



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

**ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA
ENERGÉTICA EN PUERTO PATACHE DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA
INÉS DE COLLAHUASI**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA

SEBASTIÁN ANDRÉS GWINNER SILVA

PROFESOR GUÍA:

ALFREDO MUÑOZ RAMOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DIEGO LIZANA ROJAS

RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE

2015

RESUMEN

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR

AL TÍTULO DE: Ingeniero Civil Electricista

POR: Sebastián Andrés Gwinner Silva

FECHA: Marzo 2015

PROFESOR GUÍA: Alfredo Muñoz Ramos

ANÁLISIS TÉCNICO Y ECONÓMICO DE PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN PUERTO PATACHE DE LA COMPAÑÍA MINERA DOÑA INÉS DE COLLAHUASI

Este trabajo de memoria de título tiene como objetivo identificar y evaluar proyectos de eficiencia energética en el Puerto Patache de la Compañía Doña Inés de Collahuasi. Este objetivo se alinea con los esfuerzos de Collahuasi por ser una compañía sustentable con el medio ambiente y comprometida con la reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero.

Para identificar proyectos de eficiencia energética se caracteriza el consumo de Puerto Patache de acuerdo a los motores eléctricos utilizados en el puerto. Los motores se agrupan de acuerdo a su aplicación, horas de uso, potencia, energía, entre otros parámetros para determinar las aplicaciones en las que se deben concentrar los esfuerzos. Este análisis muestra que los sistemas de bombeo, compresores de aire, correas transportadoras, agitadores y la iluminación son los consumos más demandantes en Puerto Patache.

Conociendo aquellas aplicaciones más importantes se proponen proyectos de eficiencia energética según las medidas más eficaces para disminuir el consumo energético. En el caso de sistemas de bombeo, compresores de aire y correas transportadoras el uso de sistemas de control de velocidad con un variador de frecuencia demuestra tener un gran impacto en la reducción del consumo. En tanto, para motores en general se aborda el cambio del motor por motores más eficientes y compensación individual de reactivos. Además, se estudia el reemplazo de luminarias por luminarias eficientes.

Los resultados muestran que existen grandes oportunidades de eficiencia energética, principalmente asociados a proyectos de instalación de variador de frecuencia en los sistemas de bombeo y al cambio de luminarias. En tanto, no es recomendable realizar cambio de motores ni invertir en compensación individual reactiva puesto que los motores existentes no presentan problemas de eficiencia y se estima que las pérdidas en los conductores del puerto no justifican que se compense el factor de potencia para reducir las pérdidas de potencia activa. Con respecto a las correas transportadoras, un análisis teórico de la reducción de potencia por reducción de velocidad muestra que es posible reducir el consumo eléctrico en este tipo de carga sin afectar la producción de la planta.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.....	1
1.1	Fundamentación y objetivo general	1
1.2	Objetivos específicos.....	1
1.3	Alcances.....	2
1.4	Estructura de capítulos.....	3
2	ANTECEDENTES GENERALES Y CONTEXTUALIZACIÓN	5
2.1	Antecedentes generales.....	5
2.2	Cambio climático y mitigación de GEI	5
2.2.1	Evidencias de cambio climático.....	5
2.3	Causas del cambio climático	7
2.4	Situación del sector minero	8
2.5	Medidas de mitigación.....	9
3	CASO DE ESTUDIO: PUERTO PATACHE.....	10
3.1	Collahuasi y puerto Patache.....	10
3.2	Caracterización de Puerto Patache	11
3.2.1	Motores eléctricos	11
3.3	Iluminación.....	14
4	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	15
4.1	Eficiencia energética en motores eléctricos	15
4.1.1	Sistemas de bombeo	16
4.1.2	Correas transportadoras	18
4.1.3	Compresores de aire	21
4.2	Iluminación.....	23
4.3	Motores en general.....	25
4.3.1	Cambio por motores de eficiencia Premium.....	26
4.3.2	Compensación de potencia reactiva individual	27
4.4	El variador de frecuencia.....	30
4.4.1	Principio de funcionamiento.....	30
4.4.2	Ventajas de usar Variador de Frecuencia.....	32
4.4.3	Aplicaciones del VDF	32

4.5	Curvas de costo marginal de abatimiento de GEI (CCMA).....	33
5	METODOLOGÍA	34
5.1	Alcances.....	34
5.2	Procedimiento de trabajo	34
5.3	Supuestos y estimaciones	35
6	PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y RESULTADOS	37
6.1	Sistemas de bombeo	37
6.1.1	VDF en bombas de filtrado (Área Espesado).....	37
6.1.2	VDF en bombas de forestación	38
6.1.3	VDF en bombas que emplean osmosis reversa en la Planta Riles	40
6.2	Compresores de aire	41
6.3	Correas Transportadoras.....	42
6.3.1	Correa 320CV25	43
6.3.2	Correas 320CV22, 23, 24, 1048, 1049	45
6.3.3	Correa 320CV30	46
6.3.4	Correa 320CV26	48
6.3.5	Correa 320CV27A	49
6.3.6	Correa CV3302.....	50
6.4	Motores en general.....	51
6.4.1	Compensación individual de reactivos.....	51
6.4.2	Cambio por motores eficientes Premium	55
6.5	Iluminación.....	56
6.6	Resumen de proyectos de eficiencia energética.....	58
7	ANÁLISIS DE RESULTADOS	60
7.1	Sistemas de bombeo	60
7.1.1	VDF en bombas de filtrados.	60
7.1.2	VDF en bombas de forestación.	62
7.1.3	VDF en bombas de RILES.....	65
7.2	Compresores de aire	67
7.3	Correas transportadoras	70
7.4	Motores en general.....	71
7.4.1	Compensación reactiva individual en celdas Rougher.....	71
7.4.2	Compensación individual reactiva en motores sobre las 8.000 horas uso anual.	74
8	CONCLUSIONES	76

9	BIBLIOGRAFÍA.....	79
10	ANEXOS.....	1
10.1	Inventario de motores de Puerto Patache.....	1
10.2	Esquemas de motores eléctricos en proyectos de EE analizados.....	7
10.2.1	Bombas loop filtrado.....	7
10.2.2	Bombas de forestación.....	7
10.2.3	Bombas de osmosis reversa de planta Riles.....	7
10.2.4	Compresores de aire.....	8
10.2.5	Agitadores celdas Rougher.....	8
10.2.6	Diagrama de correas transportadoras de Puerto Patache.....	9
10.3	Proyectos de iluminación eficiente en Puerto Patache.....	10
10.4	Proyectos de iluminación eficiente prioritarios.....	13
10.5	Datos de placa de motores eléctricos de Puerto Patache.....	15

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Factor de emisión tCO ₂ eq del SING desde 2011	8
Tabla 2 Cantidad de motores por tipo de aplicación.	14
Tabla 3 Medidas de eficiencia energética más usadas según aplicación.....	15
Tabla 4 Color de temperatura recomendada para distintas aplicaciones.....	23
Tabla 5 Eficiencia de luminarias	24
Tabla 6 Caracterización de bombas por ubicación.....	37
Tabla 7 Datos nominales proyecto VDF en bombas de filtrado	38
Tabla 8 Resultados financieros proyecto VDF en bombas de filtrado	38
Tabla 9 Resultados financieros en proyecto VDF en bombas de forestación	39
Tabla 10 Estimación consumo de energía proyecto VDF en bombas de forestación	39
Tabla 11 Resultados financieros proyecto VDF en bombas de forestación	39
Tabla 12 Datos nominales bombas proyecto VDF en osmosis reversa de planta Riles.....	40
Tabla 13 Resultados financieros proyecto de VDF en osmosis reversa de Planta Riles.....	40
Tabla 14 Datos nominales motores de compresores de aire.....	41
Tabla 15 Estimación de consumo de energía de compresores de aire.....	41
Tabla 16 Resultados financieros proyecto VDF en compresores de aire	42
Tabla 17 Resultados financieros proyecto VDF en seis compresores de aire	42
Tabla 18 Datos nominales de correas transportadoras de puerto patache	43
Tabla 19 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV25	44
Tabla 20 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV22, 23, 24, 1048, 1049.....	45
Tabla 21 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV30.....	47
Tabla 22 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV26.....	48
Tabla 23 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV27A.....	49
Tabla 24 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV3302.....	51
Tabla 25 Resultados financieros de proyecto compensación individual reactiva en agitadores de celdas Rougher	53
Tabla 26 Equipos sobre 8.000 horas/año sin variador de frecuencia	54
Tabla 27 Resultados financieros proyecto de compensación individual reactiva en equipos sobre 8.000 horas/año.....	54
Tabla 28 Equipos en el rango 7.000-8.000 horas uso sin variador de frecuencia	54
Tabla 29 Resultado financiero proyecto de compensación reactiva en equipos sobre 7.000 horas/uso.....	55
Tabla 30 Datos nominales compresores de aire	55
Tabla 31 Resultado financiero proyecto cambio de motor por motor eficiente premium en compresores de aire	56
Tabla 32 Resultados financieros proyecto iluminación eficiente.....	57
Tabla 33 Resultados financieros proyecto iluminación eficiente prioritaria.....	57
Tabla 34 Resumen de proyectos de eficiencia energética identificados en Puerto Patache.....	58
Tabla 35 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de filtrado.	60
Tabla 36 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de filtrado	61
Tabla 37 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de filtrado	61

Tabla 38 Escenarios de proyecto VDF en bombas de filtrado	62
Tabla 39 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de forestación	63
Tabla 40 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de forestación	63
Tabla 41 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de forestación	64
Tabla 42 Escenarios de proyecto VDF en bombas de forestación	64
Tabla 43 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de RILES .	65
Tabla 44 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de RILES	66
Tabla 45 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de RILES	66
Tabla 46 Escenarios de proyecto VDF en bombas de RILES	67
Tabla 47 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en compresores de aire	68
Tabla 48 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en compresores de aire	68
Tabla 49 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en compresores de aire	69
Tabla 50 Escenarios de proyecto VDF en compresores de aire	69
Tabla 51 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto compensación individual celdas Rougher	72
Tabla 52 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto compensación individual celdas Rougher	72
Tabla 53 Escenarios de proyecto compensación individual reactiva en agitadores celdas Rougher	73
Tabla 54 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto compensación individual en motores sobre 8000 horas/año	74
Tabla 55 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto compensación individual en motores sobre 8000 horas/año	74
Tabla 56 Escenarios de proyecto compensación individual reactiva en motores sobre 8000 horas/uso	75

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Cambio en la temperatura promedio de la Tierra desde 1860.....	6
Ilustración 2 Cambio en el nivel del mar medido en Europa	6
Ilustración 3 Aumento de emisiones de GEI en el último milenio.....	7
Ilustración 4 Emisiones de CO ₂ eq en la producción de Cobre	8
Ilustración 5 Esquema de proceso productivo de Collahuasi	10
Ilustración 6 Ubicación geográfica de Puerto Patache	11
Ilustración 7 Gráfico de potencia instalada por área productiva	11
Ilustración 8 Gráfico de consumo de energía por área	12
Ilustración 9 Gráfico de consumo de energía por aplicación de motor eléctrico	13
Ilustración 10 Gráfico de potencia instalada por tipo de equipo	13
Ilustración 11 Bomba centrífuga	16
Ilustración 12 Bomba de desplazamiento positivo	16
Ilustración 13 Esquema de sistema de variación de velocidad en motores	17
Ilustración 14 Curvas de % velocidad vs % potencia de una bomba según método de control....	17
Ilustración 15 Correa transportadora ShipLoader en Puerto Patache.....	19
Ilustración 16 Medidas de EE en motores eléctricos.....	25
Ilustración 17 Eficiencia de tipos de motores.....	27
Ilustración 18 Esquema de diferentes tipos de compensación reactiva.....	29
Ilustración 19 Esquema del variador de frecuencia.....	30
Ilustración 20 Etapa de rectificación del VDF	31
Ilustración 21 Rectificador de onda completa	31
Ilustración 22 Ejemplo de CCMA	33
Ilustración 23 Esquema de metodología de trabajo.....	34
Ilustración 24 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV25	43
Ilustración 25 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV25.....	44
Ilustración 26 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correas 320CV22, 320CV23, 320CV24, 320CV1048 y 320CV1049	45
Ilustración 27 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV22,23,24,1048,1049.....	46
Ilustración 28 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV30	46
Ilustración 29 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV30.....	47
Ilustración 30 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV26	48
Ilustración 31 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV26.....	49
Ilustración 32 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV27A	49
Ilustración 33 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV27A.....	50
Ilustración 34 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV3302	50
Ilustración 35 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV3302.....	51

Ilustración 36 Curvas de costo marginal de abatimiento de proyectos identificados en Puerto Patache.....	59
--	----

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Fundamentación y objetivo general

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (de ahora en adelante CMDIC) es una compañía que se guía por un modelo de negocio sustentable, de estándar mundial, con el fin de no comprometer a las comunidades y con constante preocupación por los impactos que sus operaciones tienen en la emisión de gases de efecto invernadero. Dentro de la compañía se cuenta con líneas específicas que abordan este problema en temas relacionados con eficiencia energética, energías renovables y cambio climático.

Entre las medidas realizadas por CMDIC se cuenta con la implementación del Sistema de Gestión de Energía (ISO 50.001) en Puerto Patache que busca mejorar el control y gestión de las fuentes energéticas utilizadas en la compañía.

Collahuasi ha sido pionera en reportes de emisiones de gases de efecto invernadero y huella de carbono, contabilizando sus emisiones desde el año 2007, convirtiéndose en la primera compañía chilena en verificar su huella de carbono por una tercera parte independiente de manera voluntaria.

La forma más común de medir emisiones de gases de efecto invernadero es mediante el uso de factores de emisión por datos de actividad de Collahuasi como el consumo de energía eléctrica.

Para reducir la huella de carbono de la producción de cobre de la CMDIC las acciones apuntan a hacer un mejor uso de los recursos energéticos con medidas de eficiencia energética, incorporación de fuentes de energía no carbonizadas como ERNC y el manejo y gestión de residuos. Si se consideran emisiones directas e indirectas la energía eléctrica representa un aporte del 67,89% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), debido en parte al alto nivel de emisiones del sistema interconectado del norte grande. [1]

El objetivo general de este trabajo de memoria de título consiste en analizar técnica y económicamente medidas de eficiencia energética detectadas en los procesos llevados por la compañía en Puerto Patache, lo cual comprende fundamentalmente el embarque para exportación de la producción y la extracción de molibdeno como subproducto del cobre. De esta forma se pretende contribuir al esfuerzo realizado por CMDIC en la reducción de GEI mediante el mejor aprovechamiento de recursos energéticos.

1.2 Objetivos específicos

Los objetivos que se espera cumplir con el presente trabajo de memoria de título son:

- Clasificación de equipos según su uso (ventiladores, bombas, compresores, etc.), según rangos de potencia y horas uso.

- Analizar el consumo eléctrico de Puerto Patache, identificando equipos y áreas de mayor consumo.
- Identificar oportunidades de eficiencia energética para cada tipo de equipo. Esto significa identificar el mejor o los mejores métodos de ahorro de energía validados según la aplicación.
- Realizar un análisis preliminar de cada aplicación según la oportunidad detectada y analizar detalles de su factibilidad y consecuencias de su implementación
- Cotizar o estimar monto de inversión necesaria para la oportunidad de ahorro identificada en la aplicación (incluyendo costo de equipos, ingeniería, puesta en marcha, etc.)
- Estimar el potencial ahorro energético de aplicar el método seleccionado medido en kWh/año.
- Calcular rentabilidad de cada proyecto de eficiencia energética (VAN, TIR, Payback), en caso de ser necesario realizar un análisis de sensibilidad en parámetros críticos (precio de energía, ahorro estimado).
- Calcular toneladas de CO2 equivalente abatidas y obtención de curvas de abatimiento para comparar proyectos de EE identificados según parámetros económicos y de mitigación de gases de efecto invernadero.

Se espera que con este trabajo la Superintendencia de Eficiencia Energética pueda tener un estudio preliminar de las oportunidades presentes en los procesos llevados a cabo en Puerto Patache. Las rentabilidades y toneladas de CO2 estimadas en este trabajo entregarán información sobre el impacto que tendrían proyectos asociados al ahorro de consumo de energía eléctrica, así como también una recopilación de medidas de eficiencia energética aplicables en Puerto Patache.

1.3 Alcances

En este documento el caso de estudio corresponde únicamente a Puerto Patache, lo que incluye los procesos de Planta de Molibdeno, Planta de Riles, Filtrado, Correas y Embarque. Para ello se hará uso de los datos disponibles hasta el momento de los equipos presentes en esta área, consumos energéticos y datos operacionales.

Los proyectos de eficiencia energética analizados solo serán aquellos relacionados al consumo energía eléctrica. Se dejan fuera consumos relacionados a combustibles fósiles que corresponden a las emisiones directas de la compañía.

Las medidas de Eficiencia Energética analizadas solo corresponden a las relacionadas con la parte eléctrica. Se incluirá principalmente análisis del motor eléctrico por sobre la parte mecánica, incluyendo dispositivos de electrónica de potencia usados en control de máquinas e iluminación.

Para un análisis inicial se incluye la totalidad de equipos de Puerto, cuya información ya se encontraba disponible al momento de iniciar este trabajo. A priori, no se descartará ningún consumo para su análisis, sin embargo de este análisis preliminar se espera obtener una cantidad reducida de proyectos basados en su factibilidad y la seguridad en la operación normal del Puerto.

1.4 Estructura de capítulos

A continuación se describen los capítulos incluidos en este documento con una breve descripción de su contenido.

1. **Introducción y objetivos:** Se introduce la motivación para realizar este trabajo de memoria de título y los aportes que generaría en Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. También se incluye el objetivo general que se persigue, así como los objetivos específicos que marcan los hitos relevantes en el desarrollo de este trabajo. Se dan a conocer los alcances del trabajo que describen las restricciones que entregan los límites entre lo que se va a hacer y lo que no es relevante para cumplir con los objetivos.
2. **Antecedentes generales y contextualización:** Para contextualizar este trabajo de memoria se describen los esfuerzos realizados por la compañía para adaptarse y mitigar los efectos del cambio climático y aportar reduciendo los gases de efecto invernadero. Se describirán los efectos que tiene o tendrá el efecto del hombre y como CMDIC está involucrada en este contexto, dando a conocer la visión de la compañía y su compromiso con el medio ambiente y la sustentabilidad.
3. **Caso de estudio Puerto Patache;** En el capítulo 3 se describe el proceso productivo llevado a cabo en Puerto Patache. Se describirán los subprocesos llevado a cabo en esta área de la compañía, así como también se analizará el uso de la energía eléctrica en el Puerto. En esta sección se mostrara el detalle del consumo del área identificando equipos de mayor consumo, áreas más relevantes, entre otras. Esta información será de gran importancia para el trabajo que se describirá en las secciones posteriores entregando una referencia preliminar del estado actual de Puerto Patache y la ruta a seguir para los estudios preliminares de proyectos de eficiencia energética.
4. **Revisión bibliográfica:** Este capítulo corresponde a la recopilación de medidas de eficiencia energética basándose en los datos entregados en el capítulo anterior. Según el tipo de equipos de Puerto Patache existen proyectos que mayores ahorros generan, por ejemplo: en bombas el control mediante Variadores de Frecuencia es un método validado, así como también el cambio de luminarias por luminarias eficientes, etc. La información que se entregará en esta sección será útil para centrar los esfuerzos en aquellos métodos que más impacten en la mitigación de toneladas de CO2 y proporcionará información importante para que CMDIC utilice en el futuro.
5. **Metodología:** En el capítulo 4 se describen los pasos a seguir para utilizar la información entregada en capítulos anteriores; y cumplir con los objetivos y alcances propuestos que darán conclusión final a este trabajo.

6. **Proyectos de eficiencia energética y resultados:** Luego de analizar la información disponible e identificando las medidas de eficiencia energética que más impactan positivamente en el uso del recurso energético, se describe un número acotado de proyectos que cumplen las expectativas, mostrando los resultados financieros y las toneladas de CO₂e abatidas. Adicionalmente se incluyen las curvas de abatimiento que permiten comparar los proyectos de eficiencia energética entregando información sobre rentabilidad y emisiones de GEI.
7. **Análisis de resultados:** En esta sección se discuten los resultados obtenidos y los impactos que tendrían los proyectos de eficiencia energética descritos anteriormente. Además se entregará información adicional; como análisis de sensibilidad para determinar cómo cambia la rentabilidad del proyecto en función de los supuestos utilizados para las estimaciones realizadas.
8. **Conclusiones:** Finalmente, en este capítulo se entregan las conclusiones sobre el trabajo realizado.

2 ANTECEDENTES GENERALES Y CONTEXTUALIZACIÓN

2.1 Antecedentes generales

La superintendencia de eficiencia energética trabaja en labores relacionadas con el desarrollo sustentable y la eficiencia energética, de tal forma de disminuir las emisiones de CO₂ equivalentes de la compañía.

Entre los esfuerzos desarrollados destacan: [2]

- **Reportabilidad de Gestión de Cambio Climático y huella de carbono:** Emisión anual del inventario de emisión de GEI y Huella de Carbono, verificado según la norma UNE ISO 14064 - 1:2006 y al referencial GHG PROTOCOL
- **Proyecto de ERNC con la empresa SolarPack:** Con una potencia instalada de 25 MW se adjudicó el proyecto solar Pozo Almonte que entregará 60.000 MWh al año.
- **Implementación de sistema de gestión de energía (SGE) ISO 50.001:** Implementado durante 2013 en Puerto Patache, implica la realización de auditorías energética en esta área, creación de indicadores de desempeño energético (IDE's) y realización de las respectivas curvas de abatimiento asociadas a proyectos de eficiencia energética.

2.2 Cambio climático y mitigación de GEI

El fenómeno de cambio climático consiste básicamente en la alteración en la condición normal de variables meteorológicas como temperatura, pluviosidad, fenómenos climáticos, y la evidencia muestra que es producido, en parte, por la acción del ser humano, particularmente las emisiones de gases de efecto invernadero.

2.2.1 Evidencias de cambio climático

La temperatura media en la superficie terrestre ha aumentado entre 0.2 y 0.6 °C desde fines del siglo 19, coincidiendo con los inicios de la revolución industrial y el uso de combustibles fósiles desde aquella época. [3]. Ver Ilustración 1.

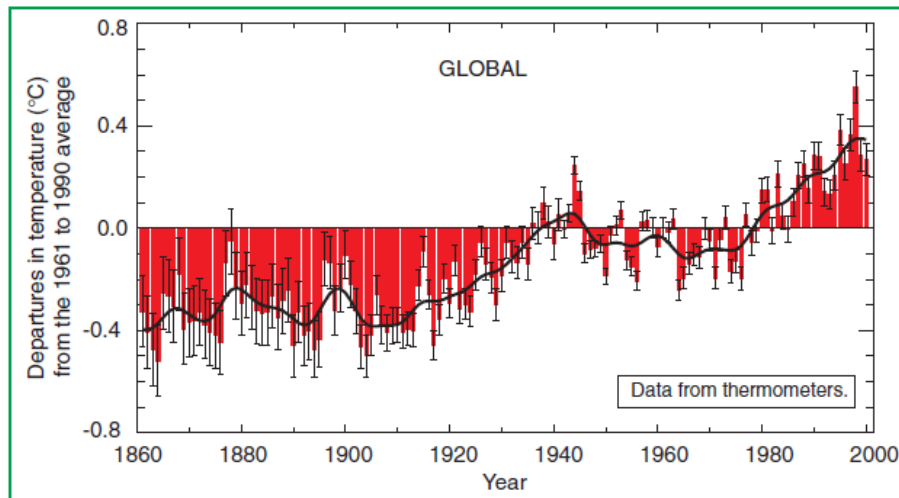


Ilustración 1 Cambio en la temperatura promedio de la Tierra desde 1860

En tanto las precipitaciones han aumentado continuamente en latitudes altas y medias del hemisferio norte (entre 0.5 a 1 % en una década), a excepción de Asia Oriental. En zonas subtropicales (10° y 30° de latitud) la caída de agua lluvia ha disminuido 0.3%/ década en promedio. En zonas tropical se observa un aumento de entre 0.2 y 0.3 % durante el siglo 20.

Con respecto a la capa de hielo y nieve se observa que esta tiene correlación directa con la temperatura en la superficie terrestre. Datos satelitales muestran que es probable que la cobertura nivosa haya disminuido cerca de un 10% desde 1960. Además, existen evidencias que la capa de hielo antártico ha sufrido muy pocas variaciones durante los años, a diferencia de lo que ocurre en el hemisferio norte, donde la capa de hielo ártico ha mostrado retrocesos significativos.

El nivel medio del mar ha aumentado durante el siglo 20 un aumento de 1 a 2 mm/año. Como se muestra en la Ilustración 2.

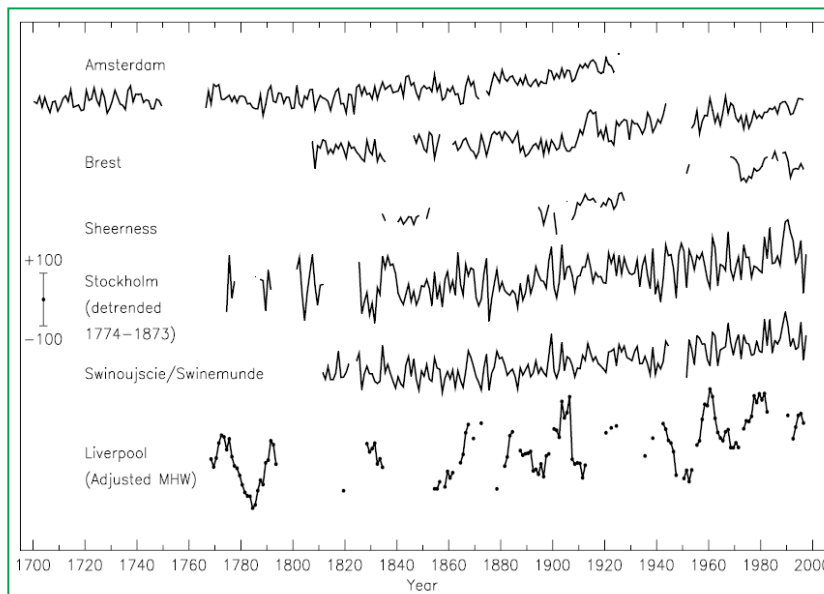


Ilustración 2 Cambio en el nivel del mar medido en Europa

Otro análisis muestra que en regiones donde ha aumentado la precipitación es muy probable que exista un aumento en fenómenos atmosféricos extremos. En tanto, en regiones donde se observa lo inverso la frecuencia de sequías extremas ha ido en aumento.

2.3 Causas del cambio climático

Además de los cambios naturales en la atmósfera, los de carácter antropogénico de mayor importancia se han vinculado con el aumento de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), que en conjunto con la variación de la actividad solar alteran la radiación que llega a la superficie de la tierra, y en consecuencia el clima.

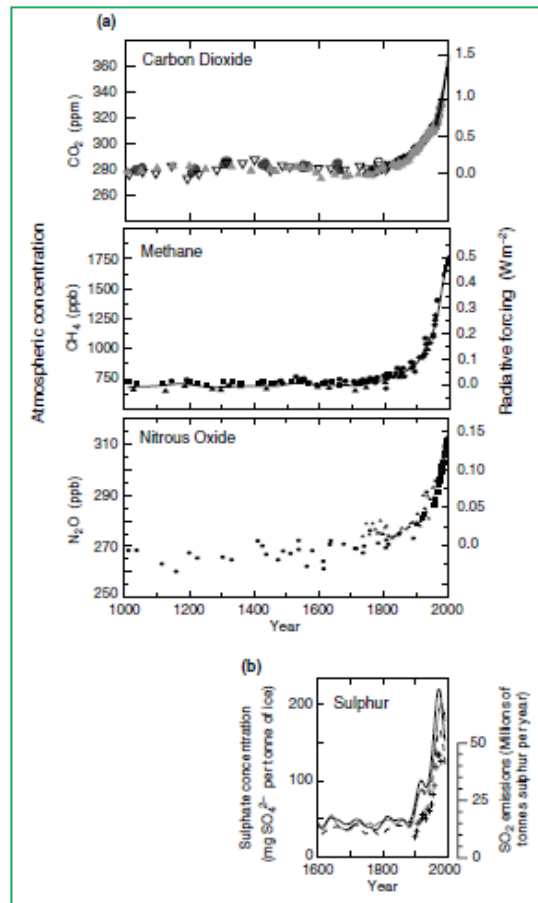


Ilustración 3 Aumento de emisiones de GEI en el último milenio

2.4 Situación del sector minero

De acuerdo a los análisis realizados por Cochilco, las emisiones de CO₂ por parte de la minería del Cobre han registrado un aumento considerable en la última década alcanzando unas 4.8 millones de toneladas de CO₂eq¹.

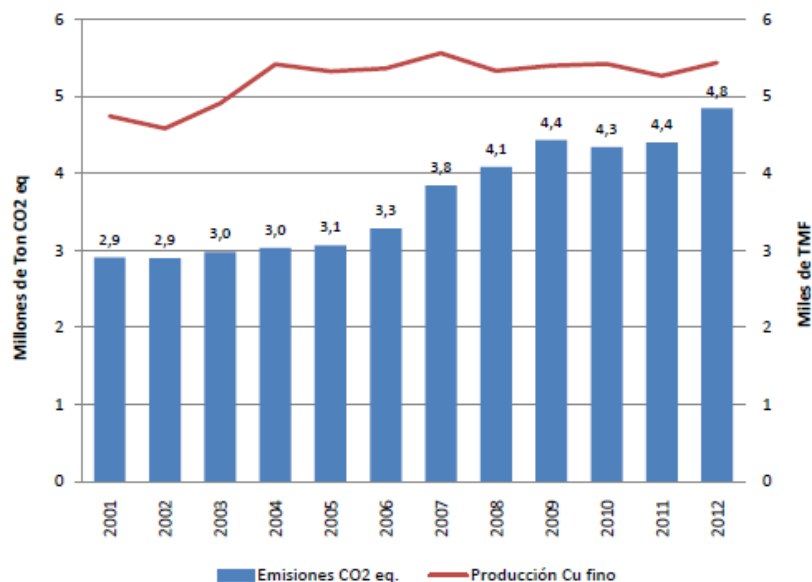


Ilustración 4 Emisiones de CO₂eq en la producción de Cobre

Gran parte de este aumento en el consumo se debe al consumo de electricidad y al alto factor de emisión del SIC (medido en ton CO₂eq/kWh) como se muestra en la siguiente tabla [4]:

Tabla 1 Factor de emisión tCO₂eq del SING desde 2011

Año	Promedio tCO ₂ eq
2010	0,715
2011	0,725
2012	0,806
2013	0,811

¹ El CO₂eq es la unidad de medida con la que se cuantifican las emisiones de gases de efecto invernadero, esta principalmente compuesta por la participación de dióxido de carbono, pero también se incluyen otros gases como el metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆).

2.5 Medidas de mitigación

La identidad de Kaya es una relación matemática que muestra la relación entre los factores que influyen en las emisiones de CO₂ en la atmosfera. Esta relación involucra energía, indicadores económicos y demográficos [5]:

$$CO_2 = P * \frac{PIB}{P} * \frac{Energia}{PIB} * \frac{CO_2}{Energia}$$

En que:

CO_2 : Toneladas de CO₂ emitidas a la atmosfera.

P : Población.

$\frac{PIB}{P}$: Nivel de actividad económica medido por el PIB per cápita.

$\frac{Energia}{PIB}$: Intensidad energética. Corresponde a la cantidad de energía utilizado por unidad producida. Relacionado con la eficiencia energética.

$\frac{CO_2}{Energia}$: Intensidad de carbonización. Corresponde al CO₂ emitido por cada fuente de energía.

Luego, para disminuir la emisión de GEI se puede reducir al menos uno de estos factores. Dado que no se quiere disminuir la población ni el PIB per cápita, los esfuerzos deben ir focalizados a disminuir la intensidad energética y la intensidad de carbonización.

Con respecto a la energía eléctrica, un consumidor de energía tiene poco impacto en la intensidad de carbonización, que es equivalente a disminuir el factor de emisión del sistema eléctrico. Esto podría ser logrado en parte mediante la firma de contratos de suministro con fuentes de energías con bajas emisiones de CO₂ como ya lo hizo Collahuasi con la Planta Solar de Pozo Almonte. La forma más eficaz y rentable de alcanzar metas de reducción de GEI es mediante proyectos de **Eficiencia Energética**, los cuales no sólo reducen las emisiones de GEI sino que disminuyen los costos variables al producir una unidad del producto (tonelada de concentrado de Cu).

3 CASO DE ESTUDIO: PUERTO PATACHE

3.1 Collahuasi y puerto Patache

La Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM produce cátodos de cobre, concentrado de cobre y concentrado de molibdeno, siendo el tercer mayor depósito de cobre del mundo. La empresa basa la explotación en tres rajos abiertos (Rosario, Ujina y Huinquentipa).

El proceso productivo de la compañía se muestra en la Ilustración 5. [1]



Ilustración 5 Esquema de proceso productivo de Collahuasi

Las instalaciones industriales y los tres yacimientos se denominan “Área Cordillera”. En Ujina se ubica la planta concentradora, donde nace un mineroducto que recorre 203 kilómetros hasta Puerto Patache, lugar en el cual se realiza el filtrado y embarque del producto.

En Puerto Patache, ubicada 65 kilómetros al sur de Iquique, se encuentra la planta de molibdeno, planta de filtrado de concentrado y el terminal portuario donde se embarcan productos procesados hacia mercados internacionales. [6]

Un hito importante en la compañía en materia de eficiencia energética corresponde al desarrollo e implementación de la ISO 50.001 que aborda el uso eficiente del recurso energético. En 2011 fue implementado en el área de Lixiviación y en 2012 en Puerto Patache. Además, en Puerto Patache se construirá una planta fotovoltaica de 100 kW de potencia instalada, con fines experimentales. [7]

En la Ilustración 6 se muestra la ubicación de Puerto Patache y las operaciones de Collahuasi.



Ilustración 6 Ubicación geográfica de Puerto Patache

3.2 Caracterización de Puerto Patache

3.2.1 Motores eléctricos

Puerto Patache consumió un total de 20.561.111 kWh el año 2013, teniendo una potencia instalada total en motores eléctricos de 8 MW aproximadamente. [8]

La potencia instalada por área productiva de Puerto Patache se reparte según lo mostrado en la Ilustración 7

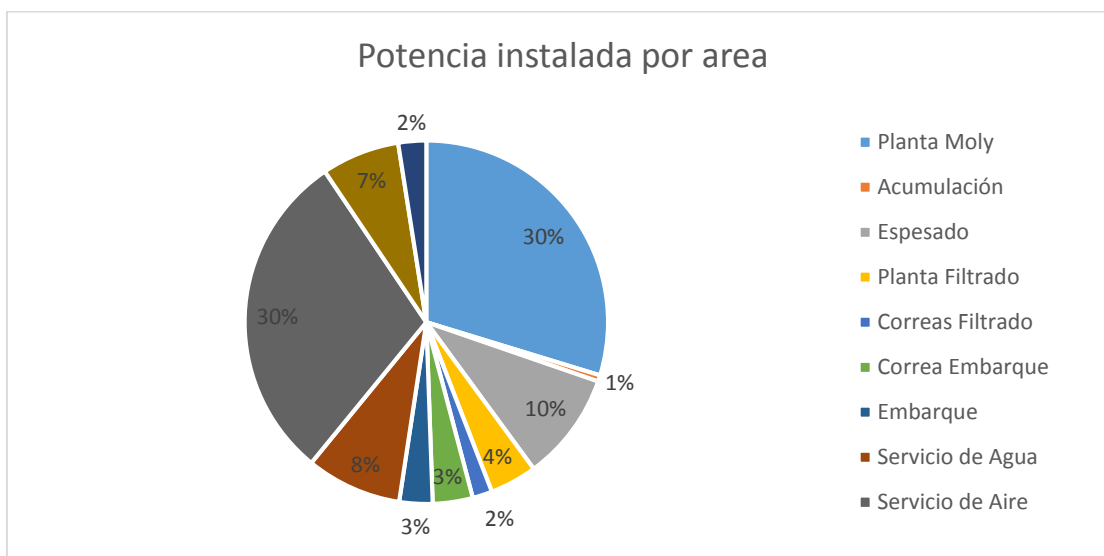


Ilustración 7 Gráfico de potencia instalada por área productiva

Como se observa, las áreas que más potencia instalada tienen son la planta de molibdeno, servicios de aire (compresores de aire) y espesado, que es donde se llevan a cabo los procesos más demandantes de energía.

En tanto, el consumo de energía se muestra en el gráfico de la Ilustración 8. De acuerdo al gráfico señalado se aprecia que tanto la planta Moly como los servicios de aire y espesado muestran la mayor parte del consumo de energía del puerto. Sin embargo, aparecen otras áreas, como la planta de filtrado, que a pesar de no tener gran parte de la potencia instalada con respecto al resto de las instalaciones posee gran consumo energético debido a que es un área que presenta gran cantidad de horas de uso de sus equipos.

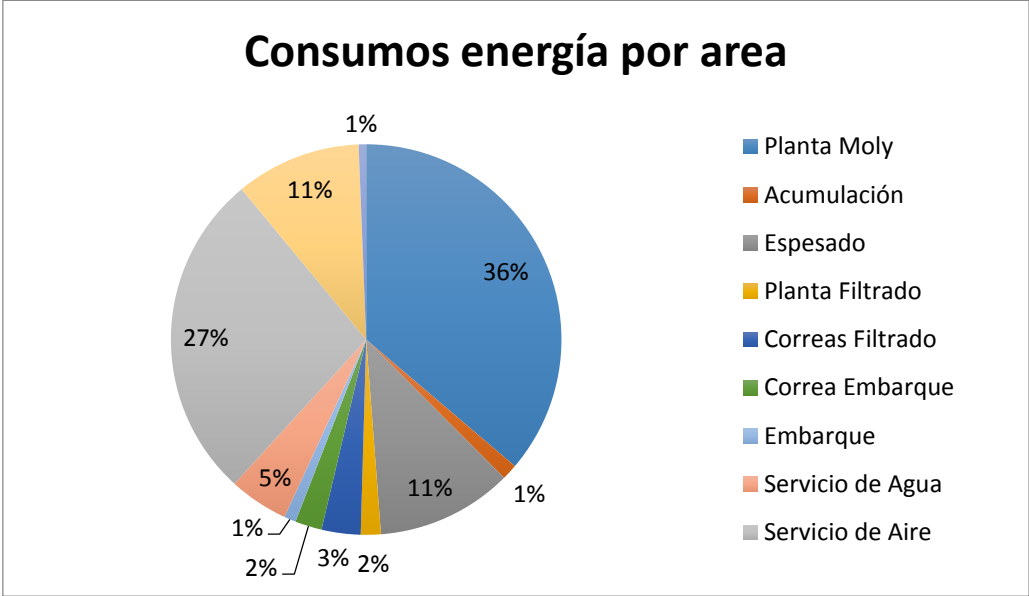


Ilustración 8 Gráfico de consumo de energía por área

Si se hace la distinción por tipo de equipo, el consumo energético (Ilustración 9) los motores que más consumen energía en el puerto son agitadores, bombas, compresores de aire y correas.

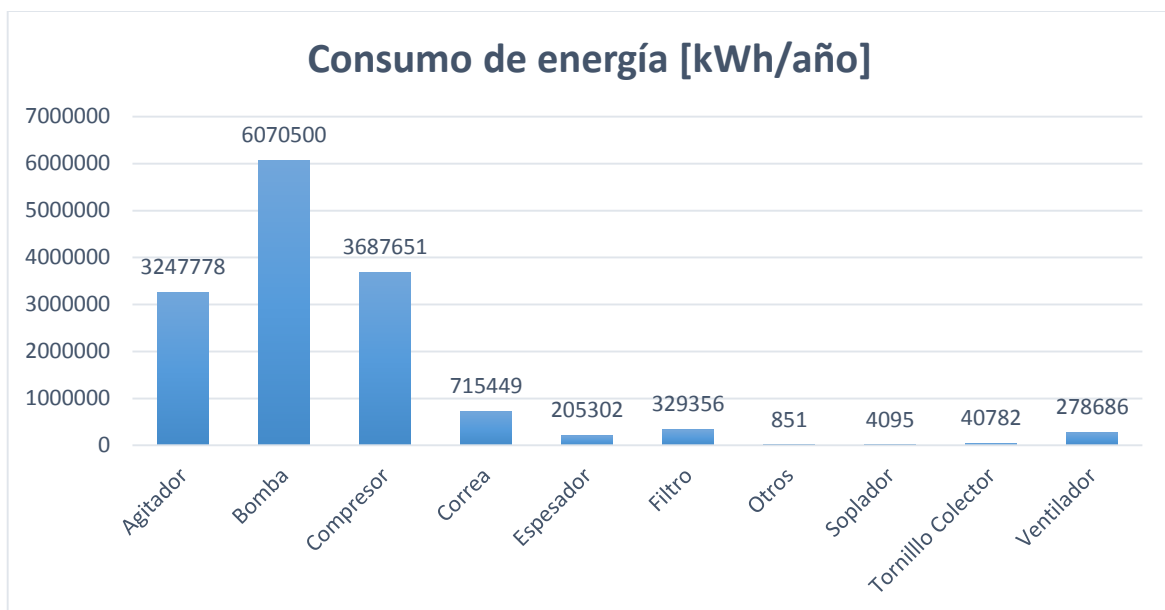


Ilustración 9 Gráfico de consumo de energía por aplicación de motor eléctrico

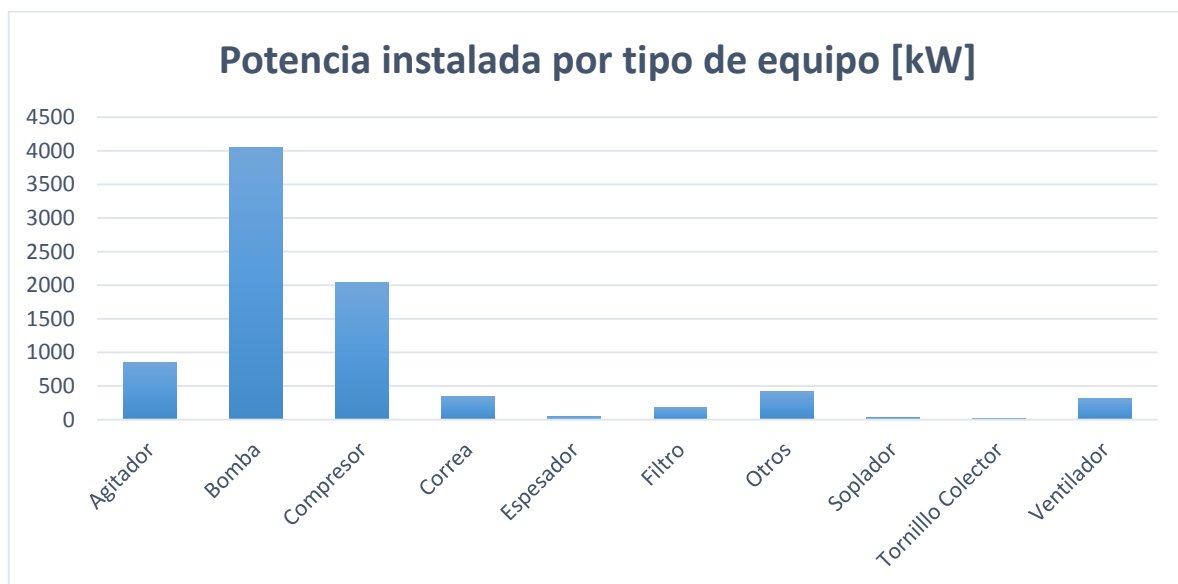


Ilustración 10 Gráfico de potencia instalada por tipo de equipo

Como se ve en los gráficos de potencia y energía los equipos más importantes, en lo que consumo energético se refiere, de Puerto Patache son las bombas, agitadores y compresores.

Parte de esto se explica por el gran número de estos equipos, el cual se muestra en la Tabla 2. En efecto, cuantitativamente las bombas alcanzan los 159 motores lo que corresponde a más de la mitad de los equipos de Puerto Patache.

Tabla 2 Cantidad de motores por tipo de aplicación.

Tipo de Equipo	N°
Agitador	23
Bomba	159
Compresor	7
Correa	10
Espesador	2
Filtro	6
Otros	10
Soplador	3
Tornillo Colector	3
Ventilador	5
Total	228

3.3 Iluminación

Con respecto a la potencia destinada a iluminación, se tiene que la potencia instalada en Puerto Patache es de 331,2 kW lo que equivale a aproximadamente al 4% de la potencia instalada en motores. Además, se estima que el consumo por concepto de iluminación es 2.157.007 kWh/año lo que representa un 10.5% aproximadamente del consumo en motores. [9]

Basándose en datos de consumo de energía estimados, ordenados por tipo de consumo de mayor a menor el resultado es el siguiente:

1. Bombas (6.070.500 kWh/año)
2. Compresores de aire (3.687.651 kWh/año)
3. Agitadores (3.247.778 kWh/año)
4. Iluminación (2.157.007 kWh/año)
5. Correas (715.449 kWh/año)

Por lo tanto, en el siguiente capítulo se expondrá la revisión bibliográfica sobre medidas de eficiencia energética para estos tipos de consumo. Además, se mostrará un análisis del estudio de medidas de eficiencia energética en motores en general.

4 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Eficiencia energética en motores eléctricos

La eficiencia energética consiste básicamente en reducir el consumo de energía para producir lo mismo o más, tema que está muy presente en la minería tanto para reducir los costos de producción en un negocio muy competitivo y mejorar la huella de carbono de la empresa.

De acuerdo a la experiencia internacional en medidas de eficiencia energética las más comunes son utilizar dispositivos de electrónica de potencia, principalmente variadores de frecuencia, cambiar motores ineficientes por motores eficientes, métodos para reducir las pérdidas en las líneas como cambio de conductores o, entre otras. Los métodos más utilizados por tipo de equipo se muestra en la siguiente tabla: [10]

Tabla 3 Medidas de eficiencia energética más usadas según aplicación

Sistema equipo	Mejoras posibles	¿Cómo?	Consecuencia
Motores eléctricos	Diminución de la potencia de arranque (Mediante curva de arranque controlado por rampa)	Variador de frecuencia	Optimización de potencia utilizada, reduciendo costos de energía
Bombas, circulación de fluidos en general	Optimización del consumo eléctrico, según presión del fluido	Variador de frecuencia	Reducción de consumo eléctrico
Bombas circulación agua piscina	Optimización del consumo eléctrico, según obturación (suciedad) de filtros de arena	Variador de frecuencia	Reducción de consumo eléctrico
Bombas agua climatización	Optimización de consumo eléctrico, según diferencia de temperatura ida y retorno	Variador de frecuencia	Reducción de consumo eléctrico
Motores General	Motores alto rendimiento	Motores especiales de alto rendimiento	Disminución de consumo eléctrico
Compresores de aire	Utilización del calor sobrante de refrigeración de compresores	Reutilización de aire caliente	Reducción de consumo eléctrico/gas para climatización

4.1.1 Sistemas de bombeo

Las bombas corresponden a las máquinas que entregan la fuerza necesaria para desplazar líquidos a diferentes elevaciones o moverlos contra la resistencia de una tubería o algún proceso.

Pueden ser clasificadas en dos tipos: centrífugas o de desplazamiento positivo.

Las bombas centrífugas son aquellas que entregan energía cinética a un líquido mediante el movimiento rotativo de una propela. La simple bomba centrífuga de flujo axial tiene aspas giratorias que mueven el líquido hacia afuera desde el centro de la propela a la carcasa, según lo que se muestra en la Ilustración 11.

Parte de la energía cinética se convierte en presión forzando que el líquido salga.

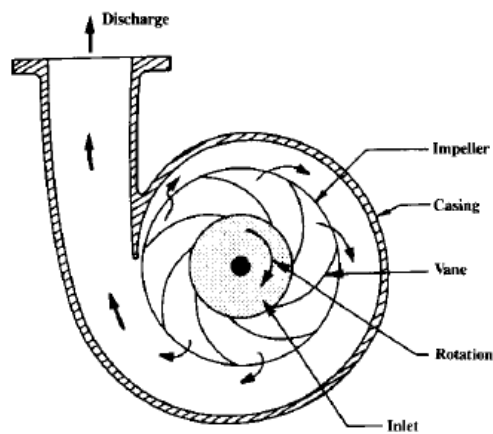


Ilustración 11 Bomba centrífuga

La bomba de desplazamiento positivo opera atrapando el líquido en cavidades y desplazándolo hacia la zona de descarga. Proveen una tasa de flujo volumétricamente constante para una determinada velocidad independiente de las diferencias de presión.

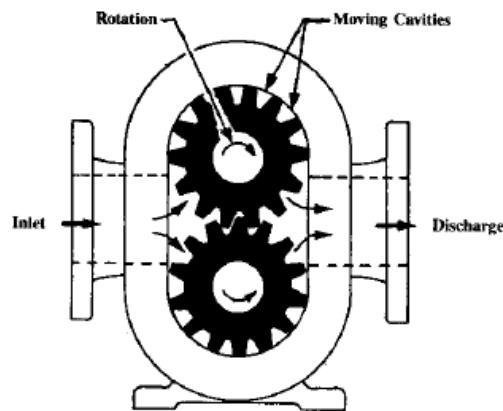


Ilustración 12 Bomba de desplazamiento positivo

El sistema de bombeo representa cerca del 20% del consumo mundial de energía en motores eléctricos y un 25-50% del total de consumo de instalaciones industriales. Existen grandes oportunidades de ahorro en estos sistemas para reducir consumo energético mediante diseño inteligente de estos sistemas, retroalimentación, y prácticas operacionales. En particular, el bombeo con carga variable ofrece un gran potencial de ahorro. La mayoría de los sistemas existentes requieren control de flujo mediante líneas de bypass, válvulas o ajustes de velocidad [11]. La manera más eficiente corresponde al control de velocidad de bombeo (Ilustración 13).

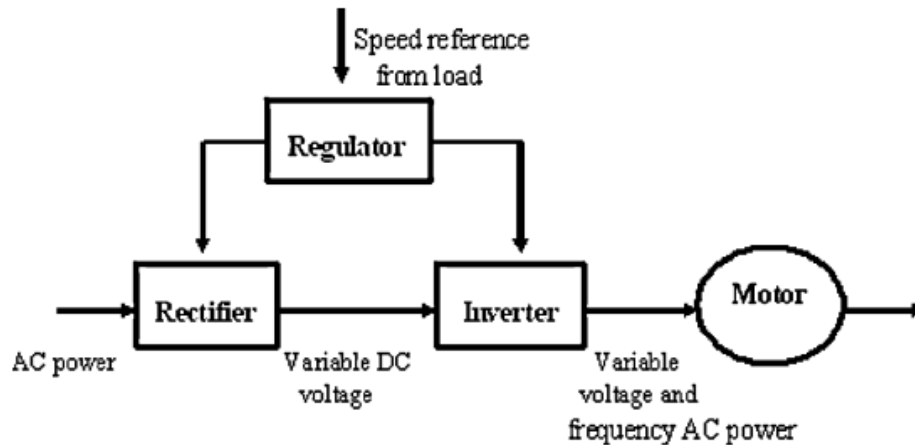


Ilustración 13 Esquema de sistema de variación de velocidad en motores

El porcentaje de consumo de potencia de una bomba mediante métodos de regulación para cada nivel de flujo se muestra en la Ilustración 14.

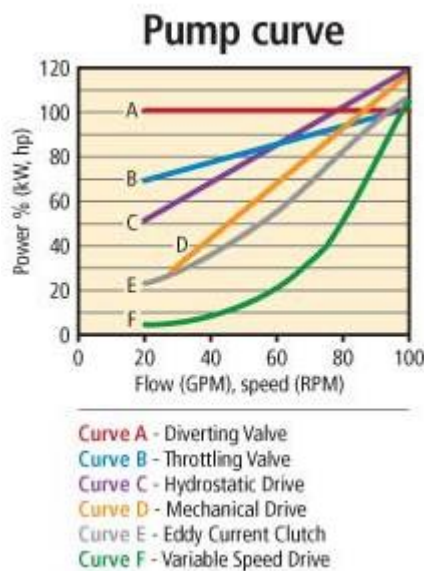


Ilustración 14 Curvas de % velocidad vs % potencia de una bomba según método de control

Otras medidas de ahorro de eficiencia energética en sistemas de bombeo [12]:

- Sacar de servicio bombas innecesarias: Si el exceso de capacidad en el funcionamiento se debe a que los requerimientos de flujo varían, se puede controlar el número de bombas en

funcionamiento mediante un sistema automático, con sensores de presión o interruptores en uno o más bombas.

- Restaurar holguras internas de las bombas: Esto se puede aplicar en casos en que las características de una bomba hayan variado significativamente a causa del desgaste de partes de la bomba, lo cual afecta recirculaciones internas y su eficiencia.
- Reemplazo de bombas sobredimensionadas: Las bombas sobredimensionadas corresponden a la causa principal de pérdidas de energía en sistemas de bombeo. El reemplazo debe evaluarse en comparación a otras alternativas como reducción de capacidad mediante recorte o sustitución de impelentes.
- Uso de bombas múltiples: El empleo de varias bombas en paralelo ofrece una alternativa de método de control de capacidad por estrangulamiento, recirculación o variación de velocidad. El ahorro resulta de sacar de servicio una o más bombas que operan con baja demanda, logrando que las bombas en servicio operen a alta eficiencia. El sistema de bombas múltiples debe considerarse en casos en que la demanda esté en periodos prolongados bajo la mitad de la capacidad nominal.

Sellos de bombas adecuados: El tipo y calidad de sello de bombas puede afectar significativamente la eficiencia de la bomba. Un sellado adecuado evita pérdidas de flujos en las uniones entre distintos dispositivos mecánicos, en sistemas de bombeo se refiere a las uniones entre las bombas y las tuberías.

4.1.2 Correas transportadoras

La correa transportadora es un sistema de transporte continuo formado por una cinta de caucho moviéndose entre dos poleas. La correa se mueve por la acción de uno o más motores.

Las correas se usan normalmente para transportar minerales granulados.

La ventaja de las correas transportadoras por sobre otros medios de transporte está asociado al bajo costo por material transportado a grandes distancias, a que se pueden adaptar a variados tipos de terrenos, a su gran capacidad de transporte, a que permiten transportar una gran variedad de minerales, cargar y descargar en cualquier punto, a que se pueden desplazar y no alteran el producto transportado, entre otras ventajas.



Ilustración 15 Correa transportadora ShipLoader en Puerto Patache

Las correas se suelen dimensionar de acuerdo a la máxima capacidad de carga, lo cual involucra la potencia del motor y el diseño de la misma correa. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que generalmente:

- No funcionan regularmente a la velocidad de diseño, a media carga por ejemplo.
- Algunas veces trabajan en vacío debido a que la entrega del material a transportar no es constante.

El consumo eléctrico de una correa trabajando a media carga está un poco por debajo del consumo a carga completa. Dependiendo de las condiciones topográficas: en subida o bajada, el consumo a media carga es de un 80% del consumo a plena carga. En el caso que la correa trabaje en vacío el consumo es de 50%-70% del consumo a plena carga. [13].

En las correas transportadoras se pueden lograr ahorros de energía de dos maneras: reduciendo la fricción en los materiales o mejorando el control del sistema. Reducir la fricción en una correa, por ejemplo, se puede lograr aplicando materiales con menor índice de fricción o reduciendo las pérdidas en la tensión de la correa. Los ahorros en el control del sistema se pueden alcanzar mediante el control de velocidad de la correa o mediante el control del material transportado.

La potencia eléctrica consumida por una correa transportadora depende mayormente de la resistencia al movimiento de la misma, la velocidad de la correa y la eficiencia mecánica, eléctrica y del sistema de control: [14]

$$P_e = \frac{F(m_L) \cdot v}{\eta_{mec} \cdot \eta_{freq} \cdot \eta_{motor}}$$

Donde

- P_e : Potencia eléctrica
- F : función que representa la resistencia al movimiento que depende de la carga (m_L)
- v : velocidad de la correa
- $\eta_{mec,freq,motor}$: eficiencia mecánica, del convertidor de frecuencia y del motor eléctrico.

Reducir la velocidad de la correa aumentaría la carga en la correa lo cual aumenta su resistencia al movimiento debido al aumento en la masa de carga que ésta transporta. Sin embargo, el aumento en la resistencia es menor que la disminución de la velocidad, por lo tanto al reducir la velocidad la potencia eléctrica es menor, pero esta relación no es lineal debido al aumento de la resistencia.

La resistencia de la correa se puede definir como:

$$F = F_H + F_N + F_{St} + F_S$$

Con:

- F_H : Resistencia primaria o resistencia principal
- F_N : Resistencia secundaria
- F_{St} : Resistencia de gradiente
- F_S : Resistencia especial

Esta resistencia en la correa se puede expresar de manera detallada con la siguiente ecuación [14]:

$$F = CfL[m_R + (2m_B + m_L)\cos\delta] + m_LgH$$

Donde:

- C : proporción entre la resistencia primaria y secundaria.
- f : coeficiente de fricción.
- L : largo de la correa
- m_r : masa de los rodamientos
- m_B : masa de la correa
- δ : ángulo de inclinación de la correa

Además de esta ecuación es posible estimar el valor del coeficiente de fricción con los datos nominales de la correa transportadora mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{\frac{P_e \cdot \eta_{mec} \cdot \eta_{freq} \cdot \eta_{motor}}{v} - m_LgH}{CLg \cdot (m_R + (2m_B + m_L)\cos\delta)}$$

Si se asume que la correa fue diseñada para transportar una determinada capacidad (Q_m) la masa por unidad de longitud del material transportado por la correa puede ser expresada como:

$$m_L = \frac{Q_m}{3,6 \cdot v\phi_1}$$

Donde ϕ_1 es la pendiente de la instalación.

Como lo único variable en la ecuación es la velocidad de la correa entonces la resistencia al movimiento de la correa se puede escribir como:

$$F = C_1 + C_2 m_L$$

Donde C_1 y C_2 solo dependen del diseño de la correa.

Con un variador de velocidad, la velocidad puede ser ajustada a la cantidad requerida de material transportado. Por ejemplo, si la correa transporta la mitad del material de la capacidad de diseño la velocidad puede regularse a la mitad donde una disminución de la velocidad implica una disminución importante en el consumo de energía. Si la correa está en vacío la velocidad puede disminuirse al mínimo.

Al disminuir la velocidad de la correa no sólo se produce un menor consumo de energía sino que además el desgaste de los rodamientos y de la correa disminuye aumentando la vida útil.

Otra oportunidad de eficiencia energética en correas transportadoras corresponde al aprovechamiento de la energía potencial en correas que van en bajada aprovechando el momento de frenado para inyectar esta energía al sistema eléctrico. Para estos efectos se suelen usar las siguientes alternativas [15]:

- Uso de otro motor de inducción como generador.
- Máquina síncrona con ciclo convertidor.
- Motor de inducción con fuente de corriente inversora.
- Motor de inducción con fuente inversora de tensión.

4.1.3 Compresores de aire

El compresor de aire es un equipo que transforma energía mecánica en presión para desplazar un fluido compresible como un gas. Los compresores son ampliamente utilizados en la industria. [16]

Los compresores se clasifican en:

- Compresores de desplazamiento positivo: aumentan la presión del fluido reduciendo su volumen.
- Compresores dinámicos: aumentan la velocidad del fluido, que es transformada en presión al final del equipo.

Los elementos que afectan la eficiencia de un compresor de aire son:

1. **Pérdidas en sistema de refrigeración:** Generalmente los compresores necesitan ser refrigerados debido al aumento de temperatura en el proceso de compresión con agua o aire. Este calor no se reutiliza posteriormente por lo que se convierte en la principal fuente de pérdida de energía.
2. **Pérdidas por calidad de aire de aspiración:** Para que la compresión resulte más eficiente, el aire debe tener las siguientes características:

- a. Frío: Por cada 4°C de aumento de la temperatura del aire en aspiración el consumo de energía aumenta un 1%.
 - b. Limpio: Polvo en el aire de aspiración puede producir desgaste prematuro en partes móviles y mal funcionamiento de válvulas. Para evitar esto se utilizan filtros en el lado de succión que deben mantener baja la pérdida de carga. Por cada 0.025 kg/cm² el aumento en la pérdida de carga se reduce un 2%.
 - c. Seco: El aire húmedo no afecta de forma directa en el consumo energético del compresor, sin embargo, puede ser causante de fugas y daños en los equipos que con el tiempo reducen la vida útil del equipo.
3. **Pérdidas por aumento de la temperatura entre etapas de compresión:** En compresores multietapas los inter-cooler son dispositivos que se utilizan para reducir el volumen específico del fluido reduciendo la temperatura antes que entre a la siguiente etapa. De esta forma se reduce el trabajo de la compresión y aumenta la eficiencia. Un aumento de 5,5°C en la temperatura de entrada al compresor produce un aumento del 2% en el consumo del compresor.
4. **Selección de presión óptima del sistema:** Un compresor consume más energía mientras mayor sea la presión de trabajo. La reducción de 1 bar de presión de trabajo podría reducir el consumo de energía entre un 6% y un 10%. Por lo tanto, la presión de aire comprimido debe ser la mínima que satisfaga los requerimientos.
5. **Selección de la correcta estrategia de operación:** Los compresores que trabajan con estrategia de carga/descarga pueden consumir hasta un 30% de la potencia en plena carga, por lo tanto, los más eficientes deben abastecer la demanda base e idealmente un único compresor debe modular la operación para ajustarse a la demanda. Entre las estrategias de control más usadas están:
- a. **Control automático ON/OFF:** Este control enciende y apaga el equipo controlado por un control de presión. Energéticamente esto es muy eficiente ya que se eliminan las pérdidas fuera de carga.
 - b. **Control automático de carga y descarga:** El control carga el compresor cuando se requiere presión en el sistema y lo descarga según requerimientos. Con este método el motor sigue operando durante la descarga. Energéticamente este método es menos eficiente pues existe un consumo cercano al 30% del nominal al momento de la descarga.
 - c. **Control multietapas:** Grandes compresores cuentan generalmente con control por pasos. También se presenta consumo cuando no hay carga.
 - d. **Control por velocidad variable:** Al igual que con bombas y ventiladores, la carga puede ser controlada mediante VDF, lo cual es muy eficiente energéticamente.
6. **Pérdidas en el sistema de distribución por fugas:** Constituye una de las medidas principales para reducir costos energéticos. Las fugas de aire se pueden presentar en acumuladores de aire, válvulas entre mangueras y tuberías. Estas fugas, disminuyen la

presión del sistema y con ello se produce un aumento del consumo de energía para contrarrestarlo.

4.2 Iluminación.

La iluminación es un importante consumo en el sector industrial. Por lo tanto, mejorar la eficiencia de este sector implicaría una reducción importante en el consumo de energía. Por otra parte, tener una mejor iluminación se traduce en un mejor ambiente de trabajo, aumentando la productividad.

La eficiencia luminosa, también conocida como rendimiento luminoso o eficacia lumínica, indica la eficiencia con la que la energía eléctrica es transformada en luz y se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Eficiencia luminosa} \left[\frac{\text{lm}}{\text{W}} \right] = \frac{(\text{Flujo luminoso [W]})}{\text{Potencia consumida [W]}}$$

Sin considerar consumos de equipos auxiliares.

Además de la eficiencia luminosa, hay otros factores que tomar en cuenta, más relacionados con la comodidad de la luz en el ambiente determinado, como el índice de reproducción cromática (IRC) el cual define la capacidad de la luminaria para reproducir de forma real los colores cuyo valor varía entre 0 y 100, siendo más alto mejor. Otra variable importante corresponde a la temperatura de color, cuyas recomendaciones se muestran en la Tabla 4:

Tabla 4 Color de temperatura recomendada para distintas aplicaciones

Tono de luz, temperatura de color	Tipo de actividad o iluminación
Tonos Cálidos (< 3000 K)	Entornos decorados con tonos claros Áreas de descanso Salas de espera Oficinas tipo reunión Oficinas tipo celda Zonas con usuarios de avanzada edad Áreas de esparcimiento Bajos niveles de iluminación
Tonos neutros (3.300-5.000K)	Lugares con importante aportación de luz natural Tareas visuales con requisitos medios Oficinas tipo colmena Oficinas tipo celda
Tonos fríos (>5.000 K)	Entornos decorados con tonos fríos Altos niveles de iluminación. Tareas visuales de alta concentración

En cuanto a eficiencia lumínica la comparativa de luminarias más utilizadas se muestra en la Tabla 5:

Tabla 5 Eficiencia de luminarias

Luminaria	Eficiencia (lm/W)	Vida útil (horas)
Inducción interna	70-80	80.000
Fluorescente	25-70	5.000-10.000
Mercurio Alta Presión	30-50	3.500-6.000
Sodio Alta Presión	90-110	8.000-14.000
Haluros metálicos	85	10.000
Incandescente	15	500-1.000
LED	70	50.000

Como se ve en la Tabla 5 las luminarias más eficientes son las de Sodio Alta Presión, Inducción y Haluros. Sin embargo, debido a la gran vida útil y buena reproducción cromática la elección debería estar orientada a las de inducción y LED.

Además del cambio de luminarias, se pueden incorporar métodos de control que también generarían importantes ahorros en iluminación como [17]:

- Sistemas automáticos de encendido/apagado.
- Sistemas de regulación y control bajo demanda del usuario por interruptor, mando a distancia, etc.
- Sistema de regulación de la iluminación artificial de acuerdo al aporte de luz natural a través de acristalamientos.
- Sistemas de detección de presencia o ausencia para encender o apagar la luz, o incluso regular flujo luminoso.
- Sistemas de gestión centralizada, automatizada.

4.3 Motores en general

A continuación se describen las medidas más comunes para reducir el consumo energético en motores eléctricos (ver Ilustración 16). [12]

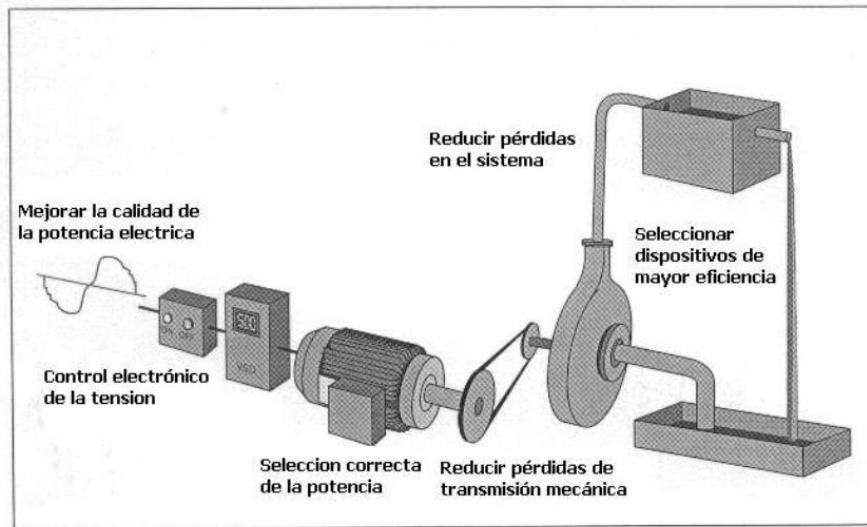


Ilustración 16 Medidas de EE en motores eléctricos

- Selección correcta de la potencia del motor: Se recomienda que la potencia nominal este sobredimensionada en 5 a 15% respecto a la potencia de operación del motor, de esta forma el motor operaría con una eficiencia (ef) y factor de potencia adecuados. Si el motor está sobredimensionado por encima del 25% de la potencia de trabajo, se tendrá un mal factor de potencia y pérdidas en eficiencia. La eficiencia del motor a un determinado factor de carga (fc) (al que va a trabajar) se puede estimar con la siguiente ecuación: [18]

$$eficiencia = \frac{fc \cdot ef}{fc \cdot ef + (1 - ef) \cdot (0,5 \cdot fc^2 + 0,5)}$$

- Mejora en calidad de la energía: Los motores de inducción están diseñados para operar en condiciones especificadas en la placa. Además deben ser alimentados con un sistema trifásico simétrico de tensiones de forma de onda sinusoidal y magnitud similar a la nominal. Si la calidad de la potencia eléctrica entregada por la red es baja el motor operaría con mayores pérdidas, disminuyendo su vida útil. Por tal razón se recomienda llevar a cabo las prácticas de operación siguientes:
 - Mantener niveles de tensión cercano al nominal: Cuando el motor opera a potencia nominal se recomienda que la tensión del motor sea muy cercana a la nominal con una desviación de a lo más un 5%. Si el motor opera con una tensión del 90%, la eficiencia puede disminuir entre el 2% y el 4%.
 - Minimizar desequilibrios de tensiones: Los factores que crean desequilibrios son: cargas monofásicas, cables de diferentes calibres, fallas de circuito, etc. Los

sistemas desequilibrados incrementan las pérdidas del sistema eléctrico industrial y en el motor.

- Disminuir la distorsión armónica de la red: Si la onda de tensión que alimenta el motor está distorsionada ocasionará un aumento en las pérdidas del motor provocando calentamiento y disminución de la eficiencia del motor.
- Reducir la carga mecánica sobre el motor

4.3.1 Cambio por motores de eficiencia Premium

Los motores eléctricos de alta eficiencia son aquellos diseñados y construidos de forma que presenten menos pérdidas en comparación con los motores estándar.

Para que un motor sea considerado altamente eficiente generalmente cumple con las siguientes características [19]:

- Mayor cantidad de cobre en bobinados para reducir pérdidas Joule.
- Barras del rotor sobredimensionadas para reducir pérdidas Joule.
- Mejor disipación térmica y enfriamiento.
- Mayor cantidad de material magnético para reducir la densidad de flujo.
- Mejor calidad en placas magnéticas para reducir pérdidas en el hierro.
- Uso de rodamientos adecuados.
- Mejor aislamiento.
- Mejor conductividad térmica.

La diferencia de eficiencia entre las clases de motores se ve en la Ilustración 17. Los motores de menores potencias son menos eficientes que los de mayores potencias. En tanto los motores con mejor estándar IE3 son más eficientes que los de estándar IE2 e IE1.

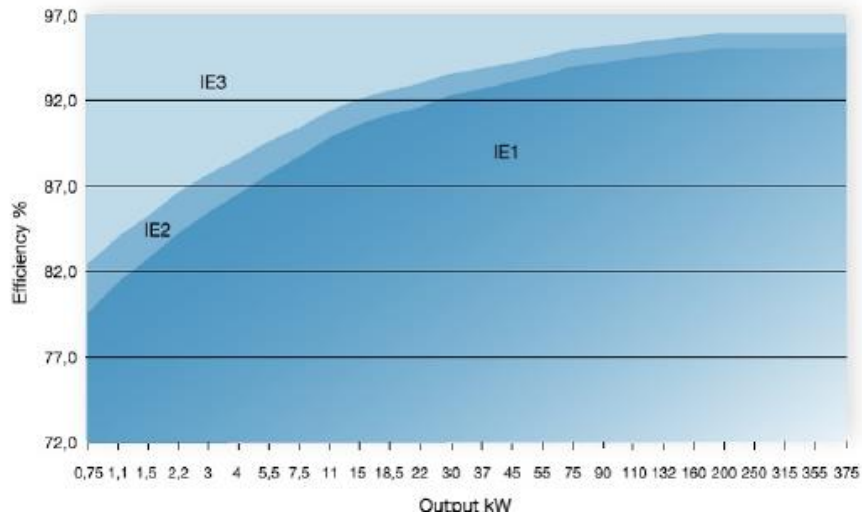


Ilustración 17 Eficiencia de tipos de motores

Las ventajas de los motores altamente eficientes son:

- Son más robustos y mejor contruidos que los motores estándar. Se traduce en menor mantenimiento y mayor vida útil.
- Disminuyen los costos de operación del motor.

Al considerar la posibilidad de comprar un nuevo motor se debe evaluar la alternativa de la mayor inversión de un motor Premium con los ingresos de los ahorros energéticos al operar a mayor eficiencia. En general se recomienda motores de alta eficiencia en los siguientes casos:

- Motores entre 10 y 75 HP cuando operan a 2500 horas/año o más.
- Motores con potencia menor a 10 HP o superior a 75 HP cuando operan más de 4500 horas/año.
- Cuando se usan para reemplazar motores sobredimensionados.
- Cuando se aplican conjuntamente con variadores electrónicos de velocidad para accionar bombas y ventiladores.

4.3.2 Compensación de potencia reactiva individual

Entre los problemas que causan los flujos de potencia reactiva se encuentran:

Pérdidas en conductores, ocasionando:

- Calentamiento de los conductores, acelerando deterioro de aislamientos reduciendo la vida útil y aumentando la probabilidad de cortocircuitos.
- Calentamiento de bobinados de transformadores de distribución
- Disparo de protecciones.

Sobrecarga de transformadores y generadores: con un bajo factor de potencia transformadora y generadora trabajan con cierto grado de sobrecarga reduciendo la vida útil de los mismos.

Efectos de la compensación de energía reactiva:

- **Disminución de pérdidas por efecto Joule:** Al disminuir el flujo de potencia reactiva por las líneas el módulo de la corriente disminuye por lo que las pérdidas también los hacen (I^2R). La razón de disminución de pérdidas por mejoramiento de factor de potencia se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\frac{Pérdidas_i}{Pérdidas_f} = \left(\frac{\cos\phi_i}{\cos\phi_f} \right)^2$$

Por ejemplo, mejorar el factor de potencia de 0.6 a 0.85 disminuye las pérdidas por efecto Joule en un 50.17%

- **Disminución de caídas de tensión en la línea:** Cuando la energía se desplaza por las líneas se produce una caída de tensión debido a que se debe vencer la impedancia de las mismas.

La distorsión armónica en la red industrial se ha incrementado debido al gran desarrollo de la electrónica de potencia y el gran uso que se les ha dado en la industria.

Estos problemas están causados en su mayoría por:

- Variadores de frecuencia.
- Rectificadores y sistemas de alimentación ininterrumpida UPS.
- Hornos de arco, balastos de lámpara de descarga y fluorescentes.

Los condensadores son especialmente sensibles presentándose dos problemas:

- La impedancia del condensador decrece con la frecuencia presentando un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas. Estas corrientes elevadas producen calentamiento, degradación del dieléctrico, pudiendo producir perforación.
- El banco de condensadores con la inductancia de la red de distribución y el transformador forman una red oscilante. Si las cargas no lineales generan corriente armónica con frecuencia cercana a la frecuencia natural del circuito se producirá el fenómeno de resonancia produciendo sobretensión en el condensador.

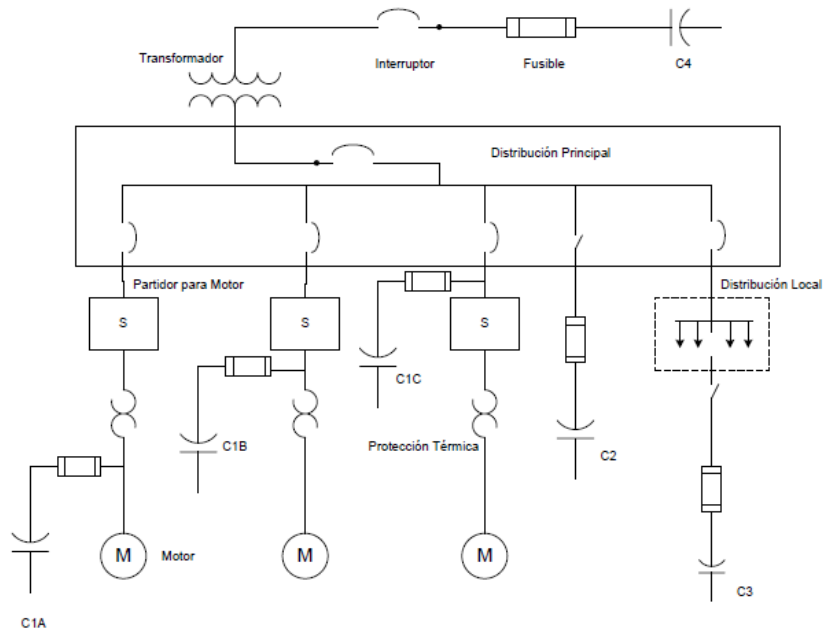


Ilustración 18 Esquema de diferentes tipos de compensación reactiva

Un capacitor ubicado muy cerca del motor reduce las pérdidas aguas arriba de este por lo que en la figura, el condensador marcado como C1A sería aquel que traería mayores beneficios para reducir al reducir la magnitud de la corriente en la Ilustración 18. Dado que las pérdidas son proporcionales a la resistencia el efecto es mayor para líneas largas o para líneas saturadas (con sección de conductor pequeña) lo que además permite disminuir el grado de carga de la línea disminuyendo la probabilidad de accionamiento de protecciones por sobre corriente.

4.4 El variador de frecuencia

4.4.1 Principio de funcionamiento.

El variador de frecuencia está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT o tiristores. La objetivo general del dispositivo es transformar energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable.

La variación de frecuencia se logra en dos etapas. La primera etapa es la etapa rectificadora que transforma corriente alterna en corriente continua, luego de un circuito intermedio se llega a la etapa inversora que transforma la corriente continua en corriente alterna con frecuencia y tensión regulables.

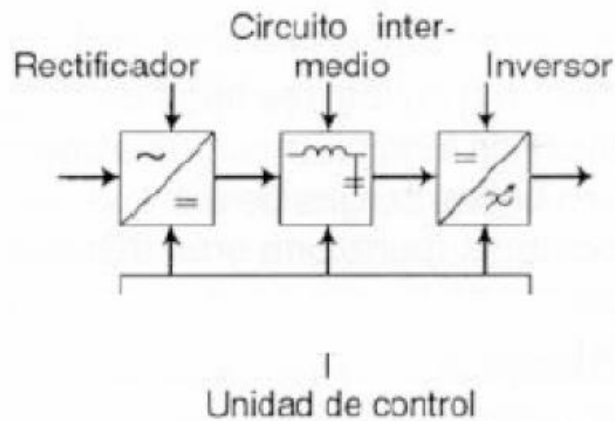


Ilustración 19 Esquema del variador de frecuencia

El uso de variadores de frecuencia añade un importante potencial para el ahorro de energía disminuyendo la velocidad del motor.

Para variar la velocidad del motor se permiten dos tipos de control:

- Control manual de velocidad: La velocidad y el sentido de giro puede ser modificada manualmente.
- Control automático de velocidad: Mediante realimentación la velocidad puede ser ajustada automáticamente.

La rectificación se produce porque los diodos conmutan cíclicamente sobre las fases en corriente continua. La tensión de la red va forzando el paso conducción o bloqueo de los diodos, esto se conoce como conmutación forzada. Cuando se rectifican solo las semiondas positivas de tensión

alternando se tiene un rectificador de media onda y si se rectifican ambas semiondas se tiene un montaje de onda completa.

En el rectificador de media onda la tensión no es puramente continua. En este caso se tiene cierto grado de rizado u oscilación en torno al valor medio.

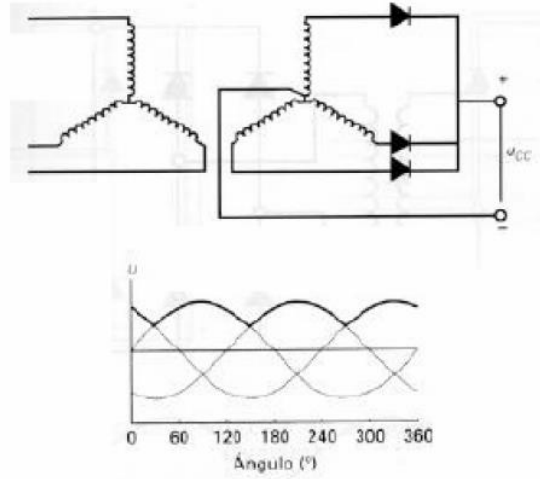


Ilustración 20 Etapa de rectificación del VDF

El rectificador trifásico de onda completa o puente de Graetz está formado por 6 diodos y tiene menor rizado que el rectificador de media onda.

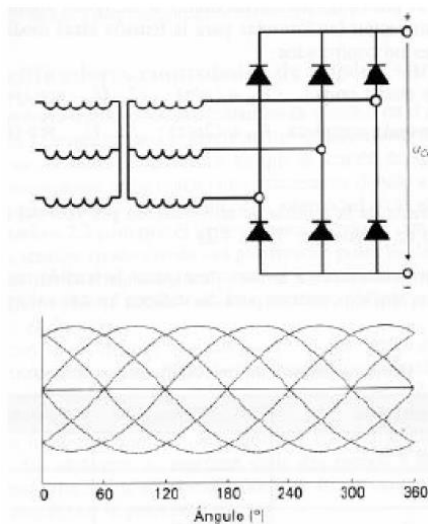


Ilustración 21 Rectificador de onda completa

La función del circuito intermedio es alimentar la etapa inversora. Esto se puede lograr funcionando como fuente de tensión con un condensador electrostático para mantener constante la tensión. Para

que funcione como fuente de corriente se pone una impedancia en serie con una de sus ramas, su función es mantener la corriente constante.

La función del inversor es de transformar la tensión de entrada en corriente continua a un voltaje simétrico de salida en corriente alterna. La disposición más común del inversor es la del puente de Graetz, y está formado por semiconductores controlables que pueden ser tiristores, GTO, IGBT o MOSFET.

Las formas de regular la tensión de salida son:

- Variar tensión en el circuito intermedio.
- Variar ancho de zona de conducción de cada semionda de salida.
- Mediante Modulación del Ancho de Pulso (PWM en inglés): Este método varía la tensión en función de tiempos de conexión y desconexión de los semiconductores de potencia. Este método tiene la ventaja de producir una onda de tensión que mejora la onda de corriente absorbida por el motor lo que hace que este último trabaje de forma semejante como si lo hiciera directamente de la red.

4.4.2 Ventajas de usar Variador de Frecuencia

Las ventajas de usar un VDF son:

- Reducir consumo de energía: Si se tiene un proceso para el cual no es necesario que el motor funcione a máxima velocidad, entonces se puede reducir el consumo de energía mediante el control de la velocidad de giro. El variador de frecuencia permite ajustar la velocidad a los requerimientos de la carga.
- Aumentar la vida útil y reducir la mantención de equipos: Como el VDF controla la frecuencia y la tensión, este proporciona mayor protección frente a sobrecargas eléctricas y térmicas, protección de fase, bajo y sobre voltaje, etc. Además es posible evitar las partidas y frenadas bruscas mediante el control de la tensión en esas etapas.

4.4.3 Aplicaciones del VDF

Diferentes aplicaciones tienen diferentes criterios que deben ser evaluados individualmente. Por ejemplo, cuando son usados en bombas centrifugas o ventiladores, un dispositivo ahorra energía al ajustar la velocidad en un punto más eficiente. A menudo puede significar un ahorro de hasta un 60% sobre motores de velocidad fija con control de válvula. Esto es suficiente para recuperar la inversión en un corto periodo de tiempo.

La discusión sobre VDF y ahorro de energía a menudo se centra en bombas y ventiladores. Sin embargo, existen otras aplicaciones que tienen alto potencial ahorrando energía. Estas aplicaciones son corrección de factor de potencia, regeneración, aplicaciones en un bus común, o una combinación de las tres.

Se estima que su uso en bombas permite un ahorro del 35%, en ventiladores permite un ahorro del 35%, en compresores de aire de un 15%, en correas transportadoras de un 15%. En tanto el grado de aplicabilidad corresponde a un 60% en ventiladores, bombas y correas, y a un 30% en compresores de aire. [20]

4.5 Curvas de costo marginal de abatimiento de GEI (CCMA)

Las curvas de costo marginal de abatimiento (CCMA) de GEI son herramientas que permiten desarrollar políticas y escenarios de reducción de emisiones, así como identificar, comparar, desarrollar e implementar mejor en cuanto a reducción de GEI y entregar valor.

Las CCMA consisten en un gráfico que muestra el potencial de reducción y el costo de abatir una tonelada de GEI, en un año particular, distintos proyectos.

El potencial de abatimiento se calcula en base a una referencia o Business as usual (BAU) y se define como la diferencia de volumen de emisiones del caso referencia con respecto al nuevo proyecto.

El costo de abatimiento se define como:

$$\text{Costo abatimiento} = \frac{\text{Costo alternativa reducción } CO_2 - \text{Costo}_{BAU}}{\text{Emisiones } CO_{2BAU} - \text{Emisiones } CO_{2alternativa}}$$

En una CCMA cada barra representa una oportunidad o proyecto, el alto de la barra representa el ahorro al reducir una cantidad de GEI y el ancho de la barra corresponde a la cantidad total de GEI que el proyecto es capaz de reducir ese año. Los proyectos son ordenados de forma ascendente según el costo de abatir una tonelada de GEI.

En la Ilustración 22 se muestra un ejemplo de CCMA [21]

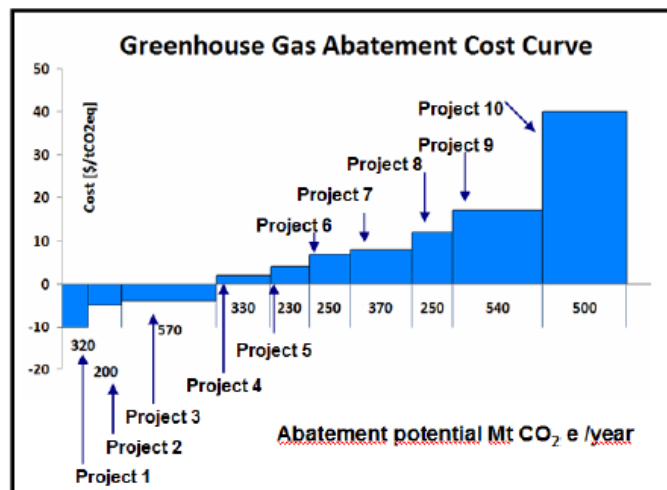


Ilustración 22 Ejemplo de CCMA

5 METODOLOGÍA

5.1 Alcances

Los alcances del trabajo son los siguientes:

- Solo se analizarán máquinas y dispositivos eléctricos en Puerto Patache. No se incluyen sistemas de uso de combustibles fósiles.
- Las medidas de eficiencia energética a considerar involucran aspectos puramente eléctricos como por ejemplo: cambio de máquinas, dispositivos de electrónica de potencia, compensación reactiva, etc. No se consideran otros aspectos como recorte de alabes, limpieza de máquinas, cambios en tuberías de agua o aire.
- El trabajo comprenderá solo las instalaciones de Puerto Patache.
- El cálculo de gases de efecto invernadero solo considerara las emisiones indirectas, esto quiere decir solo aquellas relacionadas con el consumo eléctrico de la compañía.

5.2 Procedimiento de trabajo

El procedimiento a seguir para realizar este trabajo se muestra ejemplificado en la Ilustración 23.

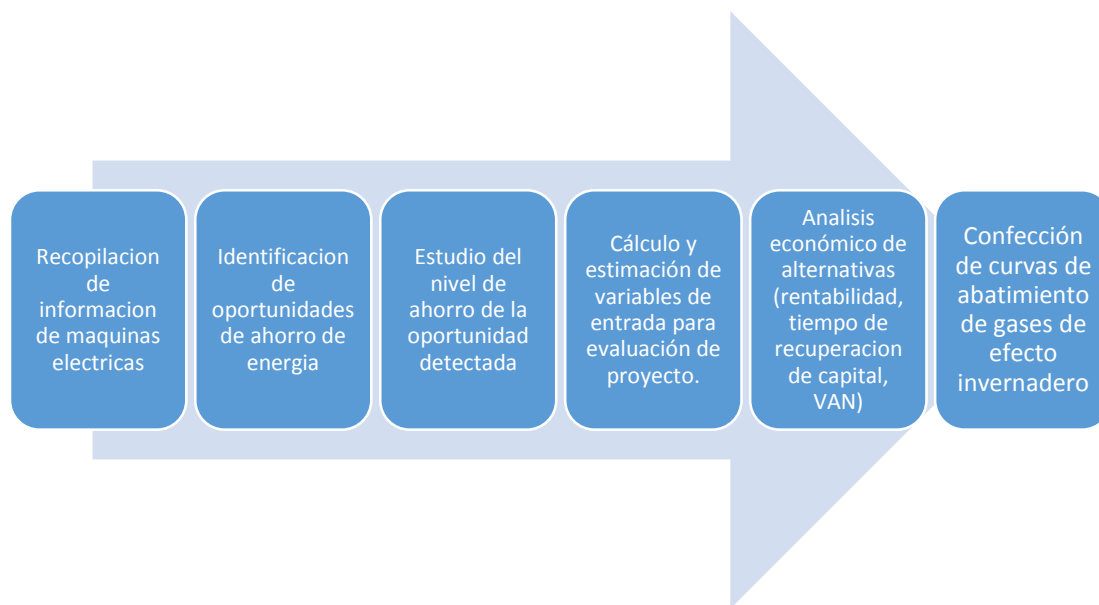


Ilustración 23 Esquema de metodología de trabajo

- **Recopilación de información de máquinas eléctricas:** Se obtendrá información relevante relacionada con las características de la operación de las máquinas, así como sobre la operación de las mismas. Entre los datos relevantes para realizar un estudio de eficiencia energética cabe destacar: eficiencia de las máquinas, nivel de utilización (horas de uso al año), grado de carga, datos nominales (factor de potencia, potencia), aplicaciones del motor eléctrico.

- Identificación de oportunidades de ahorro energético. Con la información recopilada de las máquinas, se espera identificar oportunidad de ahorro de energía basándose en la información teórica recopilada en la revisión bibliográfica de este documento. Para cada tipo de aplicación existen medidas validadas de las que se analizara la conveniencia de ser incorporadas en el proceso. Por ejemplo sistemas de bombes en los cuales resulte conveniente el control de velocidad, o maquinas sobredimensionadas y/o ineficientes a las cuales deba realizarse el cambio del motor. Así como también, se descartaran aquellas medidas que por la naturaleza del sistema no sean aplicables.
- Estudio del nivel de ahorro de la oportunidad detectada: Para cada oportunidad de eficiencia energética es necesario estimar el nivel de ahorro en MWh/año que generaría a la empresa. Con los datos recopilados, así como con estimaciones basadas en supuestos o cálculos teóricos se calculará el ahorro esperado del proyecto. Esta parte del trabajo corresponde a la parte técnica del análisis de proyectos de eficiencia energética.
- Obtención de variables de entrada para análisis financiero: Para realizar el análisis económico es necesario determinar el nivel de inversión a los cuales debe incurrir la empresa para poner en marcha la medida. En este paso se debe realizar la cotización de la inversión necesaria o la estimación de la misma con datos existentes. Otras variables a utilizar son los años de uso, costos adicionales, precio de la energía, tasa de descuento.
- Análisis económico de la alternativa. Para cada proyecto se obtienen los parámetros necesarios para analizar el nivel de rentabilidad para la compañía. Las variables a calcular son: VAN, TIR y periodo de recuperación del capital. Además se entrega el nivel de inversión necesario para poner en marcha el proyecto.
- Confección de curvas de abatimiento de la carpeta de proyectos detectados. Además de los parámetros financieros para Collahuasi es importante determinar las toneladas de CO2 abatidas y el costo (o ahorro) al que debe incurrir la compañía para abatir cada tonelada de CO2. Para ello se calcularán las toneladas de emisiones de CO2 abatidas usando el factor de emisión del sistema interconectado del norte grande.

5.3 Supuestos y estimaciones

Nivel de ahorro por variador de frecuencia: En caso que no se tengan datos exactos de la operación de los motores como los flujos instantáneos se estimara el nivel de ahorro asumiendo los valores demostrados para cada tipo de aplicación. Esto es:

- Bombas: 35%
- Ventiladores: 35%
- Correas transportadoras: 15%
- Compresores de aire: 15%

Parámetros económicos:

- Precio de la electricidad: 100 USD/MWh²
- Tasa de descuento: 8%³
- Inversión: De acuerdo a cotizaciones
- Vida útil de proyecto: Depende de equipo instalado
 - Para VDF: 10 año
 - Luminaria: 35.000 horas (equivale 6 años si encendidas 18 horas/día)
- Factor de emisión: 0.811 ton CO2/MWh que corresponde al factor de emisión del SING 2013

² Valor referencial.

³ Valor utilizado en la Superintendencia de Eficiencia Energética para evaluación de proyectos

6 PROYECTOS DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y RESULTADOS

6.1 Sistemas de bombeo

La potencia instalada en sistemas de bombeo en Puerto Patache totaliza 4.035 [kW] que representa la mitad de la potencia instalada en motores eléctricos en el Puerto. En cuanto a energía consumida es de un aproximado de 6.070 [MWh/año] lo que hace de las bombas el mayor consumo de Puerto Patache en lo que a energía eléctrica se refiere.

La cantidad de bombas de Puerto Patache es de 159 equipos lo que representa aproximadamente el 69% del total de motores eléctricos disponibles en el puerto. Estos equipos se pueden clasificar según su ubicación en Puerto Patache, según la potencia nominal y según horas de uso de los equipos.

Tabla 6 Caracterización de bombas por ubicación

Ubicación	N°	Potencia Instalada [kW]	Horas de Uso promedio	Energía consumida estimada [kWh]
Planta Moly	83	1530,36	1881	2411
Área húmeda filtrado	9	198,1	909	87
Embarque	1	11,1	0	0
Espesado	10	619	2479	1044
Planta filtrado	5	149,1	40	5
Planta riles	33	868	2780	1755
Serv. Agua	18	678	2043	769

De la Tabla 6 se puede concluir que tanto el área de embarque como el área de la planta de filtrado tienen muy poco consumo energético por parte de bombas debido a que se encuentran muy pocos equipos y/o estos son muy poco usados. Por otra parte la mayor cantidad de bombas se encuentran en la planta de molibdeno y la planta de riles, en tanto el consumo energético mayor se concentra tanto en la planta de molibdeno como en espesado, riles y servicios de agua.

Para realizar un análisis de rentabilidad de proyectos de EE en sistemas de bombeo se analizarán aplicaciones por separado, evaluando para cada uno el proyecto consistente en la instalación de control de velocidad mediante VDF para el grupo de bombas correspondiente.

6.1.1 VDF en bombas de filtrado (Área Espesado)

Este sistema de bomba consiste en dos pares de bombas en paralelo las cuales bombean concentrado de cobre desde un tanque de almacenamiento de este material a el sistema de filtrados.

Los datos nominales son:

Tabla 7 Datos nominales proyecto VDF en bombas de filtrado

Nombre	TAG	Potencia Nominal [kW]	Velocidad Motor [rpm]	Caudal [m3/s]	Altura elevación [mca]	Electrónica de Potencia
Bomba alimentadora Loop Filtros	311PP1026	111,9	1485	440	28	NO
Bomba alimentadora Loop Filtros	311PP1027	111,9	1485	440	28	NO
Bomba alimentadora Loop Filtros	311PP1028	111,9	1485	440	28	VDF
Bomba alimentadora Loop Filtros	311PP1029	111,9	1485	440	28	VDF

De acuerdo a la Tabla 7, se ve que de las cuatro bombas, dos ya poseen VDF por lo que se analizará la rentabilidad de controlar la velocidad de las dos bombas restantes. Para ello se calcula el consumo actual estimado mediante la potencia nominal y las horas de uso para el año 2013 (3360 horas/año) lo que entrega un estimado de 375.984 [kWh/año] para cada bomba.

Los resultados del proyecto fueron:

Tabla 8 Resultados financieros proyecto VDF en bombas de filtrado

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión (2 VDF)	47.850	USD
Ahorro	263,2	MWh/año
VAN	130.100	USD
TIR	40%	-
PRC	3	años
Toneladas abatidas	213	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-90,84	USD

Como se aprecia este proyecto presenta una rentabilidad en torno al 40% con un periodo de recuperación del capital en unos 3 años. Además se tiene que se abatirían 213 toneladas de CO2 equivalente por año.

6.1.2 VDF en bombas de forestación

Las bombas de forestación son un grupo de tres bombas en paralelo que transportan agua sobrante de los procesos llevados en Puerto Patache a un pequeño bosque.

Los datos nominales de las bombas son los siguientes:

Tabla 9 Resultados financieros en proyecto VDF en bombas de forestación

Nombre	TAG	Potencia Nominal [kW]	Velocidad Motor	Caudal [m3/s]	Altura elevación [mca]	Electrónica de Potencia
Bomba Weir agua forestación	350PP183	93,3	2975	400	28	NO
Bomba Weir agua forestación	350PP184	93,3	2975	400	28	NO
Bomba Weir agua forestación	350PP185	93,3	2975	400	28	NO

Las tres bombas sólo poseen un control ON/OFF lo cual significa que se encienden y se apagan cada vez que se necesita, esto puede ocasionar algunos problemas como el vertimiento del agua ocasionando el no aprovechamiento de la energía y de agua.

Para ello se propone el control del flujo de agua mediante la instalación de un VDF en cada bomba. La energía se puede estimar de acuerdo a la siguiente tabla

Tabla 10 Estimación consumo de energía proyecto VDF en bombas de forestación

Bomba	Horas Uso/año	Energía [kWh/año]
350PP189	2948	275.048
350PP184	3601	335.973
350PP185	3417	318.806
ENERGÍA CONSUMIDA TOTAL		929.827

Por lo tanto, los ahorros estimados para esta aplicación son de 325.439 [kWh/año].

Los resultados financieros del proyecto son:

Tabla 11 Resultados financieros proyecto VDF en bombas de forestación

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión (3 VDF)	76.364	USD
Ahorro	325,4	MWh/año
VAN	98.334,14	USD
TIR	32%	-
PRC	4	años
Toneladas abatidas	264	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-55,5	USD

6.1.3 VDF en bombas que emplean osmosis reversa en la Planta Riles

Las bombas a estudiar en esta área de Puerto Patache corresponden a la bomba alimentadora RO-1 (reverse osmosis) y la bomba de alta presión. En la planta de Riles es donde se tratan los residuos industriales de los procesos llevándose a cabo en el Puerto. Las características de ambas bombas se muestran en la tabla

Tabla 12 Datos nominales bombas proyecto VDF en osmosis reversa de planta Riles

Nombre	TAG	Potencia Nominal [kW]	Velocidad Motor	Caudal [m3/s]	Altura elevación [mca]	Electrónica de Potencia
Bomba alimentador RO-1	352PP3312	160	2982	216	150	NO
Bomba alta presión	352PP3313	160	2982	283.4	226,6	NO

La importancia de estas bombas se relaciona con el hecho que son las bombas con mayor potencia nominal de Puerto Patache y, además, son usadas aproximadamente 6.900 horas/año de modo que son uno de los mayores consumos de este sistema.

Al estimar la energía consumida se obtiene que entre ambas bombas se consumen unos 2.209.414,44 [kWh/año], si se estiman los ahorro de energía de un VDF en 35% los ahorros estimados en esta aplicación es de 773.295 [kWh/año].

Los resultados financieros de este proyecto se muestran en la tabla:

Tabla 13 Resultados financieros proyecto de VDF en osmosis reversa de Planta Riles

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión (2 VDF)	68.632,71	USD
Ahorro	733,3	MWh/año
VAN	325.721,62	USD
TIR	85%	-
PRC	2	Años
Toneladas abatidas	627,14	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-77,4	USD

Como se observa en la Tabla 13 el ahorro obtenido, así como la rentabilidad y el período de recuperación del capital, basados en los supuestos y estimaciones realizadas son positivas, haciendo que este proyecto tenga bastante potencial en caso de ser ejecutado. En el próximo capítulo se analiza en profundidad los resultados y se realizará un análisis de sensibilidad para determinar que parámetros son los que más inciden en la rentabilidad de estos proyectos.

6.2 Compresores de aire

Como ya se vio anteriormente, los compresores de aire corresponden a los motores de mayor consumo en Puerto Patache, por lo que proyectos de eficiencia energética en estas máquinas puede tener un gran impacto en el consumo total. A continuación se muestran los detalles técnicos de estos motores:

Tabla 14 Datos nominales motores de compresores de aire

Nombre	TAG	Potencia Nominal [kW]	Velocidad Motor	Electrónica de Potencia
Compresor Atlas Copco	310CP019	312,95	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP018	312,95	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP012	312,95	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP013	312,95	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP020	312,95	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP014	238,35	1490	NO
Compresor Atlas Copco	310CP015	238,35	1490	NO

De acuerdo a la tabla, se tienen 7 compresores de aire en servicios de aire de Puerto Patache, de los cuales cinco corresponden a motores de 400 [HP] y dos a motores de 300 [HP]. En total la potencia instalada en estos equipos es de 1.939,6 [kW]. El detalle de las horas de uso para el año 2013 es de

Tabla 15 Estimación de consumo de energía de compresores de aire

Bomba	Horas Uso/año	Energía [kWh/año]
310CP019	5906	1.848.263
310CP018	5388	1.686.276
310CP012	4684	1.465.718
310CP013	4214	1.318.804
310CP020	1072	335.466
310CP014	3744	892.327
310CP015	0	0
ENERGÍA CONSUMIDA TOTAL		7.546.853

La estimación de energía consumida el ahorro total estimado es de aproximadamente 7.546 [GWh/año] por lo que los ahorros estimados al instalar VDF para el control de velocidad de estos motores alcanzarían 1.132.028 [kWh/año].

Los resultados financieros se muestran a continuación:

Tabla 16 Resultados financieros proyecto VDF en compresores de aire

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	390.080	USD
Ahorro	1.132	MWh/año
VAN	184.425	USD
TIR	18%	-
PRC	6	años
Toneladas abatidas	914	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-30,08	USD

Según el detalle de horas uso de los compresores se aprecia que el 310CP015 no se usó en un año completo por lo que se puede deducir que es un motor de respaldo. Por lo tanto se hará una nueva evaluación financiera en caso que un VDF instalado en ese motor no fuese necesario de instalar. Dado que esto no impacta en el ahorro estimado y si en la inversión solo se esperan cambios en este ítem y en el VAN.

Tabla 17 Resultados financieros proyecto VDF en seis compresores de aire

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	345.845	USD
Ahorro	1.132.028	MWh/año
VAN	228.660	USD
TIR	21%	-
PRC	6	años
Toneladas abatidas	914	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-37,3	USD

Como era de esperar la disminución en la inversión mejora el VAN y el costo de la tonelada abatida.

6.3 Correas Transportadoras

En esta sección se estimarán los ahorros resultantes de la reducción de velocidad en las correas transportadoras de la correa basadas en las ecuaciones presentadas en la sección 4.1.2. Para ello se estimará el valor del coeficiente de fricción de cada correa para luego calcular la potencia consumida para cada 10% de reducción de la velocidad. Para el cálculo de los ahorros de energía que se podrían lograr se multiplica la potencia reducida debido a la reducción de la velocidad por las horas de uso (medido con horómetros) en el año 2013. Se asume que trabajarán la misma cantidad de horas.

Los datos de las correas se muestran en la Tabla 18.

Tabla 18 Datos nominales de correas transportadoras de puerto patache

Correa	Largo [m]	Elevación [m]	Capacidad nominal [Ton/h]	Velocidad nominal [m/s]	Potencia nominal [kW]
CV25	248	24,12	148	1	76,8
CV22,23,24,1048,1049	14	0	148	0,2	1,7
CV30	2,5	0	148	1	7,5
CV26,27	269	1	1.350	2	71,9
CV27A	98,85	0	1.350	2,02	74,6
CV3302	3,1	0	148	1	7,5

Además se asumen los siguientes datos en las correas basados en la información disponible:

mR: masa de rodamientos 40 [kg/m]

mB: masa de correa: 78 [kg/m]

Eff: eficiencia de motor 0,95

6.3.1 Correa 320CV25

Los resultados de este estudio para la correa 25 del Puerto se muestran en la Ilustración 24. La potencia nominal de esta correa transportadora es de 76,8 [kW]. Es la correa transportadora que más consume energía en Puerto Patache.

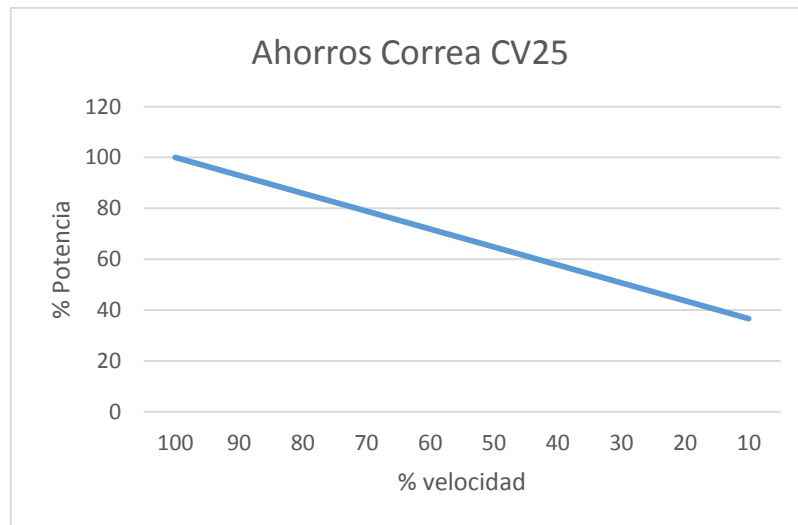


Ilustración 24 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV25

De acuerdo al gráfico se ve que una reducción de un 10% de velocidad se traduce en un 7% de potencia. Como se explicó en la sección 4.1.2 a pesar que un motor aplicado en correas transportadoras tiene un comportamiento lineal, debido al aumento de carga de material al mantener el flujo del mismo constante existe otra componente que aumenta la potencia para oponerse a este efecto lo que explica ese 3% menos de potencia ahorradas.

Esta correa en particular un 10% de reducción de velocidad significa reducir de 1[m/s] a 0,9 [m/s], lo que implica un ahorro en potencia de 5,4 [kW]. En tanto, una reducción de 0,2 [m/s] se traduce en un ahorro de 10,8 [kW].

Si la correa trabajo 6.798 [horas/año] en 2013. Los ahorros estimados de al reducir su velocidad usando VDF son de 36.709 [kWh/año] a 0,9 [m/s] y de 73.418 [kWh/año] a 0,8 [m/s] manteniendo el flujo de material a 148 [m/s]. La masa de CO2 equivalente abatida es de 29,77 [tonCO2eq/año] y 59,54 [tonCO2eq/año] respectivamente.

Se recomienda mantener la velocidad cercana a la nominal cuando se mantiene el flujo de material constante debido a que la masa de material sobre la correa puede traer consecuencias indeseadas en la operación. En la Ilustración 25 se ve que a velocidades bajas el material acumulado puede aumentar exponencialmente.

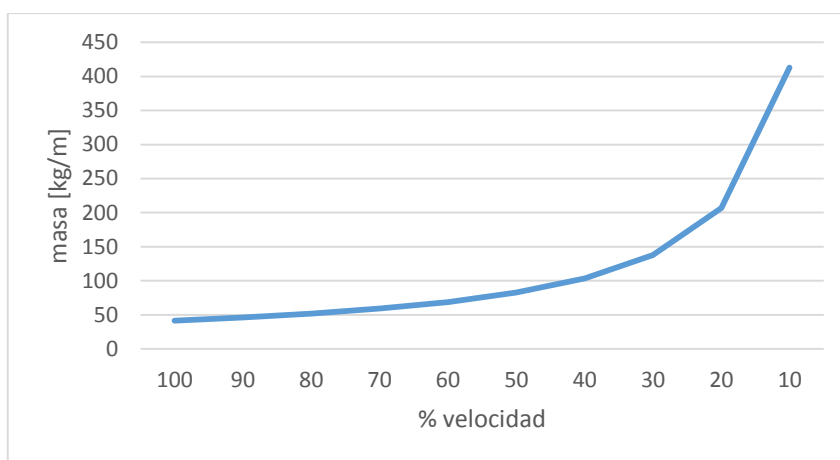


Ilustración 25 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV25

La correa trabajando al 80 [%] de su capacidad nominal transporta una masa de 51,6 [kg/m] en cambio si la velocidad disminuye a un 30 [%] la masa transportada es de 137,7 [kg/m].

Tabla 19 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV25

Velocidad (%nominal)	Velocidad [m/s]	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
0,9 (90%)	0,9	5,4	36.709	3.671	29,77
0,8 (80%)	0,8	10,8	73.418	7.342	59,54

6.3.2 Correas 320CV22, 23, 24, 1048, 1049

En la Ilustración 26 se muestran los resultados obtenidos para las correas. Las 5 correas tienen los mismos datos nominales como se revisó al comienzo de la sección. La potencia nominal de estas correas es de 1,7 [kW].

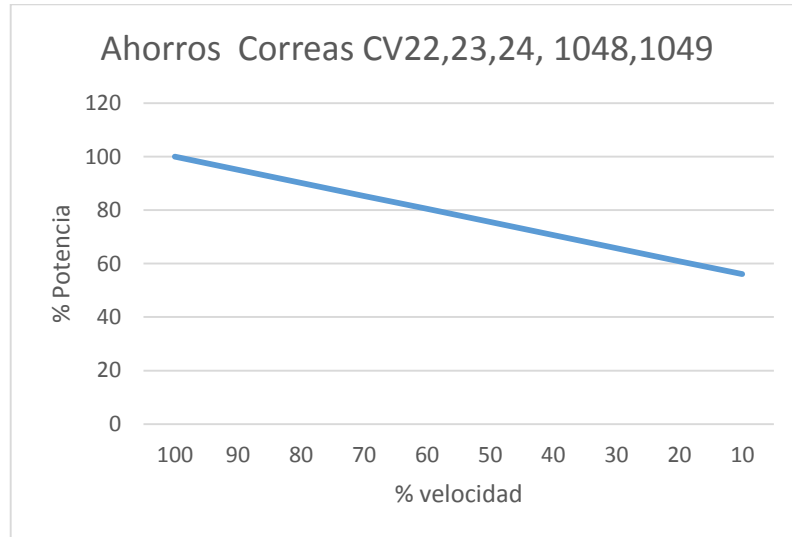


Ilustración 26 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correas 320CV22, 320CV23, 320CV24, 320CV1048 y 320CV1049

Para estas correas la reducción de un 10 % en la velocidad de 0,2 [m/s] a 0,18 [m/s] equivale a un ahorro de 4,9 [%] de potencia. Una disminución del 20 [%] implica un 9,8 [%] de disminución de velocidad. En valores reales se traduce en que cuando el motor trabaja a 0,18 [m/s] la potencia consumida disminuye en 83 [W] y cuando lo hace a 0,16 [m/S] se ahorran 167 [W]. La suma de las horas de uso de las cinco bombas es 30.798 [horas/año] en 2013.

Tabla 20 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV22, 23, 24, 1048, 1049

Velocidad (%nominal)	[m/s]	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
0,18 (90%)		0,42	2.556	256	2,07
0,16 (80%)		0,84	5.143	514	4,17

La masa de la carga de las correas para cada % de velocidad nominal se muestra en la Ilustración 27

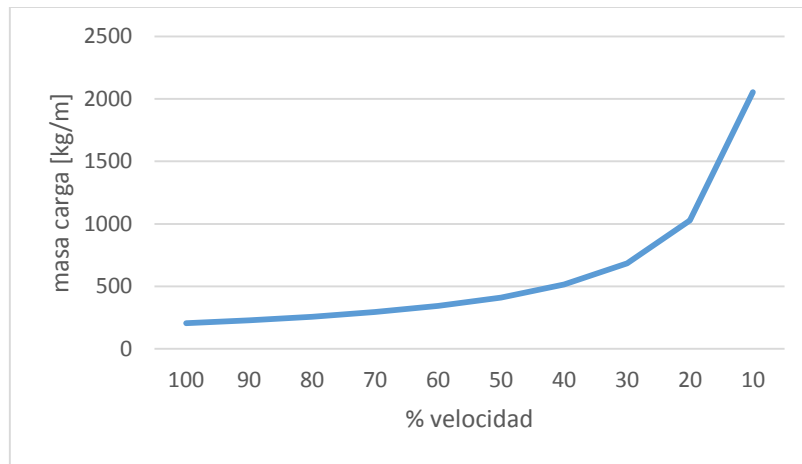


Ilustración 27 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV22,23,24,1048,1049

6.3.3 Correa 320CV30

La correa 320CV30 de 7,5 [kW] produciría ahorros en potencia según se muestra en la Ilustración 28. Además ésta trabajó 6.849 [horas/año] en 2013.

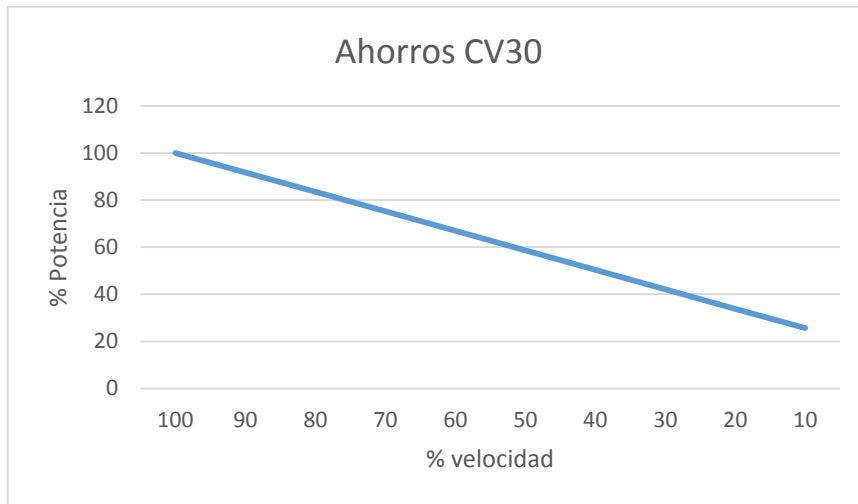


Ilustración 28 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV30

De acuerdo al estudio realizado un 90% de reducción reduce la potencia consumida un 8,3 [%] o 622.5 [W], en tanto la velocidad reducida al 80% reduce la potencia un 16,5% o 1,24 [kW]

En la tabla se muestran los resultados en energía, así como monetarios y de toneladas abatidas de CO2 equivalente para ambas reducciones en la velocidad de la correa con un VDF.

Tabla 21 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV30

Velocidad (%nominal)	[m/s]	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
0,9 (90%)		0,62	4.246	425	3,44
0,8 (80%)		1,24	8.493	849	6,89

El aumento de carga del material por la reducción de la velocidad de esta correa se muestra en la Ilustración 29.

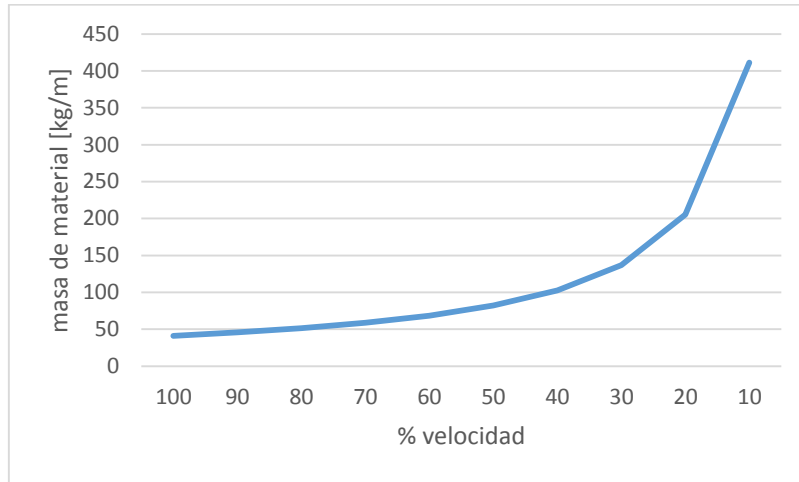


Ilustración 29 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV30

6.3.4 Correa 320CV26

La correa 26 tiene una potencia nominal de 71,9 [kW] y trabajó durante 2013 1.920 [horas/año]. En la Ilustración 30 se muestran los resultados en ahorros de potencia estimados para cada reducción de velocidad de la correa.

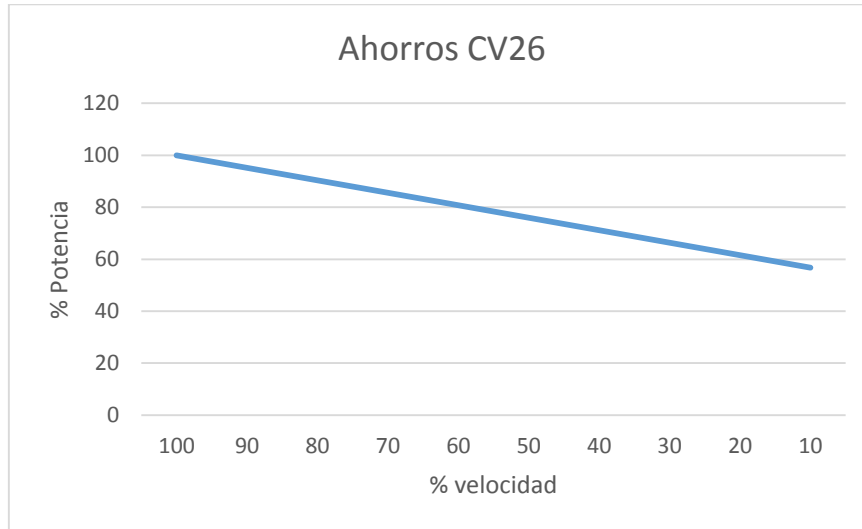


Ilustración 30 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV26

Para la correa 26 se tiene que una disminución del 10% de la velocidad de la correa implica un ahorro en potencia activa de 4,8% o 3,45 [kW]. Por otra parte, una disminución del 20% produce un ahorro de 9,6% de potencia o 6,9 [kW].

Tabla 22 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV26

Velocidad (%nominal)	[m/s]	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
1,8 (90%)		3,45	6.624	662	5,37
1,6 (80%)		6,9	13.248	1.325	10,74

El aumento en la carga de material se muestra en la Ilustración 31.

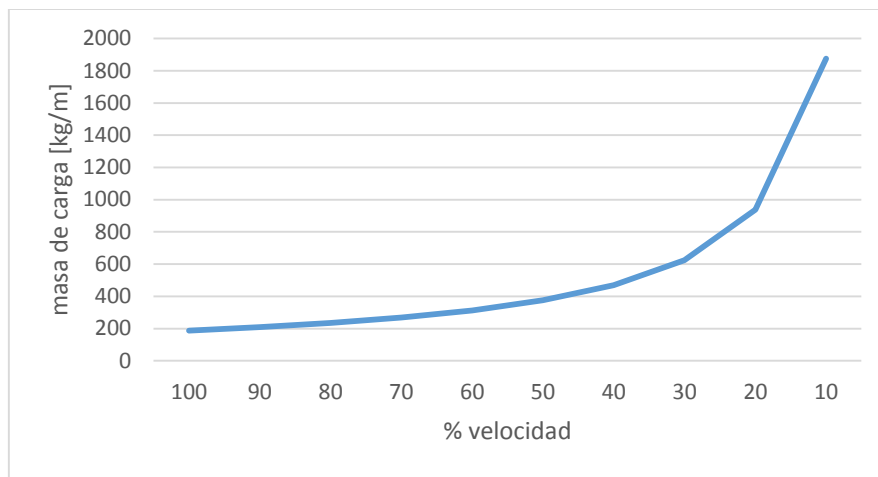


Ilustración 31 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV26

6.3.5 Correa 320CV27A

La correa 27A es aquella encargada de transportar el concentrado de cobre al barco para su exportación. La potencia nominal de esta correa es de 74,6 [kW] y fue usada 2.019 [horas/año] en 2013. En la Ilustración 32 se muestran los ahorros que se podrían lograr al disminuir la velocidad de la correa.

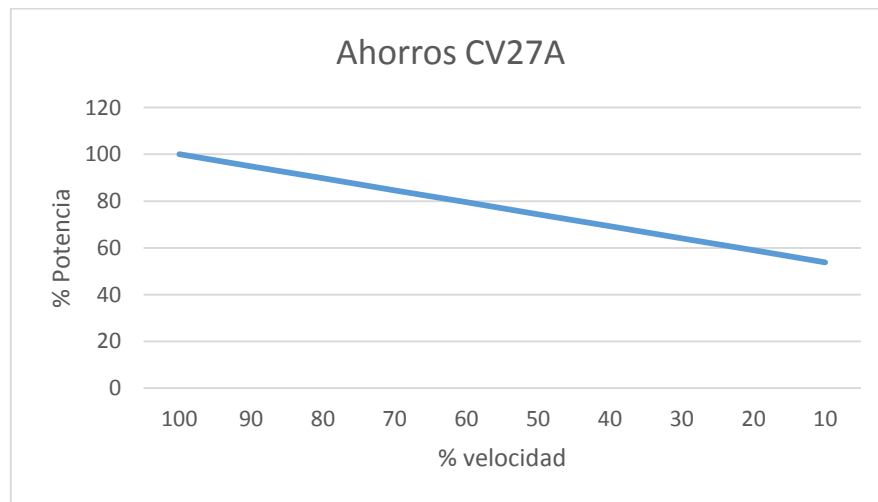


Ilustración 32 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV27A

Con una reducción del 10% en su velocidad se podría ahorrar 5,1% en potencia o equivalentemente 3,8 [kW], una reducción del 20% ahorra 10,3% o 7,7 [kW] en potencia activa.

Tabla 23 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV27A

Velocidad [m/s] (%nominal)	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
1,8 (90%)	3,8	7.672	767	6,22
1,6 (80%)	7,7	15.546	1.554	12,61

En la Ilustración 33 se muestra el aumento en la carga de la correa al disminuir la velocidad de la misma y mantener el flujo constante.

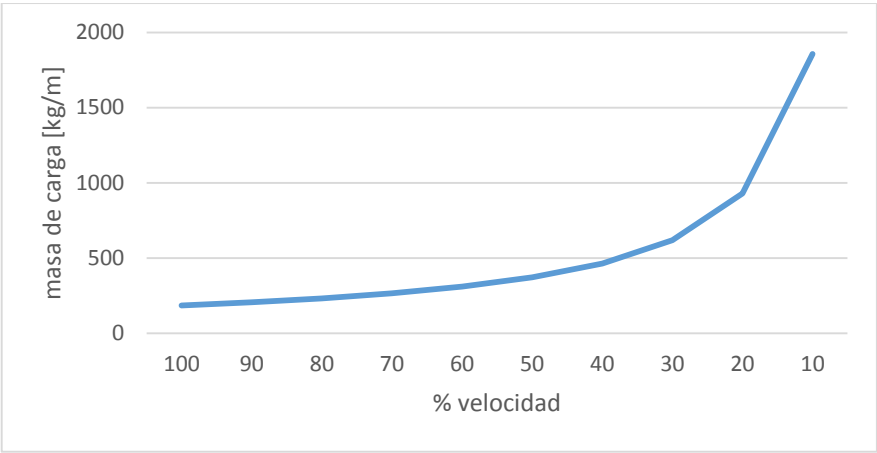


Ilustración 33 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV27A

6.3.6 Correa CV3302

La correa 3302 tiene una potencia nominal de 7,5 [kW] y 3.522 [horas/años] de uso en 2013. Los ahorros calculados de la reducción de velocidad por VDF se muestran en la Ilustración 34.

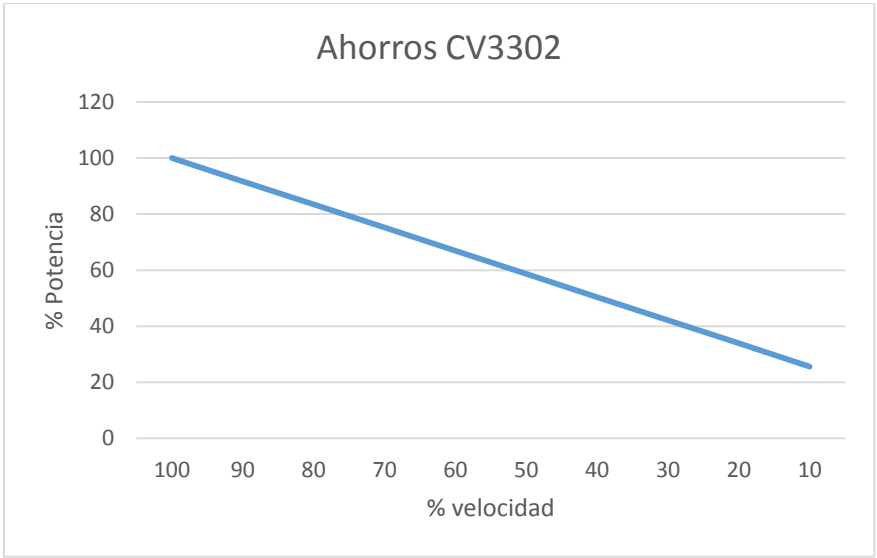


Ilustración 34 Ahorros estimados por reducción de velocidad de correa 320CV3302

En esta correa la reducción del 10% en su velocidad produce una reducción del 8,3% en tanto una reducción del 20% produce una reducción del 16,5%. Esto equivale a ahorros de 623 [W] y de 1.238 [W] respectivamente.

Tabla 24 Ahorros estimados al reducir velocidad de correa 320CV3302

Velocidad [%nominal]	Ahorro potencia [kW]	Energía [kWh/año]	Ahorros [USD/año]	Toneladas CO2eq abatidas
0,9 (90%)	0,62	2.184	218	1,77
0,8 (80%)	1,24	4.367	437	3,54

El cambio en la masa de la carga transportada se muestra en la Ilustración 35.

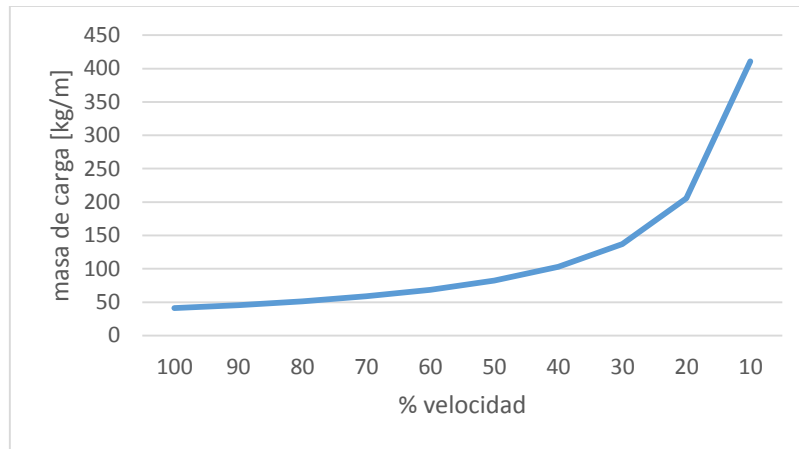


Ilustración 35 Aumento de masa de carga sobre la correa al disminuir la velocidad en Correa 320CV3302

6.4 Motores en general

6.4.1 Compensación individual de reactivos.

Como se discutió en la sección 4.3.2 la colocación en paralelo de condensadores cerca del motor puede disminuir indirectamente el consumo de potencia activa del motor a partir de la disminución de las pérdidas de transmisión al reducir la corriente por los conductores. Para cuantificar el ahorro que esta medida puede lograr se realizará un modelo simplificado del consumo de una carga inductiva.

Las pérdidas en un conductor se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{Loss} = 3 \cdot R \cdot I^2$$

Con:

R: resistencia del conductor desde alimentador hasta consumo

I: corriente que circula por cada conductor

A su vez, la corriente se puede calcular como:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot V}$$

Con:

S: Potencia aparente

V: Tensión

Con:

$$S = \frac{P}{fp}$$

P: Potencia activa

Fp: factor de potencia

Luego, las pérdidas se pueden escribir como:

$$P_{Loss} = \frac{P^2 \cdot R}{V^2 \cdot fp^2}$$

La resistencia del conductor se puede estimar conociendo algunos parámetros del mismo de la siguiente forma:

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$

ρ : Resistividad del material

L: largo del conductor desde alimentación a consumo

A: Sección transversal del conductor.

Como el ahorro de compensación de potencia reactiva proviene de la disminución de las pérdidas, y asumiendo que la potencia y la tensión son las nominales, el ahorro en potencia activa se puede escribir como

$$P_{Loss} = \frac{P^2 \cdot \rho \cdot L \cdot (1 - fp^2)}{V^2 \cdot fp^2 \cdot A}$$

Para estimar pérdidas se asumirá como longitud de cable la distancia entre la barra de la central Tarapacá a Puerto Patache de 150 [metros] y la sección de conductor se estimará individualmente de acuerdo a tablas que relacionan la sección con la corriente. Los ahorros eventuales por disminución de las pérdidas dependen de la potencia del motor, el largo entre el alimentador y el consumo, la sección transversal del cable y el factor de potencia. Además se asume que el conjunto entre del motor con el condensador tiene factor de potencia unitario.

6.4.1.1 *Compensación individual de reactivos en agitadores de celdas rougher.*

Este proyecto consiste en la instalación de condensadores en paralelo a 8 motores de agitadores de celdas rougher de 56 kW. Se eligieron estos agitadores debido a que en promedio se usan aproximadamente 7.000 [horas/año], estando entre el grupo de equipos con más uso de Puerto Patache

Para este grupo de equipos se asume que la sección transversal del conductor basándose en la corriente nominal de la máquina más un margen de seguridad es de 40 [mm²]. El factor de potencia inicial se estima en 0,75 basado en mediciones realizadas en terreno.

De acuerdo a la información que se tiene de estos motores el ahorro estimado es de aproximadamente 1 [kW] lo que equivale a un ahorro de 1,71%. Dado que este valor es estimado, dependiendo del valor de la sección del conductor en valores típicos para estos valores de corriente el rango de variación puede alcanzar ahorros de hasta 2 [kW] o de aproximadamente 3,6 % de la potencia instalada.

Los resultados del proyecto para estos valores se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 25 Resultados financieros de proyecto compensación individual reactiva en agitadores de celdas Rougher

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	35.840	USD
Ahorro	6.299	MWh/año
VAN	2.140,48	USD
TIR	9%	-
PRC	11	años
Toneladas abatidas	51,09	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-5,56	USD

Como se ve en la tabla el proyecto resulta tener VAN positivo, pero el ahorro es marginal y el período de recuperación de capital es bastante extenso.

6.4.1.2 *Compensación individual reactiva en equipos sobre 8000 horas/año*

Dado que los ahorros en potencia por compensación de reactivos tienen mayores beneficios en equipos de mayor uso es interesante analizar el proyecto discriminando a los equipos que más se usan en el puerto. Hay que recalcar que no se consideran equipos que cuenten con dispositivos de electrónica de potencia como un variador de frecuencia debido a los problemas que esto ocasiona en los condensadores por presencia de corrientes armónicas. Se estima el costo del condensador en 80 USD/kW

Los 4 equipos que cumplen las características fueron:

Tabla 26 Equipos sobre 8.000 horas/año sin variador de frecuencia

Equipo	TAG	Potencia [kW]	Horas Uso 2013
Espesador	310TM008	22,4	8.730
Espesador	312TM1501	22,4	8.614
Rastra	740TM1527	5,6	8.136
Secador	740DR1501	60,22	8.019

Los resultados financieros fueron:

Tabla 27 Resultados financieros proyecto de compensación individual reactiva en equipos sobre 8.000 horas/año

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	8.850	USD
Ahorro	18,34	MWh/año
VAN	2.209	USD
TIR	13%	-
PRC	9	años
Toneladas abatidas	14,86	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-19,7	USD

De acuerdo a lo mostrado en la tabla la compensación individual reactiva muestra que es rentable con un período de recuperación del capital de 9 años. Los ahorros estimados de este proyecto son 18,34 [MWh/año], abatiendo 14,86 [tonCO2eq/año].

6.4.1.3 Compensación individual reactiva en equipos sobre 7000 horas/año

Al igual que el caso anterior, esta vez se incluyen los equipos que sobrepasan las 7.000 horas de uso para el año 2013. A los equipos mostrados en el proyecto anterior se suman los de la tabla:

Tabla 28 Equipos en el rango 7.000-8.000 horas uso sin variador de frecuencia

Equipo	TAG	Potencia [kW]	Horas uso 2013
Est. Almacenamiento concentrado	312AG1504	29,8	7.981
Bba de piso área filtro de molibdeno	740PP1635	29,8	7.191
Bba. Alimentación piscina monitor	310PP171	18,7	7.124
Agitador Celda Rougher	710FT1502	56	7.034
Agitador Celda Rougher	710FT1501	56	7.034
Agitador Celda Rougher	710FT1504	56	7.032
Agitador Celda Rougher	710FT1505	56	7.032
Agitador Celda Rougher	710FT1506	56	7.032
Agitador Celda Rougher	710FT1507	56	7.029
Agitador Celda Rougher	710FT1508	56	7.028
Agitador Celda Rougher	710FT1503	56	7.028
Agitador Celda Rougher	710FT1509	56	7.027

Agitador celda flotacion 2° Limpieza	710FT1516	30	7.005
Agitador celda flotacion 1° Limpieza	710FT1511	30	7.001
Agitador celda flotacion 1° Limpieza	710FT1512	30	7.001
Agitador celda flotacion 1° Limpieza	710FT1513	30	7.001
Agitador celda flotacion 1° Limpieza	710FT1514	30	7.001

Como se ve en la tabla este proyecto es prácticamente la suma de los agitadores de las celdas Rougher más otros equipos con más horas uso.

Los resultados fueron:

Tabla 29 Resultado financiero proyecto de compensación reactiva en equipos sobre 7.000 horas/uso

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	67.434	USD
Ahorro	122	MWh/año
VAN	6.074	USD
TIR	10%	-
PRC	11	años
Toneladas abatidas	98,88	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-8,15	USD

Como se esperaba los ahorros aumentaron, sin embargo por la mayor inversión requerida y los menores tiempos de uso aumenta el periodo de recuperación de capital a 11 años y aumenta el costo de la tonelada abatida de CO2eq (o equivalentemente disminuyen los beneficios por tonelada).

6.4.2 Cambio por motores eficientes Premium

Como proyecto de cambio de motor por un motor eficiente Premium se estudiaron los equipos que más consumen energía en el puerto, los que corresponden a los compresores de aire.

Las eficiencias de los compresores se ven en la siguiente tabla:

Tabla 30 Datos nominales compresores de aire

TAG compresor	Potencia [HP]	Tensión	RPM	Eficiencia nominal
310-CP012A	400	3300	1490	95
310-CP013A	400	3300	1490	95
310-CP019A	400	3300	1490	95,4
310-CP018A	400	3300	1490	95,4
310-CP014A	300	3300	1490	95,4
310-CP020A	400	3300	1490	95,4

De acuerdo a la tabla la eficiencia de los motores ya instalados es bastante alta por lo que el cambio a un motor eficiente Premium es marginal. Un motor eficiente Premium de 400 HP puede alcanzar una eficiencia de 96%, en tanto uno de 300 HP de 95,8 %.

Los resultados del proyecto fueron los siguientes:

Tabla 31 Resultado financiero proyecto cambio de motor por motor eficiente premium en compresores de aire

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	445.091	USD
Ahorro	52,04	MWh/año
VAN	-401.393	USD
TIR	-13%	-
PRC	Mayor a vida útil	años
Toneladas abatidas	42,21	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	1.417	USD

Los resultados muestran que cambiar motores en los compresores de aire no resulta económicamente atractivo, puesto que los ya utilizados muestran altas eficiencias y la inversión es bastante alta comparada con otros proyectos ya mostrados en este estudio.

6.5 Iluminación

El estudio de rentabilidad de cambio de luminarias está basado en el realizado por el realizado por la consultora Marwen para toda la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi, basándose en un levantamiento de luminarias de la compañía y estimando los ahorros apoyándose en las potencias de las luminarias y el tiempo usado diario por cada una de ellas.

Para efectos de los alcances de este trabajo de memoria de título se analiza el inventario de luminarias del caso de estudio y se estiman los ahorros solo para Puerto Patache. En la sección 3.3 de este documento se expone que la potencia instalada en iluminación es de 331,2 [kW] que consumen 2.157.007 [kWh/año].

Si se compara el consumo en iluminación de Puerto Patache se observa que tanto la potencia en iluminación como la energía consumida es mayor que el mayor consumo individual, que corresponde a los compresores de aire, siendo la energía consumida en iluminación casi el doble que lo consume cada uno de los compresores. Como se expuso en la sección 4.2 los ahorros potenciales en luminarias pueden ser significativos comparados con los ahorros en los motores. Además, la mejora en eficiencia energética en luminarias no tiene impacto en la operación de la planta, y en caso que existiera impacto, esto sería positivo por las mejoras en productividad y en la seguridad en el trabajo.

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 32:

Tabla 32 Resultados financieros proyecto iluminación eficiente

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	341.304,04	USD
Ahorro	1.041,26	MWh/año
VAN	205.211,38	USD
TIR	10%	-
PRC	6	Años
Toneladas abatidas	844,46	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-36,22	USD

El detalle por luminaria y por proyecto, así como la cantidad de luminaria a sustituir y los ahorros separados se pueden encontrar en Anexos 10.3. A la inversión en luminarias se añade un sobrecosto del 5% debido a que esto solo contempla el costo del equipo y no de la instalación y mano de obra.

Como el proyecto de iluminación eficiente implica una inversión de 341.000 USD aproximadamente se realizará un segundo proyecto llamado iluminación eficiente prioritaria en la que se seleccionan los subproyectos que posean una más rápida recuperación de capital. Con esto se pretende entregar una lista de proyectos que suponen una menor inversión en el agregado pero un ahorro importante. Los detalles de este proyecto se encuentran en el Anexo 10.4.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 33 Resultados financieros proyecto iluminación eficiente prioritaria

Parámetro	Valor	Unidad
Inversión	173.720,36	USD
Ahorro	733,03	MWh/año
VAN	211.017,99	USD
TIR	23%	-
PRC	4	años
Toneladas abatidas	594,5	Ton CO2e/año
Costo tonelada abatida	-61,77	USD

A diferencia del proyecto que involucra toda la luminaria, este presenta una menor inversión y un menor ahorro. Sin embargo, el VAN, TIR y PRC mejoraron con respecto al proyecto original.

6.6 Resumen de proyectos de eficiencia energética

A continuación se resumen los proyectos de EE identificados en el caso de estudio:

Tabla 34 Resumen de proyectos de eficiencia energética identificados en Puerto Patache

Nombre	Inversión [USD]	Ahorro anual [MWh/año]	VAN [USD]	Toneladas CO₂eq abatidas anuales	Costo abatimiento [USD/ton CO₂eq]
VDF en bombas de filtrado	47.850	263,2	130.100	213	-90,84
VDF en bombas de forestación	76.364	325,4	98.334	264	-55,5
VDF en bombas de Osmosis Reversa de Planta Riles	68.633	733,3	325.722	627,14	-77,4
VDF en compresores de aire	390.080	1.132	184.425	914	-30,08
Compensación de reactivos en agitadores Rougher	35.840	63	2.140	51,09	-5,56
Compensación de reactivos en equipos sobre 8.000 horas uso	8.850	18,34	2.209	14,86	-19,7
Compensación de reactivos en equipos sobre 7.000 horas uso	67.434	122	6.074	98,88	-8,15
Iluminación eficiente	341.304	1.041	205.211	844,46	-36,22
Iluminación eficiente prioritaria	173.720	733,33	211.018	594,5	-61,77
Cambio de motores por motores Premium en compresores de aire	445.091	52,04	-401.393	42,21	1.417

En la Ilustración 36 se muestran las curvas de costo marginal de abatimiento, solo incluyendo proyectos rentables económicamente. Como se ve en la figura los mejores proyectos son los de cambio de iluminación y de control de velocidad en sistemas de bombeo en Puerto Patache. En tanto, los proyectos de compensación de reactivos, a pesar de ser rentables, son marginales con respecto a los mejores proyectos identificados. El cambio de motores en compresores de aire, así como también en el resto de motores, queda descartado puesto que la inversión es muy alta y la mejora en rendimiento es casi inexistente con respecto a los motores actuales.

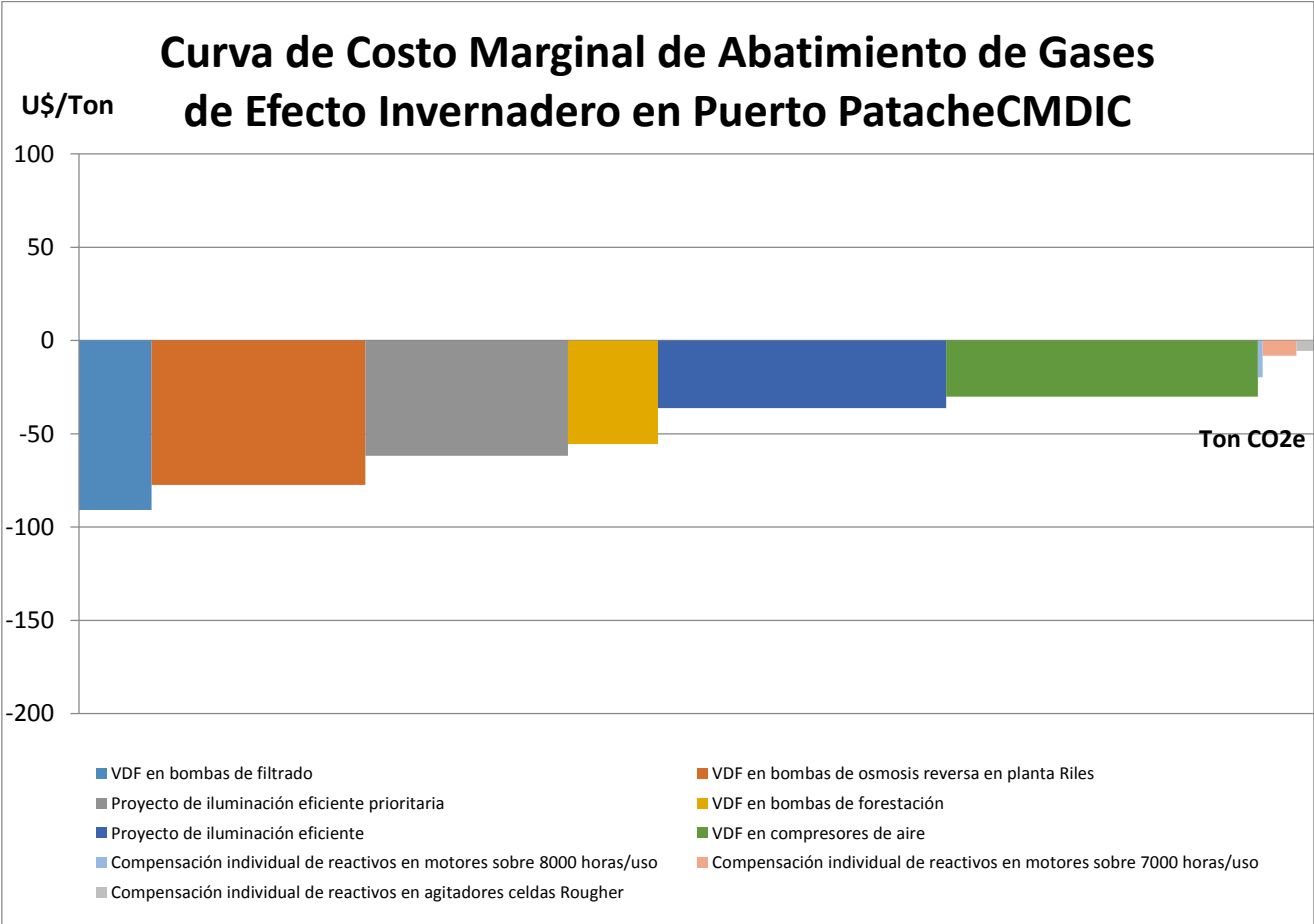


Ilustración 36 Curvas de costo marginal de abatimiento de proyectos identificados en Puerto Patache

7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Sistemas de bombeo

7.1.1 VDF en bombas de filtrados.

De acuerdo a los resultados expuestos en la sección anterior el proyecto de instalación de dos variadores de frecuencia en las bombas de filtrado del área de espesado supone una inversión de aproximadamente 48.850 [USD] teniendo un ahorro de 263 [MWh/año], asumiendo un precio de energía de 100 [USD/MWh] esto equivale a un ahorro monetario anual de 26.300 [USD/año] abatiendo 213 [ton CO₂eq/año]. A continuación se presenta un análisis de sensibilidad de los parámetros de entrada del análisis financiero para determinar su impacto en los resultados financieros.

7.1.1.1 Inversión

La inversión en ambos VDF asciende a 48.850 [USD] lo que incluye instalación y dispositivos. Dado que en las cotizaciones siempre es posible que el precio final fuera mayor o menor al esperado se calculará cuanto influye este parámetro en el VAN, TIR y PRC. El ahorro esperado y el precio de la energía no se ven afectados por estos parámetros. Los resultados fueron:

Tabla 35 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de filtrado

Inversión [USD]	28.710	38.280	47.850	57.420	66.990
VAN [USD]	149.240	139.670	130.100	120.530	110.960
TIR [%]	69	51	40	33	27
PRC [años]	2	3	3	4	5
Costo Ton abatida [USD]	-104,2	-97,52	-90,84	-84,16	-77,47

De acuerdo a la tabla se deduce que la inversión afecta poco los resultados financieros debido a los grandes ahorros esperados de este proyecto por lo que la inversión inicial se recupera a los tres o cuatro años en el peor de los casos. El resto de los parámetros no se ve afectado por la inversión

7.1.1.2 Ahorro

En esta aplicación el ahorro es estimado en un 35% pero dependiendo del uso de los equipos, ya sea su nivel de carga en el tiempo o el consumo actual en el cual se basa esta estimación pueden variar significativamente.

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 36.

Tabla 36 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de filtrado

Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	58.920	94.510	130.100	165.690	201.281
TIR [%]	22	31	40	49	58
PRC [años]	5	4	3	3	2
Costo Ton abatida [USD]	-68,56	-82,48	-90,84	-96,41	-100,38
Ahorro anual [MWh/año]	158	211	263,2	316	368
Toneladas abatidas	128	171	213	256	299

7.1.1.3 Precio de la energía

Las variaciones en el precio de la energía son las mismas que las variaciones en el nivel de ahorro bajo las mismas tasas de cambio de los parámetros. Por ejemplo, si el precio de la energía es de 80 USD equivale a un 80% del nivel usado en este trabajo y equivale a un 80% del nivel de ahorro estimado inicialmente si se mantienen los otros parámetros sin alteración.

Tabla 37 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de filtrado

Precio Energía [USD/MWh]	60	80	100	120	140
VAN [USD]	58.920	94.510	130.100	165.690	201.281
TIR [%]	22	31	40	49	58
PRC [años]	5	4	3	3	2
Costo Ton abatida [USD]	-41,14	-65,99	-90,84	-115,69	-140,54
Ahorro anual [MWh/año]	263,3	263,3	263,2	263,3	263,3
Toneladas abatidas	213	213	213	213	213

Lo que es importante notar es que los mejores resultados en proyectos de eficiencia energética ocurren cuando el precio de la energía es alto. Otro parámetros que cambia es el costo de la tonelada de CO₂eq abatida por el proyecto, ya que si la energía es más cara obtenemos mayores ahorros al abatir la misma tonelada de CO₂eq, el caso inverso ocurre cuando la energía es más barata ya que disminuye el beneficio de abatir la tonelada de CO₂eq.

7.1.1.4 Análisis

El proyecto de instalar el VDF en este grupo de bombas es un proyecto bastante atractivo si se dan las condiciones óptimas para su implementación. Sin embargo, en su peor escenario que corresponde a una alta inversión, bajos precios de la energía y bajo nivel de ahorro sigue siendo un proyecto rentable en el cual aumenta el periodo de recuperación del capital y se ve desfavorecido el abatimiento de toneladas de CO2 así como su beneficio asociado a esto.

Tabla 38 Escenarios de proyecto VDF en bombas de filtrado

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	66.990	57.420	47.850	38.280	28.710
Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	-2.928	56.468	130.100	217.699	320.072
TIR [%]	-	18	40	75	137
PRC [años]	Mayor a vida útil	6	3	2	1
Costo Ton abatida [USD]	3,41	-49,28	-90,84	-126,82	-159,63
Ahorro anual [MWh/año]	157,9	210,55	263,2	315,83	368
Toneladas abatidas	128	171	213	256	299

De acuerdo a la tabla sólo en el peor escenario se ven números negativos. Tanto el peor escenario como el mejor escenario aquí mostrado son muy poco probables que ocurran. Lo más probable es que los resultados estén en el rango entre el mal escenario y el buen escenario. Se deduce que es altamente probable que el periodo de recuperación real de este proyecto sea entre 2-6 años siendo de tres años para el escenario normal para este estudio.

A pesar que el proyecto de números favorables siempre existes más restricciones que las aquí planteadas como puede ser la factibilidad del proyecto, es decir que sea posible de realizar dadas las condiciones de la empresa o de la aplicación misma.

7.1.2 VDF en bombas de forestación.

El proyecto de instalar VDF en las tres bombas usadas para transportar agua a la zona de forestación de Puerto Patache para la regulación del flujo del líquido muestran un VAN de 98.334 [USD] con una inversión de 76.340 [USD] en los tres variadores de frecuencia. A diferencia del proyecto anterior este muestra un periodo de recuperación de capital de cuatro años (uno mayor que el del

proyecto VDF en bombas de filtrado) debido a la menor potencia de las bombas y por lo tanto, menor ahorros esperados. A continuación se muestra el análisis de sensibilidad realizado a los parámetros más relevantes.

7.1.2.1 Inversión

La variación de la inversión en un proyecto puede variar tanto en cómo se coticen los productos, así como a variaciones naturales en los precios de los mismos. Los resultados para distintos valores de inversión inicial de este proyecto se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de forestación

Inversión [USD]	45.818	61.091	76.363	91.636	106.909
VAN [USD]	128.880	113.607	98.334	83.061	67.789
TIR [%]	56	41	32	25	21
PRC [años]	2	3	4	5	6
Costo Ton abatida [USD]	-72,77	-64,15	-55,52	-46,9	-38,28

Para distintos niveles de inversión los números se mantienen positivos, variando el período de recuperación del capital de dos a seis años entre el mejor y el peor caso. Dado que el VAN era menor y la inversión mayor con respecto al proyecto anterior, se observa que los resultados financieros son más sensibles a la inversión debido a que esta proporcionalmente es mayor cuando se calcula el valor del proyecto actualizado.

7.1.2.2 Ahorro

Los resultados del análisis de sensibilidad frente al ahorro son:

Tabla 40 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de forestación

Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	28.455	63.395	98.334	133.274	168.213
TIR [%]	16	24	32	39	47
PRC [años]	7	5	4	3	3
Costo Ton abatida [USD]	-26,78	-44,74	-55,52	-62,71	-67,84
Ahorro anual [MWh/año]	195,26	260,35	325,44	390,53	456
Toneladas abatidas	158	211	264	317	370

El proyecto de VDF en bombas de forestación se muestra muy sensible al nivel de ahorro siendo este de 7 años para el peor escenario, en tanto al aumentar el nivel de ahorro estimado para este tipo de aplicación el periodo de recuperación del capital solo disminuye un año. De esto se concluye

que el proyecto se presenta muy sensible cuando el nivel de ahorro esta sobreestimado, ya que si el ahorro en la realidad resulta ser mucho menor que los esperados el periodo de recuperación de la inversión puede ser mayor a lo estimado o incluso dejar de ser un proyecto rentable.

7.1.2.3 Precio de la energía

Los resultados del análisis de sensibilidad sobre el precio de la energía son:

Tabla 41 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de forestación

Precio Energía	60	80	100	120	140
[USD/MWh]					
VAN [USD]	28.455	63.395	98.334	133.274	168.213
TIR [%]	16	24	32	39	47
PRC [años]	7	5	4	3	3
Costo Ton abatida [USD]	-16,07	-35,80	-55,52	-75,25	-94,98
Ahorro anual [MWh/año]	325	325	325	325	325
Toneladas abatidas	264	264	264	264	264

El análisis es el mismo que para el nivel de ahorro. Esta vez el ahorro en MWh no debe cambiar puesto que el ahorro se mantiene constante para este análisis.

7.1.2.4 Análisis

En la Tabla 42 se muestra el análisis de sensibilidad realizado para cinco escenarios posibles, entre el peor y el mejor escenario para un proyecto de eficiencia energética.

Tabla 42 Escenarios de proyecto VDF en bombas de forestación

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	106.909	91.636	76.363	61.091	45.818
Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	-44.018	20.170	98.334	190.474	296.589
TIR [%]	-	13	32	61	111
PRC [años]	Mayor a vida útil	8	4	2	1
Costo Ton abatida [USD]	41.42	-14,,24	-55,52	-89,63	-119,62

Ahorro anual [MWh/año]	195	260	325	391	456
Toneladas abatidas	158	211	264	317	370

De acuerdo a la tabla solo en el peor escenario se ven números negativos. Tanto el peor escenario como el mejor escenario aquí mostrado son muy poco probables que ocurran. Lo más probable es que los resultados estén en el rango entre el mal escenario y el buen escenario. Se deduce que es altamente probable que el periodo de recuperación real de este proyecto sea entre 2-6 años siendo de tres años para el escenario normal para este estudio.

A pesar que el proyecto tenga números favorables siempre existes más restricciones que las aquí planteadas como puede ser la factibilidad del proyecto, es decir que sea posible de realizar dadas las condiciones de la empresa o de la aplicación misma.

7.1.3 VDF en bombas de RILES

La inversión aproximada en el proyecto de instalación de VDF en las bombas de osmosis reversa de planta de Riles asciende a 68.633 [USD], mientras que el VAN esperado es de 325.722 [USD] con un retorno de la inversión en 2 [años]. A continuación se realiza un análisis de sensibilidad del análisis económico del proyecto para la inversión, el nivel de ahorro esperado y el precio de la energía

7.1.3.1 Inversión

La sensibilidad del resultado financiero del proyecto frente a la inversión se expone en la Tabla 43.

Tabla 43 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en bombas de RILES

Inversión [USD]	41.180	54.906	68.633	82.359	96.086
VAN [USD]	353.175	339.448	325.722	311.998	298.269
TIR [%]	143	107	85	71	61
PRC [años]	1	2	2	2	2
Costo Ton abatida [USD]	-89,93	-80,66	-77,40	-74,14	-70,88

La sensibilidad frente a la inversión en este proyecto es baja, puesto que al existir un ahorro estimado alto la inversión es una componente poco relevante al momento del cálculo del VAN. El periodo de recuperación de capital no muestra variación excepto cuando la inversión estimada es muy baja, recuperándose el capital solo en un año. Tanto el VAN como el costo de la tonelada abatida presentan pocos cambios. Se concluye que en proyectos donde el monto del VAN con respecto al de la inversión es muy grande el proyecto es poco sensible a las variaciones en el monto de la inversión.

7.1.3.2 Ahorro

La sensibilidad financiera del proyecto frente a los niveles de ahorro estimados se muestra en la Tabla 44

Tabla 44 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en bombas de RILES

Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	167.980	246.851	325.722	404.593	483.463
TIR [%]	51	68	85	103	120
PRC [años]	3	2	2	2	1
Costo Ton abatida [USD]	-66,53	-73,32	-77,40	-80,12	-82,06
Ahorro anual [MWh/año]	464	619	773	928	1.083
Toneladas abatidas	376	502	627	753	878

De la tabla se puede concluir que el proyecto, a pesar que el nivel de ahorro pueda estar sobreestimado, sigue mostrando buenos resultados financieros. Si la estimación del ahorro de un VDF en una bomba fuera de 21% en vez de 35% el periodo de capital sería de solo 3 [años]. Como el consumo de energía de este grupo es comparativamente muy grande con respecto a otros motores eléctricos en el Puerto los ahorros aunque fueran menores a los esperados siguen siendo positivos.

7.1.3.3 Precio de la energía

El análisis de sensibilidad de la inversión frente a los precios de la energía se muestra en la Tabla 45.

Tabla 45 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en bombas de RILES

Precio Energía [USD/MWh]	60	80	100	120	140
VAN [USD]	167.980	246.851	325.722	404.593	483.463
TIR [%]	51	68	85	103	120
PRC [años]	3	2	2	2	1
Costo Ton abatida [USD]	-39,92	-58,66	-77,40	-96,14	-114,89
Ahorro anual [MWh/año]	773	773	773	773	773
Toneladas abatidas	627	627	627	627	627

Al ser las variaciones porcentuales las mismas que las realizadas para las variaciones en el nivel de ahorro, los resultados financieros son los mismos. La diferencia radica en que los ahorros en [MWh/año] y con ello las toneladas abatidas no cambia, sólo difieren los flujos de capital.

7.1.3.4 Análisis de escenarios

Los resultados financieros para distintos escenarios del proyecto de eficiencia energética se muestran en la Tabla 46

Tabla 46 Escenarios de proyecto VDF en bombas de RILES

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	96.086	82.359	68.633	54.906	41.180
Nivel de ahorro [%]	21	28	35	42	49
VAN [USD]	45.882	170.027	325.721	512.964	731.754
TIR [%]	18	45	85	154	280
PRC [años]	6	3	2	1	1
Costo Ton abatida [USD]	-18,17	-50,51	-77,40	-101,58	-124,21
Ahorro anual [MWh/año]	464	619	773	928	1.083
Toneladas abatidas	376	502	627	753	878

Como se aprecia en el estudio realizado, el proyecto aun para el peor escenario en cuanto a inversión, nivel de ahorro esperado y precio de la energía sigue siendo un proyecto rentable. El periodo de recuperación de capital pasa de 2 a 6 [años] mientras que el VAN se reduce a un 14%.

7.2 Compresores de aire

El análisis de los compresores de aire se hará sólo al proyecto que deja afuera al compresor que no se usa. Este proyecto tiene una inversión de 345.845 [USD] con un VAN de 228.660 [USD], el periodo de recuperación de capital es de 6 [años]. Dado que en compresores de aire los ahorros esperados son menores que en otras aplicaciones como en bombas o en ventiladores, este proyecto no resulta tan atractivo como los mencionados anteriormente, sin embargo debido al gran consumo que estos tienen los ahorros absolutos como las toneladas de CO2 equivalente que son abatidas son de gran magnitud. A continuación se analizan los cambios que tienen la evaluación económica cuando sus parámetros varían con respecto a lo estimado inicialmente.

7.2.1.1 Inversión

En la Tabla 47 se exponen los resultados del análisis de sensibilidad del proyecto frente a la inversión.

Tabla 47 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto VDF en compresores de aire

Inversión [USD]	207.507	276.676	345.845	415.013	484.182
VAN [USD]	366.998	297.829	228.660	159.492	90.323
TIR [%]	40	28	21	16	12
PRC [años]	3	4	6	7	8
Costo Ton abatida [USD]	-59,86	-48,58	-37,30	-26,02	-14,73

A diferencia del análisis realizado en sistemas de bombeo, este proyecto se muestra más sensible al costo de la inversión. Como se discutió anteriormente el monto de la inversión, en este caso, no difiere mucho del VAN por lo que esta componente tiene mayor relevancia en su cálculo y, en conclusión, en los resultados financieros del mismo. El periodo de recuperación del capital puede variar en cinco años desde el peor al mejor caso, lo que hace de este proyecto un buen proyecto o uno no tan bueno dependiendo del costo de la inversión.

7.2.1.2 Ahorro

El análisis de sensibilidad realizado en el proyecto de VDF en compresores de aire se muestra en la Tabla 48.

Tabla 48 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto VDF en compresores de aire

Nivel de ahorro [%]	9	12	15	18	21
VAN [USD]	-1.142	113.759	228.660	343.561	458.462
TIR [%]	8	15	21	27	33
PRC [años]	Mayor a vida útil	7	6	5	4
Costo Ton abatida [USD]	0,31	-23,20	-37,30	-46,7	-53,42
Ahorro anual [MWh/año]	676	901	1.127	1.352	1.577
Toneladas abatidas	548	731	914	1.096	1.279

Este proyecto a pesar de no presentar ahorros porcentuales de la magnitud de los proyectos en sistemas de bombeos si muestra que es sensible a las variaciones en las estimaciones del ahorro, a pesar que estas varíen en solo 3% para cada escenario.

Debido al gran consumo de energía de estos motores una pequeña diferencia en ahorro significa grandes ahorros en [MWh/año]. Un 3% de diferencia en las estimaciones significa una diferencia de 220 [MWh/año] aproximadamente. Como comparación los 220 [MWh/años] que representa el

3% entre cada escenario son solo un poco menos que todos los ahorros esperados para el proyecto de instalación de variadores de frecuencia en las bombas de filtrado.

7.2.1.3 Precio de la energía

En la Tabla 49 se expone los resultados financieros se el precio de la energía real es distinta al utilizado en el caso base en escalas de 20 [USD/MWh]

Tabla 49 Análisis de sensibilidad frente al precio de la energía de proyecto VDF en compresores de aire

Precio Energía [USD/MWh]	60	80	100	120	140
VAN [USD]	-1.142	113.759	228.660	343.561	458.462
TIR [%]	8	15	21	27	33
PRC [años]	Mayor a vida útil	7	6	5	4
Costo Ton abatida [USD]	0,19	-18,56	-37,30	-56,04	-74,78
Ahorro anual [MWh/año]	1.127	1.127	1.127	1.127	1.127
Toneladas abatidas	914	914	914	914	914

El proyecto se muestra muy sensible al precio de la energía, teniendo resultados negativos cuando la energía es mucho más barata que en el caso base. El ahorro energético y las toneladas abatidas no debiesen cambiar puesto que el ahorro esperado se asume constante para este análisis.

7.2.1.4 Análisis

A continuación se muestran los resultados económicos para los cinco escenarios bajo estudio. Ver Tabla 50.

Tabla 50 Escenarios de proyecto VDF en compresores de aire

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	484.182	415.013	345.845	276.676	207.507
Nivel de ahorro [%]	9	12	15	18	21
VAN [USD]	-277.361	-47.330	228.660	550.612	918.523
TIR [%]	-7	5	21	43	81
PRC [años]	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil	6	3	2
Costo Ton abatida [USD]	75,40	9,65	-37,30	-74,85	-107,02

Ahorro anual [MWh/año]	676	901	1.127	1.352	1.577
Toneladas abatidas	548	731	914	1.096	1.279

Los resultados obtenidos demuestran que este proyecto es muy sensible a todos los parámetros económicos, y con ello puede significar un proyecto riesgoso del punto de vista económico. Si los valores estimados están bajo el caso base de estudio es muy probable que se tengan números negativos puesto que como se discutió anteriormente el proyecto es muy sensible a la inversión, al precio de la energía y al ahorro estimado. Por ejemplo, si el costo de los variadores resulta ser mayor y el nivel de ahorro es menor el proyecto deja de ser rentable.

En este caso, se recomienda realizar un estudio detallado del proyecto previo a su implementación de tal forma de eliminar el riesgo asociado y llevarlo a cabo solo si se asegura que tenga números positivos.

7.3 Correas transportadoras

El estudio que se realiza a las correas de Puerto Patache fue la aplicación de ecuaciones de consumo de potencia para distintos niveles de velocidad de desplazamiento de las correas accionadas por variadores de frecuencia. Dado que en Puerto Patache todas las correas cuentan con estos dispositivos se analizara el uso eficiente de la energía por parte de los mismos.

Debido a que estas correas son cortas y, además, en su mayoría van en subida o en un plano horizontal la aplicación de correas regenerativas no resulta una opción atractiva para ser estudiada. Dado que cuentan ya con variadores de frecuencia no se analiza la opción de compra de estos sistemas de control de velocidad.

Según lo presentado en la sección 4.1.2 la potencia de una correa transportadora no es una función lineal con respecto a la velocidad, a pesar que usualmente se suele decir que la velocidad de la correa si es lineal con respecto a la potencia. De la misma forma se dice que las bombas y ventiladores presentan una relación cuadrática entre ambas variables. En el caso de las correas la relación no es lineal debido al efecto que tiene el aumento de carga sobre las correas cuando se disminuye la velocidad y se desea mantener el flujo de material (se desea que el impacto de los proyectos de eficiencia energética no afecte negativamente la operación ni la producción del caso de estudio).

De acuerdo a la bibliografía la función que describe la potencia eléctrica es una ecuación de la recta donde sus parámetros dependen de la configuración física de la misma, así como los parámetros de diseño como el flujo del material transportado. Por otra parte, existe una relación inversa entre la velocidad y la masa por unidad de longitud que se transporta en la correa, implicando que una disminución en la velocidad de la correa aumenta la carga de la misma. Esto último se desea evitar lo más que se pueda puesto que un aumento en la carga de la correa puede tener consecuencias indeseadas en la operación y la seguridad. De los cálculos realizados se estima que bajo el 50% de la velocidad la masa por unidad de longitud comienza a aumentar exponencialmente.

Si las velocidades de todas las correas del Puerto Patache se reduce en un 10% se tendría como ahorro estimado, de acuerdo a las ecuaciones, de 59.991 [kWh/año] o 5.999 [USD/año] sin invertir en ningún equipo nuevo. El mismo ejercicio para una reducción de velocidad del 20% implica ahorros de 120.215 [kWh/año] o 12.022 [USD/año].

En conclusión el ahorro en correas transportadoras proviene del uso eficiente de la energía de las mismas, los cálculos muestran que solo con la reducción de un 10 o 20% de la velocidad se pueden lograr ahorros importantes sin necesidad de invertir en equipos adicionales. Todo esto manteniendo el flujo de material constante para no afectar la operación ni la producción, en tanto es deseable que la velocidad sea cercana a la nominal para no aumentar excesivamente la carga de material sobre las correas.

7.4 Motores en general

Se analizaran en detalles el proyecto de compensación reactiva en las celdas Rougher y en motores sobre 8.000 horas/año. El proyecto de compensación reactiva en equipos sobre 7.000 horas/año es muy similar al proyecto de celdas Rougher. El cambio de motores no se analizara por mostrar resultados evidentemente desfavorables como proyecto de eficiencia energética.

7.4.1 Compensación reactiva individual en celdas Rougher

El proyecto de compensación reactiva en ocho celdas Rougher consiste en la colocación en paralelo de condensadores en cada uno de los motores para compensar el consumo de reactivos y disminuir las pérdidas de potencia. Como fue calculado, el ahorro depende mayoritariamente de las perdidas actuales de la línea que se relaciona con el largo y la sección transversal de esta. En el caso de Puerto Patache las líneas de distribución al interior de las instalaciones son cortas (100-200 metros) por lo que los eventuales ahorros son insignificantes, estimándose en aproximadamente un 2% del consumo de potencia activa. Se hará a continuación un análisis de sensibilidad del proyecto bajo distintos valores de inversión, ahorro y precio de la energía.

7.4.1.1 Inversión

La inversión estimada en el grupo de condensadores alcanza unos 35.840 [USD]. El objetivo de realizar un análisis de sensibilidad bajo este parámetro es la posible variación de precios que se puede lograr en una cotización o los posibles descuentos en caso de la compra de más de un equipo.

Tabla 51 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto compensación individual celdas Rougher

Inversión [USD]	21.504	28.672	35.840	43.008	50.176
VAN [USD]	16.476	9.308	2.140	-5.027	-12.196
TIR [%]	21	14	9	6	3
PRC [años]	6	8	11	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil
Costo Ton abatida [USD]	-42,79	-24,18	-5,56	13,06	31,67

De la tabla se ve que con la inversión cotizada en este estudio, el proyecto resulta muy poco atractivo. Sin embargo, alcanzando precios menores cercanos a los 20.000 [USD] por el grupo de condensadores, incluyendo instalación y traslado, el proyecto puede resultar atractivo económicamente.

7.4.1.2 Nivel de ahorro

Debido a la dificultad que existe en determinar el nivel de ahorro exacto en este tipo de proyectos, el análisis bajo el nivel de ahorro puede indicar como esto influye en la evaluación económica. El caso base se realiza con el supuesto de un ahorro del 2%.

Tabla 52 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto compensación individual celdas Rougher

Nivel de ahorro [%]	0,5	1,5	2	2,5	3,5
VAN [USD]	-26.344	-7.354	2.140	11.635	30.625
TIR [%]	-	4	9	14	22
PRC [años]	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil	11	8	6
Costo Ton abatida [USD]	273,69	25,47	-5,56	-24,18	-45,45
Ahorro anual [MWh/año]	15,75	47,25	63	78,75	110,25
Toneladas abatidas	12,77	38,31	-5,56	-24,18	89,41

Del análisis de sensibilidad se puede apreciar que los resultados económicos son muy sensibles al nivel de ahorro lo que puede representar mayor riesgo. Si el ahorro del 2% fue subestimado el proyecto puede resultar muy atractivo puesto que con una baja inversión es posible lograr buenos ahorros. Pero si el ahorro en la realidad resulta ser menor, aunque sea 0,5 puntos porcentuales, el proyecto deja de ser rentable.

7.4.1.3 Escenarios

A continuación se muestran los resultados obtenidos para distintos escenarios posibles para un proyecto de eficiencia energética. El peor escenario consiste en un alto costo de inversión, más pobres ahorros reales y un bajo precio de la energía, el mejor, en tanto, consiste en lograr bajos costos de la inversión, alcanzar ahorros superiores y tener altos precios de la energía

Tabla 53 Escenarios de proyecto compensación individual reactiva en agitadores celdas Rougher

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	50.176	43.008	35.840	28.672	21.504
Nivel de ahorro [%]	0,5	1,5	2	2,5	3,5
VAN [USD]	-44.478	-20.219,71	2.140	28.298	71.548
TIR [%]	-	-	9	24	57
PRC [años]	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil	11	5	2
Costo Ton abatida [USD]	462,09	70,02	-5,56	-58,8	-106,19
Ahorro anual [MWh/año]	15,75	47,25	63	78,75	110,25
Toneladas abatidas	12,77	38,31	51,09	63,86	89,41

Como era de esperar por los análisis anteriores, el proyecto resulta ser muy sensible a todos los parámetros con los que se realiza la evaluación financiera. Si el proyecto logra un bajo costo de inversión (20.000 [USD] aprox.) y buenos niveles de ahorro reales (superior al 3%), entonces la rentabilidad es positiva recuperándose el capital en pocos años.

7.4.2 Compensación individual reactiva en motores sobre las 8.000 horas uso anual.

7.4.2.1 Inversión

La sensibilidad del proyecto frente a la inversión se muestra en la Tabla 54.

Tabla 54 Análisis de sensibilidad frente a la inversión de proyecto compensación individual en motores sobre 8000 horas/año

Inversión [USD]	5.310	7.080	8.849	10.620	12.389
VAN [USD]	5.748	3.979	2.209	439	-1.331
TIR [%]	26	18	13	9	6
PRC [años]	5	7	9	12	Mayor a vida útil
Costo Ton abatida [USD]	-51,28	-35,49	-19,70	-3,92	11,87

Se aprecia que el proyecto solo para una inversión muy alta a la estimada tiene rentabilidad negativa. El periodo de recuperación de capital vería entre los 7 y los 12 años para variaciones moderadas del costo de la inversión. En el precio más bajo el VAN es de 5.748 [USD].

7.4.2.2 Nivel de ahorro

La evaluación económica del proyecto para distintos niveles de ahorro se muestra en la Tabla 55.

Tabla 55 Análisis de sensibilidad frente al nivel de ahorro de proyecto compensación individual en motores sobre 8000 horas/año

Nivel de ahorro [%]	0,5	1,5	2	2,5	3,5
VAN [USD]	-6.084	-555,68	2.209	4.974	10.503
TIR [%]	-	7	13	18	27
PRC [años]	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil	9	7	5
Costo Ton abatida [USD]	217,11	6,61	-19,70	-35,49	-53,54
Ahorro anual [MWh/año]	4,59	13,76	18,34	22,93	32,10
Toneladas abatidas	3,72	11,16	14,88	18,60	26,03

El proyecto muestra ser muy sensible frente a los ahorros reales de los dispositivos a instalar. Si el ahorro real es menor al 2% el proyecto deja de ser rentable.

7.4.2.3 Análisis de escenarios

Bajo distintos escenarios, el proyecto de eficiencia energética muestra los resultados de la Tabla 56.

Tabla 56 Escenarios de proyecto compensación individual reactiva en motores sobre 8000 horas/uso

Escenario	Peor	Malo	Normal	Bueno	Mejor
Precio Energía	60	80	100	120	140
Inversión	12.389	10.620	8.849	7.080	5.310
Nivel de ahorro [%]	0,5	1,5	2	2,5	3,5
VAN [USD]	-10.731	-3.984	2.209	9.508	21.784
TIR [%]	-	0	13	30	68
PRC [años]	Mayor a vida útil	Mayor a vida útil	9	4	2
Costo Ton abatida [USD]	382,87	47,39	-19,70	-67,85	-111,04
Ahorro anual [MWh/año]	4,59	13,76	18,34	22,93	32,10
Toneladas abatidas	3,72	11,16	14,88	18,60	26,03

Como era de esperar el proyecto solo tiene resultados positivos en un escenario normal o mejor que el caso baso. Solo para escenarios buenos el periodo de recuperación de capital resulta positivo.

8 CONCLUSIONES

Del trabajo realizado en Puerto Patache se puede concluir que el consumo de energía está dominado por cierto tipo de aplicaciones de motores eléctricos que difieren con otras áreas de la compañía, por su naturaleza de ser el último punto de la cadena productiva de la empresa y puerto de exportación del mineral. También se destaca por ser el área donde se obtiene el Molibdeno como subproducto de la producción de Cobre. En Puerto Patache predominan las bombas de fluido, principalmente dedicadas al transporte de concentrado de Cobre, de Molibdeno y agua, compresores de aire, los cuales a pesar de ser un grupo pequeño en cuanto a cantidad representan gran parte del consumo total de Puerto Patache. También destacan, en menor medida, agitadores y correas transportadoras como consumo de fuerza motriz. Una particularidad de Puerto Patache es que como no existen grandes máquinas como pueden ser molinos SAG o chancadores el consumo está más distribuido dentro de la planta y el consumo de iluminación es relativamente importante.

Los **sistemas de bombeos** representan gran parte del consumo de motores eléctricos en Puerto Patache, por lo que existe una gran oportunidad de eficiencia energética en el puerto en estas aplicaciones. Está demostrado que la instalación de variadores de frecuencia puede lograr grandes ahorros de energía al controlar la velocidad de giro del motor y con ello regular el flujo del fluido por cada sistema de bombeo.

En este trabajo se analizaron tres aplicaciones de sistemas de bombeo (bombas de filtrado, bombas de forestación y osmosis reversa en plantas de Riles). Los cálculos realizados muestran que los tres son proyectos atractivos económicamente y como medida de mitigación de gases de efecto invernadero. Además, el análisis de sensibilidad muestran que aunque los ahorros hayan sido sobredimensionados o la inversión subestimada los proyectos siguen siendo rentables, pero con mayor tiempo de capital. Sin embargo, para realizar la inversión siempre debe asegurarse la factibilidad del proyecto, es decir, que la implementación no tenga consecuencias negativas con la operación y que sea posible el control de velocidad de las mismas. El variador de frecuencia por sí solo no asegura ahorros de energía, debe existir regulación de flujo o al menos, una disminución del flujo del fluido.

Como trabajo a futuro, se recomienda analizar el resto de las bombas de Puerto Patache y detectar aplicaciones donde exista alguna necesidad de regulación de flujo o donde exista algún tipo de regulación manual o de recirculación. Además, se recomienda que la bomba tenga sobre 3.000 horas/año de uso y supere los 30 [kW] como cota mínima para que un proyecto de esta naturaleza sea atractivo económicamente. [22]

Con respecto a los **compresores de aire**, estos individualmente representan los motores con más potencia instalada y de los equipos más consumidores. Al igual que las bombas, el variador de frecuencia es una aplicación viable en este tipo de máquinas sus ahorros potenciales son mucho menores puesto que estos equipos son de par constante que se traduce en una relación lineal entre la velocidad y la potencia, a diferencia de la relación cuadrática que existe en sistemas de bombeos. A pesar que los ahorros son menores sigue siendo un proyecto rentable.

En el caso de los compresores de aire se recomienda estudiar en profundidad la factibilidad de proyectos de regulación de flujo de aire, no solo como proyecto de eficiencia energética sino como

mejora operacional de la planta. Aunque este trabajo de memoria no tiene como alcance proyectos de tipo mecánico, es importante hacer mención al potencial aprovechamiento térmico del calor generado por producto de la compresión de fluido. Todo gas al ser comprimido aumenta su temperatura, lo inverso ocurre cuando es comprimido, por lo que este calor puede ser aprovechado en otra aplicación en Puerto Patache.

El trabajo realizado en las **correas transportadoras** fue más bien teórico, puesto que no fue posible generar ningún proyecto asociado a estas (si como proyecto se entiende como algo que requiere de inversión inicial). A pesar de esto se calculó teóricamente los eventuales ahorros que se lograrían solo reduciendo la velocidad de operación de las correas en un 10% y un 20%. Estos ahorros pueden ser significativos: por ejemplo al reducir la velocidad un 20% de todas las correas se pueden ahorrar cerca de 120 MWh/año o 12.000 [USD/año] sin necesidad de invertir en dispositivos costos (los VDF ya están instalados). Hay que recalcar que la reducción de velocidad de la correa trae consigo un aumento en el peso del material transportado sobre ella para mantener el flujo de material constante, por esta razón se recomienda no disminuir demasiado la velocidad con el fin de ahorrar energía.

Se puede concluir que los ahorros en correas transportadoras derivan de un uso racional de la energía, por ejemplo al trabajar a una velocidad ligeramente inferior a la nominal o poner énfasis en el uso que se les está dando cuando trabajan en vacío. Está demostrado que la correa trabajando en vacío puede consumir la mitad de la potencia nominal, por lo que una reducción de la velocidad o simplemente apagar el motor cuando no se use pueden significar ahorros importantes.

Este trabajo muestra que proyectos asociados al **cambio de motores eléctricos por motores eficientes** no son económicamente atractivos bajo ninguna circunstancia. Los motores en Puerto Patache están muy cerca de la eficiencia de los motores más eficientes del mercado por lo que invertir en el cambio de un motor ya operando es muy costoso, puede complicar la operación de la planta y no se justifica para el ahorro marginal que se lograría. El estudio de cambio de motores debe ser realizado al momento en que estos lleguen al fin de su vida útil comparando distintas alternativas y ponderando la eficiencia de cada una para la mejor elección basándose en ahorros futuros y mitigación de gases de efecto invernadero.

Con respecto a la **compensación individual reactiva** queda demostrado que en Puerto Patache los ahorros son mínimos debido principalmente a las cortas distancias existentes entre alimentadores y consumos, se estima que las pérdidas actuales de potencia por distribución son bajas por lo que cualquier medida que tenga como fin reducirlas conducirá a ahorros marginales. Los análisis de sensibilidad muestran que si se logra demostrar que los ahorros son superiores al 4% de potencia activa este proyecto resulta más atractivo. Además, a diferencia de otros proyectos aquí mostrados, la inversión de estos equipos es baja por lo que a pesar de ser marginales los ahorros también lo es el esfuerzo económico. Por otra parte los beneficios indirectos como pago de multas por factor de potencia o alivianar la carga de líneas saturadas justifican la inversión en estos equipos, pero por el bajo nivel de ahorro esperado es difícil catalogarlo como eficiencia energética.

Se recomienda evaluar la compensación individual reactiva en áreas donde la red de distribución se extensa, por ejemplo en faena cordillera donde las distancias entre los consumos y los puntos de alimentación son de la magnitud de kilómetros. Las pérdidas en casos como estos pueden ser

significativa por lo que medidas que tengan como objetivo reducir las pérdidas en transmisión son pertinentes como proyecto de eficiencia energética.

La **iluminación** en el Puerto es equiparable al consumo de algunos motores de mayor potencia presente en esta área y que sería usado gran parte del año. El análisis realizado en este trabajo muestra que el cambio de luminarias por luminarias eficientes alcanza grandes niveles de ahorro, interviniendo mínimamente en la operación normal de la planta. Si la inversión resulta costosa de implementar de una sola vez en todo Puerto Patache se recomienda comenzar por el proyecto aquí llamado iluminación eficiente prioritaria donde se privilegia el cambio de luminarias que más rápido recuperan la inversión inicial. Como el consumo por fuerza motriz en Puerto Patache es mucho menor que el del resto de las áreas productivas de Collahuasi, el consumo en iluminación es relativamente importante, se estima que las luminarias consumen 2 GWh/año lo que supera el consumo de 700.000 kWh/año en correas transportadoras, por lo que mejorar la eficiencia de las luminarias es prioritario si se quiere reducir el consumo del puerto.

Como conclusión final de este trabajo, queda en evidencia que existen oportunidades de eficiencia energética en Puerto Patache que se alinean con el objetivo de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de la compañía. Como resumen se pueden sacar las siguientes conclusiones:

- Las bombas de fluidos corresponden al mayor consumo del puerto y a sus proyectos asociados son los que tienen mayores ahorros de energía, por lo tanto se recomienda profundizar en la operación de las bombas y detectar la factibilidad de instalar variadores de frecuencia cuando corresponda.
- En segundo lugar es prioritario el cambio de luminarias ineficientes por luminarias eficientes, preocupándose siempre de no interferir en la seguridad y salud ocupacional de los trabajadores, así como también en la vida útil y robustez frente a las condiciones de trabajo a la que se exponen.
- Como motores individuales, los compresores de aire se encuentran entre las máquinas más importantes en cuanto a consumo de energía se refiere, la implementación de variadores de frecuencia y el aprovechamiento del calor del proceso de compresión ofrecen grandes oportunidades de ahorro de energía.
- Medidas como el cambio de motores por motores eficientes y de compensación individual reactiva presentan pocas oportunidades de ahorro real. Esto se debe a que la eficiencia de los motores actualmente operando es cercana a la de los motores más eficientes en el mercado, y, por otro lado, la corta longitud de las líneas de distribución no justifica medidas que apunten a reducir las pérdidas en las mismas. El único nicho que la compensación reactiva individual encuentra en Puerto Patache es en motores que se usan muchas horas al año (7.000 horas como cota mínima) o en líneas saturadas que requieran alivianar su carga. La compensación reactiva la mayoría de los casos se justifica solo cuando existen multas por mal de factor de potencia.
- En correas transportadoras no se pudo identificar un proyecto concreto, pero queda demostrado que en estas aplicaciones los ahorros apuntan a un uso eficiente de la energía, ya sea reduciendo la velocidad ligeramente bajo la nominal o poner énfasis en el uso que se les da a las correas cuando trabajan en vacío.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM, Reporte Gestión Cambio Climático, 2013.
- [2] S. Almendra, 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, Santiago de Chile, 2014.
- [3] IPCC, Climate Change: The scientific Basis, 2001.
- [4] Ministerio de Energía, «Inventario de GEI,» [En línea]. Available: <http://huelladecarbono.minenergia.cl/emision-para-el-sing>. [Último acceso: Julio 2014].
- [5] Manicore, «The Kaya Equation,» [En línea]. Available: http://www.manicore.com/anglais/documentation_a/greenhouse/kaya_equation.html. [Último acceso: Julio 2014].
- [6] Collahuasi, «Descripción de la empresa,» [En línea]. Available: http://www.collahuasi.cl/espanol2/compania/descripcion_empresa.asp. [Último acceso: Julio 2014].
- [7] Collahuasi, «Eficiencia Energética y Cambio Climático,» [En línea]. [Último acceso: Julio 2014].
- [8] Collahuasi, «Reporte de Sistema de Gestión de Energía,» 2013.
- [9] Marwen, «Estudio de iluminación eficiente de Collahuasi,» 2014.
- [10] Centro de ahorro y eficiencia energética de Madrid, «Instalaciones industriales. Guía de Ahorro de Energía,» 2006.
- [11] R. Saidur, S. Makhilef, A. Safari y H. Mohammed, «Applications of Variable Speed Drives (VSD) in electrical motors energy savings,» *Renewable and Sustainable Energy Review* , nº 16, 2012.
- [12] Universidad Autónoma de Occidente, «Eficiencia energética en motores eléctricos».
- [13] ABB Buildinf Material Industries, «Integrated Variable Speed Drives- The Energy Savers».
- [14] G. Lodewijks, D. Schott y Y. Pang, «Energy Saving at Belt Conveyors by Speed Control».
- [15] J. Rodriguez, J. Pontt, N. Becker y A. Weinstein, «Regenerative Drives in the Megawatt Range for High Performance Downhill Belt Conveyor,» 2000.

- [16] AChEE, «Guía para la calificación de consultores de eficiencia energética,» Santiago de Chile.
- [17] Madrid ahorra con energía, «Guía de ahorro energético de instalaciones industriales».
- [18] A. Muñoz, «Métodos para orientar la adquisición de motores eléctricos en la industria y la minería.».
- [19] M. Saidel, M. Ramos y S. Alves, «Assessment and Optimization of Induction Electric Motors Aiming Energy Efficiency in Industrial Applications,» *International Conference and Electrical Machines*, n° XIX, 2010.
- [20] Prien, «Caracterización del parque actual de motores».
- [21] J. Pontt, J. Yianatos, L. Bergh, W. Valderrama, F. Rojas, M. Olivares, H. Robles y M. Lopez, «Impact of Process and Energy Efficiency in Mineral Processing of Abatement of Carbon Emissions,» 2010.
- [22] Schneider Electric, «Soluciones de eficiencia energética con variación de velocidad».
- [23] Oficina catalana del Canvi Climatic, «Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI),» 2011.

10 ANEXOS

10.1 Inventario de motores de Puerto Patache

Nombre equipo	TAG	Ubicación	Potencia Nominal kW
Est. Almacenamiento concentrado	312-AG-1504	Planta Moly	29.8
Bba transferencia	312-PP-1504	Planta Moly	44.8
Bba transferencia	312-PP-1505	Planta Moly	44.8
Agitador TK 1515 acondicionador celda rougher	710-AG-1512	Planta Moly	3.7
Agitador Celda Rougher	710-FT-1501	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1502	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1503	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1504	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1505	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1506	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1507	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1508	Planta Moly	56
Agitador Celda Rougher	710-FT-1509	Planta Moly	56
Agitador celda flotación 1° Limpieza	710-FT-1511	Planta Moly	30
Agitador celda flotación 1° Limpieza	710-FT-1512	Planta Moly	30
Agitador celda flotación 1° Limpieza	710-FT-1513	Planta Moly	30
Agitador celda flotación 1° Limpieza	710-FT-1514	Planta Moly	30
Agitador celda flotación 2° Limpieza	710-FT-1515	Planta Moly	30
Agitador celda flotación 2° Limpieza	710-FT-1516	Planta Moly	30
Bba relaves planta Moly	710-PP-1535	Planta Moly	93.3
Bba relaves planta Moly	710-PP-1536	Planta Moly	93.3
Bba alimentación 1° Limpieza	710-PP-1508	Planta Moly	29.8
Bba	710-PP-1509	Planta Moly	29.8
Bba alimentación 1° Limpieza	710-PP-1512	Planta Moly	15
Bba alimentación 1° Limpieza	710-PP-1513	Planta Moly	15
Bba alimentación 4° limpieza	710-PP-1521	Planta Moly	3.7
Bba alimentación 4° limpieza	710-PP-1522	Planta Moly	3.7
Bba de alimentación 3° Limpieza	710-PP-1519	Planta Moly	7.5
Bba de alimentación 3° Limpieza	710-PP-1518	Planta Moly	7.5
Bba alimentación batería ciclones 1	710-PP-1523	Planta Moly	15
Bba alimentación batería ciclones 2	710-PP-1524	Planta Moly	15
Bba alimentación agua proceso	700-PP-1625	Planta Moly	93.3
Bba alimentación agua proceso	700-PP-1626	Planta Moly	93.3
Bba alimentación agua proceso	700-PP-1824	Planta Moly	93.3
Secador	740-DR-1501	Planta Moly	60.23

Filtro de discos	740-FL-1501	Planta Moly	2.25
Est. Almacenador Moly Final	740-AG-1529	Planta Moly	11.2
Rastra	740-TM-1527	Planta Moly	5.6
Bba alimentadora Filtro	740-PP-1529	Planta Moly	5.6
Bba alimentadora Filtro	740-PP-1530	Planta Moly	5.6
Bba O´Flow	740-PP-1527	Planta Moly	3.7
Bba O´Flow	740-PP-1528	Planta Moly	3.7
Bba distribución agua filtrada	700-PP-1631	Planta Moly	37.3
Bba distribución agua filtrada	700-PP-1632	Planta Moly	37.3
Bba alimentación agua proceso	700-PP-1627	Planta Moly	93.3
Bba alimentación agua proceso	700-PP-1628	Planta Moly	93.3
Agitador TK Alimentador 3º Limpieza	710-AG-1518	Planta Moly	7.5
Agitador TK Alimentador 4º Limpieza	710-AG-1521	Planta Moly	3.7
Bba recirculación efluentes	740-DC-1596-01	Planta Moly	0.75
Ventilador lavador de gases	740-DC-1596-02	Planta Moly	15
Bba llenado y drenaje de aceite	740-DR-1501-03	Planta Moly	1.5
Bba circulación de aceite	740-DR-1501-04	Planta Moly	22.4
Bba circulación de aceite	740-DR-1501-05	Planta Moly	22.4
Soplador Combustión de aire	740-DR-1501-10	Planta Moly	3.7
Válvula rotatoria	740-DR-1501-12	Planta Moly	1.12
Bba de vacío	740-FL-1501-02	Planta Moly	111.9
Bba de vacío	740-FL-1501-03	Planta Moly	111.9
Bba de filtrado	740-FL-1501-04	Planta Moly	3.7
Bba de filtrado	740-FL-1501-05	Planta Moly	3.7
Bba de filtrado	740-FL-1501-09	Planta Moly	3.7
Bba de piso área espesador moly final	740-PP-1614	Planta Moly	29.8
Bba de piso área filtro de molibdeno	740-PP-1635	Planta Moly	29.8
Bba transferencia diésel	720-PP-1569	Planta Moly	2.2
Bba transferencia diésel	720-PP-1570	Planta Moly	2.2
Bba alimentación de P-4000	720-PP-1601	Planta Moly	2.2
Bba alimentación de P-4000	720-PP-1602	Planta Moly	2.2
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1701	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1703	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1704	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1705	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1706	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1707	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1708	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1709	Planta Moly	1.5

Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1711	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de hidrosulfuro sodio	720-PP-1712	Planta Moly	1.5
Bba dosificadora de diésel molibdeno	720-PP-1713	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de diésel molibdeno	720-PP-1714	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de diéselmolibdeno	720-PP-1715	Planta Moly	0.37
Bba dosificadora de diésel molibdeno	720-PP-1716	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de ácido sulfúrico	720-PP-1727	Planta Moly	3
Bba dosificadora de ácido sulfúrico	720-PP-1728	Planta Moly	3
Bba dosificadora de ácido sulfúrico	720-PP-1729	Planta Moly	3
Bba dosificadora de ácido sulfúrico	720-PP-1730	Planta Moly	3
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1733	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1734	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1735	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1736	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1737	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1738	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1739	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1740	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1741	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1743	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1745	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1746	Planta Moly	2.24
Bba dosificadora de P-4000	720-PP-1747	Planta Moly	2.24
Bba alimentación batería ciclonesbatería cilones 1	710-PP-1514	Planta Moly	15
Bba alimentación batería ciclonesbatería cilones 1	710-PP-1515	Planta Moly	15
Bba de piso área 1° Limpieza	710-PP-1611	Planta Moly	29.8
Bba de piso limpieza final	710-PP-1617	Planta Moly	29.8
Bba muestreo relaves rougher	710-PP-1619	Planta Moly	5.6
Bba muestreo relaves rougher	710-PP-1621	Planta Moly	5.6
Bba muestreo retorno final	710-PP-1622	Planta Moly	5.6
Bba descarga NaHS	720-PP-1565	Planta Moly	3.7
Bba alimentación NaHS	720-PP-1566	Planta Moly	7.5
Bba alimentación NaHS	720-PP-1567	Planta Moly	7.5
Bba descarga diésel	720-PP-1568	Planta Moly	7.5
Bba derrames reactivos	720-PP-1624	Planta Moly	6.3
Espesador	310-TM-008	Acumulación Acumulacion	22.4
Espesador	312-TM-1501	Acumulación Acumulacion	22.4
Bba U´Flow flujo interior espesado	310-PP-151	Espesado	29.8
Bba U´Flow flujo interior espesado	310-PP-152	Espesado	29.8
Bba U´Flow	312-PP-1501	Espesado	29.8
Bba U´Flow	312-PP-1502	Espesado	29.8

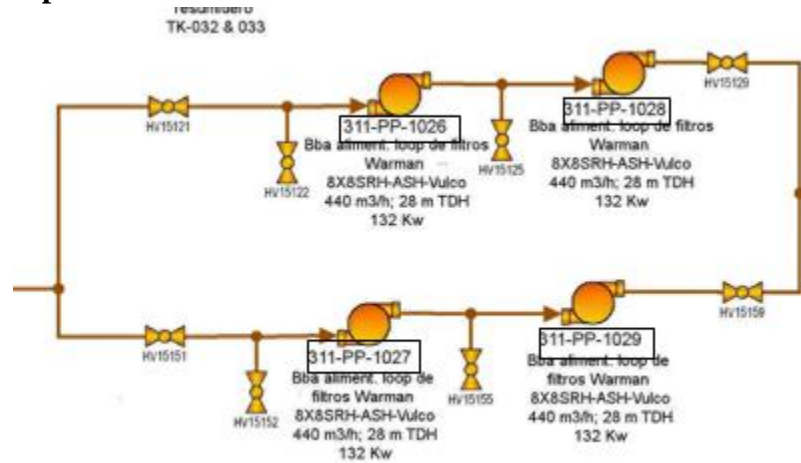
Agitador TK 032	310-AG-011	Espesado	75
Agitador TK 033	310-AG-012	Espesado	75
Bba sumidero espesador	310-PP-153	Espesado	29.8
Bba sumidero áreaarea estanque	310-PP-167	Espesado	22.4
Bba alimentadora loop filtros	311-PP-1026	Espesado	111.9
Bba alimentadora loop filtros	311-PP-1028	Espesado	111.9
Bba alimentadora loop filtros	311-PP-1027	Espesado	111.9
Bba alimentadora loop filtros	311-PP-1029	Espesado	111.9
Filtro prensa vertical	310-FL-001	Planta Filtrado	37
Filtro prensa vertical	310-FL-002	Planta Filtrado	37
Filtro prensa vertical	310-FL-003	Planta Filtrado	37
Filtro prensa vertical	310-FL-004	Planta Filtrado	37
Filtro prensa vertical	310-FL-005	Planta Filtrado	37
Bba agua de lavado	310-PP-162	Planta Filtrado	37.3
Bba agua de lavado	310-PP-161	Planta Filtrado	37.3
Bba piso sumidero	311-PP-1032	Planta Filtrado	14.9
Bba transferencia agua filtrada	311-PP-3303	Planta Filtrado	29.8
Bba transferencia agua filtrada	311-PP-3304	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 29.8
bba agua potable	350-PP-179	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 14.9
bba agua potable	350-PP-180	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 14.9
bba agua potable	350-PP-200	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 2.2
bba sist. Contra incendios	360-PP-203	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 1.5
Bba sumidero planta filtro	311-PP-1180	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 56
Bba alimentación lavado de telas	311-PP-1181	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 37.3
Bba alimentación lavado de telas	311-PP-1182	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 37.7
Bba sumidero planta de filtro	310-PP-164	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 14.9
Bba. Alimentación piscina monitor	310-PP-171	ÁreaArea Filtrado	Húmeda 18.7
Correa descarga filtro	311-CV-1049	Correas filtrado	5.6
Correa descarga filtro	311-CV-1048	Correas filtrado	5.6
Correa descarga filtro	310-CV-022	Correas filtrado	5.6
Correa descarga filtro	310-CV-023	Correas filtrado	5.6
Correa descarga filtro	310-CV-024	Correas filtrado	5.6
Correa alimentación Stock PileStockPile	320-CV-025	Correas filtrado	111.9
Correa alimentadora Stock PileStockPile 1	320-CV-030	Correa embarque	7.5
Correa alimentadora Stock PileStockPile 2	320-CV-3302	Correa embarque	11.1
Correa recuperadora de concentrado	320-CV-026	Correa embarque	97
Correa alimentación ShipLoader	320-CV-027	Correa embarque	93.21
ShipLoader	330-CV-027A	Correa embarque	74.5
Recuperadora concentrado	320-BM 001	Embarque	150

Auxiliar	320-BM 002	Embarque	74.5
Bba sumidero lavado de camiones	322-PP-3302	Embarque	11.1
Bbas Weir Agua Forestación	350-PP-183	Serv. Agua	93.3
Bbas Weir Agua Forestación	350-PP-184	Serv. Agua	93.3
Bbas Weir Agua Forestación	350-PP-185	Serv. Agua	93.3
Bba Galhiger de pozo	310-PP-159	Serv. Agua	29.8
Bba Galhiger de pozo	310-PP-160	Serv. Agua	29.8
Bba sistema contra incendio	360-PP-201	Serv. Agua	110
Bba sistema contra incendio	360-PP-202	Serv. Agua	111.9
Bba agua sello	311-PP-1030	Serv. Agua	1.5
Bba agua sello	311-PP-1031	Serv. Agua	1.5
Bba agua sello	311-PP-1033	Serv. Agua	1.5
Bba agua lavado de telas	310-PP-165	Serv. Agua	30.6
Bba agua lavado de telas	310-PP-166	Serv. Agua	22.4
Bba agua sello	350-PP-181	Serv. Agua	5.5
Bba agua sello	350-PP-182	Serv. Agua	5.5
Bba de agua lavado de pisos	350-PP-175	Serv. Agua	18.7
Bba de agua lavado de pisos	350-PP-176	Serv. Agua	18.7
Bba de agua rompe burbujas espesador	310-PP-173	Serv. Agua	5.5
Bba de agua rompe burbujas espesador	310-PP-174	Serv. Agua	5.6
Compresor Atlas Copco	310-CP-014	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-015	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-018	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-019	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-020	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-012	Serv. Aire	300
Compresor Atlas Copco	310-CP-013	Serv. Aire	300
Ventilador centrífugo	320-FA-039	Serv. Aire	150
Ventilador centrífugo	320-FA-201	Serv. Aire	134.3
Ventilador centrífugo	320-FA-036	Serv. Aire	7.5
Ventilador centrífugo	320-FA-037	Serv. Aire	7.5
Tornillo colector de polvo	320-CV-035	Serv. Aire	7.5
Tornillo colector de polvo	320-CV-036	Serv. Aire	7.5
Tornillo colector de polvo	320-CV-037	Serv. Aire	7.5
Secador	310-UA-6807	Serv. Aire	
Agitador TK 3301	352-AG-3301	Planta Riles	4
Agitador TK 3302 A/B	352-AG-3302A	Planta Riles	0.75
Agitador TK 3304	352-AG-3302B	Planta Riles	0.75
Bba alimentador DAF	352-PP-3301A	Planta Riles	15
Bba alimentador DAF	352-PP-3301B	Planta Riles	15
Bba descarga de lodos TK 3303	352-PP-3302	Planta Riles	1.5

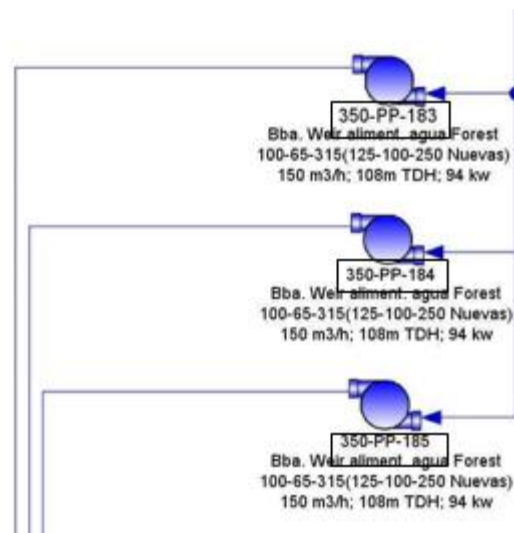
Bba recirculación celda de aire	352-PP-3304	Planta Riles	22
Bba recirculación de aire	352-PP-3305	Planta Riles	22
Bba descarga de lodos TK 3305	352-PP-3303	Planta Riles	1.5
Bba alimentación de filtros	352-PP-3306	Planta Riles	45
Bba circulación para filtro (floculante)	352-PP-3307	Planta Riles	2.2
Bba retrolavado filtro de arena y carbón	352-PP-3308	Planta Riles	11
Bba alimentación FLUSH UF	352-PP-3309	Planta Riles	37
Bba alimentación CIP UF	352-PP-3310	Planta Riles	11
Bba de pozo	352-PP-3311	Planta Riles	6.3
Bba alimentador RO-1	352-PP-3312	Planta Riles	160
Bba alta presión	352-PP-3313	Planta Riles	160
Tren Bba etapa alimentación RO 1-2	352-PP-3314A	Planta Riles	26
Tren Bba etapa alimentación RO 1-2	352-PP-3314B	Planta Riles	26
Tren Bba etapa alimentación RO 1-2	352-PP-3314C	Planta Riles	26
Bba de descarga de lodos TK3315	352-PP-3315	Planta Riles	1.5
Bba alimentación RO-2	352-PP-3316	Planta Riles	11
Bba alta presión RO-2	352-PP-3317A	Planta Riles	110
Bba alta presión RO-2	352-PP-3317B	Planta Riles	110
Bba alimentación de filtros	352-PP-3318	Planta Riles	45
Bba dosificadora para regulación PH (coagulante)	352-PP-3319	Planta Riles	0.37
Bba dosificadora para regulación PH (floculante)	352-PP-3320	Planta Riles	0.37
Bba dosificadora	352-PP-3321	Planta Riles	0.09
Bba dosificadora	352-PP-3322	Planta Riles	0.09
Bba dosificadora de floculantes DAF 001	352-PP-3323	Planta Riles	0.18
Bba dosificadora de floculantes DAF 001	352-PP-3324	Planta Riles	0.18
Agitador TK 3311	352-AG-3304	Planta Riles	1.5
Bba dosificadora anti-incrustante RO	352-PP-3328	Planta Riles	0.023
Bba dosificadora anti-incrustante RO	352-PP-3329	Planta Riles	0.023
Bba dosificadora regulación floculante	352-PP-3330	Planta Riles	0.022
Bba dosificadora regulación floculante	352-PP-3331	Planta Riles	0.022
Equipo raspador DAF 001	352-ZM-2201	Planta Riles	75
Equipo raspador DAF 001	352-ZM-2202	Planta Riles	75
Soplador	352-BL-3301	Planta Riles	9.2
Soplador	352-BL-3302	Planta Riles	15

10.2 Esquemas de motores eléctricos en proyectos de EE analizados

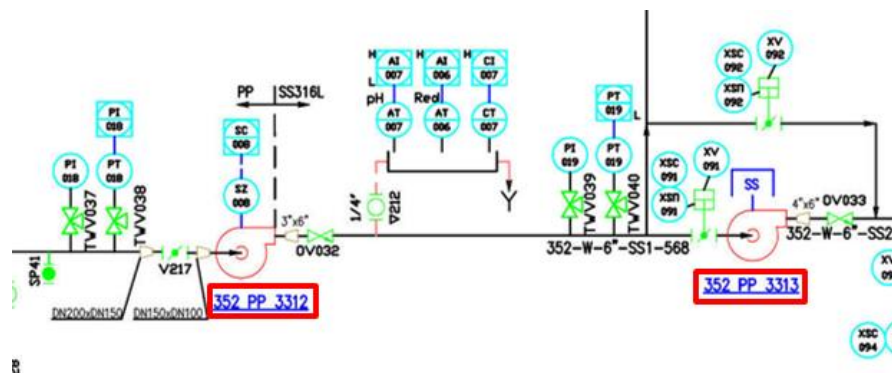
10.2.1 Bombas loop filtrado



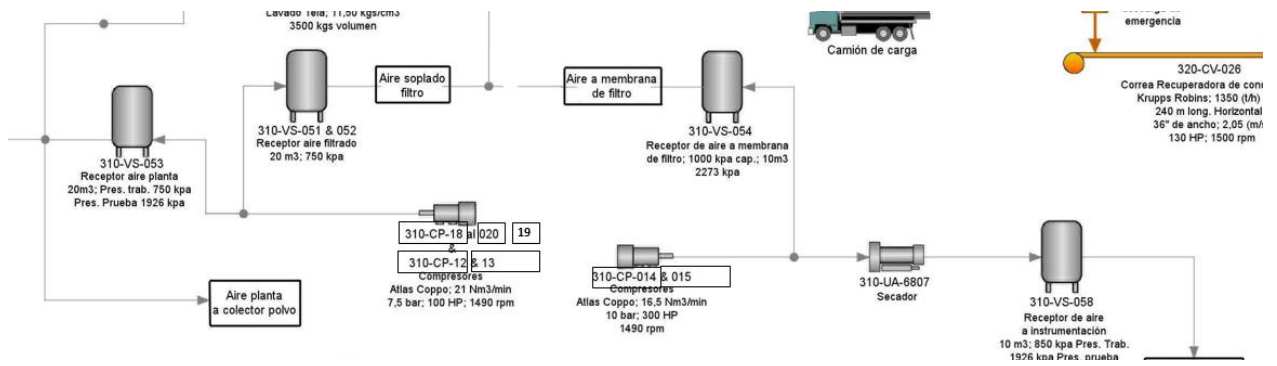
10.2.2 Bombas de forestación



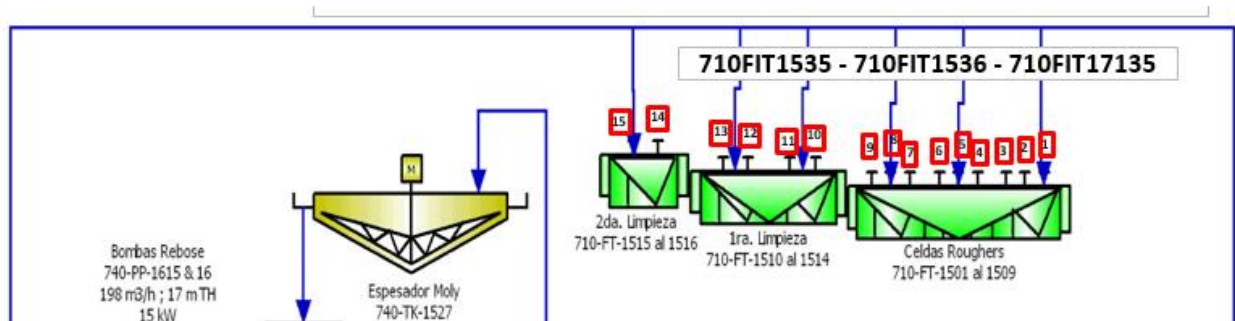
10.2.3 Bombas de osmosis reversa de planta Riles



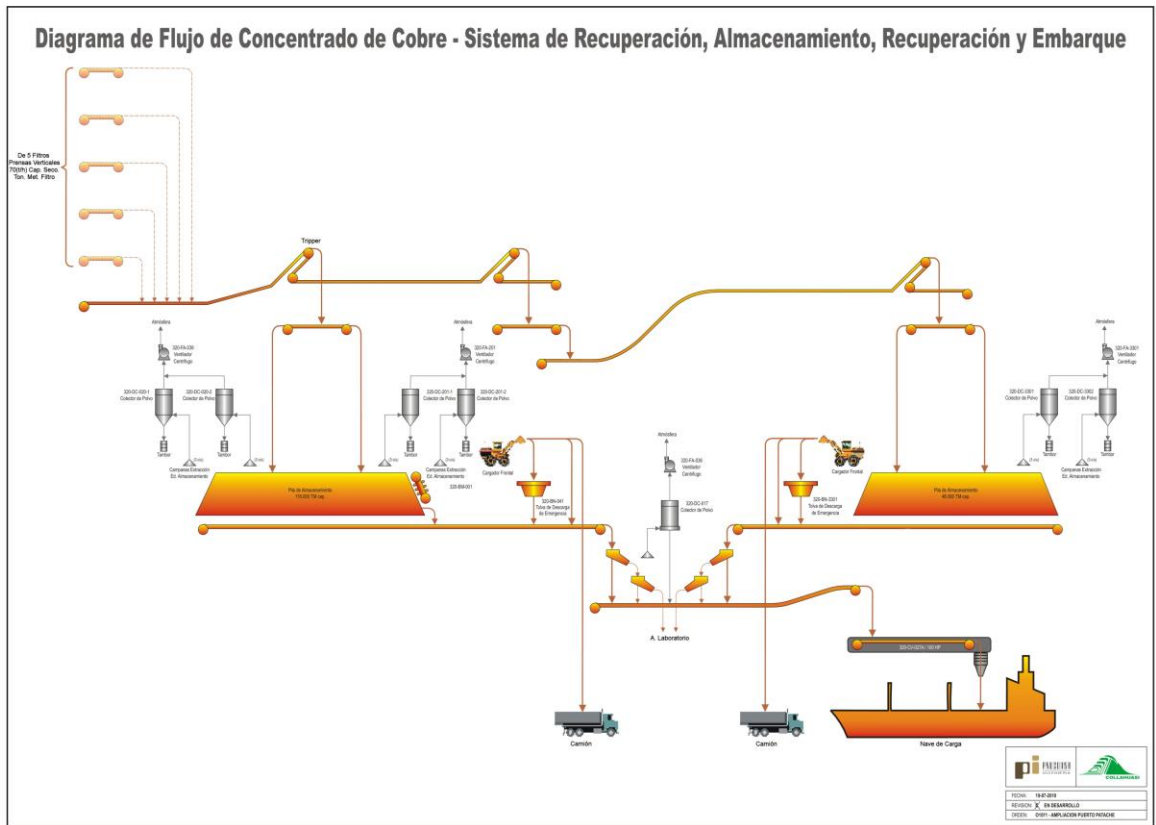
10.2.4 Compresores de aire



10.2.5 Agitadores celdas Rougher



10.2.6 Diagrama de correas transportadoras de Puerto Patache



10.3 Proyectos de iluminación eficiente en Puerto Patache

Descripción de proyecto	Ubicación	Luminarias	A sustituir	Inversión estimada [CLP]	Ahorro Anual [CLP]	Ahorro Energía [MWh/año]
Sustitución de lámparas incandescentes de 60 y 75 Watt por lámparas de bajo consumo de 15W	Oficinas Superintendencia	25	24	\$ 42.960	\$ 332.875	6,09
SUSTITUCIÓN DE CAMPANAS INDUSTRIALES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y DE HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 250 W POR CAMPANAS INDUSTRIALES LED DE 100 W	Torre de transferencia	5	2	\$ 317.700	\$ 103.861	1,90
SUSTITUCIÓN DE CAMPANAS INDUSTRIALES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 400 W POR CAMPANAS INDUSTRIALES LED DE 150 W	Correa 25 Stock Pile Grande	55	52	\$ 12.940.800	\$ 7.698.767	140,75
	Planta de filtros y sala eléctrica	3	3	\$ 746.550	\$ 442.036	8,08
	Planta Molibdeno	2	2	\$ 497.700	\$ 147.345	2,69
	Stockpile 1	4	4	\$ 995.400	\$ 559.912	10,24
	Stockpile 2	28	28	\$ 6.718.950	\$ 3.919.387	71,65
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 250 W POR PROYECTOR LED DE 120 W	Ficemo	5	5	\$ 1.248.875	\$ 388.129	7,10
	Planta Filtro y sala eléctrica	103	85	\$ 21.230.875	\$ 6.636.235	121,32
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP), HALOGENUROS METÁLICOS DE 400 W Y HALÓGENAS DE 500 W POR PROYECTORES LED DE 160 W	Correa 25 Stock Pile Grande	1	1	\$ 297.840	\$ 134.743	2,46
	Correa 27	4	4	\$ 1.191.360	\$ 538.973	9,85
	Correa 3301	1	1	\$ 297.840	\$ 134.743	2,46
	Correa Stock Pile pequeño	28	27	\$ 8.041.680	\$ 3.772.809	68,97
	Ficemo	5	5	\$ 1.489.200	\$ 709.175	12,96
	Muelle	3	3	\$ 893.520	\$ 404.229	7,39
	Planta filtros y sala eléctrica	8	6	\$ 1.787.040	\$ 1.134.679	20,74
	Planta Molibdeno	103	94	\$ 27.996.960	\$ 6.574.048	120,18
	Planta Raile	18	18	\$ 5.361.120	\$ 1.212.688	22,17
	Sala eléctrica molibdeno	2	2	\$ 595.680	\$ 283.670	5,19

	Torre de transferencia	1	1	\$ 297.840	\$ 141.835	2,59
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES Y FOCOS CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP), HALOGENUROS METÁLICOS (HM) Y HALÓGENAS DE 70 W POR PROYECTORES LED DE 20 W	Oficinas Superintendencia	1	1	\$ 70.655	\$ 11.261	0,21
	Planta Molibdeno	1	1	\$ 70.655	\$ 13.153	0,24
SUSTITUCIÓN DE FOCOS Y PANTALLAS CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) DE 100 W POR PROYECTORES LED DE 50 W	Correa 25	16	15	\$ 1.745.640	\$ 455.213	8,32
	Correa 26	4	4	\$ 465.504	\$ 113.803	2,08
	Correa 27	16	15	\$ 1.745.640	\$ 445.214	8,14
	Correa 3301	18	17	\$ 1.978.392	\$ 512.115	9,36
	Correa 3303	9	9	\$ 1.047.384	\$ 256.058	4,68
	FICEMO	6	6	\$ 698.256	\$ 179.690	3,29
	Muelle	67	64	\$ 7.448.064	\$ 1.906.206	34,85
	Planta filtros y sala eléctrica	18	17	\$ 1.978.392	\$ 506.724	9,26
	Planta Molibdeno	108	97	\$ 11.288.472	\$ 1.455.485	26,61
	Planta Riles	58	55	\$ 6.400.680	\$ 825.074	15,08
	Stockpile 2	10	9	\$ 1.047.384	\$ 281.514	5,15
	Torre de transferencia	13	10	\$ 1.163.760	\$ 299.782	5,48
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES Y FOCOS CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALÓGENAS DE 150 W POR PROYECTORES LED DE 70 W	Correa 27	42	40	\$ 6.474.040	\$ 1.902.337	34,78
SUSTITUCIÓN DE TUBOS FLUORESCENTES DE 36 Y 40 W POR TUBOS DE LED DE 18 W	Oficinas Perskenk	42	42	\$ 546.000	\$ 452.817	8,28
	Correa 25	32	30	\$ 390.000	\$ 397.674	7,27
	Correa 27A	38	36	\$ 468.000	\$ 472.238	8,63
		6	6	\$ 78.000	\$ 64.688	1,18
	Oficinas Superintendencia	82	78	\$ 1.014.000	\$ 422.090	7,72
	Planta filtros y sala eléctrica	244	215	\$ 2.795.000	\$ 2.808.837	51,35
	Planta Molibdeno	6	6	\$ 78.000	\$ 32.344	0,59
	Sala eléctrica molibdeno	116	109	\$ 1.417.000	\$ 1.175.601	21,49
	Sala eléctrica Riles	24	23	\$ 299.000	\$ 298.256	5,45

SUSTITUCIÓN DE LUMINARIAS VIALES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) DE 400 W POR LUMINARIAS LED DE 140 W	Viales Patache	91	84	\$ 35.080.500	\$ 6.398.547	116,98
TOTAL		1472,00	1356	\$ 178.778.308	\$ 56.956.860	1041,26

10.4 Proyectos de iluminación eficiente prioritarios

Descripción de proyecto	Ubicación	Luminarias	A sustituir	Inversión estimada [CLP]	Ahorro Anual [CLP]	Ahorro Energía [MWh/año]	Payback
Sustitución de lámparas incandescentes de 60 y 75 Watt por lámparas de bajo consumo de 15W	Oficinas Superintendencia	25	24	\$ 42.960	\$ 332.875	6,09	0,1
SUSTITUCIÓN DE CAMPANAS INDUSTRIALES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y DE HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 250 W POR CAMPANAS INDUSTRIALES LED DE 100 W	Torre de transferencia	5	2	\$ 317.700	\$ 103.861	1,90	3,1
SUSTITUCIÓN DE CAMPANAS INDUSTRIALES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 400 W POR CAMPANAS INDUSTRIALES LED DE 150 W	Correa 25 Stock Pile Grande	55	52	\$ 12.940.800	\$ 7.698.767	140,75	1,7
	Planta de filtros y sala eléctrica	3	3	\$ 746.550	\$ 442.036	8,08	1,7
	Planta Molibdeno	2	2	\$ 497.700	\$ 147.345	2,69	3,4
	Stockpile 1	4	4	\$ 995.400	\$ 559.912	10,24	1,8
	Stockpile 2	28	28	\$ 6.718.950	\$ 3.919.387	71,65	1,7
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALOGENUROS METÁLICOS (HM) DE 250 W POR PROYECTOR LED DE 120 W	Ficemo	5	5	\$ 1.248.875	\$ 388.129	7,10	3,2
	Planta Filtro y sala eléctrica	103	85	\$ 21.230.875	\$ 6.636.235	121,32	3,2
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP), HALOGENUROS METÁLICOS DE 400 W Y HALÓGENAS DE 500 W POR PROYECTORES LED DE 160 W	Correa 25 Stock Pile Grande	1	1	\$ 297.840	\$ 134.743	2,46	2,2
	Correa 27	4	4	\$ 1.191.360	\$ 538.973	9,85	2,2
	Correa 3301	1	1	\$ 297.840	\$ 134.743	2,46	2,2
	Correa Stock Pile pequeño	28	27	\$ 8.041.680	\$ 3.772.809	68,97	2,1
	Ficemo	5	5	\$ 1.489.200	\$ 709.175	12,96	2,1
	Muelle	3	3	\$ 893.520	\$ 404.229	7,39	2,2
	Planta filtros y sala eléctrica	8	6	\$ 1.787.040	\$ 1.134.679	20,74	1,6
	Sala eléctrica molibdeno	2	2	\$ 595.680	\$ 283.670	5,19	2,1
	Torre de transferencia	1	1	\$ 297.840	\$ 141.835	2,59	2,1
SUSTITUCIÓN DE FOCOS Y PANTALLAS CON LÁMPARAS DE	Correa 25	16	15	\$ 1.745.640	\$ 455.213	8,32	3,8
	Correa 27	16	15	\$ 1.745.640	\$ 445.214	8,14	3,9

VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) DE 100 W POR PROYECTORES LED DE 50 W	Correa 3301	18	17	\$	1.978.392	\$	512.115	9,36	3,9
	FICEMO	6	6	\$	698.256	\$	179.690	3,29	3,9
	Muelle	67	64	\$	7.448.064	\$	1.906.206	34,85	3,9
	Planta filtros y sala eléctrica	18	17	\$	1.978.392	\$	506.724	9,26	3,9
	Stockpile 2	10	9	\$	1.047.384	\$	281.514	5,15	3,7
	Torre de transferencia	13	10	\$	1.163.760	\$	299.782	5,48	3,9
SUSTITUCIÓN DE PROYECTORES Y FOCOS CON LÁMPARAS DE VAPOR DE SODIO DE ALTA PRESIÓN (VSAP) Y HALÓGENAS DE 150 W POR PROYECTORES LED DE 70 W	Correa 27	42	40	\$	6.474.040	\$	1.902.337	34,78	3,4
SUSTITUCIÓN DE TUBOS FLUORESCENTES DE 36 Y 40 W POR TUBOS DE LED DE 18 W	Oficinas Perskenk	42	42	\$	546.000	\$	452.817	8,28	1,2
	Correa 25	32	30	\$	390.000	\$	397.674	7,27	1,0
	Correa 27A	38	36	\$	468.000	\$	472.238	8,63	1,0
		6	6	\$	78.000	\$	64.688	1,18	1,2
	Oficinas Superintendencia	82	78	\$	1.014.000	\$	422.090	7,72	2,4
	Planta filtros y sala eléctrica	244	215	\$	2.795.000	\$	2.808.837	51,35	1,0
	Planta Molibdeno	6	6	\$	78.000	\$	32.344	0,59	2,4
	Sala eléctrica molibdeno	116	109	\$	1.417.000	\$	1.175.601	21,49	1,2
	Sala eléctrica Riles	24	23	\$	299.000	\$	298.256	5,45	1,0
TOTAL		1079,00	993,00	\$	90.996.378	\$	40.096.743	733,03	2,3

310-CP015CO01	ABB MOTOR	M2AA160 L4	36AA162911-ASA	19,5	440/460	26/25	84	60	3	1455	----	IEC	----	1	F	----	40° C	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	88,1	----	----
310-CP018CO01	ABB MOTOR	M2AA160 L4	36AA162911-ASA	19,5	440/460	26/25	84	60	3	1455	----	IEC	----	1	F	----	40° C	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	88,1	----	----
310-CP019CO01	ABB MOTOR	M2AA160 L4	36AA162911-ASA	19,5	440/460	26/25	84	60	3	1455	----	IEC	----	1	F	----	40° C	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	88,1	----	----
310-CP020CO01	ABB MOTOR	M2AA160 L4	36AA162911-ASA	19,5	440/460	26/25	84	60	3	1755/1760	----	IEC	----	1	F	----	40° C	6209-2Z/C3	6209-2Z/C3	88,1	----	----

TAG	MARCA	MODEL	SERIE	HP	VOLT	AMP	FP	HZ	FAS	ES	RP	FR	ME	TYP	EN	CL	SF	INS	DES	T°	AMB	ROD	EJE	ROD	VENT	EFF	CO	DE	KV	AR
320-BM001A	US MOTOR	H19234	A10A1880459R-1	200	380	270	88,5	50	3	1475	449T	MC	JCE	TE	CF	1,15	F	B	40° C	100BCO2x3	100BCO2x3	95	G	36,9						
320-BM001B	US MOTOR	H19225	A09A1880291R-1	100	380	134	88,4	50	3	1485	447T	SC	----	TEF	C	1,15	F	B	40° C	6220-J/C3	6313-J/C3	95,8	G	14						
320-BM001C	US MOTOR	H19227	A08A1880300F	5	380	7,5	----	50	3	1465	215T	C	TCI	TE	1,15	F	B	40° C	6309-J	6207-J	90,2	G	----							
320-BM001D	US MOTOR	H19226	A08A188029TF	5	380	7,5	----	50	3	1465	215T	C	TCI	TE	1,15	F	B	40° C	6309-J	6207-J	90,2	G	----							
320-BM001E	DEMAG	-----	43818359	384	380	72	71	50	3	955	200B6	KBH	TEF	C	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	
320-BM001F	DEMAG	-----	43818359	47	380	10	72	50	3	1405	100B4	KBH	TEF	C	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	
320-BM001G	DEMAG	-----	43819419	243	380	46	----	50	3	1445	160B4	KBH	TEF	C	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	
320-BM001H	DEMAG	-----	43819419	31	380	6,8	----	50	3	1365	90B4	KBH	TEF	C	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	
320-CY035A	US MOTOR	H308A	Z07Z131R006M	3	230/460	8,18/4,08	----	60	3	1760	182T																			
320-CY036A	US MOTOR	H308A-60	Y06Y128P001M	3	230/460	8,18/4,08	----	60	3	1760	182T																			
320-CY037A	US MOTOR	H308A	A07A1117R291N	1,5	460	2,25	----	60	3	1450	145T																			
320-CV025A	US MOTOR	H15924	A05A0770555R-1	75	380	100	89,3	50	3	1480	445T	TC	TEF	C	1,15	F	B	40° C	100BCO2x3	65BCO3x3	95,4	G	----							
320-CV026A	US MOTOR	H15931	A05A0770639R-1	125	380	168	88,5	50	3	1485	447T	TC	TE	CF	1,15	F	B	40° C	100BCO2x3	65BCO3x3	95,4	G	24,1							
320-CV027A	US MOTOR	H15931	A05A0770639R-2	125	380	168	88,5	50	3	1485	447T	TC	TE	CF	1,15	F	B	40° C	100BCO2x3	65BCO3x3	95,4	G	24,1							
320-CV037A	US MOTOR	H303A	A07A147R291N	1,5	460	2,25	----	60	3	1450	145T	CT	TE	1,15	F	B	40° C	6205-2Z-JC3	6205-2Z-JC3	86,5	L	----								
320-DC018A	US MOTOR	-----	DD-066220	0,75	380	1,5	----	50	3	1430	56	UT	P	----	1,15	F	B	----	----	6203-2Z	----	M	----							
320-DC020A	US MOTOR	-----	DD-066218	1	380	1,9	----	50	3	1430	56	UT	P	----	1,15	F	B	----	----	6203-2Z	----	M	----							
320-DC027A	US MOTOR	-----	DD-066217	1	380	1,9	----	50	3	1430	56	UT	P	----	1,15	F	B	----	----	6203-2Z	----	M	----							
320-DO028A	US MOTOR	F012B	Z05Z072R106M	0,75	190/380	3/1,5	----	50	3	1750	56C	UT	TE	1,35	F	M	40° C	6203-2Z-J/C3	6203-2Z-J/C3	----	----	----								
320-DO029A	US MOTOR	F012B	Z05Z072R106M	0,75	190/380	3/1,5	----	50	3	1750	56C	UT	TE	1,35	F	M	40° C	6203-2Z-J/C3	6203-2Z-J/C3	----	----	----								
320-PP275A	US MOTOR	H19954	A09A2060701R-2	15	380	21,2	86,1	50	3	1480	284T	TC	TE	1,15	F	B	40° C	6310-2Z-JC3	6210-2Z-JC3	95	G	3,2								
320-PP276A	US MOTOR	H19954	A09A2060701R-1	15	380	21,2	86,1	50	3	1480	284T	TC	TE	1,15	F	B	40° C	6310-2Z-JC3	6210-2Z-JC3	95	G	3,2								
330-DP00803	FLENDER HIMMEL	-----	A412876/02	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00801	FLENDER HIMMEL	-----	A412876/03	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00802	FLENDER HIMMEL	-----	A412877/02	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00804	FLENDER HIMMEL	-----	A412876/04	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00805	FLENDER HIMMEL	-----	A412879/01	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00806	FLENDER HIMMEL	-----	A412877/01	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00807	FLENDER HIMMEL	-----	A412876/01	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DP00808	FLENDER HIMMEL	-----	A412877/04	7,5	380/660	11,7/6,8	----	50	3	1450	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DT00901	FLENDER HIMMEL	-----	A412878/02	10	380/660	15,5/9	----	50	3	1445	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DT00902	FLENDER HIMMEL	-----	A412878/01	10	380/660	15,5/9	----	50	3	1445	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DT00903	FLENDER HIMMEL	-----	A412877/03	10	380/660	15,5/9	----	50	3	1445	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-DT00904	FLENDER HIMMEL	-----	A412878/02	10	380/660	15,5/9	----	50	3	1445	----	----	----	----	----	F	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----
330-CV006	US MOTOR	-----	A06A1110116 R-1	100	380	136	87,6	50	3	1480	444T	TC	TEF	C	1,15	F	B	40° C	100 BC02x3	65 BC03x3	95	G	21,8							

350-PP175A	US MOTOR	H1704 2	A06A11505 05R-2	25	380	34	89,3	5 0	3	296 0	324T S	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6311-2Z- JC3	6211-2Z- JC3	92,4	G	3,2
350-PP176A	US MOTOR	H1704 2	A06A11505 05R-1	25	380	34	89,3	5 0	3	296 0	324T S	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6311-2Z- JC3	6211-2Z- JC3	92,4	G	3,2
350-PP179A	US MOTOR	H1583 2	A06A11504 70R-1	20	380	27	89,3	5 0	3	296 5	286T S	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6310-2Z- JC3	6210-2Z- JC3	92,4	H	3,3
350-PP180A	US MOTOR	H1583 2	A06A11504 70R-2	20	380	27	89,3	5 0	3	296 5	286T S	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6310-2Z- JC3	6210-2Z- JC3	92,4	H	3,3
350-PP181A	US MOTOR	H1583 5	A05A07303 97F	1, 5	380	2,6	----	5 0	3	144 0	14ST	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6205-2Z- J/C3	6203-2Z- J/C3	84	L	----
350-PP182A	US MOTOR	H1583 5	A05A07303 97F	1, 5	380	2,6	----	5 0	3	144 0	14ST	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6205-2Z- J/C3	6203-2Z- J/C3	84	L	----
350-PP183A	US MOTOR	H1585 5	A05A07303 579R-1	12 5	380	164	90,7	5 0	3	----	449T	JCE	TE C	1,15	F	B	40° C	100BCO 2x3	-----	95,4	G	19
350-PP184A	US MOTOR	H1585 5	A05A07303 579R-2	12 5	380	164	90,7	5 0	3	----	449T	JCE	TE C	1,15	F	B	40° C	100BCO 2x3	-----	95,4	G	19
350-PP185A	US MOTOR	H1585 5	A05A07303 579R-3	12 5	380	164	90,7	5 0	3	----	449T	JCE	TE C	1,15	F	B	40° C	100BCO 2x3	-----	95,4	G	19
350-PP200A	US MOTOR	H1580 8	A05A07303 77F	3	380	5	83	5 0	3	147 0	184T	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6206-2Z- J/C3	6205-2Z- J/C3	90,2	L	1,4
360-PP202A	US MOTOR	H2279 1	B01A29607 16R-1	15 0	380	197	90,9	5 0	3	296 0	449T	JCE	TE CF	1,15	F	B	40° C	100BCO 2x3	100BCO 2x3	95	G	19,1
360-PP203A	US MOTOR	H2278 8	A12A29607 10F	3	380	4,5	----	5 0	3	290 5	184T C	TC E	TE	1,15	F	B	40° C	6300-Z- J/C3	6205- J/C3	85,5	G	----