



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

**PLANTA MINERA QUELLAVECO: DESARROLLO DE UN
MODELO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

CLAUDIO ALEJANDRO CORTÉS MUÑOZ

**PROFESOR GUÍA
ALFREDO MUÑOZ RAMOS**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
ALFREDO BERNAL ROJAS
OSCAR MOYA ARAVENA**

2010

RESUMEN DE MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA
POR: CLAUDIO CORTÉS MUÑOZ
FECHA: 14/04/2010
PROF. GUÍA: ALFREDO MUÑOZ RAMOS

“PLANTA MINERA QUELLAVECO: DESARROLLO DE UN MODELO DE EFICIENCIA ENERGÉTICA”

La Eficiencia Energética es el conjunto de acciones que permiten optimizar la relación entre la cantidad de energía consumida y los productos obtenidos. Dado que en el último tiempo ha existido un aumento sostenido en el precio de la energía eléctrica, así como de los combustibles, se hace necesario estudiar medidas que permitan disminuir los costos operacionales del sector industrial, y en especial, que generen ahorros de energía sustentables en el tiempo, y de manera responsable con el medio ambiente.

En este contexto se enmarca el presente trabajo de título. En él se desarrolla una guía que permite diseñar, operar y mantener de manera eficiente una planta industrial, realizando evaluaciones técnicas y económicas para la incorporación de medidas de uso eficiente de la energía. En este sentido cabe señalar que la industria minera es un sector propicio para implementar alternativas que permitan generar ahorros de energía, dado el trabajo intensivo que realizan los diferentes procesos que actúan en la cadena productiva, y que participan de manera permanente en el consumo de electricidad y combustible.

De esta manera, y conociendo las ventajas que posee la industria minera para el uso eficiente de la energía, es que la empresa Anglo American Quellaveco S.A se ha interesado en desarrollar una planta concentradora de cobre con altos índices de eficiencia energética, por lo que este proyecto minero será la base de partida para el presente estudio. Sin pérdida de generalidad, las opciones de uso eficiente de la energía descritas en este documento pueden ser replicadas en todo el sector industrial.

La metodología desarrollada contempla llevar a cabo una caracterización completa de los diferentes procesos y equipos que interactuarán en la planta concentradora Quellaveco, con el objetivo de conocer las condiciones de operación de cada equipo. Luego se desarrolla una explicación técnica, y un análisis económico, de cómo se pueden implementar las alternativas de uso eficiente de la energía y se evaluarán los resultados en la planta.

Se concluye que el uso eficiente de la energía en Quellaveco permitirá ahorrar anualmente 108,7 [GWh] de energía, lo que significa el 8,66% de la demanda global de la planta. Se observa además que, al inscribir Quellaveco como un mecanismo de desarrollo limpio, se podrán obtener ganancias anuales superiores a los US\$ 230.000, lo que corresponderá a disminuir las emisiones de CO₂ en 68.000 toneladas por año.

... para mi Mamá

Agradecimientos

Con estas palabras quiero agradecer a todas las personas que me han ayudado a finalizar esta etapa universitaria, y que con sus acciones no sólo me han ayudado a convertirme en un mejor profesional, sino que principalmente me han ayudado a crecer como una persona integral.

En primer lugar, quiero agradecer a toda mi familia: Mamá, Hermana, Abuelita, Tía Sandra y Papá, que gracias a su ayuda y apoyo incondicional he podido superar con éxito esta difícil etapa universitaria. Sin ustedes, nunca hubiera llegado tan lejos en la vida.

Agradezco además a todos mis tíos, tías, primos y primas, que me han acompañado y apoyado en las diferentes etapas de mi vida.

Doy gracias también a todos mis amigos y compañeros de la universidad, ya que sin su ayuda y compañía, este difícil camino se habría tornado imposible.

Agradezco además a la empresa Anglo American Chile, y en especial a Don Alfredo Bernal, por haberme ayudado y orientado a lo largo de este último año. Agradezco además su confianza y apoyo, ya que sin lugar a dudas, este proyecto hubiera sido imposible de realizar sin su ayuda y consejos permanentes.

Agradezco a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, junto a todos los profesores y funcionarios, por haberme recibido en estos últimos seis años, y entregarme las invaluable herramientas que ahora poseo, como son los conocimientos adquiridos, así como la formación de un profesional competente e integral. En especial, agradezco a los profesores Alfredo Muñoz y Oscar Moya, por haberme apoyado en la realización de este proyecto.

Para finalizar, quiero agradecer a Dios junto a los ángeles que lo acompañan, como son mi Tata Arturo, Tío Miguel, Abuelito Enrique y Abuelita Eliana, ya que de seguro habrían estado orgullosos por haber finalizado este camino junto a mí.

*“Agradece a la llama su luz,
pero no olvides el pie del candil,
que constante y paciente, la sostiene en la sombra”*

(Rabindranath Tagore)

Índice

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1. OBJETIVOS	9
2. ANTECEDENTES.....	11
2.1. ANTECEDENTES GENERALES.....	11
2.1.1. <i>Eficiencia Energética en el Mundo</i>	11
2.1.2. <i>Caso de Chile</i>	12
2.1.3. <i>Caso de Perú</i>	14
2.1.4. <i>Ley Peruana sobre Promoción del Uso Eficiente de la Energía.</i>	17
2.1.5. <i>Uso Eficiente de la Energía en la Gran Minería del Cobre Peruana.</i>	18
2.1.6. <i>Procesos asociados a la Gran Minería del Cobre</i>	20
2.2. ANTECEDENTES ESPECÍFICOS.....	22
2.2.1. <i>Anglo American PLC</i>	22
2.2.2. <i>Política para el UEE de AAPLC</i>	23
2.2.3. <i>Alcance del Proyecto</i>	24
3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO EN LA DIVISIÓN QUELLAVECO.....	26
3.1. BREVE RESEÑA DE LA PLANTA MINERA QUELLAVECO	26
3.2. PROCESO ASOCIADO A LA PLANTA QUELLAVECO	28
3.3. CONSUMO DE ENERGÍA POR PROCESOS PRODUCTIVOS QUELLAVECO.....	30
4. SELECCIÓN DEL NIVEL DE ESTUDIO	35
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DEL PROYECTO QUELLAVECO.....	35
4.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS PROCESOS Y EQUIPOS	37
4.2.1. <i>Caracterización de Procesos</i>	39
4.2.2. <i>Caracterización de Equipos</i>	43
5. DESARROLLO	47
5.1. MOTORES ELÉCTRICOS	47
5.1.1. <i>Caracterización de Motores Eléctricos en Quellaveco</i>	48
5.1.2. <i>Problemas Comunes que Disminuyen la Eficiencia en Motores</i>	51
5.1.3. <i>Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas Motrices</i>	56
5.1.4. <i>Evaluación Técnica – Económica</i>	61
5.2. BOMBAS HIDRÁULICAS	67

5.2.1.	<i>Bombas Centrífugas</i>	67
5.2.2.	<i>Bombas de Desplazamiento Positivo o Volumétricas</i>	70
5.2.3.	<i>Caracterización de Bombas Hidráulicas en Quellaveco</i>	72
5.2.4.	<i>Problemas Comunes en Sistemas de Bombeo que Disminuyen la Eficiencia</i>	74
5.2.5.	<i>Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Bombeo</i>	80
5.3.	VENTILADORES.....	83
5.3.1.	<i>Tipos de Ventiladores</i>	84
5.3.2.	<i>Curvas de Operación de Ventiladores</i>	87
5.3.3.	<i>Caracterización de Ventiladores en Quellaveco</i>	88
5.3.4.	<i>Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Ventilación</i>	90
5.4.	COMPRESORES DE AIRE.....	99
5.4.1.	<i>Caracterización de Compresores de Aire en Quellaveco</i>	100
5.4.2.	<i>Problemas Comunes en Sistemas de Compresión que Disminuyen la Eficiencia</i>	102
5.4.3.	<i>Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Compresión</i>	104
5.5.	CORREAS TRANSPORTADORAS.....	111
5.5.1.	<i>Generalidades de Correas Transportadoras</i>	111
5.5.2.	<i>Caracterización de Correas Transportadoras en Quellaveco</i>	112
5.5.3.	<i>Variación de Velocidad en Correas Transportadoras</i>	114
5.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA EQUIPOS CON VDFS.....	117
5.7.	TRANSFORMADORES.....	125
5.7.1.	<i>Caracterización de Transformadores en Quellaveco</i>	125
5.7.2.	<i>Eficiencia en Transformadores</i>	127
5.7.3.	<i>Pérdidas y Diseño de un Transformador Eficiente</i>	129
5.7.4.	<i>Evaluación Técnica – Económica</i>	130
5.8.	ILUMINACIÓN.....	134
5.8.1.	<i>Fundamentos de Luminotecnia</i>	134
5.8.2.	<i>Tipos de Luminarias</i>	136
5.8.3.	<i>Caracterización de Sistemas de Iluminación en Quellaveco</i>	141
5.8.4.	<i>Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Iluminación</i>	143
5.8.5.	<i>Evaluación Técnica – Económica</i>	146
5.9.	GESTIÓN DE COMBUSTIBLES.....	151
5.9.1.	<i>Ventajas de la Gestión del Combustible</i>	151
5.9.2.	<i>Establecimiento del Sistema de Control de Combustible</i>	151
5.9.3.	<i>Medidas para el Ahorro de Combustible</i>	153
5.9.4.	<i>Mantenimiento de Camiones de Gran Tonelaje</i>	154

5.9.5.	<i>Conducción Eficiente</i>	155
5.9.6.	<i>Evaluación Técnica – Económica</i>	156
6.	RESULTADOS	161
6.1.	RESULTADOS GLOBALES.....	161
6.1.1.	<i>Ahorros de Energía</i>	161
6.1.2.	<i>Inversiones</i>	163
6.2.	CURVA DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA	164
6.2.1.	<i>Costo de la Energía Conservada (CCE)</i>	164
6.2.2.	<i>Curva de Conservación de la Energía</i>	165
6.3.	MECANISMOS DE DESARROLLO LIMPIO.....	167
6.3.1.	<i>Mercado del Carbono</i>	168
6.3.2.	<i>Disminución de Emisiones de CO₂</i>	168
6.3.3.	<i>Caso Perú</i>	172
6.4.	REPERCUSIÓN DE LAS MEDIDAS DE UEE EN QUELLAVECO SOBRE EL SISTEMA DE TRANSMISIÓN PERUANO.....	175
6.4.1.	<i>Evaluación de pérdidas en el Sistema de Transmisión</i>	175
7.	CONCLUSIONES	179
7.1.	TRABAJO FUTURO.....	183
8.	BIBLIOGRAFÍA	184
9.	ANEXOS	187
9.1.	VALORES DE EFICIENCIA EN MOTORES SEGÚN NORMA IEC 60034-30.....	187
9.2.	CONSIDERACIÓN GENERAL PARA LA EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS EN MOTORES ELÉCTRICOS.....	188
9.3.	NATURALEZA DE LAS PÉRDIDAS EN MOTORES ELÉCTRICOS	192
9.4.	NORMA HD 428 PARA TRANSFORMADORES (ESTÁNDAR EUROPEO)	195
9.5.	RESULTADOS DE LAS EVALUACIONES ECONÓMICAS DE LOS DIFERENTES EQUIPOS	197

1. Introducción

La energía eléctrica es un insumo fundamental en la producción de la gran mayoría de las plantas industriales, así como en los sectores residenciales y comerciales del país. De esta manera, el aumento sostenido en el precio de la energía eléctrica, así como de los combustibles, ha golpeado con fuerza a los sectores de la gran, mediana y pequeña empresa, que se han visto obligados a recurrir a métodos que permitan reducir sus costos operacionales, y en especial, que generen ahorros de energía sustentables en el tiempo. A su vez, la utilización de medidas de uso eficiente de la energía, permite disminuir las emisiones de CO₂ al medio ambiente, potenciando el desarrollo sustentable, y la responsabilidad social de las empresas. En este contexto, es que se enmarca el presente trabajo de título, que consiste en desarrollar una guía de cómo diseñar, operar y mantener de manera eficiente una planta industrial, realizando evaluaciones técnicas y económicas para la incorporación de medidas de uso eficiente de la energía. Cabe señalar, que en ese sentido la industria minera es un sector propicio para implementar alternativas que permitan generar ahorros de energía, dado el trabajo intensivo que realizan los diferentes procesos que actúan en la cadena productiva, y que participan permanentemente del consumo de electricidad y combustibles. De esta manera, y conociendo las ventajas que posee la industria para el uso eficiente de la energía, es que la empresa Anglo American Quellaveco S.A se ha interesado en desarrollar una planta concentradora de cobre con altos índices de eficiencia energética, y por lo tanto este proyecto minero será la base de partida para el presente estudio. Aunque sin pérdida de generalidad, las opciones de uso eficiente de la energía descritas en este documento pueden ser replicadas en cualquier planta minera, e incluso, pueden ser aplicadas a otros sectores industriales.

La metodología desarrollada contempla inicialmente llevar a cabo una caracterización completa de los diferentes procesos y equipos que interactuarán en Quellaveco, con el objetivo de conocer las condiciones de operación a las cuáles estarán sometidos. Luego se desarrollará una explicación técnica, así como un análisis económico, de cómo se pueden implementar las alternativas de uso eficiente de la energía, para finalmente modelar los resultados en la planta concentradora Quellaveco.

La memoria será dividida en 9 capítulos, que se han organizado de tal forma de permitir un cómodo entendimiento de los contenidos, así como de las implicancias del proyecto:

1. Introducción
2. Antecedentes
3. Caracterización del Proceso Productivo en la División Quellaveco
4. Selección del Nivel de Estudio
5. Desarrollo
6. Resultados
7. Conclusiones
8. Bibliografía
9. Anexos

1.1. Objetivos

En la Gran Minería y la Industria existe un significativo potencial no explotado de eficiencia energética (EE), entre los cuales, aquellos procesos y equipos vinculados a la utilización de energía proveniente de la electricidad y diesel son fundamentales.

Estos potenciales ahorros de energía pueden ser recuperados mediante la utilización de nuevas tecnologías, así como mediante un correcto diseño y mantenimiento de los equipos. Además, mediante la gestión de la energía, y en particular, de los combustibles se pueden obtener reducciones importantes de los costos operacionales de una empresa. A su vez, la utilización de medidas de eficiencia energética, permite reducir las emisiones de CO₂, por lo que es una ayuda directa al medio ambiente.

Según lo anterior, se puede decir que los **objetivos primarios** que se persiguen con la elaboración de este trabajo de titulación son:

- Determinar áreas y equipos dentro de una planta concentradora de cobre donde es posible el desarrollo del uso eficiente de la energía, ya sea en electricidad o combustibles.
- Realizar un análisis técnico económico para comprobar las ganancias obtenidas en el mediano plazo con el uso de equipos de alta eficiencia, así como de procesos más eficientes. En particular, se deben analizar:
 - Motores
 - Bombas Hidráulicas
 - Ventiladores
 - Compresores
 - Correas
 - Transformadores
 - Iluminación
 - Variadores de Frecuencia
 - Gestión del Combustible
- Desarrollar un modelo para determinar la disminución de gases de efecto invernadero, con el uso de las alternativas eficientes. Además observar las ganancias obtenidas al introducir a la planta como un mecanismo de desarrollo limpio.
- Realizar un modelo global de una planta minera, para poder comparar entre la realización de una planta minera “normal” y una planta con altos niveles de uso eficiente de la energía. En particular, es necesario observar los ahorros de energía globales, así como las inversiones adicionales requeridas por el proyecto.

A partir de los objetivos anteriores se desprende una serie de **objetivos secundarios**.

- Evaluar la rentabilidad de diseñar una planta minera eficiente, y en particular, se observará la posibilidad de diseñar e instalar la Planta Minera Quellaveco con altos índices de eficiencia.
- Dado que Quellaveco se ubicará al Sur de Perú, será necesario estudiar el mercado eléctrico peruano, y en particular determinar los incentivos que existen para la utilización de uso eficiente de la energía.
- Estudiar que otras experiencias existen al respecto, estado del arte.
- Estudiar costos marginales y proyecciones de costos en el mercado peruano.
- Evaluación de estimación de costos de operación.

2. Antecedentes

2.1. Antecedentes Generales

2.1.1. Eficiencia Energética en el Mundo

El patrón de consumo energético de un país es un factor que ha cobrado gran relevancia en los últimos años, dado que el aumento “indiscriminado” de la demanda tiene altos costos en los principales aspectos de un sistema eléctrico, como son: la seguridad de suministro, la estabilidad del sistema, y la sustentabilidad con el medio ambiente. Debido a ello, las políticas de eficiencia energética han ido tomando cada vez más relevancia en los países desarrollados, en donde se apunta a reducir la demanda, ya sea aumentando los niveles de producción sin elevar el consumo de energía, o bien disminuyendo la energía utilizada en los procesos. Esto es posible, enfocando los ejes de acción en los siguientes cuatro objetivos, que muestran como los ahorros energéticos pueden ser obtenidos en actividades industriales, comerciales y residenciales:

❖ Medidas de Mantenimiento

El ahorro de energía puede resultar a partir de mejores prácticas de operación y mantenimiento. Tales medidas incluyen el apagado de equipos sin uso; mejoramiento de la demanda eléctrica; reducción de ajustes de temperatura en invierno; apagado de luces; eliminación de fugas de vapor, aire comprimido y calor. Por otra parte, una apropiada limpieza y reemplazo de filtros, así como una adecuada lubricación de los equipamientos, además de un correcto reemplazo y limpieza de luminarias en sistemas lumínicos puede resultar en un óptimo uso de la energía en las instalaciones industriales existentes.

❖ Modificación de Procesos y Equipamiento

Estos cambios pueden ser aplicados a los equipos existentes o bien pueden ser incorporados en el diseño de nuevo equipamiento. Ejemplos de esto, pueden incluir el uso de componentes de mayor eficiencia o mayor vida útil, como es el caso de motores y luminarias respectivamente; la implementación de nuevos conceptos que entreguen mayor eficiencia a los procesos; o el reemplazo de un proceso existente con uno que utilice una menor cantidad de energía.

❖ Mejoras en la operación de los equipos

La mejor utilización de los equipos puede ser logrado por medio de una examinación minuciosa de los procesos productivos, horarios y prácticas de operación. Típicamente, las plantas industriales son instalaciones multiunidades que involucran una serie de operaciones independientes con consideraciones mínimas en el consumo energético global de la planta. El mejoramiento en la eficiencia de la planta puede ser lograda a través de una apropiada secuencia en los procesos de operación, reordenando horarios para que las maquinarias sean utilizadas de manera continua, disminuyendo de esta manera las pérdidas asociadas a las puestas en marcha de los equipos; además se puede calendarizar la operación de algunos procesos durante los períodos de baja demanda con el objetivo de nivelar la curva de carga diaria, y a la vez tratando de reducir el uso de energía durante el horario de punta. Ejemplos de esto, puede ser la instalación de variadores de velocidad en sistemas de ventilación y bombeo, así como una correcta consideración de los efectos solares en una planta.

❖ Reducción de Pérdidas de Calor en Edificios

La reducción de pérdidas de calor puede ser lograda integrando sistemas de aislamiento en los edificios, u otras medidas más simples, como son el cerrado de puertas, reducción de escapes de calor, entre otros. Además, se pueden integrar cambios en el diseño arquitectónico del edificio, con el objetivo de aprovechar de una mejor manera la energía proveniente del Sol.

Para visualizar la importancia de las políticas energéticas, se muestra a continuación la evolución que ha tenido la demanda eléctrica en algunos países del continente:

2.1.2. Caso de Chile

El elevado crecimiento de la economía chilena, principalmente en las últimas décadas, se ha traducido en una extraordinaria expansión del consumo energético. Dicho crecimiento se ha producido manteniendo una estrecha correlación entre la demanda de energía, en especial la eléctrica, y la expansión de la actividad económica de nuestro país. Así en el período 1990 – 2004, el crecimiento del 5,8% promedio anual del Producto Interno Bruto o PIB tuvo como contraparte un crecimiento del 5,1% en el consumo total de energía secundaria y dentro de ésta, la electricidad tuvo un aumento de 8,2%. La tendencia de este comportamiento se muestra en la Figura N° 1.

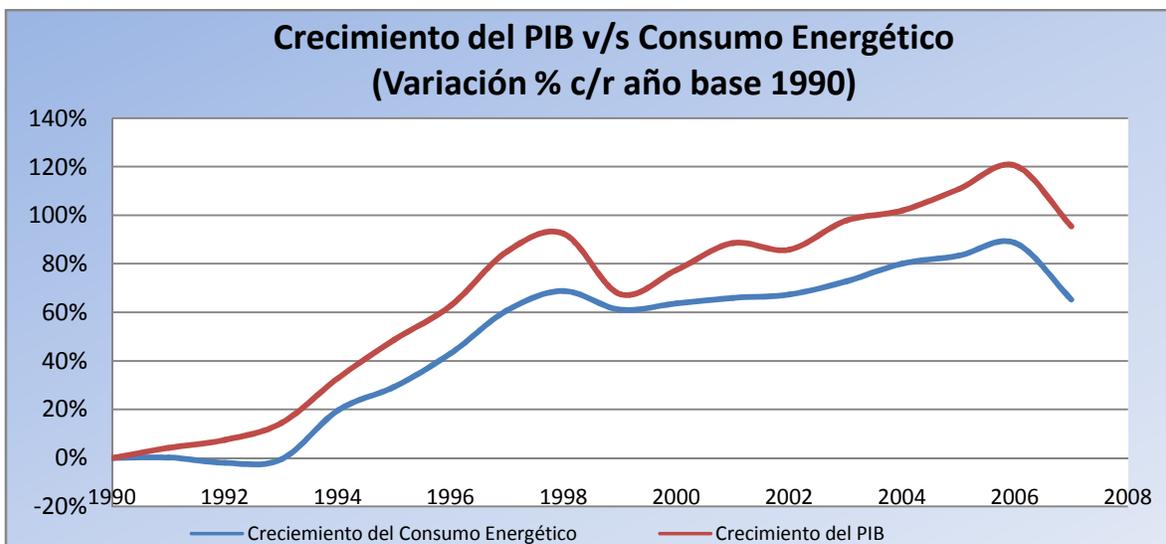


Figura N° 1: “Crecimiento del Producto Interno Bruto y Consumo Energético”

De acuerdo a lo anterior se tiene que la **intensidad energética**, o cociente entre el consumo de energía y el PIB, se ha mantenido creciente durante la última década en nuestro país. Lo mismo ocurre para la **intensidad eléctrica** que es el cociente entre el consumo de energía eléctrica y el PIB. Este comportamiento en el tiempo puede ser visualizado en la Figura N° 2.

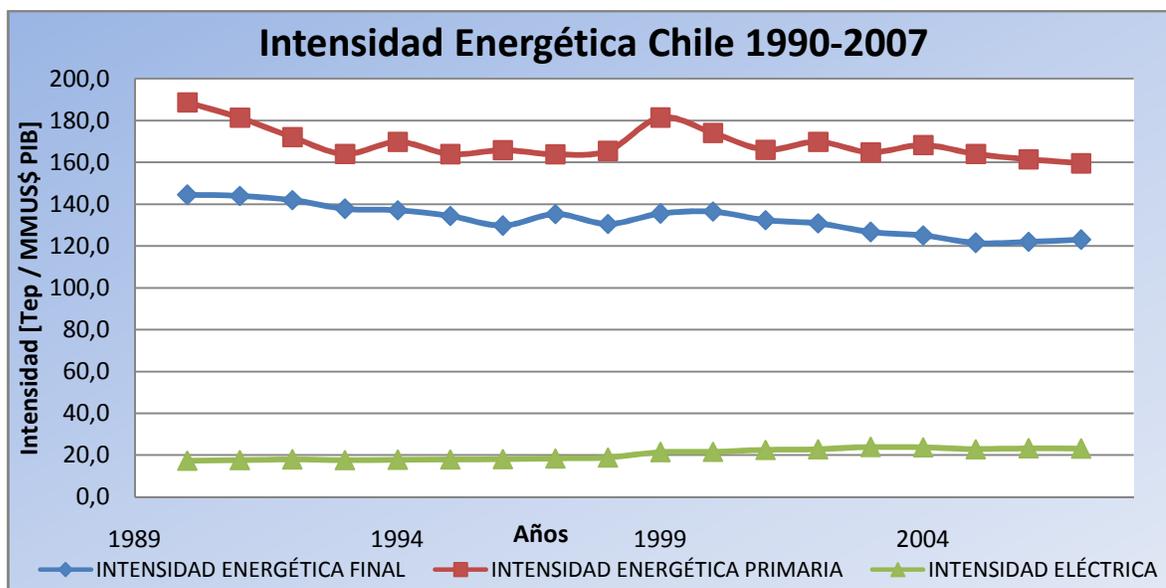


Figura N° 2: “Intensidad Energética 1990 - 2007¹”

¹ Fuente: “Anuario de Estadísticas Sector Energía – CNE”

2.1.3. Caso de Perú

Lo ocurrido en el mercado chileno contrasta bastante de lo ocurrido en el caso de Perú, en donde inclusive cuando ha existido un gran crecimiento del Producto Interno Bruto (PIB), más de un 35% en los últimos 12 años, el consumo de energía eléctrica per cápita se ha mantenido relativamente constante, como se puede observar en la Figura N° 3:

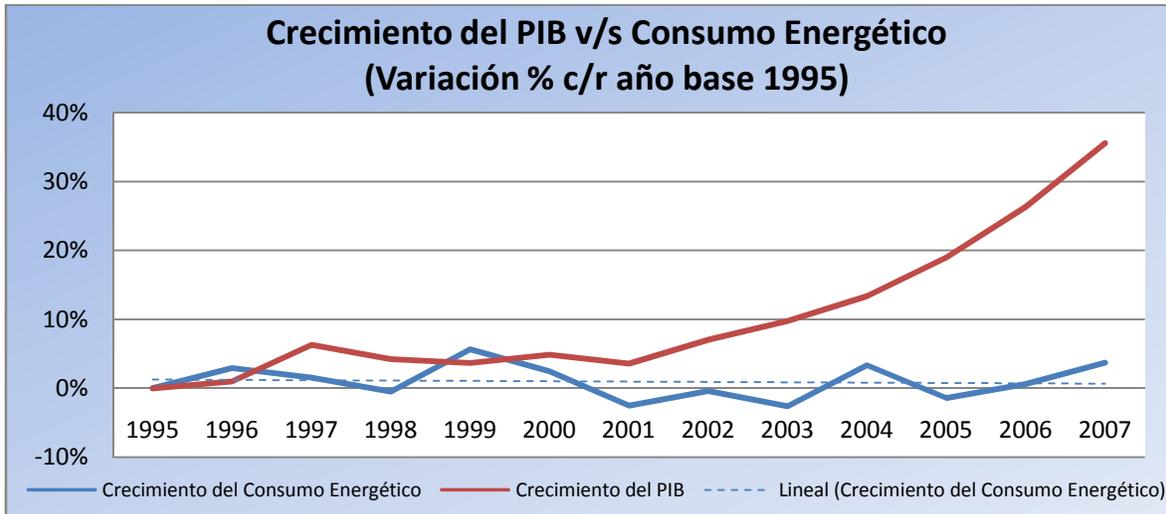


Figura N° 3: "Crecimiento del Producto Interno Bruto v/s Consumo Energético"

De la misma manera, se tiene que la intensidad eléctrica no se ha mantenido constante como ocurrió en el caso chileno, sino que ha ido disminuyendo en el tiempo como se muestra en la Figura N° 4:

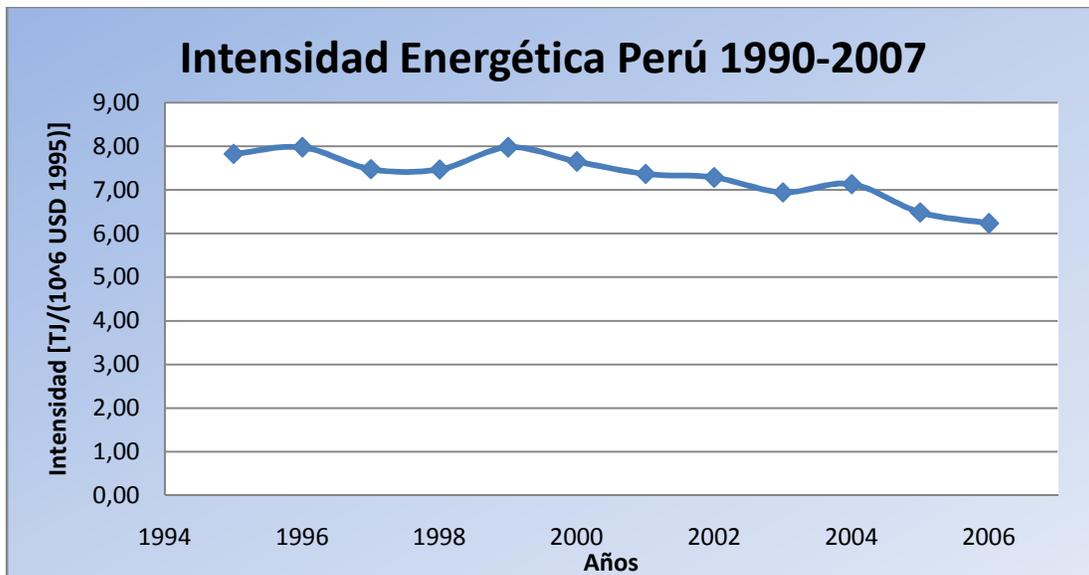


Figura N° 4: "Evolución de la Intensidad Energética en Perú"

Esta situación concuerda con lo ocurrido en la mayoría de los países desarrollados, donde la intensidad energética ha disminuido entre un 30% y un 40% durante las últimas dos décadas, reflejando la tendencia de dichos países a generar una mayor expansión de la economía usando menos energía para esto, destruyendo el vínculo histórico de crecimiento económico y mayor uso de recursos energéticos.

Para ilustrar lo anterior, se presenta la Figura N° 5 y Figura N° 6, que muestran el comportamiento de la intensidad eléctrica para distintos países del orbe desde comienzos de la década de los ochenta hasta finales de la década de los noventa.

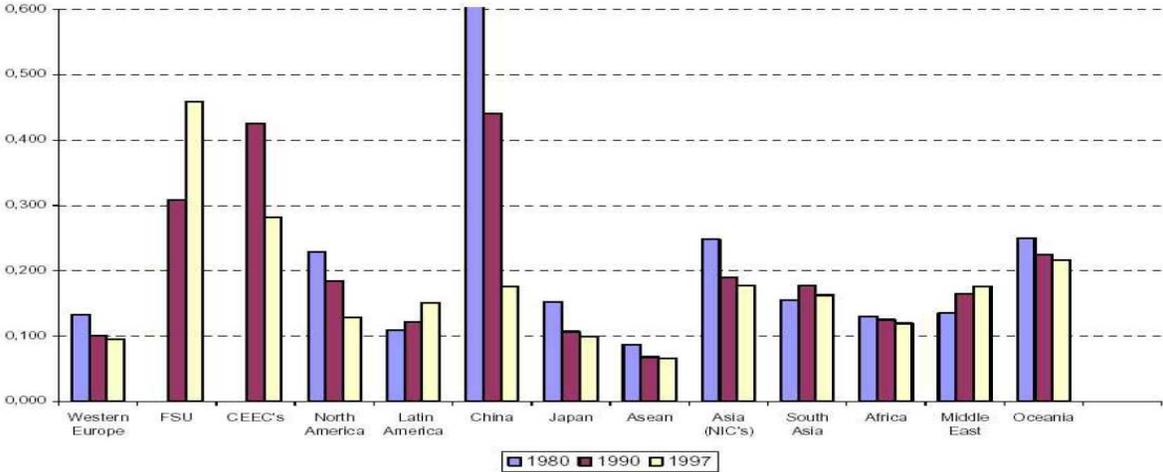


Figura N° 5: "Intensidad Energética en el Mundo"

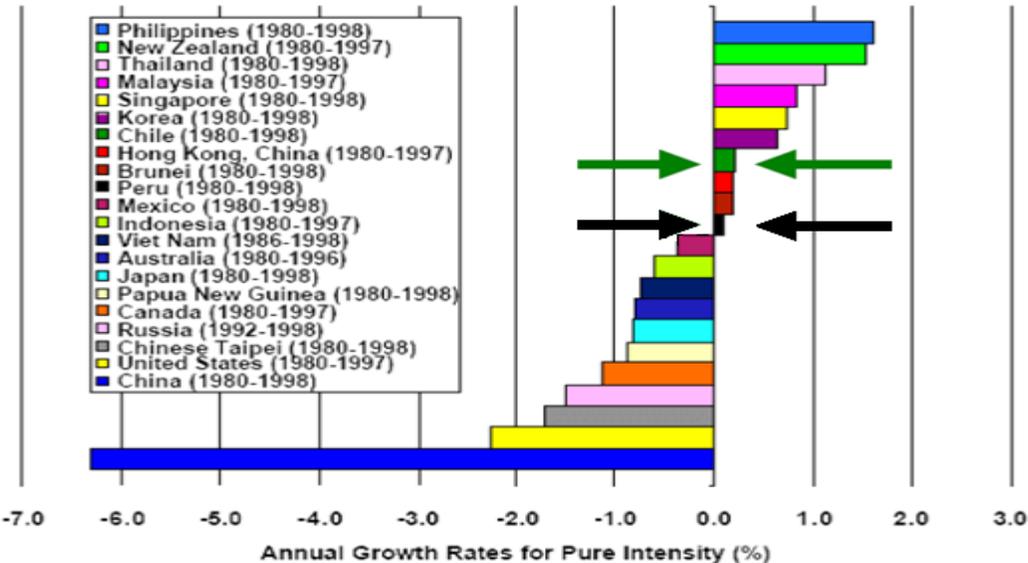


Figura N° 6: "Crecimiento Anual Promedio de la Intensidad Eléctrica en el Mundo"

El desacoplamiento entre el crecimiento económico y la demanda energética, se ha producido en gran medida por la introducción de políticas de Eficiencia Energética (EE) motivadas por la escasez de recursos energéticos no renovables, así como un aumento en el precio asociado a estos insumos, y al cuidado del medio ambiente. Esto ha generado la idea intuitiva de que existe un vínculo entre el crecimiento económico sostenible de una nación y la aplicación de políticas de eficiencia energética, o dicho de otro modo, el Uso Eficiente de la Energía (UEE) *sería uno de los factores que encaminan a las naciones hacia el desarrollo sustentable*. Bajo este contexto, una intensidad energética que se mantiene en el tiempo, significa para los privados un encarecimiento de los costos asociados al consumo de energía, menor confiabilidad de los procesos productivos y una disminución de la competitividad. Este patrón de consumo no es sustentable ni en el mediano ni el largo plazo, por lo que se requieren acciones que promuevan un cambio en esta materia.

Para los países de la OECD (Organisation For Economic Co-Operation and Development) hay un claro desacoplo entre crecimiento del PIB y el consumo energético desde el año 1973, como se puede observar en la Figura N° 7:

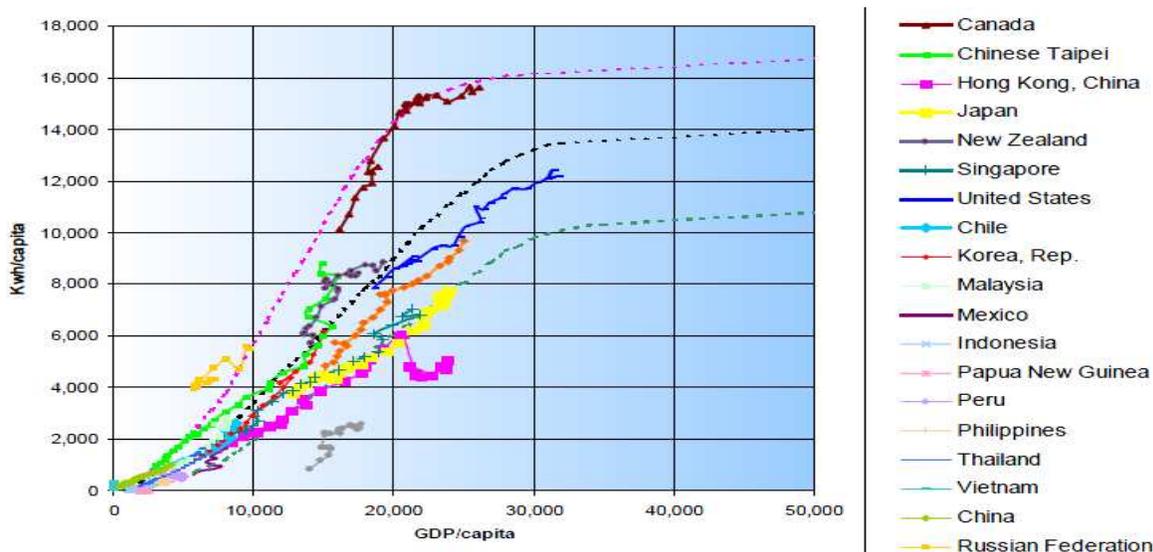


Figura N° 7: “Patrón de Consumo en Diferentes Países del Mundo”

Se aprecia que la evolución de los países puede enmarcarse en dos curvas tendenciales o envolventes. Con la tendencia actual de búsqueda de mejoramiento de eficiencia de los procesos productivos y equipos eléctricos, la curva envolvente inferior parece corresponder a la mejor estimación de tendencia de evolución de los distintos países, y en donde se puede observar con gran claridad el gran incentivo que tiene Japón hacia la utilización de procesos de alta eficiencia.

Este análisis global permite visualizar las tendencias en los sectores eléctricos del mundo, en particular Perú y Chile, con el fin de orientar decisiones de futuros inversionistas. Asimismo, este análisis sirve para dimensionar el rol de las energías renovables en la matriz energética futura.

2.1.4. Ley Peruana sobre Promoción del Uso Eficiente de la Energía.

El estado peruano ha tratado de seguir la línea de los países desarrollados, promocionando el uso eficiente de la energía eléctrica a través de la Ley N° 27.345 emitida en Septiembre del año 2000, cuyo objetivo es declarar el interés nacional por el Uso Eficiente de la Energía (UEE) para de esta manera asegurar el suministro eléctrico, proteger al consumidor, fomentar la competitividad de la economía nacional y reducir el impacto ambiental negativo del uso y consumo de los energéticos.

En esta ley se establece como autoridad encargada de los programas de eficiencia energética al Ministerio de Energía y Minas, entregándole atribuciones para:

- Promover la creación de una cultura orientada al empleo racional de los recursos energéticos para impulsar el desarrollo sostenible del país, buscando un equilibrio entre la conservación del medio ambiente y el desarrollo económico.
- Promover la mayor transparencia del mercado de la energía, mediante el diagnóstico permanente de la problemática de la eficiencia energética y de la formulación y ejecución de programas, divulgando los procesos, tecnologías y sistemas informativos compatibles con el UEE.
- Diseñar, auspiciar, coordinar y ejecutar programas y proyectos de cooperación internacional para el desarrollo del UEE.
- La elaboración y ejecución de planes y programas referenciales de eficiencia energética.
- Promover la constitución de empresas de servicios energéticos (EMSES), así como la asistencia técnica a instituciones públicas y privadas, y la concertación con organizaciones de consumidores y entidades empresariales.
- Coordinar con los demás sectores y las entidades públicas y privadas el desarrollo de políticas de uso eficiente de la energía.
- Promover el consumo eficiente de energéticos en zonas aisladas y remotas.

2.1.5. Uso Eficiente de la Energía en la Gran Minería del Cobre Peruana.

Según cifras del año 2007², se tiene que un 31,4% del total del consumo eléctrico peruano es atribuible al sector industrial y minero, destacando el consumo de la gran minería del cobre y del oro en dicha fracción (45,2 [TWh]). Se observa además que dicho sector ha aumentando notablemente su consumo de energía en los últimos años, creciendo en más de un 16,3% entre los años 2006 y 2007.

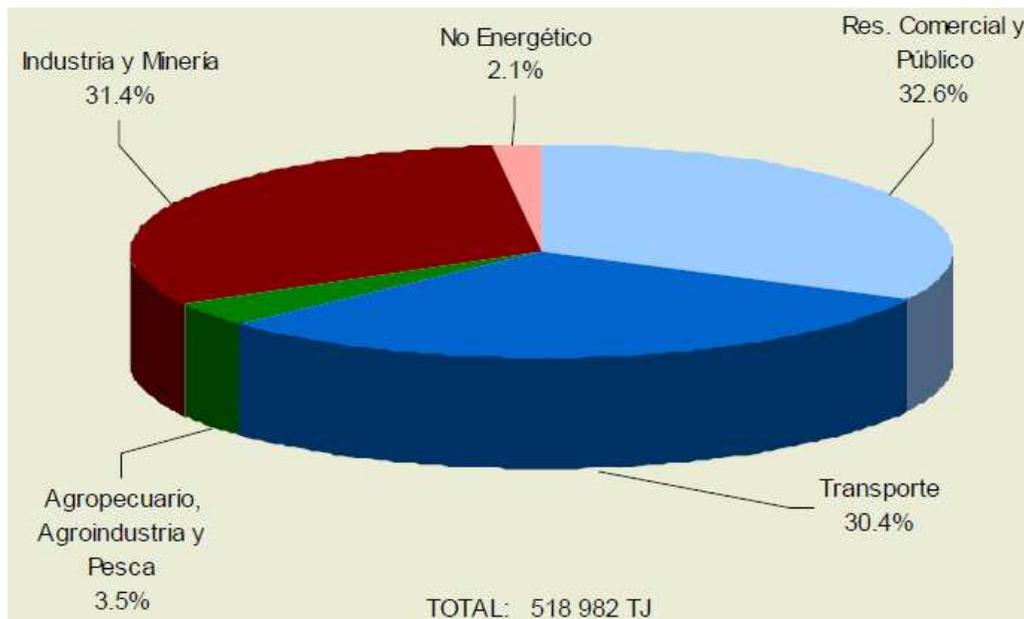


Figura N° 8: "Estructura del Consumo Final de Energía por Sectores Económicos 2007"

SECTOR	2006	2007	VARIACIÓN (%)
Res. Comercial y Público	158 883	169 349	6.6
Transporte	163 450	157 616	-3.6
Agropecuario, Agroindustria y Pesca	21 295	18 385	-13.7
Industria y Minería	140 106	162 967	16.3
No Energético	14 388	10 665	-25.9
TOTAL	498 121	518 982	4.2

Tabla N° 1: "Consumo Final Total de Energía por Sectores Económicos [TJ]"

² Balance Nacional de Energía del año 2007, Ministerio de Energía y Minas.

A continuación se muestran las Figura N° 9 y Figura N° 10, en donde se observa la gran relevancia que tiene la energía eléctrica dentro de las fuentes energéticas del Sector Minero Metalúrgico, llegando a alcanzar una importancia de un 50% en el año 2007 (aprox. 7 [TWh]), frente a un 25% del Diesel.

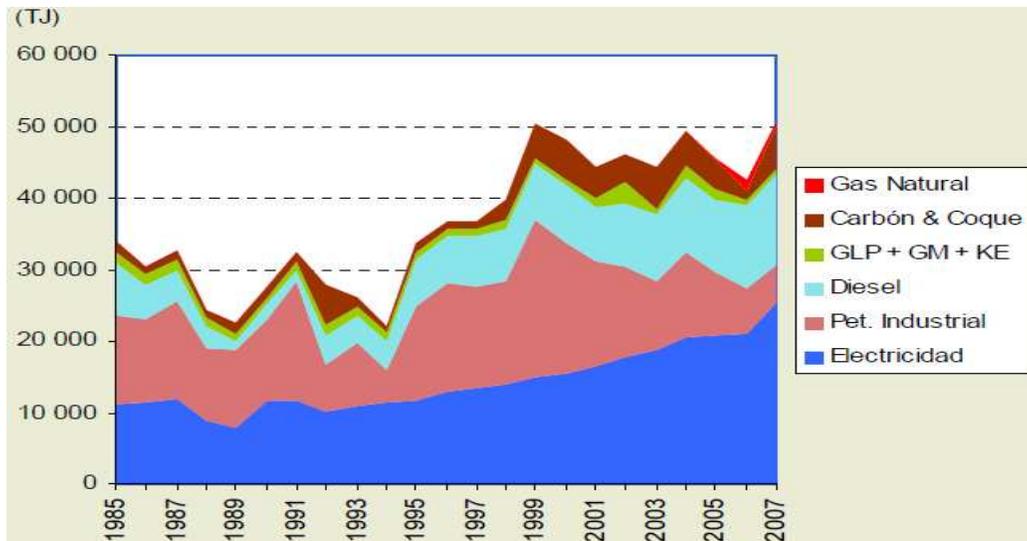


Figura N° 9: "Consumo de Energía - Sector Minero Metalúrgico"

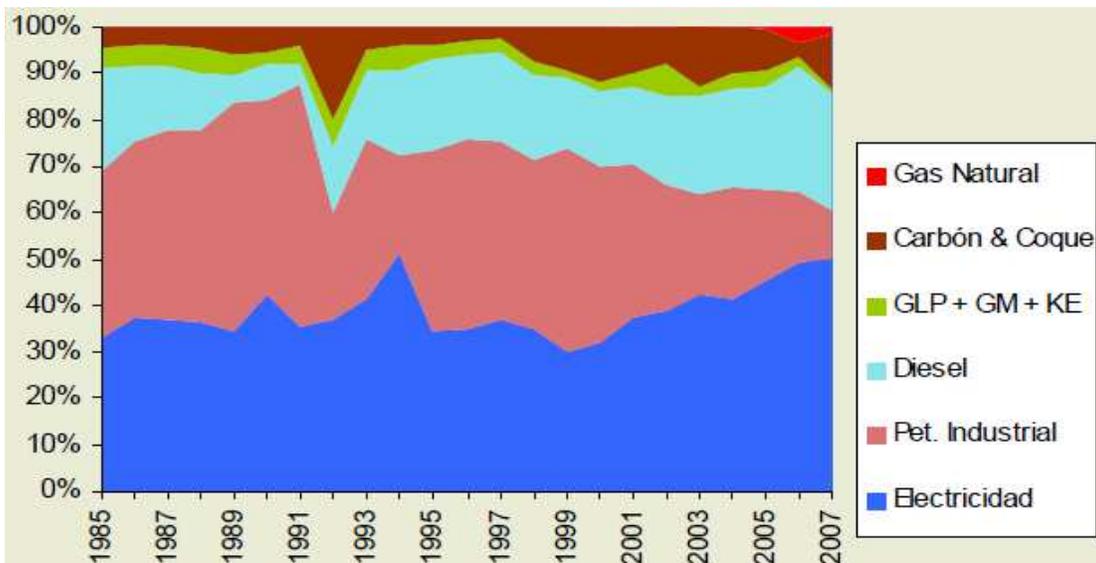


Figura N° 10: "Estructura de Participación por Fuentes"

Debido a la magnitud de estas cifras se hace evidente la necesidad de profundizar en la forma en que la Gran Minería utiliza la energía, identificando las medidas destinadas a mejorar el uso de estos recursos desde una perspectiva que apunte a mejorar la productividad y competitividad de la producción minera y reducir su responsabilidad sobre los impactos ambientales vinculados al uso y producción de energía.

Si bien, se aprecian interesantes mejoras en la eficiencia con que se usa la energía en algunas empresas de la Gran Minería y la Industria, existe todavía un significativo potencial no explotado de eficiencia energética en estos sectores. Es así como Anglo American Quellaveco, analizando los antecedentes expuestos sobre UEE y el compromiso de la empresa privada en este tema, es que considera la realización de un proyecto de UEE que permita aportar en aspectos teóricos y prácticos, al diseño y operación de proyectos mineros con altos niveles de eficiencia, en particular, se plantea la necesidad de desarrollar un modelo que permita comparar de manera técnico económica, la construcción de una planta concentradora de cobre con altos índices de eficiencia energética, con una planta con equipamiento estándar. En particular, los resultados podrían ser implementados en la planta Quellaveco (85 ktpd, demanda eléctrica media aprox. 100 MW), que Anglo American está desarrollando en el sur de Perú. Cabe señalar que se analizará el uso eficiente de energía en la mayoría de sus procesos, considerando la totalidad de los combustibles utilizados por la minería, ya sea electricidad, gas natural, diesel, aire comprimido, vapor, entre otros.

2.1.6. Procesos asociados a la Gran Minería del Cobre

Para llevar a cabo un programa de UEE es indispensable conocer a fondo el proceso en que se implementará, por lo que a continuación se realizará una revisión de las etapas involucradas en el proceso de extracción y procesamiento del cobre, facilitando con esto la lectura y comprensión del presente estudio.

Los procesos asociados a la gran minería del cobre se muestran a continuación:

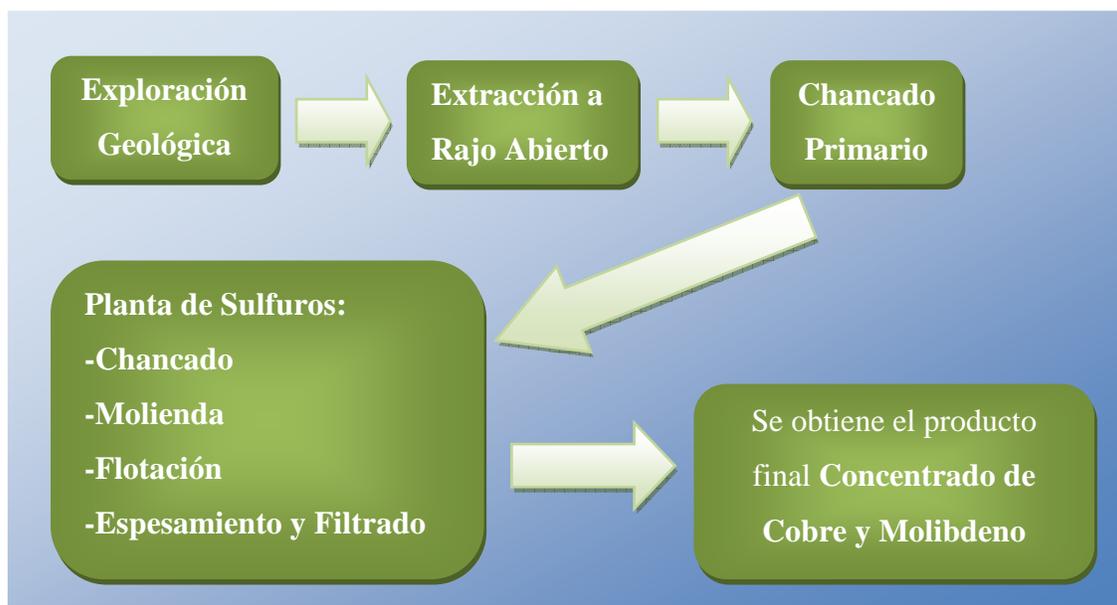


Figura N° 11: “Procesos Asociados a la Extracción de Cobre”

El proceso parte con la extracción del mineral, ya sea de manera subterránea o en minas a rajo abierto, para posteriormente ser triturado en el proceso de chancado. Una vez realizado lo anterior, el material puede ser llevado a la planta de sulfuros o de óxidos, que a través de distintos procesos permiten extraer el cobre del mineral.

A través de la planta de sulfuros se obtiene como producto el concentrado de cobre; o mezcla de sulfuro de cobre, fierro y una serie de otros metales, con una pureza cercana al 31% de cobre. A su vez, el concentrado de cobre puede ser sometido a los procesos de fundición y electrorefinación, que permiten obtener cátodos de alta pureza de cobre (99,99%).

De la misma manera, al realizar el procesamiento del mineral a través de la planta de óxidos se obtienen cátodos de cobre, o cobre de alta pureza (99,99%). Mayor detalle de cada uno de estos procesos puede ser encontrado en la sección *Anexos* de este documento.

Cabe señalar, que en los procesos de extracción y refinación del cobre, la etapa que consume la mayor cantidad de energía es la fase de **concentrado (53%)**, por lo que resulta de gran trascendencia la observación de las potencialidades de eficiencia energética en este proceso.

CONSUMOS DE ENERGÍA ELÉCTRICA POR PRODUCTOS DE COBRE (*)						
Procesos	% Consumo 2004	Producto Comercial	Coef. Unitarios (KWH / TMF)		Variación	Causas
			1995	2004		
Extracción Concentración	(53%)	CONCENTRADO (30% Cu)	1.837,4	2.204,1	20,0%	Baja de leyes, Reemplazo de secadores por filtros
Fundición	(11,6%)	BLÍSTER (99,5 % Cu)	2.615,4	3.302,7	26,3%	Eliminación de hornos de reverberos, Incorporación Horno Flash, Conz TTE y Noranda
Refinación Electrolítica	(2,4%)	CÁTODOS ER (99,99% Cu)	2.947,5	3.654,1	24,0%	Causas anteriores. Consumo estable en refinación
Extracción / Lixiviación / Ext. Solventes / Elect.Obtención	(33%)	CÁTODOS SX EW (99,99% Cu)	3.291,4	3.111,5	-5,5%	Consumo estable y más eficiente

Tabla N° 2: “La energía eléctrica y el desarrollo de la minería del cobre en Chile”³

³ Fuente: Cochilco

2.2. Antecedentes Específicos

2.2.1. Anglo American PLC

Anglo American PLC (AAPLC) es un grupo líder mundial enfocado en el negocio minero, con operaciones en 45 países alrededor del mundo, en las cuales se desempeñan más de 140.000 trabajadores. Su casa matriz se encuentra en Londres y sus acciones se transan principalmente en la Bolsa de Valores de la capital del Reino Unido.

A partir del desarrollo de sus seis unidades de negocios (Platino, Diamantes, Metales Básicos, Metales Ferrosos, Carbón y Minerales Industriales), logró ventas por US\$32.964 millones y utilidades por US\$5.215 millones durante el año 2008. En este escenario, las operaciones mineras en Chile generaron el 12% de los ingresos y aportaron con el 22,5% de las utilidades de la compañía.

Anglo American PLC participa además en los mercados financieros de Sudáfrica, Suiza, Namibia y Botswana. En 2006, mantuvo su índice regional European STOXX y el segundo lugar, con un puntaje de 84%, en el índice Dow Jones Sustainability Index (DJSI), donde el promedio de la industria es de 57% y el más alto es de 86%. El grupo busca alcanzar estándares de clase mundial en todas sus áreas de negocio, que aborda a través de sus divisiones, las cuales generan la siguiente distribución de sus ganancias operacionales.



Figura N° 12: “Importancia de Anglo Base Metals según Ganancias Operacionales”

Uno de los desafíos más relevantes que se ha impuesto Anglo American PLC ha sido mejorar la **eficiencia en el uso de la energía y del agua**, y al mismo tiempo **reducir las emisiones de CO₂**. Con esta finalidad, la empresa se ha fijado metas exigentes para los próximos años, con el objetivo de consolidar un futuro sustentable, tanto para la compañía como para las futuras generaciones.

2.2.2. Política para el UEE de AAPLC

AAPLC adhiere a la preocupación manifestada en el Informe Stern y asume los compromisos contraídos por Inglaterra, Chile y Perú respecto del Protocolo de Kyoto. Con este objetivo en mente, en octubre de 2004 el Presidente Ejecutivo de Anglo American anunció a todos los trabajadores el lanzamiento de un Programa de Eficiencia Energética. Esta iniciativa implicó un proceso de planificación que fijó metas responsables, metodologías y pasos para avanzar hacia el logro de los objetivos propuestos en cada una de las divisiones.

Uno de los hitos de AAPLC fue la creación del Comité de Energía, con representantes de todas las divisiones, para definir el cuadro general de consumos y emisiones 2003 – 2014. Como una de las primeras medidas, en noviembre 2005 se lanzó la campaña “Uso responsable de energía”, cuyo objetivo fue educar a todos los empleados sobre el consumo racional de los diversos tipos de energía que se utilizan en la empresa y en la vida diaria.

Con el objetivo de conocer en detalle los consumos de los diferentes tipos de energía, las emisiones de CO₂ y el consumo de agua, se hizo un levantamiento y balance detallado en cada división, separado por procesos productivos y tipos de energía consumida. Esto permitió conocer la distribución de los consumos energéticos para orientar los esfuerzos iniciales a aquellos más relevantes.

Luego, para tener una estandarización en el método de medición y claridad respecto de los resultados obtenidos en las diferentes iniciativas, se propuso una metodología que permite evitar el uso de indicadores globales, a través del empleo de indicadores específicos para efectos de control al interior de los procesos. Es así que para el cálculo de los ahorros se consideran las reducciones de consumo de energía (GJ), reducciones de emisión de CO₂ (ton CO₂) y reducciones en el consumo de agua fresca (m³), como producto de iniciativas por sobre el negocio “usual” y que tengan carácter de permanentes en el tiempo.

Debido a ello, y como una manera de fortalecer su postura frente al calentamiento global, se propuso cumplir las siguientes metas:

- Reducción de las emisiones de carbono (t CO₂) de 10% para el año 2014 en relación con la línea de base ajustada del año 2004.
- Reducción del uso de energía (GJ) de 15% para el año 2014, en relación con la línea de base ajustada del año 2004.
- Reducción del uso de agua (m³) de 15% para el año 2014, en relación con la línea de base ajustada del año 2004.

Cabe señalar que las reducciones son en “relación con la línea de base ajustada del año 2004”, esto ocurre ya que el ambiente minero lleva implícitamente un aumento de energía a medida que la operación progresa en el tiempo, dado principalmente por un aumento en las distancias de transporte, mayor profundidad en los rajos, cambios en las leyes del mineral, entre otros; lo que se suma a los aumentos de producción.

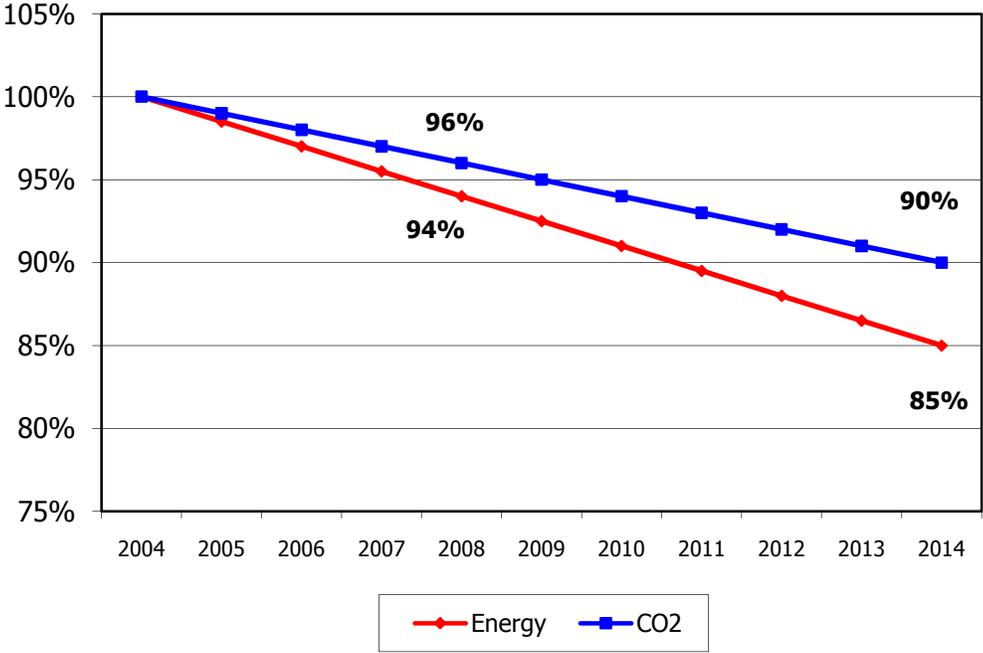


Figura N° 13: “Metas impuestas por Anglo American para el año 2014”

2.2.3. Alcance del Proyecto

Debido a la política de UEE establecida como directriz del sistema de gestión de Anglo American PLC, y a la importancia que ha adquirido el tema en la agenda internacional en los últimos años, es que se desarrolla una guía para la implementación eficiente de una planta concentradora de cobre, cuya construcción no sólo disminuirá el consumo de energía, sino que indirectamente permitirá aumentar el consumo de cobre, sentando un precedente en la Industria de la Gran Minería.

De esta manera, y tomando en cuenta los puntos de la sección 2.1.1, es que se considera el diseño, operación y mantenimiento eficiente de la planta concentradora Quellaveco, cuyas características técnicas la hacen propicia para la implementación de las consideraciones antes mencionadas.

El proyecto consiste en desarrollar una guía de cómo diseñar, operar y mantener de manera eficiente una planta concentradora de cobre, realizando evaluaciones técnicas y económicas para la incorporación de medidas de uso eficiente de la energía, para de esta manera observar de manera global los ahorros energéticos totales que permitirán estas acciones, así como observar las inversiones adicionales que requerirán estas medidas. Se evaluará además la disminución en las emisiones de CO₂ que permitirá el uso eficiente de la energía, así como los beneficios que se obtendrían al ingresar el proyecto como un mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Cabe señalar que este informe podría ser aplicado a cualquier planta concentradora de cobre, pero se tomará como referencia la planta concentradora Quellaveco, no significando esto una pérdida de generalidad en el estudio, ya que la metodología a utilizar es válida para cualquier planta industrial, y en particular, es aplicable a todas las divisiones de AAPLC.

A continuación se muestran algunas de las medidas de uso eficiente de la energía que serán estudiadas en este informe:

- Utilización de motores eficiente y de alta eficiencia.
- Utilización de variadores de frecuencia en compresores, ventiladores, correas transportadoras y bombas hidráulicas.
- Utilización de transformadores eficientes.
- Utilización de iluminación eficiente, ya sea tecnología LED o inducción magnética.
- Mantenimiento eficiente en los distintos equipos de la planta.
- Gestión del combustible utilizado por camiones de gran tonelaje.
- Repercusión de las medidas de UEE sobre el sistema de transmisión peruano.

3. Caracterización del Proceso Productivo en la División Quellaveco

La planta concentradora Quellaveco será una de las divisiones de Anglo American Quellaveco S.A. (AAQSA), filial de AAPLC considerada entre las empresas productoras de cobre más grandes del mundo. Dadas las características físicas del lugar donde se instalará Quellaveco, así como el interés de AAQSA en establecer una planta concentradora de cobre con altos índices de eficiencia es que se eligió esta división como modelo en el desarrollo de alternativas de UEE en los procesos, ya sea en su operación, diseño o mantenimiento.

Para esto, se debe avanzar en la definición de los procesos productivos asociados a Quellaveco, de manera de seleccionar él o los procesos que presenten una mayor potencialidad de implementación en un programa de UEE. Esto se realiza, ya que la comprensión del esquema de funcionamiento de la división es determinante para la correcta selección del nivel de estudio, debido a que no se pueden incorporar todas las medidas de optimización para lograr un UEE en un solo proyecto, debido a limitaciones naturales que existen en los montos de inversión, por lo que es necesario poder evaluar que alternativas tienen mayores beneficios para la empresa, ya sea en disminución de energía consumida, reducción en las inversiones, disminución en las emisiones de CO₂, entre otros. Cabe señalar que en cada alternativa de ahorro energético es importante definir a partir de qué nivel se iniciará el proyecto, para de esta manera establecer recomendaciones o extrapolaciones con otras divisiones de la empresa. Posteriormente, se procederá a evaluar los diferentes equipos que interactúan en los procesos productivos, para así realizar un análisis detallado de cada uno de ellos, y poder conocer las condiciones de operación y de mercado bajo las cuales es factible la implementación de las alternativas de UEE.

3.1. Breve reseña del proyecto Quellaveco

La planta concentradora Quellaveco corresponde a un proyecto de la empresa Anglo American Quellaveco S.A. (AAQSA) cuyo objetivo es explorar, explotar, procesar y comercializar el concentrado de cobre y molibdeno proveniente de este yacimiento. Quellaveco se localiza a 38 kms de Moquegua, en la Provincia de Mariscal Nieto en el Sur de Perú, muy cercana a las operaciones de la compañía Southern Copper Peru, Cuajone y Toquepala. Los depósitos de mineral están localizados entre los 3.400 y 3.900 msnm en el Valle del Río Asana, mientras que la planta concentradora y los relaves se localizarán respectivamente en los cañones de Papujune y Cortadera entre los 3.600 y 3.200 msnm.

El agua fresca necesaria para el proceso será obtenida de los ríos Titire y Vizcachas a 4.300 msnm. La energía eléctrica será suministrada por una línea de 37km, en un nivel de tensión de 220 kV desde la subestación Montalvo. El concentrado de cobre final será transportado por camiones desde la mina y descargado en el puerto de Ilo-Enesur.

A continuación se muestra un resumen de las características principales del Proyecto Quellaveco, y un mapa donde se muestra su futura ubicación:

Proyecto Quellaveco	
Reservas	938 millones de toneladas de mineral, 0.63% Cu
Método de Explotación	Tajo abierto
Método de Tratamiento	Chancado, Molienda y Flotación
Tasa de Producción	Aproximadamente 200.000 [tn] Cu año
Inversión	US\$ 3.070 millones

Tabla N° 3: “Datos principales del Proyecto Quellaveco”

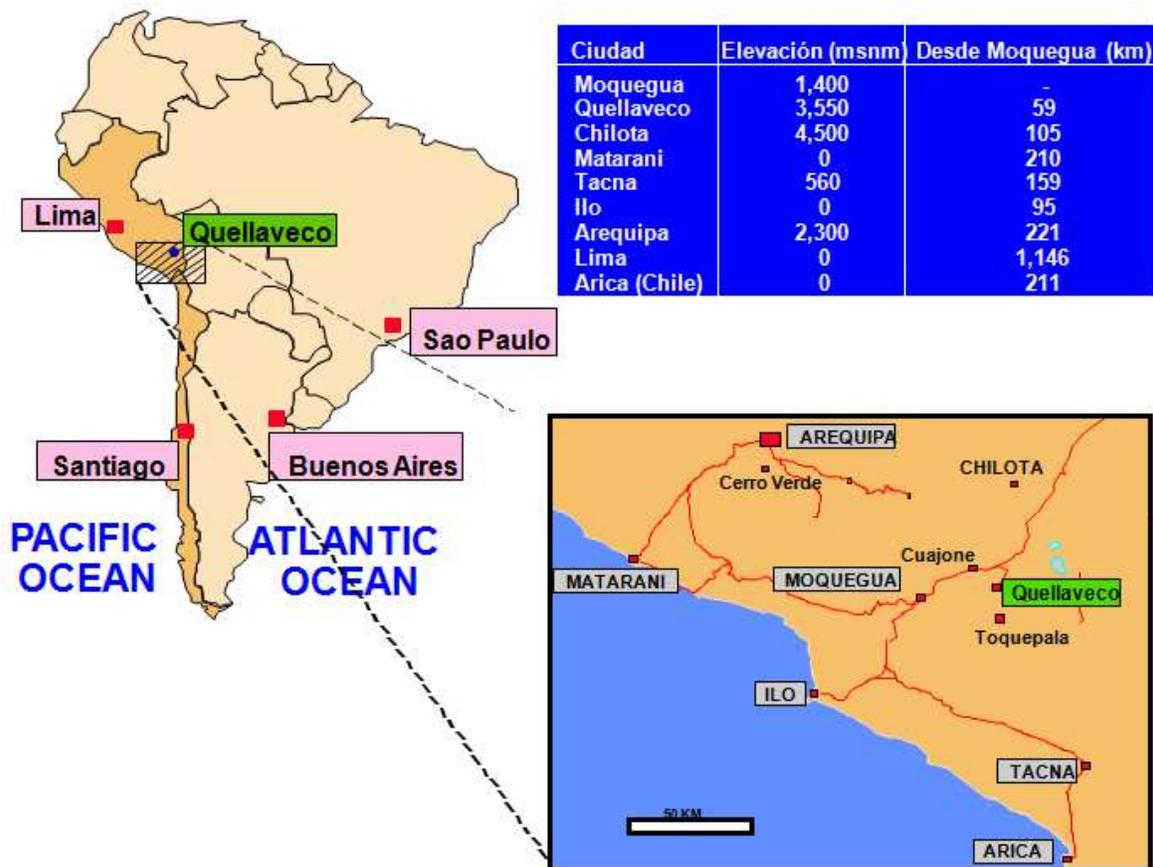


Figura N° 14: “Ubicación geográfica del Proyecto Quellaveco”

3.2. Proceso asociado a la planta Quellaveco

Para llevar a cabo un programa de uso eficiente de la energía (UEE) es indispensable conocer a fondo los procesos en los cuales se implementarán las medidas enfocadas en aumentar la eficiencia. Debido a ello, se realizará una revisión de las etapas involucradas en el proceso de extracción y procesamiento del cobre, describiendo cada una de ellas y facilitando con esto la lectura y comprensión del presente estudio.

En la Figura N° 15, se muestran un esquema con los diferentes procesos asociados a la planta concentradora Quellaveco:

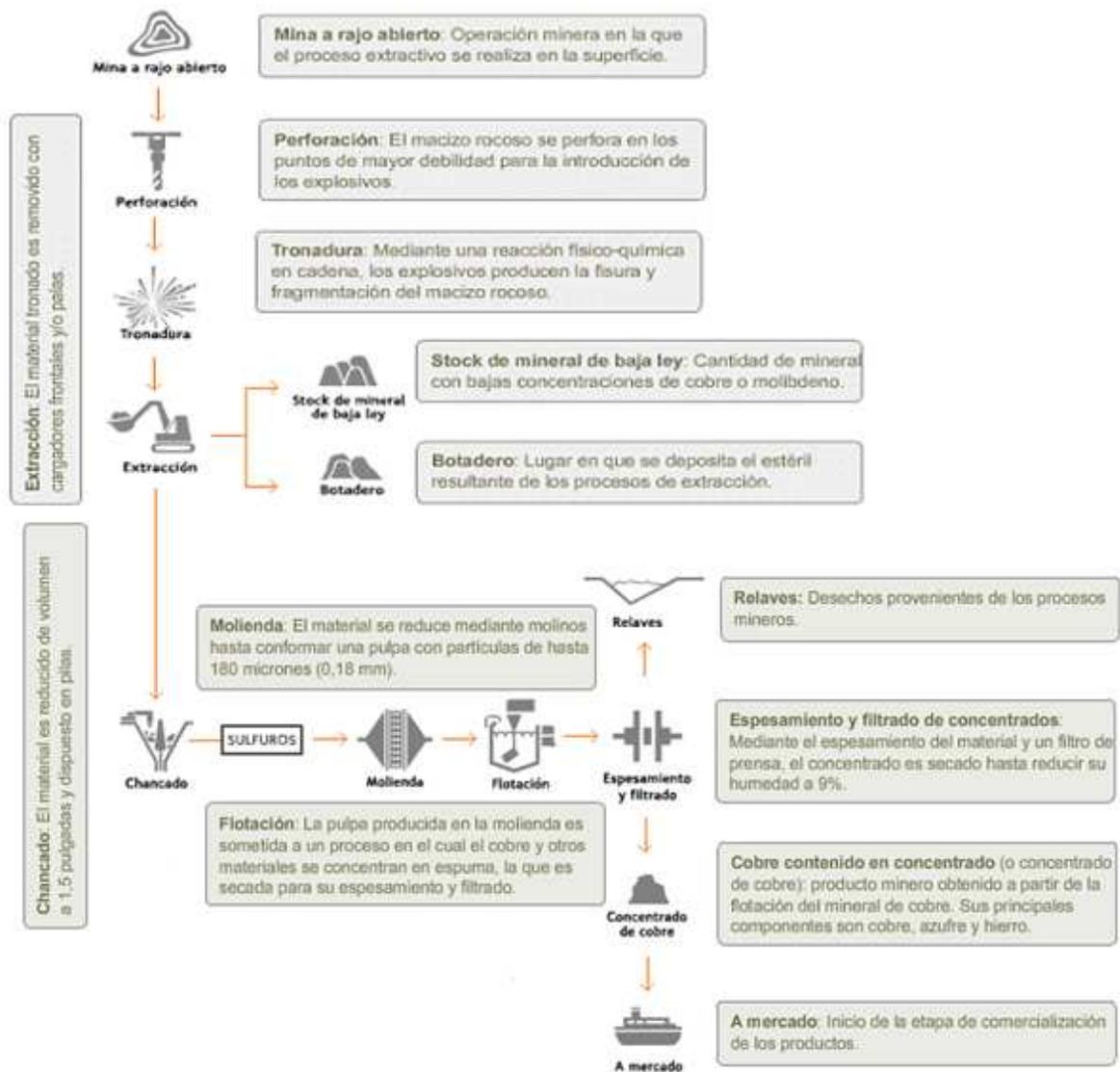


Figura N° 15: “Esquema del proceso productivo del Proyecto Quellaveco”

El proceso se inicia extrayendo el mineral de la mina a rajo abierto, para luego ser triturada en el proceso de chancado, cuyo objetivo es disminuir el tamaño del material hasta piedras que no sobrepasen las 1,5 pulgadas. Posteriormente el mineral es trasladado a través de una correa transportadora hasta la planta concentradora para comenzar el proceso de molienda, que permitirá reducir el tamaño de las partículas hasta los 180 micrones (0,18 mm) conformando de esta manera una pulpa que permitirá trabajar el material con mayor facilidad. Cabe señalar, que existirá además una etapa de remolienda para así asegurar el tamaño máximo de las partículas al interior de la pulpa.

La pulpa que se obtiene del proceso de preparación mecánica contiene todavía elementos que no son útiles, y por lo tanto, deben ser eliminados de ella a través de algún método de separación de componentes. En esta planta concentradora, la separación se realizará a través de un proceso de flotación por espumas, utilizando de esta manera las propiedades específicas que posee la superficie del mineral. Cabe señalar que este mecanismo de separación está fuertemente condicionado por el tamaño de las partículas, por lo que es indispensable que el proceso de preparación mecánica actúe de la manera más eficiente posible.

Finalmente, los productos que salen de las diferentes etapas de concentración deben pasar por un proceso de espesado y filtrado, con el objetivo de eliminar los altos contenidos de agua con los que cuenta el mineral, para así obtener el concentrado de cobre final que podrá ser comercializado en el mercado.

3.3. Consumo de Energía por Procesos Productivos Quellaveco

A continuación, se presentan los consumos de energía asociados a los diferentes procesos que actúan en la planta concentradora Quellaveco, suponiendo el caso base de que no se utilizarán mecanismos que permitan aumentar la eficiencia energética de los procesos.

Consumo de Energía Global ⁴ [GJ] por Sectores de la Planta			
Área	Consumo [GJ]	Consumo [MWh]	Consumo [%]
Impulsión Agua Titire y Vizcacha	111.719	31.033	2,47%
Mina	1.818.560	505.156	40,20%
Molienda	1.760.038	488.899	38,91%
Flotación y Remolienda	403.775	112.160	8,93%
Planta Molibdeno	23.383	6.495	0,52%
Planta de Cal y Reactivos	14.199	3.944	0,31%
Espesamiento y Filtrado de Concentrado	27.652	7.681	0,61%
Espesamiento de Relaves	124.080	34.467	2,74%
Compresores Aire Planta	18.368	5.102	0,41%
Recirculación de Agua	187.262	52.017	4,14%
Campamento y Edificios Auxiliares Planta	34.820	9.672	0,77%
TOTAL	4.523.857	1.256.627	100,00%

Tabla N° 4: “Consumo Global de Energía por Sectores de la Planta”

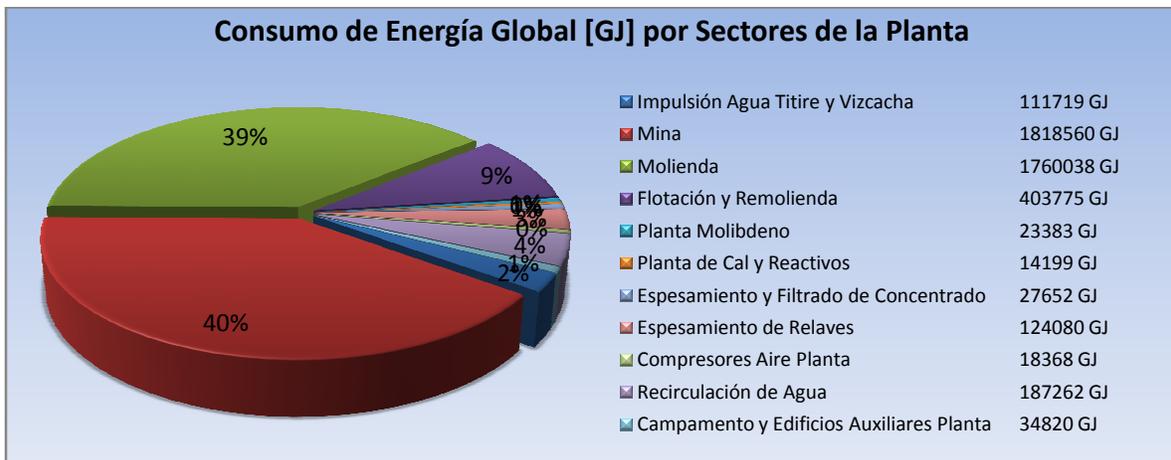


Figura N° 16: “Consumo de Energía Global [GJ] por Sectores de la Planta”

⁴ Incluye todos los tipos de energía usados en la planta, ya sea electricidad, diesel o gasolina.

Al observar la Figura N° 16, se puede apreciar que sobre el 79% de la energía global de la planta es utilizada en la Mina y en los procesos de Molienda, esto se debe principalmente a que los mayores consumos de electricidad y diesel se encuentran en estos sectores. En particular, en la zona de Molienda se consume el 61% de la energía eléctrica debido principalmente a que es en este sector en donde se encuentran los grandes molinos (un molino SAG y dos molinos de Bolas) que permitirán reducir el tamaño del mineral hasta llevarlo a partículas de un tamaño menor a los 180 micrones, y por lo tanto, es en este proceso en donde se consume la mayor cantidad de energía eléctrica. Por otra parte, el 99% de la energía proveniente del diesel es utilizado en la mina, de los cuales el 84% es utilizado solamente en el transporte y carguío del mineral.

A continuación, se muestra el detalle de los consumos de diesel, electricidad y gasolina en los diferentes sectores de la planta:

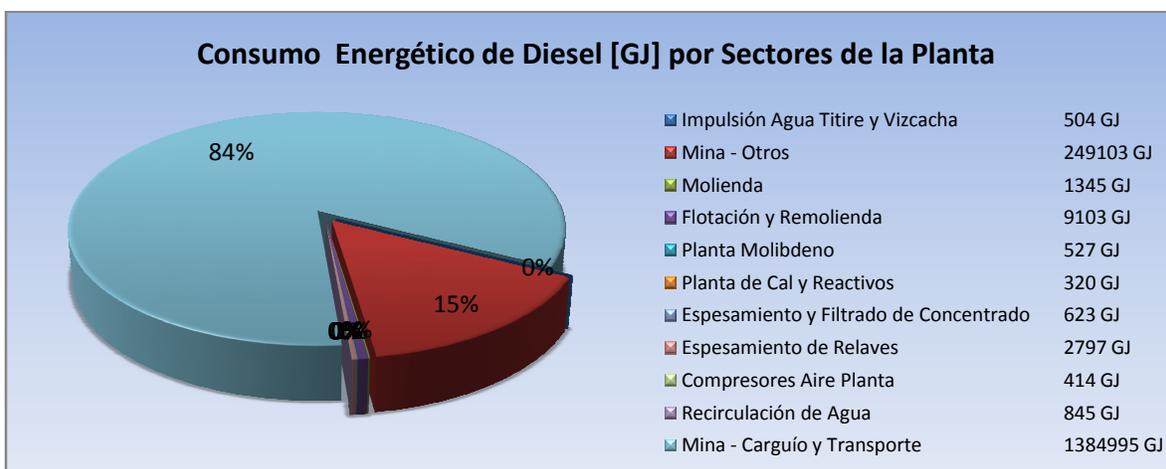


Figura N° 17: “Consumo Energético de Diesel [GJ] por Sectores de la Planta”

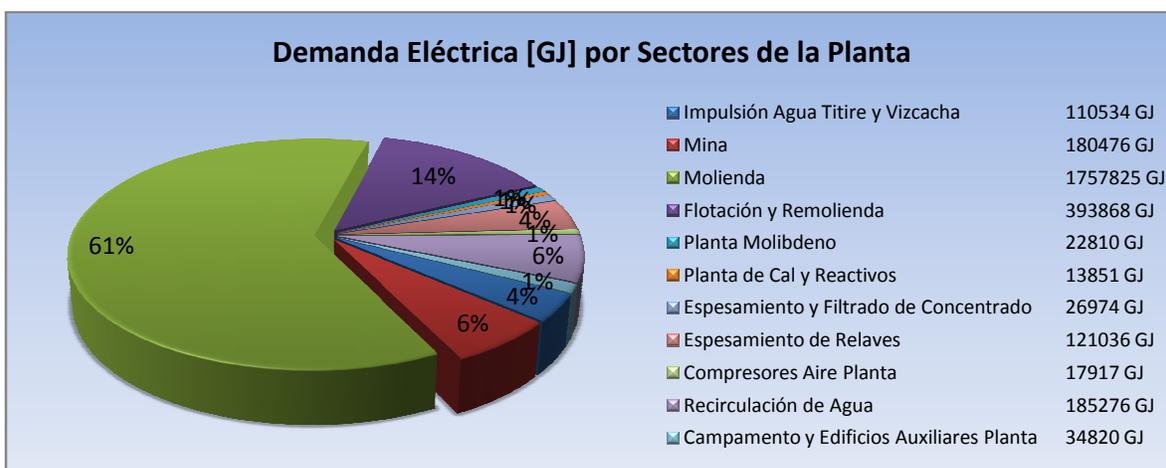


Figura N° 18: “Demanda Eléctrica [GJ] por Sectores de la Planta”

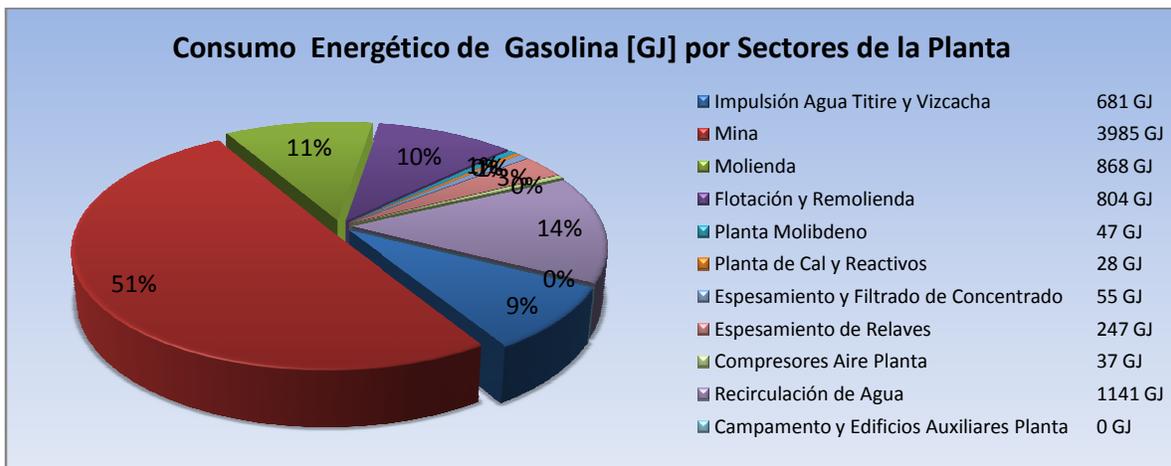


Figura N° 19: “Consumo Energético de Gasolina [GJ] por Sectores de la Planta”

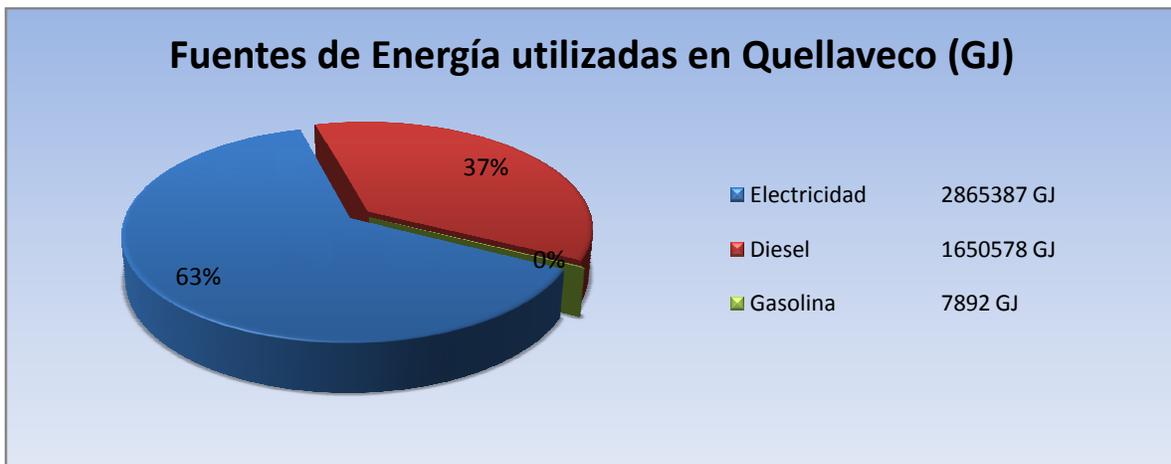


Figura N° 20: “Fuentes de Energía utilizadas en Quellaveco (GJ)”

Se puede observar que los mayores consumos de energía provienen de la electricidad y el diesel, por lo tanto, estos dos suministros serán los ejes principales en los cuales se basará la búsqueda de ahorros energéticos.

Para poder completar el análisis de demanda energética de la planta, se clasificaron los consumos eléctricos en diferentes categorías dependiendo del tipo de equipo a utilizar en los procesos, entre los cuales se pueden nombrar motores, bombas, ventiladores, compresores, transformadores, luminarias, entre otros. Cabe señalar que el 51,8% de la energía eléctrica consumida en la planta es utilizada para abastecer los molinos SAG, Bolas y de Remolienda, lamentablemente dadas las características “fijas” de estos equipos es complejo tratar de modelar su operación para que trabajen de manera eficiente, por lo tanto, es necesario centrar los esfuerzos en búsqueda de ahorros energéticos en el resto de los equipos de la planta, lo que constituirá el trabajo a desarrollar en este proyecto.

A continuación, se muestra un detalle del consumo energético de los diferentes equipos que participarán en la planta concentradora Quellaveco.

Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [GJ]			
Área	Consumo [GJ]	Consumo [MWh]	Consumo [%]
Bombas	586.386	162.885	20,46%
Tableros	12.245	3.402	0,43%
Otros Motores	11.474	3.187	0,40%
Agitadores	7.595	2.110	0,27%
Correas Transportadoras	133.040	36.955	4,64%
Ventiladores	8.747	2.430	0,31%
Iluminación	23.117	6.422	0,81%
Compresores	27.905	7.751	0,97%
Otros	221.969	61.658	7,75%
Chancadores	36.435	10.121	1,27%
Celdas	241.946	67.207	8,44%
Molinos SAG	628.422	174.562	21,93%
Molinos de Bolas	753.903	209.418	26,31%
Molinos de Remolienda	103.198	28.666	3,60%
Transformadores	69.004	19.168	2,41%
TOTAL	2.865.387	795.941	100,00%

Tabla N° 5: “Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [GJ]”

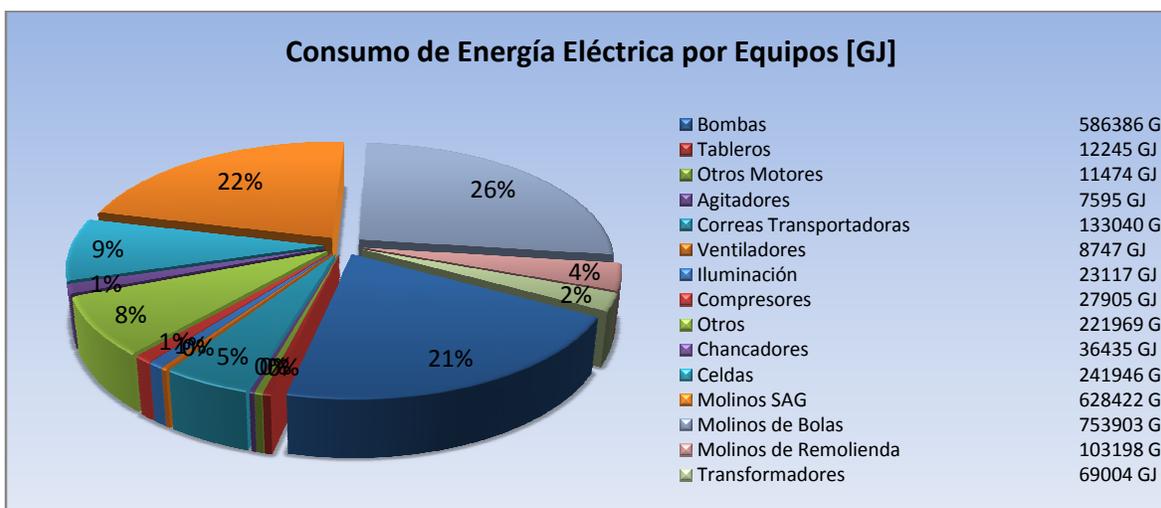


Figura N° 21: “Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [GJ]”

Dado que este trabajo busca abarcar la mayor parte de la cadena de producción de una planta concentradora de cobre, en la búsqueda de potenciales fuentes de eficiencia energética, se debe realizar un estudio detallado sobre el funcionamiento de los distintos equipos que actúan en los procesos que permitirán obtener el concentrado. En particular, los métodos que permitan aumentar la eficiencia de los equipos, podrán ser replicados, no sólo en otras divisiones de la compañía u otras empresas mineras, sino que sus resultados pueden ser aplicados a otros sectores productivos.

Debido a la naturaleza de este proyecto con el que se busca dar un ejemplo en programas de eficiencia energética, ya sea a nivel corporativo o sectorial, es que se hace necesaria la recopilación de una gran cantidad de información relacionada a la planta, que será necesario manejar y analizar de manera óptima, para así observar las mejoras que tienen las diferentes alternativas de ahorro energético con respecto a otras. En particular, los resultados a comparar entre las distintas alternativas serán los ahorros de energía que estos tendrán, así como sus reducciones en emisiones de CO₂, y los beneficios que se obtendrán al desarrollar estos proyectos como mecanismos de desarrollo limpio, y que permitirán transar bonos de carbono en el mercado.

4. Selección del Nivel de Estudio

Dada la necesidad de abarcar todo el proceso productivo del proyecto Quellaveco en búsqueda de ahorros energéticos, es que se hace indispensable analizar con detalle el sistema eléctrico de la planta, así como las áreas que participarán del proceso de concentración del cobre, para de esta manera entender la forma en cómo se distribuirán los flujos de energía.

4.1. Caracterización del Sistema Eléctrico del Proyecto Quellaveco

El sistema eléctrico de Quellaveco será alimentado a través de dos líneas de transmisión que permitirá abastecer los consumos de la planta concentradora, así como el sistema de impulsión de agua proveniente de los ríos Titire y Vizcacha. La planta concentradora será alimentada desde la SS/EE Papujune en 23 [KV], cuya energía es proveniente de la SS/EE Montalvo en 220 kV localizada a 38 [km] de la planta, y que entregará la energía a través de una línea de transmisión en doble circuito. Similarmente, el sistema de impulsión de agua de los ríos Titire y Vizcacha será alimentado desde la SS/EE Montalvo a través de una línea de transmisión de 90 [km] en un nivel de tensión de 220 [kV] (línea existente).

Con el fin de observar la distribución de los consumos a través de la planta, se dividió el sistema eléctrico según sus niveles de tensión de mayor importancia, es decir, un sistema de alta tensión en 23 [kV] que abastece directamente a los grandes molinos, dos sistemas de media tensión en 4,16 [kV] y 7,2 [kV] que abastecen los diferentes procesos de la planta concentradora y a la mina, respectivamente; y un sistema en baja tensión en el cual se instalarán los centros de control de motores y otros equipos.

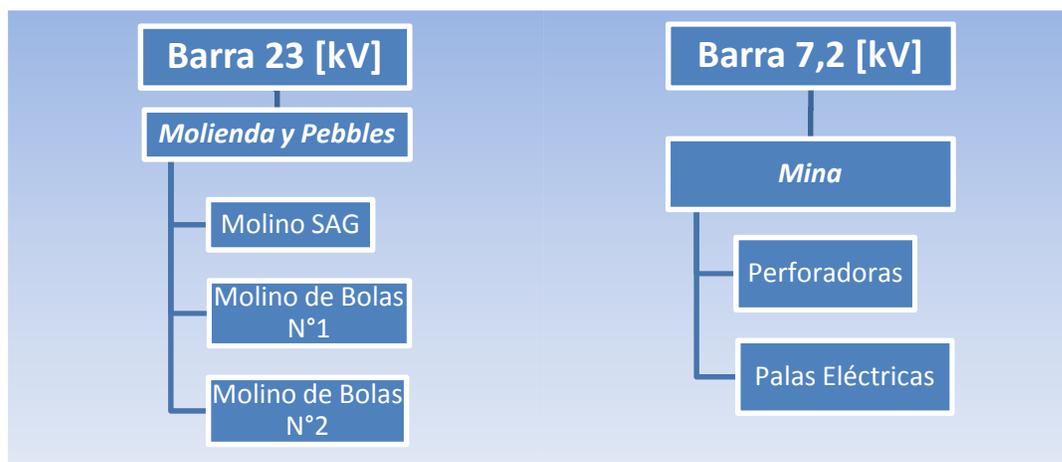


Figura N° 22: “Consumos asociados a los niveles de tensión de 7,2 [kV] y 23 [kV]”

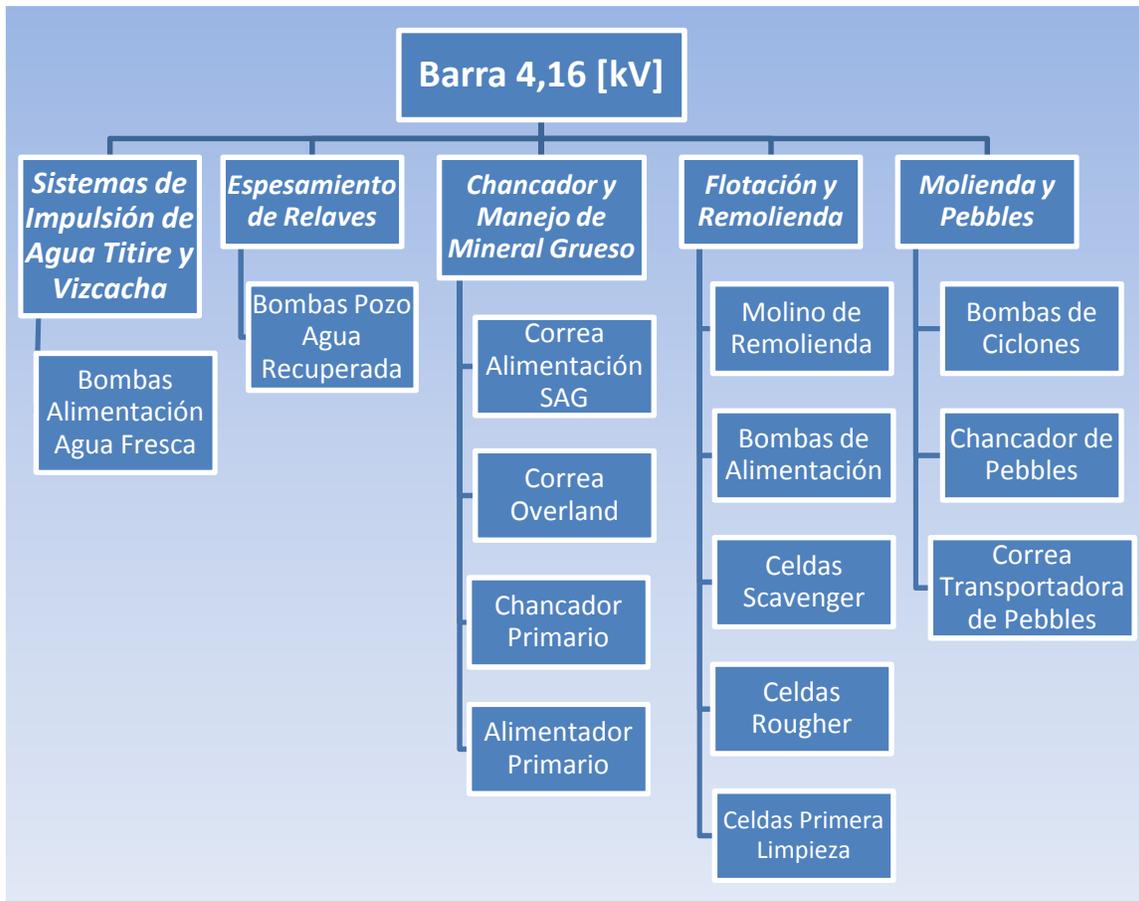


Figura N° 23: “Consumos asociados al nivel de tensión de 4,16 [kV]”

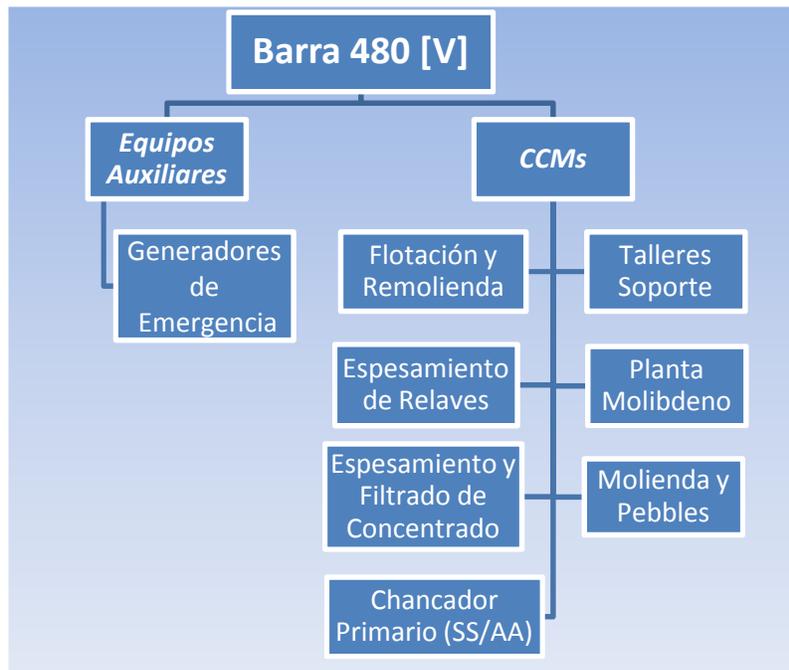


Figura N° 24: “Consumos asociados al nivel de tensión de 480 [V]”

Cabe señalar, que las figuras mostradas anteriormente fueron obtenidas directamente de los diagramas unilineales del sistema eléctrico del proyecto Quellaveco, en donde se muestra claramente la importancia de la barra de 23 [kV], ya que a partir de ella se “colgarán” los transformadores auxiliares que permitirán abastecer los diferentes procesos y consumos de la planta.

En los esquemas anteriores, es posible observar la presencia de 4 tipos de consumos. Por una parte, se encuentran los equipos conectados directamente a la barra de alta tensión 23[kV], como son el Molino SAG y los dos Molinos de Bolas, que a través de sus transformadores y cicloconvertidores permiten alimentar estos grandes equipos de manera permanente. A su vez, se encuentran los equipos de media tensión como son: palas eléctricas; perforadoras; bombas; correas alimentadoras y transportadoras; celdas y chancadores que se conectan a los niveles de tensión de 4,16 [kV] y 7,2 [kV] de forma directa. Para finalizar, se encuentra el sistema de baja tensión, en el cual se conectan los centros de control de motores (CCMs) de las diferentes etapas del proceso de concentrado del cobre y que permitirán alimentar todos los motores de baja tensión que trabajarán en la línea de producción.

4.2. Caracterización de los Procesos y Equipos

Dado que ya se tiene una distribución de los consumos de energía de los diferentes procesos y equipos que intervendrán en la planta concentradora, se hace de gran utilidad caracterizar la demanda dividiéndola según indicadores específicos de las maquinarias. En particular, el criterio a utilizar para definirla será la potencia de los equipos, así como variables estimadas que inciden directamente en la operación de ellos, como son el factor de carga y el número de horas de utilización anual, cuyos valores fueron obtenidos a partir de datos entregados por metalurgistas de Anglo American Chile, y que consideran una operación normal de la planta al producir 85 ktpa de concentrado de cobre.

A continuación, se muestran las diferentes variables que permitirán caracterizar los procesos y equipos de una manera correcta, y que posibilitarán un análisis más acabado y simple de los consumos que interactuarán en la planta. Cabe señalar, que las variables fueron divididas en rangos para de esta manera facilitar su estudio:

- **Potencia:** Muestra la potencia instalada en los diferentes sectores de la planta, así como su distribución por tipo de maquinaria en [kW], dividida en función de la potencia nominal de los equipos [kW].
- **Tiempo de Utilización:** Muestra el número de horas anuales de uso promedio que tendrá un equipo en los diferentes sectores de la planta, así como su distribución por tipo de maquinaria en [hrs/año], dividida en función de la potencia instalada. Cabe señalar, que el tiempo de utilización fue entregado por metalurgistas para las diferentes maquinarias que interactuarán en la planta.

- **Factor de Carga:** Muestra el grado de carga de los equipos en los diferentes sectores de la planta, así como su distribución por tipo de maquinaria en [%], lo que es equivalente a $[0/1]$, dividida en función de la potencia instalada. Este factor indica el cociente entre la potencia media consumida y la potencia nominal. Cabe señalar, que el factor de carga fue entregado por metalurgistas para las diferentes maquinarias que interactuarán en la planta.
- **Cantidad:** Muestra el número de equipos en los diferentes sectores de la planta, así como su distribución por tipo de maquinaria en [unidades], dividida en función de la potencia nominal de los equipos en [kW].

Variable	Unidades	Rangos	Unidades
Potencia	[kW]	(0,30]; (30,100]; (100,200]; (200,350] ; (350,500]; (500,1000]; (1000,2000]; (2000,3000]; (3000,∞)	[kW]
Tiempo Utilización Anual	[hrs/año]	(0,876]; (876,1752]; (1752,2628]; (2628,3504]; (3504,4380]; (4380,5256]; (5256,6132]; (6132,7008]; (7008,7884]; (7884,8760]	[hrs/año]
Factor De Carga	[%]	(0,10]; (10,20]; (20,30]; (30,40]; (40,50]; (50,60]; (60,70]; (70,80]; (80,90]; (90,100]	[%]
Cantidad	[unidades]	(0,30]; (30,100]; (100,200]; (200,350] ; (350,500]; (500,1000]; (1000,2000]; (2000,3000]; (3000,∞)	[kW]

Tabla N° 6: “Variables que permitirán caracterizar los consumos de Quellaveco”

4.2.1. Caracterización de Procesos

A continuación se muestra el detalle de los consumos asociados a los diferentes sectores de la planta concentradora Quellaveco.

Características de Potencia Instalada en Planta		
Área	Potencia [kW]	Porcentaje
Impulsión Agua Titire y Vizcacha	6.233	4,50%
Mina	11.050	7,99%
Molienda	77.093	55,72%
Flotación y Remolienda	19.500	14,09%
Planta Molibdeno	1.059	0,77%
Planta de Cal y Reactivos	805	0,58%
Espesamiento y Filtrado de Concentrado	1.739	1,26%
Espesamiento de Relaves	6.960	5,03%
Compresores Aire Planta	1.468	1,06%
Recirculación de Agua	10.848	7,84%
Campamento y Edificios Auxiliares Planta	1.600	1,16%
TOTAL	138.354	100%

Tabla N° 7: “Características de Potencia Instalada en Planta [kW]”

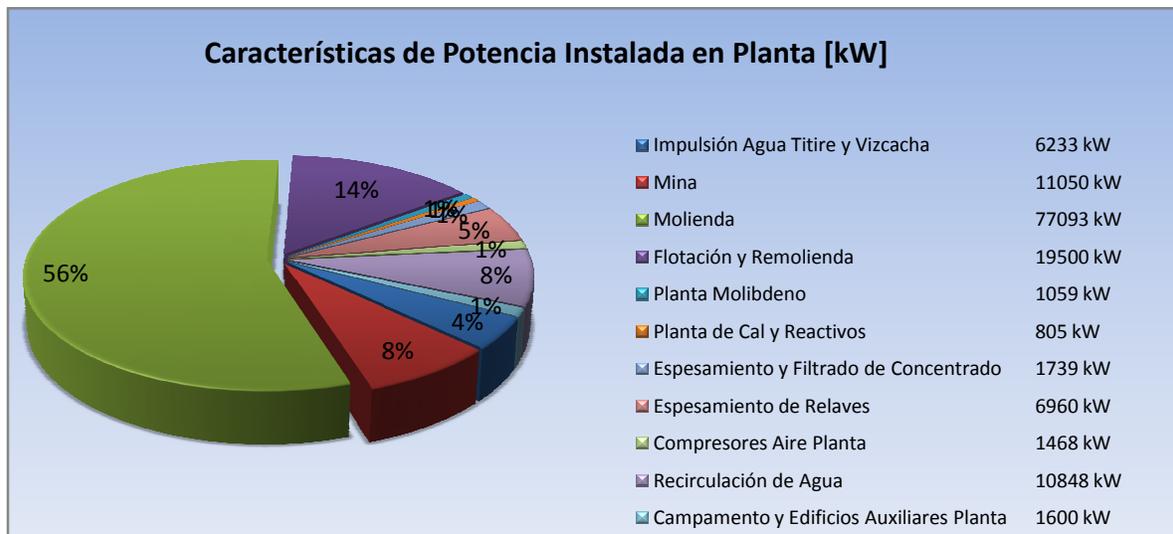


Figura N° 25: “Características de Potencia Instalada en Planta [kW]”

4.2.1.1. NÚMERO DE EQUIPOS EN FUNCIÓN DE POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [kW]

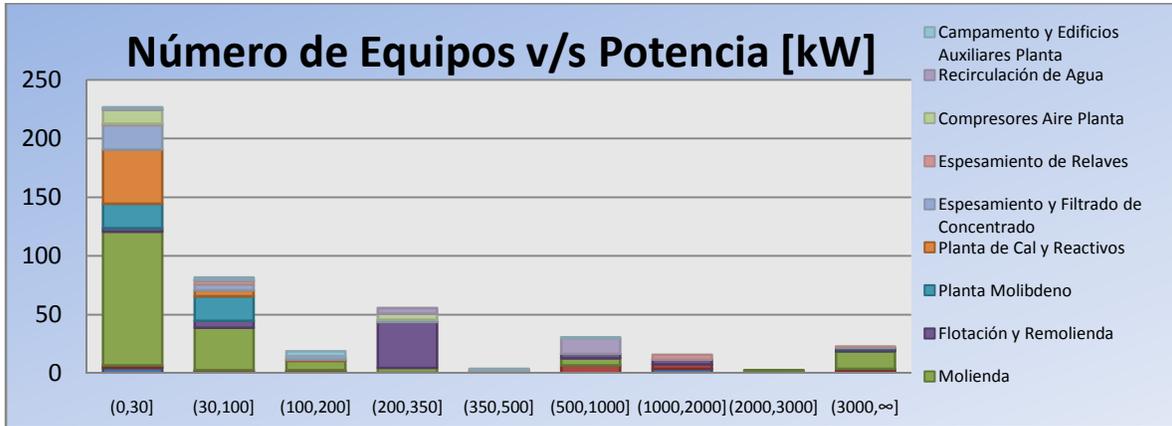


Figura N° 26: “Número de Equipos v/s Potencia [kW]”

Al observar la Figura N° 26, se aprecia que la mayor parte de los equipos que se utilizarán en la planta concentradora tienen una potencia menor a los 30 [kW], en particular, aproximadamente la mitad de los equipos se encontrarán en este rango de potencia proviniendo la mayor parte desde la molienda y la planta de Cal-Reactivos.

4.2.1.2. CARACTERÍSTICAS DE POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [kW], DIVIDIDA EN RANGOS DE POTENCIA [kW]

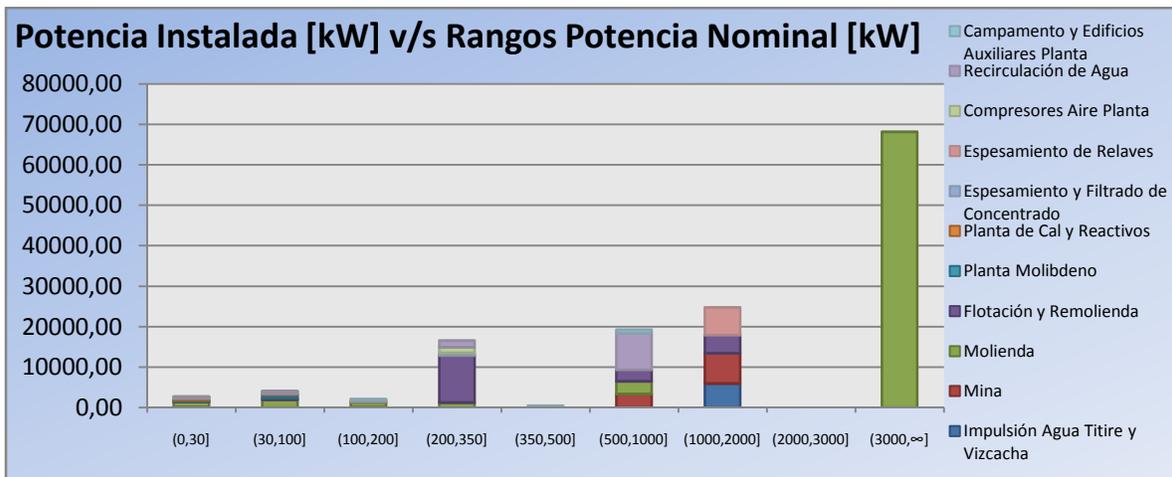


Figura N° 27: “Potencia Instalada [kW] v/s Rangos Potencia Nominal [kW]”

Al observar el gráfico anterior, se aprecia claramente que la mayor parte de la potencia instalada en la planta se encuentra en la Molienda en un rango de potencia superior a los 3.000 [kW], llegando incluso al 50% de la potencia instalada total en la planta. Esto se debe a que es en este sector en donde se encontrarán los grandes molinos que participarán en el proceso productivo.

4.2.1.3. POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [KW] EN FUNCIÓN HORAS ANUALES DE USO

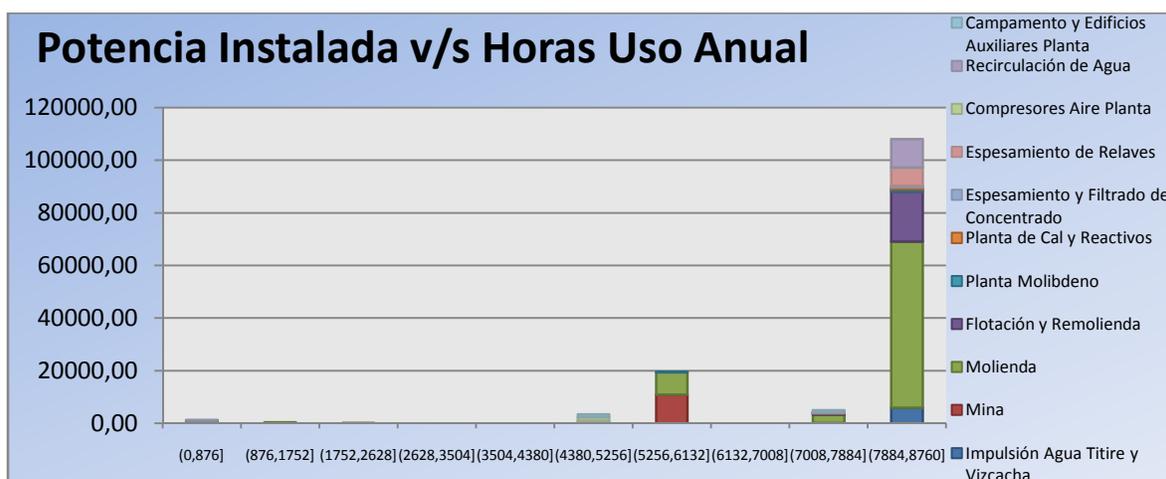


Figura N° 28: “Potencia Instalada v/s Horas Uso Anual”

Al observar la Figura N° 28, se aprecia que la mayor parte de la potencia instalada en la planta tiene un tiempo de uso promedio anual mayor a las 7.884 [hrs/año] (equivalente a utilizar los equipos durante 330 días de manera continua), en particular el 78% de la potencia instalada se encuentra en este rango de tiempo, mostrando de manera evidente el uso intensivo a la cual están sometidos los equipos en la industria minera. Cabe señalar, que este alto porcentaje corresponde principalmente a los consumos ubicados en el proceso de molienda y en la planta de flotación.

4.2.1.4. POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [KW] EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE CARGA DE LOS EQUIPOS

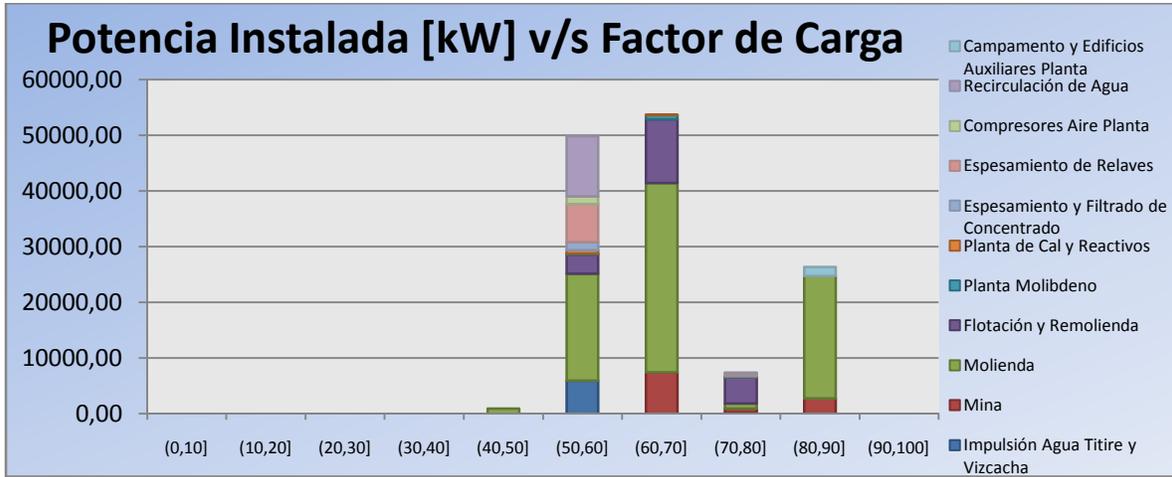


Figura N° 29: “Potencia Instalada [kW] v/s Factor de Carga”

Al observar la Figura N° 29, se aprecia que la mayor parte de la potencia instalada en la planta tiene un factor de carga entre el 50% y 70%, en particular el 75% de la potencia instalada se encuentra en este rango. Cabe señalar, que esto se debe a que los equipos se suelen sobredimensionar al momento del diseño de una planta minera, ya que no hay certeza absoluta de las fuerzas mecánicas que tendrán que ejercer los motores para realizar el trabajo de manera correcta. A su vez, el diseño de los equipos incluye un porcentaje adicional, debido a un potencial aumento en el crecimiento de la planta.

Dado que las máquinas eléctricas suelen tener su punto de máxima eficiencia sobre el 85% de carga, esto genera oportunidades de ahorro energético mediante la utilización de variadores de frecuencia, como se observará en los capítulos siguientes.

4.2.2. Caracterización de Equipos

A continuación se muestra el detalle de los consumos asociados a los diferentes sectores de la planta concentradora Quellaveco:

Características de Potencia Instalada en Planta				
Área	Numero	Porcentaje	Potencia [MW]	Porcentaje
Bombas	113	24,51%	35,16	25,41%
Tableros	13	2,82%	0,54	0,39%
Otros Motores	58	12,58%	1,26	0,91%
Agitadores	11	2,39%	0,42	0,30%
Correas Transportadoras	26	5,64%	9,45	6,83%
Ventiladores	21	4,56%	0,53	0,38%
Iluminación	12	2,60%	0,95	0,69%
Compresores	9	1,95%	2,45	1,77%
Otros	80	17,35%	13,51	9,77%
Chancadores	3	0,65%	2,50	1,81%
Celdas	64	13,88%	12,19	8,81%
Molinos SAG	1	0,22%	22,00	15,90%
Molinos de Bolas	2	0,43%	32,80	23,71%
Molinos de Remolienda	5	1,08%	4,59	3,32%
Transformadores	43	9,33%		
TOTAL	461	100,00%	138,35	100%

Tabla N° 8: “Características de Potencia Instalada en Planta en función de los equipos”

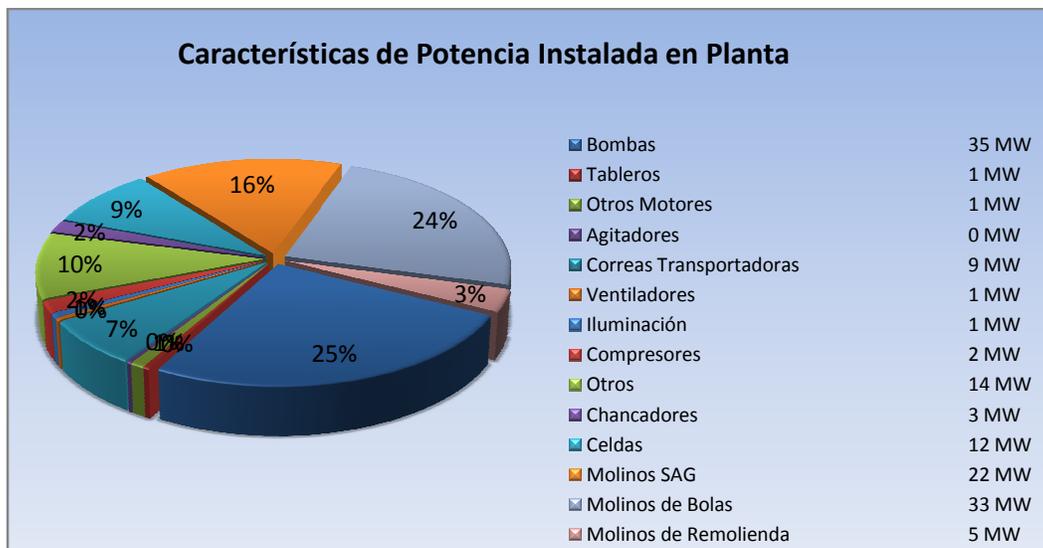


Figura N° 30: “Características de Potencia Instalada en Planta [MW] en función de los equipos”

4.2.2.1. NÚMERO EQUIPOS EN FUNCIÓN DE POTENCIA NOMINAL DE LOS EQUIPOS [KW]

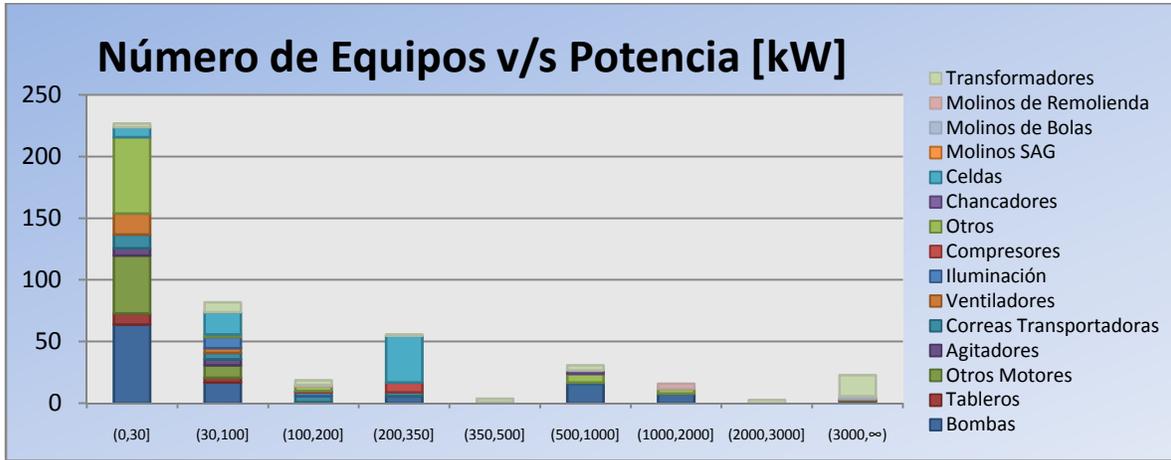


Figura N° 31: “Número de Equipos v/s Potencia Nominal [kW]”

Al observar la Figura N° 31, se aprecia que la mayor parte de los equipos que se utilizarán en la planta concentradora tienen una potencia menor a los 30 [kW], en particular, aproximadamente el 50% de los equipos se encontrarán en este rango de potencia nominal, siendo un 28% de ellos equipos de bombeo.

4.2.2.2. POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [KW] EN FUNCIÓN DE POTENCIAL NOMINAL DE EQUIPOS [KW]

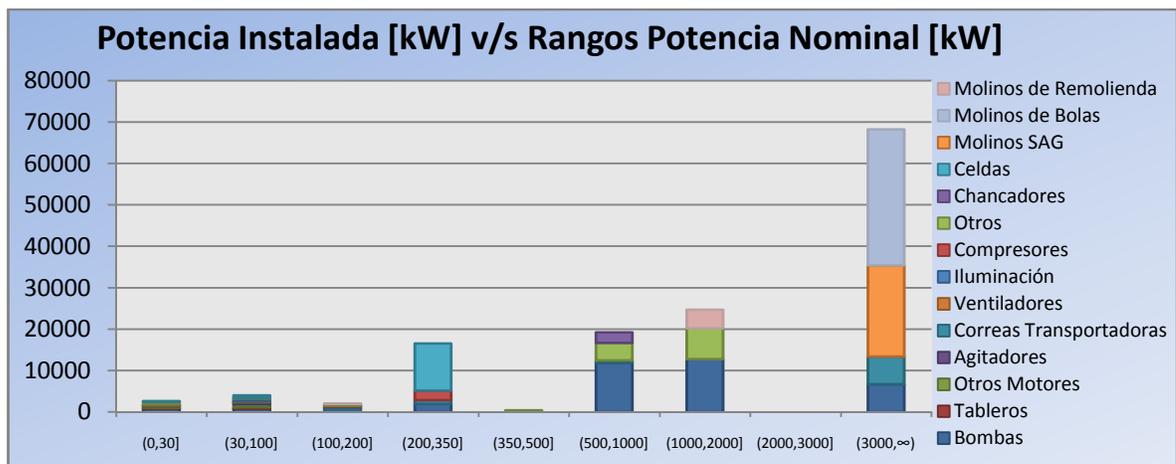


Figura N° 32: “Potencia Instalada [kW] v/s Rangos Potencia Nominal [kW]”

Al observar el gráfico anterior, se aprecia que la mayor parte de la potencia instalada en la planta se encuentra en un rango superior a los 3.000 [kW], llegando incluso al 50% de la potencia instalada total en la planta. Esto se debe a que es en este rango de potencia donde se encuentran los grandes molinos utilizados en minería del cobre, en particular, los molinos SAG y de Bolas tendrán una potencia nominal equivalente al 16% y 24% de la potencia instalada en la planta respectivamente.

4.2.2.3. POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [KW] EN FUNCIÓN HORAS ANUALES DE USO

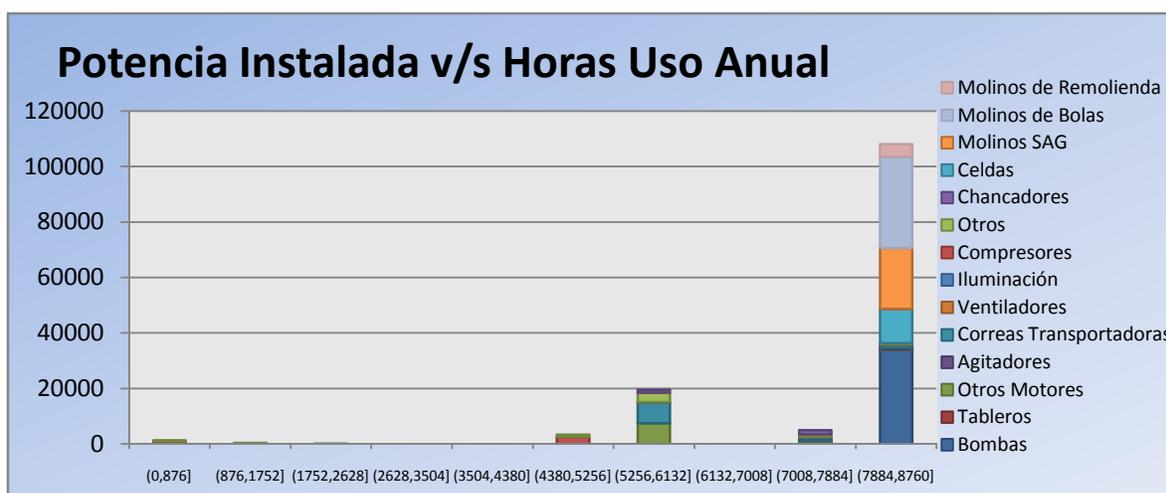


Figura N° 33: “Potencia Instalada v/s Horas Uso Anual”

Al observar la Figura N° 33, se aprecia que la mayor parte de la potencia instalada en la planta tiene un tiempo de uso promedio anual mayor a las 7.884 [hrs/año] (equivalente a utilizar los equipos durante 330 días de manera continua), en particular el 78% de la potencia instalada se encuentra en este rango de tiempo, mostrando de manera evidente el uso intensivo a la cual están sometidos los equipos en la industria minera. Cabe señalar, que en este alto porcentaje incluye gran parte de la maquinaria utilizada en la flotación y en la molienda, entre los que se encuentran bombas, celdas y los grandes molinos.

4.2.2.4. POTENCIA INSTALADA EN PLANTA [KW] EN FUNCIÓN DEL FACTOR DE CARGA DE LOS EQUIPOS

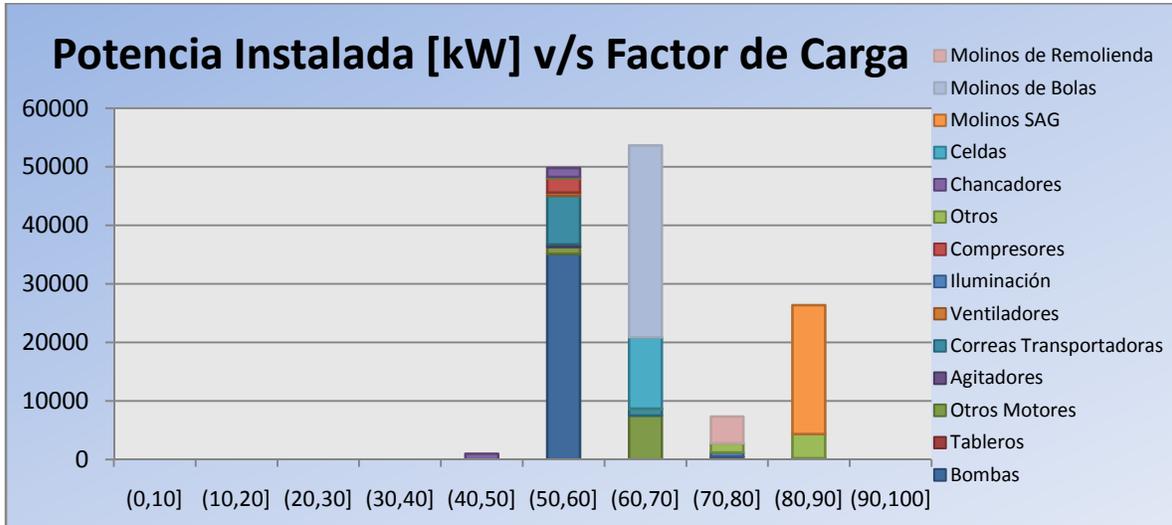


Figura N° 34: “Potencia Instalada [kW] v/s Factor de Carga”

Al observar el gráfico anterior, se aprecia que la mayor parte de la potencia instalada en la planta tiene un factor de carga entre el 50% y 70%, en particular el 75% de la potencia instalada se encuentra en este rango. Cabe señalar, que gran parte de los equipos utilizados en la planta concentradora se encuentran en este rango de carga, entre los que se cuentan bombas, compresores, chancadores, correas alimentadoras y transportadoras, celdas, molinos de bolas, entre otros.

5. Desarrollo

5.1. Motores Eléctricos

Los motores eléctricos son utilizados ampliamente en todo tipo de industrias como una manera de generar energía mecánica de rotación o torque, a partir de energía eléctrica. Como se puede observar en la Figura N° 35, los motores constituyen aproximadamente el 35% de la energía eléctrica consumida por un país de América Latina, por lo que la generación de ahorros energéticos en motores es fundamental para aumentar la eficiencia eléctrica de un país.

Debido a la amplia gama de aplicaciones en donde son utilizados estos equipos, ya sea, para la generación de fuerza motriz en: bombas; ventiladores; correas transportadoras; compresores; celdas etc. es que se hace necesaria la utilización de motores en un amplio rango de tamaños, desde potencias fraccionarias hasta potencias de miles de kilowatts como los grandes molinos SAG y de Bolas utilizados en la industria minera.

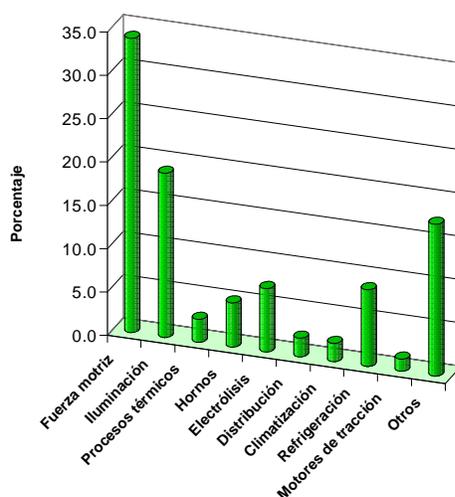


Figura N° 35: “Porcentaje de Uso de la Electricidad en Cinco Países de América Latina: Argentina, Brasil, Chile, México y Perú⁵”

⁵ Fuente: Potencialidades de mejoramiento de la eficiencia con que se utiliza la electricidad en América Latina. Preparado por el Programa de investigaciones en Energía (PRIEN) de la Universidad de Chile, para el Consejo Latinoamericano del ICA, Agosto 1997.

5.1.1. Caracterización de Motores Eléctricos en Quellaveco

Los motores eléctricos son indiscutiblemente los equipos con mayor consumo de electricidad al interior de una planta concentradora alcanzando el 88,6% de la energía eléctrica, y al 56% de la energía global consumida, es decir, la eléctrica y la proveniente de los combustibles como diesel o gasolina. Dado lo anterior, se hace fundamental el ahorro energético en motores eléctricos dada la alta demanda existente, y al gran potencial en eficiencia energética debido al amplio rango de aplicaciones en que son utilizados estos equipos.

No obstante lo anterior, existen motores eléctricos al interior de la planta concentradora en los cuales no es posible aplicar las medidas de eficiencia que se mostrarán en este capítulo, como son los grandes molinos SAG y de Bolas cuyo sistema de funcionamiento es completamente diferente al resto de los equipos, y por lo tanto no se tratarán en este documento. En la Tabla N° 9 se muestra como se distribuye el consumo eléctrico entre los diferentes tipos de motores al interior de la planta.

Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [MWh]		
Tipo	Consumo [MWh]	Consumo [%] (respecto a demanda eléctrica)
Motores Grandes	412.645	51,84%
Motores Pequeños y Medianos	292.647	36,77%
TOTAL	705.292	88,6%

Tabla N° 9: “Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [MWh]”

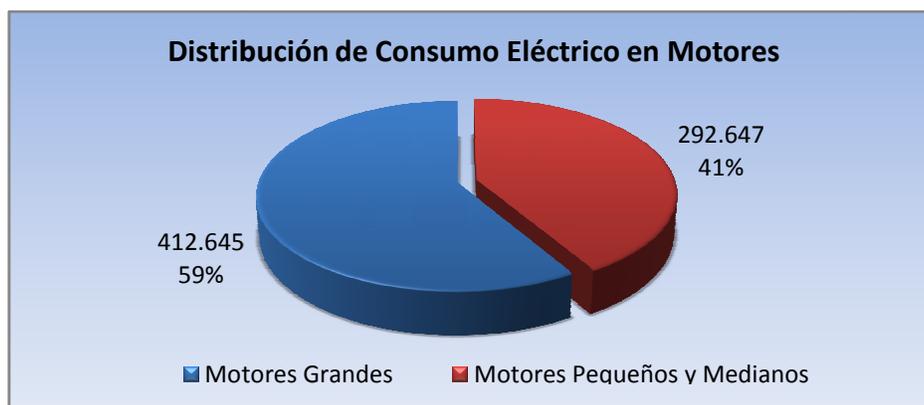


Figura N° 36: “Distribución de Consumo Eléctrico en Motores”

A continuación, se caracterizarán los motores pequeños y medianos a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.1.1.1. ENERGÍA, POTENCIA Y NÚMERO DE MOTORES

Como se mencionó anteriormente, los motores eléctricos son utilizados en la mayoría de las aplicaciones dentro de una planta minera, ya sea en bombas hidráulicas, ventiladores, compresores, correas transportadoras, agitadores, entre otros. Sin embargo, la mayoría de estas aplicaciones serán analizadas de manera individual en las secciones posteriores, por lo que la caracterización que se llevará a cabo a continuación sólo considerará los siguientes elementos: celdas de flotación, agitadores y otros motores, de los cuales se excluirán bombas hidráulicas, ventiladores, compresores y correas transportadoras.

Equipos	Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [GJ]		
	Consumo [GJ]	Consumo [MWh]	Consumo [%]
Otros Motores	11.474	3.187	0,40%
Agitadores	7.595	2.110	0,27%
Celdas	241.946	67.207	8,44%
Total Motores	261.015	72.504	9,11%
Total Demanda Eléctrica	2.865.387	795.941	100,00%

Tabla N° 10: “Consumo de Energía Eléctrica por Equipos [GJ]”

Características de Potencia Instalada en Planta				
Área	Número	Porcentaje	Potencia [MW]	Porcentaje
Otros Motores	58	12,58%	1,26	0,91%
Agitadores	11	2,39%	0,42	0,30%
Celdas	64	13,88%	12,19	8,81%
Total Motores	133	28,85%	13,87	10,02%
Total Equipos Eléctricos	461	100,00%	138,35	100,00%

Tabla N° 11: “Características de Potencia Instalada en Planta”

Como se observa en la Tabla N° 10, aun con la exclusión de importantes equipos motrices, las celdas y agitadores conforman aproximadamente el 9,1% de la energía consumida por Quellaveco, llegando a los 72,5 [GWh] anualmente.

Se aprecia además que la planta contará con un importante número de motores eléctricos alcanzando el 29% del total de equipos. Cabe señalar, que este tipo de máquinas corresponde aproximadamente el 10% de la potencia instalada con 13,9 [MW], por lo que es interesante observar la distribución de estos valores según la potencia nominal de los equipos, como una manera de conocer cuáles de ellos tendrán un mayor potencial de ahorro energético.

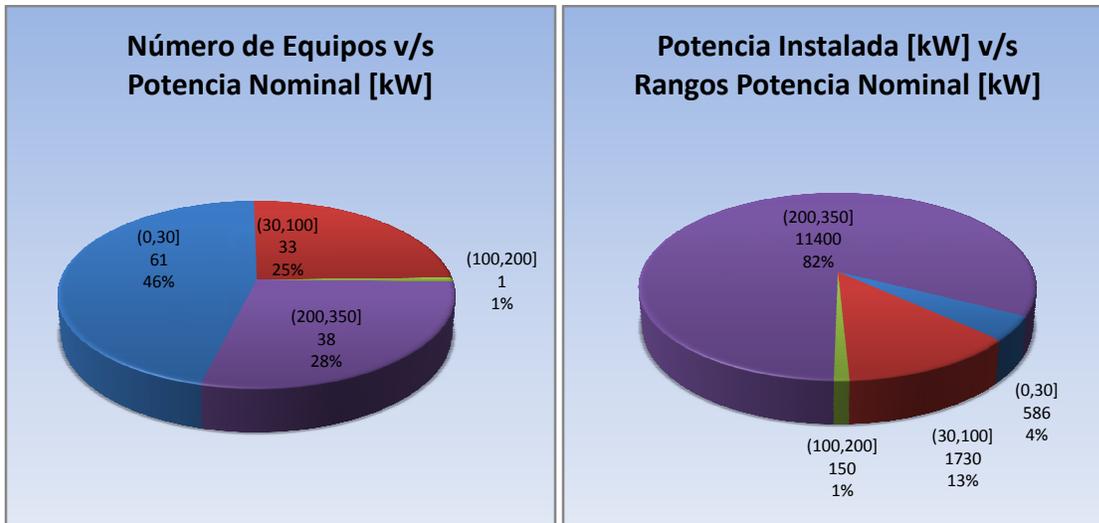


Figura N° 37: “Caracterización de Motores en Función de Potencia Nominal”

Es posible apreciar, que la mayor cantidad de equipos se concentra en potencias menores a 30 [kW] correspondiendo al 46% de los motores eléctricos a utilizar en la planta, no obstante este gran número de equipos corresponde a sólo el 4% de la potencia instalada en motores. Por el contrario, el 82% de la potencia instalada en estos sistemas motrices se distribuye solamente en 38 equipos cuya potencia va de los 200 a 350 [kW]. No obstante lo anterior, dadas las características de los motores es posible obtener considerables ahorros energéticos en todo el rango de potencias como se mostrará en los capítulos sucesivos.

5.1.1.2. OPERACIÓN DE MOTORES

El tipo de operación de un sistema motriz queda caracterizado principalmente por dos valores fundamentales, que son el número de horas de utilización anual y el factor de carga de los equipos. Como se observa en la Figura N° 38, el factor de carga de los sistemas motrices de Quellaveco variará entre los 0,5 [0/1] y 0,7 [0/1], dado especialmente por un sobredimensionamiento en el diseño inicial de los equipos para que sean capaces de soportar cargas variables sin sobrecargarse. Esto ocurre sobre todo en el caso de las celdas de flotación, ya que este proceso irá requiriendo una cantidad mayor de energía a lo largo de la vida útil de la planta, dado principalmente por un aumento en la dureza del material, y en ocasiones por una mayor densidad.

Además, es posible observar que este tipo de equipos tendrá un alto grado de utilización, siendo superior a las 7.884 horas en el 92% de la potencia instalada en motores (12,7 [MW]). Por lo tanto, se hace necesaria la confiabilidad y seguridad en los dispositivos, con el objetivo de disminuir los tiempos de mantenimiento no programado.

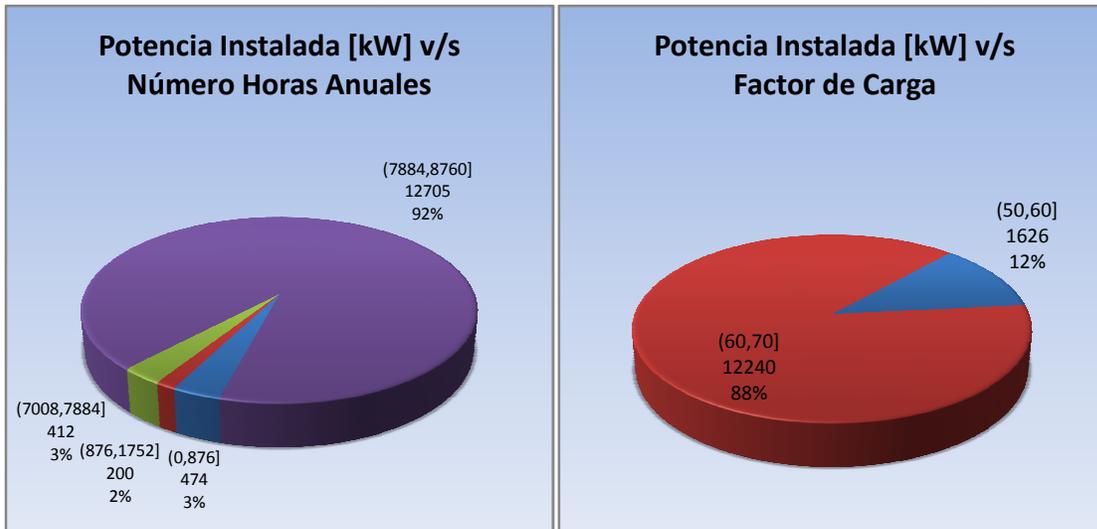


Figura N° 38: “Potencia Instalada en Función de Número de Horas Anuales y Factor de Carga”

5.1.2. Problemas Comunes que Disminuyen la Eficiencia en

Motores

Existen diferentes problemas que disminuyen la eficiencia de los motores, como son el aumento de temperaturas, el desbalance de voltajes, la utilización de motores en grandes alturas, el rebobinado de equipos, entre otros. A continuación, se expresa matemáticamente la pérdida de eficiencia en los equipos⁶:

$$\eta_1 = K_v * K_f * K_d * K_c * K_t * K_a * K_r * \eta_0$$

Siendo:

η_1 = Rendimiento del motor corregido.

η_0 = Rendimiento de placa del motor a 100% de carga.

⁶ Informes de las auditorías ex ante y ex post del Proyecto piloto: Reemplazo de motores eléctricos en Empresas de la minería de cobre en Chile, Subsecretaría del Ministerio de Minería, Octubre 2009

La expresión anterior considera que la eficiencia original del motor se modifica debido a las circunstancias siguientes:

- Voltaje diferente al nominal (Kv).
- Frecuencia diferente a la nominal (Kf).
- Voltaje y/o corrientes desequilibradas (Kd).
- Carga diferente a la nominal (Kc).
- Variaciones de temperatura ambiente (Kt).
- Altura sobre el nivel del mar (Ka).
- Reparaciones (rebobinados) en la vida del motor (Kr).

La explicación formal de los valores anteriores se muestra en el Anexo 9.2.

5.1.2.1. DESBALANCES DE VOLTAJES

Los desbalances de voltajes disminuyen la eficiencia de los equipos y reducen su vida útil, debido principalmente a la introducción de corrientes desbalanceadas que generarán aumentos de torque pulsatorio, incrementando las vibraciones y tensiones mecánicas, así como las pérdidas y sobrecalentamiento que concluirán en un deterioro progresivo de la aislación en los enrollados del motor.

Dado lo anterior, se recomienda que el desbalance de voltajes en los terminales del motor no exceda el 1%, ya que a partir de este valor las pérdidas de eficiencia aumentan de manera considerable, como se muestra en la Tabla N° 12:

Motor Efficiency* Under Conditions of Voltage Unbalance			
Motor Load % of Full	Motor Efficiency, %		
	Voltage Unbalance		
	Nominal	1%	2.5%
100	94.4	94.4	93.0
75	95.2	95.1	93.9
50	96.1	95.5	94.1

Tabla N° 12: “Pérdida de Eficiencia según el Desbalance de Voltaje”

Cabe señalar, que el desbalance de voltajes es probablemente el principal problema que incide sobre el aumento de temperatura del motor y sobre las fallas prematuras en estos equipos, por lo que cualquier medida que ayude a disminuir este tipo de problemas incidirá en un decremento de los costos de operación en la planta.

Entre las causas que suelen generar el desbalance de voltajes se encuentra:

- Fallas en la operación de los equipos encargados de corregir el factor de potencia.
- Bancos de transformadores desbalanceados alimentando una carga trifásica demasiado grande para el transformador.
- Cargas monofásicas distribuidas de manera desequilibrada a lo largo del sistema.
- Fallas monofásicas a tierra no identificadas.
- Circuitos abiertos en algunos sectores del sistema de distribución primario.

5.1.2.2. PÉRDIDAS DE EFICIENCIA DEBIDO A LA ALTURA

Muchas plantas mineras se ubican a elevaciones por sobre los 1.000 metros respecto del nivel medio del mar (m.s.n.m.). Normalmente, los motores de inducción se fabrican para condiciones de instalación en elevaciones de hasta 1.000 m.s.n.m, por lo que para dimensionar motores en instalaciones de mucha altitud, es necesario realizar un derating de la potencia del motor. Estos decrementos de potencia en los motores ocurren principalmente debido a tres factores: **la tensión aplicada, la altura de la instalación y la temperatura.**

Cuando se permanece en una elevación por sobre un cierto límite inferior (establecido típicamente en 1.000 m.s.n.m.), existe el efecto de disminución de presión atmosférica por menor peso de la columna de aire. Esto produce dos efectos: la disminución de la tensión de ruptura de un aislante gaseoso, por efecto de la Ley de Paschen (donde la tensión de ruptura es función de la presión y la distancia entre láminas), y la disminución de la densidad del aire.

La Figura N° 39 muestra la variación de la presión atmosférica terrestre en función de la altitud. La forma de variación es aproximadamente una exponencial decreciente respecto de la altura. Se aprecia que a una altura del orden de 5.000 m.s.n.m. la presión atmosférica es aproximadamente la mitad que a nivel del mar.

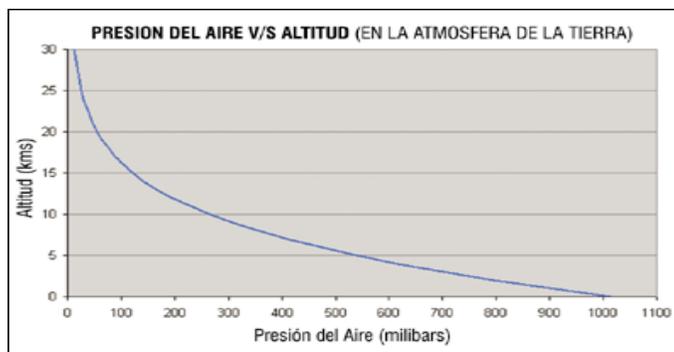


Figura N° 39: “Presión del Aire v/s Altitud”

Un motor industrial genera calor debido a las pérdidas internas⁷ (roces, pérdidas Joule, pérdidas de fierro, pérdidas varias, etc), y necesita traspasar este calor hacia el ambiente, por lo que precisa de una masa de aire frío que actúe como vehículo de esta transferencia de calor. Si tenemos un motor de inducción autoventilado, con un ventilador acoplado al eje del rotor (TEFC, Totally Enclosed and Fan Cooled), la potencia que se gasta en impulsar una masa de aire externo hacia el interior de la máquina es:

$$P_{ventilacion} = K \cdot \rho_{aire} \cdot n^3 \quad [W]$$

Donde K es un factor que depende de la geometría del ventilador, ρ_{aire} es la densidad del aire, y n, la velocidad de giro del rotor.

Se observa que esta expresión indica que existe proporcionalidad en la potencia requerida para ventilar una cierta masa de aire de refrigeración. Por ello se necesitará una menor potencia para impulsar aire, si el motor gira a una misma velocidad, en instalaciones de altura a nivel del mar, pero por otra parte, como el aire será menos denso a una altura mayor, la masa de aire que ingresa como medio de refrigeración de las masas de fierro y cobre del motor será menor. La velocidad no debiese cambiar notoriamente para una condición de carga constante e independiente de la altitud de montaje, dado que será principalmente función de la frecuencia y tensión de la red.

La paradoja se da en que, al enfriarse menos el motor, si bien se gastará menos potencia en ventilación (y se disminuirán con ello las pérdidas netas en la máquina), no se podrá exigir de él la misma potencia que a nivel del mar. Por esto, necesariamente habrá que "castigar" la potencia máxima que se podrá obtener del eje del motor si se instala la máquina a una gran altura, hablándose entonces del derrateo del motor.

De esta forma, al instalar en altura un motor capaz de entregar una determinada potencia real a nivel del mar, sólo se podrá lograr una potencia menor debido a las limitaciones de temperatura máxima de sus devanados. Con ello, la carga real del motor será menor en altura que a nivel del mar, por lo que se tendrá que la eficiencia en ambos casos será diferente.

Cabe señalar, que el decremento de temperatura con la altura de montaje será, sin embargo, un plus a favor del motor porque éste trabajará con temperaturas ambientales más frías que la del diseño del motor, pero ello dependerá de la condición de la instalación.

Por lo señalado, el uso de curvas de eficiencia en un rango amplio de cargas, y los efectos de menor ventilación y limitada capacidad de refrigeración, serán factores fundamentales para determinar exactamente el efecto de la altitud sobre el rendimiento de un motor determinado.

⁷ Ir al Anexo 9.3

5.1.2.3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LA EFICIENCIA DE UN MOTOR

Un motor que funciona con sobre temperatura ve afectada su eficiencia neta de forma severa, debido principalmente a que las pérdidas de carga de un motor (I^2R) se verán incrementadas de forma lineal si el devanado de la máquina tiene una temperatura mayor que la nominal, debido a que existe una relación directa de aumento de resistividad del cobre en función de la temperatura.

$$R_{conductor} = R_{base} \cdot [1 + \alpha \cdot \Delta t]$$

Donde:

$R_{conductor}$ = Resistencia del conductor a cualquier temperatura.

R_{base} = Resistencia del conductor a una temperatura de 20°C.

α = Coeficiente de incremento térmico del material conductor.

Δt = Diferencia entre la temperatura de trabajo y la del medio ambiente.

Para un conductor de cobre electrolítico, el coeficiente de expansión térmico de la resistividad es 0,0039 (1/°C), y suponiendo una temperatura ambiente de 40°C y elevaciones de temperatura de 50°C, el incremento de resistencia será del orden de 20%. Este aumento es genérico y se aplicará a cualquier motor, indistintamente si es o no de diseño de alta eficiencia.

Esto indica que en condiciones límites de funcionamiento, sin sobreexigir térmicamente la máquina, se tendrá un 20% de mayores pérdidas Joule en los devanados que en el caso de tener el motor trabajando sin sobre temperatura. El mismo efecto ocurre en las pérdidas del núcleo por corrientes parásitas, dado que el hierro también aumentará su resistividad con la temperatura. De forma adicional, la mayor disipación de calor al ambiente implica mayores requerimientos de carga térmica en los sistemas de ventilación general del recinto y/o de aire acondicionado.

5.1.3. Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas Motrices

5.1.3.1. ESTABLECER PROGRAMAS DE MANEJO DE MOTORES

Debido a que las plantas mineras se basan principalmente en sistemas motrices alcanzando el 89% de la energía consumida anualmente, es que se hace necesario el establecimiento de un programa de manejo de motores, para saber el grado de importancia de un equipo dentro de la línea de producción, así como sus factores de carga y tiempo de utilización. A través de la implementación de un programa de manejo de motores, es posible definir estrategias corporativas al interior de la mediana y gran minería, como son los siguientes puntos:

- Establecer condiciones apropiadas para la reparación o reemplazo de motores.
- Establecer políticas de compra de motores eficientes.
- Establecer inventarios de repuestos y motores.
- Tener un registro de la vida de cada motor, para conocer las fallas que han presentado a través del tiempo.
- Establecer medidas de mantenimiento adecuadas que permitan conservar la eficiencia de los motores a lo largo de su vida útil.

Entre los beneficios al implementar las medidas mencionadas con anterioridad, se incluye el incremento de la confiabilidad de los motores, un mejoramiento en la operación de estos y una disminución en el consumo de la energía. A continuación, se explican de una mejor manera las medidas indicadas anteriormente.

➤ ESTABLECER CONDICIONES APROPIADAS PARA LA REPARACIÓN O REEMPLAZO DE MOTORES.

Cuando un motor falla al interior de la planta, el pensamiento inicial es llevarlo rápidamente a reparar como una alta prioridad, especialmente si el motor es esencial o crítico para el proceso productivo. No obstante, esta rápida decisión puede ser muchas veces equivocada y en el largo plazo podría incrementar los costos de operación de la planta. Esto ocurre principalmente, a que **no** existe un proceso de reparación de motores que entregue un motor reparado igual al previamente existente, ocurriendo **siempre** una pérdida de eficiencia al reparar un equipo, que puede ir del 2 al 4%.

Dado lo anterior, se hace inevitable la necesidad de responder algunas preguntas antes de enviar a reparar un motor, con el objetivo de conocer si es realmente conveniente la reparación del equipo, o se hace necesaria la instalación de un nuevo motor. En la Figura N° 40 se muestra un diagrama con las preguntas que es necesario realizar antes de tomar una decisión sobre la reparación de un motor.

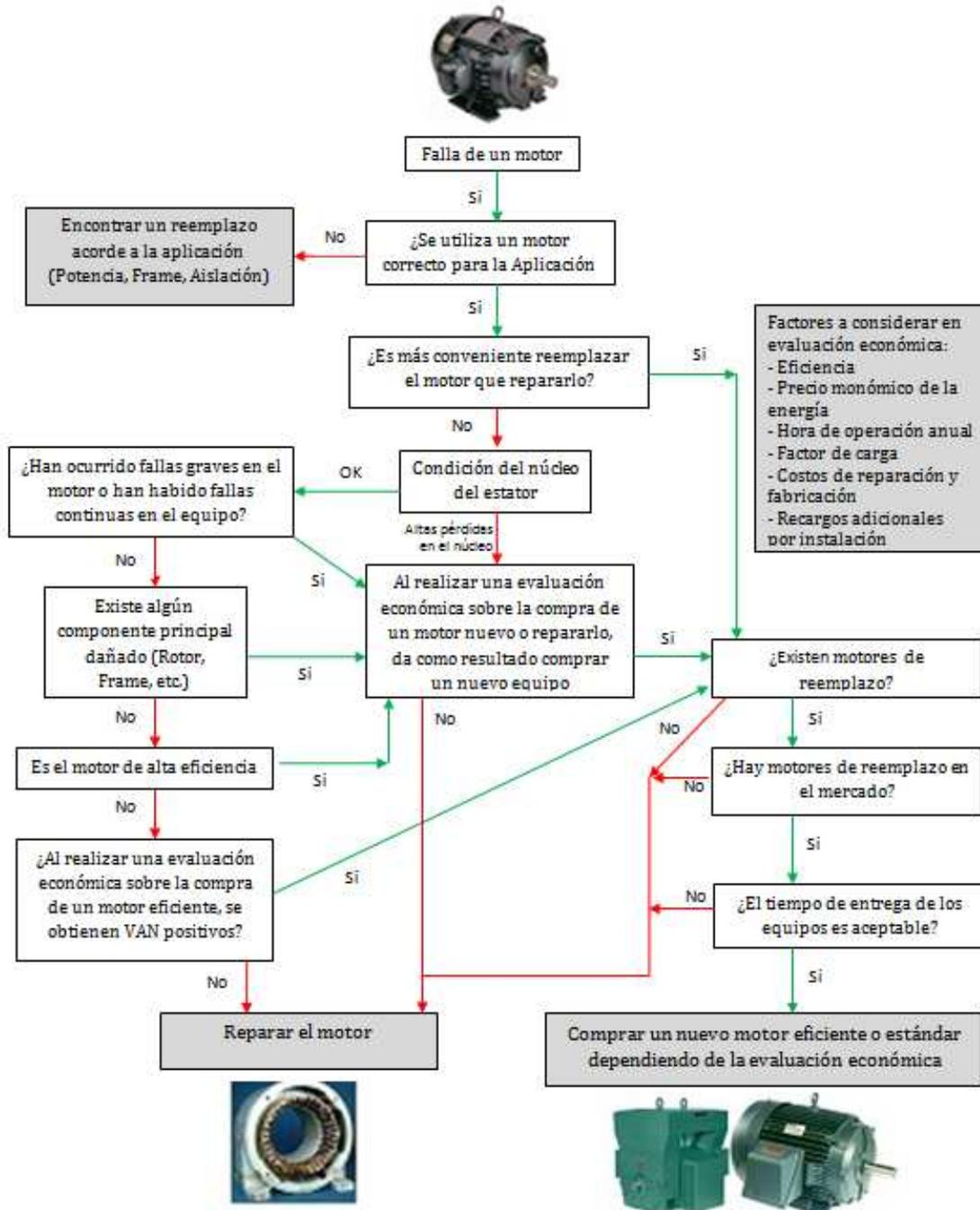


Figura N° 40: “Diagrama de Decisión sobre la Reparación de un Motor”

➤ ESTABLECER INVENTARIOS DE REPUESTOS Y MOTORES.

El establecimiento de inventarios adecuados podrá aumentar el tiempo para tomar una decisión informada al momento de enviar a reparar un motor, ya que esto garantizará que no existirán pérdidas de producción debido a la falla de un equipo, y por lo tanto, la decisión puede ser tomada después de un análisis del sistema, y habiendo evaluado de manera correcta los costos asociados a tales medidas.

5.1.3.2. MANTENIMIENTO EFICIENTE EN MOTORES

Un apropiado mantenimiento de motores puede traer una gran cantidad de beneficios, como el aumento de la confiabilidad, un aumento de la vida útil de los equipos y una disminución de los costos de operación. Además, dado que existen motores esenciales para la producción, las medidas de mantenimiento disminuirán el riesgo de falla y posibles pérdidas de producción asociadas. A continuación se muestran las principales acciones a realizar en el mantenimiento preventivo y predictivo.

➤ MANTENIMIENTO PREVENTIVO.

INSPECCIONES

La inspección de motores debe estar basada en factores tales como, el número de horas de operación continua, condiciones ambientales, consecuencias ante fallas, entre otros. A menudo, este tipo de inspecciones puede ser combinado a limpiezas “superficiales” de los equipos, con el objetivo de remover las impurezas del motor.

La humedad o lubricantes contaminados en los enrollados del motor aumentarán el desgaste de éste, reduciendo a la vez su vida útil. Además la humedad reducirá directamente la capacidad dieléctrica de los aislantes aumentando el riesgo de fallas fortuitas. Por otra parte, el aceite contaminado degradará la capacidad dieléctrica e incrementará la acumulación de contaminantes.

CHEQUEO A LA RESISTENCIA DE AISLACIÓN

Midiendo la resistencia de la aislación de los enrollados del motor se puede observar el grado de limpieza y humedad, así como determinar las fallas potenciales en el aislamiento. Este test se realiza aplicando un voltaje (típicamente 500 o 1.000 [V]) a los enrollados del motor y midiendo la resistencia desde el aislamiento a tierra. Otra forma de realizar el test es utilizando un megóhmetro para determinar la resistencia de aislación, este elemento es usualmente utilizado en motores húmedos, debido a que ello disminuiría la resistencia a medir.

➤ MANTENIMIENTO PREDICTIVO

Los programas de mantenimiento predictivo tienen por objetivo identificar problemas que están comenzando a desarrollarse, pero que aun no han causado la falla de los equipos. La identificación temprana de un problema en desarrollo mejorará la habilidad para planear una reparación efectiva o comprar un motor nuevo antes de que la falla ocurra. A continuación, se describen los tipos de análisis predictivos más efectivos.

ANÁLISIS DE VIBRACIONES

Este tipo de análisis es particularmente efectivo para determinar problemas emergentes en rodamientos, así como detectar desbalances y desalineamientos en el eje del motor debido al acoplamiento con otros equipos. El análisis de vibraciones es usado también para evaluar las condiciones de las barras en un rotor jaula de ardilla en motores de inducción, mostrando aquellas que se encuentran sueltas.

ANÁLISIS DE LUBRICANTES

Un análisis de lubricantes puede indicar la existencia o el desarrollo de un problema de rodamientos, así como determinar que lubricante debe ser reemplazado. Este tipo de análisis puede indicar además la presencia de problemas por altas temperaturas en rodamientos. Los lubricantes suelen cambiar permanentemente debido al calor, lo que los hace propicios para la detección de problemas, especialmente en aquellos que actúan de manera intermitente.

ESCANEEO INFRARROJO O TERMOGRAFÍA

El escaneo infrarrojo (IR) es un método efectivo para determinar las condiciones de aislamiento e integridad de una conexión. Este análisis evalúa la imagen termal de un cuerpo para determinar sus características de temperatura, por lo que es útil para observar rodamientos que comienzan a trabajar a temperaturas elevadas o conexiones eléctricas “débiles” que generar una mayor resistencia, mostrándose como puntos calientes en la termografía. En motores, una aislación debilitada se mostrará como un área de alta temperatura en el estator del motor.

5.1.3.3. VARIADORES DE FRECUENCIA (VDF)

Las ventajas y beneficios de la utilización de variadores de frecuencia incluyen ahorros de energía debido a una mayor eficiencia de los equipos, un mejoramiento de la confiabilidad de los sistemas, menores requerimientos de mantenimiento y un control más efectivo de los procesos. No obstante lo anterior, las características principales de estos equipos se mostrarán en las secciones siguientes, donde se observará su incidencia en sistemas sobredimensionados y con carga variable.

5.1.3.4. REEMPLAZO DE CORREAS V POR CORREAS DENTADAS O SÍNCRONAS

Debido a que gran parte de las aplicaciones con sistemas motrices utilizan correas como una manera de transmitir energía, es que se hace necesaria la utilización de un buen mecanismo transmisor como correas síncronas o dentadas. El acoplamiento por correas tiene la ventaja de entregar flexibilidad en el posicionamiento del motor con respecto a la carga. Además, en sistemas correctamente diseñados se realiza una transmisión de alta eficiencia, ruido reducido, bajos niveles de mantenimiento y la no utilización de lubricantes. A continuación, se muestra una breve descripción de los distintos tipos de correas:

➤ CORREAS TIPO V

Son las correas más utilizadas en la industria, y se caracterizan por el uso de una sección transversal con forma trapezoidal (V) para crear presión sobre las poleas e incrementar la fricción en ellas como una manera de mejorar la capacidad de transmisión de potencia. Pueden llegar a tener eficiencias máximas entre 95% y 98% al momento de la instalación, no obstante, van perdiendo su eficiencia de manera permanente debido al resbalamiento sobre las poleas, si estas no son tensionadas periódicamente.

➤ CORREAS DENTADAS

Este tipo de correas se caracteriza por tener espacios perpendiculares a lo largo de ésta, reduciendo de esta manera la resistencia al doblado. Pueden ser utilizadas en las mismas poleas que utilizan correas V, y entre sus ventajas principales se cuentan su mayor duración, su menor temperatura de operación, y una eficiencia aproximadamente un 2% mayor que una correa V estándar.

➤ CORREAS SÍNCRONAS

Las correas síncronas ofrecen una eficiencia cercana a un 98%, y son capaces de mantener este valor bajo un amplio rango de cargas. En contraste, las correas V tienen una reducción abrupta de su eficiencia al enfrentarse a altos torques debido a un mayor resbalamiento. Las correas síncronas requieren un bajo mantenimiento y sin la necesidad de retensionado, además son capaces de operar en ambientes húmedos sin resbalar. No obstante, este tipo de correas producen un mayor ruido, suelen transferir las vibraciones entre equipos, y son vulnerables ante aumentos de carga sorpresivos.

5.1.4. Evaluación Técnica – Económica

Este tipo de análisis permitirá discriminar de manera correcta, la utilización de los diferentes criterios de eficiencia energética que se mencionaron en las secciones anteriores. En particular, será posible observar las diferentes condiciones de operación y externas a la planta concentradora, que permitirán la integración de motores de alta eficiencia. Además este tipo de análisis mostrará los aumentos en la inversión debido al uso de estos equipos, así como los ahorros energéticos generados.

En este tipo de análisis es necesario considerar diferentes estados para comparar cuál es la mejor decisión a tomar en cuanto a medidas de eficiencia energética. Los estados a considerar son los siguientes:

- Estado Base: en el cual el sistema contará con un motor de eficiencia estándar, desde ahora llamado IE1 de acuerdo a la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores de eficiencia se muestran en el Anexo 9.1.
- Estado IE3: en el cual el sistema contará con un motor de alta eficiencia, desde ahora llamado IE3 de acuerdo a la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores de eficiencia se muestran en el Anexo 9.1.
- Estado IE2: en el cual el sistema contará con un motor eficiente, desde ahora llamado IE2 de acuerdo a la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores de eficiencia se muestran en el Anexo 9.1.

A continuación, se muestran los diferentes costos que tendrán los motores a través de su ciclo de vida, y que es necesario considerar para obtener los resultados correctos:

5.1.4.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Corresponde al costo que se debe efectuar por la compra de un motor en los diferentes estados a analizar. A continuación, se muestran los diferentes costos de inversión a utilizar:

- Estado Base
 - Costo Fábrica Motor IE1
- Estado IE2
 - Costo Fábrica Motor IE2
- Estado IE3
 - Costo Fábrica Motor IE3

El detalle de los costos de fábrica de los distintos equipos se muestra en el anexo digital “Costos de Fábrica Motores.xlsx”, obtenido a partir de distintos catálogos de proveedores de motores. Cabe señalar que para modelar el costo de fábrica de los motores se utilizará la siguiente ecuación:

$$\begin{cases} \text{CostoFábricaMotor[USD]} = a_1 + b_1 \cdot \text{PotenciaMotor[kW]} & \text{si PotenciaMotor} < 20\text{kW} \\ \text{CostoFábricaMotor[USD]} = a_2 + b_2 \cdot \text{PotenciaMotor[kW]} & \text{si PotenciaMotor} \geq 20\text{kW} \end{cases}$$

A continuación, se muestran las constantes utilizadas para modelar los costos de fábrica de los motores:

Tipo	Norma	Constantes				Valides Aprox. R ²
		a ₁	b ₁	a ₂	b ₂	
Motor	IE1	203,00	64,59	-599,35	90,04	0,9658
Motor	IE2	325,00	108,23	-956,50	139,66	0,9948
Motor	IE3	581,46	107,56	-1124,80	152,23	0,9926

Tabla N° 13: “Constantes para la Modelación de los Costos de Fábrica de los Motores”

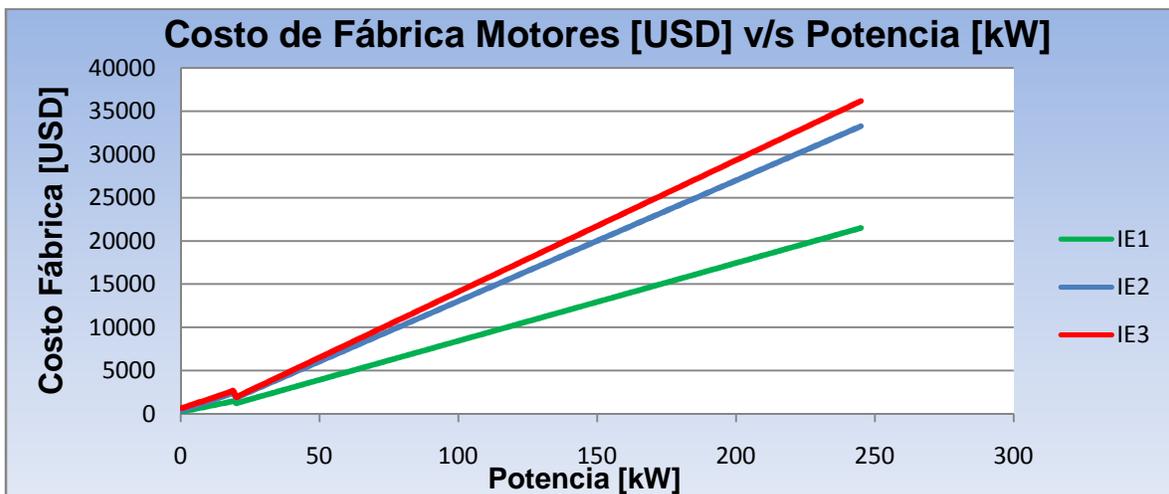


Figura N° 41: “Costo de Fábrica Motores [USD] v/s Potencia [kW]”

Cabe señalar, que **no** se utilizó un modelo lineal para los costos de fábrica de los motores, ya que en algunos casos el costo de inversión resultaba negativo para potencias pequeñas.

Para obtener el costo de inversión en cada uno de los casos, se aplicará un recargo del **30%** sobre el costo de fábrica, distribuido de la siguiente manera:

- 15%, debido a las obras de ingeniería y montaje necesarias para la *instalación* del motor en planta.
- 10%, debido a todas las *tasas arancelarias* que afectan al costo del motor desde que se entrega en la fábrica, hasta que se tiene dicho motor con llave en mano.
- 5%, debido al *transporte* que se debe realizar desde la fábrica hasta la planta.

5.1.4.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Corresponde a los costos en que incurren los elementos del sistema para funcionar correctamente. En el caso de los motores, el costo de operación se basa principalmente en su consumo de energía y en los costos de mantenimiento necesarios para la operación. Cabe señalar, que no se considerará un costo de reparación del motor, ya que Quellaveco es una planta que aun está en etapas de proyecto, y por lo tanto, al inicio de la operación sólo se contará con motores nuevos, cuya probabilidad de falla es aproximadamente igual en todos los equipos, luego los costos asociados a la reparación serán iguales para un motor estándar o para un motor eficiente, y por lo tanto pueden ser obviados del análisis.

El costo de operación anual asociado a la energía y potencia consumida para los diferentes estados mencionados anteriormente se muestra a continuación:

- Estado Base - Estado IE2 - Estado IE3

$$COA = \frac{P_{nom} \cdot fc \cdot H_A \cdot P_M}{\eta} \quad [\text{USD}]$$

- P_{nom} : Potencia Nominal Motor[kW].
- fc : Factor de Carga, medido en [0/1].
- H_A : Número de horas anuales promedio de uso.
- P_M : Precio monómico de la energía medido en [USD/kWh].
- η : Eficiencia del Motor en Planta, medida en [0/1]. Depende del factor de carga, y del tipo de Norma que siga el motor. A continuación, se muestra la ecuación que muestra la variación de eficiencia con el factor de carga⁸:

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{f_c}{f_c \cdot \eta_0 + (1 - \eta_0) \cdot (0,5 \cdot f_c^2 + 0,5)}$$

Con

f_c = factor de carga [0/1]

η_0 = eficiencia nominal del equipo [0/1]

⁸ Modelo obtenido por el Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), para la Corporación Nacional del Cobre Codelco - Chile

Cabe señalar, que sólo se considerará el factor de carga como una medida de disminución en la eficiencia, ya que se supondrá ideal el sistema eléctrico de Quellaveco, es decir, sin variaciones considerables entre fases de voltaje y manteniendo la frecuencia y tensión nominal a lo largo de su operación. Además, dado que se utilizarán sólo motores nuevos para la construcción de la planta, no existirán motores previamente rebobinados. Por otra parte, no se considerará el factor de altura, ya que como se mencionó anteriormente su incidencia en la eficiencia variará dependiendo de la aplicación y de las variaciones de carga a las cuales se enfrente el equipo.

5.1.4.3. OTROS COSTOS

Existen diversos costos que son necesario evaluar previo a la instalación de un sistema motriz, pero que no se considerarán en este informe debido a la dificultad para estimarlos, o porque son dependientes de condiciones de operación externas a este estudio. A continuación, se explica en detalle el origen de estos costos:

- Costos de Mantenimiento.

Corresponde al costo debido a las rutinas de mantenimiento que recibirán los motores, con el objetivo de garantizar su operación diaria. Este costo depende principalmente del tipo de rutina de mantenimiento a ejercer, así como su frecuencia, costos de materiales y sueldos de los funcionarios dedicados a esta labor. Se supondrá un costo de mantenimiento equivalente en el estado base y estados eficientes, aun cuando estos últimos recibirán las recomendaciones mostradas en la sección 5.1.3.2 que permiten garantizar un mantenimiento de la eficiencia a través del tiempo.

- Costos Asociado a Pérdida de Producción

Corresponde al costo debido a la disminución en la producción debido a la no operación de un motor eléctrico. Este costo tienen una gran variabilidad ya que depende fundamentalmente de la importancia del equipo dentro del proceso, por lo tanto, se hace complejo estimar la pérdida de producción para cada equipo utilizado en la cadena de producción.

5.1.4.4. FLUJOS DEL PROYECTO

A continuación se muestra el flujo de caja a utilizar para la evaluación económica de los proyectos de eficiencia. Para ello serán considerados los diferentes costos mencionados anteriormente **Inversión, Operación y Mantenimiento** de los distintos estados establecidos.

$$F_o = CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}$$
$$F_i = (COA + CM)_{BASE} - (COA + CM)_{OTROESTADO} \quad \text{con } i = 1 \dots 10$$

Dado que $CM_{BASE} = CM_{OTROESTADO}$

$$F_i = COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}$$

Finalmente se tiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^{10} \frac{F_i}{(1+r)^i} = F_o + \sum_{i=1}^{10} \frac{F_i}{(1+r)^i} = (CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}) + \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i}$$

Donde:

- CI: Costo de inversión de los distintos estados.
- COA: Costos de operación de los distintos estados.
- CM: Costo de mantenimiento de los distintos estados.
- F_i: Flujo de Costos del año i.
- N=10: Periodo de evaluación del flujo de cajas.
- r: Tasa de descuento [0/1].

Cabe señalar, que la forma del modelo de evaluación propuesto entregará un valor actual neto (VAN) positivo en caso de que el estado de eficiencia a considerar sea factible, y por lo tanto, sería conveniente invertir en nuevas tecnologías de ahorro energético. Por otra parte, en caso de que el VAN sea negativo, no convendría la inversión en mecanismos de eficiencia, ya que los ahorros energéticos obtenidos no serían suficientes para compensar la inversión inicial.

Los resultados de las evaluaciones anteriores se mostrarán en el anexo digital entregado junto a este informe. No obstante se muestran en el Anexo 9.5.1 algunos gráficos que permite observar de una mejor manera la conveniencia de las diferentes alternativas a considerar.

En particular, al analizar una condición de operación de 75 [USD/MWh] para el precio monómico de la energía, factor de carga de 80% y 8.000 horas de utilización anual, se puede observar la ventaja que posee la instalación de motores eficientes IE3 como un mecanismo de ahorro de energético para potencias menores a 100 [kW]. Por otra parte, al realizar una sensibilización de los resultados con respecto al número de horas de utilización anual, se puede apreciar que es factible la inversión en motores de alta eficiencia (IE3) solamente si el equipo opera por más de 8.000 horas anuales, y su potencia nominal es menor a 100[kW]. Esto generaría a su vez considerables ahorros energéticos, llegando incluso a los 15 [MWh] anuales para un motor de 90 [kW], y requiriendo solamente una inversión adicional de 6.500 dólares.

Cabe mencionar, que en el análisis realizado se compararon motores eficientes (IE2) y de alta eficiencia (IE3) con respecto a motores estándar (IE1), y por lo tanto, los resultados no fueron tan buenos como se hubiera pensado. Esto ocurre, ya que la eficiencia de un motor IE1 corresponde aproximadamente a la eficiencia EFF2 de la antigua Norma IEC, y por lo tanto su eficiencia **no** coincide con el peor valor posible de eficiencia que puede tener un motor. Por otra parte, dado que Quellaveco es un proyecto en desarrollo, se consideraron sólo motores nuevos en la evaluación, y no fueron considerados los aspectos de deterioro de eficiencia mencionados en la sección 5.1.2.

5.2. Bombas Hidráulicas

Las bombas hidráulicas son utilizadas ampliamente en la industria como una manera de transferir fluidos entre los diferentes procesos de una planta, como sistemas de refrigeración o lubricación de servicios, o para entregar la fuerza de impulsión necesaria en los sistemas hidráulicos. Debido a la amplia gama de aplicaciones en donde son utilizados estos equipos, es que se hace necesaria la utilización de bombas en un amplio rango de tamaños, desde bombas con potencias fraccionarias utilizadas en la planta de Molibdeno para la descarga del espesador, hasta potencias de miles de kilowatts como las que se utilizarán en los sistemas de impulsión de Titire y Vizcacha que permitirán el abastecimiento de agua en la planta. En adición a un extenso rango de tamaños, también existen diferentes tipos de bombas, cuya clasificación depende de la forma en cómo se entregue la energía al fluido. A continuación se describen de mejor manera los diferentes tipos de bombas hidráulicas.

5.2.1. Bombas Centrífugas

Su principio de funcionamiento está basado en el intercambio de cantidad de movimiento entre la máquina y el fluido, aplicando la hidrodinámica. En este tipo de bombas hay uno o varios rodets con álabes que giran generando un campo de presiones en el fluido. Cabe señalar, que en este tipo de máquinas el flujo del fluido es continuo.

Las bombas centrífugas permiten manejar grandes flujos, proporcionando una salida regular y sin pulsaciones, así como un control del flujo en un amplio rango, sin que esto lleve al deterioro progresivo de la bomba. Las bombas centrífugas tienen pocas piezas móviles, y el desgaste causado por la operación normal es mínimo. Son también compactas y fáciles de desmontar para el mantenimiento. El diseño de un sistema de bombeo eficiente depende de relaciones entre el flujo, el tipo de fluido, la disposición de cañerías, la metodología de control, y la selección de la bomba.

Estas máquinas hidráulicas pueden subdividirse en:

- ***Bombas Centrífugas Radiales:*** cuando el movimiento del fluido sigue una trayectoria perpendicular al eje del rodete impulsor.
- ***Bombas Centrífugas Axiales:*** cuando el fluido pasa por los canales de los álabes siguiendo una trayectoria contenida en un cilindro.
- ***Bombas Centrífugas Diagonales o Helicocentrífugas:*** cuando la trayectoria del fluido se realiza en otra dirección entre las anteriores, es decir, en un cono coaxial con el eje del rodete.

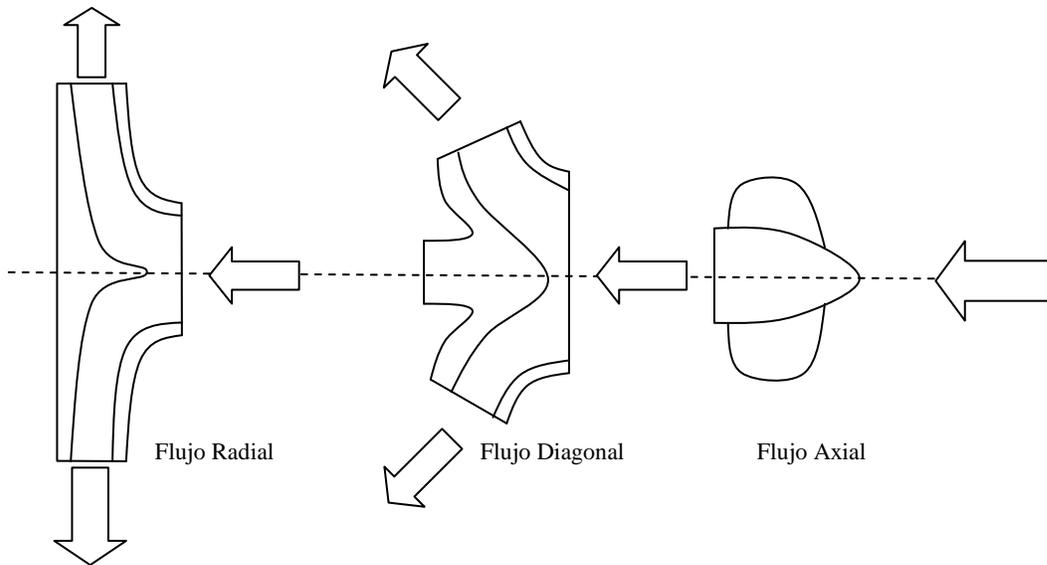


Figura N° 42: “Diferentes Tipos De Bombas Centrífugas”

El funcionamiento de una bomba centrífuga queda descrito típicamente por un gráfico que muestra la altura que puede alcanzar el fluido entregado por la bomba (también llamado Head) en función del flujo.

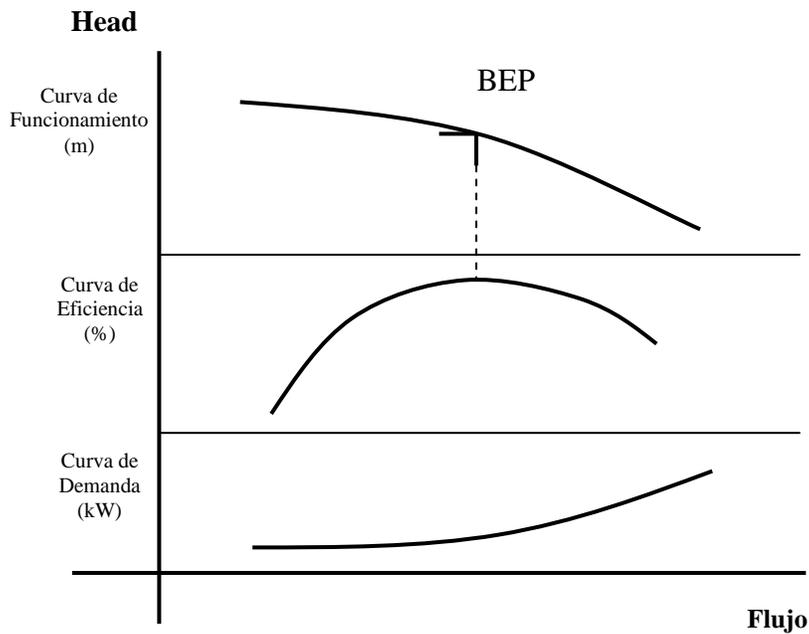


Figura N° 43: “Curvas de Operación de una Bomba Hidráulica”

La cantidad de fluido que una bomba centrífuga puede mover depende de la presión diferencial de ésta. De esta manera, si la diferencia de presión aumenta en la bomba, entonces el flujo decrece, y viceversa. Además en una curva de operación típica de una bomba centrífuga se señalan los puntos de máxima eficiencia (BEP) y de consumo de potencia, en función del flujo. Debido a lo anterior, este tipo de bombas suele ser utilizado en aplicaciones que demanden altos flujos a bajas presiones, y en donde el fluido no tenga una viscosidad excesivamente alta.

5.2.1.1. PUNTO DE MEJOR EFICIENCIA (BEP)

Una característica importante de una curva de operación de una bomba centrífuga corresponde al punto de máxima eficiencia o “Best Efficiency Point” (BEP). En el BEP, la bomba opera de manera eficiente en términos de la **energía consumida y del mantenimiento**. La operación de una bomba en un punto alejado del BEP acelerará el desgaste en los rodamientos, sellos mecánicos y otras partes. En la práctica, puede ser difícil mantener una bomba operando consistentemente en este punto debido a que los sistemas suelen tener cargas variables, no obstante mediante la utilización de variadores de frecuencia se puede mantener la bomba funcionando en este punto, disminuyendo de esta manera las sobrecargas a las cuales se puede ver enfrentada una bomba y reduciendo sus costos de operación.

5.2.1.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE BOMBAS CENTRÍFUGAS

➤ VENTAJAS

Algunos de los beneficios de este tipo de bombas son su simplicidad y seguridad en su operación, además son confiables y poseen una larga vida útil, por lo que son especiales para trabajar en una planta concentradora de cobre, ya que las bombas se encuentran sometidas a un alto grado de utilización, por lo que su larga vida útil las favorece. Por otra parte, requieren poco mantenimiento, ya que sufren poco desgaste con el uso diario y además requieren pocas partes de reemplazo, tales características las hacen propicias para su utilización en ambientes mineros, ya que su confiabilidad permite disminuir los mantenimientos no programados. Cabe señalar, que el reemplazo de sellos mecánicos debe ser realizado periódicamente, pero requieren poco tiempo.

Además tienen la capacidad de operar bajo un amplio rango de condiciones, por lo que trabajan correctamente con cargas variables.

Es importante mencionar, que al contrario de las bombas de desplazamiento positivo, las bombas centrífugas tienen un bajo riesgo de sufrir daño debido a una operación inadecuada de las válvulas de flujo.

➤ DESVENTAJAS

Los principales problemas a los cuales se ven sometidas las bombas centrífugas son la cavitación, la recirculación interna, dificultades con los sellos mecánicos y con la empaquetadura o su operación con una carga inapropiada sobre el eje. Las características mencionadas anteriormente se mostrarán con mayor detalle en la sección 5.2.4.

5.2.2. Bombas de Desplazamiento Positivo o Volumétricas

Su principio de funcionamiento está basado en la hidrostática, de modo que el aumento de presión se realiza por el empuje de las paredes de las cámaras que varían su volumen. En este tipo de bombas, en cada ciclo el órgano propulsor genera de manera positiva un volumen dado o cilindrada, por lo que también se denominan bombas volumétricas. En caso de poder variar el volumen máximo de la cilindrada se habla de bombas de volumen variable. Si ese volumen no se puede variar, entonces se dice que la bomba es de volumen fijo. A su vez este tipo de bombas pueden subdividirse en:

- **Bombas de Émbolo Alternativo:** en las que existe uno o varios compartimentos fijos, pero de volumen variable, por la acción de un émbolo o de una membrana. En estas máquinas, el movimiento del fluido es discontinuo y los procesos de carga y descarga se realizan por válvulas que abren y cierran alternativamente.
- **Bombas Volumétricas Rotativas o Rotoestáticas:** en las que una masa fluida es confinada en uno o varios compartimentos que se desplazan desde la zona de entrada (de baja presión) hasta la zona de salida (de alta presión) de la máquina.

5.2.2.1. VENTAJAS

➤ APLICACIONES CON ALTA PRESIÓN Y BAJO FLUJO

Las bombas de desplazamiento positivo son más efectivas cuando se necesitan altas presiones en aplicaciones de bajo flujo. Cabe señalar, que las bombas centrífugas pueden ser diseñadas para generar altas presiones, pero estas bombas especiales suelen requerir inversiones mucho mayores.

➤ APLICACIONES CON FLUIDOS DE ALTA VISCOSIDAD

Las bombas de desplazamiento positivo son más efectivas cuando se necesita mover fluidos viscosos, ya que se presuriza el fluido directamente perdiendo de esta manera una menor cantidad de energía debido a las altas fuerzas tangenciales que poseen inherentemente los fluidos viscosos.

➤ APLICACIONES CON UN PRECISO CONTROL DE FLUJO

Dado que cada movimiento o revolución genera una cierta cantidad de flujo, a través del control de ciclos de bombeo, las bombas de desplazamiento positivo suelen ser mejores para aplicaciones en donde se requiere un flujo preciso.

➤ AUTO-CEBANTE

Este tipo de bombas son usualmente autocebantes (pueden trabajar con gas en su interior) y puede operar con una baja línea de succión, esto puede ayudar a los diseñadores para ubicar las bombas sobre el nivel del fluido, lo que puede simplificar el layout del sistema.

5.2.2.2. DESVENTAJAS

➤ FLUJO PULSANTE

Dadas las características de las bombas de desplazamiento, éstas poseen flujos pulsantes lo que en algunos sistemas puede crear problemas de vibraciones, especialmente si los pulsos poseen componentes armónicos que coincidan con la frecuencia natural del sistema de cañerías o de la estructura.

➤ GRAN CANTIDAD DE PIEZAS MÓVILES

Dada la gran cantidad de piezas móviles necesarias en las bombas de desplazamiento, se hace indispensable la necesidad de mantener una gran cantidad de repuestos en los inventarios. Esto hace que aumenten los tiempos de mantenimiento cuando sea necesario el reemplazo de partes en las bombas.

5.2.3. Caracterización de Bombas Hidráulicas en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, las bombas hidráulicas son los equipos con mayor potencial de ahorro energético debido principalmente a que son un gran consumidor de energía llegando a demandar el 20,5% de la energía anual consumida por la planta, siendo superadas solamente por los grandes molinos SAG y de Bolas. A continuación se caracterizarán los equipos de bombeo a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.2.3.1. POTENCIA Y NÚMERO DE EQUIPOS DE BOMBEO

Como se observó en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 113 bombas hidráulicas que corresponderán al 24,5% de los equipos eléctricos. Cabe señalar que este tipo de máquinas tendrá la mayor potencia instalada en la planta con 35,16 [MW], lo que equivale al 25,41% de la potencia total instalada. En la Figura N° 44 se muestra la distribución de la potencia instalada y de los equipos de bombeo según su potencia nominal en [kW].

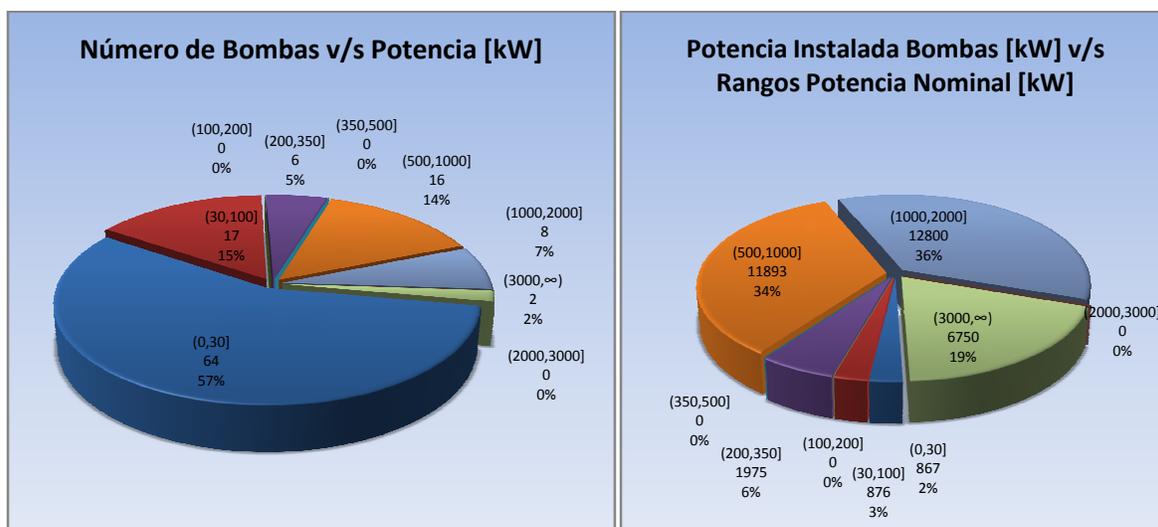


Figura N° 44: “Caracterización de Sistemas de Bombeo”

Es posible apreciar, que la mayor cantidad de equipos se concentra en potencias menores a 100 [kW] correspondiendo al 74% de las bombas hidráulicas a utilizar en la planta, no obstante este gran número de equipos corresponde a sólo el 5% de la potencia instalada en bombas. Por el contrario, el 89% de la potencia instalada en sistemas de bombeo se distribuye solamente en 26 equipos cuya potencia es mayor a los 500 [kW]. No obstante lo anterior, dadas las características de estos equipos es posible obtener considerables ahorros energéticos en todo el rango de potencias como se mostrará en los capítulos sucesivos.

5.2.3.2. OPERACIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO

El tipo de operación de un sistema de bombeo queda caracterizado principalmente por dos valores fundamentales, que son el número de horas de utilización anual y el factor de carga de los equipos. Como se observó en la Figura N° 34, el factor de carga de los sistemas de bombeo de Quellaveco variará entre los 0,5 [0/1] y 0,6 [0/1], dado principalmente por un sobredimensionamiento en el diseño inicial de los equipos para que sean capaces de soportar cargas variables sin sobrecargarse. Por otra parte, se muestra a continuación en la Figura N° 45 la distribución de potencia instalada en función del número de horas de utilización anual.

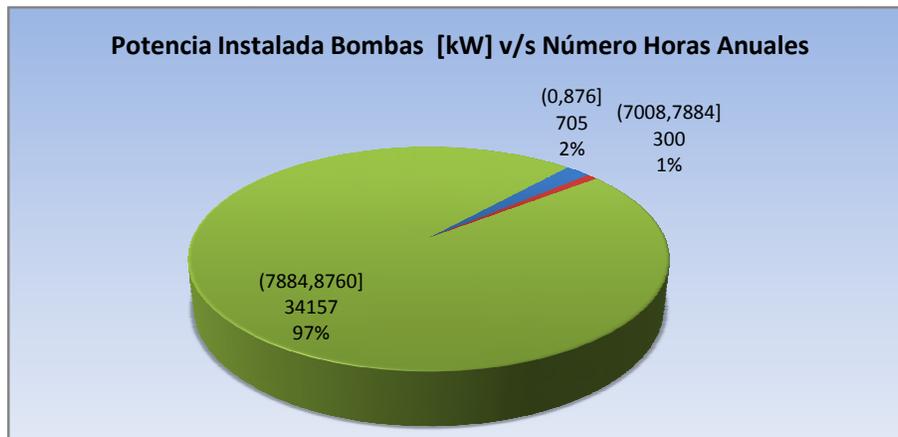


Figura N° 45: “Potencia Instalada Bombas [kW] v/s Número Horas Anuales”

Se puede apreciar que los sistemas de bombeo en una planta concentradora de cobre tienen un alto grado de utilización, siendo superior a las 7.884 horas en el 97% de la potencia instalada en bombas (34,1 [MW]). Por lo tanto, se hace necesaria la confiabilidad y seguridad de los equipos para disminuir los tiempos de mantenimiento no programado. Por otra parte, se observa la importancia de establecer medidas de eficiencia energética como una manera de disminuir el alto consumo de este tipo de equipos.

5.2.4. Problemas Comunes en Sistemas de Bombeo que Disminuyen la Eficiencia

Un mal diseño de los sistemas de bombeo o una operación inapropiada de estos puede crear graves problemas en las instalaciones de una planta. Esto ocurre principalmente, a que las bombas son máquinas rotatorias que se ven afectadas por diferentes problemas, tales como: el desgaste de piezas; fugas de fluido o la cavitación. Por lo tanto, un mal diseño o un mal uso de los equipos puede concluir en un aumento considerable en los costos de operación debido a que se trabaja en forma ineficiente, y además aumentan los costos por mantenimiento, debido a que no se trabaja con los equipos de manera correcta. A continuación, se muestran los principales problemas a los cuales se ven afectados los sistemas de bombeo.

5.2.4.1. PROBLEMAS EN LOS SISTEMAS DE BOMBEO

➤ FUGAS DE FLUIDO

En la mayoría de los sistemas, las fugas ocurren principalmente en las juntas mecánicas, basándose en mantener una alta tensión en las uniones para de esta manera asegurar la rigidez, evitando de esta manera las fugas. No obstante, dado que en una planta concentradora el 97% de las bombas tendrán un tiempo de utilización anual superior a las 7.884 hrs, esto es superior a un 90% de la operación anual, las juntas mecánicas naturalmente se irán degradando aumentando la probabilidad de fuga. Cabe señalar, que en sistemas sobredimensionados, suelen aumentar las vibraciones en los bornes de las máquinas, aumentando así el desgaste en las juntas mecánicas y por consiguiente, la probabilidad de fuga.

5.2.4.2. PROBLEMAS EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

➤ CAVITACIÓN Y RECIRCULACIÓN INTERNA

La cavitación es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido. Esto puede producir que se alcance la presión de saturación del líquido, de tal forma que las moléculas que lo componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas en éste. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita) produciendo una estela de gas y un arranque de metal de la superficie en la que origina este fenómeno.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión, y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Este fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones.

➤ PROBLEMAS EN SELLOS Y EMPAQUETADURAS

El punto de acoplamiento entre el motor y la bomba tienen gran importancia al observar la eficiencia de un sistema, dado principalmente a que se producen filtraciones naturales en este lugar. Esta área suele ser cubierta a través de dos métodos, como son la utilización de Empaquetaduras (Packing) o sellos mecánicos (Mechanical Seal).

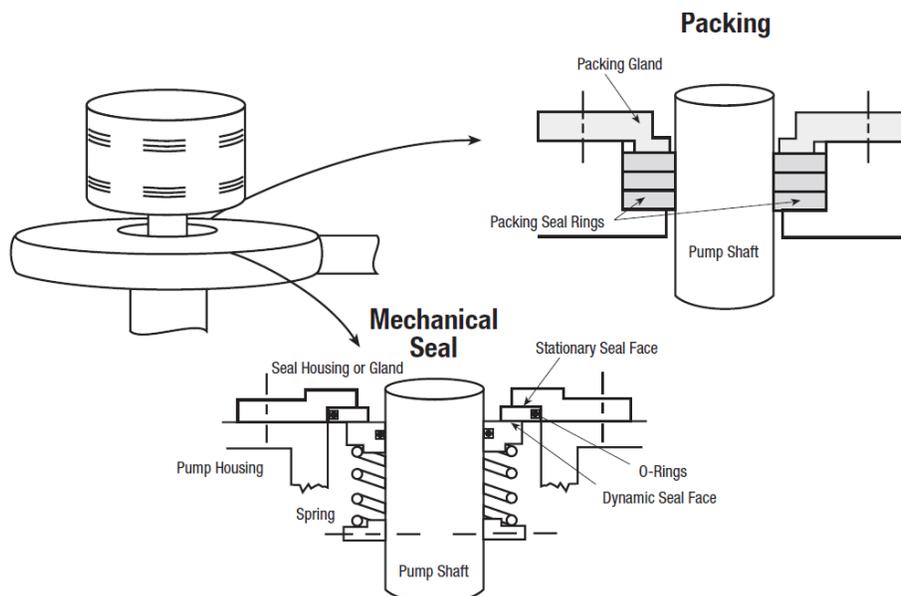


Figura N° 46: “Problema producidos en Sellos y Empaquetaduras”

EMPAQUETADURA

Este tipo de sellado se utiliza en sistemas en donde las fugas de fluido no son un problema significativo, dado principalmente a sus bajos costos y a que no requieren una sofisticada mantención. Existen básicamente dos problemas al utilizar el sellado de empaquetadura: la sobretensión y la instalación del rodete.

Dado que este tipo de sellado requiere “fugas” de fluido controladas y especificadas para mantener el área lubricada y refrigerada, una sobretensión de los anillos de empaquetadura creará una fricción excesiva que generará un exceso de calor, que podría eventualmente destruir el sellado y dañar el eje.

Además dado el contacto directo con el eje de la bomba y el alto grado de utilización de éstas, es natural el incremento de las fugas de fluido en el tiempo, requiriendo un mantenimiento continuo para observar el grado de tensión de los anillos, ya que no debe haber una sobretensión que aumente la fricción del acoplamiento y tampoco debe existir una baja tensión que aumente las fugas de fluido.

SELLOS MECÁNICOS

Este tipo de dispositivos posee una efectividad mayor que la empaquetadura, por lo que son utilizados en sistemas donde el sellado es de gran importancia. Su efectividad depende básicamente de su correcta instalación y un ambiente de operación que se mantenga limpio de manera continua. La fuerza requerida para mantener el sellado trabajando de manera correcta es entregado por resortes, por lo que se hace necesaria una mantención adecuada para minimizar las fatigas de material. Para minimizar la fatiga en los sellos mecánicos, estos deben estar precisamente alineados para que de esta manera sea mínimo el movimiento que sufrirán los resortes en cada revolución del acoplamiento.

5.2.4.3. PROBLEMAS EN BOMBAS DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Este tipo de bombas suele experimentar muchos de los problemas sufridos por las bombas centrífugas, y además suelen tener problemas propios. En este tipo de equipos, el ciclo natural de la acción de bombear puede causar fatiga en sus componentes, ya sea en los rodamientos o en la membrana del equipo. Esto ocurre principalmente al flujo pulsante al que se ve sometido el equipo, que puede resultar en vibraciones en los bornes de la estructura creando una condición de carga que acelere la degradación de las cañerías, válvulas o soportes. Consecuentemente, aquellos sistemas que no estén diseñados para soportar estas vibraciones, pueden experimentar severos problemas de operación y mantenimiento.

5.2.4.4. PROBLEMAS DEL SOBRE-DIMENSIONAMIENTO

Como se observó en la sección 4.2.2, las bombas hidráulicas en una planta concentradora son fundamentales para la operación diaria requiriendo una utilización anual superior al 90% del tiempo. Esta alta dependencia tiende a promover la práctica de utilizar las bombas de manera conservadora para asegurar que las necesidades de los sistemas se cumplan bajo todas las condiciones de carga, entregando así una señal de “confiabilidad” en la planta. No obstante, la utilización de bombas sobredimensionadas capaces de asegurar las distintas necesidades del sistema, diferentes condiciones de carga, entregan una falsa noción de seguridad, ya que hace operar los equipos a un costo mayor al necesario, aumentando además los niveles de mantenimiento. Esto ocurre ya que un exceso en la potencia del fluido debe ser disipado por las válvulas, dispositivos reguladores de presión o por el mismo sistema de cañerías, incrementando el uso continuo de los componentes y por ende el deterioro en los distintos dispositivos del sistema de bombeo. Cabe señalar que esto además aumenta los niveles de ruido y vibraciones en los equipos.

Por lo tanto, es necesario hacer notar que cuando los diseñadores tratan de mejorar la confiabilidad del sistema aumentando la dimensión de los equipos, usualmente los resultados suelen ser contraproducentes entregando una menor seguridad. Esto causado por un uso adicional de las maquinas y sistemas, y por una disminución en la eficiencia de la operación.

A continuación, se muestra gráficamente como aumenta la potencia consumida por los equipos debido a un sobredimensionamiento de los equipos de bombeo.

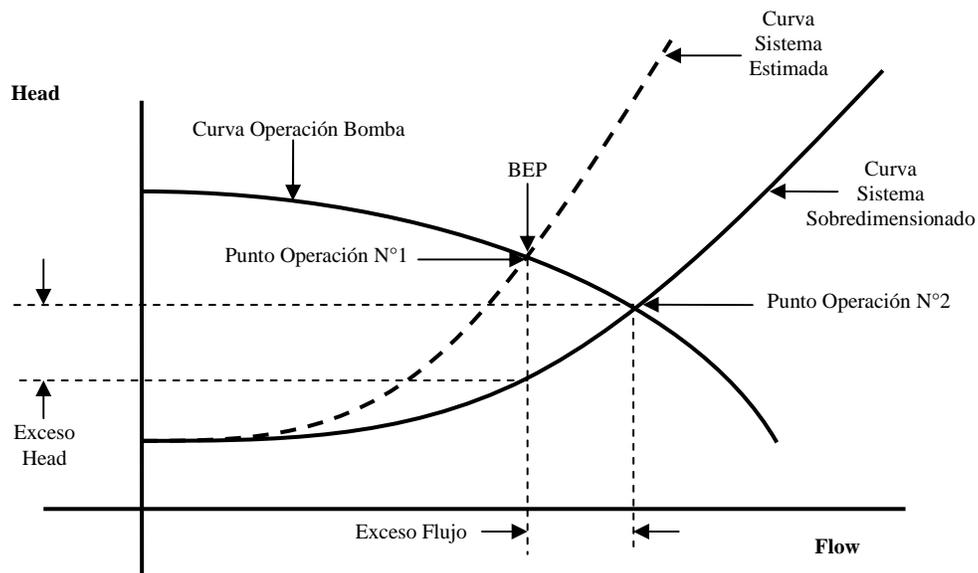


Figura N° 47: “Curvas de Operación en Sistemas de Bombeo con Problemas de Dimensionamiento”

En la Figura N° 47 se observan tres curvas que muestran el comportamiento de la operación de una bomba, y de un sistema de bombeo cualquiera de la planta. Cuando se realiza el correcto diseño de una bomba hidráulica se debe buscar un equipo cuyo punto de máxima eficiencia (BEP) se encuentre cercano al punto de operación N°1, que corresponde a la intersección de la curva de funcionamiento de la bomba y de la curva estimada del sistema hidráulico. No obstante, cuando se trabaja con un equipo sobredimensionado, el punto de operación de la máquina (N°2) se desplaza a la derecha del BEP disminuyendo de esta manera la eficiencia total del sistema de bombeo. Por otra parte, en la Figura N° 48 se observa como la operación ineficiente de la bomba genera un exceso de flujo y de presión que incidirán directamente en el funcionamiento y demanda del equipo como se muestra a continuación.

La potencia de una bomba se puede definir como:

$$P_{gr} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p \cdot \eta_m}$$

Donde

Q: Flujo impulsado por la bomba [m³/seg]

H: Altura alcanzada por el fluido debido a la presión ejercida por la bomba [m]

ρ : Densidad del fluido [kg/m³]

g: Gravedad $\approx 9,8$ [m/seg²]

η_p : Eficiencia de la bomba [0/1]

η_m : Eficiencia del motor [0/1]

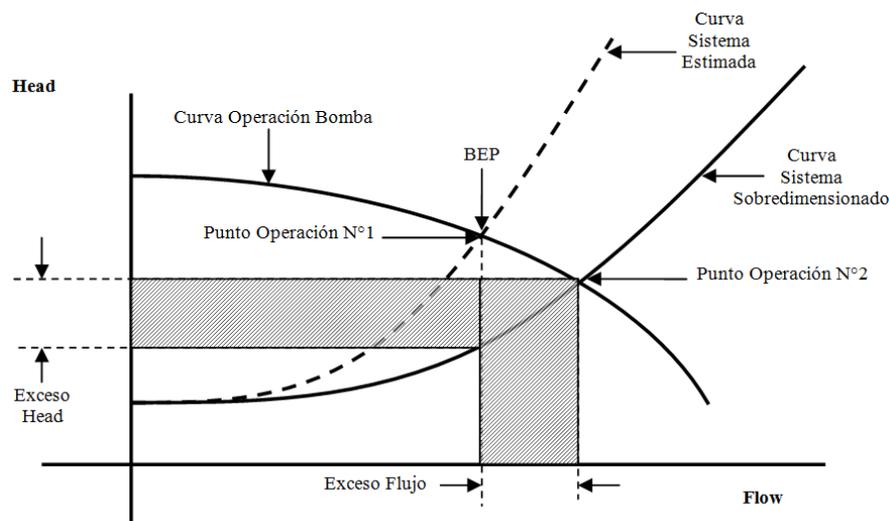


Figura N° 48: “Curvas de Operación en Sistemas de Bombeo con Problemas de Dimensionamiento”

Por otra parte, la curva del sistema se puede descomponer en una parte estática y otra dinámica, teniendo esta última una forma cuadrática:

$$H = H_s + H_d = H_s + a \cdot Q^2$$

Finalmente reemplazando en la ecuación de demanda de una bomba hidráulica se tiene:

$$\begin{aligned} P_{gr} &= \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta_p \cdot \eta_m} \\ \Rightarrow P_{gr} &= \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot (H_s + a \cdot Q^2)}{\eta_p \cdot \eta_m} \\ \Rightarrow P_{gr} &= \frac{\rho \cdot g \cdot H_s}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot Q + \frac{\rho \cdot g \cdot a}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot Q^3 \end{aligned}$$

Donde se observa claramente, la fuerte dependencia que tiene la potencia consumida con el flujo impulsado por la bomba, por lo que un aumento de éste debido al sobredimensionamiento de un equipo conducirá a un aumento en los costos de operación, no sólo debido a una pérdida de eficiencia sino que por el funcionamiento inadecuado de los sistemas de bombeo.

En resumen, el sobredimensionamiento de equipos conlleva los siguientes problemas en los sistemas de bombeo:

- Aumento significativo de la potencia consumida y por consiguiente de los costos de operación.
- La bomba opera ineficientemente a la derecha del punto de máxima eficiencia (BEP).
- Aumenta el riesgo de cavitación.

5.2.5. Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Bombeo

5.2.5.1. UTILIZACIÓN DE VARIADORES DE FRECUENCIA (VDF)

La mayoría de las bombas utilizadas en la industria minera son seleccionadas para cumplir requerimientos de alta demanda y futuros aumentos en la producción, es decir, que existe un gran número de bombas sobredimensionadas en el sector, que raramente trabajan con toda la capacidad para la cual fueron diseñadas. Además, a menudo las bombas son instaladas en sistemas con múltiples puntos de operación que coinciden con los requerimientos de los procesos, y en los cuales se instalan válvulas de flujo para disminuir el fluido impulsado cuando existen disminuciones en la demanda. No obstante, como se mencionó en las secciones anteriores, este tipo de válvulas incrementa la resistencia al flujo del sistema, haciendo que la bomba trabaje con un mayor requerimiento de presión (head), ya que se traslada el punto de operación a la izquierda de la curva de operación, y típicamente, se aleja del punto de máxima eficiencia (BEP), dando como resultado una disminución en la eficiencia del sistema.

Dadas las condiciones anteriores, se hace propicia la utilización de variadores de frecuencia en bombas centrífugas, cuyo consumo varía de manera cúbica con la velocidad de rotación del motor, como se mostrará posteriormente. Debido a ello, pequeñas disminuciones de la velocidad o del flujo permitirán una disminución significativa del consumo eléctrico. Por ejemplo, una reducción de un 20% de la velocidad (flujo) del motor puede reducir la potencia consumida por una bomba en aproximadamente un 50%. Además, los VDFs ofrecen un control preciso de la velocidad y una partida suave en los equipos, reduciendo de esta manera el stress mecánico y térmico en los enrollados, acoplamientos y correas. Por otra parte, se reducen los voltajes fluctuantes que pueden ocurrir en la partida de grandes motores. La operación a velocidad reducida tiene además otros beneficios como son la disminución de la carga en los rodamientos y reducción de la carga en el eje lo que incide directamente en la disminución de los costos de mantenimiento.

A continuación se muestra la variación cúbica que tiene la potencia consumida con la velocidad de rotación del motor en una bomba hidráulica. Dado que el flujo varía linealmente con la velocidad de rotación se tiene que:

Sea $Q = b \cdot N$

Con:

Q = Flujo entregado por la bomba

b = constante

N = velocidad de rotación del motor

Luego

$$\begin{aligned}P_{gr} &= \frac{\rho \cdot g \cdot H_s}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot Q + \frac{\rho \cdot g \cdot a}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot Q^3 \\ \Rightarrow P_{gr} &= \frac{\rho \cdot g \cdot H_s}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot (b \cdot N) + \frac{\rho \cdot g \cdot a}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot (b \cdot N)^3 \\ \Rightarrow P_{gr} &= \left(\frac{\rho \cdot g \cdot H_s}{\eta_p \cdot \eta_m} \cdot b \right) \cdot N + \left(\frac{\rho \cdot g \cdot a \cdot b^3}{\eta_p \cdot \eta_m} \right) \cdot N^3\end{aligned}$$

5.2.5.2. MANTENIMIENTO EFICIENTE EN SISTEMAS DE BOMBEO

El mantenimiento efectivo de los sistemas de bombeo permite a las plantas industriales conservar la correcta operación de los equipos, detectar los problemas a tiempo para introducirlos a las mantenencias programadas, y evitar fallas tempranas en las bombas. El mantenimiento regular también revela la disminución en la **eficiencia** y capacidad de los sistemas, que pueden ocurrir mucho antes que una bomba falle. Por ejemplo, la erosión en el rotor o el desgaste de los anillos puede ser un problema costoso, que puede reducir la eficiencia del sistema motor-bomba en un 10% o más.

La cantidad de atención dada al mantenimiento depende de que tan importante sea el sistema para la operación de la planta. En particular, puede ser muy costoso si un equipo crítico en la planta llega a fallar de manera repentina, ya que esto significaría una disminución en los tiempos de producción, lo que puede llegar a costar miles de dólares en la gran minería. Debido a ello se hace necesaria la realización de un mantenimiento preventivo y predictivo.

El mantenimiento preventivo incluye actividades tales como el alineamiento de acoplamientos en el sistema bomba-motor, lubricación rutinaria de los equipos, la eliminación de contaminantes, así como el mantenimiento y reemplazo de sellos. Estos últimos se deben examinar periódicamente para asegurarse de que no existan fugas no especificadas. Cabe señalar, la inclusión del mantenimiento general de los motores acoplados a las bombas, tales como lubricación y limpieza apropiadas.

Por otra parte, el mantenimiento predictivo se enfoca en la realización de pruebas e inspecciones para detectar con anticipación condiciones que puedan denotar cierto deterioro en los equipos. Es importante nombrar, que este tipo de actividades ayuda a disminuir los tiempos de mantención no calendarizados.

A continuación se muestran algunos métodos de mantenimiento preventivo aplicados a los sistemas de bombeo:

- **Análisis de Vibraciones:** La realización de vibraciones en amplitud y frecuencia permite detectar fallas en los cojinetes. Además revela desbalances mecánicos y eléctricos (voltaje) que pueden ser causados por erosión en el rodete o problemas de acoplamiento. Cabe señalar, que este tipo de análisis es más efectivo cuando se realiza a lo largo de la vida útil de los equipos.
- **Análisis a la corriente del motor:** Algunas veces llamado “análisis dinámico”, permite revelar deterioro en la aislación, daños en el rotor, desbalance de los sistemas eléctricos y armónicos. Puede recoger además problemas en los sistemas tales como mal funcionamiento de las válvulas de control que causan perturbaciones en el flujo. Cabe señalar, que este tipo de análisis es más efectivo cuando se realiza a lo largo de la vida útil de los equipos.
- **Análisis al aceite lubricante:** Esto aplica solamente a las grandes bombas lubricadas con aceite, ya que es un procedimiento con costos muy elevados. El análisis del aceite permite detectar problemas en los cojinetes causados por partículas metálicas o cambios en los químicos que pueden resultar de un sobrecalentamiento, además permite observar problemas en los sellos causados por fluido bombeado en el aceite. Este análisis permite observar cuando es necesario el cambio en el aceite de la bomba.
- **Test periódico de eficiencia:** Observar regularmente la eficiencia del sistema bomba-motor puede significar un ahorro sustancial en los costos de energía de la planta.

5.3. Ventiladores

Los ventiladores son utilizados ampliamente en la industria como una manera de transferir gases entre los diferentes puntos de una planta. Entre sus aplicaciones en una planta concentradora de cobre se destaca la función de hacer circular y renovar el aire en lugares cerrados, como una manera de proporcionar el oxígeno suficiente a los trabajadores. Dado lo anterior, los sistemas de ventilación en Quellaveco poseerán un alto grado de utilización, superior al 90% del tiempo anual, ya que sirven como un método para mantener la seguridad ocupacional de la planta.

Al contrario de lo ocurrido en el caso de las bombas, donde existía un amplio rango de tamaño en la potencia nominal de los sistemas, los ventiladores son equipos con potencias bastante acotadas, siendo todos ellos menores a 100 [kW].

Un sistema de ventilación típico consiste en un ventilador, un motor eléctrico, la correa que se utiliza como acoplamiento entre los equipos, los ductos o cañerías, el controlador de flujo y otros equipos auxiliares como filtros, intercambiadores de calor, entre otros. En la Figura N° 49 se muestra un diagrama en donde se observan los equipos mencionados anteriormente.

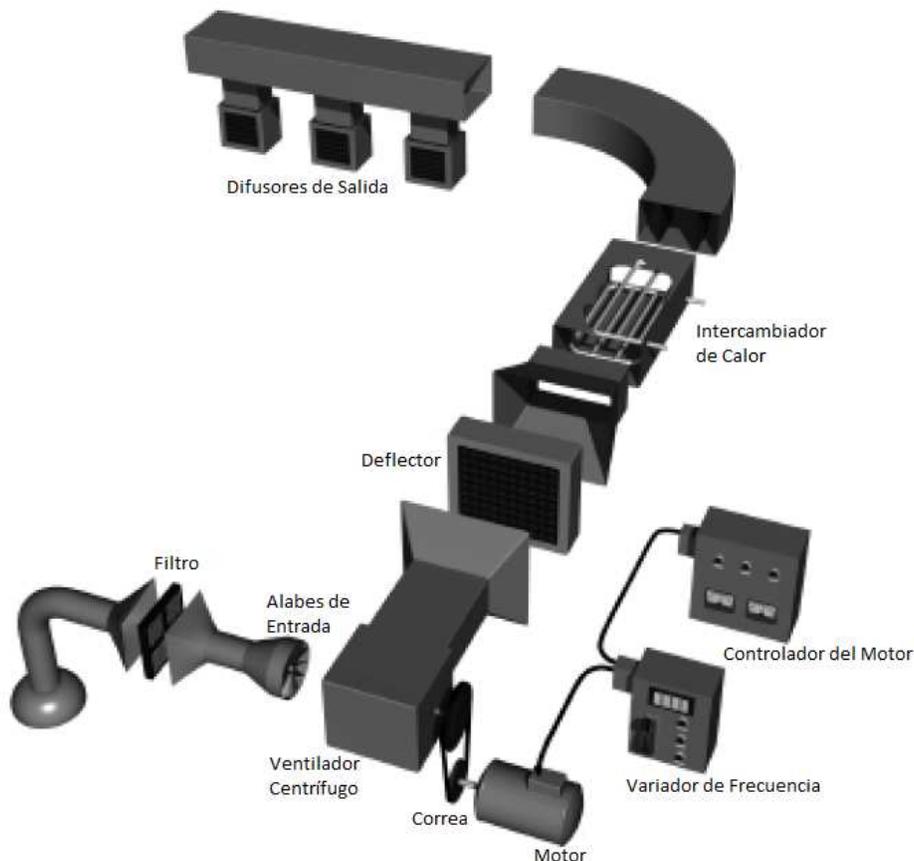


Figura N° 49: “Diagrama de Elementos en Sistemas de Ventilación”

5.3.1. Tipos de Ventiladores

Los ventiladores pueden ser clasificados principalmente en dos tipos diferentes: axiales y centrífugos. Los ventiladores axiales actúan como una hélice, generando un flujo de aire a través del eje del equipo. Por otra parte, los ventiladores centrífugos aceleran el flujo de aire radialmente, convirtiendo la energía cinética rotacional en presión. Cabe señalar, que ambos tipos de ventiladores tienen capacidades similares en términos de presión, flujo de aire y eficiencia, no obstante, ambos tienen características especiales que los hacen idóneos para diferentes aplicaciones.

5.3.1.1. VENTILADORES CENTRÍFUGOS

Este tipo de ventiladores son los más usados en la industria, debido principalmente a sus capacidades de generar flujos de aire de alta presión manteniendo altos niveles de eficiencia. Además, este tipo de ventiladores puede ser utilizado en ambientes de alta contaminación, lo que los hace propicios para ser utilizados en la industria minera. Según el tipo de rodete, se pueden encontrar tres tipos de ventiladores centrífugos, los cuales se describen a continuación:

- **Ventiladores de álabes curvados hacia adelante, también llamados de jaula de ardilla:** tienen una hélice o rodete con los álabes curvados en el mismo sentido que la dirección de giro. Estos ventiladores necesitan poco espacio, baja velocidad periférica y son silenciosos. Se utilizan cuando la presión estática necesaria es de baja a media, tal como la que se encuentran en los sistemas de calefacción, aire acondicionado o renovación de aire, etc. Se caracterizan por tener una baja eficiencia (entre un 55 % y 65 %).

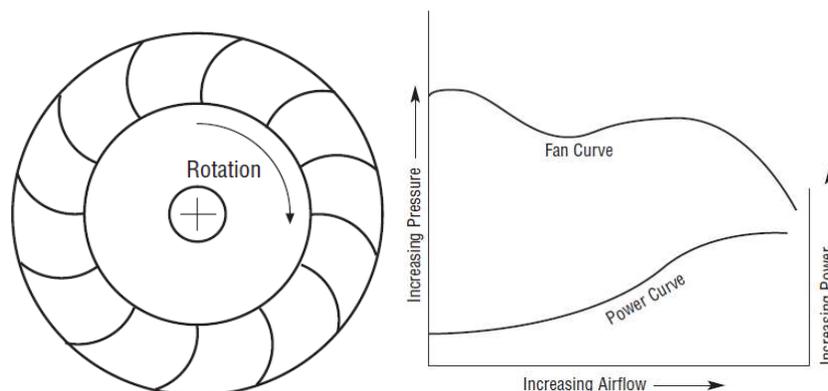


Figura N° 50: “Diagrama y Curva de Operación de Ventiladores de Álabes Curvados hacia Adelante”

- **Ventiladores centrífugos radiales:** tienen el rodete con los álabes dispuestos en forma radial. Este tipo de equipos es comúnmente usado en aplicaciones con un requerimiento bajo a medio de flujo de aire con alta presión, y suelen tener una eficiencia hasta de 75%. A su vez, la forma de las aspas impide la acumulación de impurezas, por lo que es altamente utilizado en ambientes contaminados. Cabe señalar, que la gran distancia entre los alabes permite que el ventilador opere con un bajo flujo de aire sin problemas de vibraciones. Este tipo de ventilador es el comúnmente utilizado en las instalaciones de extracción localizada en las que el aire contaminado con partículas debe circular a través del ventilador.

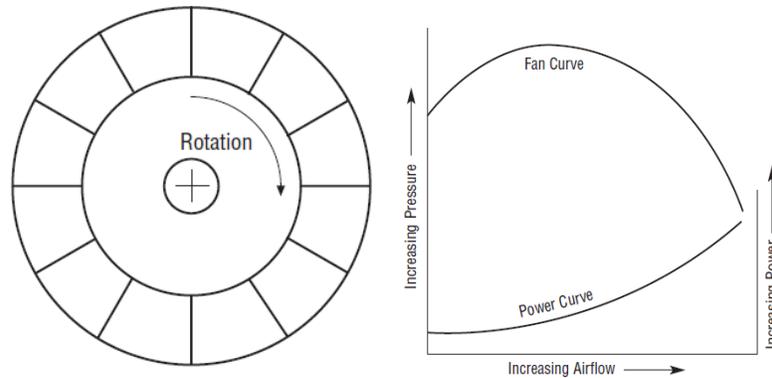


Figura N° 51: “Diagrama y Curva de Operación de Ventiladores Centrífugos Radiales”

- **Ventiladores centrífugos de álabes curvados hacia atrás:** tienen un rodete con los álabes inclinados en sentido contrario al de rotación. Este tipo de ventilador es el de mayor velocidad periférica y mayor rendimiento con un nivel sonoro relativamente bajo y una característica de consumo de energía no sobrecargable. Este tipo de ventiladores es el más eficiente alcanzando valores superiores al 85%

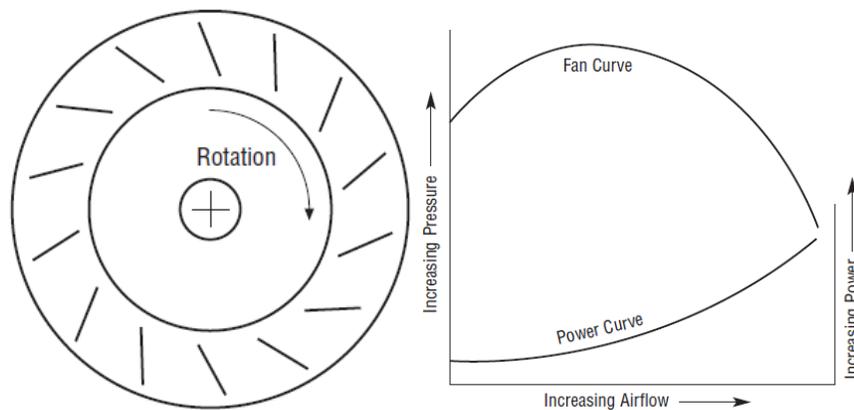


Figura N° 52: “Diagrama y Curva de Operación de Ventiladores Centrífugos de Álabes Curvados hacia Atrás”

5.3.1.2. VENTILADORES AXIALES

Entre las ventajas de este tipo de ventiladores son sus bajos costos, su compactidad y ligereza. Son frecuentemente utilizados en aplicaciones de extracción donde las partículas son de pequeño tamaño, tales como polvo, humo o vapor. Los ventiladores axiales son también utilizados en aplicaciones de ventilación que requieren la habilidad para generar flujos de aire invertidos, para lo cual el equipo debe ser diseñado especialmente para emitir aire en ambas direcciones del eje. Esta característica es utilizada en espacios cuyo aire contaminado debe ser extraído, para luego entregar aire limpio al recinto.

Los ventiladores axiales tienen una gran región de “detención”, lo que los hace particularmente no aptos para sistemas en donde exista un amplio rango de condiciones de operación. En esta región de “detención”, el flujo de aire es insuficiente para llenar las aspas del ventilador, causando inestabilidad en la operación. Una consecuencia de ello será un aumento en el ruido, ineficiencia en la operación y una disminución de la vida útil.

Cabe señalar, que los ventiladores axiales deben rotar a una mayor velocidad que un ventilador centrífugo para lograr el mismo flujo de aire, lo que los hace más ruidosos en la mayoría de las aplicaciones.

Existen tres tipos básicos de ventiladores axiales: helicoidales, tubulares y tubulares con directrices.

- **Ventiladores helicoidales:** se emplean para mover aire con poca pérdida de carga, y su aplicación más común es la ventilación general.
- **Ventiladores tubulares:** disponen de una hélice de álabes estrechos de sección constante o con perfil aerodinámico montada en una carcasa cilíndrica. Pueden mover aire venciendo resistencias moderadas.
- **Ventiladores turboaxiales con directrices:** tienen una hélice de álabes con perfil aerodinámico montado en una carcasa cilíndrica que normalmente dispone de aletas enderezadoras del flujo de aire en el lado de impulsión de la hélice. En comparación con los otros tipos de ventiladores axiales, éstos tienen un rendimiento superior y pueden desarrollar presiones superiores.

5.3.2. Curvas de Operación de Ventiladores

La curva de operación de un ventilador se define típicamente como una función de la presión generada por el equipo versus el flujo de aire desplazado. Cabe señalar, que el entendimiento de esta relación es esencial para diseñar y operar un sistema de ventilación, y es la clave para obtener un trabajo eficiente en los equipos.

5.3.2.1. PUNTO DE MÁXIMA EFICIENCIA.

Al igual que en el caso de las bombas hidráulicas, los equipos de ventilación también poseen un punto de máxima eficiencia, en el cual el ventilador opera a una mayor razón de costo – eficiencia en términos de una disminución del consumo de energía, y de los costos de mantenimiento. Operar un ventilador cercano al BEP mejorará la operación de estos y aumentará la vida útil de los equipos, ya que existirá un menor desgaste debido al uso. Por otra parte, utilizar el ventilador en un punto lejano al BEP incrementará la carga sobre los rodamientos e incrementará el ruido generado por el equipo.

5.3.2.2. REGIÓN DE INESTABILIDAD

En general, la curva de operación de un ventilador poseerá un decrecimiento desde la condición de flujo nulo, por lo tanto, a medida que aumenta el flujo generado por el ventilador disminuirá la presión de éste. A su vez, la mayoría de los ventiladores tienen una región de operación en el cual la curva posee la misma pendiente que la curva de resistencia del sistema, por lo que un ventilador operando en esta región puede tener un comportamiento inestable, como se muestra en la Figura N° 53, lo que puede concluir en un intento del equipo por aumentar el flujo de aire desplazado, lo que a su vez causaría un incremento en la presión del sistema, reduciendo así el flujo de aire generado. Como el caudal de aire disminuye, la presión del sistema también decrece, y el ventilador responde desplazando una mayor cantidad de aire. Este ciclo del ventilador causaría un sonido regular en el equipo, parecido al que ocurre al respirar. A su vez, la operación inestable promovería una disminución en la eficiencia y un incremento en el desgaste de los componentes del ventilador.

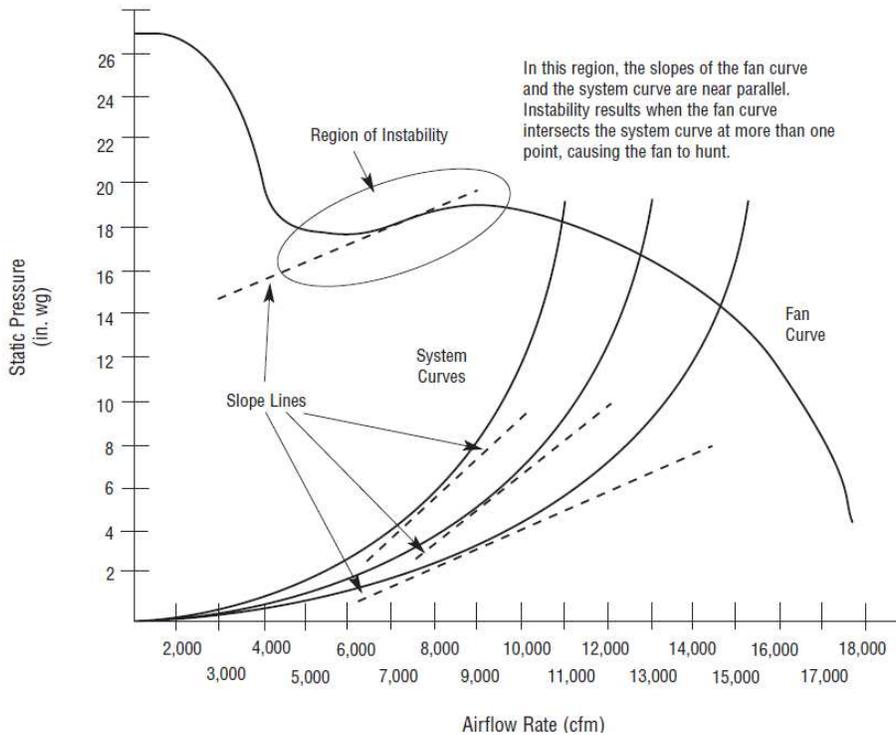


Figura N° 53: “Región de Inestabilidad en Sistemas de Ventilación”

5.3.3. Caracterización de Ventiladores en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, los ventiladores son equipos que **no** tendrán un consumo excesivo de energía en Quellaveco, representando sólo un 0,31% de la energía consumida en la planta. No obstante, los sistemas de ventilación son usados ampliamente en todo tipo de industrias por lo que representan un alto potencial de ahorro energético a nivel país, ya que a través de una correcta operación y mantención es posible lograr ahorros de hasta un 35% de energía.

A continuación, se caracterizarán los equipos de ventilación a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.3.3.1. POTENCIA Y NÚMERO DE EQUIPOS DE VENTILACIÓN

Como se observó en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 21 equipos de ventilación que corresponderán al 4,56% de los equipos eléctricos de la planta. Cabe señalar que este tipo de máquinas tendrá una potencia instalada de 530 [kW], lo que equivale al 0,38% de la potencia total instalada. En la Figura N° 54 se muestra la distribución de la potencia instalada y de los equipos de ventilación según su potencia nominal en [kW].

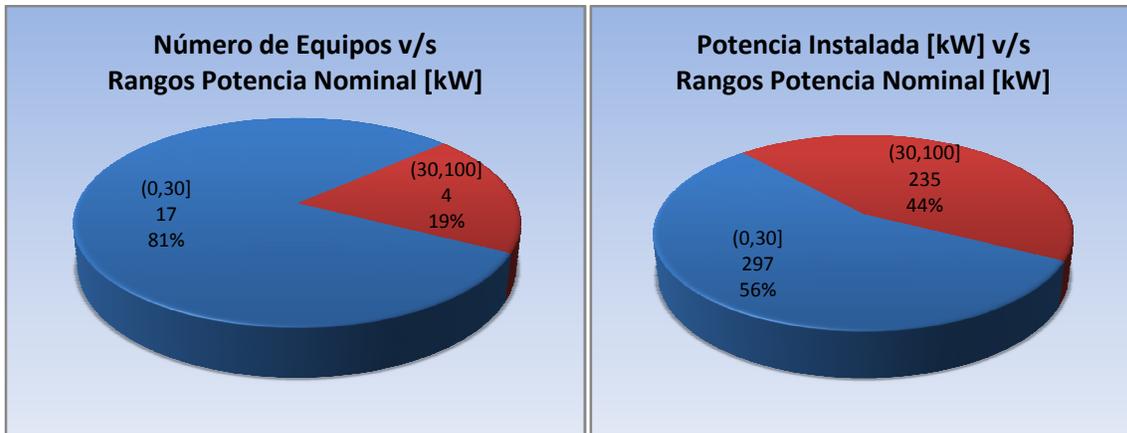


Figura N° 54: “Distribución de Equipos y Potencia Nominal de Sistemas de Ventilación”

Es posible apreciar, que la totalidad de los equipos tiene una potencia nominal menor a 100 [kW], concentrándose el 81% de ellos en potencias menores a 30 [kW]. Cabe señalar, que aun con esta gran agrupación de ventiladores con baja potencia nominal, se tiene que ellos sólo corresponderán al 56% de la potencia total.

5.3.3.2. OPERACIÓN DE EQUIPOS DE VENTILACIÓN

Al igual que lo ocurrido con los equipos analizados anteriormente, la operación de los sistemas de ventilación queda caracterizado principalmente por dos valores fundamentales, que son el número de horas de utilización anual y el factor de carga de los equipos. Como se observó en la Figura N° 34, el factor de carga de los sistemas de ventilación de Quellaveco se concentra entre los 0,5 [0/1] y 0,6 [0/1], dado principalmente por un sobredimensionamiento en el diseño inicial de los equipos para que sean capaces de soportar cargas variables sin sobrecargarse. Por otra parte, se muestra en la Figura N° 55, la distribución de la potencia instalada en función del número de horas de utilización anual.

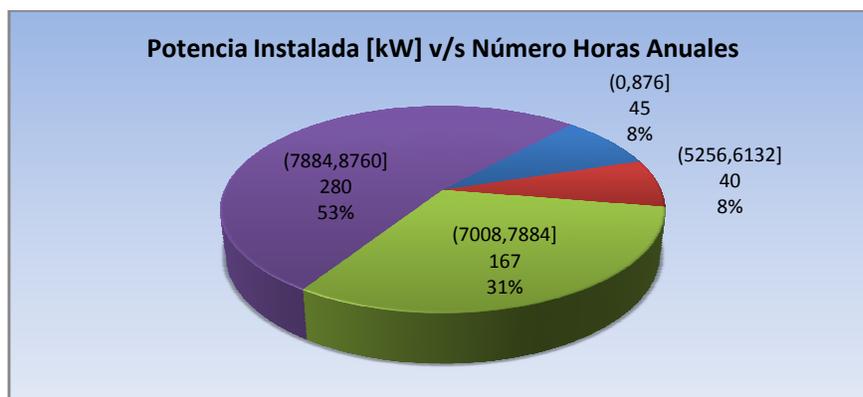


Figura N° 55: “Potencia Instalada [kW] v/s Número de Horas Anuales”

Se puede apreciar que los sistemas de ventilación en una planta concentradora de cobre tienen un alto grado de utilización, siendo superior a las 7.000 horas en el 84% de la potencia instalada. Dado lo anterior, se hace necesaria la confiabilidad y seguridad de los equipos para disminuir los tiempos de mantenimiento no programado. Por otra parte, se observa la gran importancia de establecer medidas de eficiencia energética, dado el gran potencial de ahorro existente en estos equipos.

5.3.4. Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Ventilación

5.3.4.1. DISEÑO EFICIENTE DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN

Muchos problemas relacionados a la operación de un sistema de ventilación pueden ser evitados con un correcto diseño de los ductos de salida y entrada, asegurando que estos se encuentren alineados con el equipo y acorde a las restricciones físicas del espacio disponible. Por ello una inadecuada atención de las condiciones de los ductos durante el diseño del sistema, incidirá directamente en los costos de operación futuros de la planta. A continuación, se muestran algunas prácticas que permiten mejorar la eficiencia de los sistemas de ventilación mediante un correcto diseño:

➤ ENTRADA DEL VENTILADOR

Malas condiciones en el flujo de entrada al ventilador disminuirá la efectividad y eficiencia con la cual el equipo entrega energía a una corriente de aire. De hecho, esta sensibilidad al flujo de entrada es usada para controlar el aire de salida del ventilador en varios tipos de ventiladores. Dispositivos como alabes de entrada con guía variable permitirán ajustar el patrón de flujo que entra a un ventilador, cambiando de esta manera la cantidad de energía transferida desde el equipo al fluido.

Cuando se crea un remolino en el sistema de ventilación que gira en la misma dirección que las aspas del ventilador, se produce una disminución en la carga del ventilador que hace que la curva de operación de éste se desplace hacia la izquierda, alejándose en general del punto de máxima eficiencia (BEP). Por el contrario, cuando existe un remolino que gira en la dirección opuesta de las aspas del ventilador se creará una carga adicional en el equipo, haciendo que la curva de operación se desplace hacia la derecha, concluyendo en una pérdida de eficiencia. Cabe señalar, que algunos diseñadores utilizan la creación de remolinos que giran en el sentido opuesto de las aspas del ventilador, como una manera de aumentar la presión de salida del equipo, no obstante esto disminuye directamente la eficiencia del ventilador. Las condiciones explicadas anteriormente se pueden apreciar en la Figura N° 56:

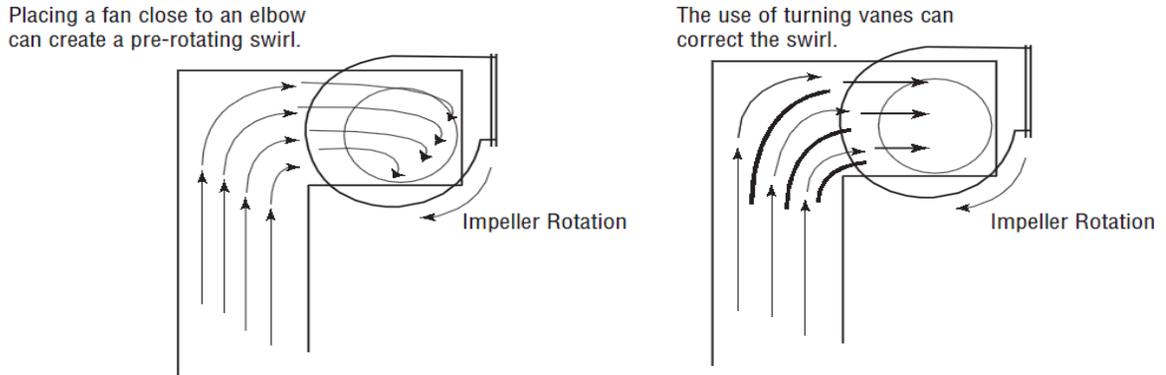


Figura N° 56: “Consideraciones para el diseño eficiente a la entrada de un Sistema de Ventilación”

Otra condición en los álabes de entrada que puede interferir con la operación de un ventilador, es el aumento en el flujo no uniforme a la entrada del equipo. Como se muestra en la Figura N° 57, ubicando un codo en el ducto de ventilación muy cercano a la entrada del ventilador puede causar que el flujo de ingreso sea irregular, lo que causaría una ineficiencia en la transferencia de energía y vibraciones en el ventilador. Una guía general en el diseño de sistemas de ventilación, es la existencia de un ducto lineal de entrada al equipo con una longitud mayor a tres veces el diámetro del ducto, permitiendo de esta manera que el flujo de aire se vaya uniformando a medida que se acerca al ventilador.

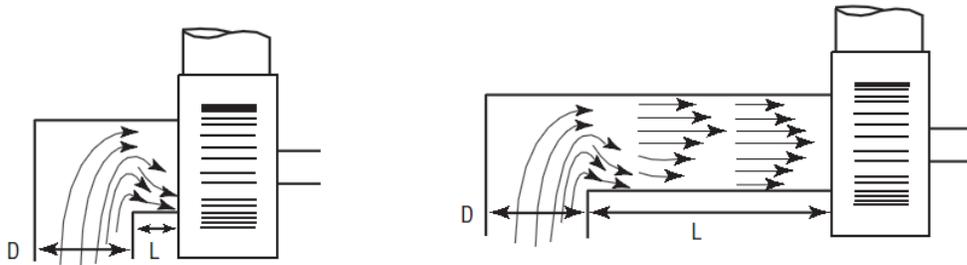


Figura N° 57: “Consideraciones para el diseño eficiente a la entrada de un Sistema de Ventilación”

Alternativamente, en caso de que no exista el espacio necesario para realizar la medida anterior, es posible utilizar un codo que permita guiar el flujo a la entrada del ventilador, como se muestra en la Figura N° 58.

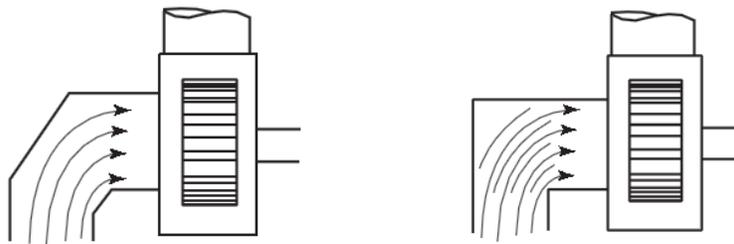


Figura N° 58: “Consideraciones para el diseño eficiente a la entrada de un Sistema de Ventilación”

➤ SALIDA DEL VENTILADOR

Malas condiciones a la salida de un ventilador, también producirá ineficiencias en el sistema aumentando los costos de operación. Vórtices o remolinos aumentarán las caídas de presión en los ductos de ventilación, lo que puede llevar a un servicio inadecuado en una o más ramas del sistema. Como se muestra en la Figura N° 59, las cavidades deben ser ubicadas lo suficientemente lejos de la salida del ventilador, para que los flujos de aire se regularicen y no causen una mayor obstrucción del aire.

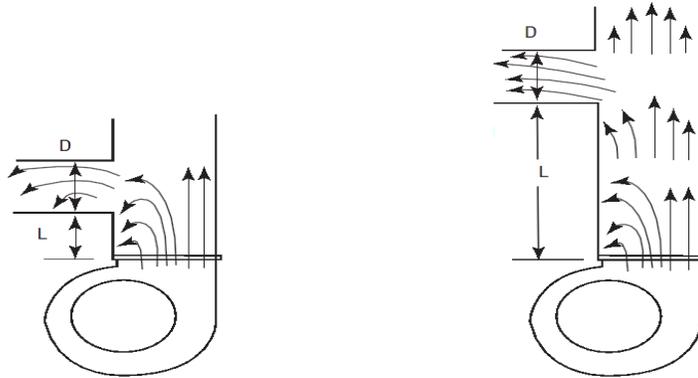


Figura N° 59: “Consideraciones para el diseño eficiente a la salida de un Sistema de Ventilación”

➤ DIVISORES Y UNIFORMADORES DE FLUJO

Muchos problemas en los ductos de ventilación pueden ser corregidos utilizando otros dispositivos que permitan dividir o uniformar el flujo, con el objetivo de disminuir la creación de remolinos de aire u obstrucciones en el sistema. Por ejemplo, como se muestra en la Figura N° 60, un divisor de flujo puede prevenir el gran desajuste que ocurre al interior de los ductos debido al choque de masas de aire.

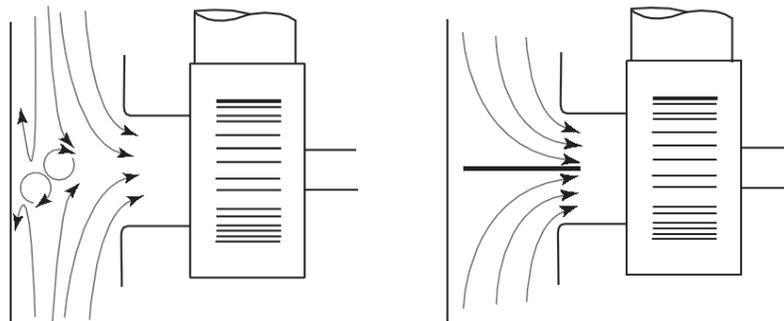


Figura N° 60: “Utilización de divisores de flujo para el diseño eficiente de Sistemas de Ventilación”

5.3.4.2. CONTROL DE VENTILADORES CON CARGAS VARIABLES

Los ventiladores a menudo son utilizados en un amplio rango de condiciones de operación, debido a cambios variables en la producción, en las condiciones ambientales o en la ocupación de un determinado lugar. Para acomodarse a los cambios en la demanda, el flujo debe ser controlado de manera variable, para lo cual existen tres métodos principales: cambios en los álabes de entrada, reguladores de salida o controladores de velocidad.

Cada método tiene ventajas y desventajas en términos de inversión, efectividad en el control de flujo y eficiencia energética. Por ejemplo, en sistemas de ventilación que son usados con poca frecuencia, el costo inicial será un factor determinante, y por el contrario, en aquellos que poseen un alto grado de utilización anual, como es el caso de los equipos a utilizar en la Planta Concentradora Quellaveco, la efectividad en el control de flujo y la eficiencia energética serán las características a preferir.

En la Figura N° 61, se muestra como varía el consumo de energía en función del flujo de aire, mediante la utilización de diferentes métodos de control en los sistemas de ventilación.

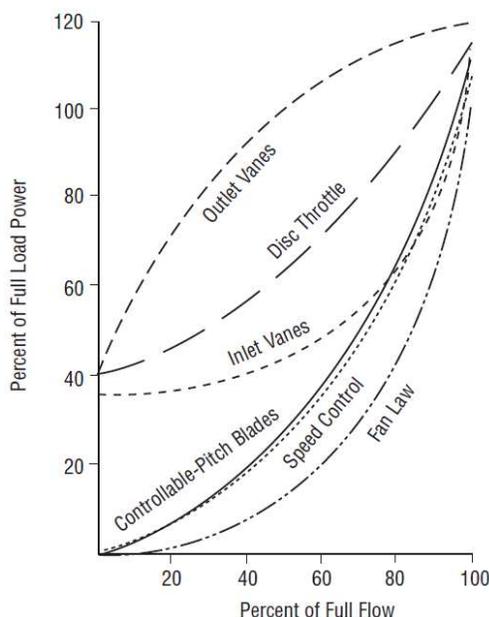


Figura N° 61: “Curvas de operación de diferentes métodos de control de flujo”

➤ REGULADORES (DAMPERS)

Los Dampers proveen un control de flujo cambiando las restricciones en el “camino” de la corriente de aire. Mediante la utilización de un dámper cerrado, se reducirá la cantidad de flujo y se incrementará la presión del aire “aguas arriba”.

A través de este aumento en la resistencia del sistema de ventilación, estos dispositivos forzarán al ventilador a operar contra una mayor presión reduciendo de esta manera la salida. A su vez, como el ventilador trabaja contra una mayor presión del sistema, el punto de operación se moverá hacia la izquierda a través de la curva de operación, lo que puede llevar a un aumento en los costos de operación y mantenimiento del sistema si hay un alejamiento del punto de máxima eficiencia (BEP).

➤ CAMBIOS EN LOS ÁLABES DE ENTRADA.

Este tipo de dispositivos se utiliza principalmente en los ventiladores centrífugos, y su característica principal es la de cambiar el perfil de la corriente de aire que entra al ventilador. Estos dispositivos crean remolinos que rotan en la misma dirección que el rodete del ventilador, disminuyendo así el ángulo de entrada entre la corriente de aire entrante y los álabes del rodete, reduciendo de esta manera la carga en el ventilador, así como la presión y el flujo de aire. Cambiando la sensibilidad en el remolino de entrada, estos dispositivos podrán cambiar la curva de operación del ventilador reduciendo el flujo de salida y la carga del equipo, y a su vez aumentando la eficiencia de éste. Este tipo de aparatos es especialmente eficaz cuando la demanda en el flujo de aire varía entre un 80% y 100% de la carga nominal, ya que a bajas cargas este tipo de módulos es menos eficiente.

➤ VARIADORES DE FRECUENCIA

La utilización de variadores de frecuencia corresponde al método más eficiente para controlar el flujo de un ventilador. Esto ocurre, ya que reduciendo la velocidad de rotación del equipo, una menor cantidad de energía será impartida al flujo de aire, por lo que una menor cantidad de energía será disipada en el sistema de ventilación. Otra de sus características, es la posibilidad de cambiar la velocidad de rotación de manera continua, pudiendo mejorar la eficiencia del ventilador sobre un amplio rango de condiciones de operación. Para observar más características ventajosas en el uso de variadores de velocidad, leer la sección 5.2.5.1.

5.3.4.3. MANTENIMIENTO EFICIENTE DE SISTEMAS DE VENTILACIÓN

Existen diversas tareas de mantenimiento en los sistemas de ventilación, que incluyen:

- Inspección periódica de todos los componentes del sistema.
- Lubricación y reemplazo de rodamientos.
- Ajuste de la tensión de correas o eventual reemplazo.
- Medidas de Mantenimiento de Motores.

- Limpieza del Equipo de Ventilación.

Cabe señalar, que debido a un mal mantenimiento se pueden producir grandes costos adicionales en el sistema o pérdidas en la producción, debido a fallas en equipos importantes del proceso productivo.

➤ PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREVENTIVO

Para minimizar las fallas en los equipos, y por lo tanto el tiempo de mantenimiento no programado, es necesario realizar un chequeo de los sistemas de ventilación de manera periódica, dando a conocer los costos por pérdida de producción, así como los costos y riesgos debido a fallas catastróficas en el sistema, y la disponibilidad de equipos de repuestos.

A continuación, se muestra un detalle de las acciones de mantenimiento más importantes:

INSPECCIÓN DE CORREAS.

En aquellos ventiladores que utilizan correas, éstas son usualmente el elemento que requiere una mayor atención desde el punto de vista de mantenimiento. Debido al uso permanente que reciben estos elementos, estas tienden a perder tensión a lo largo del tiempo, reduciendo de esta manera la eficiencia en la transmisión de energía. Inclusive recién instaladas y con un apropiado ajuste las correas sufren pérdidas por transmisión entre un 5% y 10%, y dado que con el uso estas continúan degradándose, las pérdidas irán aumentando con el tiempo. A su vez, una mala mantención en estos dispositivos incidirá directamente en un aumento significativo de los niveles de ruido. Dado lo anterior, es necesario establecer una tensión adecuada en las correas, para de esta manera minimizar las pérdidas de energía.

Dos factores importantes en la inspección de una correa son la tensión de ésta y su alineamiento, los cuales deben ser chequeados periódicamente. La tensión apropiada para una correa es típicamente la más baja que evitará que una correa se deslice en la carga máxima, como se muestra en la Figura N° 62. Una importante práctica de mantenimiento a **evitar** es la utilización de “Belt Dressing Sprays” cuyo tratamiento superficial incrementa el nivel de fricción entre la correa y las poleas, impidiendo el resbalamiento de éstas. No obstante, este producto enmascara la causa fundamental del resbalamiento de la correa, entregando una solución temporal a la reducción del ruido. Cabe señalar, que este problema debe ser solucionado limpiando el sistema de acoplamiento o ajustando la tensión de la correa.

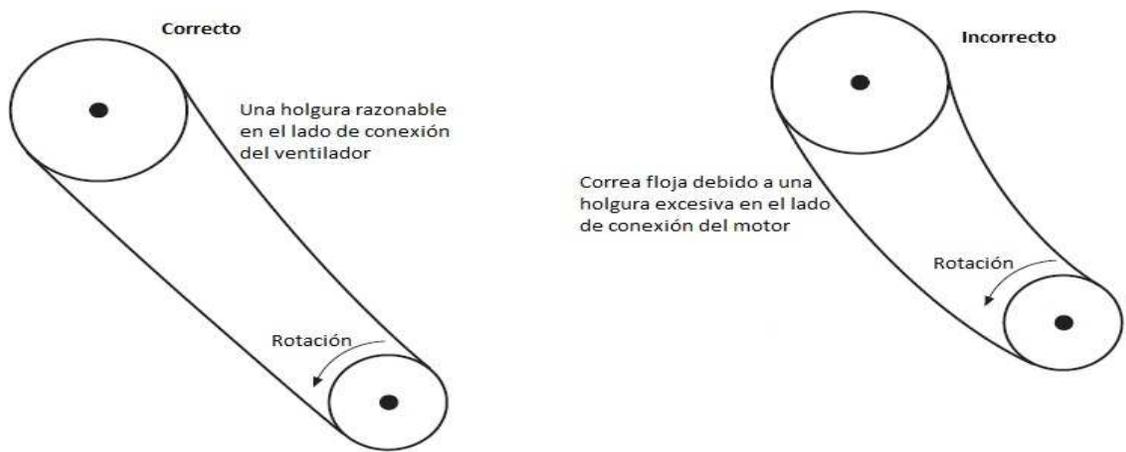
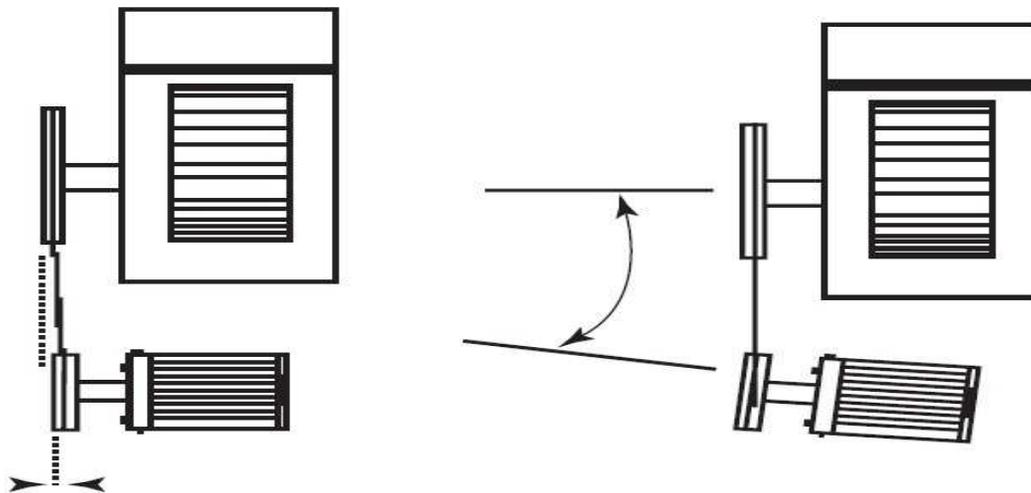


Figura N° 62: “Problemas de tensión en correas”

Una instalación apropiada de la correa requiere un cuidadoso alineamiento y tensado para asegurar que la correa tendrá un correcto funcionamiento. La alineación de la correa es importante para minimizar el desgaste lateral, así como para mantener uniformemente distribuida la tensión en la correa. El desgaste lateral en una correa disminuirá su vida útil y generará una tensión insuficiente promoviendo el resbalamiento de la correa, lo que puede conducir a un “pulimiento” de la polea, así como de la superficie de contacto de la correa. Una polea con una superficie “pulida” tendrá una menor fricción, lo que reducirá la capacidad de la correa para transmitir energía.



Es necesario mantener alineada la correa para evitar el desgaste lateral y mantener la carga distribuida uniformemente

Figura N° 63: “Problema de desalineamiento en acoplamientos”

LIMPIEZA DEL VENTILADOR

En muchos ventiladores, la operación decrece considerablemente debido a la contaminación que se va acumulando en las aspas del ventilador u otras superficies a través del tiempo. La contaminación que se deposita en el equipo, a menudo es no uniforme, resultando en un problema de balanceo que puede resultar en problemas de operación. A su vez, los ventiladores en una planta concentradora suelen estar expuestos a una alta contaminación con flujos de aire de alta humedad, haciendo necesaria una limpieza regular de los equipos.

Algunos tipos de ventiladores, como los centrífugos de álabes curvados hacia atrás, son altamente susceptibles de acumular partículas o humedad. Esta contaminación suele incidir en un decrecimiento de la eficiencia del ventilador, y por lo tanto, en un aumento en los costos de operación.

En aplicaciones con alto contenido de partículas y humedad, se suelen utilizar ventiladores de aspas radiales debido a su resistencia a la acumulación de contaminantes. Si debido a limitaciones técnicas, no puede ser utilizado un ventilador de aspas radiales es necesario realizar una inspección y limpieza periódica, con una frecuencia mayor a la normal.

LUBRICACIÓN DE RODAMIENTOS.

Los rodamientos desgastados pueden generar altos niveles de ruido, así como aumentar el riesgo de falla en los equipos. Dado lo anterior, los rodamientos deben ser monitoreados frecuentemente, y su lubricación debe ser realizada acorde a las instrucciones del fabricante. En particular, en una faena minera donde se utilizan ventiladores en ambientes severos, los intervalos de lubricación deben ser necesariamente semanales o diarios. A continuación se muestran algunas recomendaciones para el lubricante de rodamientos:

- Para rodamientos lubricados con aceite es necesario chequear la calidad de éste de manera regular, y reemplazarlo si fuera conveniente.
- Para rodamientos lubricados con grasa es importante chequear la calidad de ésta, y si fuere necesario cambiar los rodamientos junto con la grasa. Cabe señalar, que se debe ser cuidadoso de no sobre-engrasar los rodamientos, ya que esto podría interrumpir el movimiento rotatorio de las esferas causando un sobrecalentamiento.
- Asegurar que los rodamientos estén adecuadamente protegidos contra la contaminación.

➤ PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO

En muchas aplicaciones, el mantenimiento de ventiladores es reactivo en vez de proactivo. Por ejemplo, la lubricación de rodamientos se realiza como respuesta a un ruido audible en el equipo. A su vez, la limpieza del ventilador se realiza para corregir la mala operación de éste, o debido a la acumulación de polvo en el equipo. Desafortunadamente, muchos problemas en los sistemas de ventilación no son detectados hasta que ellos se convierten en un molestia audible, lo que en muchos casos puede haber significado altos costos en la operación debido al trabajo ineficiente del equipo.

Dado lo anterior, se hace fundamental utilizar herramientas que permitan pronosticar estas fallas, como es el caso del equipamiento de análisis de vibraciones, que permite detectar las perturbaciones del motor u otras piezas del ventilador, revelando así los síntomas previos a problemas de rodamientos, problemas en los enrollados del motor o desbalances dinámicos en la estructura del equipo. Una identificación de los problemas de manera anticipada, puede permitir una programación efectiva de las reparaciones, reduciendo de esta manera los riesgos por fallas en los equipos.

5.4. Compresores de Aire

Los compresores son máquinas de fluido construidas especialmente para aumentar la presión de elementos compresibles, tales como gases y vapores. Esto se realiza a través de un intercambio de energía entre la máquina y el fluido en el cual el trabajo ejercido por el compresor es transferido a la sustancia que pasa por él convirtiéndose en energía de flujo, aumentando su presión y energía cinética impulsándola a fluir.

Al igual que las bombas, los compresores también desplazan fluidos, pero a diferencia de las primeras que son máquinas hidráulicas, éstas son máquinas térmicas, ya que su fluido de trabajo es compresible (sufre un cambio apreciable de densidad) y, generalmente, también de temperatura; a diferencia de los ventiladores y los sopladores, los cuales impulsan fluidos compresibles, pero no aumentan su presión, densidad o temperatura de manera considerable.

Cabe señalar, que aun cuando sólo se utilizarán 9 compresores de aire en la planta Quellaveco estos consumirán anualmente 7.751 [MWh], lo que equivale al 1% de la energía eléctrica consumida por la planta. Cabe hacer notar, que estos equipos trabajarán principalmente entregando aire de servicio en la zona de molienda, y como “aireación” en las columnas de flotación. Dado lo anterior, se hace importante la optimización de estos equipos, ya que son elementos que individualmente consumen una gran cantidad de energía eléctrica.

A continuación, se describen los diferentes elementos que compondrán un sistema de aire comprimido:

- Compresor: corresponde al elemento mecánico que permitirá obtener aire del ambiente, para de esta manera incrementar su presión.
- Motor: corresponde al elemento que entregará la energía mecánica al compresor, que luego será utilizada para incrementar la presión del fluido.
- Controladores: corresponde a los elementos que permitirán regular la cantidad de aire comprimido a ser producido.
- Equipo de Tratamiento de Aire: corresponde al equipo que permitirá remover los elementos contaminantes existentes en el aire.
- Cañerías: corresponde a los elementos que permitirán transportar el fluido desde su zona de origen, al lugar donde será utilizado.

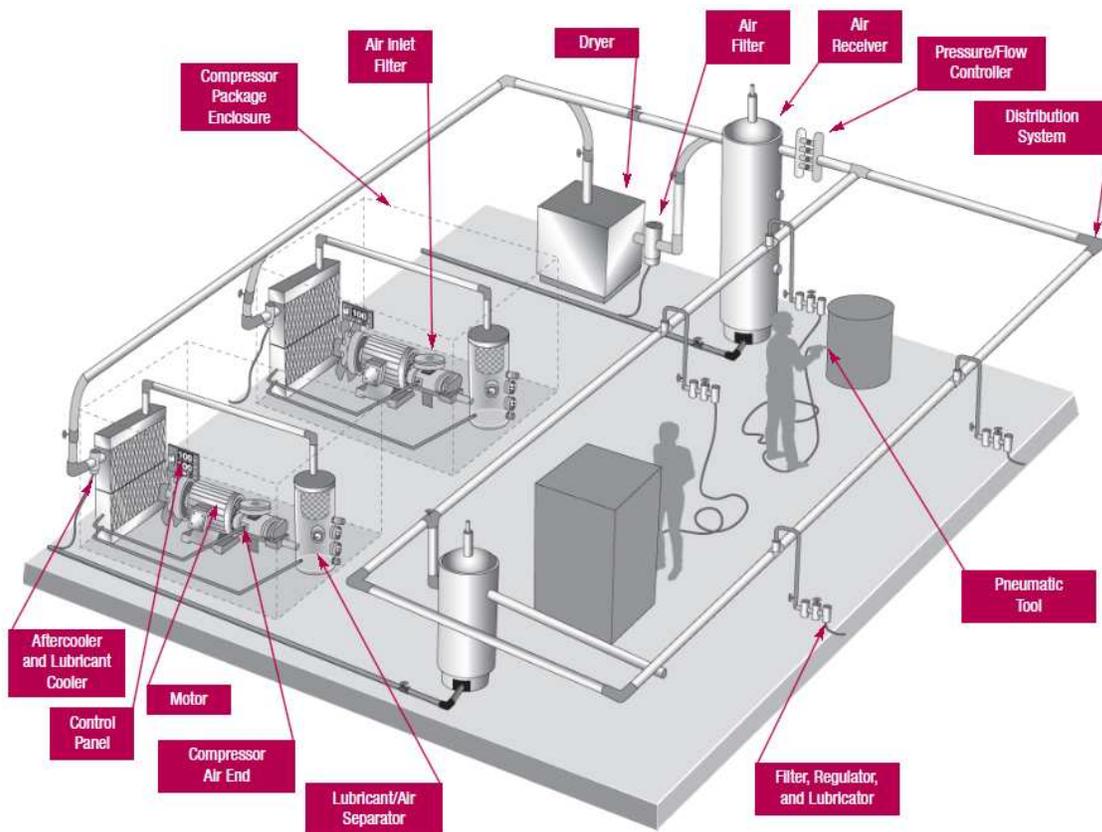


Figura N° 64: “Componentes principales de un Sistema de Compresión”

5.4.1. Caracterización de Compresores de Aire en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, los compresores de aire son equipos con gran potencial de ahorro energético debido principalmente a que son elementos que individualmente consumen mucha energía, llegando en promedio a los 861[MWh] de energía consumida anualmente. A continuación se caracterizarán los compresores a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.4.1.1. POTENCIA Y NÚMERO DE COMPRESORES DE AIRE

Como se observó en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 9 compresores de aire que corresponderán aproximadamente al 2% del número total de equipos eléctricos utilizados en la planta. Cabe señalar que este tipo de máquinas tendrá una potencia instalada de 2,45[MW], lo que equivale al 1,77% de la potencia total instalada. En la Figura N° 44 se muestra la distribución de la potencia instalada y del número de compresores según su potencia nominal en [kW].

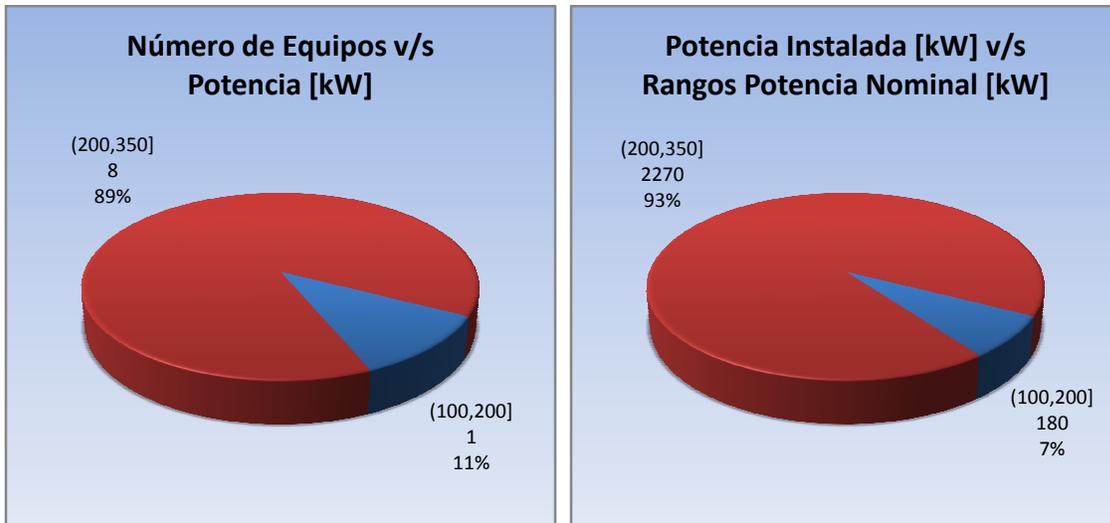


Figura N° 65: “Distribución de equipos y potencial instalada en Sistemas de Compresión”

Es posible apreciar, que la mayor cantidad de equipos se concentra en potencias menores a 350 [kW] correspondiendo al 89% de los compresores de aire a utilizar en la planta, que a su vez equivalen al 93% de la potencia instalada en compresores. Esto hace que los compresores a utilizar tengan una potencia nominal promedio muy alta, lo que hace propicio para las medidas de ahorro energético, en particular, para la utilización de variadores de frecuencia como un método de ahorro de energía.

5.4.1.2. OPERACIÓN DE EQUIPOS DE COMPRESORES

Como se observó en la Figura N° 34, el factor de carga de los compresores variará entre los 0,5 [0/1] y 0,6 [0/1], dado principalmente por un sobredimensionamiento en el diseño inicial de los equipos para que sean capaces de entregar flujos variables sin sobrecargarse. Además se observa, una utilización anual entre las 4.300 y 5.200 horas que es un valor menor al promedio de uso de los demás equipos de la planta. Esto se debe principalmente a los límites técnicos que poseen los compresores que no permiten un uso exhaustivo de los equipos, acotando el número de horas de uso.

5.4.2. Problemas Comunes en Sistemas de Compresión que Disminuyen la Eficiencia

En los sistemas de compresión existen dos grandes problemas que disminuyen la eficiencia de los procesos, como son las fugas de aire y las caídas de presión. Estos problemas ocurren principalmente debido a fallas en el diseño de los procesos o a la no utilización de programas de mantenimiento que permitan mantener la eficiencia de los sistemas a través del tiempo. A continuación se explicará en detalle la incidencia de estos problemas en los sistemas de compresión y como llevar a cabo medidas que busquen evitar este tipo de inconvenientes.

5.4.2.1. PROBLEMAS EN LOS SISTEMAS DE COMPRESIÓN

➤ FUGAS DE AIRE

Las fugas pueden ser una fuente significativa de pérdidas de energía en una planta industrial, llegando incluso a ser un 20% ó 30% de las pérdidas totales de un compresor. A su vez, las fugas de aire son causantes de otros problemas de operación, como son la caída de presión dentro del sistema, lo que disminuirá la eficiencia de los diferentes equipos, y por lo tanto, afectará directamente la producción. Por otra parte, dado que los equipos tienen que realizar un trabajo adicional debido a las fugas, estos tienden a tener un tiempo de vida útil menor, lo que aumenta los costos de mantención, así como la probabilidad de que ocurra una falla en el sistema.

Las pérdidas de aire debido a fugas pueden ser estimadas a través de la siguiente ecuación:

$$Pérdidas[cfm] = \left[\frac{V \cdot (P_1 - P_2)}{T} \cdot 14,7 \right] \cdot 1,25$$

Donde:

V: Corresponde al volumen estimado total del sistema en [pies cúbicos].

P₁: Corresponde a la presión de operación normal del sistema en [psig].

P₁ - P₂: Corresponde a la pérdida de presión debido a la fuga ocurrida en el sistema en [psig].

T: Corresponde a los minutos que demora el sistema en pasar de la presión P₁ a P₂.

En la Tabla N° 14 se muestran las pérdidas que puede sufrir un sistema en [pies cúbicos por minuto] en función de la presión del aire y del tamaño de un orificio.

Leakage rates* (cfm) for different supply pressures and approximately equivalent orifice sizes ^b						
Pressure (psig)	Orifice Diameter (Inches)					
	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	3/8
70	0.29	1.16	4.66	18.62	74.4	167.8
80	0.32	1.26	5.24	20.76	83.1	187.2
90	0.36	1.46	5.72	23.1	92	206.6
100	0.40	1.55	6.31	25.22	100.9	227
125	0.48	1.94	7.66	30.65	122.2	275.5

Tabla N° 14: “Pérdidas de fluido en un Sistema de Compresión en función de la presión del aire y del tamaño del orificio”

A partir de la tabla anterior, se puede observar que las pérdidas varían de manera proporcional al cuadrado del diámetro de un orificio, por lo que es de vital importancia disminuir al mínimo el tamaño de las fugas como un incentivo al ahorro energético y a la disminución de las fallas en los equipos.

Los costos debido a fugas de fluido en el sistema de compresión pueden ser estimadas a través de la siguiente ecuación:

$$\text{Costo}_{\text{Pérdidas}}[\text{USD}] = \# \text{Fugas} \cdot \text{FlujoFuga} \cdot E_C \cdot T_A \cdot P_E$$

Donde:

#Fugas: Corresponde al número de fugas existente en el sistema.

FlujoFuga: Corresponde a las fugas de flujo debido a los orificios existentes en el sistema, en [cfm].

E_C : Corresponde a la eficiencia del compresor de aire, expresado en [kW/cfm].

T_A : Corresponde al número de horas de uso anual del sistema de compresión.

P_E : Corresponde al precio monómico de la energía expresado en [USD/kWh].

➤ CAÍDAS DE PRESIÓN

Las caídas de presión se caracterizan por una reducción en la presión del aire desde el punto de descarga del compresor, hasta el punto de utilización del flujo. En sistemas de aire comprimido diseñados correctamente, se obtienen caídas de presión menores a un 10% de la presión de descarga del compresor, no obstante, en sistemas mal diseñados o que no poseen un mantenimiento rutinario, las caídas de presión puede variar entre un 30% y 50%.

Una caída de presión excesiva incidirá directamente en un mal funcionamiento del sistema, así como pérdidas en la eficiencia debido al mayor consumo de energía. Cabe señalar, que cualquier restricción, obstrucción o dificultad que presente el flujo en un sistema de cañerías incidirá en caídas de presión, por lo tanto, cualquier minimización en las diferencias de presión entre los distintos componentes del sistema será una mejora en la eficiencia de la operación.

Otro problema asociado a las caídas de presión, es el aumento en la presión de descarga de un compresor, lo que incrementa de manera directa las pérdidas de flujo en grietas u orificios que pueda presentar el sistema.

5.4.3. Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Compresión

5.4.3.1. ESTABILIZANDO LA PRESIÓN DEL SISTEMA

La estabilización de presión en un sistema de aire comprimido es una importante forma de disminuir los costos de energía, manteniendo a su vez la confiabilidad de la producción y la calidad del aire. No obstante, esta necesidad de estabilizar la presión debe ser regida por los patrones de demanda de aire comprimido y un nivel de presión mínimo aceptable para mantener la confiabilidad de la producción, ya que altos volúmenes de demanda intermitente pueden causar a su vez variaciones en la presión del aire, pudiendo ser mal interpretados como insuficiencia de presión en el sistema. A continuación, se muestra una breve descripción de los componentes necesarios para realizar una correcta estabilización de la presión de un sistema de aire comprimido.

➤ ALMACENADOR DE AIRE PRIMARIO

Existen casos en que una aplicación de aire comprimido puede requerir una gran demanda de flujo intermitente, que a su vez puede causar severas fluctuaciones de presión en todo el sistema. Este tipo de demandas a menudo es de corta duración por lo que un equipo de almacenamiento primario de aire puede suplir la necesidad del sistema, sin la necesidad de sufrir variaciones de presión en los equipos restante. Además, el intervalo de tiempo entre este tipo de eventos de demanda es adecuado para restaurar el sistema de almacenamiento de aire, sin que ello amerite la necesidad de aumentar la capacidad de compresión en el sistema. Entre las ventajas de utilizar un sistema de almacenamiento primario de aire se tienen:

- Disminuye los procesos de carga y descarga en compresores.
- Acumula el aire condensado, que puede ser transportado desde el intercambiador de calor o los separadores de humedad.
- Provee una disminución en los pulsos de presión de los compresores recíprocos.
- Permite suministrar el aire comprimido en caso de una demanda intermitente de “corta duración”, sin sobrecargar el compresor.

➤ CONTROLADORES PRESIÓN / FLUJO (P/FC)

Los controladores de Presión / Flujo (P/FC) son dispositivos de control usados como complemento a los compresores y a los equipos de almacenamiento primario. Estos dispositivos sirven para separar el lado de alimentación de un sistema de aire comprimido con la demanda del sistema. Los P/FCs usan la operación de los compresores para llenar y acumular el aire a una alta presión en un sistema de almacenamiento primario, para luego abastecer la demanda del sistema a la presión requerida por ésta. Los P/FCs pueden trabajar además con controladores electrónicos para monitorizar la presión del sistema “aguas abajo” de las válvulas. De esta manera, los P/FCs responderán rápidamente a fluctuaciones de demanda y permitirán mantener la presión del sistema de manera controlada, evitando así las caídas de presión y los aumentos repentinos en los flujos de aire. Con un diseño apropiado y un sistema de control, el almacenamiento puede ser usado para cumplir la demanda de aire y reducir los tiempos de operación de los sistemas de compresión.

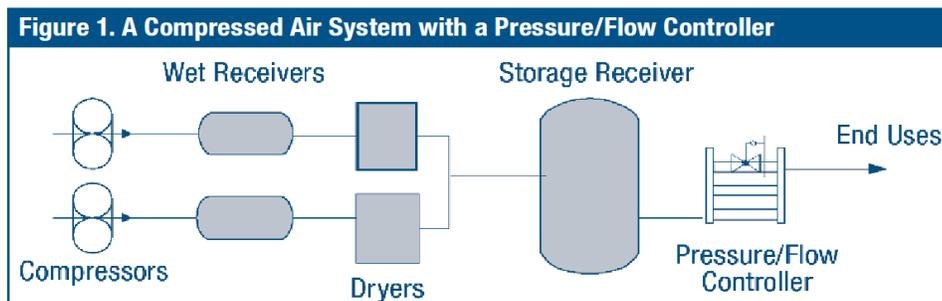


Figura N° 66: “Esquema de un Sistema de Compresión con controladores P/FC”

A continuación se muestran otras alternativas que permiten la disminución de las caídas de presión en un sistema de aire comprimido, y por ende aumentaran la eficiencia de estos procesos:

- Diseñar correctamente el sistema de cañerías para disminuir las caídas de presión. Además, es necesario utilizar intercambiadores de calor, separadores de humedad, secadores y filtros, que garanticen la menor caída de presión en el punto de operación del sistema.
- Operar y mantener los filtros de aire y secadores de manera óptima para disminuir los efectos de la humedad, tales como la corrosión de cañerías.
- Reducir la distancia recorrida por el aire a través del sistema de distribución, para de esta manera disminuir la probabilidad de fugas debido a grietas u orificios.
- Especificar reguladores de presión, lubricadores, mangueras y conectores con las mejores características de funcionamiento para una baja presión diferencial.

5.4.3.2. UTILIZACIÓN DE VARIADORES DE VELOCIDAD (VSD)

Mediante la utilización de almacenadores de aire y controladores P/FC disminuirá inevitablemente la carga de los compresores, ya que será posible operar el sistema utilizando el aire acumulado en el dispositivo de almacenamiento primario. Esto puede llevar a utilizar los compresores de manera equivocada, cambiando continuamente las condiciones de carga y descarga de estos, basándose en la idea equivocada de que si la capacidad promedio del sistema es 50%, el compresor estuvo trabajando un 50% del tiempo a plena carga y un 50% sin carga, lo que no ocurre en la realidad, ya que el consumo promedio de energía no aumenta linealmente con el grado de carga del compresor como se muestra en la Figura N° 67.

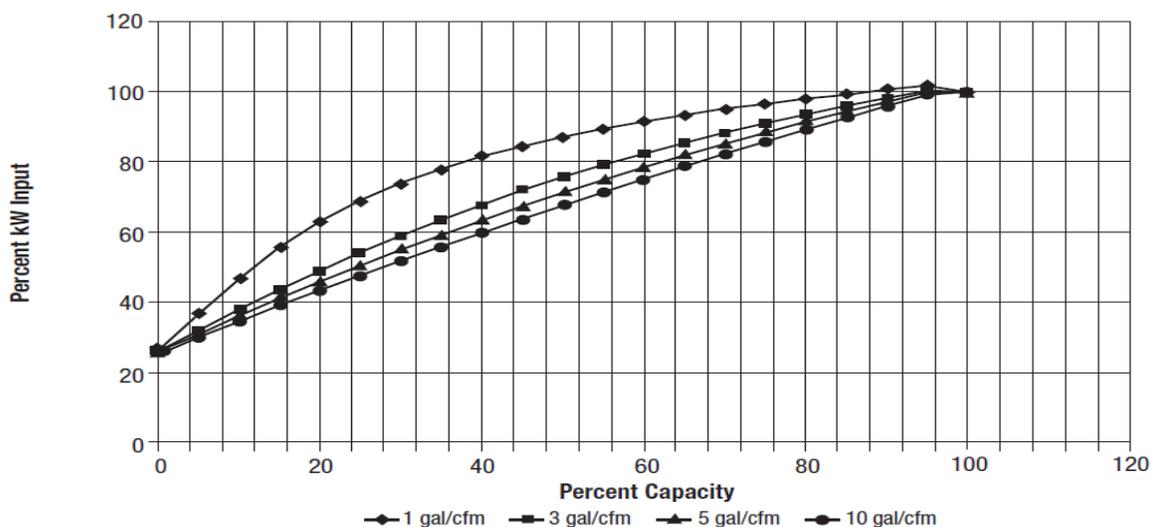


Figura N° 67: "Curva de operación de un Sistema de Compresión con VDFs"

Al observar la figura anterior, se puede observar que la potencia consumida por el compresor tiene un crecimiento decreciente con respecto al grado de carga de éste, en particular esto ocurre al utilizar un equipo de almacenamiento primario de gran tamaño (10gal/cfm), por lo que a bajas cargas el aumento diferencial de potencia será mayor que con un alto factor de carga. Además, es posible apreciar la existencia de una potencia base consumida por el compresor (26%), que existe inclusive cuando el equipo trabaja sin carga, y que es posible reducir a través del uso de variadores de velocidad (VSD).

Un compresor de aire manejado por un variador de velocidad permite controlar la potencia consumida del equipo de manera lineal con respecto al grado de carga, con una demanda de energía nula cuando no existe un flujo de aire requerido. Esto contrasta, con lo acontecido en compresores sin un sistema de control, que llegan a consumir un 26% de la potencia nominal, al trabajar sin carga.

Cabe señalar, que a plena carga este sistema consumirá una energía levemente mayor debido a las pérdidas originadas en el VSD, no obstante la energía ahorrada cuando el compresor trabaja a baja capacidad logra compensar ampliamente estas pérdidas.

5.4.3.3. DETECCIÓN DE FUGAS

Debido a que las fugas de aire son casi imposibles de ver, se debe recurrir a métodos especializados para localizar este tipo de problemas, como por ejemplo, la utilización de detectores ultrasónicos que permitan reconocer sonidos de alta frecuencia ocurridos en las tuberías y que en general están asociados a fugas de aire. Debido a las capacidades de estos equipos, es posible detectar este tipo de problemas en un gran número de situaciones, basados principalmente en el ruido generado por el aire, al pasar de un flujo laminar de alta presión dentro de la tubería a un flujo turbulento de baja presión a la salida de una fuga. Los detectores ultrasónicos tienen además la capacidad de no ser afectados por otro tipo de ruidos que pueden existir al interior de la tubería, debido a un filtro interno en el equipo, además tienen la ventaja de ser fáciles de usar, versátiles y rápidos en la búsqueda de fugas, debido principalmente a un incremento en la señal en la medida de que el escaneo se aproxime al punto donde se encuentre el problema.

5.4.3.4. MANTENIMIENTO EFICIENTE EN COMPRESORES

Para asegurar una mejor operación en los sistemas de compresión, así como una mayor vida útil de los equipos es fundamental mantener una calidad del aire apropiada, ya que de esta manera disminuyen los costos debido al uso de la energía y se asegura la confiabilidad de la producción. Una mala calidad del aire puede tener un efecto negativo en los equipamientos de la producción, como serán las celdas de flotación, incrementando de esta manera la necesidad de mantención de los dispositivos. Cabe señalar, que el nivel de la calidad del aire se ve afectado directamente por los niveles de partículas, humedad y contaminación por lubricantes que la aplicación final puede tolerar, por lo que claramente este nivel de calidad debe ser determinado antes de decidir si el aire necesita un tratamiento adicional. Además, dado que una mayor calidad del aire se traduce en mayores costos de producción (aumento en la inversión de equipamientos, consumo de energía y mantenimiento), es necesario realizar un tratamiento que permita mantener el aire de manera adecuada, y no sobreexigir la limpieza de este producto. A continuación, se muestra una breve descripción del mantenimiento a realizar en los distintos dispositivos del sistema:

➤ COMPRESOR

Las principales áreas a mantener en un sistema de compresión son el compresor, las superficies que intercambian calor, el separador del lubricante con el aire, el lubricante, el filtro del lubricante y el filtro de aire. El compresor, así como las superficies intercambiadoras de calor, necesitan mantener una limpieza diaria, ya que la suciedad disminuirá directamente la eficiencia de los compresores.

El lubricante del compresor, así como su filtro respectivo deben ser cambiados según las especificaciones del fabricante, ya que éste se puede transformar en corrosivo, y por lo tanto, degradaría la eficiencia de los equipos y del sistema.

➤ MOTOR

Si el motor eléctrico que conduce un compresor no es mantenido apropiadamente, éste no sólo consumirá una mayor cantidad de energía, sino que disminuirá su vida útil. A continuación, se muestra una breve descripción de la mantención que debe requerir un motor, no obstante existe un mayor detalle de ello en la sección 5.1.3.2.

- **Lubricación:** Una lubricación excesiva puede ser tan dañina como la utilización de lubricantes en un motor, y es la causa principal de las fallas prematuras en los equipos. Los motores deben ser lubricados según las especificaciones del fabricante, cuyo rango va de los 2 a 18 meses, dependiendo del número de horas de utilización anual, así como de la velocidad del motor.
- **Limpieza:** Debido a que los motores necesitan disipar calor, es importante mantener limpias y libres de obstrucción todas las vías de aire.

➤ EQUIPOS DE TRATAMIENTO DE AIRE

Un equipo de tratamiento de aire que no posee una mantención adecuada puede resultar en un consumo excesivo de energía, así como entregar una pobre calidad del aire que puede dañar el equipamiento aguas abajo. Todos los filtros deben mantenerse limpios según las especificaciones técnicas, así como secadores, intercambiadores de calor, y separadores.

➤ TRAMPAS DE HUMEDAD.

La mayoría de los sistemas de aire comprimido tiene numerosas trampas de humedad localizadas a través del sistema. Las trampas necesitan ser inspeccionadas periódicamente para asegurar que no se encuentran bloqueadas en una posición en particular. Una trampa automática estancada en la posición de apertura aumentará las pérdidas de aire comprimido, por el contrario, una trampa automática estancada en la posición de cerrado causará la condensación del aire, que luego será transportado “aguas abajo” y por lo tanto puede dañar otros componentes del sistema. No obstante lo anterior, las pérdidas debido a trampas atascadas en la posición de apertura suelen ser mayores.

➤ FILTROS, REGULADORES Y LUBRICADORES.

Estos dispositivos son necesarios para asegurar que las aplicaciones están recibiendo un aire limpio y a una presión regulada. Los filtros deben ser inspeccionados periódicamente, ya que uno en mal estado aumentará las caídas de presión, aumentando el flujo de aire entregado por el compresor, o bien disminuyendo la presión obtenida por la aplicación a utilizar, lo que en ambos casos causará un aumento en los costos de operación. Además, un filtro que no opera apropiadamente permitirá el acceso de contaminantes, causando una disminución en la vida útil de los equipos. Los niveles de lubricante deben también ser chequeados continuamente para asegurar que el compresor no está corriendo en seco.

➤ RUTINA DE MANTENIMIENTO PARA COMPRESORES (AIR-COOLED RECIPROCATING COMPRESSORS)

DIARIAMENTE

- Mantener los niveles de lubricación en un rango adecuado. Un alto nivel de lubricación puede indicar la presencia de gotas líquidas de aire condensado. Si el lubricante está contaminado será necesario drenar y reemplazar.
- Drenar los tanques de almacenamiento de aire y las trampas en el sistema de distribución de aire.
- Realizar una inspección visual para asegurar que los protectores de seguridad estén en su lugar.
- Chequear por ruidos o vibraciones inusuales en el compresor.

- Comprobar la presión del lubricante, se debe mantener una presión entre 18 y 20 psig cuando el compresor este con una presión y temperatura de operación. Compresores a una alta presión deben mantener una presión de lubricación entre 22 a 25 psig.
- Chequear por fugas de lubricantes.

SEMANALMENTE

- Asegurar que las válvulas de presión estén funcionando adecuadamente.
- Limpiar las superficies de los intercambiadores de calor y compresores.
- Chequear el compresor por fugas de aire.
- Chequear el sistema de distribución de los compresores por fugas.
- Inspeccionar el lubricante por contaminación y cambiar si es necesario.
- Limpiar o reemplazar el filtro de aire. Chequear más a menudo si las condiciones de humedad o polvo ambiental son severas.

MENSUALMENTE

- Chequear la tensión de las correas.

TRIMENSUALMENTE

- Cambiar el lubricante (con mayor frecuencia en ambientes contaminados).
- Chequear el filtro de los lubricantes (con mayor frecuencia en ambientes contaminados).

SEMESTRALMENTE

- Cuando se utilice lubricación sintética, cambiar el lubricante cada 1.000 horas.
- Inspeccionar las válvulas del compresor por fugas. Limpiar el colector de lubricante usando un solvente seguro, inflamable y no tóxico.

ANUALMENTE

- Inspeccionar los puntos de contacto en el partidador del motor.
- Inspeccionar el diafragma del compresor, así como los contactos.

5.5. Correas Transportadoras

Las correas transportadoras son utilizadas ampliamente en los sectores comerciales e industriales, como una forma de trasladar productos entre dos puntos de una planta. En la gran minería, las correas transportadoras son el medio más eficaz para transportar mineral, ya que proporcionan un flujo continuo de éste. Más aún, con los nuevos requerimientos ambientales en los procesos productivos, se incentiva aún más la utilización de este medio de transporte, ya que es una tecnología que emplea bajos costos de mano de obra y requiere una menor cantidad de energía, en comparación a otros sistemas como la utilización de camiones.

En la gran minería, las correas transportadoras tienen una labor fundamental al transportar el material entre los diferentes sectores de la planta, por lo que se utilizan correas en un amplio rango de tamaños, desde pequeñas potencias para el transporte de mineral desde el Chancador Pebbles al Molino de Bolas (11 [kW]), hasta grandes equipos como la correa que se utilizará para transportar el mineral desde el Chancador Primario a los Molinos SAG (6.700 [kW]). A continuación se describirán de una mejor manera las diferentes ventajas de utilizar correas transportadoras, así como algunas medidas de eficiencia que es posible establecer.

5.5.1. Generalidades de Correas Transportadoras

La correa, cinta o banda transportadora permite el traslado de material a granel y es un equipo de transporte continuo, cuya principal limitante es la granulometría del material a acarrear, ya que por el tamaño de la banda no permite el transporte de piedras de gran tamaño. Con la correa se pueden vencer pendientes significativas (20% y más), pudiéndose pasar por sobre terrenos con agua, lo cual es un punto favorable respecto a los camiones. El desarrollo de las correas tiene como principal traba la aparición de los camiones de gran tonelaje (debido al alto costo de instalación del sistema de correas), pero a grandes distancias se tiene que las correas son más competitivas llegando a ser más aplicables a medida que los trayectos y pendientes aumentan (profundización del rajo). Entre las principales ventajas de las correas transportadoras se tiene:

- Menores costos de operación
- Mayor seguridad
- Eficiencia y disponibilidad
- Versatilidad
- Adaptabilidad al perfil del terreno y al material a transportar

La inversión en este tipo de sistemas se divide en dos partes prácticamente iguales (correa + instalación), y la preocupación principal de los fabricantes es conseguir correas más baratas sin dejar de lado lo que respecta a la calidad de ellas, para lograr aún más competitividad.

La correa en sí, consta de un recubrimiento resistente al calor, abrasión, químicos, aceites, etc. Para lo cual se utiliza goma o caucho, que a su vez puede o no contar en su superficie con resaltes o relieves, para aumentar la adherencia del material a la cinta, la otra parte de la correa es el armazón interno, el cual le entrega la resistencia a la tracción y permite mantener la forma de la correa, este armazón es como una especie de tejido, cuyas características dependerán del material a transportar, ambiente y tensión a soportar.

Para la disposición de las correas transportadoras se puede distinguir entre: correas horizontales, correas con inclinación positiva, correas con inclinación negativa y correas con concavidades positivas y negativas. En la Figura N° 68 se muestran las principales partes de una correa transportadora típica:

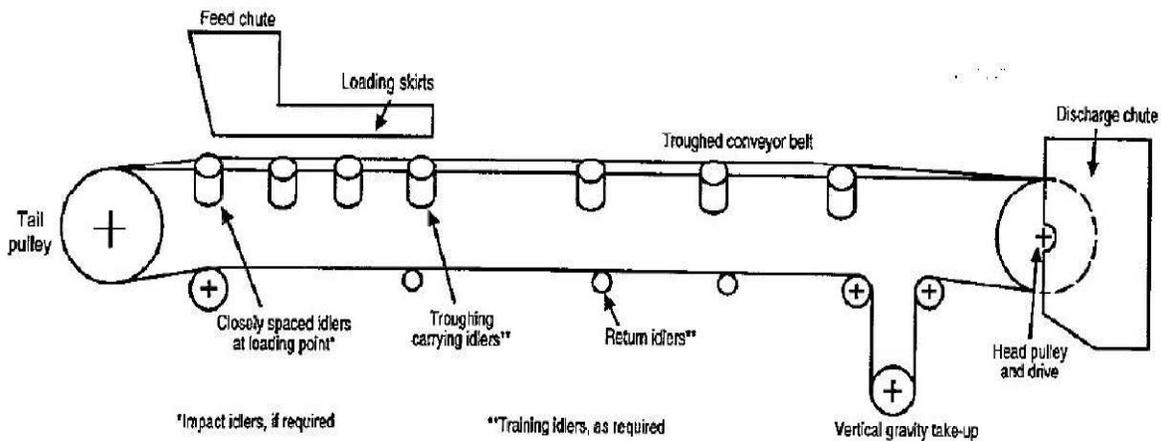


Figura N° 68: “Elementos principales de una Correa Transportadora”

5.5.2. Caracterización de Correas Transportadoras en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, las correas transportadoras son equipos con una gran demanda eléctrica alcanzando el 4,6% del consumo anual de la planta, con 37.000 [MWh]. Además, debido a la importancia de estos equipos dentro de la cadena productiva es que se hace fundamental su trabajo eficiente a lo largo del tiempo. A continuación, se caracterizarán las correas transportadoras a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.5.2.1. POTENCIA Y NÚMERO DE CORREAS TRANSPORTADORAS

Como se observó en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 26 correas que corresponderán al 5,6% de los equipos eléctricos. Cabe señalar que este tipo de máquinas tendrá una potencia instalada en la planta de 9,45 [MW], lo que equivale al 6,8% de la potencia total instalada. En la Figura N° 69 se muestra la distribución de las correas transportadoras y de su potencia instalada según su potencia nominal en [kW].

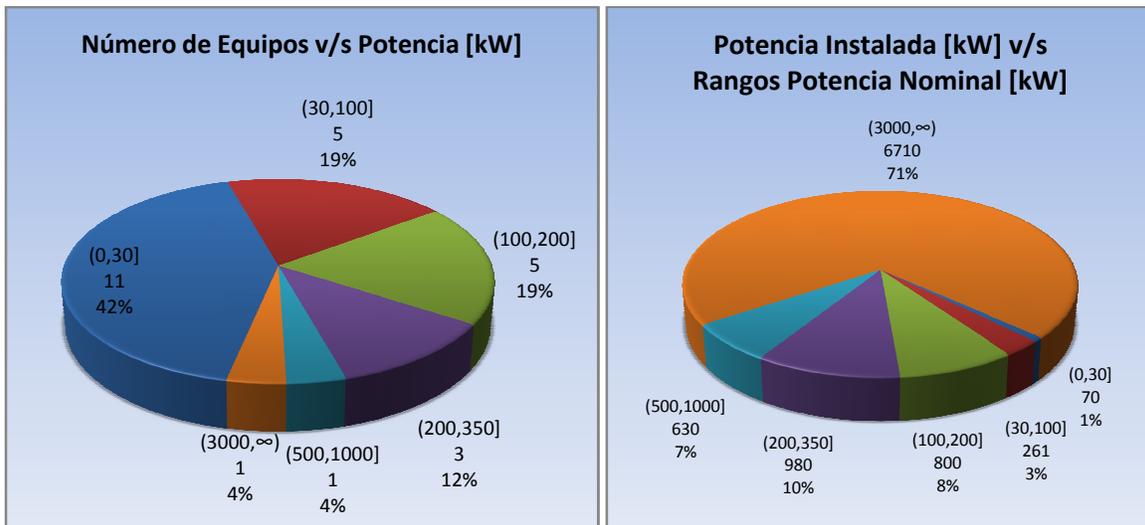


Figura N° 69: “Distribución de equipos y potencia instalada en Correas Transportadoras”

Es posible apreciar, que la mayor cantidad de equipos se concentra en potencias menores a 100 [kW] correspondiendo al 53% de las correas transportadoras, no obstante este gran número de equipos corresponde sólo al 4% de la potencia total instalada en correas.

Por el contrario, el 78% de la potencia instalada se distribuye solamente en 2 correas transportadoras que permitirán llevar el mineral desde el chancador primario hasta la entrada del molino SAG. No obstante lo anterior, dadas las características de estos equipos es posible obtener considerables ahorros energéticos en todo el rango de potencias, como se mostrará en los capítulos sucesivos.

5.5.2.2. OPERACIÓN DE CORREAS TRANSPORTADORAS

El tipo de operación de un sistema de correas transportadoras queda caracterizado principalmente por dos valores fundamentales, que son el número de horas de utilización anual y el factor de carga de los equipos. Como se observa en la Figura N° 34, el factor de carga de las correas transportadoras de Quellaveco variará entre los 0,5 [0/1] y 0,7 [0/1], dado principalmente por un sobredimensionamiento en el diseño inicial de los equipos para que sean capaces de soportar cargas variables sin sobrecargarse.

En particular, se puede observar que cerca del 90% de la potencia instalada tiene un factor de carga entre 0,5 y 0,6 [0/1].

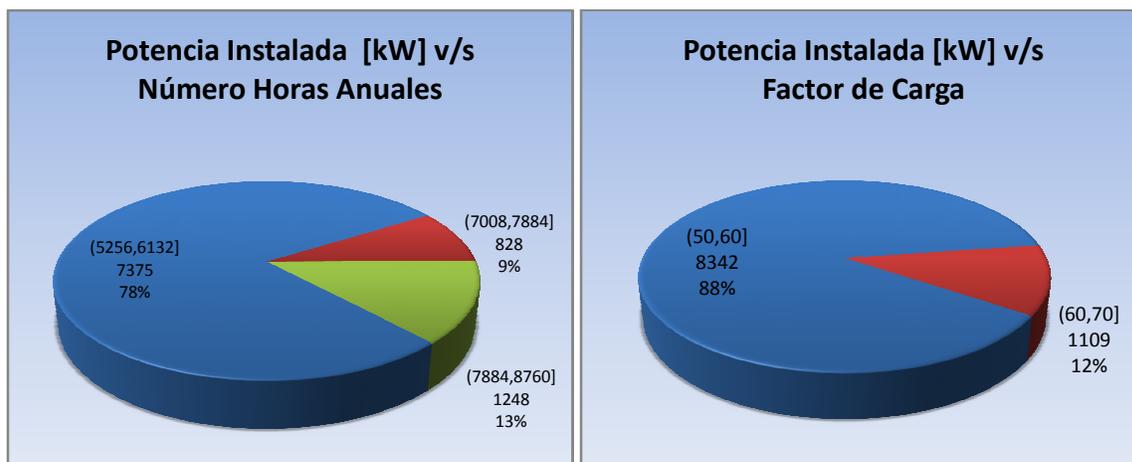


Figura N° 70: “Caracterización de la Operación de Correas Transportadoras”

Se puede apreciar, que las correas transportadoras en una planta concentradora de cobre tienen un alto grado de utilización, siendo superior a las 5.200 horas en el 100% de la potencia instalada. Cabe señalar, que las correas transportadoras son fundamentales para garantizar el buen funcionamiento de la cadena productiva en una planta minera, por lo que se hace necesaria la confiabilidad y seguridad de los equipos para disminuir los tiempos de mantenimiento no programado. Por otra parte, se observa la gran importancia de establecer medidas de eficiencia energética como una manera de disminuir el alto consumo de este tipo de equipos.

5.5.3. Variación de Velocidad en Correas Transportadoras

Al producirse una variación de la velocidad, también se puede incrementar o disminuir la capacidad de carga de una correa transportadora, considerando una alimentación constante de material en el chute de alimentación. Específicamente, para una condición de baja alimentación, se puede disminuir la velocidad de la correa, con lo cual, se disminuye el consumo de energía eléctrica, y para una condición de alta alimentación, se incrementa la velocidad, aumentándose la capacidad de transporte (toneladas/hora). Esto se conoce como Control del Perfil de Carga de la Correa.

En cualquier aplicación hay muchas opciones disponibles cuando se considera la elección del control. En correas transportadoras algunos de los criterios que se consideran en la elección son:

- Confiabilidad.
- Características mecánicas y eléctricas en la partida.

- Capacidad de compartir la carga entre múltiples motores.
- Control de la velocidad para efectuar reparto de carga.
- La eficiencia.
- Las características para interactuar con el sistema de control de la Planta.

En correas transportadoras se encuentran disponibles las siguientes opciones en cuanto al accionamiento: motores de rotor bobinado, acoplamientos hidráulicos, partidas a voltaje pleno, variador de frecuencia e inicio con partidador suave electrónico.

- Motores de rotor bobinado: Esta solución fue la más utilizada hace algunos años atrás, ya que proporciona una disponibilidad de torque en la partida y suministra ciertas características de variación de velocidad para compensar condiciones de reparto de carga entre varios motores. Sin embargo, tienen fuertes desventajas en parámetros, tales como mantenibilidad, debido a los carbones, la resistencia del rotor y el control en el switchgear. La variación de velocidad limitada y la eficiencia también son pobres. Con respecto a las partidas, hay altas corrientes de inrush que someten a los sistemas a altos peaks de torque.
- Partidor de motor a tensión plena: Esta solución es la más económica, pero tiene varios inconvenientes, como por ejemplo, la caída de tensión que provoca en sistemas eléctricos relativamente débiles. Además posee bajos torques de partida, estrés mecánico en el sistema de acoplamiento y en la correa, así como una pobre característica de reparto de carga, en la cual todos los transientes de tipo mecánico como eléctrico se absorben en las partes mecánicas, esto es en la misma cinta, como en reductores, acoplamientos y sistema de tensión mecánica de la correa.
- Partidores de tensión reducida: Esta solución si bien reduce las caídas de tensión en el sistema eléctrico y limita el estrés en el sistema mecánico es el que tiene la peor condición de partida, debido a que la característica de torque del motor se ve desmejorada con la reducción de la tensión aplicada al motor.
- Variador de frecuencia: Es por excelencia el mejor partidador de un motor de inducción. Entre las ventajas que posee la utilización de variadores de frecuencia en correas transportadoras se tienen:
 - Control del estrés mecánico producido por una partida directa en los motores eléctricos, impidiendo que se produzcan cortes de correa, afectando la estructura mecánica. En la actualidad, muchas correas acopladas a un variador de frecuencia no admiten una partida directa de los motores eléctricos, impidiendo de esta manera que se vea comprometida la estructura mecánica.

- Control de parada para correas regenerativas que utilizan variadores de velocidad. Esto permite controlar de mejor forma la detención de una correa, ya que se puede producir una detención en menor tiempo, y de manera más segura.

- Capacidad de **cogeneración** en correas regenerativas al devolver la energía al sistema eléctrico. Esta es una importante característica en el uso de VDF, y que permite un ahorro sustancial de energía en plantas concentradoras, no obstante, dado que se trata de un proceso de generación de energía y **no** de una disminución en el consumo eléctrico, es que no se tratará en este documento.

- Mejor distribución de la carga cuando se utiliza más de un motor en una combinación maestro-esclavo, dando además una mayor confiabilidad, ya que en caso de falla de uno de los variadores y/o motor, es posible operar la correa con menos carga.

- Mejores características de control, ya que el variador de velocidad permite, a través de protocolos de comunicación, enviar toda la información operativa de la correa. Con la utilización de variables eléctricas, se puede disponer de información tal como, tonelaje de la correa, así como datos que permitan conocer si la calibración de la correa es adecuada.

5.6. Evaluación Económica Equipos con VDFs

(Bombas, Compresores, Ventiladores y Correas Transportadoras)

Este tipo de análisis permitirá discriminar de manera correcta, la utilización de los diferentes criterios de eficiencia energética que se mencionaron en las secciones anteriores. En particular, permitirá observar las distintas condiciones de operación y externas a la planta concentradora, que permitirán la integración de las medidas de eficiencia en bombas hidráulicas, ventiladores, compresores y correas transportadoras; donde la principal fuente de ahorros provendrá de la utilización de variadores de frecuencia (VDF). Además este tipo de análisis permitirá obtener los aumentos en la inversión debido al uso de estas medidas, y los ahorros energéticos generados.

En este tipo de análisis es necesario considerar diferentes estados para comparar cuál es la mejor decisión a tomar en cuanto a medidas de eficiencia energética. Los estados a considerar son los siguientes (sin pérdida de generalidad, se considerará a las bombas hidráulicas como ejemplo para definir los estados):

- Estado Base: en el cual el sistema contará con una bomba centrífuga (compresor, ventilador o correa transportadora) acoplada a un motor de eficiencia estándar, que coincidirá con los valores de eficiencia IE1, definidos por la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores se muestran en el Anexo 9.1.
- Estado VDF + Motor Alta Eficiencia: en el cual el sistema contará con una bomba centrífuga (compresor, ventilador o correa transportadora) acoplada a un motor de **alta eficiencia**, que a su vez es controlado por un **variador de frecuencia** (el motor de alta eficiencia coincidirá con los valores de eficiencia IE3, definidos por la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores se muestran en el Anexo 9.1)
- Estado VDF + Motor Eficiente: : en el cual el sistema contará con una bomba centrífuga (compresor, ventilador o correa transportadora) acoplada a un motor **eficiente**, que a su vez es controlado por un **variador de frecuencia** (el motor eficiente coincidirá con los valores de eficiencia IE2, definidos por la nueva normativa de la IEC 60034-30 cuyos valores se muestran en el Anexo 9.1)
- Estado Motor Alta Eficiencia: en el cual el sistema contará con una bomba centrífuga (compresor, ventilador o correa transportadora) acoplada a un motor de alta eficiencia (IE3)
- Estado Motor Eficiente: en el cual el sistema contará con una bomba centrífuga (compresor, ventilador o correa transportadora) acoplada a un motor eficiente (IE2)

A continuación se muestran los diferentes costos que tendrán los equipos a través de su ciclo de vida, y que es necesario considerar para obtener los resultados correctos:

5.6.1.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Corresponde al costo que se debe efectuar por la compra de un “sistema de bombeo” en los diferentes estados a analizar. A continuación se muestran los diferentes costos de inversión a utilizar:

- Estado Base
 - Costo Fábrica Motor Estándar
 - Costo Bomba Centrífuga (Compresor, Ventilador o Correa Transportadora)
- Estado VDF + Motor Alta Eficiencia
 - Costo Fábrica de Motor Alta Eficiencia
 - Costo Fábrica VDF
 - Costo Bomba Centrífuga (Compresor, Ventilador o Correa Transportadora)
- Estado VDF + Motor Eficiente
 - Costo Fábrica de Motor Motor Eficiente
 - Costo Fábrica VDF
 - Costo Bomba Centrífuga (Compresor, Ventilador o Correa Transportadora)
- Estado Motor Alta Eficiencia
 - Costo Fábrica Motor Alta Eficiencia
 - Costo Bomba Centrífuga (Compresor, Ventilador o Correa Transportadora)
- Estado Motor Eficiente
 - Costo Fábrica Motor Motor Eficiente
 - Costo Bomba Centrífuga (Compresor, Ventilador o Correa Transportadora)

Dado que los costos de inversión de los motores fueron descritos en la sección 5.1.4.1, a continuación sólo se mostrarán los costos asociados a los variadores de frecuencia (VDFs).

Para modelar el costo de fábrica de los variadores de frecuencia se utilizará la fórmula siguiente:

$$\text{Costo Fábrica VDF [USD]} = a_1 + b_1 \cdot \text{Potencia VDF [kW]} \quad \forall \text{Potencia VDF}$$

En donde las constantes utilizadas para modelar estos costos son:

Tipo	Constantes		Valides Aprox. R ²
	a ₁	b ₁	
VDF	491,69	92,02	0,9890

Tabla N° 15: “Constantes utilizadas para modelar los precios de VDFs”

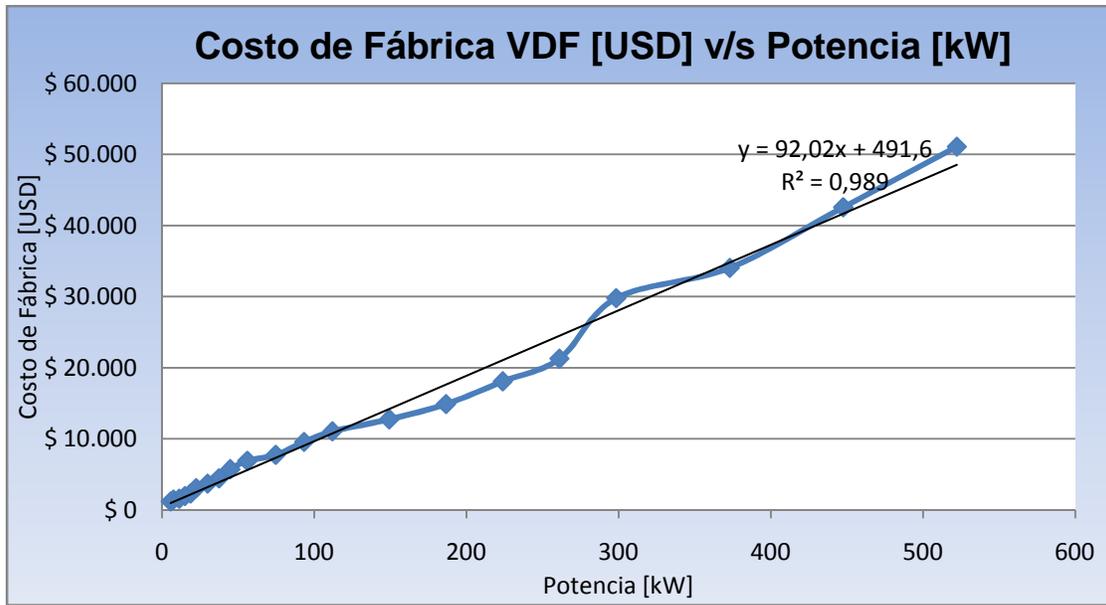


Figura N° 71: “Costo de Fábrica VDF [USD] v/s Potencia [kW]”

Cabe señalar, que se aplicará un recargo del 30% sobre el costo de fábrica de los variadores de frecuencia, distribuido de la misma manera que en el caso de los motores (Sección 5.1.4.1)

Por otra parte, es posible observar que no es necesario conocer el valor de fábrica de las bombas centrífugas (compresores, ventiladores o correas transportadoras) para la realización de la evaluación económica, debido principalmente a que todos los estados ocuparán el mismo tipo de elementos y por lo tanto los costos de fábrica de éstos se anularán.

Sea

$$CI_{BASE} = CI_{MOTOR_IE1} + CI_{BOMBA}$$

$$CI_{VDF+IE3} = CI_{VDF} + CI_{MOTOR_IE3} + CI_{BOMBA}$$

Se tiene que el flujo de caja en el año será :

$$\Rightarrow F_0 = CI_{VDF+IE3} - CI_{BASE} = (CI_{VDF} + CI_{MOTOR_IE3} + CI_{BOMBA}) - (CI_{MOTOR_IE1} + CI_{BOMBA})$$

$$\Rightarrow F_0 = CI_{VDF} + CI_{MOTOR_IE3} - CI_{MOTOR_IE1}$$

Observándose que el F_0 no depende de los costos de fábrica de los equipos, ya sea bombas hidráulicas, compresores, correas transportadoras o ventiladores.

5.6.1.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Corresponde a los costos en que incurren los elementos del sistema para funcionar correctamente. A continuación se realiza una breve explicación de este tipo de costos en cada uno de los elementos del sistema de bombeo (sin pérdida de generalidad, se puede aplicar al caso de ventiladores, compresores y correas transportadoras):

- Bomba: Dado que las bombas no son un elemento consumidor de energía su costo de operación se basa principalmente en el mantenimiento que estas conllevan. La forma en cómo se evaluará este costo se explicará en la siguiente sección.
- VDF: Su costo de operación se basa principalmente en su consumo de energía y en los costos de mantención necesarios para la operación. No obstante, dado que su consumo es mucho menor respecto al del motor, se supondrá un consumo despreciable. La forma en cómo se evaluará el costo de mantenimiento se explica en la siguiente sección.
- Motor: Su costo de operación se basa principalmente en su consumo de energía y en los costos de mantención necesarios para la operación. Cabe señalar, que no se considerará un costo de reparación del motor, ya que Quellaveco es una planta que aun está en etapas de proyecto y por lo tanto, al inicio de la operación sólo se contará con motores nuevos, cuya probabilidad de falla es aproximadamente igual en todos los equipos, luego los costos asociados a la reparación serán iguales para un motor estándar o para un motor eficiente.

El costo de operación anual asociado a la energía y potencia consumida para los diferentes estados mencionados anteriormente se muestra a continuación:

- Estado Base - Estado Motor Eficiente - Estado Motor Alta Eficiencia

$$COA = \frac{P_{nom} \cdot fc \cdot H_A \cdot P_M}{\eta} \quad [\text{USD}]$$

- P_{nom} : Potencia Nominal Motor[kW]
- fc : Factor de Carga, medido en [o/1]
- H_A : Número de horas anuales promedio de uso.
- P_M : Precio monómico de la energía medido en [USD/kWh].

- η : Eficiencia del Motor en Planta, medida en [0/1]. Depende del factor de carga, y del tipo de Norma que siga el motor. A continuación se muestra la ecuación que muestra la variación de eficiencia con el factor de carga⁹:

$$\eta = \eta_0 \cdot \frac{f_c}{f_c \cdot \eta_0 + (1 - \eta_0) \cdot (0,5 \cdot f_c^2 + 0,5)}$$

Con

f_c = factor de carga [0/1]

η_0 = eficiencia nominal del equipo [0/1]

- Estado VDF + Motor Eficiente - Estado VDF + Motor Alta Eficiencia

$$COA = \frac{P_C \cdot f_c \cdot H_A \cdot P_M}{\eta} \quad [\text{USD}]$$

- P_C : Potencia corregida según el tipo de aplicación [kW].
- f_c : Factor de Carga, medido en [0/1]
- H_A : Número de horas anuales promedio de uso.
- P_M : Precio monómico de la energía medido en [USD/kWh].
- η : Eficiencia del Motor en Planta, medida en [0/1]. Obtenida a partir de la ecuación mostrada en la parte anterior.

La potencia corregida de los equipos que utilizarán variadores de frecuencia se obtendrá mediante la siguiente ecuación¹⁰:

$$P_C = P_{NOM} \cdot (1 - K)$$

En donde el valor de “K” dependerá del tipo de aplicación donde se utilizará el variador de frecuencia, y mostrará los ahorros promedio que generará la utilización de un VDF en los distintos procesos. En particular, se tiene que:

K = 0,15 en correas transportadoras y compresores

K = 0,35 en bombas y ventiladores

⁹ Modelo obtenido por el Programa de Investigaciones en Energía (PRIEN), para la Corporación Nacional del Cobre Codelco - Chile

¹⁰ La ecuación fue obtenida a partir de la Bibliografía N° 18

Cabe señalar, que al igual que en el caso de los motores, sólo se considerará el factor de carga como una medida de disminución en la eficiencia, ya que se considerará ideal el sistema eléctrico de Quellaveco, es decir, sin variaciones considerables entre fases de voltaje y manteniendo la frecuencia y tensión nominal a lo largo de su operación. Además dado que se utilizarán sólo motores nuevos para la construcción de la planta, no existirán motores previamente rebobinados. Por otra parte, no se considerará el factor de altura, ya que como se mencionó anteriormente su incidencia en la eficiencia variará dependiendo de la aplicación y de las variaciones de carga a las cuales se enfrente el equipo.

5.6.1.3. OTROS COSTOS

Existen diversos costos que son necesario evaluar previo a la instalación de un sistema de bombeo, de ventiladores, de compresores o correas transportadoras, pero que no se considerarán en este informe debido a la dificultad para estimarlos, o porque son dependientes de condiciones de operación externas a este estudio. Estos costos son análogos a los descritos en la sección 5.1.4.3, pero se agrega a ellos el “costo ambiental”, que depende de los problemas que pueden existir en el medio ambiente debido a la mala operación de un equipo. En particular, en el caso de bombas hidráulicas puede existir el derrame de los fluidos transportados, lo que puede dañar seriamente el medio ambiente. Así como los sectores aledaños a la planta. No obstante lo anterior, la gran dificultad que existe para estimar este tipo de pérdidas impide que sean parte del análisis económico siguiente.

5.6.1.4. FLUJOS DEL PROYECTO

A continuación se muestra el flujo de cajas a utilizar para la evaluación económica de los proyectos de eficiencia. Para ello serán considerados los diferentes costos mencionados anteriormente **Inversión, Operación y Mantenimiento** de los distintos estados establecidos.

$$F_o = CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}$$

$$F_i = (COA + CM)_{BASE} - (COA + CM)_{OTROESTADO} \quad \text{con } i = 1 \dots 10$$

Dado que $CM_{BASE} = CM_{OTROESTADO}$

$$F_i = COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}$$

Finalmente se tiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^{10} \frac{F_i}{(1+r)^i} = F_o + \sum_{i=1}^{10} \frac{F_i}{(1+r)^i} = (CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}) + \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i}$$

Donde:

- CI: Costo de inversión de los distintos estados.
- COA: Costos de operación de los distintos estados
- CM: Costo de mantenimiento de los distintos estados
- F_i : Flujo de Costos del año i
- $N=10$: Periodo de evaluación del flujo de cajas
- r : Tasa de descuento $[0/1]$

Cabe señalar, que la forma del modelo de evaluación propuesto entregará un valor actual neto (VAN) positivo en caso de que el estado de eficiencia a considerar sea factible y por lo tanto sería conveniente invertir en nuevas tecnologías de ahorro energético. Por otra parte, en caso de que el VAN sea negativo, no convendría la inversión en mecanismos de eficiencia, ya que los ahorros energéticos obtenidos no serían suficientes para compensar la inversión inicial.

Los resultados de las evaluaciones anteriores se mostrarán en el anexo digital entregado junto a este informe, no obstante se muestran a continuación dos gráficos que permiten observar de una mejor manera la conveniencia de las diferentes alternativas a considerar.

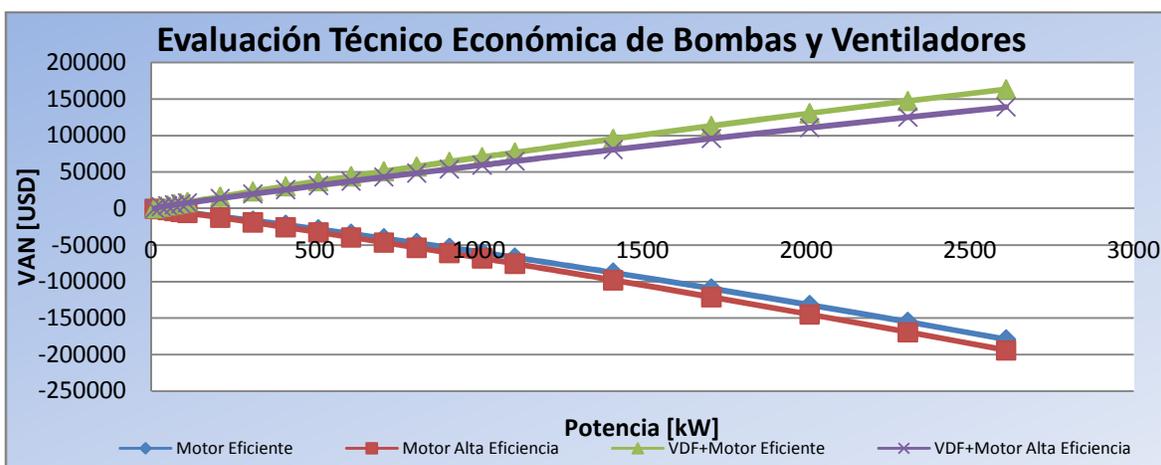


Figura N° 72: “Evaluación Técnico Económica de Bombas y Ventiladores
($P=0.055$ [USD/kWh]; $F_c=0,5$; $H_A=4.000$ horas)”

A partir de las condiciones de operación anterior, se puede observar la gran ventaja que posee la utilización de variadores de frecuencia acoplados a un motor eficiente como un mecanismo de ahorro de energía en bombas hidráulicas y ventiladores. Se observa además la **no** conveniencia de utilizar motores eficientes y de alta eficiencia bajo las condiciones de operación mencionadas anteriormente, en todo el rango de potencia. Cabe señalar, que debido a que la condición de operación corresponde a un bajo número de horas de utilización con un reducido factor de carga, **no** conviene la utilización de motores de alta eficiencia (IE3) por sobre los motores eficientes (IE2).

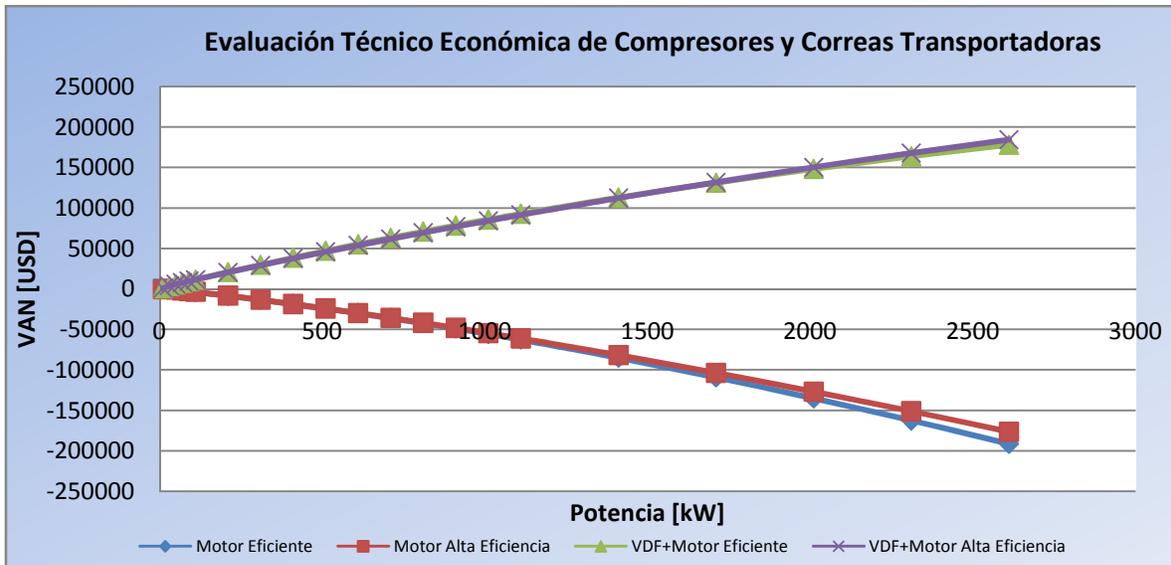


Figura N° 73: “Evaluación Técnico Económica de Compresores y Correas Transportadoras (P=0.055 [USD/kWh]; Fc=0,7; H_A=7.000 horas)”

Al observar el gráfico anterior, se puede apreciar que bajo condiciones de operación de mayor intensidad en correas y compresores, sigue teniendo buenos resultados la utilización de variadores de frecuencia. No obstante, se necesitan condiciones de operación mucho más exigentes para que sea realmente factible la utilización de estos equipos.

Para finalizar, en el Anexo 9.5.2 se muestra un ejemplo de los gráficos que es posible obtener para las distintas condiciones de operación de las bombas hidráulicas y ventiladores, como una manera de entender las condiciones bajo las cuales es factible la utilización de variadores de frecuencia, así como conocer los ahorros de energía e inversiones requeridas para la instalación de estos dispositivos. En particular, se puede observar, que mediante la utilización de una bomba hidráulica con un factor de carga de 50% y un precio monómico de la energía de 35[USD/MWh], es factible la inversión en VDFs y motores de alta eficiencia (IE3) solamente si la utilización anual del equipo es superior a las 5.000 horas. Esto generaría a su vez considerables ahorros energéticos, llegando incluso a los 2.150 MWh en una bomba de 1.400 [kW] de potencia nominal, con una utilización de 8.000 horas anuales, que corresponde a una operación real de un equipo en Quellaveco.

5.7. Transformadores

Los transformadores son uno de los principales elementos dentro de cualquier instalación eléctrica, debido principalmente a su capacidad de reducir el voltaje para ser utilizado por los diferentes equipos de una planta. Dado lo anterior, existirá un amplio rango de transformadores a utilizar en Quellaveco, ya que como se mostró en la sección 4.1, se utilizarán 4 niveles de tensión al interior de las instalaciones con el objetivo de alimentar los diferentes sectores de la planta.

Cabe señalar, que al contrario de lo ocurrido con los diferentes elementos analizados en este documento, los transformadores no son equipos demandantes de energía, sino que son los dispositivos encargados de llevar la potencia a los distintos niveles de tensión de las instalaciones de Quellaveco. No obstante lo anterior, los transformadores son una importante fuente de pérdidas de energía, por lo que mejorar su eficiencia tiene importantes ventajas económicas dentro de una instalación eléctrica, pues son componentes de fácil sustitución en comparación con las líneas de conductores, además de que su eficiencia puede ser clasificada, calificada y estandarizada. La ventaja de mejorar la eficiencia en la transformación es aún más evidente cuando se analiza en sus aspectos tecnológicos, ya que el aumento de la eficiencia puede ser obtenida mediante la reducción de las pérdidas en dos partes del equipo: el núcleo y los devanados.

5.7.1. Caracterización de Transformadores en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, los transformadores consumirán aproximadamente 19.168 [MWh] de energía anualmente, correspondiendo al 2,41% de la demanda eléctrica anual de Quellaveco. Cabe señalar, que los transformadores tienen la particularidad de ser utilizados globalmente en todos los sectores industriales del país, por lo que conocer potenciales formas de ahorro energético ayudará de manera importante a disminuir la demanda eléctrica nacional.

A continuación, se caracterizarán los transformadores a utilizar en Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la planta.

5.7.1.1. POTENCIA Y NÚMERO DE TRANSFORMADORES

Como se observó en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 43 transformadores, cuya capacidad permitirá suministrar toda la potencia requerida por la planta. En la Figura N° 74 se muestra la distribución de los transformadores en función de su potencia nominal en [kW].

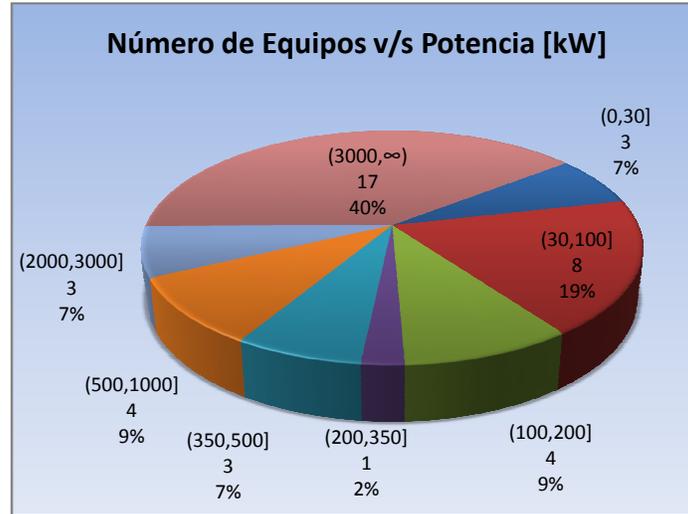


Figura N° 74: “Número de Equipos v/s Potencia [kW]”

Al observar la figura anterior, se puede apreciar que la mayor parte de los transformadores tendrá una potencia superior a los 3 [MW]. Esto se debe principalmente a que la planta Quellaveco tendrá una capacidad instalada superior a los 100 [MW] y con un gran número de procesos en su interior, por lo que se requerirá un gran número de transformadores para abastecer de energía a los grandes equipos de la planta.

5.7.1.2. OPERACIÓN DE TRANSFORMADORES

El tipo de operación de los transformadores queda caracterizado principalmente por dos valores fundamentales, que son el número de horas de utilización anual y el factor de carga de los equipos. Como se observa en la Figura N° 33, el número de horas de utilización de los transformadores en Quellaveco será superior a las 7.800 horas (90% del tiempo) en la totalidad de los equipos, esto se debe a que los transformadores deben trabajar de manera permanente para que el resto de los dispositivos de la planta puedan funcionar de manera adecuada. Esto hace que los transformadores sean propicios para la utilización de medidas de eficiencia energética, ya que cualquier ahorro que pueda ser generado tendrá un gran impacto en la planta. En la Figura N° 75 se muestra la distribución de potencia instalada en función del factor de carga de los equipos.

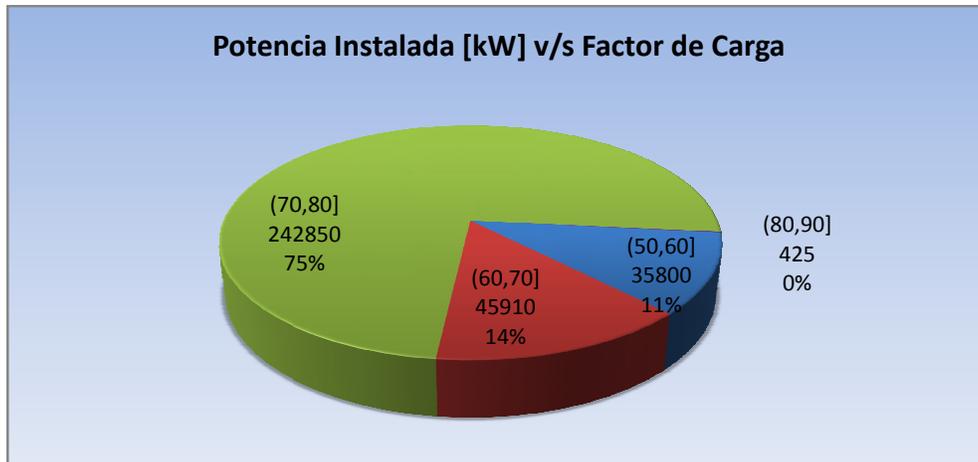


Figura N° 75: “Potencia Instalada en Transformadores [kW] v/s Factor de Carga”

Se puede observar, que al contrario de lo que ocurre con la mayoría de los equipos de Quellaveco que poseen una distribución de carga uniforme, los transformadores tendrán su potencia instalada distribuida en diferentes factores de carga.

5.7.2. Eficiencia en Transformadores

Existen principalmente dos tipos de pérdidas en transformadores, las pérdidas sin carga (originadas en el núcleo) y las pérdidas con carga (originadas en los enrollados). Las pérdidas en el núcleo son virtualmente constantes, ocurriendo continuamente en el núcleo de hierro como una forma de mantener “energizado” el transformador ante la necesidad de proveer potencia en los terminales secundarios. Por lo tanto, se tiene que las pérdidas en el núcleo estarán presentes inclusive si la carga en el transformador es nula. Por otra parte, las pérdidas en los enrollados ocurrirán siempre que el transformador esté bajo carga, y serán proporcionales al cuadrado de la corriente suministrada. En la Figura N° 76 se muestra como varían las pérdidas en un transformador seco de 75 [kVA] en función del grado de carga.

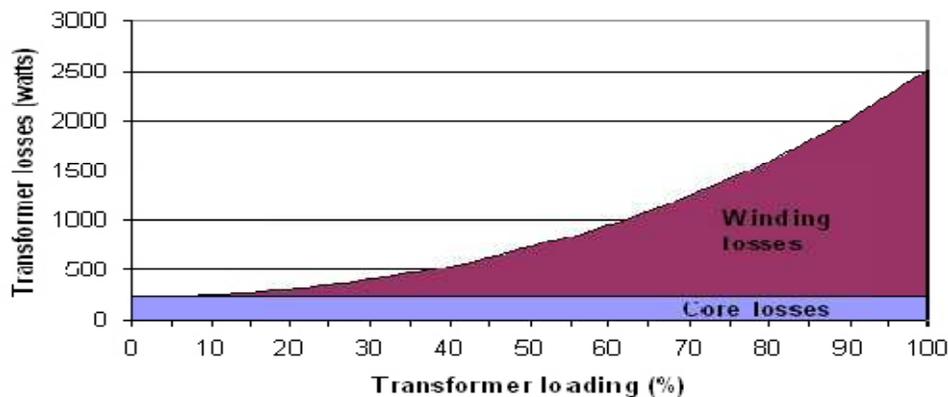


Figura N° 76: “Distribución de pérdidas en un Transformador de 75[kVA]”

Se observa claramente un crecimiento “exponencial” de las pérdidas en los enrollados del transformador, al contrario de lo que ocurre con las pérdidas en el núcleo que se mantienen constantes con la carga.

A partir de los parámetros mencionados anteriormente, es posible definir la eficiencia de un transformador bajo cualquier carga, según la norma IEEE C57.12.00, mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{P_{nom} \cdot fc \cdot 1000}{P_{nom} \cdot fc \cdot 1000 + NLL + LL \cdot fc^2 \cdot T}$$

Donde:

η = eficiencia porcentual a una determinada carga en [0/1]

fc = factor de carga en [0/1]

P_{nom} = potencia nominal del transformador en [kVA]

NLL = pérdidas sin carga del transformador en [W]

LL = pérdidas con carga del transformador en [W]

T = factor de corrección de temperatura.

Se puede observar, que al igual que lo que ocurre en los motores, la eficiencia en los transformadores no es un valor estático, sino que variará con el grado de carga aplicado. Cabe señalar, que la eficiencia alcanzará su valor máximo en un grado de carga tal, que las pérdidas de vacío igualen a las pérdidas de plena carga, según la expresión:

$$x_{max} = \sqrt{\frac{Perdidas_{VACIO}}{Perdidas_{CARGA}}}$$

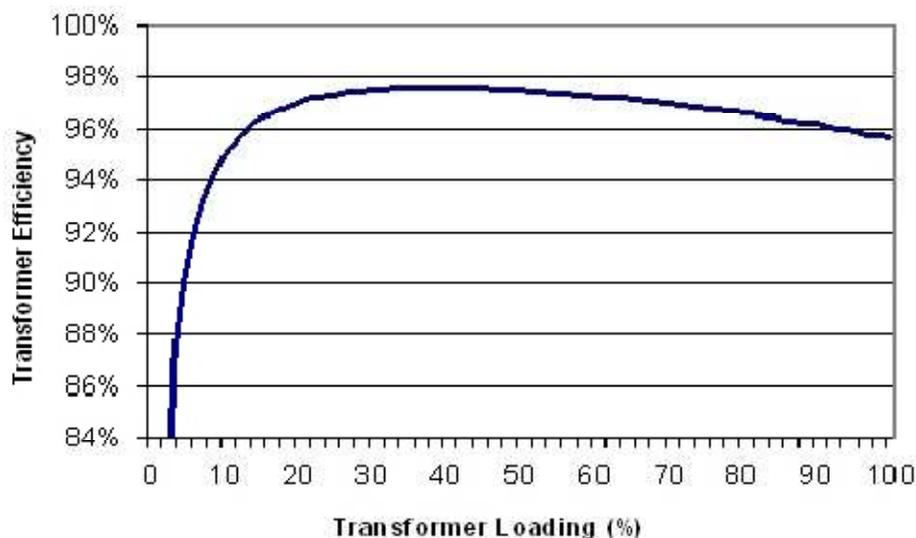


Figura N° 77: “Variación de la Eficiencia de un Transformador en función del Factor de Carga”

5.7.3. Pérdidas y Diseño de un Transformador Eficiente

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas sin carga ocurrirán en el núcleo de hierro del transformador y se presentan bajo cualquier condición de carga. Este tipo de pérdidas se compone básicamente de dos componentes, las pérdidas por histéresis y las pérdidas por corrientes de Eddy.

Las pérdidas por histéresis son causadas debido a la reluctancia de las moléculas del núcleo que se reorientan así mismas con una frecuencia de 50 o 60 Hz, alternando de esta manera el campo magnético aplicado por la corriente primaria. Por otra parte, las pérdidas por corrientes de Eddy son inducidas en el núcleo de hierro por el campo magnético, de la misma manera en que se induce la corriente en el enrollado secundario. Cabe señalar, que estas corrientes permanecerán circulando entre las láminas del núcleo convirtiéndose eventualmente en calor, no obstante existen alternativas para disminuirlas como el uso de láminas de hierro más delgadas o materiales amorfos. En el caso de estos últimos, los transformadores construidos con estos materiales pueden tener una reducción de pérdidas en el núcleo por sobre un 70% al compararlos con el mejor diseño convencional, llegando a eficiencias de hasta 99,7% en transformadores de 1.000 [kVA].

Como se mencionó anteriormente, las pérdidas en los enrollados ocurren en las bobinas primarias y secundarias cuando el transformador se encuentra bajo carga, debido a la resistencia eléctrica del material. A medida que la carga crece, las pérdidas en los enrollados aumentan y se hacen más significativas que las pérdidas en el núcleo, sobre todo si el factor de carga es superior al 50%. En general, los métodos que permiten reducir las pérdidas en los enrollados tienden a aumentar las pérdidas en el núcleo, como ocurre al aumentar la sección de los conductores (disminuyendo así la densidad de corriente), que implicará un aumento en el tamaño del núcleo y por consiguiente las pérdidas.

Se puede observar, que el tratar de aumentar la eficiencia de un transformador es bastante complejo, ya que una disminución en las pérdidas en los enrollados implicará generalmente un aumento en las pérdidas del núcleo, y viceversa. En la Tabla N° 16 se muestran los diferentes problemas que se generan al tratar de aumentar la eficiencia en uno de los componentes del transformador.

	Pérdidas Sin Carga	Pérdidas Bajo Carga	Impacto de los Costos
<i>Para disminuir las pérdidas sin carga:</i>			
Usar materiales en el núcleo con bajas pérdidas	Disminuyen	Sin Cambios	Aumentan
Disminuir la densidad de flujo mediante:			
(a) Incrementando la sección transversal del núcleo	Disminuyen	Aumentan	Aumentan
(b) Disminuyendo el voltaje por vuelta	Disminuyen	Aumentan	Aumentan
Disminuir el largo del “camino” del flujo disminuyendo el área transversal del conductor	Disminuyen	Aumentan	Disminuyen
<i>Para disminuir las pérdidas con carga:</i>			
Usar un material conductor con bajas pérdidas	Sin Cambios	Disminuyen	Aumentan
Disminuir la densidad de corriente al aumentar el área transversal del conductor	Aumentan	Disminuyen	Aumentan
Disminuir el largo del camino de la corriente:			
(a) Disminuir el área transversal del núcleo	Aumentan	Disminuyen	Disminuyen
(b) Incrementando el voltaje por vueltas	Aumentan	Disminuyen	Disminuyen

Tabla N° 16: “Problemas para el diseño eficiente de un Transformador”

Existe un tercer tipo de pérdidas en aquellos transformadores que poseen un sistema de ventilación propio, y se debe a la demanda de energía requerida por el ventilador. Cabe señalar, que a medida que aumentan las otras pérdidas, el transformador necesitará una mayor ventilación y, por lo tanto, crecerá el consumo de este equipo.

5.7.4. Evaluación Técnica – Económica

Este tipo de análisis permitirá evaluar la conveniencia de utilizar transformadores eficientes en reemplazo de equipos estándar en Quellaveco. En particular, permitirá observar las diferentes condiciones de operación y externas a la planta concentradora que permitirán la integración de estos equipos. Además, será posible obtener los aumentos en la inversión debido al uso de estas medidas, así como los ahorros energéticos generados.

En este tipo de análisis es necesario considerar diferentes estados para comparar cuál es la mejor decisión a tomar en cuanto a medidas de eficiencia energética. No obstante, debido a que **no** fue posible encontrar una fuente confiable de precios de transformadores con distintos valores de eficiencia, es que se optó por realizar un análisis en donde se encontrará el **punto de quiebre**, tal que a partir de este valor sea conveniente utilizar transformadores de alta eficiencia. Cabe señalar, que el “punto de quiebre” antes mencionado corresponderá a la diferencia máxima que puede existir en los costos de inversión entre un transformador estándar y eficiente.

Los estados a considerar en la evaluación son los siguientes:

- Estado Base: en el cual el transformador será de eficiencia estándar, o también llamado B-B', de acuerdo a la norma HD 428.1 que establece valores para las pérdidas de un transformador (Anexo 9.4).
- Estado Eficiente: en el cual el transformador será eficiente, o también llamado A-A', de acuerdo a la norma HD 428.1 que establece valores para las pérdidas de un transformador (Anexo 9.4).
- Estado Alta Eficiencia: en el cual el transformador será de alta eficiencia, o también llamado C-C', de acuerdo a la norma HD 428.1 que establece valores para las pérdidas de un transformador (Anexo 9.4).

A continuación se muestran los diferentes costos que tendrán los transformadores a través de su ciclo de vida, y que es necesario considerar para obtener los resultados correctos:

5.7.4.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Corresponde al costo que se debe efectuar por la compra de un transformador en los diferentes estados a analizar, y que corresponderá al costo de fábrica más un recargo de **30%** distribuido de la siguiente manera:

- 15%, debido a las obras de ingeniería y montaje necesarias para la instalación del transformador en planta.
- 10%, debido a todas las tasas arancelarias que afectan al costo del transformador desde que se entrega en la fábrica, hasta que se tiene dicho motor con llave en mano.
- 5%, debido al transporte que se debe realizar desde la fábrica hasta la planta.

Cabe señalar, que la diferencia máxima entre los costos de inversión entre un transformador eficiente y estándar será el resultado del análisis a realizar.

5.7.4.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Corresponde a los costos debido al consumo de energía del transformador, y a los costos de mantención necesarios para su correcto funcionamiento. El costo de operación anual asociado a la energía consumida por los transformadores, se puede expresar de la siguiente manera:

$$COA = \left(\frac{H_A \cdot P_M}{1000} \right) \cdot NLL + \left(\frac{fc^2 \cdot T \cdot H_A \cdot P_M}{1000} \right) \cdot LL \quad [\text{USD}]$$

Donde

- f^c : Factor de Carga, medido en [o/1]
- H_A : Número de horas anuales promedio de uso.
- P_M : Precio monómico de la energía medido en [USD/kWh].
- NLL = Pérdidas sin carga del transformador en [W].
- LL = Pérdidas con carga del transformador en [W].
- T = Factor de corrección de temperatura.

5.7.4.3. OTROS COSTOS

Existen diversos costos que son necesario evaluar previo a la instalación de un transformador, pero que no se considerarán en este informe debido a la dificultad para estimarlos, o porque son dependientes de condiciones de operación externas a este estudio. Estos costos son análogos a los descritos en la sección 5.1.4.3.

5.7.4.4. FLUJOS DEL PROYECTO

A continuación, se muestra el flujo de cajas a utilizar para la evaluación económica de los proyectos de eficiencia. Para ello, serán considerados los diferentes costos mencionados anteriormente **Inversión, Operación y Mantenimiento** de los distintos estados establecidos.

$$F_o = CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}$$

$$F_i = (COA + CM)_{BASE} - (COA + CM)_{OTROESTADO} \quad \text{con } i = 1 \dots 25$$

Dado que $CM_{BASE} = CM_{OTROESTADO}$

$$F_i = COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}$$

Finalmente se tiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = F_o + \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = (CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}) + \sum_{i=1}^{25} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i}$$

Donde:

- CI: Costo de inversión de los distintos estados.
- COA: Costos de operación anual de los distintos estados.
- CM: Costo de mantenimiento de los distintos estados.
- F_i : Flujo de Costos del año i .
- $N=25$: Periodo de evaluación del flujo de cajas.
- $r=10\%$: Tasa de descuento [0/1]

Dado que se busca el **punto de quiebre**, tal que a partir de este valor sea conveniente la utilización de transformadores de alta eficiencia, es que se hace necesaria la modificación de la ecuación anterior, ya que el punto de quiebre corresponderá a la diferencia en los costos de inversión, tal que a partir de este valor el VAN sea positivo, luego se tiene:

$$VAN = (CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}) + \sum_{i=1}^{25} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i} = 0$$

$$\Rightarrow \text{PuntoQuiebre} = CI_{OTROESTADO} - CI_{BASE} = \sum_{i=1}^{25} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i}$$

Los resultados de las evaluaciones anteriores se encuentran en el anexo digital entregado junto a este informe, no obstante, se muestra a continuación la Figura N° 78 que permite observar de una mejor manera la conveniencia de las diferentes alternativas a considerar. En particular, es posible observar la inversión adicional que requiere la instalación de transformadores eficientes y los ahorros asociados a la inversión.

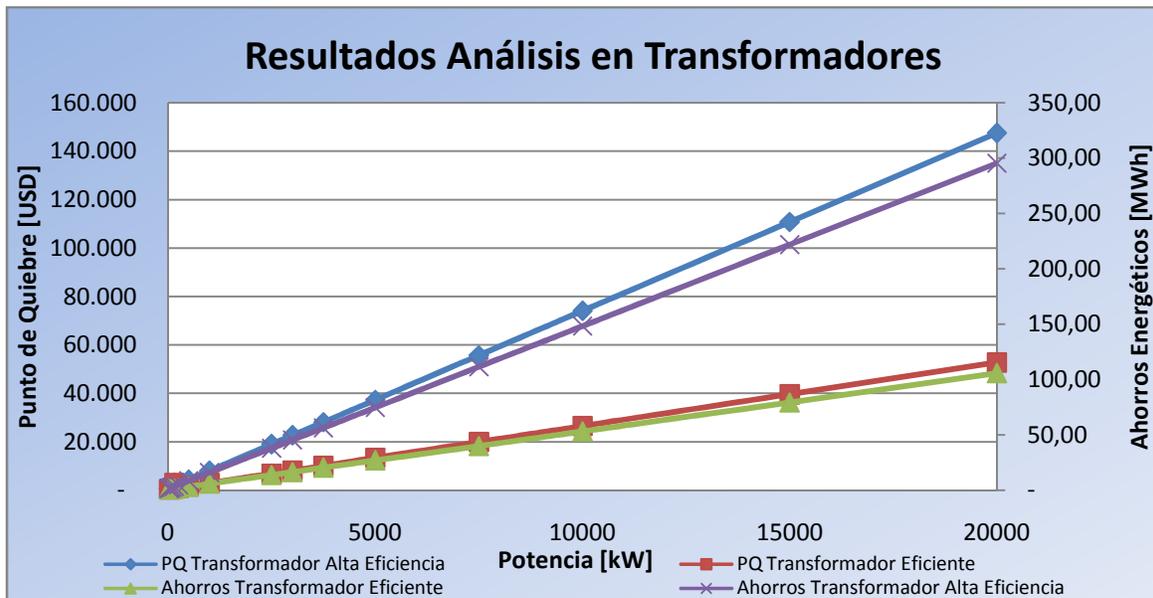


Figura N° 78: “Resultados Análisis de Transformadores (P=55 [USD/MWh]; Fc=0,7; H_A=7.000 horas)”

A partir de las condiciones de operación anterior, se puede observar que para el caso de un transformador de 5 [MW] es posible obtener diferencias de ahorro de más de 50 [MWh] anuales, con una inversión adicional máxima de 25.000 [USD]. Por otra parte, si la diferencia máxima entre los costos de inversión entre un transformador estándar y eficiente superan los 13.400 [USD] no convendrá la utilización de este último, aunque genere ahorros de hasta 27[MWh] anuales de energía eléctrica. En el Anexo 9.5.3 se muestra un ejemplo de los ahorros energéticos que es posible obtener para las distintas condiciones de operación en transformadores eficientes y de alta eficiencia.

5.8. Iluminación

Los sistemas de iluminación tienen una gran importancia en todo tipo de industrias, ya que de ellos depende en gran parte la seguridad y la calidad de vida de los trabajadores. En particular, la industria minera se caracteriza por tener faenas produciendo constantemente a lo largo del año, haciendo indispensable la buena visibilidad durante las 24 horas del día. Dado lo anterior, es necesario que los sistemas de iluminación a utilizar en Quellaveco sean capaces de trabajar durante largas jornadas requiriendo un bajo mantenimiento, y siendo capaces de soportar impactos y vibraciones dadas las características propias de una planta concentradora de cobre. Además, se hace indispensable la necesidad de equipos con larga vida útil y de alta eficiencia, como una manera de disminuir los mantenimientos no programados, así como la energía a consumir por los sistemas de iluminación.

Cabe señalar, que a pesar de los bajos ahorros porcentuales que generan los sistemas de iluminación al compararlos con la totalidad del proyecto minero, estos tienen la característica particular que permiten crear conciencia en los trabajadores, mejorando así los hábitos de ahorro energético al interior de la planta.

5.8.1. Fundamentos de Luminotecnia

Los sistemas de iluminación pueden ser definidos a través de tres conceptos fundamentales, los cuales se explican a continuación:

5.8.1.1. POTENCIA LUMÍNICA O FLUJO LUMINOSO

El flujo luminoso se define simplemente como la cantidad de luz que es capaz de emitir una lámpara en todas las direcciones. Técnicamente hablando, la potencia por unidad de superficie asociada a la propagación de una onda electromagnética está dada por el producto vectorial de los vectores intensidad de campo eléctrico \vec{E} e intensidad del campo magnético \vec{H} :

$$\vec{p} = \vec{E} \times \vec{H} [W/m^2]$$

En base a estos conceptos, la potencia lumínica o flujo luminoso F debe entenderse como la sensación de luz asociada a la parte de la potencia de las ondas electromagnéticas que el ojo humano es capaz de ver según su sensibilidad al color. En estricto rigor la potencia lumínica debería medirse en vatios [W]. No obstante, debido precisamente a que como la intensidad de la luz que vemos corresponde a una evaluación personal de tipo psicotécnica, más que a la medición de un parámetro físico mediante un instrumento, la Comisión Internacional de Pesos y Medidas ha preferido asignarle a esta magnitud, el flujo luminoso, una unidad de medida particular: el **lumen [lm]**.

5.8.1.2. EFICIENCIA LUMINOSA

Se define como el cociente entre la potencia lumínica o flujo luminoso, medido en lúmenes [lm], dividido por la potencia total radiada por el emisor, medida en vatios [W]:

$$\rho_L = \frac{F [lm]}{P [W]}$$

Un problema frecuente al momento de hablar de luminarias, es creer que una lámpara con mayor potencia generará más luz, lo que claramente es incorrecto, ya que dependerá básicamente del tipo de luminaria y de su eficiencia lumínica asociada.

5.8.1.3. ILUMINANCIA

El concepto de iluminancia (o claridad) se refiere al flujo luminoso por unidad de superficie que recibe un plano. Se define, simplemente, como el cociente entre el flujo luminoso que baña una superficie, dividida por el plano considerado. Su unidad de medida en el Sistema SI es el lux:

$$E = \frac{F [lm]}{S [m^2]} \quad ; \text{ o bien } \quad E = \frac{\partial F [lm]}{\partial S [m^2]}$$

$$1 [lux] = 1 \left[\frac{lm}{m^2} \right]$$

En la Tabla N° 17 se muestran algunos valores recomendados para diversos tipos de recintos públicos y privados.

ILUMINANCIA DE REFERENCIA	
TIPO DE RECINTO	[lux]
Caminos y vías públicas secundarias	5
Carreteras y vías principales	10
Patios galerías y lugares de paso	20
Manipulación de mercancías	50
Salas de máquinas, depósitos y almacenes	100
Actividades de manufactura de baja precisión	200
Oficinas y bancos de trabajo	300
Salas de clase	400
Ebanistería y mecánica de precisión	500 a 1.000
Joyerías, imprentas, salas de dibujo	1.000
Exposición de algunas zonas en vitrinas	1.500
Estadios para transmisiones de TV	1.200 a 1.500
Zonas para filmaciones especiales de televisión	2.000

Tabla N° 17: “Iluminancias típicas de diversos recintos”

5.8.2. Tipos de Luminarias

Las luminarias son el principal componente a considerar en el diseño de un sistema de iluminación, ya que la lámpara a elegir determinará la calidad de la luz a emitir, el CRI (Índice de Reproducción Cromática) y los costos de operación e inversión que tendrá el sistema. A continuación, se describirán los aspectos más importantes de los tres tipos de luminarias a utilizar en la evaluación técnico-económica de los sistemas de iluminación:

5.8.2.1. LÁMPARA INCANDESCENTE

Este tipo de luminarias está formado por un filamento de tungsteno, muy fino, encerrado en una ampolla de vidrio en la que se ha hecho el vacío, o se ha rellenado con un gas inerte, para evitar que el filamento se volatilice por las altas temperaturas que alcanza. Se completa con un casquillo metálico, en el que se ubican las conexiones eléctricas.

La ampolla varía de tamaño con la potencia de la lámpara, puesto que la temperatura del filamento es muy alta y, al crecer la potencia y el desprendimiento de calor, es necesario aumentar la superficie de enfriamiento.

Inicialmente el interior de la ampolla estaba al vacío. Pero actualmente está rellena de algún gas noble (normalmente kriptón) que evitan la combustión del filamento.

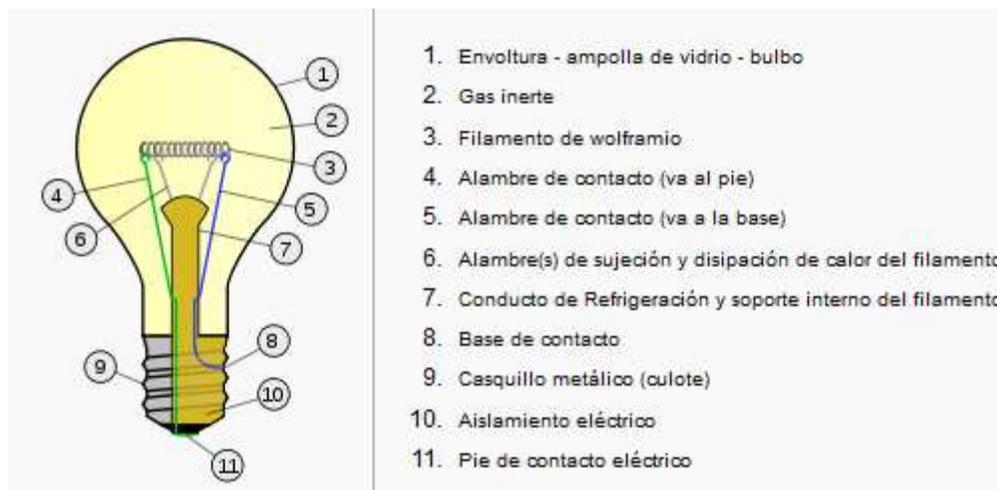


Figura N° 79: “Elementos principales de una lámpara incandescente”

La lámpara incandescente es la de más bajo rendimiento luminoso de las disponibles actualmente en el mercado: de 12 a 18 [lm/W], y la que menor vida útil tiene con aprox. 1.000 horas. No obstante, es la más difundida por su bajo precio y el color cálido de su luz.

No ofrece muy buena reproducción de los colores, ya que no emite en la zona de colores fríos, pero al ser su espectro de emisiones continuo logra contener todas las longitudes de onda en la parte que emite del espectro. Su eficiencia es muy baja, ya que solo convierte en trabajo (luz visible) alrededor del 15% de la energía consumida. Otro 25% será transformado en energía calorífica y el 60% restante en radiación no perceptible, luz ultravioleta y luz infrarroja, que acaban convirtiéndose en calor.

Las lámparas incandescentes se utilizarán como caso **base** en la evaluación técnico económico, debido principalmente a su amplio uso en el mercado, ya sea en el sector residencial o industrial.

5.8.2.2. LÁMPARAS LED

Los LEDs son componentes electrónicos constituidos por la unión de materiales semiconductores de diferentes características, capaces de convertir la energía eléctrica directamente en energía luminosa cuando son polarizados por medio de un campo eléctrico. Al contrario de las lámparas convencionales, los LEDs no poseen filamentos, electrodos o tubos de descarga.

Principales ventajas de las luminarias LEDs:

- Mayor vida útil: Promedio luz 70% (aproximadamente 50.000 horas de uso).
- Costos de mantención reducidos.
- Eficiencia muy próxima a la eficiencia del fluorescente.
- Bajo voltaje de operación.
- Resistencia a impactos y vibraciones: Es robusto, ya que no tiene filamentos ni vidrios.
- Control dinámico del color: Ajuste perfecto de color y temperatura de color deseada.
- Accionamiento instantáneo, aún con temperaturas bajas.
- Control de la intensidad variable: Su flujo luminoso es variable en función de la variación de la corriente eléctrica aplicada, posibilitando con esto un ajuste preciso de la intensidad de luz de la luminaria.
- Colores vivos y saturados sin filtros, lo que facilita que no se pierda intensidad lumínica y la alteración del color.
- Luz directa: Aumento de la eficiencia del sistema.
- Ecológicamente correcto: No utiliza mercurio, ni ningún elemento que cause daño a la naturaleza.
- Ausencia de radiaciones Ultravioleta e Infrarroja.

Debido a las características mencionadas anteriormente, las lámparas LED serán utilizadas para evaluar las luminarias al **interior de los edificios** de la planta concentradora Quellaveco, debido principalmente a su larga vida útil, sus bajos costos de mantención, su resistencia a impactos y vibraciones, y su buena eficiencia lumínica.

5.8.2.3. LÁMPARAS DE INDUCCIÓN MAGNÉTICA

Este tipo de luminarias usa una bobina de inducción sin filamentos y una antena acopladora, la cual consiste en tecnología de aplicar una descarga de frecuencia para proveer soluciones de iluminación.

El centro de la lámpara es la bobina de inducción a la cual le provee potencia un generador de alta frecuencia. El ensamble de vidrio circundante contiene un material electrón-Ion plasma y está relleno con un gas inerte. La porción interior del vidrio está recubierta con un recubrimiento de fósforo el cual es similar al que se encuentra en las lámparas fluorescentes. La antena transmite la energía generada por el primario de la bobina de un sistema de inducción al gas que se encuentra dentro de la lámpara, por lo cual se crea una radiación ultravioleta, que luego es transformada a fuentes visibles de luz, por medio del recubrimiento de fósforo en la superficie de vidrio.

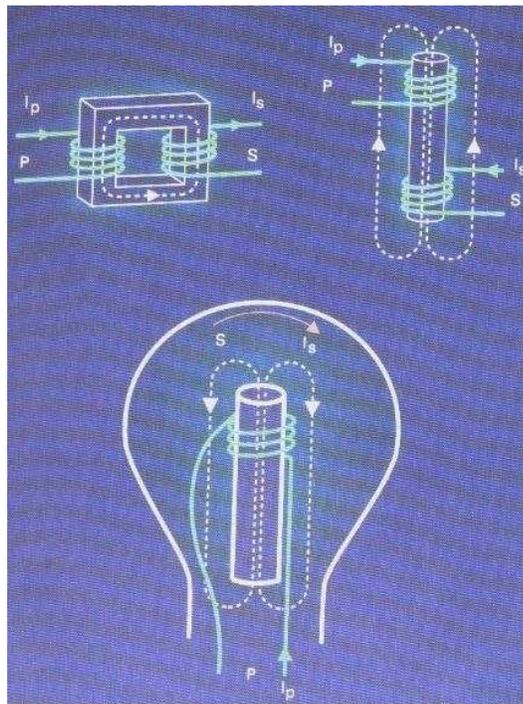


Figura N° 80: “Funcionamiento de una lámpara de Inducción Magnética”

Entre las propiedades que agrega la utilización de un circuito electrónico son:

- Eliminación de parpadeos.
- Encendido inmediato de la lámpara.
- Produce todo el flujo al primer instante.

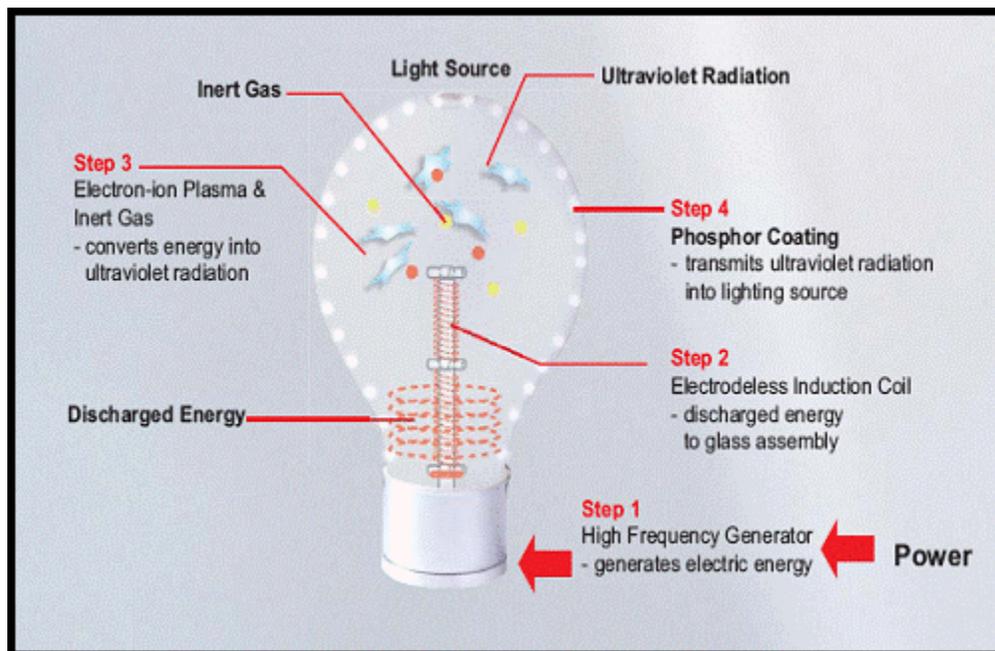


Figura N° 81: “Elementos principales de una lámpara de Inducción Magnética”

Las lámparas de inducción cuentan con las siguientes ventajas:

- 100,000 hrs. de vida útil (contra 15-20,000 del haluro metálico). El tiempo de encendido, reencendido es instantáneo (no necesita calentarse para prender después de 15- 20 minutos como el haluro metálico).
- Alto factor de potencia, >99%
- No necesita mantenimiento ni cambios de foco ni balastro (NO utilizamos balastro).
- Alta eficiencia energética, alcanzando los 80 [lum/W]
- El índice de rendimiento de color es mejor con esta tecnología (> 85) en comparación con el rendimiento del haluro metálico (78) lo que hace que los colores se vean más vivos y mejor en cuestiones de seguridad industrial.
- No utiliza gases a presión ni tóxicos como el haluro metálico. El contenido de mercurio sólido, no más de 5 mg de las normas internacionales, es mucho menor que en las lámparas fluorescentes.
- Protección contra variaciones de voltaje que evita cualquier daño a luminarias. A diferencia del haluro metálico que por esta causa puede dañarse fácilmente.

- Mejor intensidad de la luz o mejor nivel de luxes que el haluro metálico (dependiendo la aplicación puede ser mucho mayor o igual).
- El peso por luminaria de inducción es de 7 kgs. aprox. Contra el peso de las luminarias de aditivos de 20 kgs.
- La depreciación de la luz es mucho menor en comparación con la tasa de depreciación en un haluro metálico.

A continuación, se muestra un gráfico comparativo entre las distintas tecnologías a utilizar en luminarias, mostrando sus principales características como son su eficiencia lumínica y su vida útil.

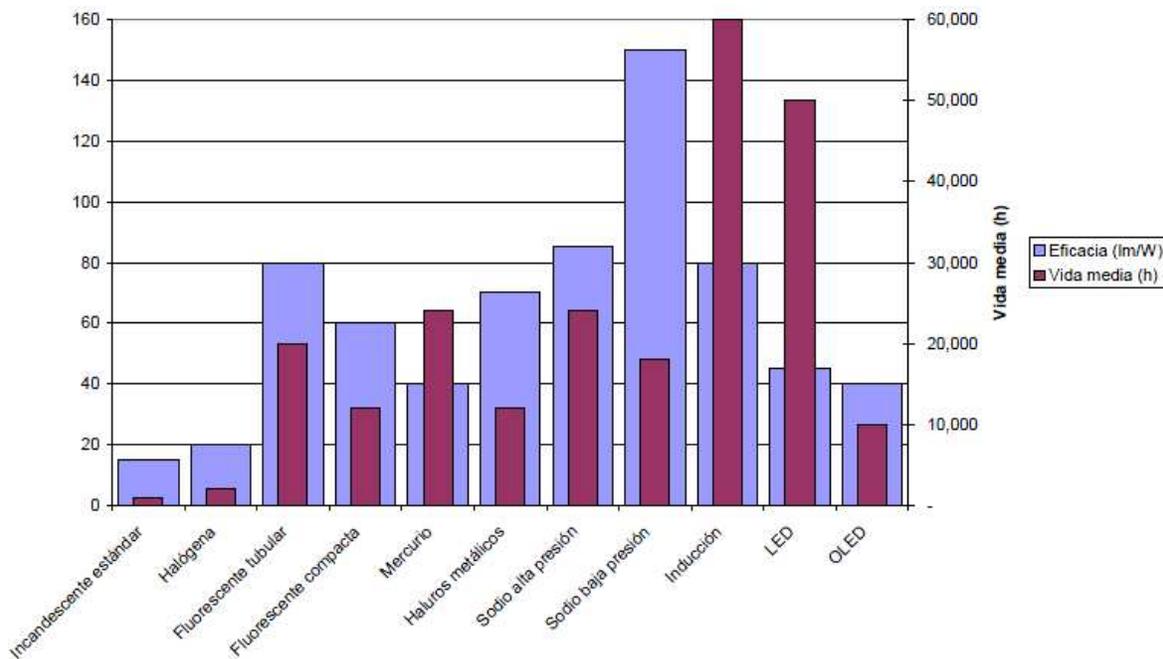


Figura N° 82: “Eficiencia y Vida Útil de diferentes tipos de Luminarias”

5.8.3. Caracterización de Sistemas de Iluminación en Quellaveco

Como se observó en la Tabla N° 5, los sistemas de iluminación consumirán aproximadamente 6.422 [MWh] de energía anualmente, correspondiendo al 0,81% de la demanda eléctrica anual de Quellaveco. No obstante lo anterior, los sistemas de iluminación son utilizados globalmente partiendo desde el sector residencial hasta la gran minería, por lo que conocer potenciales formas de ahorro energético ayudará no solo a la industria minera, sino que a todos los sectores del país.

A continuación, se caracterizarán los equipos de iluminación a utilizar en la planta Quellaveco, para observar de una mejor manera su incidencia en la demanda energética de la Planta.

5.8.3.1. POTENCIA Y NÚMERO DE SISTEMAS DE ILUMINACIÓN

Como fue señalado en la Tabla N° 8, Quellaveco contará con 12 sistemas de iluminación, cuya potencia instalada correspondería a 950 [kW] (0,69%) utilizando luminarias incandescentes. Cabe mencionar, que en Quellaveco se utilizarán lámparas LEDs para entregar luz al interior de los edificios, y luminarias de inducción magnética al exterior de estos, por lo que se hace necesario analizar estos dos grandes subconjuntos de manera separada.

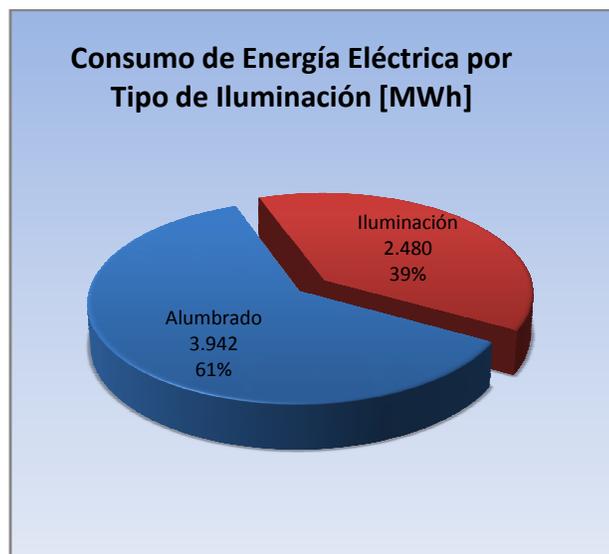


Figura N° 83: “Consumo de Energía Eléctrica por tipo de Iluminación [MWh]”

Al observar la Figura N° 83, se puede apreciar que la mayor parte de la energía es consumida por los sistemas de iluminación exteriores alcanzando casi 4 [GWh] de consumo anual, dividido entre los 9 sistemas de alumbrado que poseerá Quellaveco. Por otra parte, la iluminación al interior de los edificios corresponderá al 40% del consumo, alcanzando los 2,5 [GWh] de energía entre la demanda del campamento principal, talleres y edificios auxiliares.

En la Figura N° 84 se muestra la distribución de la potencia instalada y de los sistemas de iluminación según su potencia nominal en [kW].

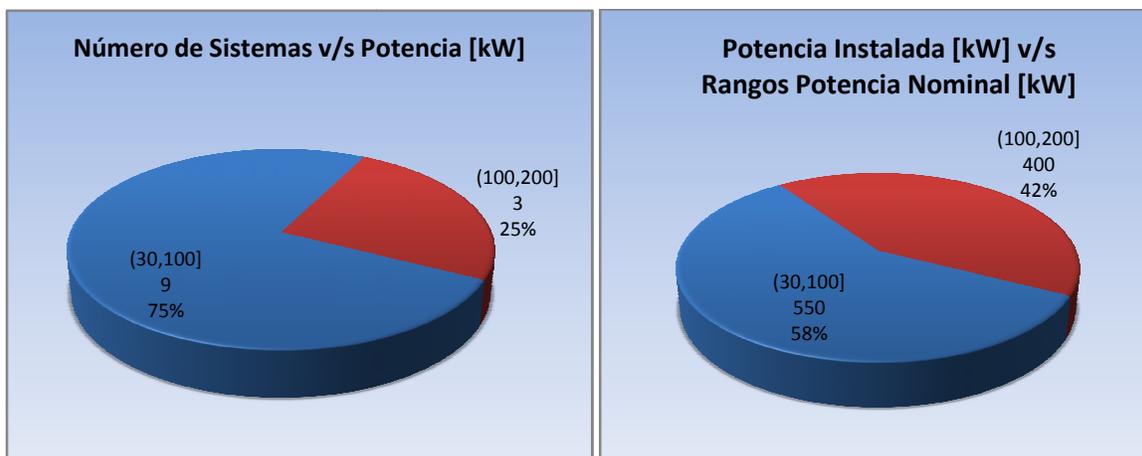


Figura N° 84: “Distribución de los Sistemas de Iluminación en función de Potencia Nominal”

Es posible apreciar, que la mayor parte de los sistemas se concentra en potencias menores a 200 [kW], y en particular, los sistemas de iluminación interior tendrán potencias mayores a 100 [kW] y los exteriores tendrán potencias menores a este valor. Cabe señalar, que aun cuando el 75% de los sistemas se concentra en bajas potencias, estos solo ocuparán el 58% de la potencia total instalada en sistemas de iluminación.

5.8.3.2. OPERACIÓN DE EQUIPOS DE ILUMINACIÓN

Al contrario de lo ocurrido en las tecnologías analizadas anteriormente, la operación de los sistemas de iluminación queda caracterizada sólo por el número de horas de utilización anual, obviando el componente de carga utilizado en las secciones anteriores. Esto ocurre, ya que los sistemas de iluminación sólo tendrán la opción de estar encendidos o apagados, sin la posibilidad de trabajar a media potencia.

A continuación, se muestra a la distribución de potencia instalada en función del número de horas de utilización anual.

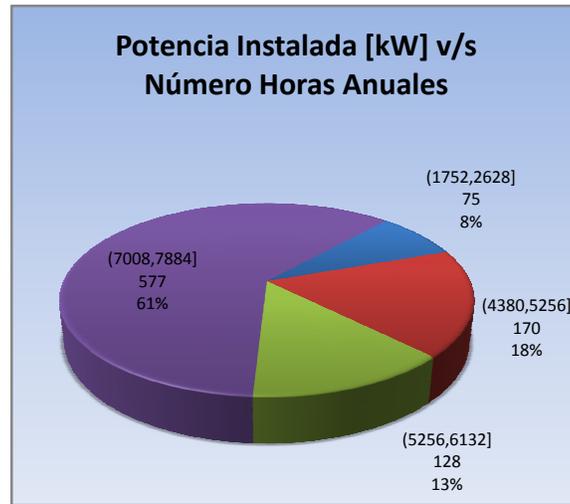


Figura N° 85: “Potencia Instalada [kW] v/s Número de Horas Anuales”

Se puede apreciar que los sistemas de iluminación en una planta concentradora de cobre tienen un alto grado de utilización, siendo superior a las 7.000 horas en el 61% de la potencia instalada. No obstante lo anterior, en este tipo de sistemas existe una distribución de utilización mucho mayor a las tecnologías analizadas con anterioridad, debido principalmente a que este tipo de sistemas son los únicos que dejarán de funcionar durante gran parte del día, al contrario de lo que ocurre con otro tipo de equipos que funcionan las 24 horas.

5.8.4. Medidas que Permiten Aumentar la Eficiencia de los Sistemas de Iluminación

Los tres aspectos básicos para mejorar la eficiencia de los sistemas de iluminación son:

- Identificar las necesidades de calidad y cantidad de iluminación para poder realizar las diferentes actividades de manera correcta.
- Incrementar la eficiencia de los sistemas de iluminación en aquellos lugares frecuentemente utilizados.
- Optimizar el control de la iluminación si son sectores frecuentemente desocupados.

No obstante lo anterior, el incremento principal de la eficiencia en los sistemas de iluminación pasa directamente por la utilización de nuevas tecnologías como las luminarias LEDs o de inducción magnética cuya eficacia y vida útil son muy superiores a sus competidores.

Por otra parte, es posible aumentar la eficiencia de un sistema de iluminación mediante la instalación de reflectores y lentes, ya que de esta manera aumentará el flujo luminoso manteniendo constante el nivel de energía consumido.

5.8.4.1. ILUMINACIÓN FOCALIZADA

Como un subconjunto del aumento en la eficiencia de las fuentes de luz, existe la iluminación focalizada, que implica un mejoramiento de la eficiencia en un sector completo de la planta, mediante el reemplazo y relocalización de luminarias en sectores específicos con el objetivo de iluminar “tareas” particulares. Cabe señalar, que este tipo de iluminación suele concluir en una disminución de los niveles ambientales de luz, mientras que se mantiene un nivel adecuado de flujo luminoso en cada una de los sectores específicos que requieren iluminación, como se muestra en la Figura N° 86. Este tipo de iluminación suele tener mejores resultados al interior de los edificios, ya que existe una mayor cantidad de actividades donde se requiere focalización de iluminación.



Figura N° 86: “Ejemplo de la Iluminación Focalizada”

5.8.4.2. OPTIMIZACIÓN DEL CONTROL DE ILUMINACIÓN

Otro paso importante en el mejoramiento de la eficiencia de los sistemas, corresponde a la utilización de controladores en las luminarias que permitan encender o apagar los dispositivos cuando estos no sean utilizados. Cabe señalar, que dependiendo de la aplicación, los controladores de apagado automático pueden aumentar la eficiencia de los sistemas aun más que la utilización de tecnologías de alta eficiencia, esto ocurrirá principalmente en aquellos sectores que tengan un bajo grado de utilización diario.

A continuación, se muestra un breve resumen de los principales dispositivos de control utilizados en luminarias:

➤ INTERRUPTORES PROGRAMABLES TEMPORALMENTE

Este tipo de interruptores es usado para controlar sistemas de iluminación cuando su operación está basada en un patrón horario fijo, como puede ser el caso de oficinas donde existe una determinada hora de cierre. Cabe señalar, que estos dispositivos pueden ser obtenidos en el mercado en formato electrónico o mecánico, no obstante, en ambos casos debe existir un chequeo periódico para asegurar que el sistema de control este trabajando correctamente.

➤ FOTOCELDAS

Las fotoceldas son dispositivos que permiten encender un sistema de iluminación cuando existe poca iluminación natural, y apagarlo cuando la iluminación natural sobrepasa cierto umbral a definir. El uso de fotoceldas se extiende a la mayoría de las aplicaciones al exterior de los edificios, debido principalmente a sus bajos costos de mantenimiento. Al contrario de los interruptores programables, las fotoceldas se autoajustan a los cambios estacionales y climáticos, pudiendo encenderse automáticamente cuando existan bajos niveles de luz, como puede ser el caso de días lluviosos. En comparación a otros equipos, las fotoceldas tienen un bajo costo de inversión pudiendo instalarse en cada una de las luminarias, o pueden ser utilizadas para controlar sistemas de iluminación completos. Cabe señalar, que aun cuando estos dispositivos requieren un bajo mantenimiento, debe existir una limpieza periódica de los equipos para eliminar la acumulación de polvo en la apertura del fotodiodo, ya que esto puede ser interpretado como la ausencia de luz natural lo que implicaría que la luminaria se mantendría encendida permanentemente.

➤ SENSORES DE MOVIMIENTO

Los sensores de movimientos permiten el ahorro de energía apagando luminarias en espacios desocupados temporalmente. Cuando el sensor detecta movimiento, éste activa el dispositivo de control que enciende el sistema de iluminación, y por el contrario, si no se detecta movimiento en un periodo de tiempo definido, las luminarias se apagarán automáticamente. Al igual que la mayoría de los sensores, la sensibilidad (la habilidad para detectar movimiento) y el retraso temporal (diferencia de tiempo entre que el sensor no detecta movimiento, y que el sistema de iluminación es apagado) son ajustables. En la Tabla N° 18 se muestran los porcentajes de ahorro estimado mediante la utilización de estos dispositivos en diferentes lugares.

Sector	Ahorro de Energía [%]
Oficinas (Privadas)	25 – 50
Oficinas (Espacio Abierto)	20 – 25
Salas de Descanso	30 – 75
Pasillos	30 - 40
Áreas de Almacenamiento	45 - 65
Salas de Reuniones	45 – 65
Salas de Conferencias	45 – 65
Bodegas	50 - 75

Tabla N° 18: “Ahorros de Energía obtenidos con Sensores de Movimiento en diferentes sectores”

5.8.5. Evaluación Técnica – Económica

Este tipo de análisis permitirá discriminar de manera correcta, la utilización de los diferentes criterios de eficiencia energética que se mencionaron en las secciones anteriores. En particular, permitirá observar las diferentes condiciones de operación y externas a la planta concentradora, que permitirán la integración de estas medidas de eficiencia en sistemas de iluminación. A partir de lo anterior, será posible obtener los aumentos en la inversión debido al uso de estas medidas, y los ahorros energéticos generados.

En este tipo de análisis es necesario considerar diferentes estados para comparar cuál es la mejor decisión a tomar en cuanto a medidas de eficiencia energética. En particular, una característica importante de los sistemas de iluminación en una planta concentradora es la resistencia a vibraciones y golpes, así como la necesidad de un bajo mantenimiento, por lo que para la evaluación económica sólo se utilizarán las luminarias LEDs y de inducción como alternativas de alta eficiencia. En particular, se utilizarán los sistemas LEDs como alternativa de iluminación al interior de los edificios, y sistemas de inducción magnética para el alumbrado externo a los edificios. A continuación, se muestran los diferentes estados a utilizar en la evaluación:

Los estados a considerar son los siguientes:

- **Estado Base:** en el cual el sistema de iluminación contará con lámparas incandescentes.
- **Estado N°1:** en el cual el sistema de iluminación contará con lámparas LEDs.
- **Estado N°2:** en el cual el sistema de iluminación contará con lámparas de inducción magnética.

A continuación se muestran los diferentes costos que tendrán las luminarias a través de su ciclo de vida, y que es necesario considerar para obtener los resultados correctos:

5.8.5.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Corresponde al costo que se debe efectuar por la compra de un “sistema de iluminación” en los diferentes estados a analizar, y que corresponderá al costo de fábrica más un recargo de **15%** debido a las obras de ingeniería y montaje necesarias para la instalación de los sistemas de iluminación. La expresión matemática para el costo de inversión se muestra en la sección 5.8.5.4.

5.8.5.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Corresponde a los costos en que incurren los elementos del sistema para funcionar correctamente. En los sistemas de iluminación este costo está dado principalmente por el consumo de energía de los dispositivos, ya que las luminarias LEDs y de Inducción Magnética requieren una mantención casi nula. La expresión matemática para el costo de operación se muestra en la sección 5.8.5.4

5.8.5.3. OTROS COSTOS

Existen diversos costos que son necesario evaluar previo a la instalación de un sistema de iluminación, pero que no se considerarán en este informe debido a la dificultad para estimarlos, o porque son dependientes de condiciones de operación externas a este estudio. Estos costos son análogos a los descritos en la sección 5.8.5.4.

A continuación se muestra una tabla comparativa, con las diferentes características de las luminarias a utilizar en la evaluación económica.

	<i>Incandescente</i>	<i>Halógena</i>	<i>HID</i>	<i>LED</i>	<i>Inducción</i>
Vida Útil [horas]	1.500	2.500	12.000	50.000	60.000
Costo [US\$/1000lumenes]	7	6	20	8	50
Temperatura del Color Espectral [°K]	2.800	3.200	4.000	5.500	4.000
Eficiencia [Lumenes/Watt]	14	20	70	45	80
Resistencia a Golpes	no	no	no	si	si

Tabla N° 19: “Características Principales de las Luminarias a considerar en la Evaluación Económica”

5.8.5.4. FLUJOS DEL PROYECTO

A continuación, se muestra el flujo de cajas a utilizar para la evaluación económica de los proyectos de eficiencia. Para ello serán considerados los diferentes costos mencionados anteriormente **Inversión, Operación y Mantenimiento** de los distintos estados establecidos.

$$F_o = CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}$$
$$F_i = (COA + CM)_{BASE} - (COA + CM)_{OTROESTADO} \quad \text{con } i = 1 \dots 10$$

Dado que $CM_{BASE} = CM_{OTROESTADO}$

$$F_i = COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}$$

Finalmente se tiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = F_o + \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = (CI_{BASE} - CI_{OTROESTADO}) + \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{OTROESTADO}}{(1+r)^i}$$

Donde:

- CI: Costo de inversión de los distintos estados.
- COA: Costos de operación anual de los distintos estados.
- CM: Costo de mantenimiento de los distintos estados.
- F_i : Flujo de Costos del año i .
- $N=10$: Periodo de evaluación del flujo de cajas.
- r : Tasa de descuento [0/1].

A continuación, se realizará un desarrollo matemático de los diferentes costos a evaluar en el sistema de iluminación. Cabe señalar, que se evaluarán las luminarias a utilizar al interior de los edificios, es decir, el manejo de luminarias LEDs. No obstante, el cálculo es análogo para el caso de luminarias de inducción magnética, cambiando solamente los valores de eficiencia, costos de inversión y vida útil.

Para comenzar, es necesario indicar que se debe generar el mismo flujo luminoso (F) en todas las luminarias a evaluar, ya que este valor depende de la luminosidad mínima que puede existir en un lugar, y está dado por la Norma NCH Elec. 4/2003 Art. 11.0 - Alumbrado.

Sea:

$$\begin{aligned} \eta_{BASE} &= \eta_{INCANDESCENTE} &&= \text{Eficiencia de Lámparas Incandescentes [lum/W]} \\ CF_{BASE} &= CF_{INCANDESCENTE} &&= \text{Costo de Fábrica de Lámparas Incandescentes [USD/klum]} \\ TV_{BASE} &= TV_{INCANDESCENTE} &&= \text{Tiempo de Vida Útil de Lámparas Incandescentes [hrs]} \\ \\ \eta_{OTROESTADO} &= \eta_{LED} &&= \text{Eficiencia de Lámparas LEDs [lum/W]} \\ CF_{OTROESTADO} &= CF_{LED} &&= \text{Costo de Fábrica de Lámparas LEDs [USD/klum]} \\ TV_{OTROESTADO} &= TV_{LED} &&= \text{Tiempo de Vida Útil de Lámparas LEDs [hrs]} \\ \\ P_{BASE} &= P_{INCANDESCENTE} &&= \text{Potencia de un Sistema de Iluminación utilizando Luminarias Incandescentes [kW]} \end{aligned}$$

A partir de los datos anteriores, se tiene que el flujo luminoso de un sistema será de:

$$F_{BASE} = \eta_{BASE} \cdot P_{BASE} \quad [\text{k lum}]$$

Por otra parte, suponiendo un tiempo de evaluación de N=10 años se tiene que las horas de evaluación serán de:

$$T_E = \text{Horas de Evaluación} = 8760 [\text{hrs/año}] \cdot N = 8760 [\text{hrs/año}] \cdot 10 [\text{años}] = 87600 [\text{hrs}]$$

➤ COSTOS DE INVERSIÓN

El costo de inversión estará dado por la cantidad de luminarias a utilizar en el periodo de evaluación y el costo de fábrica de los equipos.

$$CI_{BASE} = \left[\frac{T_E}{TV_{BASE}} \right] \cdot CF_{BASE} \cdot (1 + 15\%) \cdot F_{BASE} = \left[\frac{T_E}{TV_{BASE}} \right] \cdot CF_{BASE} \cdot (1 + 15\%) \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

$$CI_{OTROESTADO} = \left[\frac{T_E}{TV_{OTROESTADO}} \right] \cdot CF_{OTROESTADO} \cdot (1 + 15\%) \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

➤ COSTOS DE OPERACIÓN

El costo de operación estará dado por el costo de la energía a consumir anualmente.

$$COA_{BASE} = \left[\frac{T_A \cdot P_{MONOMICO}}{\eta_{BASE}} \right] \cdot F_{BASE} = \left[\frac{T_A \cdot P_{MONOMICO}}{\eta_{BASE}} \right] \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

$$COA_{OTROESTADO} = \left[\frac{T_A \cdot P_{MONOMICO}}{\eta_{OTROESTADO}} \right] \cdot F_{BASE} = \left[\frac{T_A \cdot P_{MONOMICO}}{\eta_{OTROESTADO}} \right] \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

Luego la energía a consumir por el sistema será:

$$Energia_{BASE} = \left[\frac{T_A}{\eta_{BASE}} \right] \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

$$Energia_{OTROESTADO} = \left[\frac{T_A}{\eta_{OTROESTADO}} \right] \cdot \eta_{BASE} \cdot P_{BASE}$$

Con

T_A = Tiempo de utilización anual en horas.

Cabe señalar, que la forma del modelo de evaluación propuesto entregará un valor actual neto (VAN) positivo en caso de que el estado de eficiencia a considerar sea factible y por lo tanto sería conveniente invertir en nuevas tecnologías de ahorro energético. Por otra parte, en caso de que el VAN sea negativo, no convendría la inversión en mecanismos de eficiencia, ya que los ahorros energéticos obtenidos no serían suficientes para compensar la inversión inicial.

Los resultados de las evaluaciones anteriores se mostrarán en el anexo digital entregado junto a este informe. No obstante, en el Anexo 9.5.4 se muestran los resultados obtenidos al evaluar la peor condición posible en la instalación de luminarias con tecnología LED al interior de los edificios, es decir, un bajo precio monómico de la energía 35 [USD/MWh]. En particular, se pudo apreciar la gran conveniencia y rentabilidad que tiene la utilización de luminarias con tecnología LED, ya que se obtuvieron evaluaciones positivas ($VAN > 0$), aun si el precio de la energía es muy bajo, lo que no ha ocurrido con el resto de los equipos analizados. Cabe señalar además, que al observar la inversión en el horizonte de evaluación, se obtendrá un menor gasto al utilizar tecnología LED. Esto ocurre principalmente, debido a la larga vida útil de este tipo de tecnologías, que permite un bajo recambio de luminarias a través del tiempo.

Por otra parte, en el Anexo 9.5.5, se muestran los resultados obtenidos al evaluar la instalación de luminarias de inducción magnética en exteriores, pensando en el peor de los casos a analizar, es decir, un precio monómico de la energía muy bajo (35 [USD/MWh]). Se pudo apreciar que se mantienen los buenos resultados alcanzados con la tecnología LED, al utilizar lámparas de inducción magnética, por lo que la inversión en eficiencia energética en sistemas de iluminación alcanzará buenos resultados bajo cualquier condición del mercado eléctrico. En particular, esto las hace propicias para ser la primera fuente de inversión en cualquier proyecto que desee realizar un uso eficiente de la energía, ya que no sólo tendrá una menor inversión a través de la vida útil del proyecto, sino que además generará ahorros en la operación de los sistemas de iluminación.

5.9. Gestión de Combustibles

El consumo de diesel y gasolina como fuente de energía para los procesos de carguío y transporte en la mina es parte importante de la demanda total de energía de la planta, alcanzando el 37% del consumo con 460 [GWh]. Este alto consumo de diesel y gasolina se debe principalmente a la utilización de camiones de gran tonelaje, con motores de tipo diesel-eléctrico, cuya función es llevar el material removido desde la zona de carguío hasta el chancador primario.

Dado lo anterior, se hace fundamental una mejora en la eficiencia energética en la utilización de combustibles, como diesel y gasolina, ya que no sólo forman parte importante de los costos de operación de la planta, sino que además tienen una incidencia directa en el aumento de emisiones de CO₂, al ser combustibles fósiles.

Entre las medidas de eficiencia energética que se pueden realizar en camiones de gran tonelaje, se cuentan: la gestión de combustible en flotas de camiones, la conducción eficiente, y el mantenimiento de camiones.

5.9.1. Ventajas de la Gestión del Combustible

La gestión del combustible corresponde al diseño y la puesta en práctica de un sistema de control, supervisión y seguimiento del consumo de carburante global e individualizado de los vehículos de una flota de camiones. Esta gestión permite aprovechar de la manera más rentable cada litro de combustible adquirido, contribuyendo con ello a la disminución en los costos de operación, así como también al ahorro energético. La gestión de combustible puede ser realizada mejorando la eficiencia de cada vehículo, a través del control y seguimiento individualizado de los mismos, así como del establecimiento de programas de formación a los conductores en las técnicas de conducción eficiente.

5.9.2. Establecimiento del Sistema de Control de Combustible

La base para el establecimiento de un adecuado sistema de gestión de combustible en las flotas de camiones de gran tonelaje es el preciso conocimiento de los consumos de combustible de cada uno de los vehículos. Este conocimiento resulta indispensable para la implementación de sistemas avanzados de control de combustible, que incorporen criterios de discriminación de consumos en función del tipo de trayecto, velocidad, carga a transportar, entre otros. Cuanto mayor sea la precisión y detalle con la que se lleve a cabo el control del consumo de combustible, mayor será la eficiencia energética futura de la flota.

Como ya fue mencionado, el punto de partida para la integración del sistema de gestión de combustible será el establecimiento de métodos que permitan conocer las condiciones de los equipos, prácticas operacionales y condiciones del camino, para de esta manera poder tomar decisiones sobre como generar ahorros de combustible.

En ese sentido, Anglo American ha estado trabajando en un sistema de reportabilidad en camiones de gran tonelaje en la división Los Bronces, llamado IntelliComb, que permitirá medir el consumo de combustible en los camiones para así analizar las variables de manejo del operador del camión que inciden en el consumo de combustible. El sistema además tiene la característica de que permitirá observar la información a través de una interfaz gráfica web.

5.9.2.1. FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento de IntelliComb se realizará creando una conexión remota con la mina, que permitirá capturar los datos desde las interfaces del motor diesel, motor eléctrico y pesómetro de los camiones. Los datos se almacenan en el servidor DISPATCH®, desde donde son traspasados al servidor de datos SQL, el cual finalmente se constituye en la plataforma de datos del sistema IntelliComb. Por otra parte, el sistema permitirá analizar toda la información obtenida de los camiones, activando una serie de filtros de período de tiempo, flota de equipos, equipo, operador, condición de cargado/vacío y datos circunscritos a un tramo de ruta con una pendiente en particular.

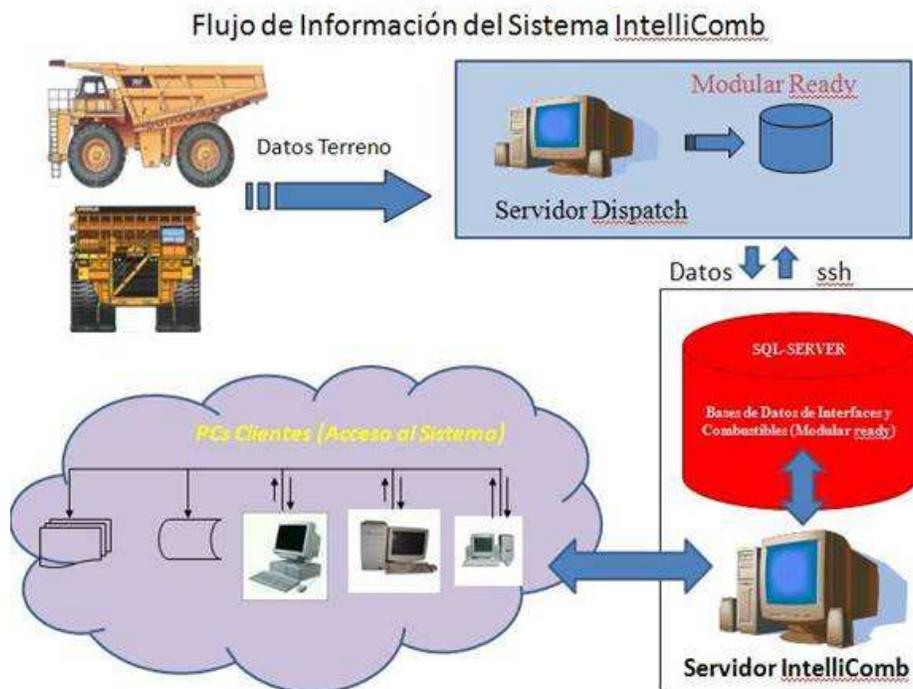


Figura N° 87: “Flujo de Información del Sistema IntelliComb”

Cabe señalar, que el rendimiento promedio de un camión puede ser obtenido simplemente mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento} \left[\frac{\text{Litros}}{\text{km}} \right] = \frac{\text{Consumo Combustible} [\text{Litros}]}{\text{Distancia Recorrida} [\text{km}]}$$

Por otra parte, puede ser útil la confección de gráficos que permitan observar de manera más rápida, aquellos consumos que salgan del funcionamiento normal de los vehículos, como se muestra en la Figura N° 88.

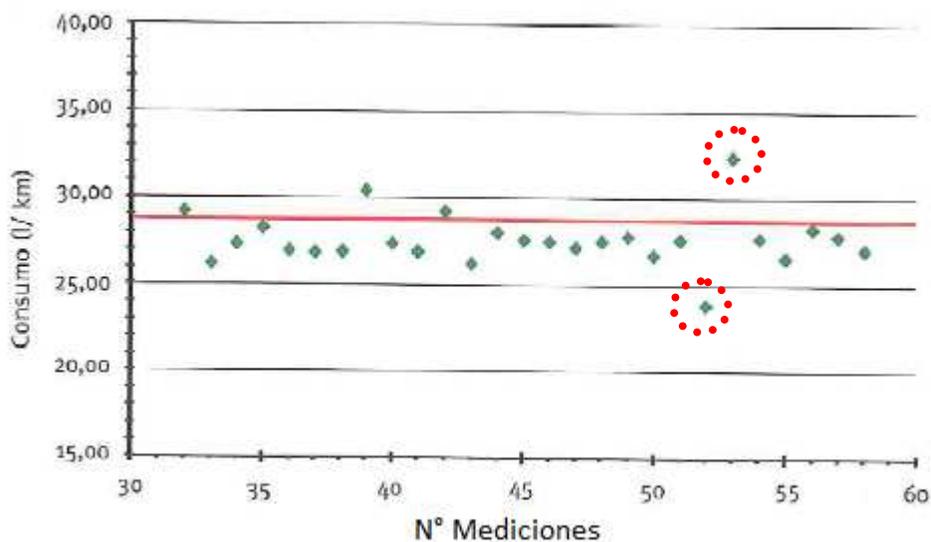


Figura N° 88: “Ejemplo de Análisis del Sistema de Gestión de Combustible”

De esta manera, se tendrá una visión sencilla y bastante clara de cuáles son los consumos habituales del camión a controlar, y se percibirá la posible existencia de algunos puntos que excedan la franja de valores habituales de consumo de este vehículo. En particular, en la Figura N° 88 se puede observar la presencia de dos puntos que varían bastante de los consumos normales que presenta el vehículo, y por lo tanto es necesario analizar las situaciones de manera específica.

5.9.3. Medidas para el Ahorro de Combustible

Una vez obtenida y analizada la información proveniente del sistema de gestión, es necesario aplicar medidas que permitirán la generación de ahorros de combustibles, aumentando así la eficiencia de los procesos. A continuación, se muestran algunas medidas que es necesario desarrollar para obtener los ahorros de combustible esperados:

5.9.3.1. CONDUCTORES

La formación de los conductores es un aspecto clave en el ahorro de combustible en camiones de gran tonelaje. En particular, resulta adecuada la formación de los conductores en las técnicas de conducción eficiente (sección 5.9.5). De esta manera, se contará con una plantilla con la preparación necesaria para obtener el máximo aprovechamiento de las posibilidades de los camiones que conforman la flota. Es un hecho que conductores con mayor nivel de formación suelen consumir menos para la misma operación, pero no siempre la mayor experiencia en conducción produce el mismo resultado.

Otra posible medida, es el establecimiento de un sistema de incentivos, que premie a aquellos conductores que tienen un menor consumo de combustible, repartiendo dividendos basados en los ahorros de combustible mensuales generados.

5.9.3.2. CAMIONES

Como se detallará en la sección 5.9.4, la realización de un correcto mantenimiento de los vehículos de la flota contribuye a evitar consumos extraordinarios de combustible, evitando así un excesivo gasto en la operación de los camiones.

5.9.3.3. VINCULACIÓN VEHÍCULO-CONDUCTOR

Otra manera de generar ahorros de energía será la integración de dispositivos en la cabina del conductor, que permitan observar de manera instantánea el flujo de combustible, así como otras variables relevantes en la conducción (uso de frenos, excesos de velocidad, entre otros). Esto provocaría un interés en el conductor por disminuir el consumo de combustible, ya que se crearía un reto personal contra la máquina, concluyendo en un incentivo por disminuir el consumo prestando más atención a la conducción continua. No obstante, ello sólo podrá ser realizado cuando los conductores hayan recibido previamente formación de conducción eficiente, a fin de contar con las herramientas oportunas para rebajar el consumo instantáneo.

5.9.4. Mantenimiento de Camiones de Gran Tonelaje

El mantenimiento adecuado de la flota de camiones es clave para el funcionamiento de la misma, afectando a la seguridad de los vehículos, su disponibilidad y consumo de combustible. Un incorrecto o deficiente mantenimiento de un vehículo puede incidir directamente en un aumento del consumo de combustible y, de no ser corregido cuando corresponde podría llegar a generar desperfectos mecánicos que aumentarían de manera considerable los costos.

5.9.4.1. CONTROL DE LOS NEUMÁTICOS

Una presión excesivamente baja de los neumáticos redonda en una mayor resistencia a la rodadura, un peor comportamiento en curvas y un aumento de su temperatura de trabajo por lo que, además de aumentar el consumo, aumentan las posibilidades de falla de los camiones.

Por ello se recomienda el control de la presión de todos los neumáticos de manera diaria. Cabe señalar, que una reducción de la presión de un neumático en 2 bares, aumentará el consumo de combustible en un 2%.

Por otro lado, una presión excesivamente alta en los neumáticos produce, además de rebotes innecesarios en la suspensión, desgastes a saltos del mismo, principalmente concentrados en la zona central de la banda de rodadura, lo que incrementa el consumo y produce un desgaste prematuro del neumático.

5.9.4.2. CONTROL DE FILTROS

El estado de los filtros de combustible, de aceite y de aire tiene una repercusión directa en el consumo de combustibles, por lo tanto, es necesario realizar las siguientes observaciones:

- El filtro de combustible: su mal funcionamiento puede causar aumentos en el consumo de hasta un 0,5%, además de que, en caso de bloqueo, pararía el motor. Es importante controlar la cantidad de agua en el filtro.
- El filtro de aceite: su mal estado, además de incrementar el riesgo de sufrir graves averías en el motor, puede aumentar el consumo del vehículo hasta un 0,5%.
- El filtro del aire: su mal estado, habitualmente por un exceso de suciedad, provoca mayores pérdidas de carga de las deseables en el circuito de admisión, lo que hace aumentar también el consumo hasta un 1,5%.

5.9.5. Conducción Eficiente

Todas las características expuestas anteriormente sobre la gestión del combustible deben ser complementadas con la conducción eficiente del camión, ya que esto junto con el monitoreo del combustible corresponderá a la mayor fuente de ahorros energéticos.

La conducción eficiente consiste en una serie de técnicas que permiten lograr importantes ahorros de combustible y reducción de emisiones al medio ambiente, así como una mejora en la seguridad. Como en todo proceso de aprendizaje, la experiencia es necesaria para alcanzar los objetivos deseados, por lo que una vez formado el conductor en las técnicas de conducción eficiente, asimilará y perfeccionará las técnicas a través de su propia experiencia.

La conducción eficiente se puede resumir mediante las siguientes reglas:

- **Conocimiento de las características del motor:** es de gran importancia el conocimiento por parte del conductor de los intervalos de revoluciones a los cuales el vehículo a conducir presenta el torque máximo y la potencia máxima, así como de las curvas características propias del motor.
- **Realización de los cambios de marchas:** realizar los cambios de marchas en la zona de torque máximo de revoluciones del motor, y solamente en condiciones de mayor exigencia se realizarán en regímenes de revoluciones cercanos a la zona de potencia máxima.
- **Salto de marchas:** cuando se puedan llevar a cabo, se podrán saltar marchas, tanto en los procesos de aceleración, como en los de desaceleración.
- **Selección de la marcha de la circulación:** procurar seleccionar la marcha que permita al motor funcionar en la parte baja del intervalo de revoluciones de torque máximo.
- **Velocidad uniforme de circulación:** intentar mantener una velocidad estable en la circulación evitando las aceleraciones y frenazos innecesarios. En particular, es útil el aprovechamiento de las inercias del vehículo.
- **Desaceleraciones:** ante cualquier desaceleración u obstáculo que presente la vía, se levantará el pie del pedal acelerador, dejando rodar el vehículo por su propia inercia. En estas condiciones el consumo de carburante del vehículo es nulo (hasta regímenes muy bajos de revoluciones cercanos al de ralentí).

5.9.6. Evaluación Técnica – Económica

Este tipo de análisis permitirá evaluar la conveniencia de utilizar las características de la gestión energética, así como el monitoreo de combustible en Quellaveco. En este tipo de análisis es necesario considerar diferentes estados para comparar cuál es la mejor decisión a tomar en cuanto a medidas de eficiencia energética. No obstante, debido a que es difícil estimar los costos de inversión de la conducción eficiente, y de las medidas de monitoreo de combustible en camiones de gran tonelaje, se utilizará el mismo análisis que el realizado en el caso de transformadores, es decir, se encontrará el **punto de quiebre en los costos de inversión**, tal que para costos menores sea factible la utilización de estas medidas.

Los estados a considerar en la evaluación son los siguientes:

- Estado Base: en el cual **no** se utilizarán las medidas de gestión energética en combustibles.
- Estado Eficiente: en el cual se utilizarán las medidas de gestión energética en combustibles.

5.9.6.1. COSTOS DE INVERSIÓN

Corresponde al costo que se debe efectuar por la implementación de las medidas de eficiencia energética. Este costo incluirá las siguientes opciones:

- Sistema de monitoreo de combustibles Intellicomb en camiones de gran tonelaje.
- Enseñanza a conductores del estilo de conducción eficiente.
- Integración de sistema de monitoreo en cabinas de conducción.

Cabe señalar, que debido a la dificultad para estimar estos costos, es que se encontrará la inversión máxima que es posible efectuar, tal de obtener una rentabilidad positiva.

5.9.6.2. COSTOS DE OPERACIÓN

Corresponde a los costos debido al consumo de combustible diesel, en la zona de transporte y carguío en la mina. A continuación se describen con mayor detalle estos costos en los diferentes estados a analizar:

➤ ESTADO BASE

Corresponde a los costos por consumo de diesel, en el caso de no utilizar las medidas de uso eficiente de la energía en combustibles. En el caso base, el consumo de energía corresponderá al descrito en la Figura N° 17 en la zona de transporte y carguío de la mina, es decir, 1.384.995 [GJ]. Finalmente los costos de operación anuales, pueden ser descritos mediante la siguiente ecuación:

$$COA_{BASE} = \frac{C_{DIESEL} \cdot PR_{DIESEL}}{FC}$$

Donde

- C_{DIESEL} = Corresponde al consumo de combustible en los motores de gran tonelaje, es decir, 1.384.995 [GJ].

- PR_{DIESEL} = Corresponde al precio del diesel en Perú. Se utilizará la estadística indicada en la Figura N° 89 (“Balance Nacional de Energía 2007 – Perú”), es decir, 559 [USD/m³]
- FC = Corresponde a un factor de conversión indicado en el “Balance Nacional de Energía 2007 – Perú”, para conocer la energía que tiene un metro cúbico de diesel. El factor de conversión es de 36,3 [GJ/m³]

Reemplazando en la ecuación anterior se tiene:

$$COA_{BASE} = \frac{1.384.995[GJ] \cdot 559 \left[\frac{USD}{m^3} \right]}{36,3 \left[\frac{GJ}{m^3} \right]} = 21.328.162[USD]$$

➤ ESTADO EFICIENTE

Corresponde a los costos por consumo de diesel, luego de haber aplicado las medidas de gestión de combustibles. Los costos de operación anuales pueden ser descritos mediante la siguiente ecuación:

$$COA_{EFICIENTE} = \frac{C_{DIESEL} \cdot PR_{DIESEL}}{FC} \cdot (1 - AhorroCombustible[\%])$$

Donde

- C_{DIESEL} = Corresponde al consumo de combustible en los motores de gran tonelaje, en el caso base, es decir, 1.384.995 [GJ].
- PR_{DIESEL} = Corresponde al precio del diesel en Perú. Se utilizará la estadística indicada en la Figura N° 89 (“Balance Nacional de Energía 2007 – Perú”), es decir, 559 [USD/m³]
- FC = Corresponde a un factor de conversión indicado en el “Balance Nacional de Energía 2007 – Perú”, para conocer la energía que tiene un metro cúbico de diesel. El factor de conversión es de 36,3 [GJ/m³]
- Ahorro Combustible = Corresponde al porcentaje de ahorro de combustible diesel en camiones de gran tonelaje, debido a las medidas de eficiencia energética. Debido a las estimaciones indicadas anteriormente, estas medidas permitirán ahorrar un 9,5% del combustible, distribuidos de la siguiente forma:
 - 5% debido al sistema de monitoreo, junto con las técnicas de conducción eficiente.
 - 2% debido a los ahorros del control de neumáticos.
 - 2,5 debido a las medidas aplicadas en filtros de combustibles, aceite y aire.

Reemplazando en la ecuación anterior se tiene:

$$COA_{EFICIENTE} = \frac{1.384.995[GJ] \cdot 559 \left[\frac{USD}{m^3} \right]}{36,3 \left[\frac{GJ}{m^3} \right]} \cdot (100\% - 9,5\%) = 19.301.987[USD]$$

**PRECIOS DE IMPORTACIÓN DE LOS DERIVADOS DE LOS HIDROCARBUROS
(US\$/m³)**

AÑO	GLP	GASOLINA AVIACIÓN	DIESEL	BASES LUBRICANTES	QUÍMICOS SOLVENTES	MATERIAL DE CORTE	NAFTA CRAQUEADA	PETRÓLEO CRUDO	KERO TURBO
2006	319	820	511	826	718	386	519	367	966
2007	414	824	559	837	963	491	2 261	417	1 099

Fuente: DGH - MEM

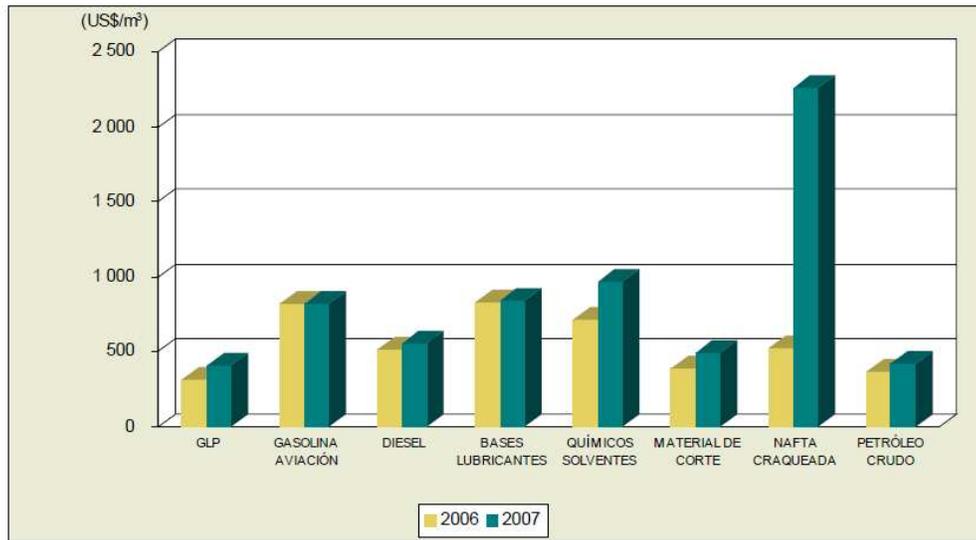


Figura N° 89: “Precios de Importación de Hidrocarburos [USD/m³]”

5.9.6.3. FLUJOS DEL PROYECTO

A continuación, se muestra el flujo de cajas a utilizar para la evaluación económica

$$F_o = CI_{BASE} - CI_{EFICIENTE}$$

$$F_i = COA_{BASE} - COA_{EFICIENTE} \quad \text{con } i = 1 \dots 10$$

Finalmente se tiene:

$$VAN = \sum_{i=0}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = F_o + \sum_{i=1}^N \frac{F_i}{(1+r)^i} = (CI_{BASE} - CI_{EFICIENTE}) + \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{EFICIENTE}}{(1+r)^i}$$

Donde:

- CI: Costo de inversión de los distintos estados.
- COA: Costos de operación anual de los distintos estados.
- F_i : Flujo de Costos del año i .
- $N=10$: Periodo de evaluación del flujo de cajas.
- $r=10\%$: Tasa de descuento [0/1]

Dado que se busca el **punto de quiebre**, tal que a partir de este valor sea conveniente la utilización de las medidas de eficiencia energética, es que se hace necesaria la modificación de la ecuación anterior, ya que el punto de quiebre corresponderá al mayor costo de inversión, tal que la rentabilidad (VAN) sea positiva, luego se tiene:

$$VAN = (CI_{BASE} - CI_{EFICIENTE}) + \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{EFICIENTE}}{(1+r)^i} = 0$$

$$\Rightarrow \text{PuntoQuiebre} = CI_{EFICIENTE} - CI_{BASE} = \sum_{i=1}^{10} \frac{COA_{BASE} - COA_{EFICIENTE}}{(1+r)^i}$$

$$\Rightarrow \text{PuntoQuiebre} = \sum_{i=1}^{10} \frac{21.328.162 - 19.301.987}{(1+10\%)^i} = 12.449.971[\text{USD}]$$

Finalmente en la Figura N° 90 se muestran los ahorros que es posible obtener a partir de las medidas de eficiencia energética.

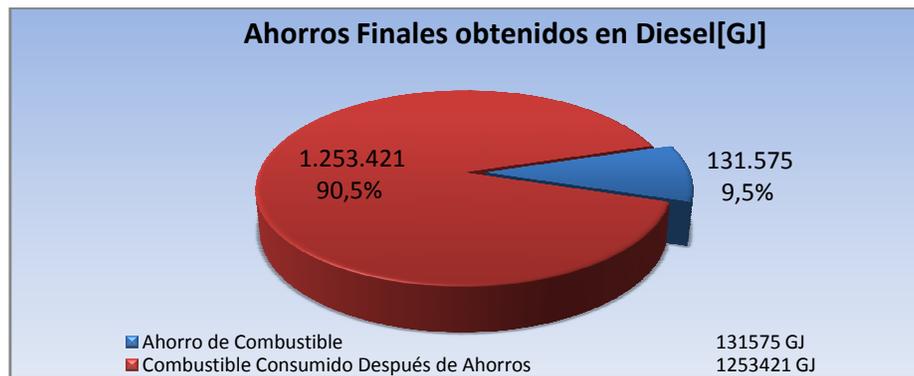


Figura N° 90: “Ahorros Finales obtenidos mediante la Gestión de Combustibles”

Cabe señalar, que este **alto punto de quiebre** observado anteriormente, tiene ventajas positivas sobre la implementación del proyecto de uso eficiente de la energía mediante la gestión del combustible, ya que esto significa que el proyecto puede requerir una inversión de hasta 12,4 millones de dólares, e inclusive de esta forma el proyecto tendrá rentabilidades positivas. Esto ocurre, debido a los grandes ahorros de diesel que pueden ser obtenidos mediante la gestión del combustible, ya sea, mediante el monitoreo del combustible consumido por los camiones de gran tonelaje, la utilización de las técnicas de conducción eficiente, o el mantenimiento eficiente de camiones.

6. Resultados

En este capítulo se expondrán los principales resultados obtenidos mediante la aplicación de las diferentes prácticas desarrolladas en el capítulo seis, y que permitirán generar ahorros energéticos en los diferentes componentes de una planta. En particular, las prácticas antes mencionadas serán aplicadas a los distintos procesos de la planta concentradora Quellaveco, cuya caracterización fue realizada en la sección 4.2.

6.1. Resultados Globales

A continuación se exponen los resultados globales obtenidos mediante la aplicación del conjunto de medidas de eficiencia energética descritas en este documento, incluyendo las medidas sobre equipos eléctricos, así como la gestión del combustible. Cabe señalar, que todos estos resultados entregaron rentabilidades positivas al realizar la evaluación.

6.1.1. Ahorros de Energía

En la Tabla N° 20 se observa como varían los ahorros de energía en función del precio monómico de la energía.

Nombres	Ahorros de Energía [GJ] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]								
	0,035	0,045	0,055	0,065	0,075	0,085	0,095	0,105	0,115
Gestión de Combustible [GJ]	131.575	131.575	131.575	131.575	131.575	131.575	131.575	131.575	131.575
Bombas [GJ]	199.429	199.484	199.513	200.733	202.465	204.081	204.083	204.087	204.087
Otros Motores [GJ]	-	-	38	165	288	288	330	373	396
Agitadores [GJ]	14	14	18	85	285	285	291	291	291
Correas Transportadoras [GJ]	247	18.511	19.500	19.651	19.696	19.780	19.780	19.780	19.785
Ventiladores [GJ]	3.143	3.186	3.191	3.211	3.216	3.226	3.226	3.226	3.226
Iluminación [GJ]	17.857	17.857	17.857	17.857	17.857	17.857	17.857	17.857	17.857
Compresores [GJ]	-	-	-	4.486	4.486	4.486	4.601	4.723	4.723
Celdas [GJ]	0,00	125	125	535	535	535	6.400	6.400	6.400
Transformadores [GJ]	19.996	19.996	19.996	19.996	19.996	19.996	19.996	19.996	19.996
TOTAL [GJ]	372.260	390.747	391.811	398.293	400.398	402.109	408.138	408.307	408.335
Ahorros Energéticos Totales	8,24%	8,65%	8,67%	8,81%	8,86%	8,90%	9,03%	9,03%	9,03%

Tabla N° 20: “Ahorros Energéticos [GJ] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]”

Para lo anterior, se consideraron los siguientes valores para los parámetros que intervienen en el cálculo de los resultados expuestos.

- Se consideraron los flujos para 10 años en la mayoría de los equipos, exceptuando a los transformadores en donde se consideró una vida útil de 25 años.
- Se consideró una tasa de descuento del 10%.

En la Figura N° 91 se observa una representación gráfica de los resultados expuestos en la Tabla N° 20.

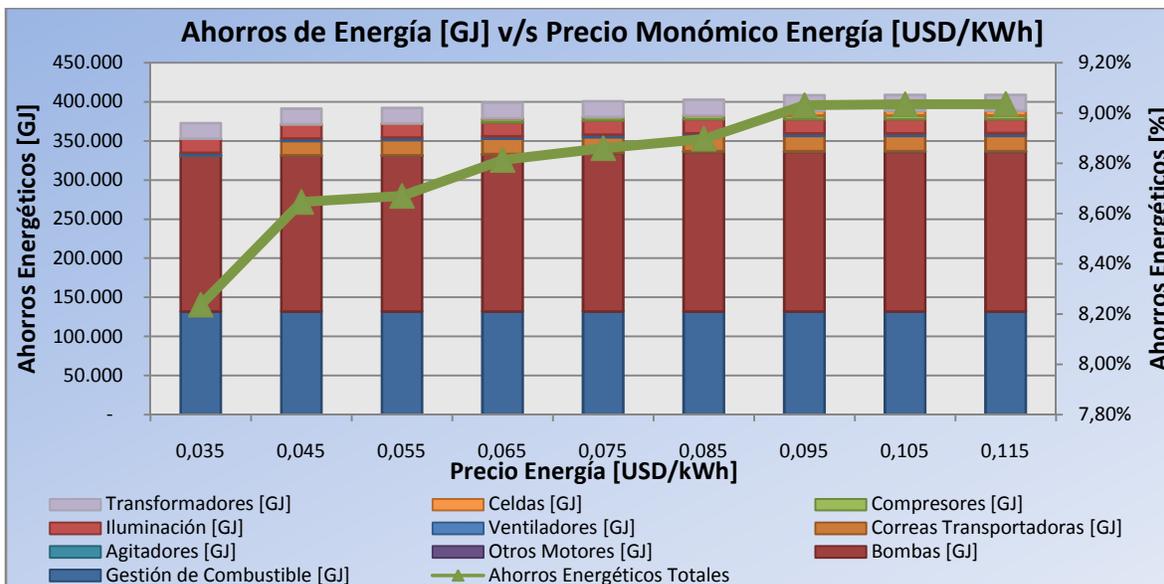


Figura N° 91: “Ahorros de Energía [GJ] v/s Precio Monómico de Energía [USD/KWh]”

A partir del gráfico anterior, se puede apreciar que a medida que aumenta el precio monómico de la energía, también se incrementarán los mecanismos de eficiencia energética a utilizar en la planta concentradora Quellaveco. Esto ocurre principalmente, a que un aumento en el precio de la energía incidirá directamente en un incremento en los costos de operación de la mayoría de los equipos eléctricos, lo que incentivará la utilización de productos que permitan generar ahorros de energía, como son los equipos mencionados en este documento.

Se observa además, que el aumento en el precio de la energía podría permitir obtener ahorros energéticos globales que podrían alcanzar el 9% del consumo total de la planta, lo que correspondería a sobre 408 [TJ] anuales. Por otra parte, se observa la existencia de una gran cantidad de equipos que permitirán generar ahorros energéticos aun si el precio monómico de la energía es bajo, como ocurre en el caso de luminarias, bombas hidráulicas, gestión de combustibles, entre otros, que no necesitan un alto precio de la energía eléctrica para generar rentabilidades positivas con el ahorro energético. En particular, se observa que es posible llegar a ahorrar sobre un 8,2% de la energía de la planta (eléctrica y diesel) con un precio de la energía muy bajo.

6.1.2. Inversiones

En la Tabla N° 21 se observa como varían las inversiones al incrementarse la utilización de equipos más eficientes con el precio monómico de la energía.

	Inversiones Adicionales [USD] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]								
	0,035	0,045	0,055	0,065	0,075	0,085	0,095	0,105	0,115
Gestión de Combustibles ¹¹	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971	12.449.971
Bombas	3.847.234	3.850.862	3.853.170	3.971.342	4.179.477	4.402.663	4.402.990	4.403.646	4.403.646
Otros Motores	-	-	3.360	16.368	30.894	30.894	37.488	44.890	49.187
Agitadores	726	726	1.051	8.360	31.477	31.477	32.467	32.467	32.467
Correas Transportadoras	14.748	1.245.354	1.328.685	1.344.592	1.349.849	1.361.266	1.361.266	1.361.266	1.362.257
Ventiladores	98.132	101.102	101.537	103.595	104.242	105.540	105.540	105.540	105.540
Iluminación									
Compresores	-	-	-	452.705	452.705	452.705	470.901	490.786	490.786
Celdas de Flotación	0,00	7.472	7.472	46.113	46.113	46.113	941.874	941.874	941.874
Transformadores	1.764.595	2.268.765	2.772.935	3.277.105	3.781.275	4.285.446	4.789.616	5.293.786	5.797.956
TOTAL	18.175.405	19.924.251	20.518.180	21.670.152	22.426.004	23.166.076	24.592.112	25.124.225	25.633.683

Tabla N° 21: “Inversiones Adicionales [USD] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]”

En la Figura N° 92 se observa una representación gráfica de los resultados expuestos en la Tabla N° 21.

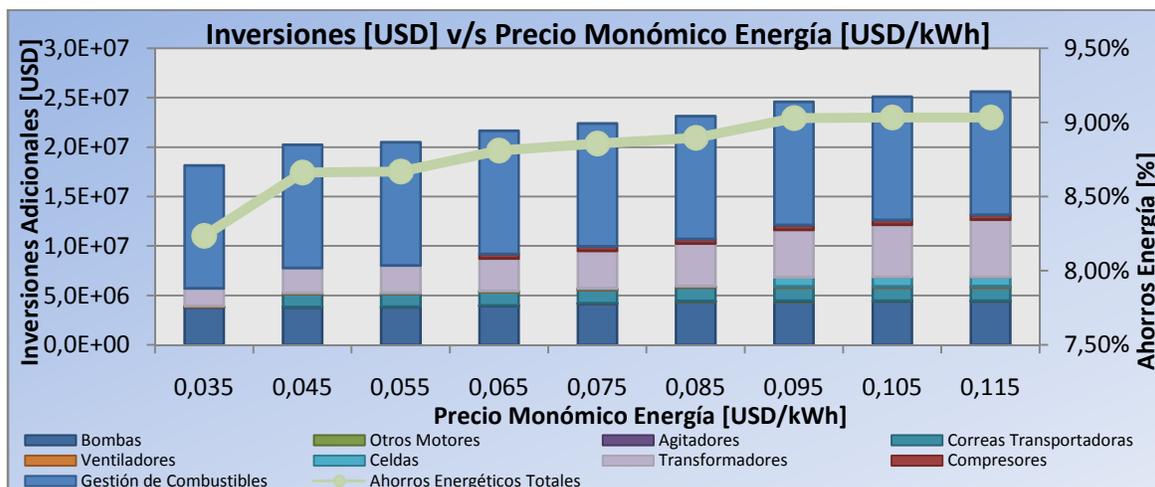


Figura N° 92: “Inversiones [USD] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]”

¹¹ Corresponde a la inversión máxima que puede llegar a necesitar la implementación de este tipo de tecnologías.

Como fue mencionado anteriormente, el aumento en el precio monómico de la energía generará un mayor incentivo en los inversionistas para implementar medidas que permitan realizar un uso eficiente de la energía, lo que concuerda con la Figura N° 92, donde se muestra un aumento en las inversiones a medida que el precio de la energía aumenta. Se aprecia además, que las inversiones adicionales que necesitarán las medidas establecidas en este documento, serán como máximo \$25 [MMUSD] lo que permitiría generar ahorros de hasta un 9% de la energía global consumida por la planta, es decir, 408 [TJ] anuales. Cabe señalar, que estos ahorros de energía son equivalentes a abastecer con energía eléctrica a **63.000 casas durante un año**, por lo que son enormes los ahorros que permitirían generar las medidas de uso eficiente de la energía descritas en este documento, y con inversiones muy inferiores a las realizadas normalmente en el sector minero. En particular, el proyecto Quellaveco requerirá una inversión total aproximada de 3.070 millones de dólares, por lo que la implementación de las medidas de eficiencia corresponderán a menos de un 0,82% del total de la inversión.

6.2. Curva de Conservación de la Energía

El costo de la energía conservada (CCE), así como la curva de conservación de la energía, son herramientas que permiten investigar el potencial técnico y económico de una medida que permite generar ahorros energéticos. A continuación se describirá en mayor detalle cada uno de estos términos.

6.2.1. Costo de la Energía Conservada (CCE)

La conservación de la energía es una consecuencia típica de una inversión que genera menores costos de operación, y en particular, de un menor consumo energético. Un inversionista se enfrenta a menudo con distintas opciones que permiten ahorrar energía, por lo que éste necesita una manera de “ordenar” estas medidas para luego poder decidir sobre la alternativa a invertir. La herramienta que permite realizar un “orden” de las alternativas a invertir es el CCE que puede ser calculado mediante la siguiente fórmula:

$$CCE = \frac{I}{\Delta E} \cdot \left[\frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \right]$$

Donde

- I corresponde al monto de la inversión realizada en [USD]
- ΔE corresponde a los ahorros energéticos anuales [MWh]
- r corresponde a la tasa de descuento, y se utilizará un valor de 10%
- n corresponde a la vida útil de la medida, y se utilizará un valor de n=10 para todas las alternativas de eficiencia, a excepción de los transformadores donde se utilizará n=25

De esta manera, el CCE es expresado en las mismas unidades que el precio de la energía, y una medida será económicamente efectiva cuando el precio de la energía sea mayor al CCE. En particular, las medidas con el menor CCE serán además las económicamente más atractivas. En la Tabla N° 22 se muestran los ahorros generados por las distintas alternativas analizadas en este documento, junto al cálculo del costo de la energía conservada (CCE).

Costo de Energía Conservada v/s Tipo de Equipos			
Tipo de Equipo	Ahorros Generados [MWh]	Ahorros Acumulados [MWh]	CCE [USD/MWh]
Iluminación	4.960	4.960	-175
Bombas	56.796	61.756	13
Ventiladores	905	62.662	21
Transformadores	5.554	68.216	35
Correas Transportadoras	5.497	73.713	40
Compresores	1.312	75.025	61
Agitadores	81	75.105	65
Celdas	1.778	76.883	86
Otros Motores	127	77.011	133

Tabla N° 22: “Costo de Energía Conservada v/s Tipo de Equipos”

6.2.2. Curva de Conservación de la Energía

La curva de conservación de la energía es una herramienta que permite mostrar el impacto acumulado de un conjunto de medida de eficiencia energética, de tal manera que sea sencillo distinguir cuál de ellas es más económicamente efectiva. Cabe señalar, que cada bloque del gráfico representa una alternativa distinta para conservar energía, en donde el ancho de éste mostrará el potencial de ahorro energético, y el alto indicará el costo asociado a esta medida.

La utilidad de esta curva radica en la facilidad con la que se ordenan las distintas alternativas de eficiencia energética, indicando claramente cuál de ellas debe ser realizada primero. El orden para la implementación de las medidas de eficiencia energética será comenzando por las alternativas de la izquierda, hacia la derecha.

En la Figura N° 93 se muestra la curva de conservación de la energía, a partir de las distintas alternativas analizadas en este documento. Además se remarca el precio monómico de la energía que presentará el proyecto Quellaveco (50 [USD/MWh]) como se indica en la sección 6.3.3.

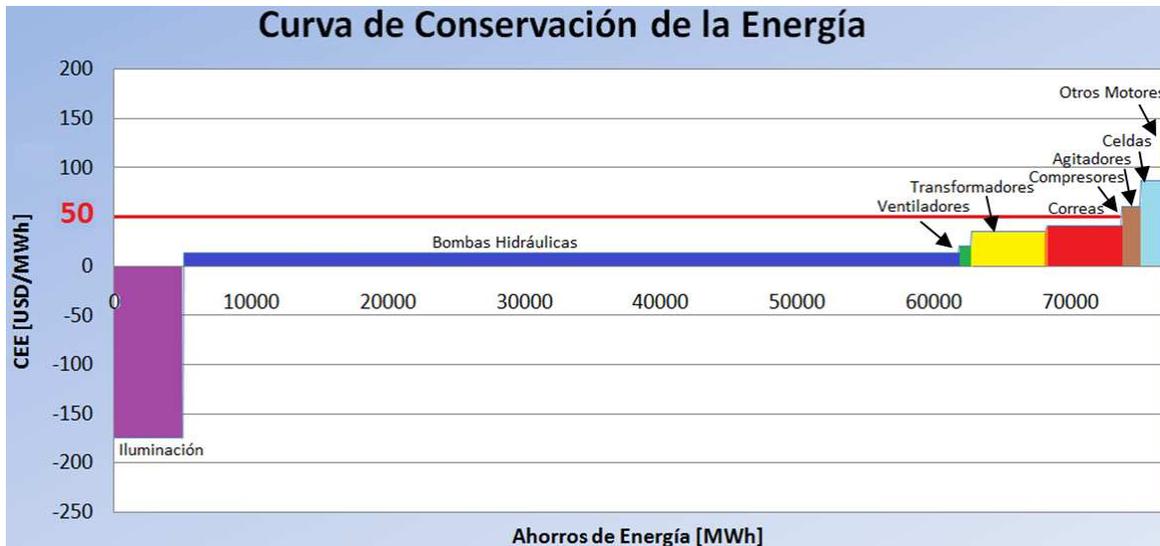


Figura N° 93: “Curva de Conservación de la Energía Eléctrica en Quellaveco”

A partir de la curva de conservación de la energía se puede apreciar que existe una gran cantidad de opciones que es factible realizar con el precio monómico de la energía que presentará Quellaveco. En particular, se observa que la primera medida a realizar para generar ahorros energéticos, es la introducción de iluminación eficiente, es decir, luminarias LED al interior de los edificios, y luminarias de inducción magnética al exterior de ellos. Esto ocurre, ya que como se mencionó en el capítulo anterior, las luminarias eficientes tienen la característica de poseer una alta vida útil, así como una mayor eficiencia lumínica, por lo que no sólo consumirán una menor cantidad de energía, con menores costos de operación asociados, sino que además tendrán un menor costo de inversión a lo largo del proyecto, ya que las luminarias no requerirán una gran cantidad de recambios a lo largo del tiempo.

Por otra parte, se observa que posterior a la iluminación eficiente es necesario invertir en mecanismos de ahorro energético en bombas hidráulicas y ventiladores. Esto ocurre, ya que estos equipos tienen un gran potencial de ahorro energético, el cual es aprovechable al utilizar variadores de frecuencia, lo que permitirá generar ahorros en torno a un 35%. Esto ocurre principalmente, a que estos equipos suelen trabajar bajo diferentes condiciones de carga durante su operación, lo que los hace propicios para utilizar equipos que permitan controlar su operación de manera variable, como son los VDFs.

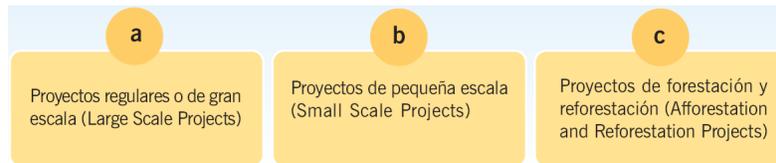
Para finalizar, se observa que también es conveniente la utilización de correas transportadoras y transformadores eficientes, ya que su costo de conservación de la energía sigue estando debajo de los 50 [USD/MWh]. Cabe señalar, que la curva anterior fue realizada a partir de los valores promedio descritos en la Tabla N° 22, ya que debido a la gran cantidad de equipos que actúan en Quellaveco, se hace muy complicado representarlos todos en sólo una figura.

6.3. Mecanismos de Desarrollo Limpio

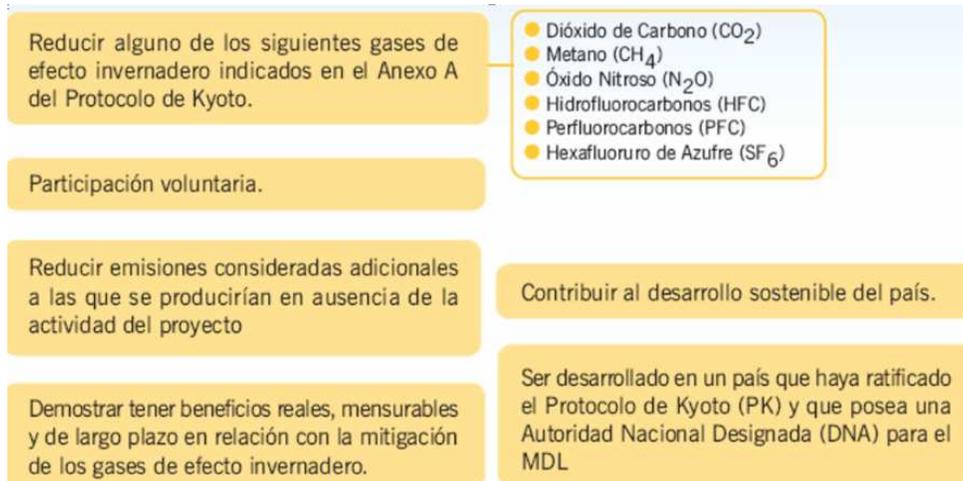
El Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) es un mecanismo establecido bajo el Protocolo de Kyoto, el cual tiene por objetivo ayudar a los países en desarrollo a alcanzar un desarrollo sostenible mediante la promoción de inversiones ambientalmente amigables por parte de gobiernos o empresas de los países industrializados.

La cantidad de dióxido de carbono equivalente o CO_{2eq} (CO_2 que significa un similar a cualquier otro gas invernadero) que es capaz de desplazar un proyecto, será proporcional al aporte que este recibirá bajo este mecanismo de desarrollo.

La United Nations Framework for the Climate Change Convention (UNFCCC) ha diferenciado los proyectos MDL, en tres grandes grupos:



Todo proyecto de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, que forme parte del MDL, debe cumplir con las siguientes condiciones:



Cabe destacar que dentro de los proyectos catalogados como a y b, se incluye la incorporación de proyectos de **uso eficiente de la energía**, por lo que las medidas expuestas en el presente trabajo pueden ser consideradas como proyectos MDL de **gran escala**, dado que los resultados expuestos en este capítulo indican un ahorro energético de 108 [GWh] anuales, lo que es muy superior a los 15 [GWh] necesarios para pertenecer a este grupo.

6.3.1. Mercado del Carbono

El Mercado del Carbono es un sistema de comercio a través del cual los gobiernos, empresas o individuos pueden vender o adquirir reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Para llevar a cabo lo anterior, uno de los métodos más usados es la comercialización de los denominados “**certificados de reducción de emisiones**”. Estos certificados se generan durante la fase de ejecución de un proyecto y constituyen derechos o créditos transables dentro del Mercado del Carbono. En este sentido el certificado de reducción de emisiones es la unidad con la que trabaja el MDL y corresponde a una tonelada métrica de CO₂ equivalente, tomando como referencia su Potencial de calentamiento global.

6.3.2. Disminución de Emisiones de CO₂

Debido a la implementación de las medidas de eficiencia energética expuestas en este proyecto será posible disminuir la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por la planta concentradora Quellaveco. Para estimar este efecto es necesario calcular el factor de emisión del mercado eléctrico peruano, que representa la cantidad de CO₂ que se genera por MWh de electricidad generada para la Red Eléctrica.

6.3.2.1. CÁLCULO FACTOR DE EMISIONES

El factor de emisión se calcula como un Margen Combinado (CM), que consiste en un promedio ponderado de dos factores, el Margen de Construcción (BM) y el Margen de Operación (OM).

$$CM = w_{BM} \cdot BM + w_{OM} \cdot OM$$

Donde:

BM = Margen de Construcción

OM = Margen Operativo

w_{BM} y w_{OM} = factores de potenciación. En general el valor a adoptar es 0,5.

6.3.2.2. CALCULO MARGEN DE CONSTRUCCIÓN (BM)

Se puede estimar BM a través de dos alternativas:

- Factor de Emisión promedio de las últimas 5 centrales incorporadas.
- Factor de Emisión promedio de las últimas centrales incorporadas correspondientes al 20% de la energía total generada en el año.

Se debe utilizar la alternativa que más energía incluya. Además, se debe excluir las centrales que ya han sido registradas ante la Junta Ejecutiva del MDL. De acuerdo a los cálculos realizados se ha utilizado la segunda alternativa dando como resultado:

Factor BM	0,4083	tCO ₂ /MWh
-----------	--------	-----------------------

6.3.2.3. CALCULO DEL MARGEN DE OPERACIÓN (OM)

Existen cuatro alternativas para el cálculo del margen de operación:

- *Promedio*. Promedio de todas las máquinas.
- *Simple*. Promedio de las máquinas térmicas.
- *Simple ajustado*. Variante del simple, en el caso en que máquinas de bajo costo estén en el margen en algunas horas.
- *Análisis de despacho*. Promedio de las máquinas que estén en el 10% más alto del orden de mérito del despacho. Requiere cálculo horario.

El método utilizado para este primer cálculo referencial del factor de emisión fue el **Análisis de Despacho**, que entrega el siguiente valor:

Factor OM	0,68571	tCO ₂ /MWh
-----------	---------	-----------------------

Finalmente el margen combinado será:

$$CM = 0,5 \cdot 0,4083 + 0,5 \cdot 0,68571$$

Factor CM	0,547	tCO ₂ /MWh
-----------	-------	-----------------------

Cabe señalar, que el valor anterior se utilizará solamente en los ahorros energéticos provenientes de la energía eléctrica indicados en este documento. Por otra parte, para calcular el ahorro en emisiones de CO₂ proveniente de la gestión de combustibles fósiles (Diesel y Gasolina) se utilizará el siguiente factor de emisión:

Tipo (Suponiendo Rendimiento 60%)	Factor Emisión [tCO ₂ /MWh]
Diesel	0,77859
Gasolina	0,72837

Tabla N° 23: “Factor de Emisión de Hidrocarburos”

Los ahorros de electricidad obtenidos para las medidas analizadas, multiplicados por el factor de emisión del sistema correspondiente permitirán estimar la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero. De acuerdo a los resultados expuestos en el capítulo anterior se tiene que las reducciones en emisiones de CO₂ anuales en función del precio de la energía serán:

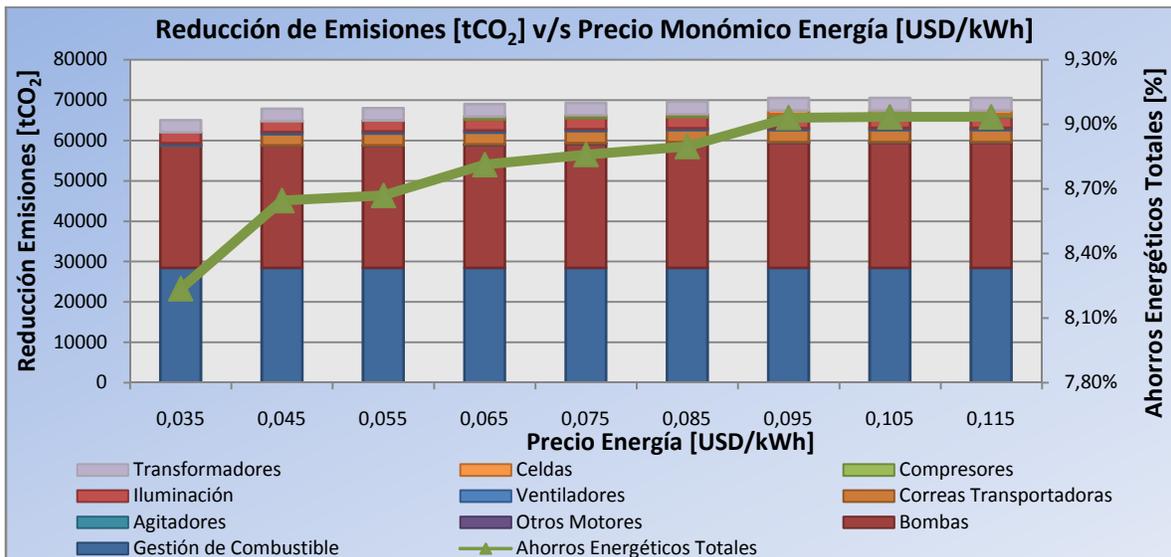


Figura N° 94: “Reducción de Emisiones [tCO₂] v/s Precio Monómico de la Energía [USD/kWh]”

Para calcular las ganancias que es posible obtener a partir de la transacción de bonos de carbono, se utilizará como referencia al proyecto Chacabuquito¹², cuyos resultados fueron:

Resultados Proyecto Chacabuquito	
Generación [GWh]	179
Reducción de CO ₂ [Ton]	112.607
Ingresos [USD]	394.000

Tabla N° 24: “Resultados Proyecto Chacabuquito”

¹² Proyecto pionero en Chile de uso de MDL. Primer proyecto de MDL a nivel de generación de electricidad en Chile. Mayor información puede ser obtenida al visitar http://www.sofofa.cl/BIBLIOTECA_Archivos/Eventos/2004/10/1_Guardia_Vieja.pdf

Si se consideran la misma valorización de las toneladas de CO₂, que es de 3,5 [USD] por [Ton] de CO₂ equivalente, se obtienen las siguientes utilidades anuales en función del precio de la energía:

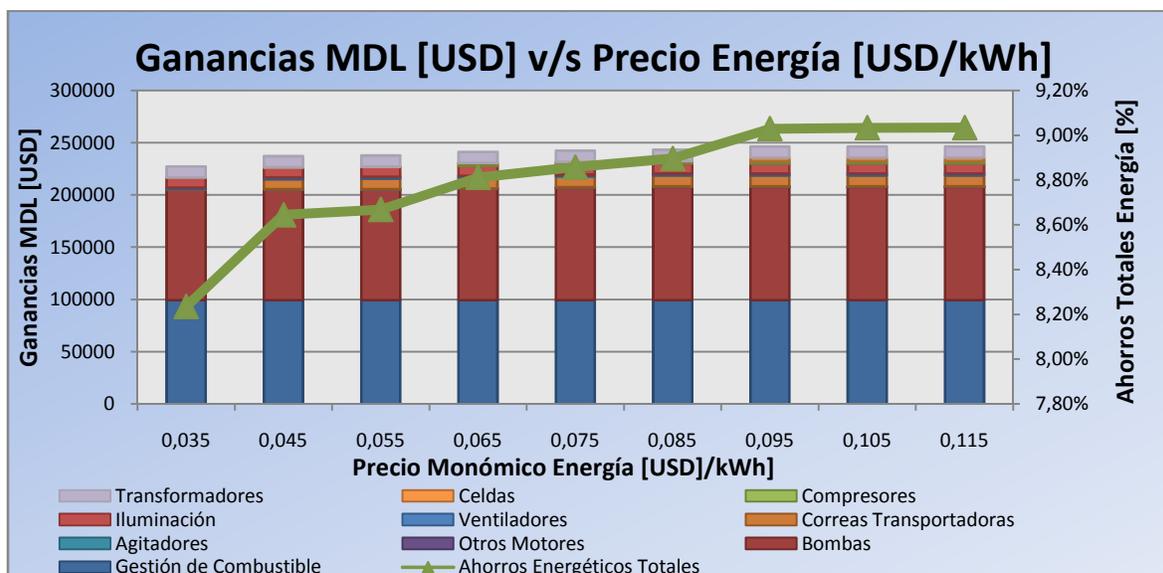


Figura N° 95: “Ganancias MDL [USD] v/s Precio Energía [USD/kWh]”

Al observar las figuras anteriores, se tiene que a medida que aumenta el precio de la energía, también aumentará la reducción en toneladas de CO₂ emitidas por Quellaveco, así como las ganancias debido a la venta de bonos de carbono. Esto ocurre, ya que el incremento en el precio de la energía, crea un incentivo en las empresas privadas en disminuir sus costos de operación, y en particular, en disminuir su consumo energético, por lo que aumentarán las inversiones en procesos más eficientes.

Por otra parte, se puede apreciar que inclusive con un precio monómico de la energía muy bajo, existen grandes incentivos para invertir en tecnologías más eficientes, como es el uso de variadores de frecuencia en bombas, la gestión del combustible, e iluminación y transformadores eficientes, obteniéndose así una reducción en emisiones de CO₂ que puede llegar hasta las 65.000 [tCO₂] con ganancias de 228.000 [USD] en ventas de bonos de carbono. Por el contrario, en el caso de tener un precio monómico de la energía muy alto (115 [USD/MWh]) los incentivos permitirían llegar a las 70.500 [tCO₂], lo que implicaría ganancias de 247.000 [USD] por venta de bonos.

6.3.3. Caso Perú

Dado que la planta concentradora Quellaveco será instalada en el sur de Perú, se hace necesario conocer la evolución que presentará el precio monómico de la energía en este país, ya que como fue mencionado anteriormente, este indicador incidirá directamente en los ahorros energéticos que es posible obtener manteniendo rentabilidades positivas (VAN >0)

CMgLP - Generación y Transmisión Troncal	46,6 US\$/MWh
CMgLP - Generación	44,3 US\$/MWh

ANO	Potencia US\$/kW-año	PCSPT US\$/kW-año	PCSGT US\$/kW-año	Energía US\$/MWh	Precio Medio US\$/MWh
2009	71,24	22,34	0,00	31,93	45,27
2010	71,24	21,80	0,00	34,15	47,41
2011	71,24	20,21	19,83	34,15	50,01
2012	71,24	18,77	18,42	34,15	49,60
2013	71,24	16,86	22,53	34,15	49,91
2014	71,24	15,25	20,38	34,15	49,38
2015	71,24	13,71	18,32	34,15	48,86
2016	71,24	12,72	17,01	34,15	48,54
2017	71,24	12,21	16,32	34,15	48,37

Notas: (1) Precio en Barra del 2009, de la Fijación de Tarifas en Barra del 2009, de OSINERGMIN

(2) Estimación Basada en Costo Marginal de Largo Plazo Escenario Medio sin Proyectos ERNC

(3) Cargo por Sistema Principal de Transmisión Constante, y Sistema Garantizado SGT con Proyectos de Transmisión Troncales del Plan de Transmisión

Tabla N° 25: “Proyección del Precio en Barra 2009 – 2017”¹³

A partir de la Tabla N° 25, se puede observar que el precio monómico de la energía será estable en los próximos años, manteniéndose en niveles inferiores a los 50 [USD/MWh] durante la próxima década. No obstante, para el análisis de los ahorros energéticos que presentará la planta concentrado Quellaveco se supondrá el peor caso posible para el precio monómico futuro, es decir, **50 [USD/MWh]**.

A continuación, se muestran los resultados sobre ahorros energéticos, inversiones adicionales, reducción de emisiones de CO₂ y ventas de bonos de carbono debido a la introducción de las políticas de uso eficiente de la energía en Quellaveco.

¹³Fuente: “Plan Referencial de Electricidad 2008-2017; Ministerio de Energía y Minas; Perú”

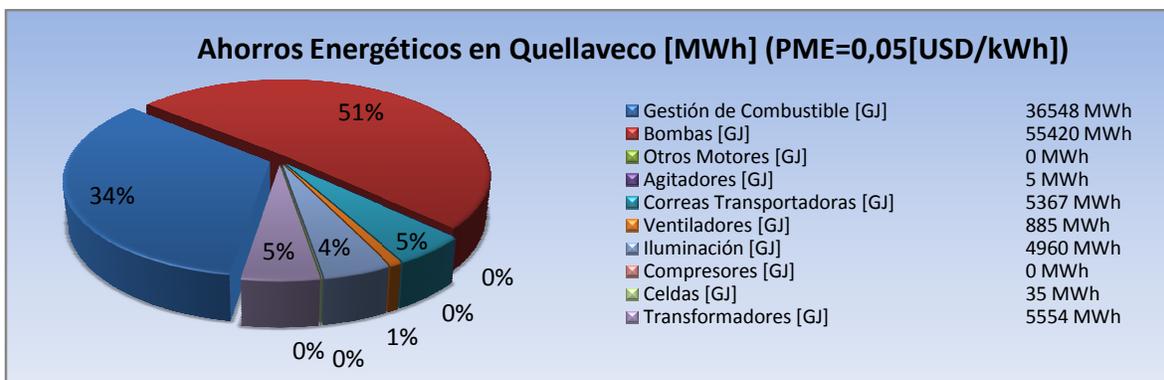


Figura N° 96: “Ahorros Energéticos en Quellaveco [MWh]”

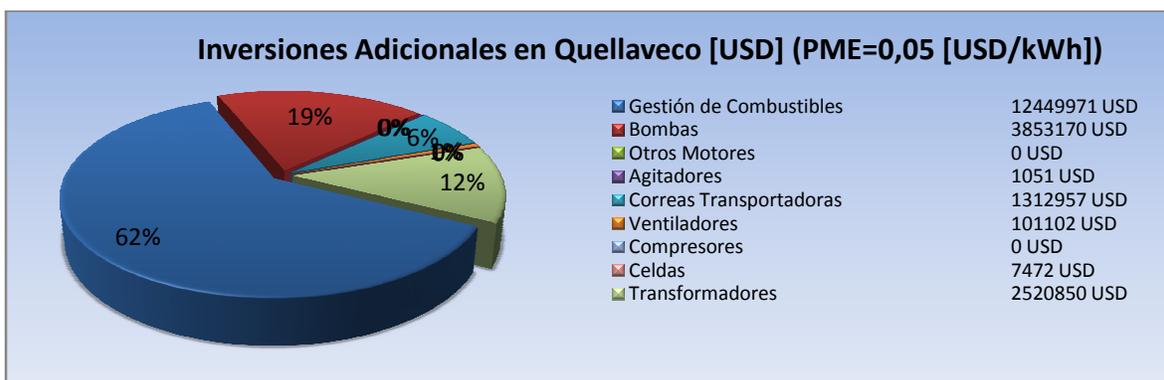


Figura N° 97: “Inversiones Adicionales requeridas por las medidas de UEE”

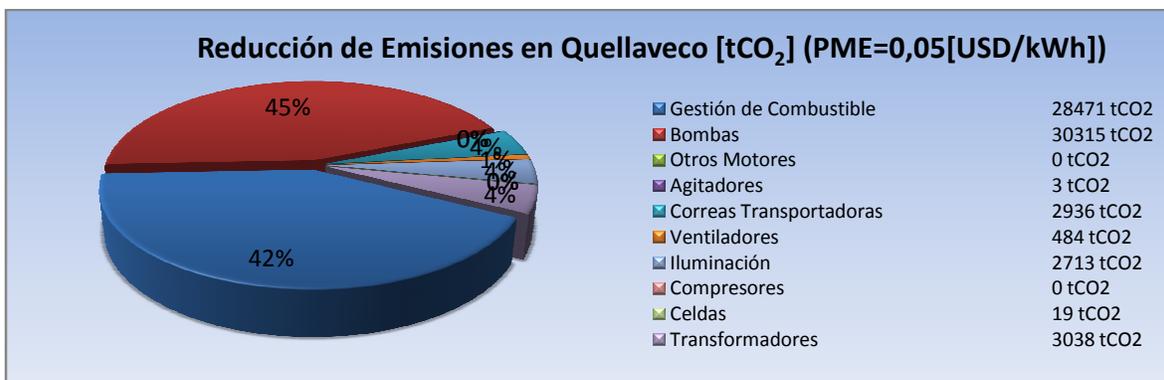


Figura N° 98: “Reducción de Emisiones de CO₂ en Quellaveco”

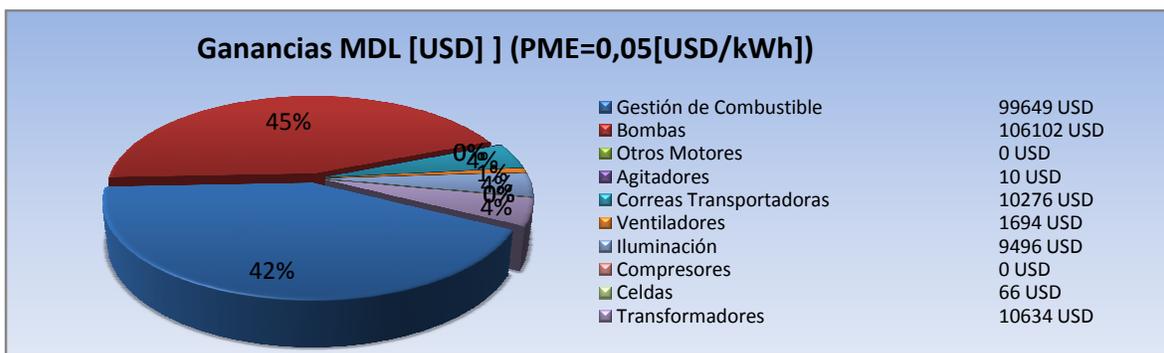


Figura N° 99: “Ganancias debido a la venta de bonos de Carbono”

A partir de los gráficos anteriores se pueden apreciar los enormes ahorros que generarán las alternativas de uso eficiente de la energía implementadas en Quellaveco, llegando a los 108,7 [GWh] de energía anuales, lo que corresponde a un 8,66% de la energía total consumida por la planta. Cabe señalar, que esto es equivalente a abastecer con energía eléctrica durante un año a **60.431 casas** con una demanda anual de 1800 [kWh]. Cabe señalar, que gran parte de estos ahorros se producen debido a la utilización de variadores de frecuencia en bombas hidráulicas (51%), así como las medidas de gestión de combustible en camiones de gran tonelaje (34%), analizadas en los capítulos anteriores. Se observa además, que existen equipos en donde no es factible la utilización de medidas de eficiencia energética, como es el caso de compresores y otros motores, en donde aun cuando existe un potencial de ahorro energético mediante la utilización de variadores de frecuencia y motores eficientes, el precio de la energía no permite una rentabilidad positiva para la utilización de estos equipos.

A partir de la Figura N° 97 se puede observar que las inversiones adicionales que requerirá el proyecto Quellaveco serán como máximo de 20.246.573 [USD], lo que correspondería a un 0,65% de la inversión total requerida por la planta. Cabe señalar, que la inversión total en mecanismos de eficiencia energética puede ser mucho menor al momento de implementar el proyecto, esto ocurre, ya que como fue mencionado en los capítulos anteriores, la inversión calculada para la gestión de combustible y de los transformadores eficientes corresponde a la inversión **máxima** que puede requerir el proyecto, ya que se calculo el punto de quiebre tal que la inversión permita tener un proyecto con rentabilidades positivas. Se puede concluir además, que en promedio se requerirán 2,3 [MMUSD] por cada 1% de energía global ahorrada, es decir, incluyendo todos los tipos de energía utilizados en Quellaveco.

Para finalizar, se observa que mediante la utilización de las medidas de UEE se generarán ahorros de hasta 68.000 toneladas de CO₂ anuales, las que se distribuirían principalmente en la gestión del combustible (42%) y en la utilización de VDFs en bombas hidráulicas (45%). Se puede observar, que aun cuando estas últimas generarán una mayor cantidad de ahorros energéticos, ambas alternativas poseen una disminución de toneladas de CO₂ emitido equivalente, esto ocurre, ya que el diesel es un elemento mucho más contaminante que la electricidad, y por lo tanto, la energía ahorrada en este tipo de combustibles incidirá de una manera mucho mayor en la reducción de emisiones de CO₂. Por otra parte, se observa que mediante la introducción de Quellaveco como un mecanismo de desarrollo limpio, se obtendrán ganancias de hasta 237.900 [USD] anuales, lo que es un gran incentivo para la utilización de las medidas de eficiencia mostradas en este documento.

6.4. Repercusión de las medidas de UEE en Quellaveco sobre el Sistema de Transmisión Peruano

La transmisión es el proceso mediante el cual la electricidad producida es transportada en alta tensión desde una central de generación a una subestación, donde es transformada a una tensión menor y entregada a la red de distribución o a un cliente libre.

La realización del proceso de transmisión se debe principalmente a los elementos conductores que son capaces de transportar la corriente eléctrica desde centrales de generación hasta el cliente final, no obstante este proceso no está libre de inconvenientes, ya que debido a su resistencia eléctrica, el cable disipa en forma de calor parte de la energía eléctrica transportada, y en particular, lo hace de manera proporcional al cuadrado de la corriente eléctrica.

A partir de lo anterior, se tiene que la implementación de las medidas de uso eficiente de la energía repercutirán positivamente en el sistema eléctrico peruano, ya que el ahorro de energía implicará una disminución en la generación eléctrica y consecuentemente una reducción de la corriente transportada por los conductores del sistema de transmisión. Además dado que las pérdidas del sistema son proporcionales al cuadrado de la corriente, se tiene que las medidas de Uso Eficiente de la Energía en la Planta Concentradora Quellaveco, ayudarán a reducir las pérdidas globales del sistema de transmisión peruano.

6.4.1. Evaluación de pérdidas en el Sistema de Transmisión

En esta sección se mostrará la forma en cómo se estimarán las reducciones de energía en el sistema de transmisión peruano (SEIN), a partir de las medidas de Uso Eficiente de la Energía establecidos en Quellaveco.

Cabe señalar, que para realizar esta actividad de manera formal sería necesario efectuar flujos de potencia del SEIN, con el objetivo de observar los flujos de corrientes por las líneas y luego ponderarlos por sus diferentes resistividades de acuerdo a la ecuación $r \cdot I^2$. No obstante, el trabajo mencionado anteriormente requiere información detallada del sistema eléctrico peruano, ya que sería necesario conocer todas las longitudes, resistividades y niveles de tensión de las líneas de transmisión peruanas, así como las características de las centrales generadoras y consumos eléctricos. Debido a que no se cuenta con tal información, se efectuará una simplificación que permitirá conocer de manera aproximada las pérdidas del sistema, así como los ahorros de energía que se producirán en el sistema de transmisión por la implementación de las medidas de eficiencia energética de Quellaveco.

En la Tabla N° 26 se muestran las pérdidas de energía del sistema de transmisión de Perú durante el año 2009.

2009	Producción [MWh]	Pérdidas Totales	
		[MWh]	%
Enero	2.516.697	55.625	2,21%
Febrero	2.317.114	47.410	2,05%
Marzo	2.551.704	51.949	2,04%
Abril	2.438.874	50.796	2,08%
Mayo	2.512.941	56.384	2,24%
Junio	2.369.257	53.039	2,24%
Julio	2.394.807	58.836	2,46%
Agosto	2.492.807	58.571	2,35%
Setiembre	2.476.241	55.477	2,24%
Octubre	2.541.603	58.301	2,29%
Noviembre	2.536.031	55.093	2,17%
Diciembre	2.659.174	65.626	2,47%
Total	29.807.250	667.107	2,24%

Tabla N° 26: “Pérdidas en el Sistema de Transmisión Peruano – 2009”

Se supondrá al sistema eléctrico peruano como una línea de transmisión de 220 [kV] con una resistencia equivalente r_{eq} , que disipará por efecto Joule una energía L, y que alimentará a Quellaveco con una demanda G, como se muestra en las figuras siguientes:

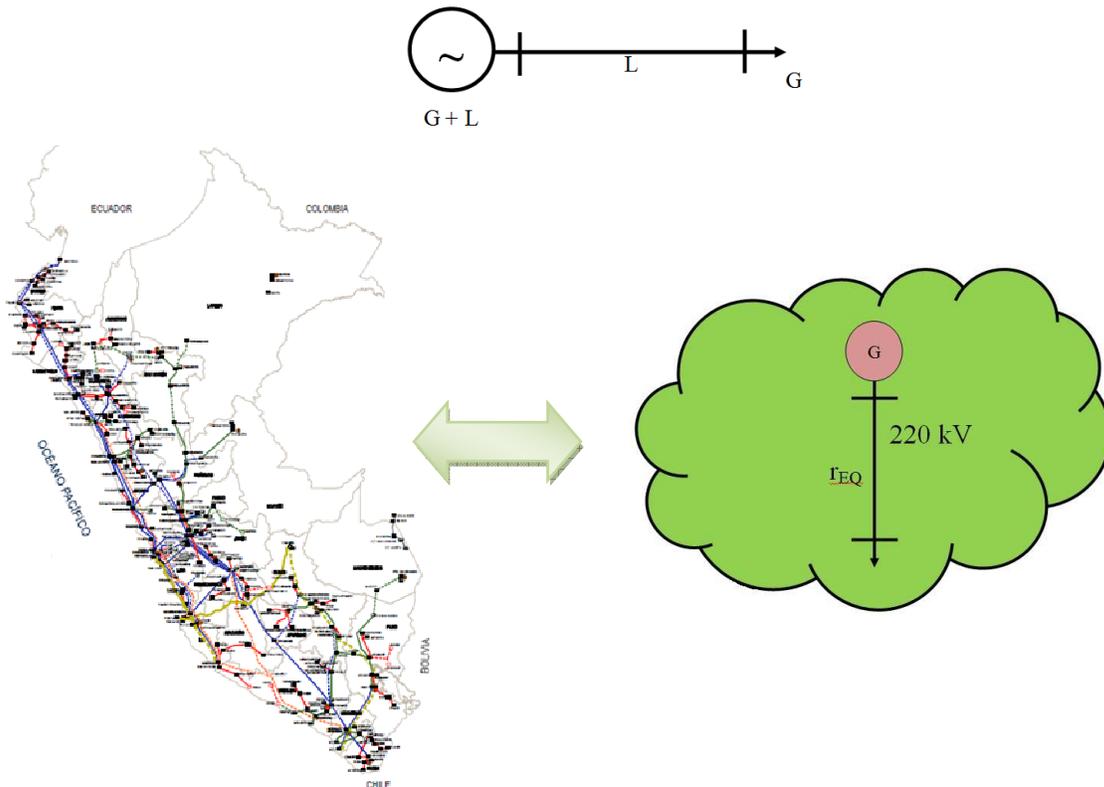


Figura N° 100: “Modelo utilizado para evaluar las pérdidas del Sistema de Transmisión de Perú”

Sea

G_i la energía producida mensualmente por el Sistema Eléctrico Peruano con $i = 1, \dots, 12$

L_i las pérdidas de energía mensuales del Sistema Eléctrico Peruano con $i = 1, \dots, 12$

Se tiene que la corriente promedio que consumirá el sistema de manera horaria, suponiendo las líneas con un nivel de tensión de 220[kV] y un factor de potencia de 0,95, será:

$$I_{L-Equivalente} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{12} G_i \right]}{\sqrt{3} \cdot 220[kV] \cdot 0,95} \cdot 8760$$

Además se tiene que la resistencia equivalente del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional será de:

$$r_{Equivalente} = \frac{\left[\sum_{i=1}^{12} L_i \right]}{3 \cdot \left(I_{L-Equivalente} \right)^2} = 0,2873[\Omega]$$

A partir del valor anterior, fueron calculadas nuevamente las pérdidas mensuales en el sistema, como una manera de conocer el Error Medio Cuadrático y conocer el grado de error que generará la aproximación realizada. A continuación se muestra una tabla comparativa de las pérdidas reales y de las estimadas, a partir del modelo explicado anteriormente:

Mes	Pérdidas	Pérdidas	Error
Enero	55.625	57.068	5,97%
Febrero	47.410	48.376	7,00%
Marzo	51.949	58.667	6,39%
Abril	50.796	53.593	6,53%
Mayo	56.384	56.898	5,88%
Junio	53.039	50.577	6,26%
Julio	58.836	51.674	5,64%
Agosto	58.571	55.990	5,67%
Setiembre	55.477	55.248	5,98%
Octubre	58.301	58.203	5,69%
Noviembre	55.093	57.948	6,02%
Diciembre	65.626	63.713	5,06%

Tabla N° 27: “Pérdidas Mensuales del Sistema de Transmisión de Perú durante el año 2009”

Se puede observar que el error generado por el modelo utilizado es menor al 7% en todos los meses del año, por lo que el modelo a utilizar entregará buenos resultados en un intervalo cercano a los valores mostrados anteriormente.

Para calcular los ahorros generados por las medidas de eficiencia energética es necesario calcular las pérdidas en el sistema de transmisión en dos casos: el primero será considerando la instalación de Quellaveco como una planta concentradora estándar y el segundo considerará a la planta con la utilización de las medidas de eficiencia energética expuestas en este documento, para de esta manera comparar las pérdidas en el sistema de transmisión como se muestra en la Tabla N° 28.

Precio Monómico Energía [USD/kWh]	Caso Estándar	Caso Eficiente								
		0,035	0,045	0,055	0,065	0,075	0,085	0,095	0,105	0,115
Energía Consumida Quellaveco NO Eficiente [MWh]	795.941									
Energía Consumida Quellaveco Eficiente [MWh]		729.084	723.948	723.653	721.852	721.267	720.792	719.117	719.070	719.063
Energía Consumida por SIEN [GWh]	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807	29.807
Energía Total Consumida [GWh]	30.603	30.536	30.531	30.531	30.529	30.529	30.528	30.526	30.526	30.526
Potencia Consumida [MW]	3.494	3.486	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485	3.485
IL [A]	9.651	9.630	9.628	9.628	9.627	9.627	9.627	9.626	9.626	9.626
Perdidas Energía [MWh]	703.210	700.141	699.905	699.892	699.809	699.783	699.761	699.684	699.682	699.681
Ahorros Energéticos en el SIEN [MWh]		3.069	3.304	3.318	3.400	3.427	3.449	3.526	3.528	3.528

Tabla N° 28: “Ahorros de Energía producidos en el Sistema de Transmisión Peruano”

Al observar la tabla anterior, se puede apreciar que las medidas de UEE en la planta Quellaveco generarán un ahorro de energía en el sistema de transmisión peruano que irá entre los 3.000 y 3.500 [MWh] dependiendo de la evolución del precio monómico de la energía, y por lo tanto de la cantidad de medidas de UEE a implementar en Quellaveco. Cabe señalar, que la energía ahorrada debido a estas medidas equivaldría a entregar energía eléctrica en aproximadamente **1.667 a 1.945 casas**, y esto es sólo una consecuencia **gratuita** de las medidas implementadas en Quellaveco.

7. Conclusiones

El presente trabajo de título tuvo como objetivo principal desarrollar una guía de cómo diseñar, operar y mantener de manera eficiente una planta concentradora de cobre, realizando para ello evaluaciones técnicas y económicas para la incorporación de las medidas de uso eficiente de la energía. En ese sentido, se concluye que se ha desarrollado un trabajo exitoso, ya que se han analizado diferentes métodos que permitirán aumentar la eficiencia en diversos equipos y procesos de una planta minera, y en particular, se han observado los potenciales ahorros de energía, así como las inversiones adicionales que requerirá la integración de estas medidas. Por otra parte, fue evaluada la disminución en emisiones de CO₂ que permitirá el uso eficiente de la energía, así como los beneficios que se obtendrían al ingresar el proyecto como un mecanismo de desarrollo limpio (MDL). Cabe señalar, que para ello no sólo se analizaron los equipos eléctricos, sino que además fueron considerados otros procesos con altos potenciales de ahorro energético, como es el caso de la gestión de combustible en camiones de gran tonelaje.

Como base a este estudio se utilizó la planta concentradora Quellaveco, de la empresa minera Anglo American Quellaveco S.A, que conociendo las ventajas que posee la industria minera para el uso de alternativas de eficiencia energética, pretende desarrollar una planta con altos índices de eficiencia energética, aprovechando potenciales ahorros de energía, así como el uso de energías renovables no convencionales y procesos de cogeneración. No obstante lo anterior, los resultados derivados de este informe pueden ser aplicados en cualquier planta minera, e incluso pueden ser replicados en otros sectores industriales.

La metodología desarrollada contempló inicialmente llevar a cabo una caracterización completa de los diferentes procesos y equipos que interactuarán en Quellaveco, con el objetivo de seleccionar aquellos que presenten una mayor potencialidad de ahorro energético. Particularmente, fueron observados los diferentes niveles de tensión que presentará la división, así como la demanda energética de los diversos equipos y procesos que interactuarán en la planta. Además se realizó una caracterización de los equipos en función de su potencial nominal, del número de equipos a utilizar, del factor de carga, del número de horas de utilización anual, y del proceso en el cual estará involucrado. A partir de lo anterior, fue posible observar las siguientes características en los consumos de Quellaveco:

- Fueron observados 4 niveles de tensión de 400[V]; 4,16[kV]; 7,2[kV] y 23 [kV]. Por una parte, se encuentran los equipos conectados directamente a la barra de alta tensión 23[kV], como son el Molino SAG y los dos Molinos de Bolas, que a través de sus transformadores y cicloconvertidores permiten alimentar estos grandes equipos de manera permanente. A su vez, se encuentran los equipos de media tensión como son: palas eléctricas; perforadoras; bombas; correas alimentadoras y transportadoras; celdas y chancadores que se conectan a los niveles de tensión de 4,16 [kV] y 7,2 [kV] de forma directa. Para finalizar, se encuentra el sistema de baja

tensión, en el cual se conectan los centros de control de motores de las diferentes etapas del proceso de concentrado del cobre y que permitirán alimentar todos los motores de baja tensión que trabajarán en la línea de producción.

- Al observar la distribución de la energía por procesos, es posible apreciar que sobre el 79% de la energía global de la planta es utilizada en la Mina y en los procesos de Molienda, esto se debe principalmente a que los mayores consumos de electricidad y diesel se encuentran en estos sectores. En particular, en la zona de Molienda se consume el 61% de la energía eléctrica, debido principalmente a que es en este sector en donde se encuentran los grandes molinos (un molino SAG y dos molinos de Bolas) que permitirán reducir el tamaño del mineral hasta llevarlo a partículas de un tamaño menor a los 180 micrones y, por lo tanto, es en este proceso en donde se consume la mayor cantidad de energía eléctrica. Por otra parte, el 99% de la energía proveniente del diesel es utilizado en la mina, de los cuales el 84% es utilizado solamente en el transporte y carguío del mineral, mediante la utilización de camiones de gran tonelaje. De esta manera, las mayores fuentes de consumo energético provendrán de la electricidad y el diesel, por lo tanto, estos dos suministros serán los ejes principales en los cuales se basará la búsqueda de ahorros energéticos.
- Al observar la distribución de la energía por equipos, es posible apreciar que el 51,8% de la energía eléctrica consumida en la planta es utilizada para abastecer los molinos SAG, Bolas y de Remolienda. Lamentablemente dadas las características “fijas” de estos equipos es complejo tratar de modelar su operación para que trabajen de manera eficiente, y por lo tanto, es necesario centrar los esfuerzos en búsqueda de ahorros energéticos en el resto de los equipos de la planta. Cabe señalar, que AAQSA está diseñando estos equipos con altos estándares de eficiencia, aun cuando no fueron considerados en este informe.
- Al observar la distribución de la potencia de los equipos instalados en Quellaveco, se puede apreciar que la mitad de ellos se encontrará en un rango de potencia entre 0[kW] y 30[kW], no obstante, su potencia instalada total corresponderá a menos de un 2% de la potencia total demandada por la planta. Por el contrario, en la división existirán sólo 23 equipos con una potencia mayor a los 3[MW], no obstante, ellos demandarán el 49% de la potencia total instalada en la planta.
- Al observar la distribución de la potencia instalada en función del número de horas de utilización anual, es posible apreciar que el 78% de la potencia total instalada en la planta, tendrá una operación anual superior a las 7.884 [hora], lo que corresponde a más de un 90% del tiempo de operación. Esto permite comprobar el alto porcentaje de utilización al que están sometidos los equipos de Quellaveco, y por lo tanto, es importante desarrollar mecanismos de ahorro energético en ellos.
- Finalmente, al observar la distribución de la potencia instalada en función del factor de carga de los equipos, se pudo apreciar que el 36% de la potencia instalada se encuentra entre los 0,5 y 0,6 [0/1], observándose claramente un problema de sobredimensionamiento en los equipos, y que afectará directamente a la eficiencia de los diferentes procesos de la planta. No obstante, los factores de carga señalados irán mejorando en el tiempo, a medida que crece la producción de la planta.

A partir de esta caracterización fue posible observar aquellos equipos y procesos con un alto potencial de ahorro energético, los cuáles fueron explicados en detalle en el capítulo número cinco. A continuación, se muestran algunas de las medidas de uso eficiente de la energía que fueron estudiadas en este informe, y que luego fueron aplicadas a la modelación de la planta concentradora Quellaveco:

- Utilización de motores eficiente y de alta eficiencia.
- Utilización de variadores de frecuencia en compresores, ventiladores, correas transportadoras y bombas hidráulicas.
- Utilización de transformadores eficientes.
- Utilización de iluminación eficiente, ya sea tecnología LED o inducción magnética.
- Gestión del combustible utilizado por camiones de gran tonelaje.
- Repercusión de las medidas de uso eficiente de la energía sobre el sistema de transmisión peruano.

Cabe señalar, que en cada alternativa de ahorro energético fue importante definir el nivel base con respecto a la cual se estaba comparando la alternativa de eficiencia, ya que esto permitirá extrapolar las recomendaciones aplicadas en este documento a otras divisiones de la empresa. No obstante, cabe destacar que el caso base supuesto en la mayoría de las alternativas de eficiencia, **no** consideraba ninguna fuente de ahorro energético, lo que es contrario a lo que ocurre en las plantas mineras actuales, donde las empresas tratan de mejorar su operación mediante el uso localizado de equipos eficientes, como es el caso de los variadores de frecuencia, o motores de alta eficiencia. Esto implicará que al extrapolar los resultados observados en este informe, en general, los ahorros energéticos a obtener serán menores a los descritos, ya que las plantas mineras actuales, ya cuentan con un cierto grado de eficiencia. No obstante lo anterior, esto dependerá de la antigüedad y tecnología de los equipos que posea la planta industrial a evaluar.

Evaluando las alternativas de uso eficiente de la energía en la planta concentradora Quellaveco, y suponiendo un horizonte de proyección de 10 a 25 años para los diferentes equipos de la planta, junto con una tasa de descuento de 10%, se pudieron obtener los siguientes resultados globales:

- Se pudo apreciar que a medida que aumenta el precio monómico de la energía en el mercado eléctrico, también se incrementarán los mecanismos de eficiencia energética a utilizar en la planta concentradora Quellaveco. Esto ocurre principalmente, a que un aumento en el precio de la energía incidirá directamente en un incremento en los costos de operación de la mayoría de los equipos, lo que incentivará la utilización de productos que permitan generar ahorros de energía, como las alternativas de eficiencia desarrolladas en este informe.
- Al analizar los ahorros de energía globales (diesel y electricidad) en función del precio monómico, se pudo observar que con un alto precio de la energía (115[USD/MWh]) es posible alcanzar un ahorro del 9,03% del consumo total de la planta, lo que correspondería a sobre 408 [TJ] anuales de energía. Por otra parte, se

observa la existencia de una gran cantidad de alternativas de eficiencia que permitirán generar ahorros energéticos aun si el precio monómico de la energía es bajo (35 [USD/MWh]), como ocurre en el caso de luminarias, bombas hidráulicas, gestión de combustibles, entre otros, que no necesitan un alto precio de la energía para generar rentabilidades positivas con el ahorro energético.

- Se aprecia además, que las inversiones adicionales que necesitarán las medidas establecidas en este documento variarán entre los 18,1 y los 25,6 [MMUSD], dependiendo del precio monómico de la energía. En particular, el proyecto Quellaveco requerirá una inversión total aproximada de 3.070 millones de dólares, por lo que la implementación de las medidas de uso eficiente de la energía corresponderán a entre un 0,58% a 0,82% del total de la inversión.
- Suponiendo que una casa consume anualmente 1.800 [kWh] de energía eléctrica, los ahorros generados por el proyecto Quellaveco serán equivalentes a abastecer con energía entre 57.400 y 63.000 casas.
- Dado que Quellaveco es un proyecto que integrará el uso eficiente de la energía, éste puede ser incorporado como un mecanismo de desarrollo limpio de “gran escala”, dado que anualmente generará ahorros de hasta 108 [GWh] anuales. Esto a su vez, le permitirá la transacción de bonos de carbono en el mercado, lo que le generará ingresos debido a las reducciones en emisiones de CO₂ que produciría.
- Entre los resultados obtenidos, se pudo observar que para un bajo precio monómico de la energía (0,035[USD/kWh]) se podrán obtener ahorros de hasta 65.000 toneladas de CO₂ anuales, lo que implicaría ingresos de 228.000 [USD] por ventas de bonos de carbono. Por el contrario, en el caso de tener un precio monómico de la energía muy alto (115 [USD/MWh]) los incentivos permitirían llegar a las 70.500 toneladas de CO₂ anuales, lo que generaría ganancias de hasta 247.000 [USD].

Cabe señalar, que los resultados anteriores permitieron conocer los ahorros que generaría Quellaveco en función de diferentes precios monómicos de la energía. No obstante, según las proyecciones del Ministerio de Minería de Perú, el precio monómico de la energía se aproximará a los **50 [USD/MWh]** en los próximos años, por lo que es necesario conocer cómo serán los ahorros energéticos, así como las inversiones en torno a este valor. A continuación, se muestra un resumen de los resultados que presentaría Quellaveco al realizar todas las medidas de eficiencia recomendadas en este informe:

- Se produciría un ahorro energético de 108,7 [GWh], lo que corresponde a un 8,66% del consumo total anual de energía en la planta.
- Esto es equivalente a abastecer con energía eléctrica durante un año a 60.431 casas con una demanda anual de 1.800 [kWh].
- La inversión máxima que requeriría Quellaveco es de 20.246.573 [USD], lo que correspondería a un 0,65% de la inversión total requerida por la planta.
- Esto implica que en promedio se requerirán 2,3 [MMUSD] por cada 1% de energía global ahorrada.

- Se reducirán las emisiones de CO₂ por 68.000 toneladas anuales.
- Mediante la introducción de Quellaveco como un mecanismo de desarrollo limpio, se obtendrán ganancias de hasta 237.900 [USD] anuales.

Cabe destacar, que gran parte de los ahorros producidos en Quellaveco se deben principalmente a la utilización de variadores de frecuencia en bombas hidráulicas (51%), así como las medidas de gestión de combustible en camiones de gran tonelaje (34%). Se observa además, que existen equipos en donde **no** es factible la utilización de las medidas de eficiencia energética, como es el caso de compresores y “otros motores”, en donde aun cuando existe un potencial de ahorro energético mediante la utilización de variadores de frecuencia y motores eficientes, el precio de la energía no permite una rentabilidad positiva para la utilización de estos equipos.

Otro tema analizado en este informe, fue la repercusión positiva que tendrán las medidas de eficiencia energética aplicadas en Quellaveco, sobre el sistema de transmisión peruano. Esta externalidad positiva se debe a que un ahorro energético de gran envergadura, como es el caso de Quellaveco, disminuirá la generación eléctrica requerida por el sistema y, consecuentemente, se producirá una reducción de la corriente transportada por los conductores del sistema de transmisión, lo que ayudará a reducir las pérdidas globales del sistema de transmisión. En particular, estos ahorros llegarían a los 3.318[MWh], que se producirían como una consecuencia gratuita de las medidas implementadas en Quellaveco.

Para finalizar, se pudo observar la curva de conservación de la energía de la planta, la cual indica que la primera medida a realizar para generar ahorros energéticos en Quellaveco, debe ser la introducción de iluminación eficiente, es decir, luminarias LED al interior de los edificios, y luminarias de inducción magnética al exterior de ellos. La segunda alternativa a realizar debe ser la introducción de variadores de frecuencia en bombas hidráulicas y ventiladores. Y por último, también es conveniente la utilización de correas transportadoras y transformadores eficientes, ya que su costo de conservación de la energía sigue estando debajo de los 50 [USD/MWh].

7.1. Trabajo Futuro

El trabajo futuro que conlleva esta memoria corresponde a la investigación sobre potenciales fuentes de generación de energía eléctrica, a través del uso de energías renovables no convencionales, así como la cogeneración. En particular, Quellaveco tiene la particularidad de estar localizada en el sur de Perú, donde existe una alta radiación solar, por lo que es necesario analizar si es factible la creación de una planta solar para producir energía. Por otra parte, se puede recuperar parte de la energía utilizada en los sistemas de impulsión de Titire y Vizcacha, aprovechando las caídas de agua mediante turbinas hidráulicas, para de esta manera generar energía (aprox. 2,4 MW). A su vez, es necesario analizar el uso de correas regenerativas como una forma de producción de energía.

8. Bibliografía

Capítulo 2: Antecedentes

1. “The Role of New and Renewable Electricity Generation Technologies in APEC Region: Present and Future Perspectives”; L. S. Vargas; 2005
2. “IEEE Recommended Practice for Energy Management in Industrial and Commercial Facilities”; IEEE Std 739-1995
3. “Ley de Promoción del uso eficiente de la Energía – Ley 27345”; OSINERGMIN; 2000
4. “Reporte de Desarrollo Sustentable y Estados Financieros 2008”; Anglo American Chile; 2008

Capítulo 3: Caracterización del Proceso Productivo en la División Quellaveco

5. Planos de Ingeniería Básica - Proyecto Quellaveco; Fluor; 2007

Capítulo 5: Desarrollo

5.1 Motores Eléctricos

6. “Métodos para orientar la adquisición de motores eléctricos en la industria y la minería”; Alfredo Muñoz Ramos.
7. “Sistema de evaluación técnico – económica de medidas de uso eficiente de la energía eléctrica en el parque de motores de una planta concentradora de cobre”; Ricardo Ramos Cid; 2007
8. “Proyecto: “Caracterización del parque actual de motores eléctricos en Chile”; PRIEN; Universidad de Chile; 2007
9. “Catálogos de Motores de diversas empresas”
10. “Norma Internacional IEC 60034-30”; IEC
11. “Energy Tips – Motor Systems”; US Department of Energy
12. “Informe de Reemplazo de Motores – Políticas de Eficiencia Energética”; Claudio Cortés – Alfredo Bernal; Anglo American Chile; 2009

13. "Improving Motor and Drive System Performance" ; US Department of Energy

14. "Motores Eléctricos de Alta Eficiencia"; Luis Mantilla – Enrique Quispe

5.2 Bombas Hidráulicas

15. "Energy Tips – Pumping Systems"; US Department of Energy – Hydraulic Institute

16. "Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems" "; US Department of Energy – Hydraulic Institute

17. "Improving Pumping System Performance" "; US Department of Energy – Hydraulic Institute

18. "Improving the Penetration of Energy- Efficient Motors and Drives"; University of Coimbra

5.3 Ventiladores

19. "Improving Fan System Performance"; US Department of Energy

20. "Increasing efficiency of the conventional auxiliary systems of power plants (Reduction of Life Cycle Cost by operational excellence)"; Thomas Schmager; ABB

5.4 Compresores

21. "Improving Compressed Air System Performance"; US Department of Energy

22. "Energy Tips – Compressed Air"; US Department of Energy

23. "Compressed air Ultrasonic leak detection guide"; UE Systems

5.5 Correas Transportadoras

24. "Aplicaciones de Variadores de Frecuencia en Correas de Gran Tonelaje"; Jorge Jara Monje; 2002

25. "Apunte sobre Máquinas y Equipos Mineros, apoyo Curso MI540"; René Le-Fraux Cortés

26. "Belt Book – Fifth Edition"; CEMA

5.7 Transformadores

27. "Energy Efficient Transformer Selection Implementing Life Cycle Costs and Environmental Externalities"; Eleftherios I. Amoiralis - Marina Tsili; 2009

28. “Eficiencia Energética en Transformadores de Distribución”; ProCobre – Instituto Brasileño del Cobre; 2009
29. “The scope for energy saving in the EU through the use of energy-efficient electricity distribution transformers”; European Commission; 1999
30. “Chapter 3: Market and Technology Assessment” ”; US Department of Energy

5.8 Iluminación

31. “Making permanent savings through Active Energy Efficiency”; Schneider Electric; 2008
32. “Energy Management Handbook – Seventh Edition”; Steve Doty – Wayne C. Turner;
33. “Implementando Planes Efectivos de Eficiencia Energética”; Olade; 2009
34. “Elementos de Luminotecnia”; Apunte del Curso Aplicaciones Industriales de la Energía Eléctrica; Ernesto Bianchi

5.9 Gestión del Combustible

35. “Guía para la gestión del combustible”; Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; España

Capítulo 6: Resultados

36. “Balance nacional de Energía 2007”; Ministerio de Energía y Minas; Peru
37. “Estadísticas de Operaciones 2009”; COES SINAC; Ministerio de Energía y Minas; Peru
38. “Plan referencial de electricidad 2008 – 2017”; Ministerio de Energía y Minas; Perú
39. “Modelo del cálculo del factor de emisiones de CO2 de la red eléctrica peruana”; Fondo Nacional del Ambiente; Perú; 2007
40. “Plan de energías Renovables en España 2005 – 2010”; Ministerio de Industria, Turismo y Comercio; España
41. “American Council for an Energy-Efficient Economy. (1986). Residential Conservation Power Plant Study. Washington, DC: ACEEE.

9. ANEXOS

9.1. Valores de Eficiencia en Motores según Norma IEC 60034-30

P _N kW	Number of poles		
	2	4	6
0,75	72,1	72,1	70,0
1,1	75,0	75,0	72,9
1,5	77,2	77,2	75,2
2,2	79,7	79,7	77,7
3	81,5	81,5	79,7
4	83,1	83,1	81,4
5,5	84,7	84,7	83,1
7,5	86,0	86,0	84,7
11	87,6	87,6	86,4
15	88,7	88,7	87,7
18,5	89,3	89,3	88,6
22	89,9	89,9	89,2
30	90,7	90,7	90,2
37	91,2	91,2	90,8
45	91,7	91,7	91,4
55	92,1	92,1	91,9
75	92,7	92,7	92,6
90	93,0	93,0	92,9
110	93,3	93,3	93,3
132	93,5	93,5	93,5
160	93,8	93,8	93,8
200 up to 375	94,0	94,0	94,0

Figura N° 101: “Límites Nominales (%) para Eficiencia Estándar (IE1), 50 [Hz]”

P _N kW	Number of poles		
	2	4	6
0,75	77,4	79,6	75,9
1,1	79,6	81,4	78,1
1,5	81,3	82,8	79,8
2,2	83,2	84,3	81,8
3	84,6	85,5	83,3
4	85,8	86,6	84,6
5,5	87,0	87,7	86,0
7,5	88,1	88,7	87,2
11	89,4	89,8	88,7
15	90,3	90,6	89,7
18,5	90,9	91,2	90,4
22	91,3	91,6	90,9
30	92,0	92,3	91,7
37	92,5	92,7	92,2
45	92,9	93,1	92,7
55	93,2	93,5	93,1
75	93,8	94,0	93,7
90	94,1	94,2	94,0
110	94,3	94,5	94,3
132	94,6	94,7	94,6
160	94,8	94,9	94,8
200 up to 375	95,0	95,1	95,0

Figura N° 102: “Límites Nominales (%) para Alta Eficiencia (IE2), 50 [Hz]”

P _N kW	Number of poles		
	2	4	6
0,75	80,7	82,5	78,9
1,1	82,7	84,1	81,0
1,5	84,2	85,3	82,5
2,2	85,9	86,7	84,3
3	87,1	87,7	85,6
4	88,1	88,6	86,8
5,5	89,2	89,6	88,0
7,5	90,1	90,4	89,1
11	91,2	91,4	90,3
15	91,9	92,1	91,2
18,5	92,4	92,6	91,7
22	92,7	93,0	92,2
30	93,3	93,6	92,9
37	93,7	93,9	93,3
45	94,0	94,2	93,7
55	94,3	94,6	94,1
75	94,7	95,0	94,6
90	95,0	95,2	94,9
110	95,2	95,4	95,1
132	95,4	95,6	95,4
160	95,6	95,8	95,6
200 up to 375	95,8	96,0	95,8

Figura N° 103: “Límites Nominales (%) para Eficiencia Premium (IE3), 50 [Hz]”

9.2. Consideración general para la evaluación de rendimientos en Motores Eléctricos.

A continuación, se muestra como cambia el rendimiento de un motor debido a modificaciones ambientales o de operación sufridas.

$$\eta_1 = K_v \cdot K_d \cdot K_c \cdot K_t \cdot K_r \cdot \eta_0$$

Siendo:

- η_1 = Rendimiento del motor corregido.
- η_0 = Rendimiento del motor a plena carga.
- K_v = Factor de corrección por operación con voltaje diferente al nominal.
- K_d = Corrección por desbalance de voltaje y corriente.
- K_c = Corrección por operación con carga diferente a la nominal.
- K_t = Corrección por diferencia de temperatura.
- K_r = Factor de corrección por reparaciones (rebobinados) en la vida del motor.

9.2.1. Factor de corrección por operación con voltaje diferente al nominal (K_v):

Este factor considera el efecto sobre el rendimiento cuando se trabaja con voltaje diferente al nominal. Cabe indicar que la situación considerada es aquella que, debido a una mala regulación del voltaje de la instalación, el motor queda operando con voltaje aplicado usualmente inferior al nominal. Su rango de validez es para tensiones menores a 110% de la tensión nominal (es decir, no considera la saturación de la máquina). Su efecto se centra en cuantificar como varían las pérdidas Joule (estator y rotor), en el hierro y mecánicas (estas últimas se pueden considerar constantes). El factor de corrección para un motor es:

$$K_v = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) * \left(1 + 0,6 * \left[\left(\frac{V_n}{V_a} \right)^2 - 1 \right] - 0.2 * \left[1 - \left(\frac{V_a}{V_n} \right)^2 \right] \right)}$$

Con:

η_o = Eficiencia nominal motor estándar

V_n = Voltaje nominal (de placa).

V_a = Voltaje con que se alimenta el motor en la realidad (promedio de las tres fases).

9.2.2. Corrección por desbalance de voltaje y corriente (K_d).

Cuando los enrollados (bobinados) de un motor quedan sometidos a voltajes de diferentes magnitudes, se alteran los flujos magnéticos y las pérdidas en el núcleo con respecto a las condiciones nominales. Igualmente, el desequilibrio de voltajes provoca un desequilibrio en las corrientes por los enrollados, modificando las pérdidas Joule (pérdidas resistivas en el cobre) respecto de las condiciones nominales. El factor de corrección para el motor estándar es:

$$K_d = \frac{1}{\eta_o + (1 - \eta_o) * \left(0,6 * \left[1 + \frac{2}{3} * (fdes_I)^2 \right] + 0.3 * \left[1 + \frac{2}{3} * (fdes_V)^2 \right] + 0,1 \right)}$$

Con:

η_o = Eficiencia nominal motor estándar

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente.

$fdes_I$ = Factor de desbalance de corrientes.

$$fdes_I = \frac{|I_{abc}|}{I_p}$$

Con $|I_{abc}|$ que es el mayor valor absoluto de $(I_p - I_a)$, $(I_p - I_b)$, $(I_p - I_c)$. Donde I_a , I_b , I_c son las corrientes de fase.

$$I_p = \frac{(I_a + I_b + I_c)}{3}$$

$fdes_V$ = Factor de desbalance de voltajes.

$$fdes_V = \frac{|V_{abc}|}{V_p}$$

Con $|V_{abc}|$ que es el mayor valor absoluto de $(V_p - V_a)$, $(V_p - V_b)$, $(V_p - V_c)$. Donde V_a , V_b , V_c son los voltajes de fase.

$$V_p = \frac{(V_a + V_b + V_c)}{3}$$

9.2.3. Corrección por operación con carga diferente a la nominal (K_c).

Este factor considera el efecto de trabajar con el motor actual con carga diferente a la nominal y se aplica solamente cuando no se dispone de las curvas factor de carga versus eficiencia del fabricante. Las pérdidas de Joule son las más afectadas cuando el motor trabaja con un grado de carga diferente del valor nominal.

El comportamiento del factor de corrección sigue la expresión siguiente para el motor eficiente:

$$K'c = \frac{f'c}{f'c * \eta_{ef,n} + (1 - \eta_{ef,n}) * (0,5 * f'c^2 + 0,5)}$$

Con:

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente.

fc = Factor de carga motor nuevo (0/1)

9.2.4. Corrección por diferencia de temperatura (*Kt*).

La temperatura ambiente afecta la temperatura de los enrollados del motor y, por ende, sus pérdidas de Joule y su rendimiento. Las normas obligan a los fabricantes a asegurar las características de placa del motor para una temperatura ambiente de 40° C. El factor para el motor estándar es:

$$K't = \frac{1}{\eta_{ef,n} + (1 - \eta_{ef,n}) * \left(0,5 * \left[\frac{334,5 + Ta}{374,5} \right] + 0,5 \right)}$$

Con:

η_o = Eficiencia nominal motor estándar

$\eta_{ef,n}$ = Eficiencia nominal motor eficiente.

Ta= Temperatura ambiente promedio (°C). Calculada como:

$$Ta = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

El rango de la temperatura para la cual la expresión es válida corresponde a $0 < Ta < 60$. Las temperaturas ambientales registradas en las campañas de medición mostraron una variación entre 18°C y 31°C.

9.2.5. Factor de corrección por reparaciones (rebobinados) en la vida del motor (Kr)

Se estima el factor de penalización de la eficiencia por proceso de rebobinados (Kr), a partir de:

$$PEPR = (100 - NPR \cdot 2) [\%]$$

$$NPR = \text{Número de Procesos de Rebobinado}$$

Lo anterior establece que la Eficiencia Nominal del motor se ve disminuida en 2% en promedio, por cada proceso de rebobinado que se le realice al motor, según la bibliografía consultada¹⁴.

9.3. Naturaleza de las pérdidas en motores eléctricos

Se entiende por pérdidas a la potencia eléctrica que se transforma y disipa en forma de calor en el proceso de conversión de la energía eléctrica en mecánica que ocurre en el motor. Las pérdidas por su naturaleza se pueden clasificar en 5 áreas: pérdidas en el cobre del estator, pérdidas en el cobre del rotor, pérdidas en el núcleo, pérdidas por fricción y ventilación y pérdidas adicionales.

9.3.1. Pérdidas en los conductores.

Las pérdidas en los conductores se dividen en dos zonas: estator ($R \cdot I^2$ en las bobinas del estator) y rotor ($R \cdot I^2$ en los bobinados del rotor).

9.3.1.1. PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES DEL ESTATOR.

Estas pérdidas son una función de la corriente que fluye en el devanado del estator y la resistencia de ese devanado. Son mínimas en vacío y se incrementan al aumentar la carga. En función del factor de potencia (FP), la corriente de línea en el estator puede expresarse como:

¹⁴ Fuente: Montgomery, David: "How to specify and evaluate energy efficient motors. General Electric Company, Tennessee, 1981.

$$I_L = \frac{P_{IN}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP}$$

Cuando se desea mejorar el comportamiento del motor, es importante reconocer la interdependencia entre la eficiencia (EF) y el factor de potencia (FP). Si se despeja el factor de potencia la ecuación se reescribe:

$$FP = \frac{P_{MEC}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \eta}$$

Por lo tanto, si se incrementa la eficiencia, el factor de potencia tendrá a decrecer. Para que el factor de potencia permanezca constante, la corriente del estator debe reducirse en proporción al aumento de la eficiencia. Si se pretende que el factor de potencia mejore, entonces la corriente debe disminuir más de lo que la eficiencia aumenta. Desde el punto de vista del diseño, esto es difícil de lograr debido a que hay que cumplir otras restricciones operacionales como el momento máximo.

Por otra parte, la corriente de línea se puede expresar:

$$I_L = \frac{P_{MEC}}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot FP \cdot \eta}$$

La expresión hace evidente que las pérdidas en el estator ($R \cdot I^2$) serán inversamente proporcionales al cuadrado de la eficiencia y del factor de potencia. Adicionalmente las pérdidas en los conductores del estator dependen de la resistencia del bobinado. Para un motor dado la resistencia del bobinado es inversamente proporcional al peso del bobinado del estator, es decir, a más material conductor en el estator menos pérdidas.

9.3.1.2. PÉRDIDAS EN LOS CONDUCTORES DEL ROTOR.

Son directamente proporcionales a la resistencia del bobinado rotórico, dependen del cuadrado de la corriente que circula en el bobinado rotórico (barras y anillos) y dependen del flujo magnético que atraviesa el entrehierro. Son prácticamente cero en vacío y se incrementan con el cuadrado de la corriente en el rotor y también se incrementan con la temperatura. Las pérdidas en el rotor se pueden expresar en función del deslizamiento:

$$Perd_Rotor = \frac{(P_{MEC} + PerdF_V)}{(1-s)} \cdot s$$

P_{MEC} = Potencia Mecánica de Salida.
 $PerdF_V$ = Pérdidas debido a la Fricción y Ventilación.
 s = Deslizamiento.

9.3.2. Pérdidas en el núcleo magnético.

Estas pérdidas tienen dos componentes, las pérdidas por corrientes de Eddy y las pérdidas por el fenómeno de histéresis, incluyendo las pérdidas superficiales en la estructura magnética del motor. Las pérdidas en el núcleo del rotor debido al flujo magnético principal, son virtualmente cero.

9.3.2.1. PÉRDIDAS POR HISTÉRESIS.

Son causadas debido a la propiedad de remanencia que tienen los materiales magnéticos al ser excitados por un flujo magnético en una dirección. Como el flujo de excitación está cambiando de dirección en el núcleo magnético, la remanencia hace que se forme el ciclo de histéresis, cuya área está relacionada por la energía gastada en magnetizar y desmagnetizar el núcleo continuamente. Estas pérdidas dependen del flujo máximo de excitación, de la frecuencia de variación del flujo y de la característica del material que determina el ancho del ciclo de histéresis.

9.3.2.2. PÉRDIDAS POR CORRIENTES DE EDDY.

Son causadas por las corrientes inducidas o corrientes de Eddy que circulan en las láminas magnéticas del núcleo del estator las que son inducidas por el flujo magnético giratorio. En efecto, de acuerdo a la ley de Faraday el campo magnético variable en el tiempo crea campos eléctricos de trayectoria cerrada en el núcleo magnético y como el acero es un material conductor estos campos hacen circular corrientes (corrientes de Eddy) a través de su trayectoria cerrada, por esta razón el núcleo magnético se hace de láminas magnéticas. Por lo tanto, estas pérdidas dependen del flujo magnético máximo, de la frecuencia de variación del flujo magnético y de la resistividad del acero magnético.

9.3.3. Pérdidas por fricción y ventilación.

Las pérdidas por fricción y ventilación son debidas a la fricción en los rodamientos y a las pérdidas por resistencia del aire al giro del ventilador y de otros elementos rotativos del motor. La fricción en los rodamientos es una función de las dimensiones de éste, de la velocidad, del tipo de rodamiento, de la carga y de la lubricación usada. Estas pérdidas quedan relativamente fijadas para un tipo de diseño, y debido a que constituyen un porcentaje pequeño de las pérdidas totales del motor, los cambios que se pueden hacer en el diseño para reducir las no afectan significativamente la eficiencia del motor.

9.3.4. Pérdidas adicionales en carga.

Las pérdidas residuales son difíciles de determinar por medio de mediciones directas o de cálculos. Estas pérdidas están relacionadas con la carga y generalmente se suponen que varían con el cuadrado del momento de salida. La naturaleza de estas pérdidas es muy compleja. Están en función de muchos factores de diseño y de fabricación del motor. Algunos de los elementos que influyen en estas pérdidas son: el diseño del devanado; la relación entre la magnitud del entrehierro y la abertura de las ranuras; la relación entre el número de las ranuras del estator y del rotor, la inducción en el entrehierro; las condiciones en la superficie del rotor; el tipo de contacto superficial entre las barras y las laminaciones del rotor.

En la Tabla N° 29 se muestra el grado de importancia de las pérdidas mencionadas anteriormente:

Componentes Pérdidas en el Motor	% Pérdidas totales
Pérdidas Conductores Estator	37
Pérdidas Conductores Rotor	18
Pérdidas Núcleo Magnético	20
Pérdidas Fricción y Ventilación	9
Pérdidas Adicionales en carga	16

Tabla N° 29: “Distribución de Pérdidas en Motores Eléctricos¹⁵”

9.4. Norma HD 428 para Transformadores (Estándar Europeo)

Los documentos de armonización (HD) que tratan de los niveles de eficiencia de transformadores en la Unión Europea son HD 428 y HD 538 [3]. El HD 428 se refiere al transformador de distribución trifásico de aceite, para 50 Hz, de 50 a 2500 [kVA], con rango de tensión que no superan los 36 [kV]. El HD 538 trata del transformador trifásico en seco, para 50 Hz, de 100 a 2500 [kVA], con rango de tensión que también no superan los 36 [kV]. El estándar del tipo HD determina los niveles de eficiencia a través de las pérdidas en carga y de las pérdidas en vacío. Para transformadores de distribución de aceite el estándar HD 428.1 establece tres niveles de pérdidas en carga (A, B, y C) y tres niveles de pérdidas en vacío (A', B', y C'). La combinación entre esas pérdidas proporciona el nivel de eficiencia del transformador según la Figura N° 104. Vale destacar que los límites impuestos por este estándar son las máximas tolerancias permitidas para estas pérdidas.

¹⁵ Fuente: Andreas Jhon ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC MOTORS. Second Edition. Marcel Dekker, Inc. New York, USA 1992.

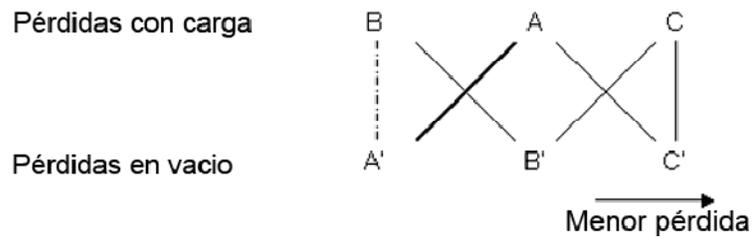


Figura N° 104: “Combinación de las Pérdidas Definidas por la HD 428”

RATED POWER	Load Losses for Distribution Transformers				No-Load Losses for Distribution Transformers			
	OIL-FILLED (HD428) UP TO 24kV ²⁾			DRY TYPE (HD538)	OIL-FILLED (HD428) UP TO 24kV ²⁾			DRY TYPE (HD538)
	LIST A	LIST B	LIST C	12kV PRIMARY ³⁾	LIST A'	LIST B'	LIST C'	12kV PRIMARY ³⁾
kVA	W	W	W	W	W	W	W	W
50	1,100	1,350	875	N/A	190	145	125	N/A
100	1,750	2,150	1,475	2,000	320	260	210	440
160	2,350	3,100	2,000	2,700	460	375	300	610
250	3,250	4,200	2,750	3,500	650	530	425	820
400	4,600	6,000	3,850	4,900	930	750	610	1,150
630 /4% ¹⁾	6,500	8,400	5,400	7,300	1,300	1,030	860	1,500
630 /6%	6,750	8,700	5,600	7,600	1,200	940	800	1,370
1000	10,500	13,000	9,500	10,000	1,700	1,400	1,100	2,000
1600	17,000	20,000	14,000	14,000	2,600	2,200	1,700	2,800
2500	26,500	32,000	22,000	21,000	3,800	3,200	2,500	4,300

Tabla N° 30: “Pérdidas en Transformadores según la Norma HD 428”

9.5. Resultados de las Evaluaciones Económicas de los diferentes Equipos

9.5.1. Motores

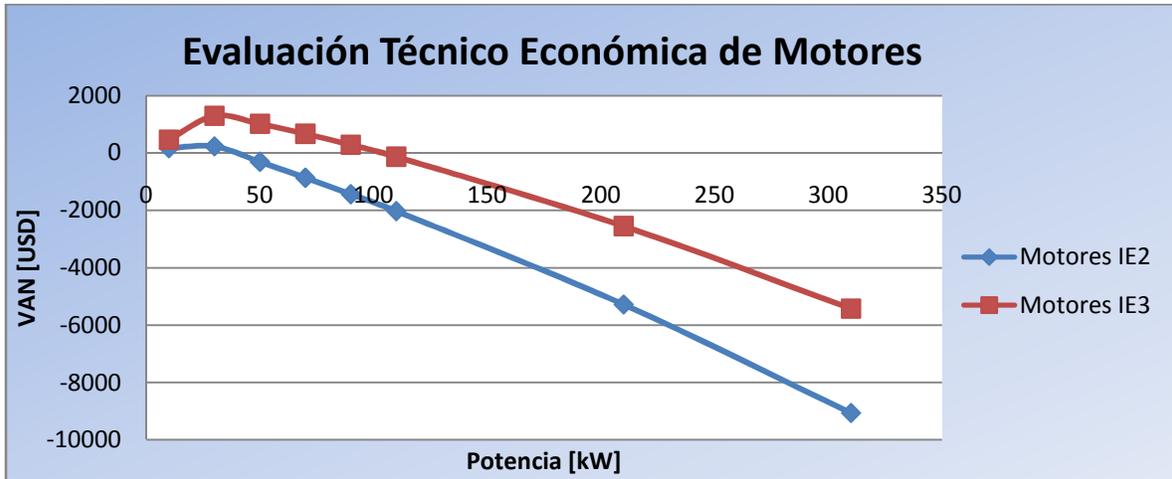


Figura N° 105: “Evaluación Técnico Económica de Motores (P=0.075 [USD/kWh] Fc=0,8 HA=8000)”

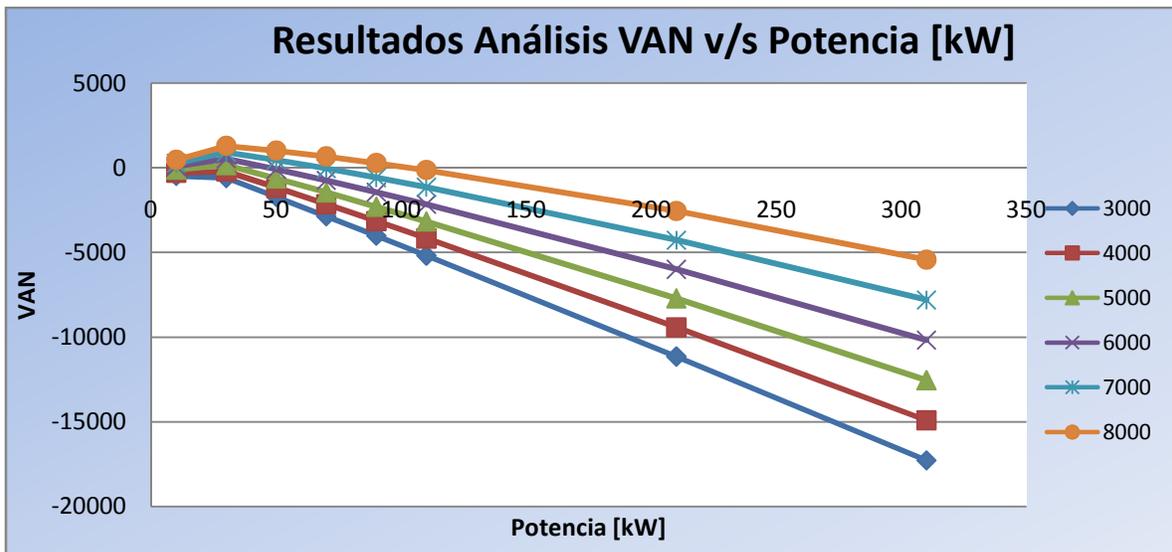


Figura N° 106: “Resultados de Análisis VAN v/s Potencia [kW]”

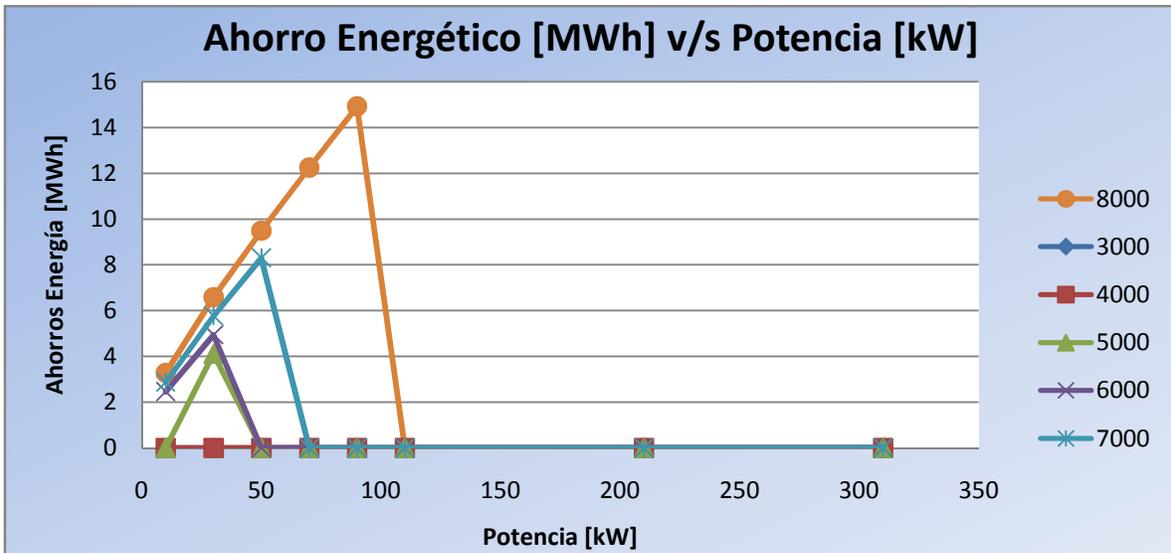


Figura N° 107: “Ahorro Energético [MWh] v/s Potencia [kW]”

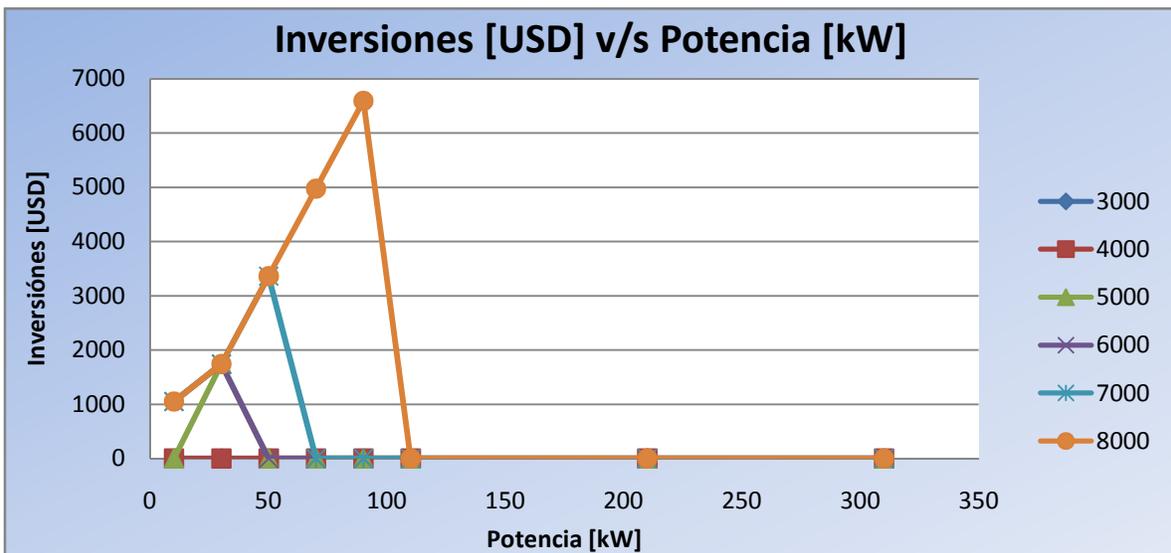


Figura N° 108: “Inversiones [USD] v/s Potencia [kW]”

9.5.2. Ventiladores y Bombas Hidráulicas

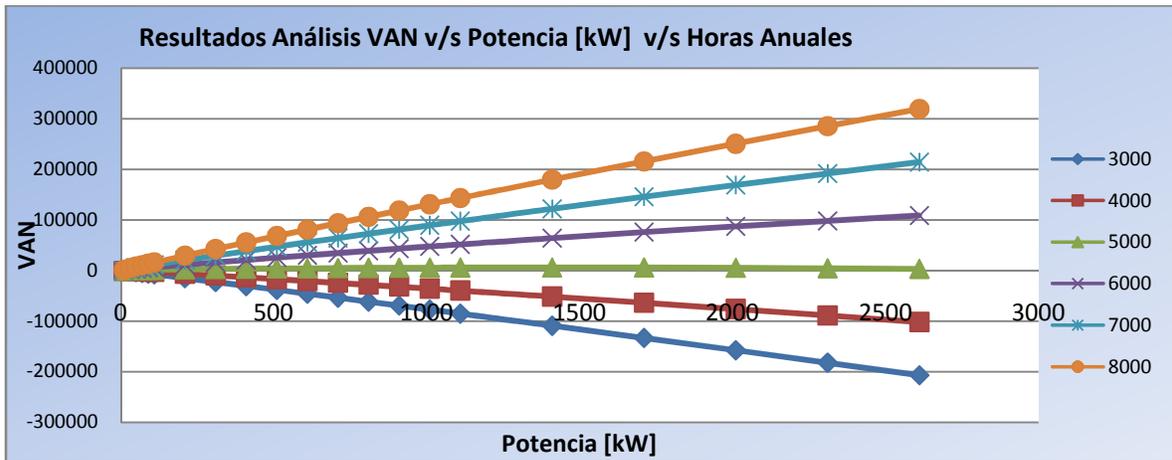


Figura N° 109: “Resultados de Análisis VAN v/s Potencia [kW] – $P_e=35$ [USD/MWh] y $F_c=0,5$ ”

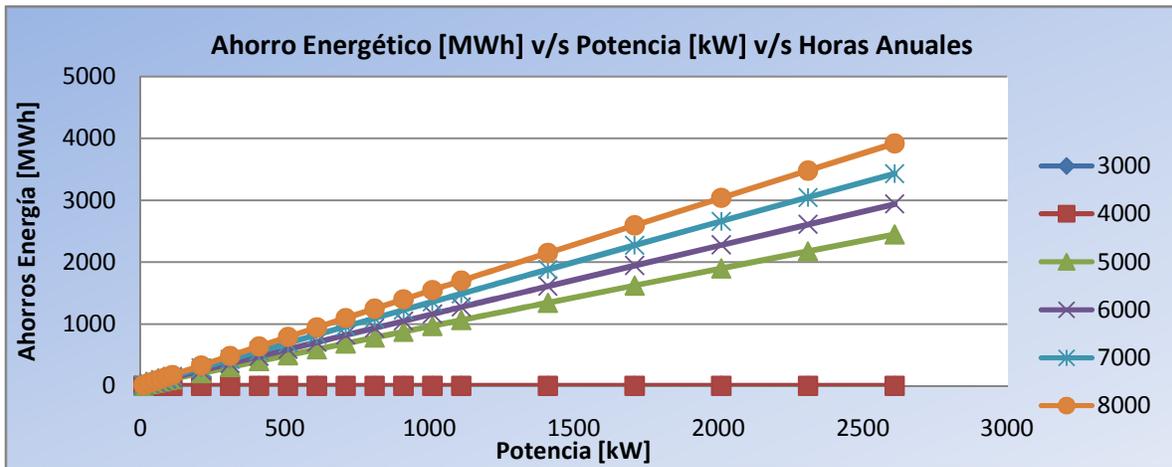


Figura N° 110: “Ahorro Energético [MWh] v/s Potencia [kW] – $P_e=35$ [USD/MWh] y $F_c=0,5$ ”

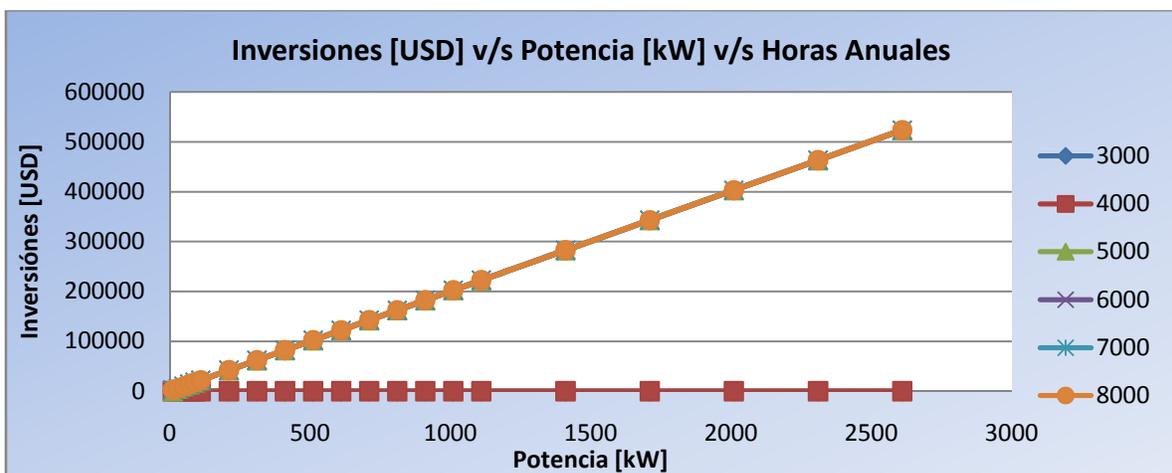


Figura N° 111: “Inversiones [USD] v/s Potencia [kW] – $P_e=35$ [USD/MWh] y $F_c=0,5$ ”

9.5.3. Transformadores

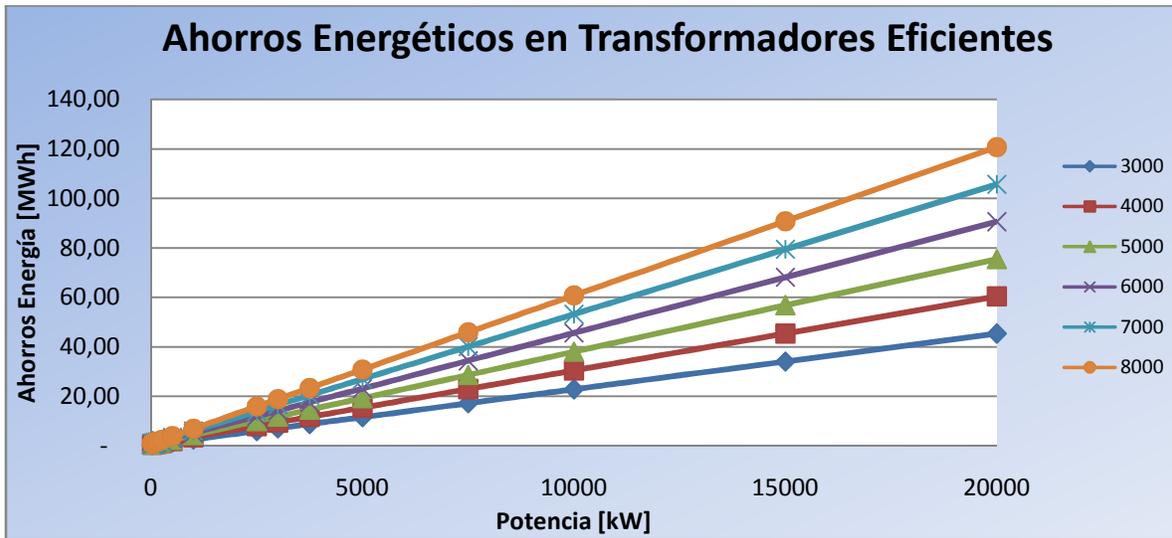


Figura N° 112: “Ahorros Energéticos en Transformadores Eficientes (P=0.055 [USD/kWh]; Fc=0,7)”

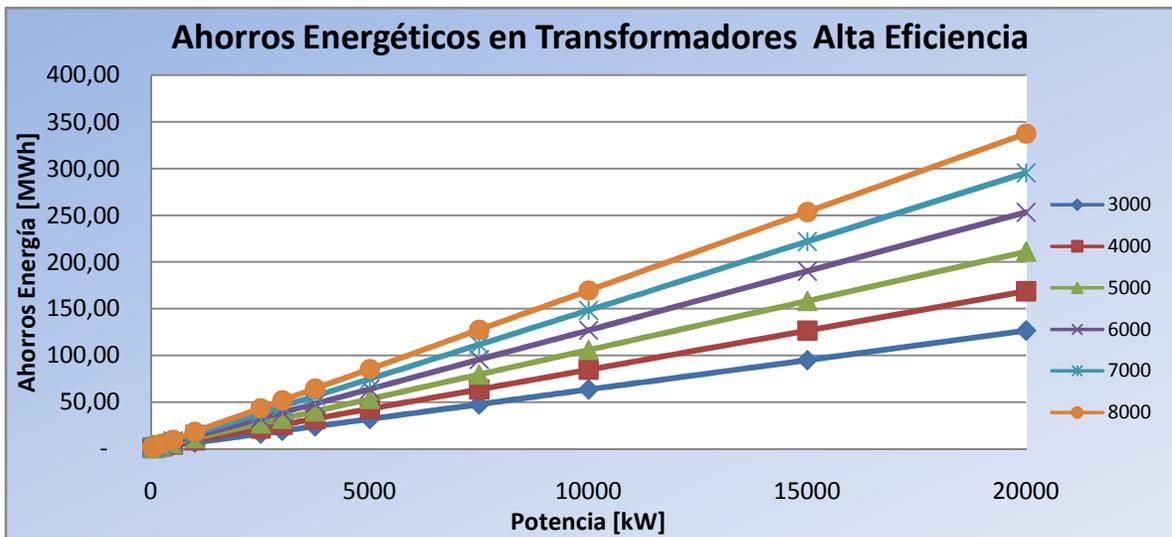


Figura N° 113: “Ahorros Energéticos en Transformadores de Alta Eficiencia (P=55 [USD/MWh]; Fc=0,7)”

9.5.4. Iluminación LED

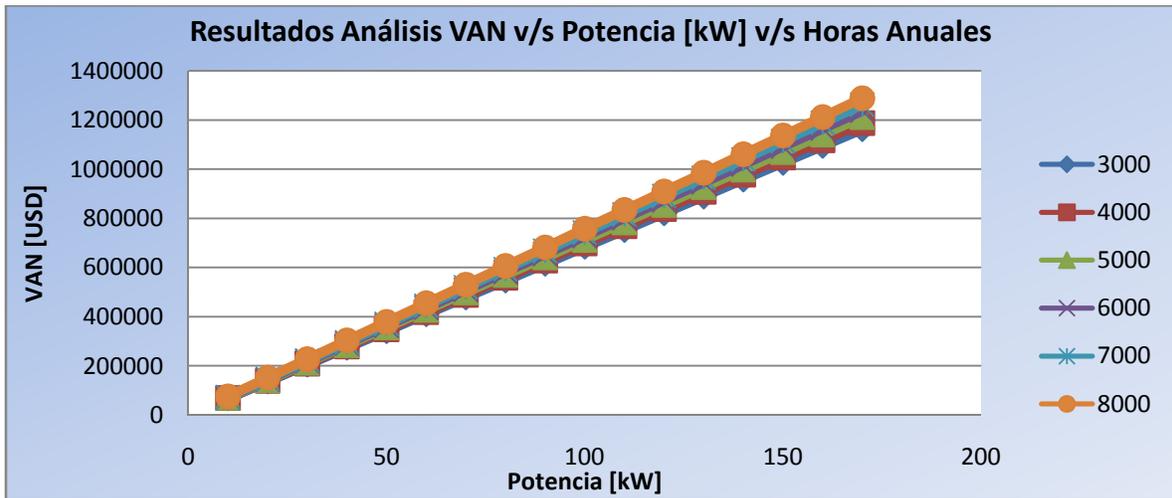


Figura N° 114: “Resultados de Análisis VAN v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

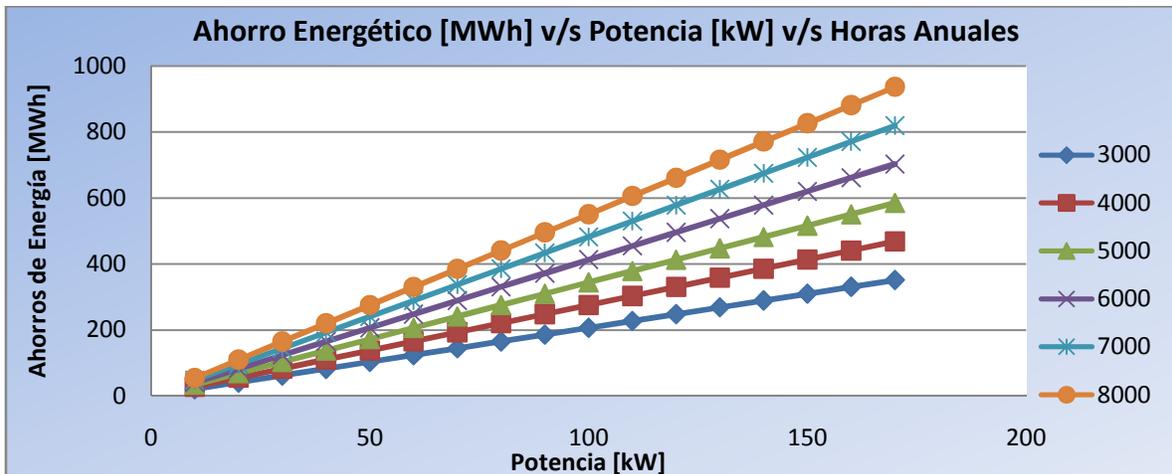


Figura N° 115: “Ahorro Energético [MWh] v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

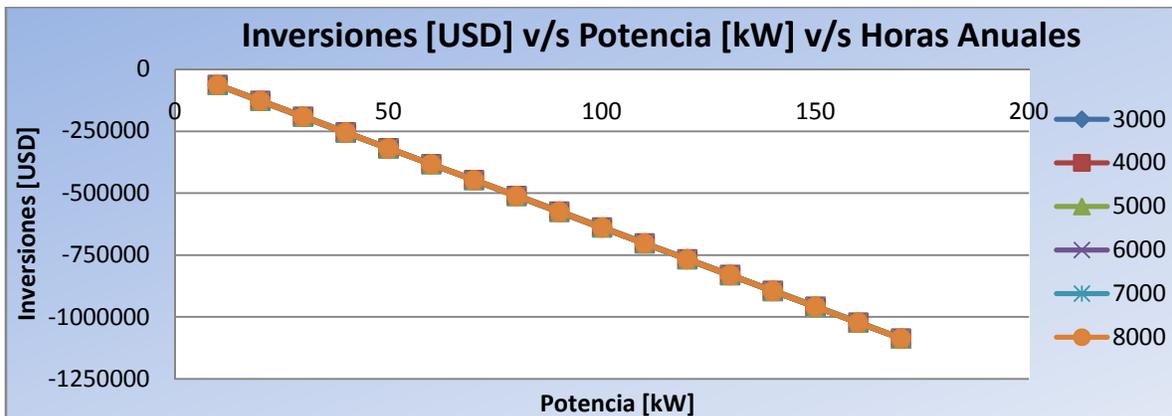


Figura N° 116: “Inversiones [USD] v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

9.5.5. Iluminación Inducción Magnética

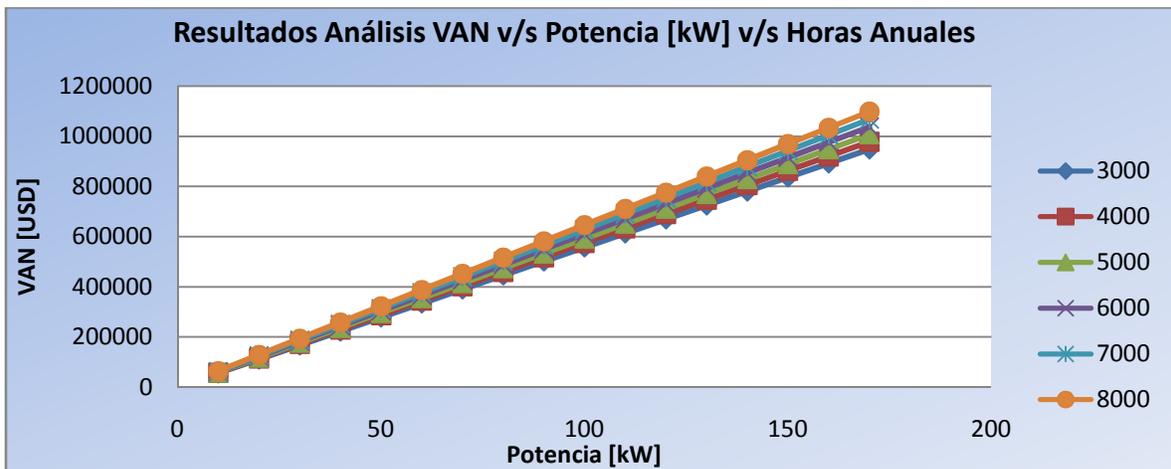


Figura N° 117: “Resultados Análisis VAN v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

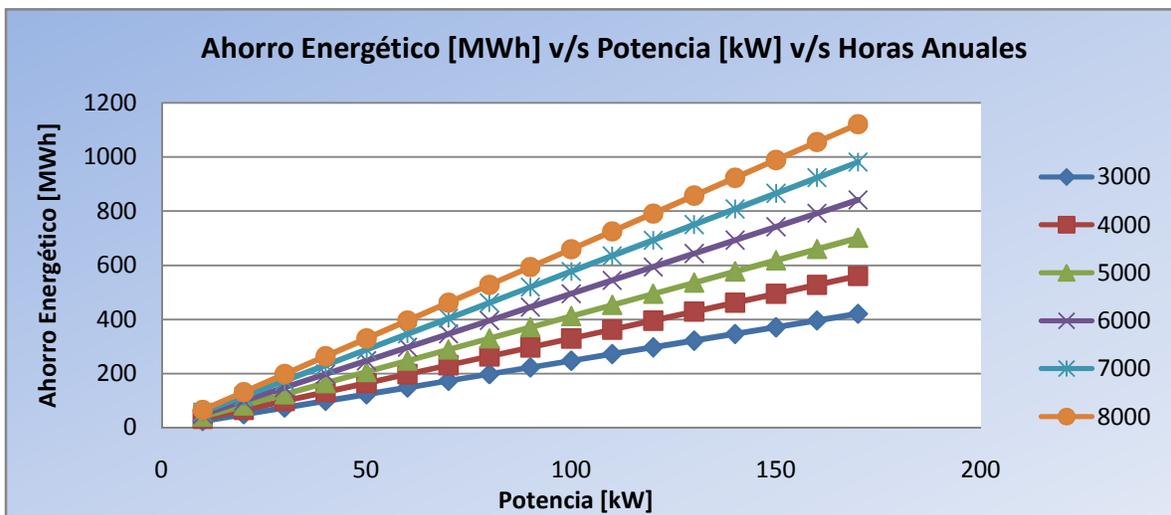


Figura N° 118: “Ahorro Energético [MWh] v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

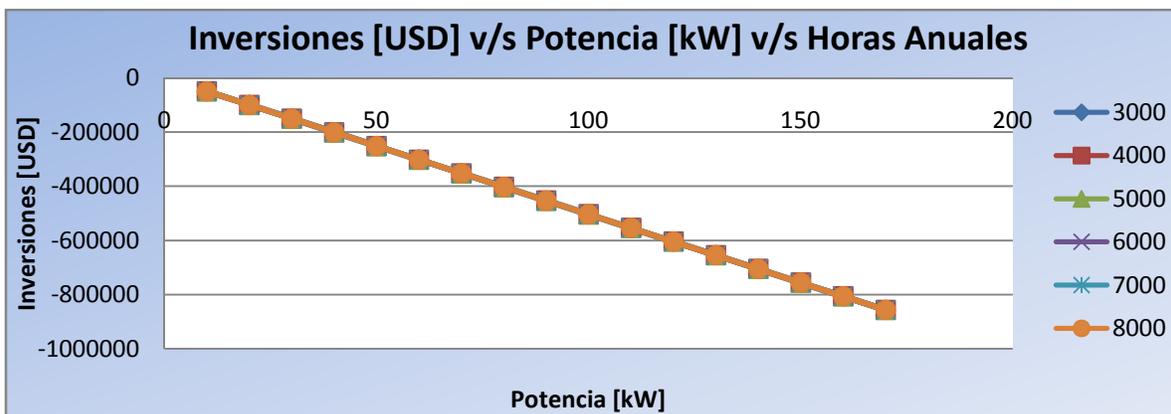


Figura N° 119: “Inversiones [USD] v/s Potencia [kW] v/s Horas Anuales” (Pe=35USD/MWh)

“La información que esta Memoria recoge y contiene respecto de las operaciones y actividades de Anglo American Chile Ltda. y/o de cualquiera de las divisiones mineras e industriales operativas, así como la integridad e interpretación de la información, los análisis y conclusiones derivadas de ella, sólo corresponden a su autor y, en consecuencia son de su exclusiva responsabilidad, por lo que no comprometen en forma alguna a Anglo American Chile Limitada, sus divisiones operativas o empresas propietarias, como tampoco a sus ejecutivos, profesionales o técnicos. Anglo American Chile Ltda. únicamente ha colaborado con el autor en facilitarle acceso a sus instalaciones e información para la realización de esta tesis y no tiene opinión ni participación alguna en su contenido.”