



Informe final

Evaluación técnico-económica, en el aspecto energético, del uso de variadores de frecuencia en bombeo de relaves de Minera Valle Central S.A.

Proyecto Eficiencia Energética en Minería

Enero 2022

Edición:

Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Friedrich-Ebert-Allee 40
53113 Bonn • Alemania

Dag-Hammarskjöld-Weg 1-5
65760 Eschborn • Alemania

Nombre del proyecto:

Eficiencia Energética en Minería en Chile

Marchant Pereira 150
7500654 Providencia
Santiago • Chile
T +56 22 30 68 600
I www.giz.de

Responsable:

Rainer Schröer

En coordinación:

Ministerio de Energía de Chile
Alameda 1449, Pisos 13 y 14, Edificio Santiago Downtown II
Santiago de Chile
T +56 22 367 3000
I www.minenergia.cl

Registro de Propiedad Intelectual Inscripción: ISBN: 978-956-8066-42-0. Primera edición digital: marzo 2022.

Cita:

Título: Evaluación técnico-económica, en el aspecto energético, del uso de variadores de frecuencia en bombeo de relaves de Minera Valle Central S.A.
Autor(es): GIZ, Ministerio de Energía, Ingeniería Task Energy.
Revisión: GIZ; Rodrigo Vásquez, Javier Hueichapán, Ingeniería Task Energy.
Edición: GIZ.
Santiago de Chile, 2022.
24 páginas.
Eficiencia Energética, bombas, variadores de frecuencia, relaves, mediana minería, cobre, Chile, GIZ.

**Aclaración:**

Esta publicación ha sido preparada por encargo del proyecto "Eficiencia energética en la minería materias primas y clima" implementado por el Ministerio de Energía y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH en el marco de la cooperación intergubernamental entre Chile y Alemania. El proyecto se financia a través de la Iniciativa internacional sobre el clima (IKI) del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania - BMU. Sin perjuicio de ello, las conclusiones y opiniones de los autores no necesariamente reflejan la posición del Gobierno de Chile o de GIZ. Además, cualquier referencia a una empresa, producto, marca, fabricante u otro similar en ningún caso constituye una recomendación por parte del Gobierno de Chile o de GIZ.

Santiago de Chile, enero 2021

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	OBJETIVOS	4
2	CONTEXTO Y ANTECEDENTES MVC	4
2.1	EL PROCESO	6
2.2	BOMBAS DE ESTUDIO.....	9
3	METODOLOGÍA DE TRABAJO	12
4	MEDICIONES ELÉCTRICAS	12
5	ESTIMACIÓN DE CONSUMO DE ENERGÍA CON VDF	15
5.1	LEY DE AFINIDAD DE BOMBAS	15
5.2	MÉTODO EMPÍRICO.....	18
6	AHORROS DE ENERGÍA	20
7	CONSIDERACIONES PARA LA FILOSOFÍA DE CONTROL DEL VDF	21
8	INVERSIÓN	21
9	EVALUACIÓN ECONÓMICA	21
9.1	CRITERIOS PARA EVALUACIÓN ECONÓMICA	21
9.2	EVALUACIÓN LEY DE AFINIDAD DE BOMBAS	22
9.3	EVALUACIÓN MÉTODO EMPÍRICO	22
9.4	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	22
10	CONCLUSIONES	22

1 Introducción

La Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, GIZ, en el marco de su programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética 4e, apoya al Gobierno de Chile en actividades destinadas a fomentar la reducción de emisiones CO₂, con investigación y desarrollo, asesoría del marco regulatorio, actividades destinadas a propiciar negocios y financiamiento de proyectos, y a mejorar la sustentabilidad del sector energético en Chile.

En este contexto, la GIZ en el marco del Proyecto “**Eficiencia Energética en la Minería**” ha lanzado un proceso de apoyo técnico para empresas del sector minero con el fin de facilitar la implementación de proyectos que estén en fases avanzadas de ingeniería y que reduzcan emisiones a través de la disminución del consumo energético. Al mismo tiempo se busca con esto, aumentar el conocimiento para el sector minero en el ámbito de la eficiencia energética, con el fin de poder generar replicabilidad de proyectos en soluciones particulares.

Bajo esta línea, la consultoría descrita en este documento está enfocada en desarrollar una evaluación técnico-económica, en el aspecto energético, del uso de variadores de frecuencia en bombeo de relaves de Minera Valle Central S.A. (MVC), así como un reporte del uso y la calidad de energía.

1.1 Objetivos

Este proyecto, tiene como objetivo principal el desarrollo de una evaluación técnico-económica, desde el punto de vista de la eficiencia energética, por el cambio de partidores suaves a variadores de frecuencia para MVC, con el fin de optimizar el consumo de energía de las bombas que impulsan los relaves en los tranques que gestiona la empresa en la comuna de Requínoa, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Para cumplir con este objetivo general, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar deficiencias en la calidad del suministro de energía que puedan afectar la eficiencia y la operación del proceso de extracción de relaves de Minera Valle Central.
2. Establecer los consumos actuales del sistema de bombeo del proceso de extracción de relaves.
3. Evaluar técnicamente la oportunidad de mejora de desempeño energético de instalación de variadores de frecuencia en las bombas.
4. Cuantificar los ahorros que se generarían al incorporar variadores de frecuencia en las bombas.
5. Evaluar económicamente la oportunidad de mejora de desempeño energético.

2 Contexto y antecedentes MVC

Minera Valle Central S.A. es una firma que ofrece soluciones integrales a la problemática de los relaves, incluyendo diseño de instalaciones de almacenamiento, procesamiento, transporte y re-depositación; además de proyectos de ingeniería y recuperación de agua. También colabora en planes de cierre de faenas, generación de capacidad de emergencia en tranques y soluciones de

saneamiento ambiental, acordes con las nuevas legislaciones. La firma opera en la industria de la minería secundaria desde 1992, basando su trabajo en la innovación, gestión del conocimiento y mejora continua.

Desde entonces, MVC lleva 29 años recuperando cobre y molibdeno desde relaves frescos y antiguos, provenientes de Codelco Chile, División El Teniente. En la planta se procesan alrededor de 130.000 toneladas de relaves al día, con una ley de 0,12% de cobre total. La minera también está facultada para extraer relaves antiguos, que han sido depositados en el Tranque Cauquenes entre los años 1939 y 1977. En la Ilustración 1 se muestra el proceso principal de este estudio, y más adelante se explican las etapas que realiza MVC para recuperar cobre de estos relaves.

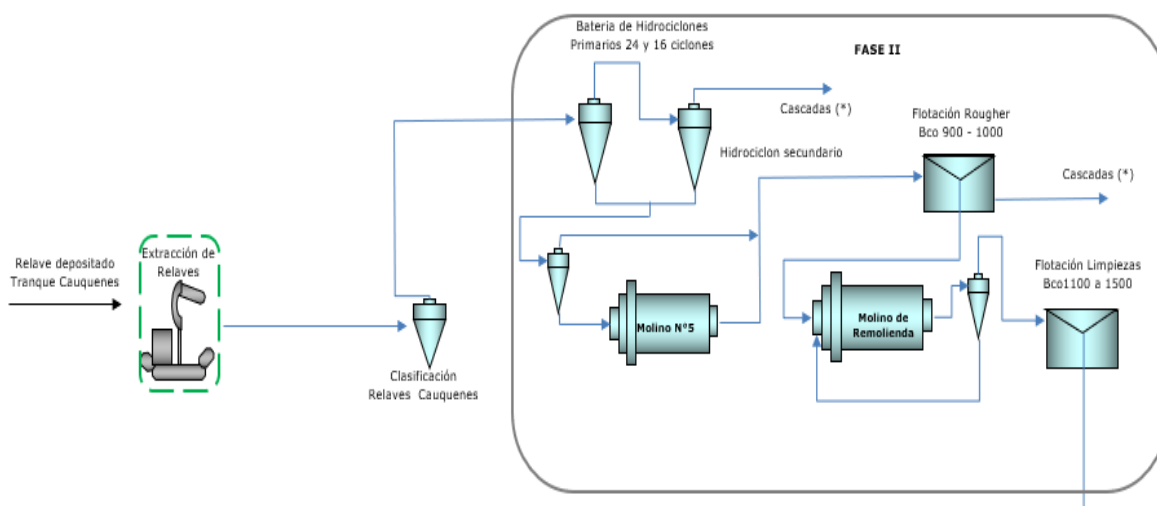


Ilustración 1: Mapa de Proceso Relaves Tranque Cauquenes

Para vaciar los tranques, la firma utiliza el método de monitoreo hidráulico, que ofrece ventajas competitivas en costo, tiempo de implementación, rendimiento y eficiencia. Actualmente, este método es usado en la explotación y vaciado del Tranque Cauquenes. Específicamente, el trabajo que se realiza en MVC para la producción de Cobre y Molibdeno a partir de los relaves de El Teniente, consta de 6 procesos esenciales.

En primer lugar, el flujo de relaves frescos de El Teniente, son transportados por el canal de relaves desde el concentrador de Colón, estos descartes son desviados hacia la planta de MVC para ser reprocesados y obtener los minerales aun presentes en la pulpa del relave.

El flujo de relaves antiguos depositados en el Tranque Cauquenes, son extraídos mediante la técnica de monitoreo hidráulico, que consiste en la inyección de agua a alta presión en el relave depositado, desintegrando el mineral y produciendo una pulpa que contiene entre otros, el cobre y molibdeno. Esta pulpa ingresa a la planta de Flotación para su procesamiento y recuperación de los elementos de interés.

Luego existe una clasificación de fracciones, la fracción fina es enviada al proceso de Flotación de Cascadas, mientras que la fracción gruesa es enviada a clasificación de deslamados para posteriormente ser enviado al proceso de molienda.

En la fase de molienda, la fracción gruesa es reducida para la liberación y limpieza de las partículas de cobre para su posterior proceso de flotación colectiva. Luego, usando la agitación e inyección de aire en celdas de flotación, se realiza la concentración de mineral que ayuda a facilitar la colección de los elementos de interés, los descartes de este proceso son enviados a una última etapa de flotación en la planta de cascadas.

El contacto del agua con el mineral genera un pre-concentrado de baja ley, 0,25% de cobre, que es enviado nuevamente a flotación convencional para enriquecer el producto de molienda. Esta planta de cascadas está compuesta por 5 líneas con 30 cascadas cada una y data de 1992.

Por último, los descartes de la planta de flotación de cascadas son enviados a tres espesadores de 100 metros de diámetro cada uno, que son capaces de recuperar en total 1.200 litros por segundo de agua y que aportan con el 90% del total del consumo de agua de la Planta. El concentrado final de la flotación colectiva es enviado a la planta de flotación selectiva para la separación de concentrado de cobre y molibdeno.

Uno de los consumos de energía más significativos en la planta refiere al flujo de relaves en general, cuyas bombas de impulsión son altos consumidores de electricidad, razón por la cuál se evalúa una oportunidad de eficiencia energética en ellas, como es el reemplazo de los partidores suaves por variadores de frecuencia.

2.1 El Proceso

El proceso involucrado en este estudio se utiliza para la extracción de cobre y recuperación de agua de los antiguos relaves almacenados en el Tranque Cauquenes de Minera Valle Central, entre los años 1939 y 1977 y que son provenientes de División El Teniente de Codelco.

Para este efecto, el primer paso consta de liberar y diluir los relaves en el tranque, a través del monitoreo hidráulico, específicamente un chorro que se dispara a alta presión e hidrata y remueve los relaves para que puedan ser transportados a las siguientes etapas del proceso. En la Ilustración 2 e Ilustración 3 se pueden apreciar el pitón de agua y su funcionamiento.



Ilustración 2: Pitón del Monitoreo Hidráulico. Fuente: MVC.



Ilustración 3: Monitoreo Hidráulico Operando. Fuente: MVC.

De esta forma, el relave suelto es llevado a la planta de cascada, el cual consta de 4 cajones de acumulación, conectados por otras bombas que van impulsando el relave a través de estos cajones, en forma de cascada para llevarlos finalmente a un estanque final, conectado al grupo de Bombas Warman, el cual se puede apreciar en Ilustración 4.



Ilustración 4: Estanque y Bombas Warman. Fuente: Visita MVC.

La función principal del grupo de bombas Warman es impulsar los relaves al proceso de Molienda, donde previamente son clasificados y distribuidos al proceso de molienda gruesa o fina, como se ve en la Ilustración 5.



Ilustración 5: Molienda de Minería Convencional. Fuente: MVC.

Finalmente, los relaves entran al proceso de flotación de la minería convencional, el que permite la obtención del concentrado de cobre a partir de la pulpa del material mineralizado que viene del proceso de molienda. Aquí se inyecta oxígeno desde el fondo para que las partículas de cobre presentes en la pulpa se adhieran a las burbujas de aire y se acumulen en la parte superior, en los dispositivos que se pueden ver en Ilustración 6.



Ilustración 6: Proceso de Flotación. Fuente: MVC.

2.2 Bombas de estudio

El presente estudio se centra en la potencial mejora de desempeño energético que tienen las bombas Warman con la instalación de variadores de frecuencia (VDF). Este grupo, consta de 4 bombas conectadas en paralelo, cada una con un motor trifásico de inducción.

Las Bombas W-01 y W-03 cuentan con un partidor suave, y las W-02 y W-04 con un VDF, siendo esta su única diferencia. Además, es importante recalcar que los motores y cableado de fuerza existentes cuentan con las capacidades necesarias para la instalación de un variador de frecuencia, siendo adecuados para ello. En la Ilustración 7, se puede apreciar un diagrama del SCADA del proceso y ubicación de las bombas en el sistema.



El motor de cada bomba es un motor trifásico de inducción, rotor de jaula marca WEG, que cuenta con las características descritas en la Ilustración 8.

Carcasa	: 5809/10	Protección	: IP55 (TEFC)
Potencia	: 500 HP (370 kW)	Forma constructiva	: F-1/B3R(D)
Frecuencia	: 50 Hz	Sentido de giro	: Ambos
Polos	: 4	Masa aproximada*	: 2858 kg
Rotación nominal	: 1488 rpm	Momento de inercia	: 12.7 kgm²
Resbalamiento	: 0.80 %	Nivel de Presión Sonora	: 81.0 dB(A) (global)
Tensión nominal	: 575V	Fuerzas en la fundación	
Corriente nominal	: 450 A	- Tracción máxima	: 21165 N
Corriente de arranque	: 2925 A	- Compresión máxima	: 49202 N
Ip/In	: 6.5 Cód. G		
Corriente en vacío	: 120 A	Carga	Fact. potencia Rendimiento (%)
Torque nominal	: 2392 Nm	100%	0.86 96.0
Torque de arranque	: 150 %	75%	0.85 95.8
Torque máximo	: 210 %	50%	0.79 95.2
Categoría	: B		
Clase de aislamiento	: F	Rodamiento	Cantidad (lubricante)
Elevación de temperatura	: 80 K (FS 1.00)	Delantero	NU322-C3 60 g
Tiempo de rotor bloqueado	: 26 s (caliente)	Trasero	6319-C3 45 g
Factor de servicio	: 1.15		
Régimen de servicio	: S1		
Temperatura ambiente	: -20°C hasta +40°C		
Altitud	: 1000 m		
		Intervalo de lubricación:	4500 h
		Grasa - MOBIL POLYREX EM	

Ilustración 8: Características Técnicas Motores

Las bombas son de marca Warman y poseen un diámetro de polea de 40 centímetros y 632,4 RPM, y las características específicas se pueden ver en Ilustración 9.

EQUIPMENT NAME	BOMBA WARMAN 16x14 SRC_BS
PUMP MODEL	16 x 14 SRC
TAG	BHP-2700-05@06
SERIE	286/287-2017
BRAND	WARMAN-ASH
CASING LINER	NEOPRENO
IMPELLER LINER	NEOPRENO
MOTOR PULLEY	SIN POLEAS
MOTOR BUSHING	-
PUMP PULLEY	-
PUMP BUSHING	-
V-BELTS	SIN CORREAS
MOTOR	SIN MOTOR
MOTOR POWER (HP)	-
V/PH/HZ	-
ALTITUDE	-
MOTOR FRAME	-
RPM	-
ENCLOSURE	-
INSULATION CLASS	-
SERVICE FACTOR	-
MOUNTING	BS, BARESHAFT
PUMP WEIGHT (Kgs)	3635
MOTOR WEIGHT (kgs)	-
BASE WEIGHT	-
PULLEYS WEIGHT (kgs)	-
TOTAL WEIGHT (kgs)	3635
HYDROSTATIC TEST PRESSURE	NOT INCLUDED
MAXIMUM CASING PRESSURE (PSI)	125
OPERATION CHARACTERISTIC	Feed de Hidrociclones Molino de Procesos 5
FLOW RATE (M3/H)	1548
TDH	30
SPECIFIC GRAVITY	1,346
SEAL WATER REQUERIMENT	NOT REQUIRED
FLOW (M3/H)	-
PRESS (PSI)	-
INGENIERO A CARGO	DAVID BANDA

Ilustración 9: Características Técnicas Bombas

3 Metodología de Trabajo

Para el cumplimiento de los objetivos propuestos en este proyecto, se solicitó la información correspondiente sobre el sistema a evaluar, tales como planos y diagramas eléctricos para identificar los equipos consumidores, junto a sus especificaciones técnicas. Luego de esto, se definió el plan de medición, el cual, a través de visitas técnicas y en conjunto con la contraparte técnica, consistió en instalar un registrador de energía trifásico FLUKE 1734 durante siete días con mediciones cada 15 minutos, en un motor con partidor suave y recolectar sus datos. De forma simultánea se instaló un registrador de energía triásico Metrel MI 2883 en un motor que cuenta con variador de frecuencia por otros 7 días.

Con las mediciones obtenidas de las variables eléctricas de la bomba sin VDF, se estimó el potencial la reducción de consumo de energía eléctrica dado el régimen de operación de la bomba. Para esto MVC proporcionó las mediciones de caudal de la bomba disponibles para el año 2021.

Con base en la información técnica de los motores eléctricos que accionan las bombas, se solicitó una cotización de VDF, y se realizó la evaluación económica de la implementación del VDF. Para este efecto, se elaboró un flujo de caja anual, determinando el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y el período de retorno de la inversión (PRI).

4 Mediciones Eléctricas

Las mediciones eléctricas del caso sin VDF se realizaron en la bomba W-03 (la bomba W-01 se encontraba en mantenimiento durante el estudio). Mientras que las mediciones de la bomba con VDF se realizaron en la bomba W-02.

Los datos de las bombas se encuentran en la Tabla 1

	Bomba W-03 (Sin VDF)	Bomba W-02 (con VDF)
Potencia nominal ¹ [kW]	370	370
Eficiencia motor nominal [%]	96%	96%
Caudal Nominal [m ³ /hr]	1548	1548
Velocidad Nominal [rpm]	632,4	632,4

Tabla 1: Resumen especificaciones técnicas Bombas Warman

La Ilustración 10 muestra la curva de las bombas para el funcionamiento con agua. Si bien en este caso se mueve pulpa, se tiene que para un caudal cercano a los 1500 m³/h y una velocidad de 632,4 rpm, la eficiencia es de un 72%, mientras que, si disminuye el caudal a la mitad, la eficiencia disminuye al 50%.

¹ Potencia Nominal

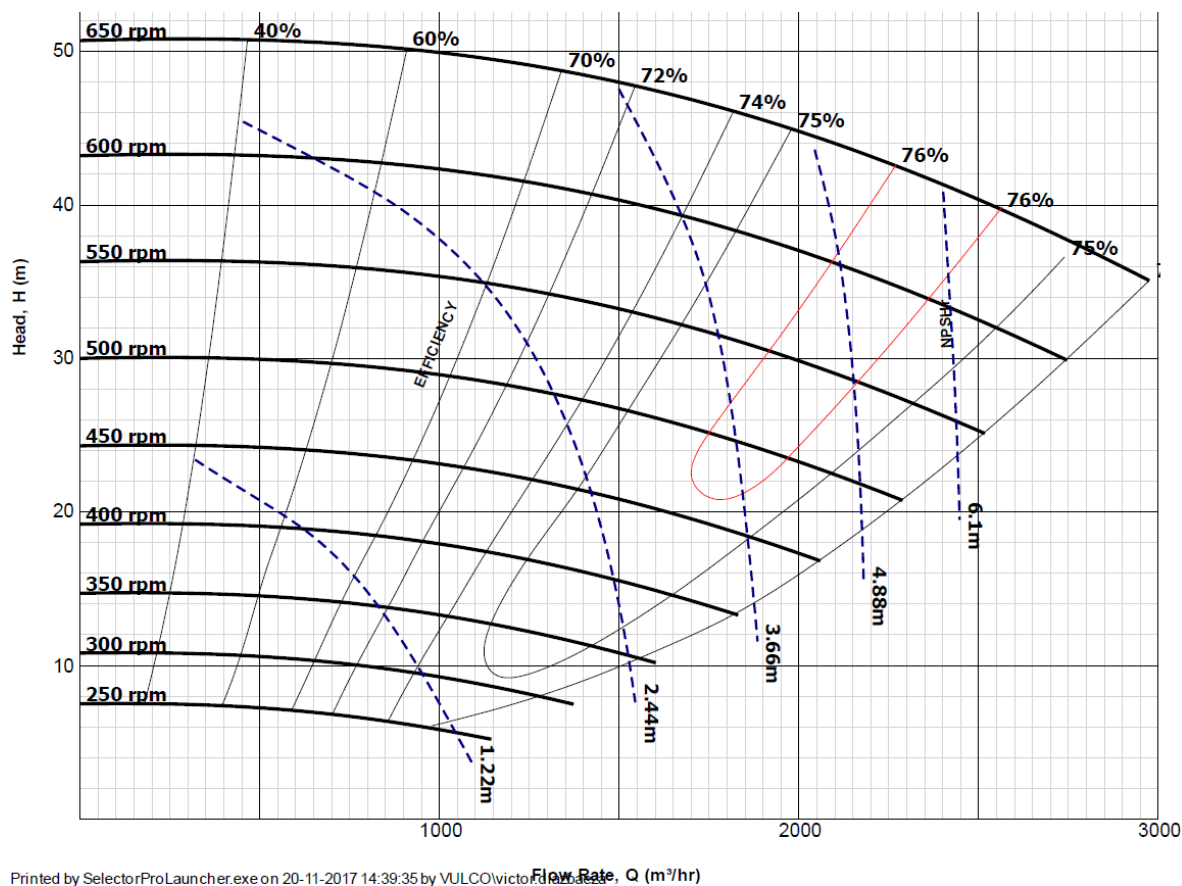


Ilustración 10. Curva de bombas Warman

Los valores de potencia medida en la bomba W-03 se presentan en el Gráfico 1.

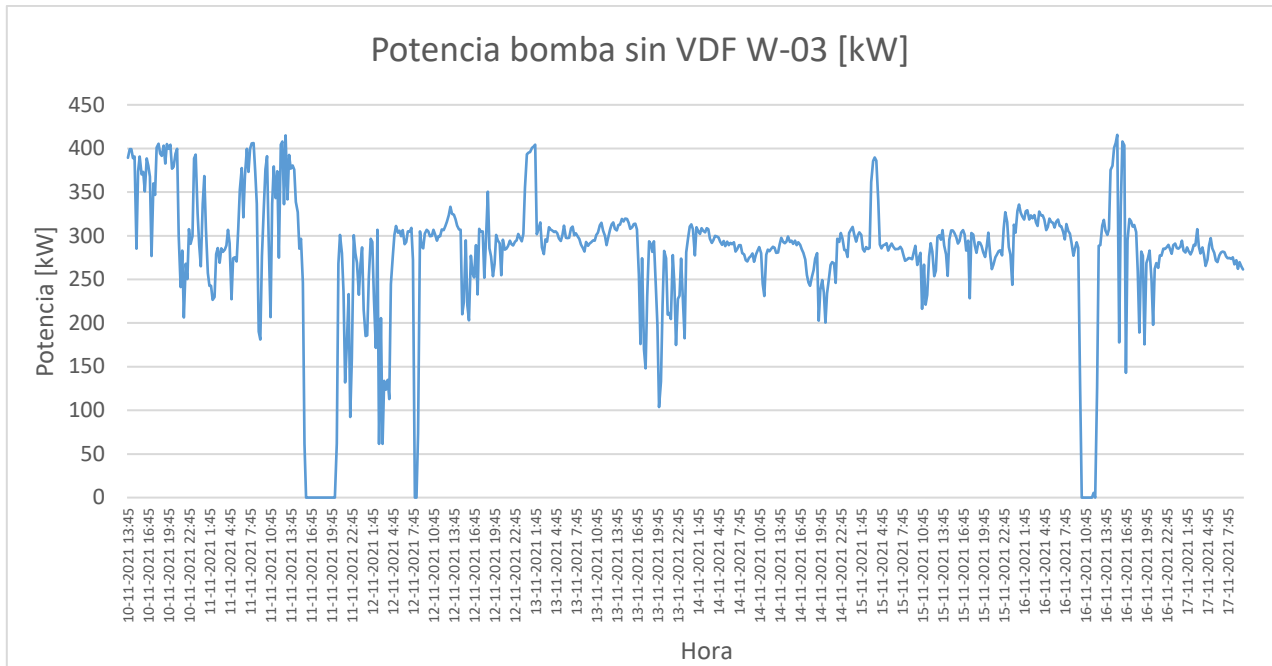


Gráfico 1: Potencia eléctrica bomba sin VDF.

Para el caso con VDF las mediciones se realizaron en la bomba W-02, sus mediciones de potencia eléctrica se aprecian en el Gráfico 2.

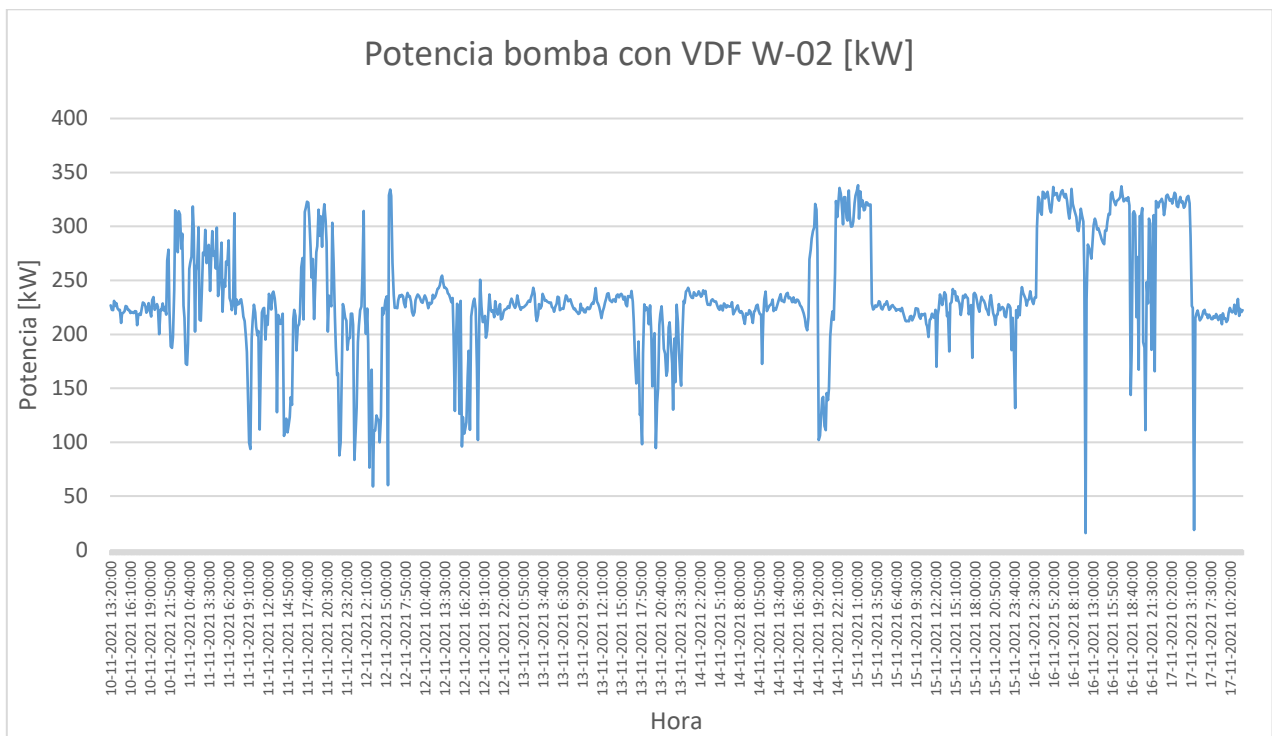


Gráfico 2: Potencia eléctrica bomba con VDF

En una primera instancia, se puede apreciar que la bomba que cuenta con el VDF presenta consumos energéticos menores que la bomba que no tiene un variador instalado. La potencia promedio de la bomba con VDF es de 235 kW y máxima es de 338 kW, mientras que en la bomba sin VDF, la potencia promedio es de 278 kW media y una máxima de 416 kW.

La potencia eléctrica de los motores a su capacidad nominal es de 485 kW aproximadamente (potencia nominal dividido por la eficiencia), el factor de carga promedio de los motores eléctricos son de un 48% y un 66% respectivamente, lo que permite mantener el rendimiento establecido por el diseño del motor.

5 Estimación de consumo de energía con VDF

Para estimar el consumo que tendría la bomba al incorporar un VDF, se utilizaron los métodos. El primer método es teórico, el cual se basa en la ley de afinidad de bombas, mientras que en el segundo método se basa en los valores de potencia medidos para distintos puntos de operación de la bomba con VDF, los cuales se aplican a la bomba sin VDF.

5.1 Ley de afinidad de bombas

La ley de afinidad aplicada a bombas centrifugas, establece que, el caudal es proporcional a la velocidad de giro del eje, por lo que una modificación en el caudal o velocidad se puede expresar según la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

Donde:

Q: es el caudal en metros cúbicos por hora (m³/h)

v: es la velocidad del eje en revoluciones por minuto (rpm).

Adicionalmente se establece que, al cambiar la velocidad de giro del eje, la potencia eléctrica del motor de la bomba varía de forma exponencial en el tercer orden. En otras palabras, la potencia eléctrica absorbida por el motor de la bomba es proporcional al cubo de la velocidad del eje, y se expresa por medio de la siguiente ecuación.

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^3$$

Donde:

P: es la potencia eléctrica del motor en kilo Watts (kW)

V: es la velocidad del eje en revoluciones por minuto (rpm).

Para efectuar el análisis, MVC proporcionó los datos de caudal real de la bomba sin VDF promedio cada 15 minutos, para el mismo período en que se realizaron las mediciones eléctricas.

Para efectos de la estimación de ahorros, se supondrá que el régimen de operación se comporta de igual forma durante el año. Para el caso de instalar el VDF, se supone que existe una menor variabilidad en el caudal, por lo que se utiliza un promedio móvil de una hora, es decir el valor de caudal con VDF se calcula como el promedio de cuatro mediciones de caudal (cada 15 minutos). En el

Gráfico 3 se presenta el caudal medido (Q real) y el caudal ajustado para el caso de que se instale un VDF (Q VDF). En el Gráfico 3, se presentan ambos caudales.

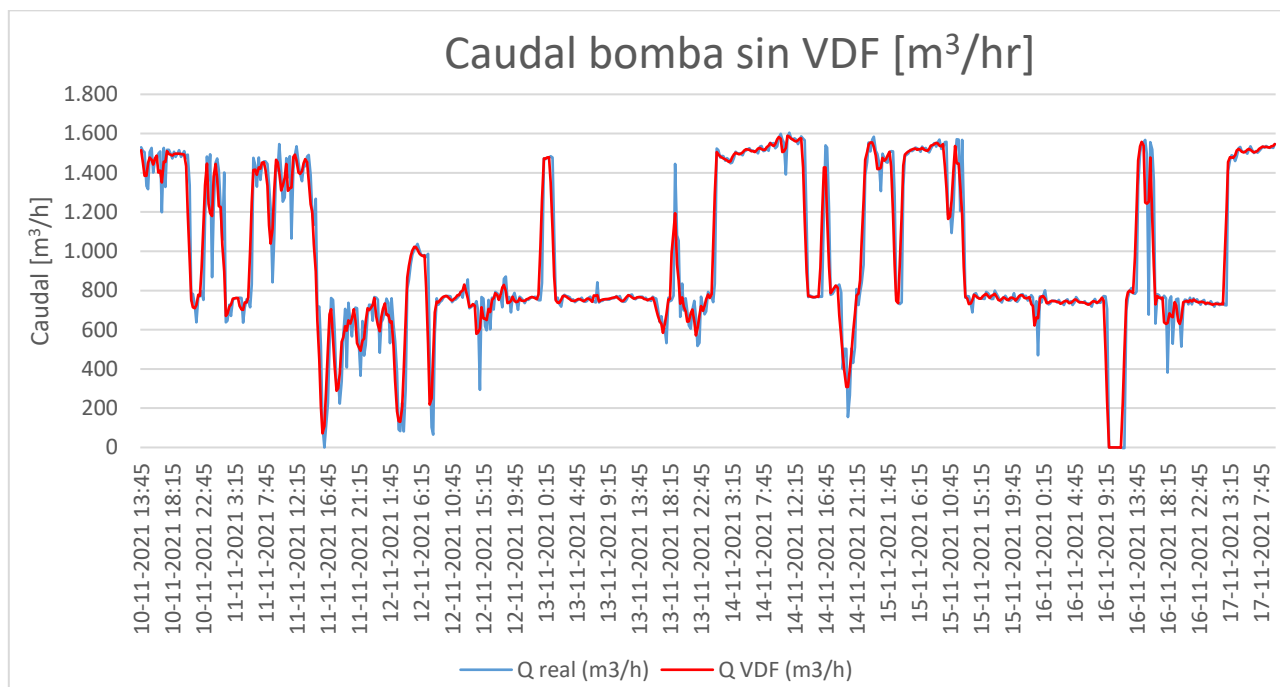


Gráfico 3: Caudal bomba sin VDF

Según los datos entregados, se aprecia que durante el régimen de operación la bomba entrega caudales cercanos 1.500 m³/h cuando está a plena capacidad (aporta a dos líneas de pulpa) y también opera a media capacidad (aporta a una línea de pulpa) con un caudal cercano a 700 m³/h, según los requerimientos del proceso.

Para estimar la potencia teórica en el caso de que se instale el VDF, se consideró la velocidad nominal de la bomba de 632,4 rpm y una reducción de velocidad de la bomba de forma proporcional a la reducción de caudal. Según los datos obtenidos, se utilizó como caudal máximo el promedio de los 10 valores más altos, que corresponde a 1493 m³/h, los que a su vez promediaron una potencia de 408 kW.

Además, para este análisis, se consideró que el variador de frecuencia tiene un 2% de pérdidas.

De esta forma la potencia con VDF se estima de la siguiente forma

$$v_i = v_{nominal} * \left(\frac{Q_i}{Q_{máximo}} \right)$$

Donde

v_i : velocidad de la bomba en rpm para cada medición

$v_{nominal}$: velocidad nominal de la bomba de 632,4 rpm

Q_i : caudal de la bomba en cada medición

$Q_{máximo}$: caudal máximo medido de 1493 m³/h

Una vez obtenida la velocidad para cada intervalo de medición, se calculó la potencia según la siguiente ecuación:

$$P_i = P_{max} * \left(\frac{v_i}{v_{nominal}} \right)^3$$

Donde

P_i : Potencia de la bomba en rpm para cada medición

P_{max} : Potencia máxima medida de 408 kW

v_i : velocidad estimada para cada medición en rpm

$v_{nominal}$: velocidad nominal de la bomba de 632,4 rpm

Además, para este análisis, se consideró que el variador de frecuencia tiene un 2% de pérdidas.

Las potencias medidas sin VDF y las potencias calculadas para el caso de que se instale un VDF se presentan en el Gráfico 4.

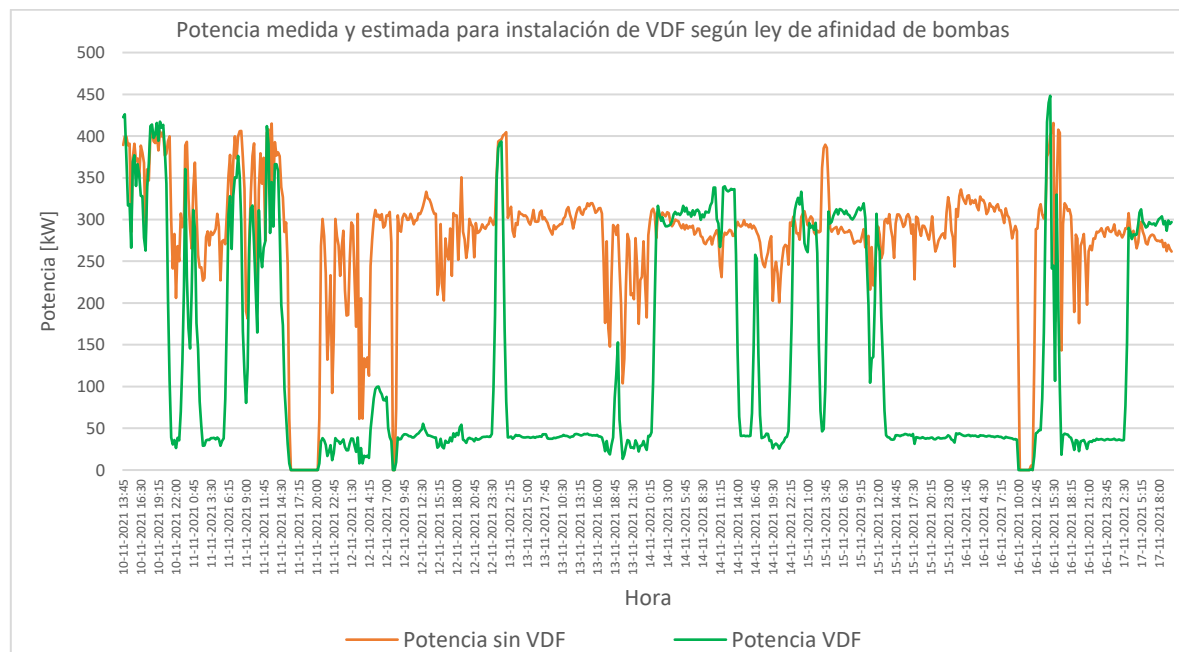


Gráfico 4: Potencia medida y estimada a partir de la instalación de un VDF

En este caso la potencia medida sin VDF y la estimada, se asemejan cuando la bomba opera cerca de su caudal nominal, pero disminuiría a considerablemente cuando la bomba opera a un 50% de su caudal nominal.

La energía consumida es el área bajo la curva respectiva. Durante el período de estudio, el ahorro de energía estimado por la instalación del VDF corresponde a un 53,94%.

Según la información entregada por MVC, la bomba sin VDF con mayor tiempo de operación es la W-01, proyectándose un total de 7.572 horas al año. De esta forma el consumo de energía anual

para la bomba sin VDF es de 2.201,5 MWh, mientras que si se instala un VDF el consumo sería de 1.014,1 MWh.

Este ahorro corresponde al máximo potencial que se puede obtener si el VDF puede modular la velocidad de acuerdo con el caudal requerido por el sistema

5.2 Método empírico

Dado que existen bombas de similares características con VDF, se analizó el comportamiento de la potencia para los distintos niveles de carga, según las mediciones de energía realizadas y los datos de caudal entregados por MVC.

Este análisis se basó en la potencia real consumida por la bomba W-02 para distintos niveles de caudal. La operación de la bomba se clasificó en intervalos de 100 m³/h, donde se estableció el caudal promedio y potencia promedio para cada intervalo. Posteriormente se calculó el consumo específico de energía (CEE) para impulsar un metro cúbico mediante la siguiente ecuación:

$$CEE = \frac{P_i}{Q_i} * 1000$$

Donde:

CEE: Consumo específico de energía en Wh/m³

P_i: Potencia promedio del intervalo i en kW

Q_i: Caudal promedio del intervalo i en m³/h

En la Tabla 2 y el Gráfico 5 se presenta el CEE para la bomba con VDF (W-02), además se incluye el CEE medido de la bomba sin VDF (W-01) y la estimación de CEE a partir de la ley de afinidad de bombas.

Rango	Consumo específico de energía (CEE) expresado en Wh/m³		
	Bomba con VDF (W-02)	Bomba sin VDF (W-03)	Ley afinidad
]300;400]	287	325	33
]400;500]	249	456	50
]500;600]	266	282	35
]600;700]	278	336	44
]700;800]	303	382	55
]800;900]	254	340	83
]900;1000]	185	311	94
]1000;1100]	188	266	101
]1100;1200]	191	255	134
]1200;1300]	185	222	124
]1300;1400]	202	259	194
]1400;1500]	207	230	214
]1500;1600]	176	196	207

Tabla 2: Consumo específico de energía [Wh/m³]

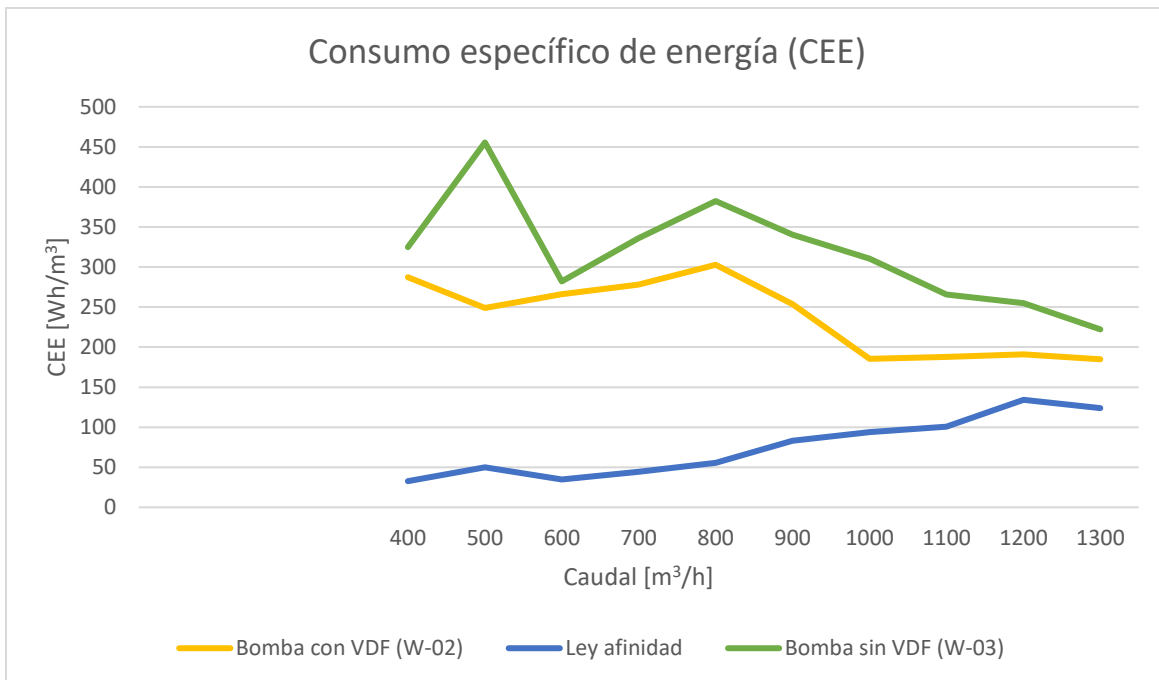


Gráfico 5: Consumo específico de energía

En el Gráfico 5 se puede apreciar que el CEE es similar en todos los casos cuando la bomba opera cerca de su caudal nominal. Cuando el caudal disminuye, el CEE de la bomba sin VDF presenta mayores valores. La bomba con VDF (W-02) presenta valores de CEE menores, mientras que los CEE calculados a partir de la ley de afinidad de bombas presentan los valores más bajos.

Para estimar la potencia empírica que consumiría la bomba al instalar el VDF, se utilizó la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{Q_i * CEE}{1000}$$

Donde:

P_i : Potencia promedio del intervalo i en kWh

Q_i : Caudal promedio del intervalo i en m³/h

CEE: Consumo específico de energía en Wh/m³

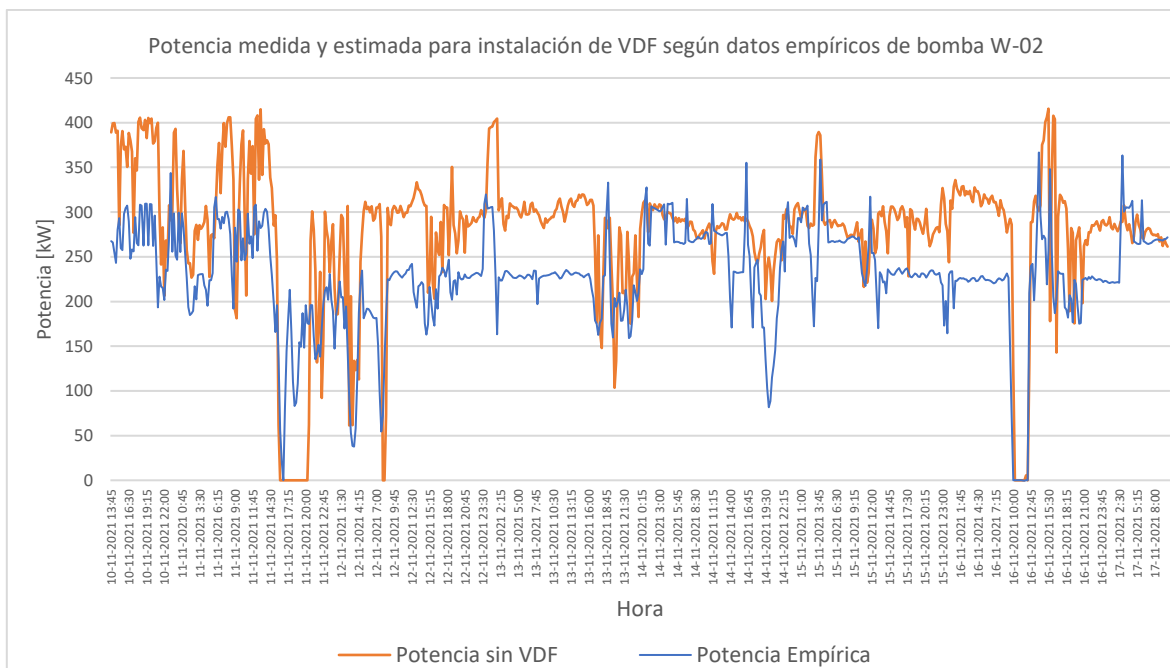


Gráfico 6: Potencia medida y estimada a partir de datos de W-02

En este caso la potencia la potencia medida sin VDF y la estimada de forma empírica, se asemejan cuando la bomba opera cerca de su caudal nominal, pero disminuiría considerablemente cuando la bomba opera a un 50% de su caudal nominal. La energía consumida es el área bajo la curva respectiva. Durante el período de estudio, el ahorro de energía por la instalación del VDF corresponde a un 17,51%.

Según la información entregada por MVC, la bomba sin VDF con mayor tiempo de operación es la W-01, proyectándose un total de 7.572 horas al año. De esta forma el consumo de energía anual para la bomba sin VDF es de 2.201,5 MWh, mientras que si se instala un VDF el consumo sería de 1.816,1 MWh.

Este ahorro corresponde al potencial que se puede obtener si el VDF puede modular la velocidad de forma similar a como lo realiza la bomba W-02.

6 Ahorros de energía

La Tabla 3 presenta un resumen de los consumos de energía de la bomba sin VDF y las estimaciones para la instalación de VDF realizadas con la ley de afinidad de bombas y de forma empírica

	Bomba sin VDF [kWh]	Bomba con VDF (ley de afinidad) [kWh]	Bomba con VDF (empírico) [kWh]
Horas operación año	7.572	7.572	7.572
Energía anual consumida (kWh/año)	2.201.520	1.014.073	1.816.103
Ahorro anual (kWh/año)	-	1.187.447	385.417
Ahorro anual (%)	-	53,94%	17,51%

Tabla 3: Resumen consumos de energía

7 Consideraciones para la filosofía de control del VDF

Para la instalación del VDF se recomienda efectuar una revisión de la filosofía de control actual, especialmente cuando se realiza la disminución del caudal mediante el cierre de una de las válvulas.

Para utilizar el máximo potencial de ahorros del sistema con VDF, la disminución del caudal debiera ser realizada mediante la reducción de la velocidad de la bomba, manteniendo ambas válvulas abiertas.

8 Inversión

Para determinar el monto de inversión se consideró un variador de frecuencia PowerFlex 755 de Allen-Bradley (perteneciente al grupo Rockwell Automation), el cual es representado en Chile por la empresa precisión. Este VDF es similar a los existentes en MVC y se considera como un equipo “heavy duty”.

En la tabla xx se presentan los montos asociados a la implementación del variador de frecuencia.

Ítem	Valor (USD)	Observaciones
VDF PowerFlex 755	\$77.561	Cotización realizada por empresa Precisión.
Ingeniería detalles	\$10.000	Debe incluir estudio de filosofía de control, programación del VDF y condiciones de montaje.
Traslado	\$4.000	Región metropolitana a instalaciones MVC.
Cables y materiales	\$10.000	Cables de poder deben ser apantallados. Puede requerir cambio de cables existentes.
Instalación y puesta en marcha	\$2.000	Considera tres días de trabajo.
Total inversión (USD)	\$103.561	

Tabla 4: Desglose monto de inversión

9 Evaluación Económica

9.1 Criterios para evaluación económica

Para realizar la evaluación económica se utilizaron los siguientes parámetros:

- Tasa de descuento: 10%
- Horizonte de evaluación: 10 años
- Valor de salvamento del activo: 20% del monto de inversión
- Precio de energía (referencial): 92 USD/MWh
- Impuesto: 25%
- Depreciación: 5 años

La evaluación económica considera la determinación del Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Período de Recuperación de la Inversión (PRI) simple².

² PRI simple, no considera tasa de descuento.

9.2 Evaluación ley de afinidad de bombas

Para efectuar la evaluación económica considerando los ahorros estimados a partir de la ley de afinidad de bombas, se consideran 1.187 MWh anuales, con un valor de USD 92 por cada MWh, lo que equivale a USD 109.245.

Los resultados de la evaluación económica son:

- VAN: USD 398.498
- TIR: 81%
- PRI: 1,19 años

9.3 Evaluación Método Empírico

Para efectuar la evaluación económica considerando los ahorros estimados a partir de la ley de afinidad de bombas, se consideran 385 MWh anuales, con un valor de USD92 por cada MWh, lo que equivale a USD 35.458.

Los resultados de la evaluación económica son:

- VAN: USD 73.486
- TIR: 26%
- PRI: 3,26 años

9.4 Análisis de sensibilidad

Dado que existen dos escenarios de ahorro y que algunos de los costos relacionados con la compra, instalación y puesta en marcha del VDF, se analizaron los montos máximos de inversión para los dos casos evaluados, de modo que el VAN no sea menor que cero.

Los montos máximos de inversión son:

- Caso ley de afinidad de bombas: USD 496.783
- Caso método empírico: USD 188.194

10 Conclusiones

La determinación de los potenciales ahorros al instalar un VDF en la bomba Warman W-01, se realizó utilizando dos métodos. De forma tradicional se utilizó la ley de afinidad de bombas, obteniendo un 53,94%, mientras con datos de funcionamiento real de una bomba con VDF, se estimó un ahorro de energía de un 17,51%.

De esta forma se puede establecer que se tiene un potencial teórico del 53,94%, el cual podrá ser alcanzado, en mayor medida, si se regula el caudal mediante la variación de la velocidad de la bomba en vez de cerrar una de las válvulas.

Para efectos de la evaluación económica se puede considerar un ahorro mínimo de 17,51% al realizar el proyecto.

Para cualquiera de los dos escenarios, los indicadores económicos (VAN, TIR y PRI), arrojan valores positivos.

En el caso de que los costos de inversión incrementen por sobre los USD 103.561, se debe considerar que el VAN sigue siendo positivo hasta los USD 496.783 si se estiman los ahorros mediante la ley de afinidad de bombas. Por otro lado, si se consideran los datos empíricos, el VAN sigue siendo positivo hasta una inversión de USD 188.194.

Los aportes ambientales del proyecto se relacionan con la disminución de gases efecto invernadero (GEI) a la atmósfera asociados al consumo de electricidad proveniente del Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Para este efecto se utilizó el factor de emisión promedio del año 2021, de 0,3966 tCO₂/MWh, según la Comisión Nacional de Energía (CNE). Si se multiplica este valor por la cantidad de energía ahorrada al año, se obtienen las toneladas de dióxido de carbono equivalente que se dejarían de emitir a la atmósfera en caso de concretarse el proyecto.

Para el método teórico, los ahorros de energía serían de 1.187 MWh anuales, por lo que la reducción de GEI para este caso es de **470,94 tCO₂** al año. Para el caso empírico, los ahorros energéticos corresponden a 385,42 MWh anuales, lo que significa una reducción de GEI de **152,862 tCO₂** cada año.