICO TENSOR CORREAS 141CV1037 - 1038	Ud. Hidráulica	0.4	2758
Ud. Hidráulica Compuerta divisoria Chute 143ST2407	Ud. Hidráulica	4.7	0

Fuente: Elaboración propia

14.10 FACTOR DE CARGA Y SOBREDIMENSIONAMIENTO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN EN BASE A AUDITORÍA ENERGÉTICA 2013

Tabla 49: Factor de Carga, por Mes, en Molienda de CMDIC

ÁREA	Molino SAG N° 1	Molino SAG N° 2	Molino SAG 1011	Molino Bolas 1 y 2	Eqs. Aux. Línea° 1 Y 2	Molino Bolas 1012	Molino Bolas 1013	Eqs.Aux. 3° línea	Promedio
Ene	90,7%	95,0%	100,1%	85,1%	74,0%	99,0%	97,6%	65,7%	88,4%
Feb	93,6%	95,2%	96,2%	84,6%	74,7%	99,0%	99,1%	59,2%	87,7%
Mar	94,6%	101,8%	93,2%	81,8%	77,8%	93,2%	95,3%	67,3%	88,1%
Abr	92,7%	99,6%	100,0%	79,2%	79,1%	98,5%	95,6%	67,1%	89,0%
May	81,7%	95,2%	92,0%	83,5%	83,9%	93,8%	91,9%	67,2%	86,1%
Jun	84,8%	93,5%	98,2%	82,6%	82,3%	96,5%	95,6%	66,0%	87,4%
Jul	81,4%	93,3%	96,3%	83,7%	81,2%	94,1%	93,6%	63,7%	85,9%
Ago	80,4%	87,3%	97,0%	81,1%	85,4%	99,2%	99,4%	62,8%	86,6%
Sep	86,5%	92,8%	94,3%	75,3%	85,3%	96,4%	94,6%	64,1%	86,2%
Oct	86,7%	91,9%	95,8%	78,3%	76,5%	98,8%	93,1%	61,1%	85,3%
Nov	94,0%	92,7%	93,8%	78,5%	75,8%	96,2%	95,5%	58,6%	85,6%
Dic	100,3%	96,0%	96,5%	81,2%	75,1%	96,6%	96,3%	53,4%	86,9%
EQUIV	89,3%	94,6%	96,2%	81,3%	79,0%	96,8%	95,7%	62,8%	87,0%

Fuente: Auditoría Interna de Molienda, CMDIC, 2013

Tabla 50: Sobredimensionamiento General de Molienda Mensual 2012

Sector/ Nombre Sala Eléctrica	ENERGÍA [MWh]		Sobre dimensionamiento
	Auditada	Medición GSO	
Molino SAG N° 1	51,061	45,808	11.47%
Molino SAG N° 2	59,739	56,499	5.73%
Molino SAG 3	146,907	141,275	3.99%
Molino Bolas Alim. N° 1 Y 2	105,829	86,246	22.71%
Molienda Alim. N° 1 Y 2	29,728	25,339	17.32%
Molino Bolas 2	116,077	112,142	3.51%
Molino Bolas 3	121,430	115,875	4.79%
Eqs.Aux. 3° línea Molienda	54,273	38,561	40.75%

Fuente: Elaboración propia