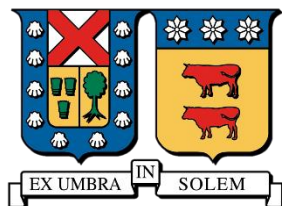


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO – CHILE



**“DESARROLLO DE PROPUESTAS
METODOLÓGICAS PARA OPTIMIZAR LA
CAPACIDAD PRODUCTIVA Y EFICIENCIA
HÍDRICA EN EMPRESA SANITARIA”**

JUAN PABLO DURÁN VALLEJO
MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: MG.-ING. JAIME ESPINOZA S.
PROFESOR CORREFERENTE: ING. IGNACIO JAINAGA S.

SEPTIEMBRE - 2023

1 Agradecimientos

A mi familia, especialmente mi mamá, papá, hermana y perrita, por su apoyo y amor incondicional.
A Pablo Alfaro, Ignacio Jainaga, y Jaime Espinoza, por apoyarme y motivarme para llevar a cabo este trabajo.

A mis amigos, a la Quinta Pluma, y mis futuros colegas, por acompañarme todos estos años.

Les agradezco de todo corazón.

2 Resumen

Desde hace más de una década, la zona central de Chile se ha visto en una situación de sequía. Esto se evidencia en una disminución considerable en la cantidad y frecuencia de las precipitaciones, como uno de los impactos del cambio climático en el país.

En la quinta y cuarta región, la empresa sanitaria Esval S.A, y su filial Aguas del Valle S.A, se encargan de la captación y tratamiento del agua cruda, del almacenamiento y distribución del agua potable y de la depuración y reutilización de aguas servidas. Bajo este contexto de sequía, la empresa tiene gran interés en optimizar sus sistemas de captación para aprovechar de mejor forma este recurso imprescindible para la vida pero que cada vez es de más difícil acceso.

El presente trabajo ofrece distintas propuestas de mejora y eficiencia hídrica a algunos de los sistemas productivos de dicha empresa, específicamente en los equipos de motobombas de pozo profundo y los métodos actuales con los que se solucionan sus problemas. Estas propuestas van de la mano con una evaluación económica y una por riesgo para demostrar los ahorros que se pueden esperar al aplicar estas propuestas. Se ordena de modo que sea comprensible al ser leído de comienzo a fin.

Se comienza por explicar en mayor detalle el contexto, los objetivos y alcance del trabajo. Se continúa por presentar la teoría detrás de los ciclos del agua, del diseño y funcionamiento de los pozos, de los principios físicos y matemáticos que rigen las motobombas, de la filosofía de operación de estos equipos y de los métodos aplicados para el estudio de los casos relevantes para este trabajo.

Luego se presentan los análisis para cuatro casos de falla en sistemas productivos de agua potable de la empresa. Cada caso incluye un diagnóstico de la situación actual, un análisis técnico, donde se proponen las mejoras dependiendo del caso, y una evaluación económica. Sólo un caso no tiene evaluación económica, lo que se reemplaza por una evaluación por riesgo, que se aplica luego al resto de casos del trabajo. Apoyándose en el análisis de estos casos, se proponen nuevos indicadores, mediciones de parámetros y recomendaciones, que buscan apoyar a la empresa para mejorar la gestión de estos activos.

Se propone que, en sistemas de varios pozos en paralelo, independizar los pozos e instalar una sentina con bombas que impulsen hasta el estanque puede permitir una reducción en los costos operacionales sin reducir en gran medida el caudal total, incluso mejorando la eficiencia de las bombas y por lo tanto su vida útil. Estas ventajas son más notorias cuando hay más de tres pozos en paralelo. Además, esta nueva configuración permite que a futuro se pueda elegir una bomba adecuada que permita entregar más caudal sin la necesidad de construir nuevos pozos, siempre y cuando el acuífero tenga la capacidad necesaria.

En conjunto, las propuestas entregan un aumento del caudal promedio de alrededor de $100 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$ y un ahorro en dos años de alrededor de 90.000 [USD] en costos operacionales.

3 Abstract

For over a decade, the central zone of Chile has experienced a drought. This is evidenced by a considerable decrease in the frequency and quantity of precipitations, as one of the effects of climate change in the country.

In the fifth and fourth region of the country, the company Esva S.A, and its subsidiary Aguas del Valle S.A, manage the captation and treatment of raw water, storage and distribution of drinking water, and depuration and reutilization of waste water. Under the context of this drought, the company has a great interest in improving its captation systems to make the most of this life essential resource, that is increasingly harder to obtain.

The present work offers different proposals for improvement and efficiency to some of the productive systems from said company, specifically to submersible pumps for deep wells and its methods used to solve their failures. These proposals are accompanied with an economic evaluation and a risk evaluation to demonstrate the expected saving that can be achieved when applied. It is organized to be comprehensible as read from start to finish.

It starts by explaining in greater detail its context, objectives and scope. It continues by presenting the theory behind the cycles of water, the design and operation of deep wells, the principles of mathematics and physics that govern submersible pumps, the philosophy of operation of these equipments and the methods applied to the study of the relevant cases for this work.

Further, the analysis of four cases of failure in the company's productive systems are presented. Each case includes a current situation diagnosis, a technical analysis, where improvements are proposed depending on each case, and an economic evaluation. Only one case doesn't have an economic evaluation, which is replaced by a risk evaluation, later applied to the rest of the cases from this work. Supported by the analysis of these cases, new indicators, new measurement of parameters and some recommendations are proposed, looking to support the company's interest in the improvement of their asset management.

It is proposed that, in systems consisting of many wells in parallel, making them independent of each other and installing a provisory water tank with a pump that boosts the water until the main tank can allow a reduction in operating costs without reducing the total system flow, while maintaining or even improving the pumps efficiency, and by extensión their life cycle. These advantages are more apparent when there are four or more pumps in a system. This new configuration also allows the system to be upgraded later with new pumps that can achieve even greater flow without the need of building new wells, as long as the aquifer has the necessary capacity.

Overall, the proposals show an increase in flow of approximately $100 \left[\frac{m^3}{h} \right]$ and savings of approximately 90.000 [USD] in operational costs over a two year period.

4 Glosario

A: Área interna de una tubería en $[m^2]$

A_{agua} : Ahorro por volumen recuperado de agua en $[\frac{CLP}{\text{año}}]$

$A_{\text{refrigeración}}$: Área transversal entre el exterior del motor y el interior de la camisa refrigerante en $[m^2]$

Aljibe: Camiones cuya función es transportar grandes cantidades de agua para suplir la demanda en zonas de escasez hídrica

A_{seq} : Ahorro por evitar soluciones alternativas en $[\frac{CLP}{\text{año}}]$

BEP: Best Efficiency Point, el punto de mayor eficiencia para la bomba

C_{altern} : Costo de solución alternativa, generalmente camiones aljibe, en $[\frac{CLP}{m^3}]$

C_i : Coeficiente de Hazen Williams en la sección i [-]

C_{op} : Costos operacionales en [CLP]

D_i : Diámetro interno de la sección i en [m]

f: Frecuencia en [Hz]

f_a : Factor de ahorro por recuperación de agua en $[\frac{CLP}{m^3}]$

f_e : Factor energético en $[\frac{CLP}{kWh}]$

g: Aceleración de la gravedad en $[\frac{m}{s^2}]$

h: Altura en [m]

H: Cabeza hidráulica, también llamada presión, en [m] de agua

H_f : Pérdidas de carga por fricción con la tubería en [m]

H_p : Pérdidas de carga por diferencias de presión, en [m]

H_s : Pérdidas de carga por diferencias de altura, en [m]

H_v : Pérdidas de carga por fricción con accesorios, en [m]

J: Factor de pérdida de carga de Hazen Williams [-]

K_i : Coeficiente de pérdida de carga del accesorio i [-]

L_i : Largo de la tubería en la sección i en [m]

Motobomba: Equipo de un motor y una bomba acoplados en una unidad

n: Revoluciones de giro en [rpm]

ND: Nivel dinámico en [m]

NE: Nivel estático en [m]

P: Potencia en [kW]

p: Presión en [m] de agua o en [Pa]

P_{bomba} : Potencia de la bomba, sin incluir eficiencias del motor y otros componentes, en [kW]

P_h : Potencia hidráulica teórica para mover una cantidad de agua, en [kW]

Piping: Sistema de tuberías

P_{real} : Potencia de la bomba, medida en [kW]

P_s : Potencia específica en $\left[\frac{\text{kW}}{\text{L/s}}\right]$

Q: Caudal, en $\left[\frac{\text{L}}{\text{s}}\right]$

Q_{BEP} : Caudal correspondiente al punto de mayor eficiencia para la bomba en $\left[\frac{\text{L}}{\text{s}}\right]$

Q_{fin} : Caudal tras intervención en $\left[\frac{\text{L}}{\text{s}}\right]$

Q_{ini} : Caudal antes de intervención en $\left[\frac{\text{L}}{\text{s}}\right]$

SPAP: Sistema de producción de agua potable

t: Tiempo de operación en [hr]

v: Velocidad del agua en $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

v_i : Velocidad del agua en el tramo i en $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

V_{recup} : Volumen de agua recuperado en $\left[\frac{\text{m}^3}{\text{año}}\right]$

$V_{\text{refrigeración}}$: Velocidad del agua por fuera del motor en $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$

Δh : Diferencia de altura en [m]

$\eta_{\text{hidráulica}}$: Eficiencia de la bomba [-]

η_{motor} : Eficiencia del motor [-]

ρ : Densidad del líquido en $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

5 Índice

1	Agradecimientos	2
2	Resumen.....	3
3	Abstract.....	4
4	Glosario.....	5
5	Índice.....	7
6	Índice de figuras.....	10
7	Índice de tablas	12
8	Introducción	13
9	Objetivos	14
9.1	Objetivos generales	14
9.2	Objetivos específicos	14
10	Marco teórico	15
10.1	Ciclo natural del agua	15
10.2	Ciclo urbano del agua	15
10.3	Principios fundamentales de los pozos	17
10.4	Pruebas de gasto variable, gasto constante y curva de agotamiento	19
10.4.1	Prueba de gasto variable	19
10.4.2	Curva de agotamiento	20
10.4.3	Prueba de gasto constante	20
10.5	Principios de funcionamiento de las bombas	21
10.5.1	Partes de una bomba	22
10.5.2	Principios de mecánica de fluidos.....	22
10.5.3	Principios aplicados a las motobombas.....	25
10.5.4	Pérdidas de carga y ecuación de Hazen-Williams	26
10.6	Familia de curvas	28
10.6.1	Curva H-Q.....	28
10.6.2	Curva del sistema.....	30
10.6.3	Punto de operación.....	31
10.6.4	Curva de potencia.....	32
10.6.5	Curva de eficiencia.....	33
10.7	Tuberías.....	35
10.8	Accesorios.....	36
10.9	Motores eléctricos y variadores de frecuencia	37

10.10	Leyes de afinidad	37
10.11	Bombas en paralelo.....	39
10.12	Rango de operación y confiabilidad.....	40
10.13	Modelos hidráulicos.....	42
10.14	Refrigeración del motor	42
10.15	Evaluación económica	45
10.16	Riesgo	46
10.17	Optimización y eficiencia	48
11	Caso 1: SPAP San Esteban	49
11.1	Diagnóstico de situación actual.....	49
11.2	Análisis técnico.....	50
11.3	Evaluación económica	52
12	Caso 2: SPAP Las Delicias	54
12.1	Diagnóstico de la situación actual.....	54
12.2	Análisis técnico.....	55
12.3	Evaluación económica	56
13	Caso 3: SPAP Liceo.....	58
13.1	Diagnóstico de la situación actual.....	58
13.2	Análisis técnico.....	58
13.3	Evaluación económica	60
14	Caso 4: SPAP El Tambo	62
14.1	Diagnóstico de la situación actual.....	62
14.2	Análisis técnico.....	64
15	Evaluación por riesgo.....	67
16	Propuestas de indicadores, parámetros de medición y recomendaciones	70
16.1	Indicadores.....	70
16.1.1	Caudal específico	70
16.1.2	Potencia específica.....	70
16.2	Parámetros de medición.....	71
16.2.1	Presión a la salida de la bomba	71
16.2.2	Frecuencia del motor.....	71
16.2.3	Potencia del motor	71
16.3	Recomendaciones	72
16.3.1	Rango de operación.....	72
16.3.2	Holgura dentro del pozo.....	72

17	Conclusiones	75
18	Referencias.....	78
19	Anexos	80
19.1	Anexo A: San Esteban	80
19.2	Anexo B: Las Delicias	88
19.3	Anexo C: Liceo	97
19.4	Anexo D: El Tambo	102

6 Índice de figuras

Figura 1: Ciclo natural del agua.....	15
Figura 2: Ciclo urbano del agua potable.....	16
Figura 3: Representación simplificada del acuífero y del nivel freático.....	17
Figura 4: Diagrama de un pozo.....	18
Figura 5: Ejemplo de prueba de gasto variable.....	19
Figura 6: Ejemplo de curva de agotamiento.....	20
Figura 7: Ejemplo de prueba de gasto constante.....	21
Figura 8: Diagrama de una motobomba en un pozo.....	21
Figura 9: Esquema de una bomba centrífuga.....	22
Figura 10: Principio de Bernoulli.....	24
Figura 11: Esquema del movimiento de líquido al interior de una bomba centrífuga.....	25
Figura 12: Sección de una bomba vertical multietapa.....	26
Figura 13: Curva H-Q de la bomba.....	28
Figura 14: Curva de bomba multietapa.....	30
Figura 15: Presiones del sistema en unidades imperiales.....	31
Figura 16: Curva del sistema en unidades imperiales.....	31
Figura 17: Punto de operación.....	32
Figura 18: Ejemplo de una curva de potencia.....	33
Figura 19: Ejemplo de familia de curvas para una bomba de sumidero.....	34
Figura 20: Tipos de válvula. Elaboración propia.....	36
Figura 21: Variación porcentual de eficiencia del motor en función de carga porcentual al usar variador de frecuencia.....	37
Figura 22: Curva H-Q de bombas en paralelo.....	39
Figura 23: Curva H-Q de bombas distintas y en paralelo.....	40
Figura 24: Punto de operación de bombas en paralelo.....	40
Figura 25: Diagrama de fuerzas radiales en una bomba.....	41
Figura 26: Confiabilidad de la bomba en función de su rango de operación.....	41
Figura 27: Movimiento del agua por arriba del motor. Elaboración propia.....	43
Figura 28: Función de la camisa refrigerante.....	43
Figura 29: Diagrama de situación actual en San Esteban.....	49
Figura 30: Diagramas de propuestas San Esteban.....	50
Figura 31: Operación no satisfactoria de bombas en paralelo.....	51
Figura 32: Diagrama de situación actual en Vicuña.....	54
Figura 33: Diagrama de situación actual en Liceo Nogales.....	58
Figura 34: Operación anterior Liceo Nogales.....	59
Figura 35: Diagrama de pozos 4 y 5 SPAP El Tambo.....	62
Figura 36: Comparación entre pozos P4 y P5 El Tambo.....	63
Figura 37: Fotografía satelital de pozos en SPAP El Tambo. De la empresa.....	65
Figura 38: Esquema de los componentes dentro del pozo.....	73
Figura 39: Curvas H-Q de P758 según frecuencia, independiente.....	80
Figura 40: Curvas de potencia y eficiencia P758 según frecuencia.....	81
Figura 41: Curvas H-Q de P4 según frecuencia, independiente.....	82
Figura 42: Curvas de potencia y eficiencia P4 según frecuencia.....	83
Figura 43: Curvas H-Q de P3 (San Esteban) según frecuencia, independiente.....	84

Figura 44: Curvas de potencia y eficiencia P3 (San Esteban) según frecuencia.....	85
Figura 45: Curvas H-Q de P3(Las Delicias) según frecuencia, independiente.....	88
Figura 46:Curvas de potencia y eficiencia P3 (Las Delicias) según frecuencia	89
Figura 47: Curvas H-Q de P586 según frecuencia, independiente	90
Figura 48: Curvas de potencia y eficiencia P586 según frecuencia.....	91
Figura 49: Curvas H-Q de P587 según frecuencia, independiente	92
Figura 50: Curvas de potencia y eficiencia P587 según frecuencia.....	93
Figura 51: Prueba de gasto variable Liceo Nogales.....	97
Figura 52: Curva de agotamiento Liceo Nogales.....	98
Figura 53: Prueba de gasto constante a 15 L/s, Liceo Nogales.....	98
Figura 54: Curvas H-Q y de sistema con nueva propuesta	99
Figura 55: Caudal modelo hidráulico El Tambo, 40 [Hz]	103
Figura 56: Velocidad modelo hidráulico El Tambo, 40 [Hz]	103

7 Índice de tablas

Tabla 1: Rangos de velocidades para distintas aplicaciones de agua.....	35
Tabla 2: Velocidad mínima del agua para refrigerar el motor	44
Tabla 3: Ejemplo de matriz de riesgo	47
Tabla 4: Situación actual San Esteban	49
Tabla 5: Resumen de bombas de San Esteban independientes, opción A	51
Tabla 6: Resumen de bombas P3 y P4 en paralelo, opción B.....	52
Tabla 7: Resumen de bombas P758 y P4 en paralelo, opción C.....	52
Tabla 8: Resumen evaluación económica San Esteban	53
Tabla 9: Resumen de puntos de operación actuales en Las Delicias	55
Tabla 10: Resumen de nuevos puntos de operación Las Delicias.....	55
Tabla 11: Resumen evaluación económica Las Delicias	57
Tabla 12: Puntos y rangos de operación nueva bomba Liceo Nogales.....	60
Tabla 13: Resumen evaluación económica Liceo Nogales.....	61
Tabla 14: Etapas del proyecto en El Tambo	63
Tabla 15: Situación P5 El Tambo	63
Tabla 16: Resumen de modelos hidráulicos El Tambo.....	64
Tabla 17: Resumen de bombas El Tambo	65
Tabla 18: Métrica de probabilidad.....	67
Tabla 19: Métrica de impacto	68
Tabla 20: Matriz de riesgo inherente	69
Tabla 21: Matriz de riesgo residual.....	69
Tabla 22: Matriz de riesgo esperada	69
Tabla 23: Ejemplo de cálculo de instalación en pozo	74
Tabla 24: Rangos de operación de P758 según frecuencia	81
Tabla 25: Rangos de operación P4 según frecuencia.....	83
Tabla 26: Rangos de operación P3 (San Esteban) según frecuencia.....	85
Tabla 27: Evaluación de probabilidad de riesgo en San Esteban.....	86
Tabla 28: Evaluación económica completa SPAP San Esteban	87
Tabla 29: Rangos de operación de P3 (Las Delicias) según frecuencia.....	89
Tabla 30: Rangos de operación de P586 según frecuencia	91
Tabla 31: Rangos de operación de P587 según frecuencia	93
Tabla 32: Evaluación de probabilidad de riesgo en Las Delicias	94
Tabla 33: Evaluación económica optimista completa SPAP Las Delicias	95
Tabla 34: Evaluación económica pesimista completa SPAP Las Delicias	96
Tabla 35: Cálculo de nueva holgura en pozo Liceo.....	100
Tabla 36: Evaluación de probabilidad de riesgo en Liceo	101
Tabla 37: Evaluación económica completa SPAP Liceo	101
Tabla 38: Datos para modelo hidráulico El Tambo	102
Tabla 39: Rango de operación bombas El Tambo	102
Tabla 40: Evaluación de probabilidad de riesgo en El Tambo	104

8 Introducción

El agua es un recurso indispensable para la vida en la tierra. Producto del cambio climático, este recurso ha aumentado su consumo y además se ha dificultado su captación, formando el fenómeno de escasez hídrica que se puede ver a nivel mundial.

Desde el año 2009 se vive en Chile una sequía, descrita incluso como “megasequía” por su larga extensión y duración. Es más, el país es uno de los más afectados por el cambio climático en cuanto al acceso al agua: “Según el último estudio (2019) de World Resources Institute del Pacto Mundial de las Naciones Unidas, 17 países [...] enfrentan un estrés hídrico [...] extremadamente alto. En este informe, Chile se encuentra en el puesto 18”. (Alvarado, 2022)

Dentro de dicho contexto, la empresa sanitaria Esva S.A y su filial Aguas del Valle S.A se encargan de la captación y tratamiento del agua cruda, del almacenamiento y distribución del agua potable y de la depuración y reutilización de aguas servidas en la quinta región del país. Dado a la escasez del recurso hídrico, la empresa tiene gran interés en optimizar sus sistemas para asegurar la continuidad del servicio de agua.

Dentro de dichos sistemas necesarios para la empresa, los sistemas de captación son aquellos que se encargan de extraer agua, sea de fuentes subterráneas o de fuentes superficiales. Posteriormente esta agua pasa por un proceso de tratamiento para potabilizarla, se almacena en estanques y finalmente se distribuye.

Estos sistemas de captación son muy variados, en parte porque sus requerimientos y sus capacidades dependen de la ubicación en la que se encuentren. Los requerimientos dependen del tamaño de la comunidad que se deba abastecer, mientras que las capacidades dependen de las fuentes de agua y de las condiciones del suelo. Por ejemplo, la calidad del agua depende de la ubicación del pozo. Este trabajo se centra en el interés de la Subgerencia de Producción de Esva S.A, específicamente en la Unidad de Fuentes de Abastecimiento, que se dedica a la mantención, optimización y monitoreo en la operación de las fuentes subterráneas de la empresa y su filial Aguas del Valle S.A. El principal enfoque de este trabajo es en un tipo de fuente subterránea, el pozo profundo, que son las fuentes más comunes en la empresa.

Así como los sistemas son variados, así también lo son sus fallas. La condición de los pozos varía según su mantención, las condiciones del suelo y las condiciones del agua, mientras que los equipos de bombeo se ven afectados por las condiciones del sistema hidráulico en el que se encuentran, y las características puntuales del pozo. El resultado es que las propuestas de solución no siempre son evidentes y su incertidumbre es alta.

Estos sistemas comienzan en la motobomba, instalada dentro del pozo y hasta cientos de metros bajo la superficie, que impulsa el agua, muchas veces conectándose con otros pozos. Esta agua luego sigue un proceso de tratamiento, almacenamiento y distribución. Una de las fallas comunes en las motobombas es el sobrecalentamiento del motor, debido a una refrigeración insuficiente. Producto de la sequía, también fallan por un constante descenso del agua de los acuíferos hasta la succión de la bomba, que comienza a aspirar aire. En los sistemas de tubería o piping, pueden provocarse fugas, roturas, lo cual se describe en este trabajo y los métodos que se pueden usar para evitar dichas fallas.

Específicamente, lo que busca este trabajo es entregar propuestas de mejora y optimización para cuatro sistemas de captación de agua, mediante un análisis técnico, una evaluación económica y una evaluación del riesgo. Se ofrecen además otras propuestas, como nuevos indicadores, parámetros de medición y otras recomendaciones, cuyo fin es facilitar, agilizar y reducir la incertidumbre este tipo de trabajos a futuro para la empresa.

9 Objetivos

9.1 Objetivos generales

- Analizar cuatro casos reales de fuentes de abastecimiento para aplicar oportunidades de mejora y optimización en fuentes subterráneas.
- Proponer mejoras en la capacidad productiva, eficiencia hídrica y económica de la empresa basadas en los casos estudiados.
- Evaluar los resultados obtenidos y comparar.

9.2 Objetivos específicos

- Analizar cuatro fallas en sondajes de sistemas de agua potable para determinar las brechas entre la producción esperada y la real.
- Desarrollar propuestas de solución para aumentar la capacidad productiva de la empresa.
- Determinar el impacto de propuestas en eficiencia hídrica.
- Cuantificar el potencial ahorro que se podría generar desde el punto de vista temporal y económico.
- Proponer nuevos indicadores (KPI) y parámetros de medición que permitan cuantificar los resultados de la optimización y mantenimiento.

10 Marco teórico

10.1 Ciclo natural del agua

Antes de hablar del proceso que permite obtener agua en nuestras casas, se debe entender el ciclo natural que sigue el agua. A continuación, se hace una breve y simplificada explicación de este ciclo.

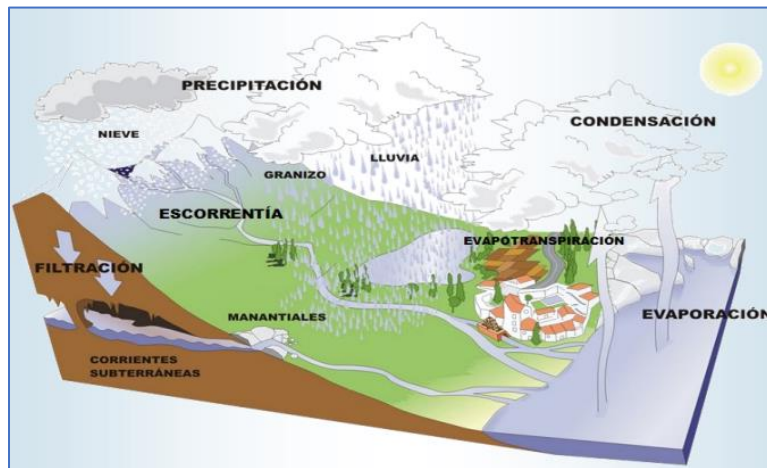


Figura 1: Ciclo natural del agua.¹

1. Evaporación: En el proceso de evaporación, el agua que se encuentra en la superficie de la tierra, calentada por el sol, cambia de estado y se evapora. El vapor de agua sube en nuestra atmósfera hasta formar nubes.
2. Condensación: Estas nubes, conformadas por agua en estado gaseoso, cambia otra vez de estado y se condensa, debido a la caída de presión a mayores alturas.
3. Precipitación: El agua en estado líquido cae de nuevo hacia la tierra.
4. Infiltración: Parte del agua que cae de la precipitación se infiltra por las capas del suelo, en un proceso de infiltración, mientras que otra parte sigue el recorrido hasta el mar, donde comienza de nuevo el ciclo.

El agua líquida se puede recolectar de distintas partes del ciclo, según los métodos que se utilicen. Por ejemplo, existen métodos para recolectar vapor de agua del ambiente y condensarlo. Sin embargo, la mayor parte del agua que se capta para producir agua potable se encuentra en la tercera etapa del ciclo descrito, en la infiltración, y es de donde se recolecta el agua de los pozos.

10.2 Ciclo urbano del agua

El agua que llega a nuestros hogares sigue un largo recorrido. Todo este camino está marcado por distintas etapas, que cambian su composición química y sus propiedades para asegurar que sea apta para el consumo. La Figura 2 muestra estas etapas.

¹ (Ordoñez, 2011)



Figura 2: Ciclo urbano del agua potable.²

1. Captación: En esta etapa el agua, denominada agua cruda, es recolectada desde su fuente y es impulsada por bombas hasta las plantas de tratamiento. Puede ser captación superficial o subterránea.
2. Potabilización: El agua cruda pasa por un tratamiento fisicoquímico que elimina partículas sólidas, en suspensión, y otros elementos no deseados. Para que el agua sea apta para el consumo humano, se incluye un proceso de cloración para eliminar bacterias y evitar enfermedades, y se añade flúor para evitar caries.
3. Almacenamiento: Una vez que se obtiene agua potable, se almacena en estanques, que permiten distribuir luego el agua dependiendo la demanda variable. El almacenamiento también permite afrontar casos de emergencia, por ejemplo, combatir incendios.
4. Distribución: El agua se transporta desde los estanques hacia las viviendas, u otros clientes particulares.
5. Consumo: El agua es usada para el consumo dependiendo de las necesidades del cliente.
6. Alcantarillado: Parte del agua consumida vuelve al sistema por medio del alcantarillado, que recoge el agua usada en el baño, cocina, etc.
7. Depuración: El agua del alcantarillado tiene un tratamiento principalmente físico, donde se separa parte del agua de los desechos provenientes del consumo.
8. Reutilización: En algunos casos, el agua que se trata en la depuración puede ser reutilizada, por ejemplo, como se ve en la Figura 2, en agricultura.
9. Retorno: En otros casos, tras el proceso de depuración, el agua tratada es devuelta al medio natural.

En este trabajo, la etapa de principal atención es la primera, la etapa de captación. Las captaciones se separan en dos tipos, según su ubicación; las captaciones subterráneas y captaciones superficiales. La captación superficial se da en ríos, tranques, y otros cuerpos de agua que se encuentran a la vista, mientras que la captación subterránea incluye distintos sistemas como norias, drenes y pozos, que extraen el agua infiltrada en el subsuelo. Dentro de estos, los pozos son los más comunes.

² (Ciudad, 2016)

Este estudio se centra en cuatro sistemas de pozos que se pueden encontrar en la cuarta y quinta región del país. Antes de hablar de los pozos en particular, se procede a explicar los principios fundamentales que los rigen.

10.3 Principios fundamentales de los pozos

La RAE define un pozo como “Perforación que se hace en la tierra para buscar una vena de agua”. Como se describió en la sección 10.1, como parte del ciclo natural del agua, se puede encontrar agua infiltrada en el suelo, y esta agua se puede aprovechar para la producción de agua potable. El agua subterránea es, de hecho, la principal fuente de agua fresca en el mundo; contiene alrededor de 60 veces la cantidad de agua de todos los ríos y lagos del mundo combinados. (Temming, 2022)

Esto demuestra la importancia de la recolección de aguas subterráneas, sin olvidar que esta agua también forma parte del ciclo natural del agua: “Este ciclo, se produce a través de los procesos de evaporación, condensación, precipitación, sedimentación, la escorrentía, el flujo de la infiltración, la sublimación, la transpiración, la fusión y las aguas subterráneas” (Ordoñez, 2011, pág. 8). Por lo tanto, como es común en los recursos naturales, hay que ser prudente y tener cuidado para no sobreexplotar este recurso. Para lograr la captación de agua de fuentes subterráneas de manera sustentable, hay que entender el funcionamiento de las aguas subterráneas.

Cuando una cantidad importante de agua se acumula bajo el suelo, se le llama acuífero. El acuífero tiene un nivel freático, comúnmente llamado napa subterránea, que corresponde al nivel máximo del acuífero. Este nivel máximo corresponde a la distancia desde la superficie hasta el primer punto donde se detecta agua, como se ve en Figura 3.

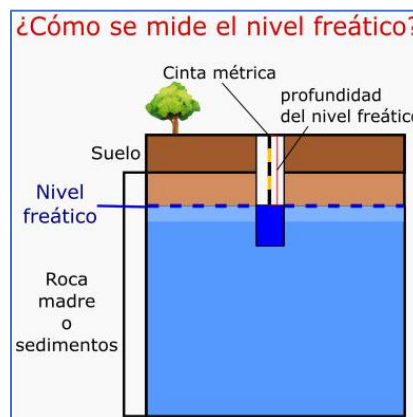


Figura 3: Representación simplificada del acuífero y del nivel freático.³

A medida que se extrae agua del acuífero, su nivel desciende, similar a lo que se podría ver en un vaso al beber de una bombilla. El acuífero se recarga de forma natural, recuperando el nivel perdido: “El nivel del agua en el pozo de bombeo es más bajo que en cualquier otro lugar de formación que rodea a éste, de manera que el agua se desplaza hacia el pozo, tratando de reponer el volumen extraído por la bomba.” (Johnson, 1975, pág.112) La rapidez a la que aumenta o disminuye el nivel depende de varios factores, como la cantidad de agua que se está extrayendo, la permeabilidad, el tamaño del acuífero, etc. Antes de hacer un pozo, se hacen estudios hidrogeológicos en la zona de interés, lo que permite determinar si la zona es o no viable para la extracción del agua subterránea. Algunos de los factores que afectan esto puede ser

³ (Maldonado, 2021)

el tipo de suelo, la profundidad del acuífero, o incluso administración de derechos de agua, es decir permisos legales.

Una vez que se construye el pozo, se hacen más pruebas, llamadas pruebas de bombeo, que permiten visualizar el comportamiento del nivel freático dependiendo del caudal que se extrae. Todo esto se hace para asegurar que no se está extrayendo del acuífero más agua de la que se puede, y así asegurar la sustentabilidad del proyecto. En la sección 10.4 se explican las distintas pruebas de bombeo en mayor detalle.

Para pozos caseros, el agua se puede extraer con mecanismos accionados de forma manual, pero para pozos profundos como los relevantes en este estudio, que pueden llegar hasta más de cien metros de profundidad, se necesitan equipos electromecánicos que permitan levantar toda esta agua hasta la superficie, y más aún, hasta el estanque donde se vaya a almacenar. Los mejores equipos para este fin son las motobombas de pozo profundo.

Al construir el pozo, se hacen perforaciones en diámetros estandarizados según las necesidades del caudal a extraer. Una vez realizada la perforación, se instala una tubería, es denominada tubería de entubamiento. La motobomba está acoplada a ella, y el agua es impulsada desde la motobomba por una tubería menor llamada tubería de impulsión. La tubería de entubamiento tiene filtros, que pueden ser cribas o ranuras, por donde entra el agua desde el acuífero hasta el pozo. Parte del estudio hidrogeológico sirve para determinar donde se instalarán estas cribas para maximizar la captación de agua.

Una vez terminado el pozo, el agua del acuífero llena el pozo hasta cierto nivel, denominado el nivel estático. Cuando la motobomba está en operación, este nivel desciende, hasta un segundo nivel denominado nivel dinámico. Se llama dinámico, porque es un nivel que cambia en el tiempo, tanto por razones naturales como por el caudal que se extrae del pozo.

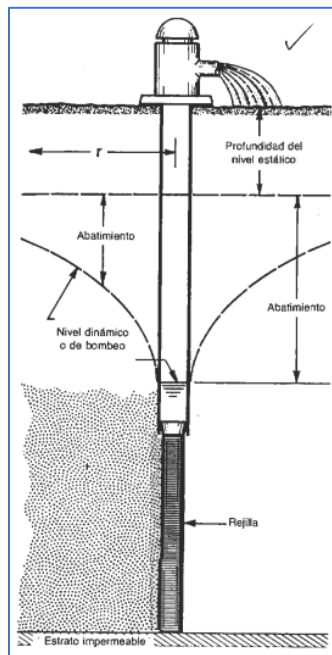


Figura 4: Diagrama de un pozo.⁴

⁴ (Johnson, 1975, pág. 63)

Este nivel dinámico es importante por varias razones. La primera, es que siempre debe monitorearse para asegurarse que nunca se acerque al nivel de la succión de la bomba, para evitar que entre aire a la motobomba y provoque fallos o incluso daño interno. La segunda, es que el nivel dinámico es esencial para calcular los puntos de operación de la motobomba, como se explica en la sección 10.6. La tercera, es que el nivel dinámico es uno de los principales indicios que permite saber las condiciones actuales del acuífero, por lo que se monitorea constantemente para asegurar que el pozo no se seque.

10.4 Pruebas de gasto variable, gasto constante y curva de agotamiento

Una vez realizada la perforación del pozo, se hacen distintas pruebas para estimar una elección de bomba, y el comportamiento que tendrá a futuro. Para ello se realizan dos pruebas, llamadas pruebas de gasto constante y variable, y a partir de ellas se determina también una curva de agotamiento. La norma NCh 777/2:2000 define y valida estas pruebas. En esta sección se explican estas pruebas y su función dentro del diseño de un nuevo pozo.

10.4.1 Prueba de gasto variable

La primera prueba que se realiza es la prueba de gasto variable. En esta prueba, se bombea durante un período corto de tiempo agua del pozo a distintos caudales. Al realizar esta prueba, se realiza un gráfico del nivel dinámico en función del tiempo. En intervalos determinados, se cambia el caudal extraído, lo que se puede ver en el gráfico como un decaimiento rápido del nivel del agua.

En esta prueba, la finalidad es determinar el comportamiento del nivel dinámico en el pozo a medida que se aumenta el caudal extraído. También permite verificar que el nivel dinámico se estabilice después de un determinado tiempo, lo que es un indicio que el pozo es capaz de recuperarse naturalmente.

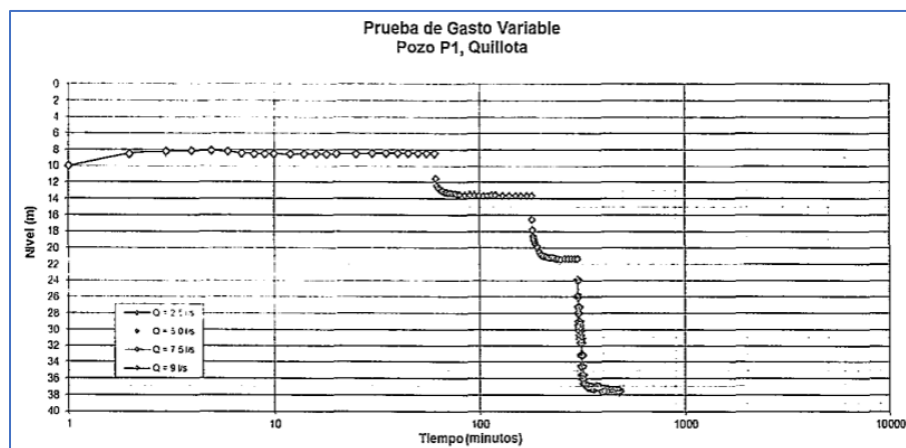


Figura 5: Ejemplo de prueba de gasto variable.⁵

⁵ (Simunovic, 2017)

10.4.2 Curva de agotamiento

La curva de agotamiento se realiza con los resultados obtenidos de la prueba de gasto variable. Se hace un gráfico del nivel dinámico en función del caudal. Ya que se usan caudales discretos en la prueba de gasto variable, la curva de agotamiento es una extrapolación del comportamiento que se puede ver en dicha prueba. Por ejemplo, se pueden ver en la Figura 6 los puntos concretos que se usaron para la prueba de gasto variable, y que se usan para dibujar esta curva de agotamiento.

La curva de agotamiento permite visualizar el rendimiento de la obra de captación, al notar el punto en el que el nivel dinámico aumenta rápidamente. Esto es un indicio que se podría estar extrayendo el agua disponible en el acuífero más rápido de lo que puede recargarse de forma natural. En la Figura 6, se puede ver que para caudales mayores a $7 \left[\frac{L}{s} \right]$ el nivel aumenta drásticamente, por lo que no sería recomendable instalar una bomba con un caudal mayor.

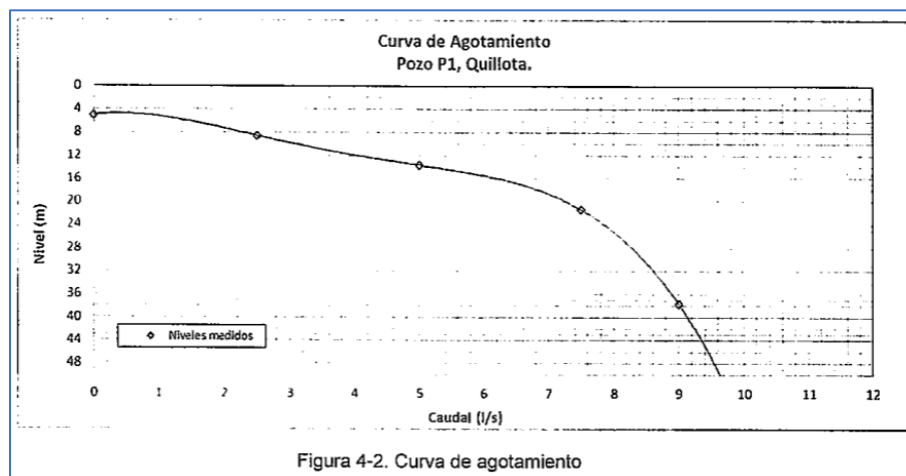


Figura 6: Ejemplo de curva de agotamiento.⁶

10.4.3 Prueba de gasto constante

La prueba de gasto constante se realiza una vez decidido el caudal de diseño que se vaya a utilizar para el pozo. Esta prueba se realiza en un período más extenso de 24 horas, durante el cual se usa una bomba a un caudal constante. El resultado es una curva del nivel dinámico en función del tiempo.

Según el artículo 23 de la resolución D.G.A 425 del 2007, “La comprobación del caudal susceptible de extraer por una obra de captación de agua subterránea, se verificará a través de las respectivas pruebas de bombeo de caudal constante [...], hasta lograr la estabilización de niveles, o una clara tendencia a ello, esto último, definido por un descenso de dos centímetros por hora, durante las últimas tres horas de bombeo.”

⁶ (Simunovic, 2017)

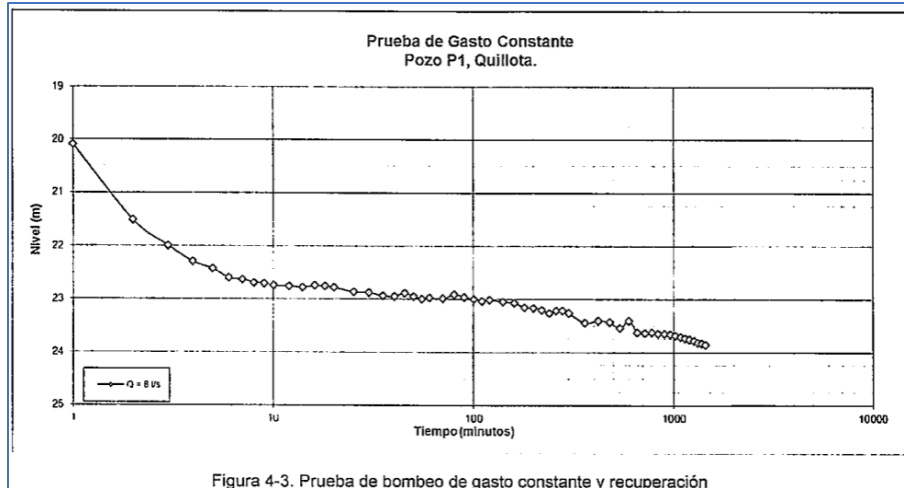


Figura 7: Ejemplo de prueba de gasto constante.⁷

10.5 Principios de funcionamiento de las bombas

Las motobombas de pozo profundo son equipos verticales que integran un motor y una bomba en una unidad cilíndrica. El motor es el encargado de transformar la energía eléctrica de la red a energía mecánica, o movimiento, y la bomba transforma esta energía mecánica en energía hidráulica, o movimiento del agua. El principio de funcionamiento de estas bombas es el mismo que para bombas centrífugas, que son los equipos de bombeo más comunes y estudiados, por lo que se usan como base para explicarlas. En la siguiente sección se explican estos equipos y su funcionamiento.

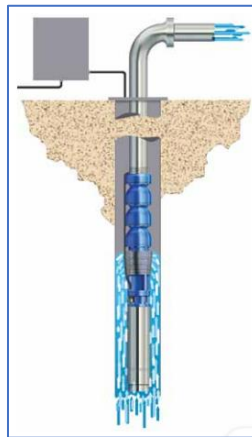


Figura 8: Diagrama de una motobomba en un pozo.⁸

⁷ (Simunovic, 2017)

⁸ (Goulds Water Technology, 2012, pág. 13)

10.5.1 Partes de una bomba

Para entender más adelante el funcionamiento de una bomba centrífuga, primero se debe entender sus partes:

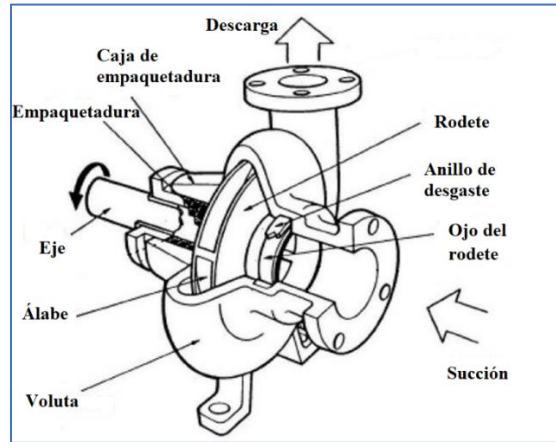


Figura 9: Esquema de una bomba centrífuga.⁹

1. Succión: Parte de la bomba por donde ingresa el líquido, también se llama tubería de succión.
2. Rodete: Componente de la bomba acoplado al eje, que proporciona el torque y el giro al líquido mediante sus álabes.
3. Álabe: Parte del rodete que dirige el movimiento del líquido. Cada rodete tiene varios álabes.
4. Ojo del rodete: Centro del rodete, por donde ingresa el líquido.
5. Voluta: Carcasa de la bomba, con una forma diseñada para maximizar la presión que se le entrega al líquido al moverse por su interior.
6. Eje: Componente que se une al motor, y le proporciona el giro y torque al rodete.
7. Caja de empaquetadura: Tiene la función de contener la empaquetadura, también llamada prensa estopa.
8. Empaquetadura o prensa estopa: Tiene la función de evitar filtraciones de líquido desde la bomba.
9. Anillo de desgaste: Al igual que la prensa estopa, son componentes que impiden el paso de líquido hacia afuera de la bomba.
10. Descarga: Parte de la bomba por donde se expulsa el líquido, también se llama tubería de descarga.

10.5.2 Principios de mecánica de fluidos

Antes de explicar el funcionamiento de las bombas, se deben entender algunos principios de mecánica de fluidos.

El primero de estos principios es el principio de continuidad. En una tubería llena y cerrada, la cantidad de líquido que entra es siempre la misma que la cantidad de líquido que sale, por conservación de masa. Por

⁹ (Hassan, 2015, pág. 1). Traducción propia

lo tanto, el caudal, que representa el volumen del líquido desplazado por unidad de tiempo, es constante en cualquier tramo de la tubería.

El caudal se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$Q = 0,001 \cdot v \cdot A \left[\frac{L}{s} \right] \quad (1)$$

Donde:

A: Área interna de una tubería en $[m^2]$

Q: Caudal, en $\left[\frac{L}{s} \right]$

v: Velocidad del agua en $\left[\frac{m}{s} \right]$

Por lo tanto, en cualquier tramo de la tubería, se puede despejar la velocidad del líquido con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{4 \cdot Q}{1000 \cdot \pi \cdot D^2} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2)$$

Donde

D: diámetro interno de la tubería en $[m]$

Esta ecuación muestra que, en una tubería llena, cerrada y con un caudal constante, a medida que aumenta el diámetro, disminuye la velocidad del líquido, y viceversa.

La segunda ecuación fundamental que rige el comportamiento de fluidos en tuberías cerradas es la ecuación de Bernoulli.

$$p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (3)$$

Donde:

p: Presión en $[Pa]$

v: Velocidad del agua en $\left[\frac{m}{s} \right]$

h: Altura en $[m]$

ρ : Densidad del líquido en $\left[\frac{kg}{m^3} \right]$

g: Aceleración de la gravedad en $[\frac{m}{s^2}]$

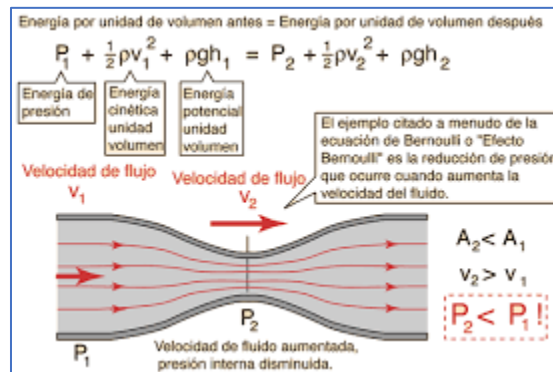


Figura 10: Principio de Bernoulli.¹⁰

La ecuación de Bernoulli es una ecuación de conservación de energía en condiciones ideales. La ecuación considera un flujo estacionario, es decir, constante en el tiempo, sin fricción, y para fluidos incompresibles, es decir, que su densidad es constante. Además, considera que, en el tramo considerado, no hay energía externa ingresando al sistema como el uso de una bomba, o calor.

En este trabajo se usa la ecuación de Bernoulli como base para explicar el comportamiento del agua dentro de una bomba. Esto se considera válido ya que el caudal es considerado constante en los casos estudiados, el agua es un fluido incompresible, y el efecto de la fricción cambia la magnitud de los resultados al usar la ecuación, pero el principio físico sigue siendo el mismo.

La ecuación se basa en que, para dos tramos de una misma tubería cerrada, la suma de las energías siempre es la misma. Estas energías se separan en tres componentes, uno de presión, uno de energía cinética por unidad de volumen, y uno de energía potencial por unidad de volumen.

Como ya sabemos que la velocidad aumenta al reducir el diámetro de la tubería, por el principio de continuidad, se entiende con la ecuación de Bernoulli que a medida que la velocidad aumenta, la presión debe disminuir.

En resumen, el diámetro y la presión varían en un mismo sentido, mientras que la velocidad varía de forma opuesta. Por ejemplo, si el diámetro aumenta, la presión aumenta y la velocidad disminuye. Esto resulta útil para comprender el funcionamiento interno de una bomba.

¹⁰ (Olmo & Nave, s.f.)

10.5.3 Principios aplicados a las motobombas

El líquido entra a la bomba hacia centro del rodete, llamado “ojo”. El rodete está fijado al eje del motor, lo que proporciona su giro.

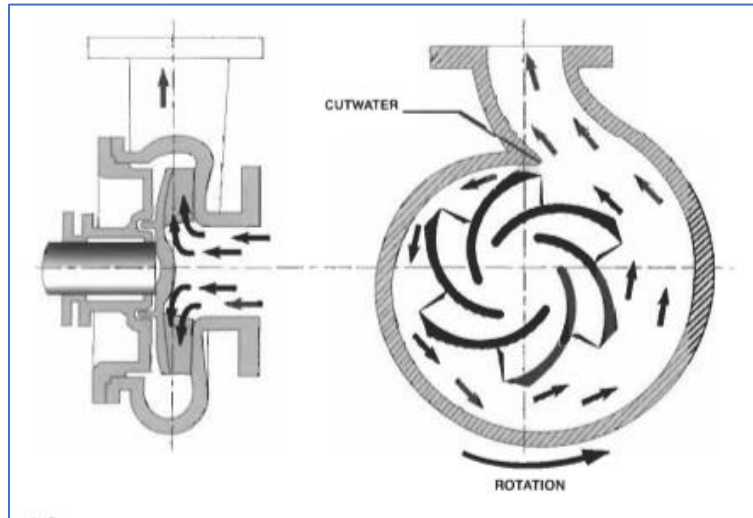


Figura 11: Esquema del movimiento de líquido al interior de una bomba centrífuga.¹¹

Al entrar al ojo rodete, el líquido aumenta su velocidad al comienzo del giro lo que genera una zona de baja presión, como se explicó en la sección anterior. Esto puede provocar cavitación, un fenómeno en el cual la presión del líquido baja tanto que sufre un cambio de estado parcial, generándose burbujas en estado gaseoso dentro del líquido, que al impactar e implotar dentro de la carcasa daña el material. Este problema es prácticamente inexistente para las bombas de pozo profundo, debido a que se encuentran permanentemente sumergidas y por lo tanto no alcanzan estas presiones críticas.

Al girar, el líquido se mueve siguiendo los álabes del rodete, como se muestra en la Figura 11. El líquido impacta contra la pared de la voluta, lo que reduce su velocidad al mínimo dentro de la bomba, aumentando mucho su presión. A medida que se mueve en el sentido de la rotación, la voluta aumenta en diámetro, lo que reduce más su velocidad, y sigue aumentando su presión. Esta es la función principal de la bomba.

Las bombas de pozo profundo necesitan alcanzar altas presiones, para ser capaces de levantar el agua cientos de metros de altura. Por lo tanto, estas bombas suelen usar varios rodetes instalados en serie en un mismo eje, lo que permite seguir aumentando la presión paulatinamente y entregar a la salida una presión más alta a la que se podría entregar con un solo rodete. Estas bombas se llaman multietapa. La Figura 12 muestra la sección de una bomba multietapa, donde los rodetes se ven en azul y los difusores en blanco.

¹¹ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 3)

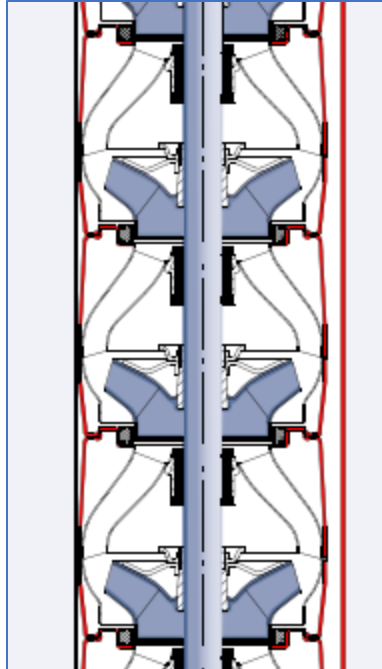


Figura 12: Sección de una bomba vertical multietapa.¹²

En estas bombas, se instala un componente adicional entre cada rodetes, llamado difusor. La función del difusor es redirigir el flujo a la salida de un rodetes hacia el centro, para que pueda entrar al ojo del rodetes siguiente y se pueda repetir el proceso.

El efecto de las bombas multietapa se describe en mayor detalle en la sección 10.6.1.

10.5.4 Pérdidas de carga y ecuación de Hazen-Williams

La ecuación de Bernoulli tiene como suposición que la energía es constante en la tubería. En la realidad, dentro de la tubería siempre se tienen pérdidas térmicas por fricción entre el líquido y las paredes de la tubería, además de pérdidas de fricción por distintos accesorios que se instalan en ella. Las pérdidas se llaman de distintas formas según la literatura, pero en este trabajo se denominan H_f las pérdidas de fricción con la tubería, mientras que las pérdidas de carga por los accesorios se llaman H_v , porque dependen de la velocidad.

Estas pérdidas por fricción se llaman pérdidas de carga. Es importante calcular las pérdidas de carga porque afectan la presión total que debe ser capaz de entregar la bomba escogida.

Las pérdidas H_v se estiman mediante distintos métodos. El método que se utiliza en este trabajo es el método de Hazen-Williams, que es el más utilizado en sistemas de bombeo de agua, por la facilidad en el cálculo.

¹² (Grundfos, 2016, pág. 22)

El método de Hazen-Williams es un modelo basado en resultados empíricos de pérdidas de carga en tuberías cerradas de agua. Como una aproximación, (la ecuación) es lo más precisa posible entre velocidades de 0.9 y 2.7 $\frac{m}{s}$, en tuberías con diámetros entre 20 y 1520 [mm]. (Bachus & Custodio, 2003, pág. 99)

Las ecuaciones del método de Hazen Williams son las siguientes:

$$J = \sum_{i=1}^n \frac{10.67}{D_i^{4.871}} \cdot \left(\frac{1000 \cdot Q}{C_i} \right)^{1.852} \quad (4)$$

$$H_f = \sum_{i=1}^n J_i \cdot L_i \quad (5)$$

Donde:

C_i : coeficiente de Hazen-Williams en la sección i [-]

D_i : diámetro de la sección i en [m]

H_f : pérdida de carga por fricción con la tubería en [m]

L_i : largo de la tubería en la sección i en [m]

J: factor de pérdida de carga de Hazen Williams [-]

Q: caudal en $\frac{L}{s}$

Los coeficientes de Hazen-Williams fueron determinados de manera empírica también, y corresponden a una abstracción sobre la rugosidad del material de la tubería. Por ejemplo, mientras más liso sea el material, mayor es el factor C. Esto significa que mientras más liso es el material, menos pérdidas por fricción hay con la tubería.

El problema de estos factores es que la rugosidad es estimada según el material, pero en la realidad existen diversos factores que hacen esta estimación incierta. La rugosidad puede variar entre dos tuberías de un mismo material, una misma tubería puede tener distintas rugosidades en distintos tramos, sobre todo para tuberías largas, y la rugosidad de la tubería suele cambiar con los años. Aunque existan tablas que dan distintos valores del factor dependiendo de la edad, siempre se debe considerar que cualquier factor que se escoja para este cálculo será siempre una estimación y una abstracción de la situación real.

Por su parte, las pérdidas de carga por los accesorios se pueden calcular con la siguiente ecuación:

$$H_v = \sum_{i=1}^n K_i \cdot \left(\frac{v_i^2}{2g} \right) \quad (6)$$

Donde:

H_v : Pérdidas de carga por fricción con accesorios, en [m]

K_i : coeficiente de pérdida de carga del accesorio i [-]

v_i : Velocidad del agua pasando por accesorio i en [$\frac{m}{s}$]

g : Aceleración de la gravedad en [$\frac{m}{s^2}$]

Los coeficientes K son conocidos para los accesorios más comunes en tuberías, incluyendo todos los accesorios que se encuentran en este trabajo.

De ambas ecuaciones se entiende que a medida que aumenta el caudal (o la velocidad) que entrega la bomba, aumentan las pérdidas de carga. Por lo tanto, a medida que se busca aumentar el caudal en un sistema, resulta interesante buscar formas de reducir las pérdidas de carga.

10.6 Familia de curvas

Todas las bombas operan con cuatro parámetros fundamentales; mueven un caudal Q , hasta una altura H , a una frecuencia de giro f , necesitando una potencia P para hacer este trabajo. Estos cuatro parámetros son la base de la familia de curvas. En esta sección se explica la teoría detrás de estas curvas y su uso.

10.6.1 Curva H-Q

La primera curva es la curva H-Q, también llamada curva característica de la bomba. Las bombas son máquinas diseñadas para entregar presión a un líquido. En su máxima presión teórica, el “shut-off head”, la presión del líquido es máxima, pero el caudal es nulo. A medida que aumenta el caudal que pasa por la bomba, la presión que le entrega la bomba al agua disminuye. Esta relación entre la presión del líquido a la salida de la bomba y el caudal que pasa por la bomba se puede representar en un gráfico H-Q, donde la abscisa representa el caudal y la ordenada la cabeza hidráulica. Esta curva se conoce también como curva de la bomba, o curva característica de la bomba.

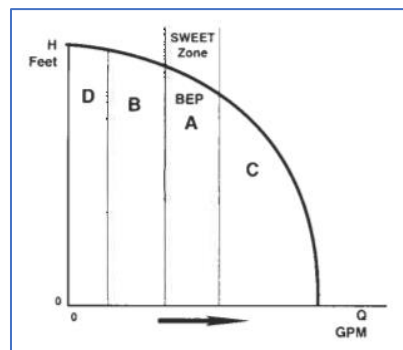


Figura 13: Curva H-Q de la bomba.¹³

¹³ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 84)

Esta curva de la bomba es determinada por el fabricante, y se usa como base para distintos análisis. Sin embargo, esta curva no siempre representa el comportamiento de la bomba. Los dos aspectos que pueden cambiarla son la frecuencia, y la edad.

La frecuencia es un parámetro que se relaciona directamente con la velocidad de giro del rodete. Dependiendo de la frecuencia con la que opere la bomba, la curva de operación puede variar. Generalmente, la curva de la bomba es dada para la máxima frecuencia a la que opera. A medida que disminuye la frecuencia de la bomba, la curva H-Q se desplaza hacia abajo y a la izquierda en el gráfico. En un sistema dado, esto significa que, para una misma presión determinada, el sistema entrega un caudal menor.

Como regla empírica, el rendimiento de la bomba empeora con los años, lo que significa que la curva de la bomba se vuelve más pronunciada (Palgrave, 2003, pág. xiv). Más adelante se entiende como esta caída provoca que la bomba entregue menor caudal, a pesar de que no cambien las condiciones externas a la bomba.

Técnicamente, el H indicado en las curvas de las bombas no corresponde a la presión, sino que a la “cabeza hidráulica”, o la altura a la que la bomba puede elevar un líquido. La relación entre el H y la presión del líquido es la siguiente:

$$H = \frac{p}{\rho_l / \rho_{\text{agua}}} \quad (7)$$

Donde:

H: Cabeza hidráulica, también llamada presión, en [m] de agua

p: Presión en [m] de agua

ρ : Densidad del líquido en $[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}]$

Como indica la ecuación, en el caso del agua el valor de H es equivalente a la presión medida en metros de columna de agua, por lo cual se usa H y presión indistintamente en este trabajo, que se centra en el agua como líquido de transporte.

Las bombas de pozo profundo están restringidas por dos características principales. Deben ser pequeñas en diámetro, para que se puedan instalar en un pozo, y deben ser de alta presión para poder impulsar el agua desde el pozo, que muchas veces son de cientos de metros de profundidad.

Para superar estos dos requerimientos, se usan bombas llamadas bomba multietapa, que conectan varios rodetes en serie. Esto permite aumentar en gran cantidad la presión entregada al líquido sin aumentar mucho el diámetro de la bomba. La Figura 14 muestra el cambio en la curva H-Q que se puede lograr para las bombas multietapa.

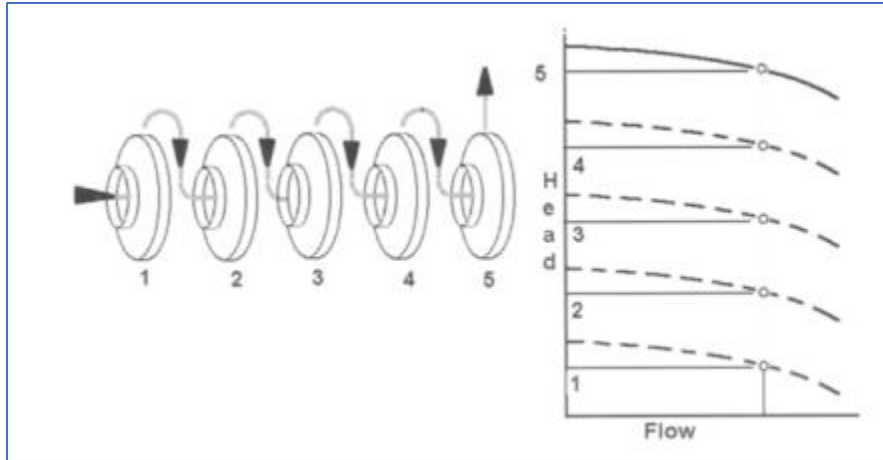


Figura 14: Curva de bomba multietapa.¹⁴

10.6.2 Curva del sistema

La segunda curva que se debe considerar dentro de la familia es la curva del sistema. Esta es una curva que depende completamente del sistema en el que va a trabajar la bomba. Es una curva que describe las presiones que debe superar la bomba para desplazar el líquido por el sistema.

La intersección con la abscisa corresponde a la suma de dos presiones. La primera es la presión debido a las diferencias de altura entre el reservorio de donde la bomba succiona el líquido, y la altura final donde se bombea. Esta presión se llama H_s , por “static” en inglés, que significa estática.

En el caso de motobombas de pozo profundo, la altura H_s es una suma entre el nivel dinámico y la diferencia de altura entre la superficie donde se instala y el punto donde, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$H_s = ND + \Delta h \quad (8)$$

Donde:

H_s : Pérdidas de carga por diferencias de altura, en [m]

ND: nivel dinámico en [m]

Δh : diferencia de altura en [m]

¹⁴ (Palgrave, 2003, pág. 11)

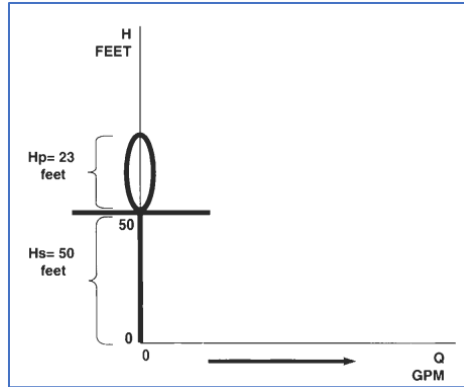


Figura 15: Presiones del sistema en unidades imperiales.¹⁵

La segunda presión es la diferencia de presión entre el reservorio inicial y el estanque final. Esta presión es más evidente cuando el estanque final está presurizado, por ejemplo, un sistema con una caldera. Esta presión se denomina H_p .

El resto de la curva se construye con las pérdidas de carga por fricción, como se vio en la sección 10.5.4, incluyendo las pérdidas H_v y H_f . El caudal entregado por la bomba es proporcional al cuadrado de las pérdidas de carga mencionadas, por lo tanto, la curva del sistema siempre tiene una forma parabólica creciente, como se ve en la Figura 16.

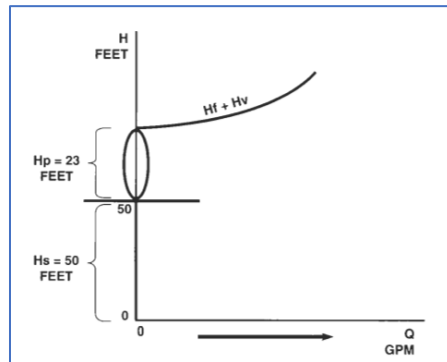


Figura 16: Curva del sistema en unidades imperiales.¹⁶

10.6.3 Punto de operación

El punto de intersección entre la curva H-Q a una frecuencia dada y la curva del sistema indica el punto donde opera la bomba. Este punto indica el caudal que pasa por la bomba y la presión que le entrega al líquido. Como se explicó en la sección 10.6.1, cambiar la frecuencia cambia la curva H-Q, lo que cambia el punto de operación.

Esto proporciona ventajas y desventajas. En algunos casos, reducir o aumentar la velocidad de giro permite adaptarse a cambios en el sistema. En otro, un cambio de frecuencia puede significar que la bomba ya no

¹⁵ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 97)

¹⁶ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 98)

es capaz de entregar un caudal, ya que las curvas no logran interceptar, o su intersección se aleja mucho del rango de operación satisfactorio. Se habla en detalle de este rango en la sección 10.12.

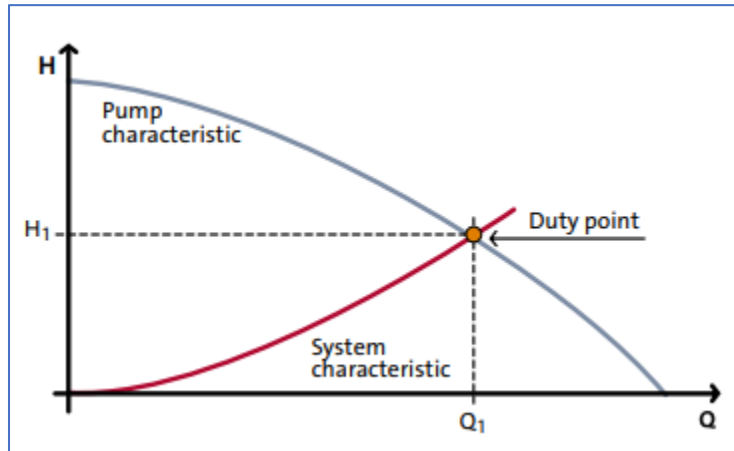


Figura 17: Punto de operación.¹⁷

El punto de operación es un concepto que influencia en todo tipo de ámbitos, desde el diseño, la operación, la mantención y hasta la optimización de los equipos hidráulicos. Determinar de forma confiable el punto de operación que tendrá una bomba al instalarse, su variación frente a cambios en la operación y las condiciones de su ambiente, y la estimación de puntos de operación de bombas que se encuentran ya instaladas son probablemente los aspectos más importantes para el análisis y optimización de sistemas de captación.

10.6.4 Curva de potencia

Para el cliente que vaya a hacer uso de la bomba, es de relevancia la potencia que necesita la bomba, ya que esto define el motor que debe acoplarse a ella, y la energía eléctrica que necesita. La ecuación para determinar la potencia hidráulica de un sistema es la siguiente:

$$P_h = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{10^6} \text{ [kW]} \quad (9)$$

Donde:

P_h : Potencia hidráulica teórica para mover una cantidad de agua, en [kW]

h : Altura en [m]

Q : Caudal, en $\left[\frac{L}{s}\right]$

¹⁷ (Grundfos, 2016, pág. 94)

ρ : Densidad del líquido en $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

g : Aceleración de la gravedad en $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right]$

La potencia hidráulica P_h es la potencia exacta teórica necesaria para elevar el caudal y la presión respectivos, sin embargo, como es el caso con cualquier equipo mecánico, la potencia que requiere la bomba es mayor que la que puede entregar al líquido. La eficiencia hidráulica se describe en detalle en la siguiente sección.

Dado que la potencia depende directamente del caudal y de la presión que entrega la bomba, generalmente el fabricante añade esta curva con las demás para que se pueda determinar de forma visual la potencia al conocer el caudal que se requiere.

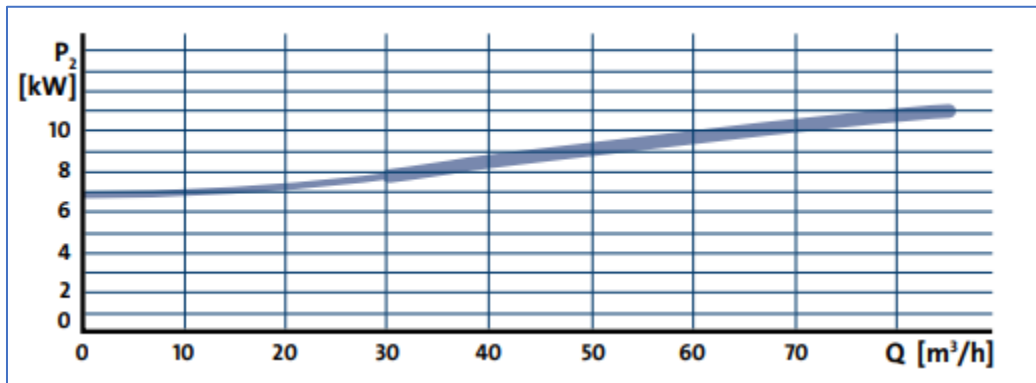


Figura 18: Ejemplo de una curva de potencia.¹⁸

10.6.5 Curva de eficiencia

Para entregar la mayor cantidad de información necesaria, los fabricantes de bombas incluyen a veces las curvas de eficiencia de la bomba.

El gráfico con la familia de curvas completo puede entregar las curvas H-Q, de potencia y de eficiencia en función de distintas frecuencias (o diámetros, en casos de bombas que se diseñan para un fácil reemplazo de rodete). La curva de sistema no se agrega en estos gráficos que realiza el fabricante, ya que depende completamente del sistema que tenga el cliente.

Un ejemplo de familia de curvas para distintos diámetros se muestra en la Figura 19.

¹⁸ (Grundfos, 2016, pág. 10)

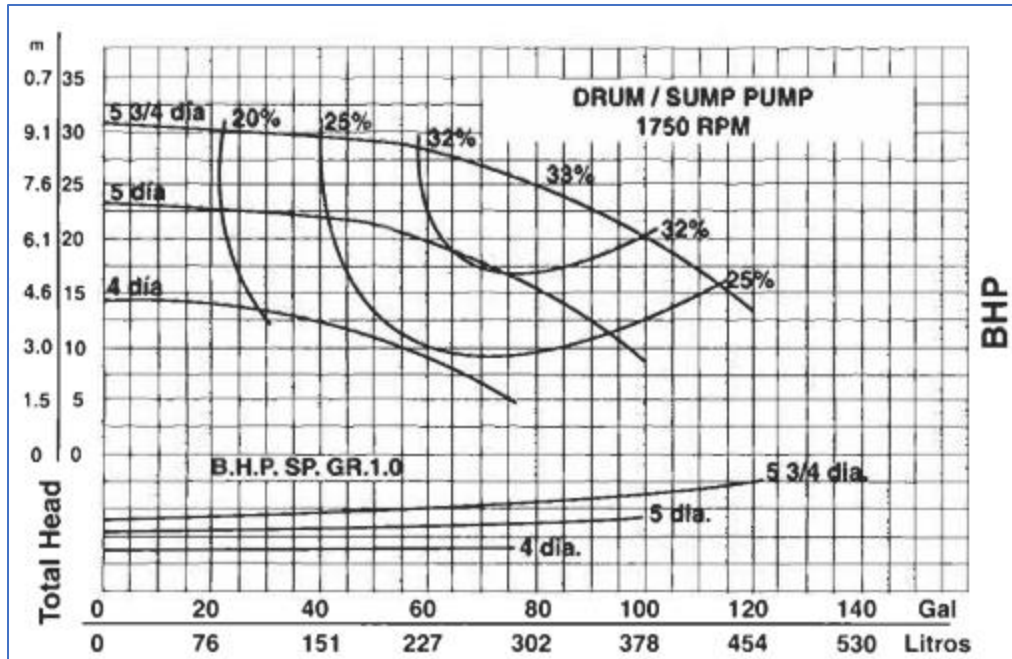


Figura 19: Ejemplo de familia de curvas para una bomba de sumidero.¹⁹

Para el cálculo de la eficiencia hidráulica de la bomba, se usa la siguiente ecuación.

$$\eta_{\text{hidráulica}} = \frac{P_h}{P_{\text{bomba}}} [-]$$

(10)

Donde:

P_{bomba} : Potencia requerida por la bomba en [kW]

$\eta_{\text{hidráulica}}$: Eficiencia de la bomba en [-]

La potencia total que requiere la motobomba incluye también la eficiencia de partes mecánicas y la eficiencia del motor. Para los objetivos de este trabajo, se considera la suma de estas eficiencias como $\eta_{\text{motor}} = 70\%$ para todos los casos. Las eficiencias individuales del motor y los componentes suelen ser más altas, pero al sumarlas se reducen, por lo que este valor se toma como estimación conservadora.

Las últimas de las curvas relevantes son las curvas de succión neta positiva, requerida y disponible. No se entra en detalle en este trabajo sobre estas curvas ya que las motobombas de pozo profundo se encuentran constantemente sumergidas, por lo que no tienen riesgo de cavitación.

¹⁹ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 87)

10.7 Tuberías

Las tuberías, a veces llamadas “piping” por su nombre en inglés, son parte fundamental del sistema de distribución de agua. La situación en la que se usa la tubería determina dos de sus características principales, su diámetro y su material.

El diámetro influye directamente en la velocidad del fluido, como se vio en la sección 10.5. Además, mientras mayor es la velocidad del fluido, mayores son las pérdidas de carga por fricción con la tubería.

El impacto exacto de la velocidad y la presión dentro de la tubería es muy complejo de resolver. El material de la tubería, la composición química del fluido, la temperatura, y otras características particulares de cada caso afectan en el resultado final. Por suerte, se han determinado empíricamente los rangos de velocidad dentro de los cuales no se debieran tener problema. Para poder diseñar tuberías y aplicarlas en sistemas reales, se consideran dichas recomendaciones sobre la velocidad, que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de velocidades para distintas aplicaciones de agua.²⁰

Aplicación	Rango de velocidades [$\frac{m}{s}$]
Servicio general de agua	0,9 - 2,4
Agua de la llave	1 - 2,5
En la succión de la bomba	0,9 – 2,4
En la descarga de la bomba	1,5 - 3

Para los casos relevantes para este estudio, se considera entonces que la velocidad en las tuberías debe estar entre 0.9 y 2.4 [$\frac{m}{s}$]. Velocidades mayores a las indicadas pueden causar ruido, desgaste en las tuberías y accesorios, golpe de ariete e incluso rupturas o fugas en la línea.

El golpe de ariete es un fenómeno que ocurre cuando se afecta repentinamente el flujo de agua en una tubería. Ocurre generalmente por un cierre rápido de una válvula, y provoca ondas de presión que se propagan por el fluido. La fuerza del impacto que este genera es proporcional a su caudal, y es incluso capaz de romper la tubería, por lo que siempre es importante tomar precauciones para evitarlo.

Por su parte, el material de la tubería afecta en su vida útil. La corrosión es un problema inevitable para los sistemas en contacto constante con el agua, y los materiales menos propensos a la corrosión permiten extender su duración. La decisión final del material incluye un análisis de los costos de compra y de instalación, comparados a los requerimientos del sistema.

²⁰ (Water systems - Maximum Flow Velocities, 2023)

10.8 Accesorios

Los sistemas de bombeo necesitan de distintos accesorios para su funcionamiento. Hay varios tipos, algunos son para la estructura y distribución de las redes de tuberías, como son los codos rectos en 90° o tuberías tee con forma de letra T. Otros permiten medir parámetros, por ejemplo, macro medidores de caudal o de presión. Otros más se conocen como válvulas, y permiten regular el flujo del líquido en la tubería.

Existen muchos tipos de válvulas para distintas aplicaciones, pero se explican a continuación algunas de las más comunes:

1. Válvula antirretorno, de retención o check: Estas válvulas obligan que el flujo en la tubería sea en una sola dirección. Se usan generalmente a la salida de una bomba, y son esenciales en sistemas con más de una bomba para reducir su interferencia.
2. Válvula de bola: Permite abrir o cerrar el paso del fluido.
3. Válvula de globo: Como la válvula de bola, pero permite también regular el paso del fluido en tuberías de bajo diámetro, a cambio de aumentar mucho la presión.
4. Válvula de compuerta: Similar a la válvula de bola, pero se usa en aplicaciones con requerimientos mayores e interrupciones menos frecuentes.
5. Válvula mariposa: Permite regular el caudal como la válvula de globo, pero es aplicable para sistemas de mayor tamaño, y no aumenta tanto la presión.



Figura 20: Tipos de válvula. Elaboración propia

La elección de válvula depende del uso que se le quiera dar, por ejemplo, si se quiere detener el paso completamente o permitir la regulación, y de las dimensiones del proyecto.

Debido a que todos estos elementos influyen en el flujo del fluido en la tubería, incluso cuando las válvulas se encuentran abiertas, siempre generan pérdidas de carga, como se vio en la sección 10.5. Los factores K de cada tipo de válvula es una abstracción sobre qué tanto obstruye el paso cada una, o qué tanto afecta en la pérdida de presión del sistema, y han sido determinados de forma empírica.

10.9 Motores eléctricos y variadores de frecuencia

Un motor es una máquina, por lo que transforma un tipo de energía en movimiento o trabajo. En los casos de bombas de pozo, se usan motores eléctricos. Estos motores reciben energía eléctrica y la convierten en movimiento rotacional. Mientras más energía recibe el motor, más rápido es su giro.

Los variadores de frecuencia son equipos que permite regular la energía que recibe el motor eléctrico, regulando así sus revoluciones por minuto, o rpm. Como el variador de frecuencia regula la energía que recibe directamente, permiten ahorrar al entregar justo la energía necesaria. En Chile, la frecuencia de la red eléctrica es de 50 [Hz], lo que indica el límite superior al que se operan los equipos.

En este estudio, el interés está en estimar nuevas eficiencias al variar la frecuencia del motor. En la práctica, se observa que a frecuencias menores a 30 [Hz] se presentan problemas, por lo tanto, se acota la menor frecuencia en este trabajo a 35 [Hz]. A esta frecuencia, el motor opera en un 70% de su carga total, equivalente a la carga para 50 [Hz]. Como se ve en la Figura 21, para valores mayores al 70% de la carga total, la eficiencia máxima del motor es prácticamente idéntica para todo tipo de motores, excepto motores de muy baja potencia, al usar un variador de frecuencia.

Por lo tanto, para la estimación de la eficiencia cualquier motor en este trabajo, se estima siempre que la eficiencia es de $\eta_{\text{motor}} = 70\%$, por las razones mencionadas anteriormente.

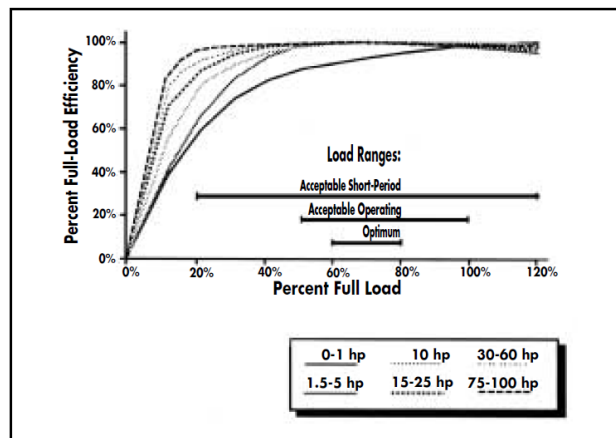


Figura 21: Variación porcentual de eficiencia del motor en función de carga porcentual al usar variador de frecuencia.²¹

10.10 Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad establecen relaciones matemáticas entre características operacionales de sistemas hidráulicos para distintas revoluciones de giro (Bachus & Custodio, 2003, pág. 39).

Las leyes de afinidad establecen lo siguiente:

²¹ (U.S Department of Energy, 1997, pág. 1)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (11)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \quad (12)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3 \quad (13)$$

Q: Caudal en $\left[\frac{L}{s}\right]$

H: Presión en [m]

P: Potencia en [kW]

n: velocidad de giro en [rpm], o frecuencia en [Hz]

Conociendo el comportamiento de una bomba para una sola frecuencia, generalmente su frecuencia nominal, estas leyes permiten estimar su rendimiento en cualquier frecuencia. La frecuencia es directamente proporcional a las revoluciones de giro, por lo tanto, se pueden reemplazar en la ecuación sin alteraciones.

En este trabajo, el método para regular el funcionamiento de las bombas es mediante el uso de variadores de frecuencia, como se explica en la sección 10.9. Para calcular la nueva eficiencia al usar el variador de frecuencia, se usa la ecuación siguiente:

$$\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) * \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1} \quad (14)$$

Donde

η_2 : nueva eficiencia en [-]

η_1 : eficiencia anterior en [-]

n_1 : las revoluciones de giro [rpm] o frecuencia en [Hz] anteriores

n_2 : las nuevas revoluciones de giro [rpm] o frecuencias en [Hz]

Esta ecuación es válida hasta el 50% de la velocidad original, en el caso de las frecuencias sería hasta 25 [Hz]. En este trabajo, la frecuencia mínima que se evalúa es de 35 [Hz], por lo tanto, se puede usar sin problemas.

La ecuación (14) permite calcular la nueva potencia de la bomba, de una forma más precisa que usando sólo las leyes de afinidad para potencias.

10.11 Bombas en paralelo

El concepto de conectar bombas “en paralelo” o “en serie” sigue la misma lógica que en conexiones eléctricas. Dos bombas se consideran en paralelo cuando el caudal que pasa por cada una se conecta en un punto común, como se ve en la Figura 22. “P1” o “P2” se refiere a las bombas, por la palabra para bomba en inglés, “pump” (Grundfos, 2016, pág. 99)

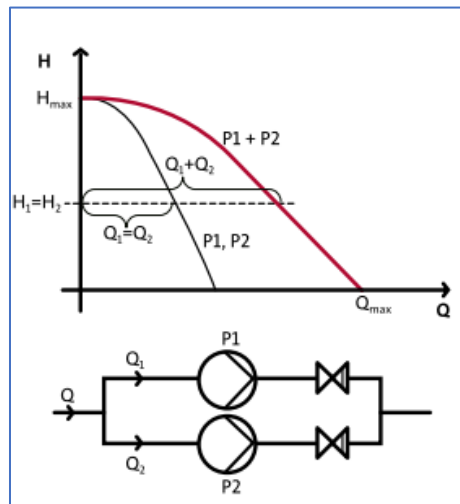


Figura 22: Curva H-Q de bombas en paralelo.²²

Cuando se usan dos bombas en paralelo, la curva H-Q total cambia, al ser una combinación entre las curvas de cada bomba. Cuando las bombas son de mismo tamaño, ocurre como en la figura anterior; sus caudales se suman para cada H para encontrar la nueva curva H-Q.

Cuando las bombas no son iguales en tamaño, la bomba menos potente opera primero, y luego cuando el H sea igual al “shut-off head” de la bomba más potente, se arranca esta segunda bomba. Esto es necesario para asegurar que la bomba más potente no impida que la bomba menos potente pueda vencer las presiones en la válvula de check. La nueva curva H-Q es la suma de los caudales de las dos bombas para cada mismo H, a partir del H indicado, como se ve en la Figura 23.

²² (Grundfos, 2016, pág. 99)

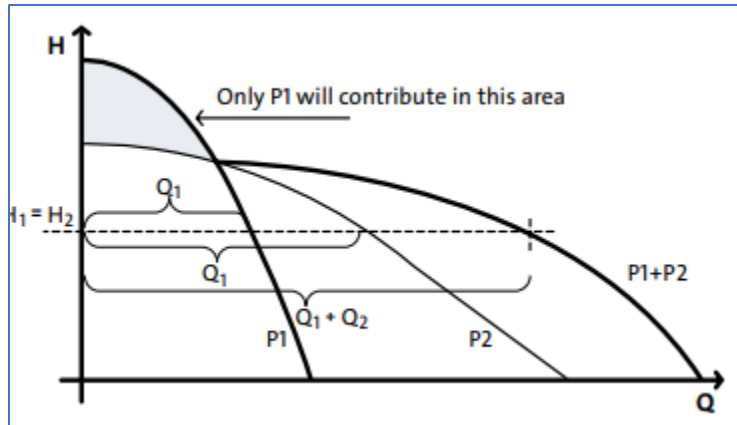


Figura 23: Curva H-Q de bombas distintas y en paralelo.²³

Cuando operan en paralelo, el caudal real que entregan ambas bombas nunca será igual a la suma de ambos caudales. Esto se debe a la curva del sistema. Mientras mayores son las pérdidas de fricción comparadas al H total, más acentuada es la pendiente de la curva de sistema, y menos caudal se puede aprovechar de un sistema de bombas en paralelo.

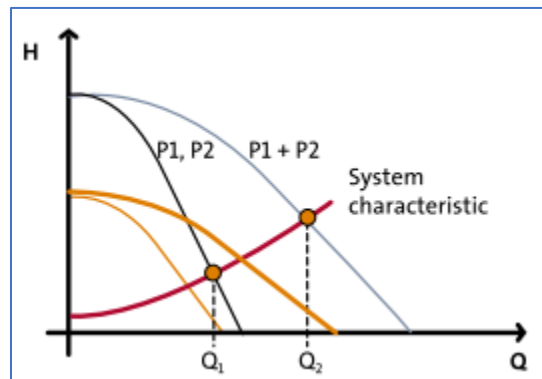


Figura 24: Punto de operación de bombas en paralelo.²⁴

Como consecuencia, no es recomendable usar bombas en paralelo en sistemas de mucha fricción y poca altura estática. Tampoco es recomendable instalar más varias bombas en paralelo, ya que, debido a la curva del sistema, mientras más bombas en paralelo se instalan menos caudal se puede conseguir.

10.12 Rango de operación y confiabilidad

Las motobombas son equipos de precisión, que son diseñados para funcionar en su punto de máxima eficiencia, el BEP (Best Efficiency Point, o punto de mejor eficiencia), o por lo menos en rangos cercanos.

²³ (Grundfos, 2016, pág. 100)

²⁴ (Grundfos, 2016, pág. 100)

Este rango de operación se llama en inglés POR (Pump Operating Range, o rango de operación de la bomba), o AOR (Allowable Operating Range, o rango permisible de operación).

A medida que la motobomba se aleja de este rango, las fuerzas radiales que actúan sobre el rodete se desequilibran y pueden generar fuerzas no deseadas. Esto puede provocar una deflexión en el eje, dañar los rodamientos en sus descansos, las empaquetaduras, provocar vibraciones no deseadas, sobrecalentamiento e incluso cavitación.

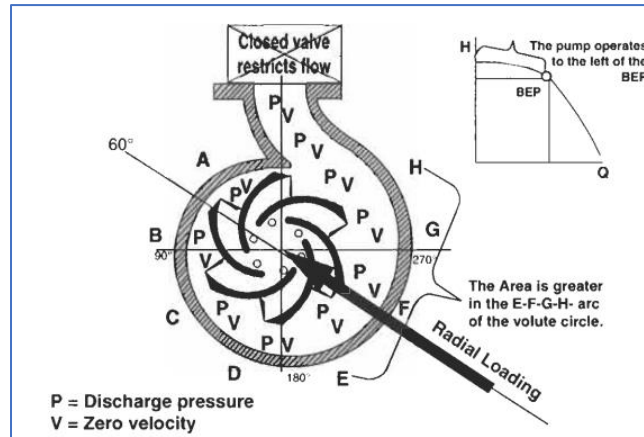


Figura 25: Diagrama de fuerzas radiales en una bomba.²⁵

Para entender el rango de operación aceptable, se debe hablar de confiabilidad. La confiabilidad de un equipo se relaciona a la probabilidad que un equipo falle en un período de tiempo determinado, bajo condiciones previstas. En este caso, se usa la medida MTBF, por su sigla en inglés, que significa “tiempo medio entre falla”. En la Figura 26 se considera η como el MTBF máximo, por lo tanto, la confiabilidad máxima, y a medida que disminuye se considera como una fracción de este valor. Por ejemplo, $0.92 * \eta$ equivale a una confiabilidad del 92%, que significa que su vida estimada es un 92% de la vida en condiciones óptimas.

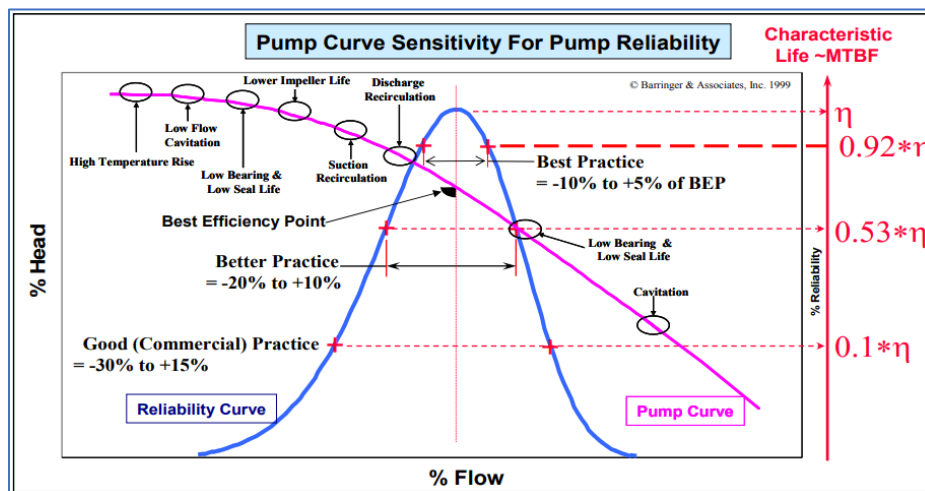


Figura 26: Confiabilidad de la bomba en función de su rango de operación.²⁶

²⁵ (Bachus & Custodio, 2003, pág. 133)

²⁶ (Barringer, 2003, pág. 8)

Como se indica en la Figura 26, en un rango entre 90% y 105% del BEP, la confiabilidad es del 92%, en un rango entre 80% y 110% del BEP se tiene una confiabilidad de 53%, y en un rango entre el 70% y el 115% se tiene un 10% de confiabilidad.

Una bomba que opera con dentro del rango entre el 80% y el 110% del BEP se considera como buena práctica, ya tendrá más de un 50% de confiabilidad. De todas formas, se corrobora la importancia de buscar siempre un punto de operación lo más cercano el BEP posible.

Para este trabajo, se considera el rango entre 80% y 110% del caudal en el BEP como un rango satisfactorio.

10.13 Modelos hidráulicos

Un modelo hidráulico es una simulación realizada en computador, que entrega resultados sobre un sistema hidráulico en función de los parámetros que se le entregan. Esta herramienta permite estimar el comportamiento de un sistema que se busque instalar, corroborar el comportamiento de un sistema existente, proyectar el comportamiento de un sistema al cambiar distintos parámetros de funcionamiento, y así puede incluso ayudar a la elección de motobomba.

Mientras más complejo es el sistema hidráulico, más útil y potente son estas herramientas para el análisis. Por ejemplo, cuando se tienen muchas bombas instaladas, en configuración en serie o en paralelo entre ellas, el cálculo manual resulta complejo y costoso. Esta herramienta no es infalible, sin embargo, ya que necesitan conocimiento técnico para diseñarlas y analizar sus resultados, pero más aún, pocas veces tienen en cuenta la disponibilidad hídrica, en este caso de los acuíferos. Por lo tanto, aunque los modelos puedan entregar resultados similares a la realidad, hace falta respaldarla con otras áreas que analicen el comportamiento del recurso hídrico.

Estos modelos se basan en ecuaciones de mecánica de fluidos, como la ecuación de Bernoulli y las pérdidas de carga, descritas en la sección 10.5, entre otras. Los parámetros que usan para su cálculo se llaman datos de entrada.

10.14 Refrigeración del motor

Un problema común que afecta las motobombas es el sobrecalentamiento del motor. En el cilindro, el motor siempre se encuentra por debajo de la bomba. En el mejor de los casos, el agua del pozo pasa por fuera del motor a medida que se mueve hacia la succión de la bomba, lo que la enfría. Esto es por convección forzada, un proceso por el cual un fluido es forzado a moverse por fuera de otro cuerpo que se encuentra a mayor temperatura, enfriándolo. Para que esto ocurra, el fluido, en este caso el agua, debe estar más frío que el cuerpo, en este caso el motor, y debe tener suficiente velocidad. Normalmente, dicha velocidad mínima para la refrigeración es indicada por el fabricante del motor.

En los pozos de agua, el agua siempre estará a menores temperaturas que el motor, pero la velocidad del agua por fuera del motor no se puede asegurar siempre. Dependiendo de la configuración del pozo, puede que las cribas se encuentren por sobre el motor, lo que significa que el agua entrará directamente a la succión de la bomba, y no pasará por fuera del motor en ese trayecto. En estas condiciones, el agua fuera del motor

aumentará su temperatura a medida que se calienta el motor, hasta llegar a un punto de equilibrio con él, sin cumplir la función de refrigeración.

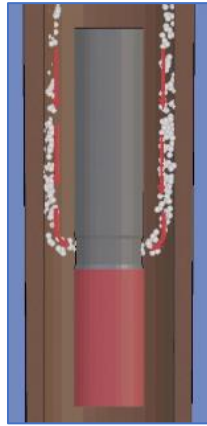


Figura 27: Movimiento del agua por arriba del motor. Elaboración propia

La solución más común a este problema es instalar la motobomba con una camisa refrigerante. La camisa refrigerante es una estructura que se ubica por fuera del cilindro para tapanlo, desde arriba de la succión de la bomba hasta debajo del motor. Esto obliga al agua a desviarse y pasar por fuera del motor. Al instalar camisas de refrigeración hay que fijarse que se tenga suficiente espacio en el pozo para ubicarla, tanto por el diámetro del pozo como la profundidad de la bomba instalada. A continuación, se presenta un esquema sobre la función de la camisa refrigerante.

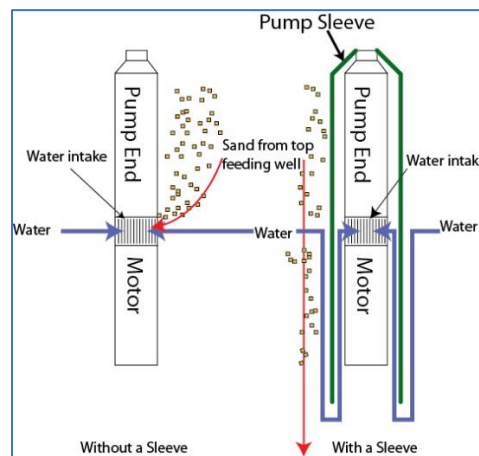


Figura 28: Función de la camisa refrigerante.²⁷

Entre los datos entregados por los fabricantes de motobombas, está incluida la velocidad mínima del agua fuera del motor para que se pueda refrigerar. La Tabla 2 indica estas velocidades para cierto tipo de bombas, y se usan en caso de que no se tenga el dato concreto del equipo que se analice.

²⁷ (Tuhorse, s.f.)

Tabla 2: Velocidad mínima del agua para refrigerar el motor²⁸

Rewindable motors:		
motor type	max. motor Ø [mm]	Min. cooling flow
6" motors ≤ 15 kW	142	0.2 m/s
6" motors > 15 kW	142	0.5 m/s
8" motors ≤ 52 kW	193,5	0.2 m/s
8" motors	193,5	0.5 m/s
10" motors	235	0.5 m/s
12" motors	286	0.5 m/s

Usando la ecuación (1), se puede calcular la velocidad del agua entre el motor y la camisa refrigerante. El área dentro de la ecuación debe reemplazarse por el área transversal entre la camisa y el motor, usando la siguiente ecuación:

$$A_{\text{refrigeración}} = \pi \cdot \frac{(D_{\text{camisa}}^2 - D_{\text{motor}}^2)}{4 \cdot 10^6} \text{ [m}^2\text{]} \quad (15)$$

Donde:

$A_{\text{refrigeración}}$: área transversal entre el exterior del motor y el interior de la camisa refrigerante, en [m²]

D_{camisa} : diámetro externo de la camisa refrigerante en [mm]

D_{motor} : diámetro del motor en [mm]

Así, al reordenar la ecuación, resulta la siguiente ecuación para el cálculo de la mínima de refrigeración.

$$V_{\text{refrigeración}} = \frac{4000 \cdot Q}{\pi \cdot (D_{\text{camisa}}^2 - D_{\text{motor}}^2)} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (16)$$

Donde:

$V_{\text{refrigeración}}$: velocidad del agua por fuera del motor en $\left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$.

Q: caudal en $\left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right]$

Se debe cumplir que esta velocidad sea mayor al mínimo entregado por el proveedor de la motobomba, o el mínimo indicado en la Tabla 2 en su defecto.

²⁸ (Franklin Electric, 2022)

10.15 Evaluación económica

En este trabajo, hay tres métodos principales para calcular los costos. El primero es comparar los costos operacionales entre la situación actual y la situación futura, una vez implementadas las propuestas. El segundo es calcular el ahorro debido al aumento de la producción de agua. El precio del agua producida depende de cada localidad. El tercero es la comparación con el costo de soluciones alternativas, principalmente el uso de camiones aljibe para responder a la demanda. Esto sólo es necesario para casos de alta escasez hídrica.

Los costos operacionales son los costos que se generan por mantener en operación los activos de la empresa. En sistemas de bombeo, están asociados en mayor medida a la potencia de las motobombas. Como se vio en la sección 10.6, las bombas operan a distintas potencias, según su diseño, sus requerimientos y su condición.

En el caso de las motobombas de pozo profundo, todas usan motores eléctricos para su funcionamiento. Estos motores se operan con la energía eléctrica de la red, lo que conlleva gastos constantes para la empresa.

La potencia es unidad de energía por tiempo, por lo tanto, si se conoce el tiempo de operación total del equipo se puede calcular la energía necesaria para su uso como se ve en la siguiente ecuación.

$$C_{op} = P_{real} \cdot t \cdot f_e \cdot \eta_{motor} \quad (17)$$

Donde:

C_{op} : Costos operacionales en [CLP]

f_e : factor energético en $\left[\frac{CLP}{kWh}\right]$

t : tiempo de operación en [hr]

η_{motor} : Eficiencia del motor [-]

P_{real} : Potencia en [kW]

El factor f_e es un factor energético que depende de la localidad, ya que el costo de la electricidad cambia según la localidad.

Para calcular el ahorro por la mayor producción de agua, se calcula el volumen de agua recuperado, es decir, la diferencia entre el volumen estimado con la propuesta y el volumen actual. En algunos casos, el ahorro también considera el costo alternativo de suministrar la comunidad con camiones aljibe. A continuación, se presentan las ecuaciones que se usan para esta evaluación.

$$V_{recup} = (Q_{fin} - Q_{ini}) \cdot 86,4 \cdot 0,8 \cdot 365 \left[\frac{m^3}{año}\right] \quad (18)$$

Donde:

Q_{fin} : Caudal tras intervención en $\left[\frac{L}{s}\right]$

Q_{ini} : Caudal antes de intervención en $\left[\frac{L}{s}\right]$

V_{recup} : volumen de agua recuperado en $\left[\frac{m^3}{año}\right]$

$$A_{agua} = V_{recup} \cdot f_a$$

(19)

Donde:

A_{agua} : Ahorro por volumen recuperado de agua en $\left[\frac{CLP}{año}\right]$

f_a : Factor de ahorro por recuperación de agua en $\left[\frac{CLP}{m^3}\right]$

El factor f_a depende de cada localidad.

$$A_{seq} = V_{recup} \cdot C_{alternativo} \left[\frac{CLP}{año}\right]$$

(20)

Donde:

A_{seq} : Ahorro por evitar soluciones alternativas en $\left[\frac{CLP}{año}\right]$

C_{altern} : Costo de solución alternativa, generalmente camiones aljibe, en $\left[\frac{CLP}{m^3}\right]$

El ahorro sequía se usa solo para los casos en los que, en caso de detención, se necesita de alternativas para mantener la continuidad del servicio. La alternativa más común es el uso de camiones aljibe.

Estas ecuaciones se usan para una realizar una evaluación económica para los próximos dos años. Para este trabajo, se usan los datos obtenidos desde abril 2022 hasta abril 2023 como base, que luego se proyectan hasta abril 2025.

10.16 Riesgo

El riesgo es una evaluación importante en la industria, en la medida que ayuda en la priorización de tareas. Se identifica un riesgo, y se evalúa en función de la probabilidad que ocurra, y del impacto o severidad que tenga al ocurrir.

Para visualizar esto, la medida más común es realizar una matriz de riesgo. En esta matriz se presentan los resultados de la evaluación de los riesgos. Para realizar esta matriz, se necesitan dos métricas, llamadas métrica de probabilidad y métrica de impacto. Para entender estas métricas, se usa como ejemplo el riesgo que falle una motobomba.

La métrica de probabilidad se realiza en base a cantidades medibles. Por ejemplo, la probabilidad que falle una motobomba puede estimarse en base a la confiabilidad de la bomba, como se ve en la sección 10.12, que depende del caudal actual de la bomba y de su caudal de mejor eficiencia. La métrica de probabilidad debe asociar a cada una de estas cantidades un rango entre 1 y 5, donde 1 es el menos probable y 5 es el más probable.

La métrica de impacto se realiza en base a distintos factores a los que puede afectar el riesgo. Por ejemplo, el impacto que falle una motobomba afecta en gran medida la continuidad del servicio, pero el impacto medio ambiental es menor ya que sólo debe desecharse el equipo. La métrica de impacto debe asociar a cada uno de estos aspectos un rango entre 1 y 5, donde 1 es el menor impacto y 5 es el mayor.

Ambas métricas usadas en este trabajo se muestran en la sección 15, una vez hecho el análisis técnico de los casos.

Una vez realizadas estas métricas, se usan para cuantificar el riesgo. Una de estas es la métrica para determinar una probabilidad total. Para determinarla, se ponderan los distintos factores que la afectan dependiendo del riesgo asociado. Por ejemplo, para el riesgo que falle una motobomba, la ponderación debe adecuarse a la probabilidad que ocurra esta falla. En este caso, una cantidad relacionada al rango de operación óptimo de la bomba debería tener una ponderación alta, y cantidades que no se asocian a este riesgo deben tener ponderación nula. El resultado de la probabilidad total es un número entre 1 y 5. La metodología para medir el riesgo depende de la empresa, pero la empresa Esva y su filial Aguas del Valle usan esta metodología de matriz 5x5, como se ve en la Tabla 3.

Tabla 3: Ejemplo de matriz de riesgo²⁹

		Impacto				
		¿Qué tan severos serían los resultados si ocurriera el riesgo?				
Probabilidad ¿Cuál es la probabilidad de que ocurra el riesgo?		Insignificante 1	Menor 2	Significativo 3	Mayor 4	Severo 5
		5 Casi seguro	Medio 5	Alto 10	Muy alto 15	Extremo 20
4 Probable	Medio 4	Medio 8	Alto 12	Muy alto 16	Extremo 20	
3 Moderado	Bajo 3	Medio 6	Medio 9	Alto 12	Muy alto 15	
2 Poco probable	Muy bajo 2	Bajo 4	Medio 6	Medio 8	Alto 10	
1 Raro	Muy bajo 1	Muy bajo 2	Bajo 3	Medio 4	Medio 5	

De forma similar, se usa una métrica para determinar el impacto total del riesgo medido. En este caso, en vez de ponderar, se toma el impacto máximo entre los distintos factores que se miden. Por ejemplo, si bien el impacto que falle una motobomba es mínimo para el medio ambiente, es un impacto alto para la continuidad del servicio, por lo que el impacto total es alto. El resultado del impacto total es un número entre 1 y 5.

El resultado de este análisis es que cada riesgo tiene asociado dos dígitos, o un par ordenado, con valores entre 1 y 5 para el impacto total y entre 1 y 5 para la probabilidad total. Por ejemplo, suponiendo que existiera un caso en que el riesgo de falla de motobomba tiene probabilidad total de 5 e impacto 3, el par ordenado sería 5;3.

²⁹ (Safety Culture, 2023)

La matriz de riesgo resultante es una matriz 5x5, como se ve en la Tabla 3, donde las filas corresponden a la probabilidad total y las columnas al impacto total. Cada casilla tiene un valor correspondiente a la cantidad de riesgos calculados que tienen el par ordenado de dicha casilla. Por ejemplo, si hay dos riesgos con un par ordenado 1;3, la casilla 1;3 tiene un valor de 2.

La matriz de riesgo entrega el análisis para un caso concreto. Se suelen realizar tres matrices, que permiten ver la evolución del riesgo con las medidas preventivas propuestas. La primera matriz es de riesgo inherente, la cual se hace suponiendo que no se hace nada para solucionar el riesgo. La segunda matriz es la matriz residual, la cual considera las propuestas y medidas que ya se toman para disminuir cada riesgo. La tercera es la matriz esperada, que corresponde a la matriz una vez hechas las propuestas, tomando como base la matriz de riesgo residual.

10.17 Optimización y eficiencia

La optimización es la búsqueda de la mejor solución posible para un problema dado. En los casos vistos en este estudio, donde ya se tiene un sistema diseñado y construido, la optimización de los pozos está centrada en la optimización de las motobombas, tanto en su elección como en su punto de operación.

Las motobombas de pozo profundo son equipos de precisión que operan de forma continua, que además están instalados hasta cientos de metros bajo tierra, por lo que el diseño previo a la instalación es clave para lograr una optimización de su funcionamiento. Esto significa optimizar la elección de la motobomba y de su punto de operación dentro del sistema que se encuentra. En este sentido, la optimización va de la mano con la eficiencia.

La eficiencia es la solución de los problemas usando la menor cantidad de recursos posibles. Se llama eficiencia también a la relación entre la energía requerida y la energía utilizada, como se puede ver en la eficiencia de bombas o motores.

Por su parte, la eficiencia hídrica se centra en la conservación del agua con distintas medidas. “Mejorar la eficiencia del agua reduce los costos operativos y reduce la necesidad de desarrollar nuevos suministros y expandir la infraestructura. También reduce las extracciones de suministros limitados de agua dulce, dejando más agua para el futuro y, mejorando la calidad del agua en el ambiente y cuidando el hábitat acuático.”³⁰ En este trabajo, se busca mejorar la eficiencia hídrica mejorando la eficiencia de los sistemas productivos de agua, además de reducir los riesgos de fugas o roturas de tuberías.

³⁰ (Baeza, 2020, págs. 3-4)

11 Caso 1: SPAP San Esteban

11.1 Diagnóstico de situación actual

El SPAP San Esteban suministra de agua la comuna de mismo nombre, en la provincia de los Andes, Región de Valparaíso, Chile. El sistema consiste actualmente en tres pozos, el pozo N°758 construido en 1968, el pozo 3 construido en 1996 y el pozo 4 construido en 2016. Las tres motobombas de dichos pozos trabajan en paralelo, e impulsan el agua más de un kilómetro de distancia hasta la planta de tratamiento. En esta sección, se refiere a los pozos y las motobombas de San Esteban indistintamente como P3, P4 y P758. Un diagrama de la situación actual se presenta en la Figura 29.

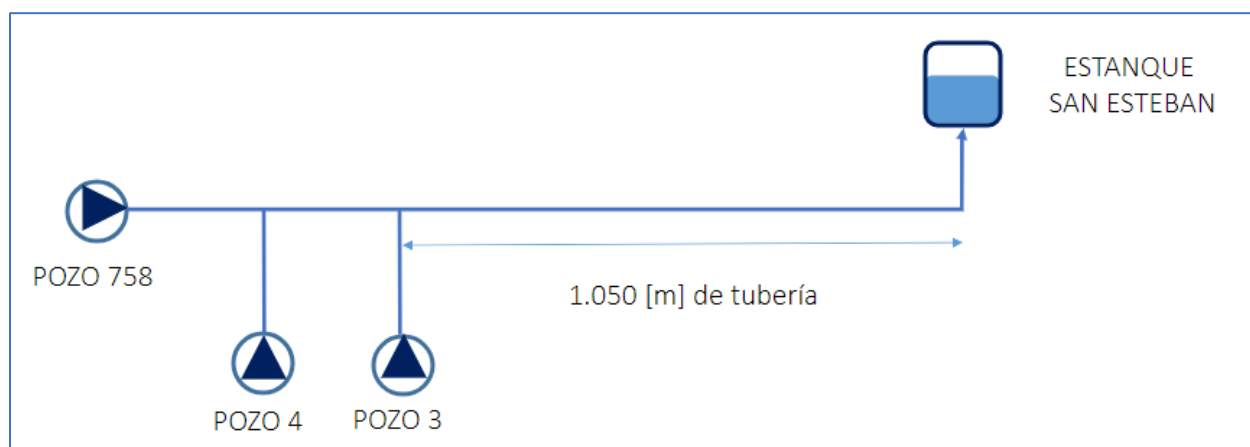


Figura 29: Diagrama de situación actual en San Esteban.

Para mejorar el sistema, se busca instalar una sentina. La sentina es una estructura que permite almacenar agua, y la ventaja que tiene es que se puede intervenir para agregar agua si el sistema no tiene suficiente, o extraer en caso de que tenga un superávit. Otra ventaja que tiene es evitar los problemas de muchas bombas en paralelo, en el caso que se quiera expandir esta SPAP a futuro.

Al evaluar la nueva operación de las bombas, éstas quedan sobredimensionadas al no considerar las pérdidas correspondientes a los más de mil metros de tubería. Se evalúa la alternativa que los tres pozos se independicen, pero también se evalúan propuestas de independizar sólo una de las bombas, descritas más adelante.

Se presenta en la Tabla 4 un resumen de las motobombas en la situación inicial. Esto es una estimación a partir del caudal total que tiene el sistema.

Tabla 4: Situación actual San Esteban

Pozo	Q [L/s]	H [m]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Eficiencia [%]
P3	45	103	50	61	74%
P4	40	159	50	100	62%
P758	25	170	50	52	80%
Total	110	-	-	213	-

11.2 Análisis técnico

Las preguntas por resolver son las siguientes: ¿Es necesario reemplazar las bombas por otras de menor potencia? ¿En caso de poder usarlas, es mejor independizar las tres, o usarlas en paralelo? ¿Cuál es la mejor configuración para estas bombas?

El primer paso fue recopilar la información relevante de las bombas. Se identifica inmediatamente que la bomba P4 es la más potente, y por lo tanto la que mayor potencial tiene para extraer caudal. Al trabajar en paralelo con otras dos bombas de menores capacidades, la limitan a trabajar en un punto menor al que se desearía.

Como se trata de un sistema que sólo incluye tres motobombas, se puede estudiar la variación puntual de cada bomba. Actualmente sólo una de las bombas tiene variador de frecuencia, por lo que se supone que se instalan para las tres, ya que el sistema eléctrico lo permite. Esta suposición se hace sabiendo que, si se espera instalar una sentina y mantener las bombas existentes, estas estarán sobredimensionadas para el trabajo requerido y por lo tanto trabajarán en un punto de muy baja eficiencia, lo que corre riesgo de presentar fallas, como se habló en la sección 10.12. Esta suposición es válida porque tras el análisis del caso queda claro que sin variador de frecuencia no se podrían mantener las bombas existentes.

Se proponen tres opciones. La opción A, de todas las bombas independientes, la opción B, donde P4 y P3 están en paralelo y P758 independiente, y la opción C con las bombas P4 y P758 en paralelo, pero P3 independiente. La Figura 30 muestra los diagramas de las tres soluciones propuestas.

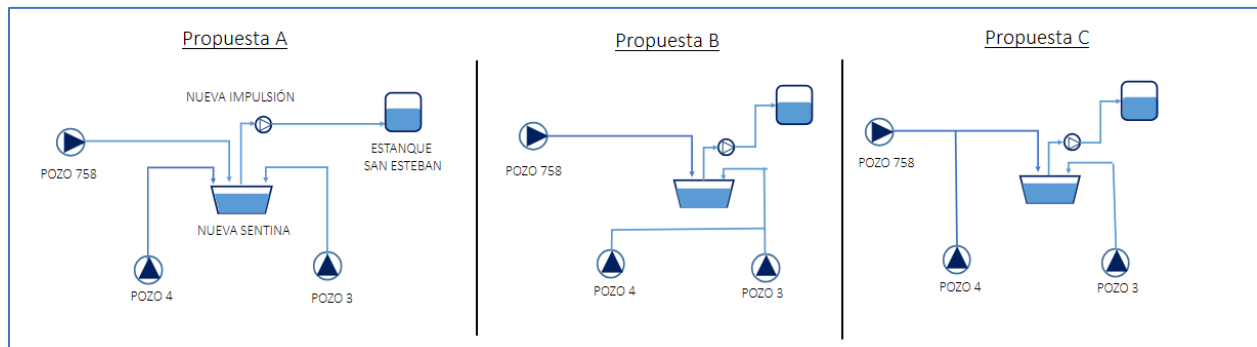


Figura 30: Diagramas de propuestas San Esteban.

Se hacen los gráficos para cada bomba por individual, usando frecuencias de 50 [Hz], 45 [Hz], 40 [Hz] y 35 [Hz]. Para estos gráficos se usaron los catálogos de las bombas y las leyes de afinidad, vistas en la sección 10.8.

Se hacen los gráficos de H-Q y de la curva de sistema, para determinar los posibles nuevos puntos de operación. Se realizaron los gráficos de potencia y de eficiencia, para determinar el nuevo punto de mejor eficiencia según cada frecuencia, o el BEP. Como se vio en la sección 10.12, este punto es relevante porque permite establecer un rango estimado de operación para las bombas. Se usa el rango descrito en dicha sección como un rango aceptable, esto es, con caudales entre un 80 y 110% del caudal correspondiente al BEP. Normalmente los proveedores de bombas indican este rango, pero como se están generando nuevas curvas de operación, el rango ya no sería válido. Una vez realizados estos gráficos, se puede verificar si las motobombas pueden trabajar en un rango satisfactorio de operación, al reducir su velocidad de giro con el

variador de frecuencia. Todos los gráficos realizados para cada opción se encuentran en Anexo A: San Esteban, pero se presenta aquí el resumen de los nuevos puntos de operación para cada bomba. En la Tabla 5, se resume la opción A.

Tabla 5: Resumen de bombas de San Esteban independientes, opción A

Pozo	Caudal [L/s]	Presión [m]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Eficiencia [%]
P758	28	70	35	21	90%
P4	52	63	35	41	76%
P3	28	61	35	22	81%
Total	109	-	-	84	-

Las propuestas B y C utilizan bombas en paralelo. La propuesta B considera P3 y P4 en paralelo, mientras que la propuesta C considera P4 y P758 en paralelo. En estas dos propuestas se suma luego la producción de la tercera bomba que queda independiente, como se indica en la Tabla 5 para que en las tres propuestas se consideren las tres bombas en operación. Sólo se dejan los casos que tienen un rango de operación satisfactorio, como se vio en la sección 10.12.

Como ejemplo, se muestra en un caso no satisfactorio en la Figura 31, donde se tienen las bombas P3 y P4 en paralelo a 40 [Hz]. En verde se ve el rango de operación satisfactorio para cada bomba.

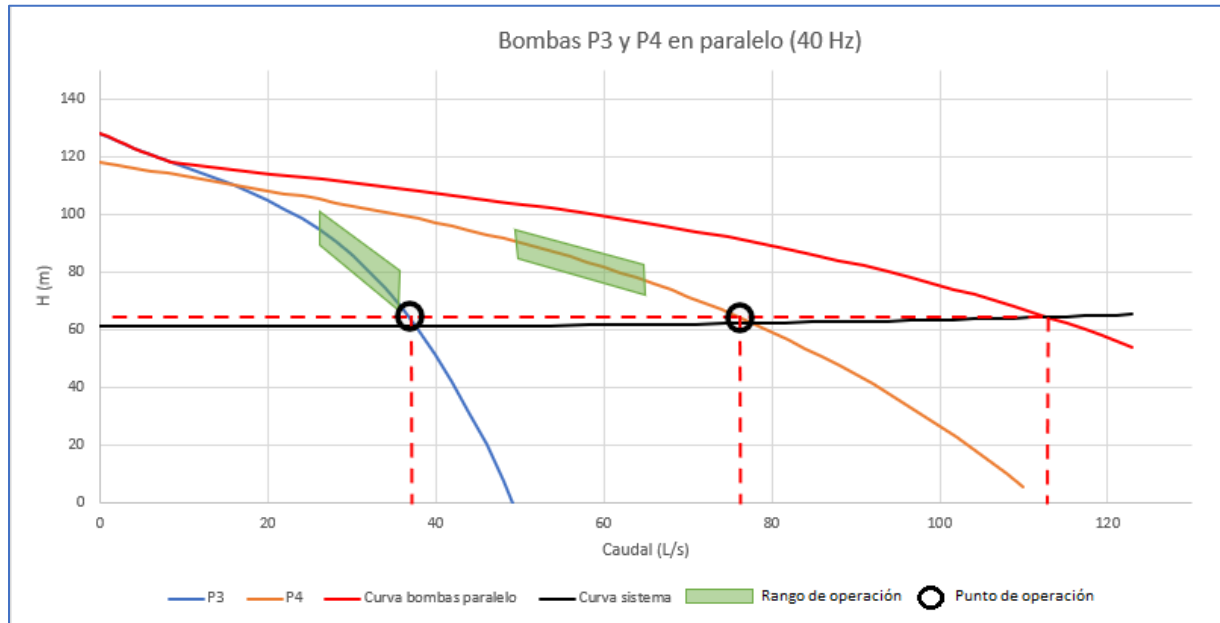


Figura 31: Operación no satisfactoria de bombas en paralelo.

Como se puede ver, en esta configuración ninguna de las dos bombas está operando dentro del rango de operación satisfactorio, como se describe en la sección 10.12, por lo que es una solución no satisfactoria.

Como se vio en la sección 10.11, cuando las bombas operan en paralelo se suma su caudal para un mismo H. En este caso, el punto de operación total sería para un caudal $Q = 113 \left[\frac{L}{s} \right]$, y un $H = 64$ [m], la intersección entre la roja y negra. El problema es que, para lograr este punto de operación, las bombas deberían operar en un punto fuera de su rango de operación, como se ve en la Figura 31. Los demás casos estudiados que no dieron resultados satisfactorios se omiten de este trabajo, ya que no servirán como propuesta de mejora.

Los siguientes dos cuadros de resumen muestra los nuevos puntos de operación para las opciones B y C respectivamente.

Tabla 6: Resumen de bombas P3 y P4 en paralelo, opción B

Punto de operación	P3	P4	En paralelo	P758	Total
Caudal $\left[\frac{L}{s} \right]$	27	52	79	29	108
Presión [m]	63	63	63	70	-
Frecuencia [Hz]	35	35	-	35	-

Tabla 7: Resumen de bombas P758 y P4 en paralelo, opción C

Punto de operación	P758	P4	En paralelo	P3	Total
Caudal $\left[\frac{L}{s} \right]$	30	46	76	28	104
Presión [m]	68	68	68	61	-
Frecuencia [Hz]	35	35	-	35	-

Se puede ver que las tres alternativas son satisfactorias, en cuanto permiten entregar un caudal cercano al que se espera del sistema, al sumarse con la tercera bomba que queda independiente. Sin embargo, la propuesta A es la que entrega mayor caudal total, por lo cual se usa para hacer la evaluación económica.

11.3 Evaluación económica

Para la evaluación económica de San Esteban, se considera un período de dos años. Para la evaluación económica de este caso se debe añadir un nuevo pozo que se va a incorporar al sistema, llamado Pozo 5, o P5. Este pozo afecta el análisis ya propuesto en la sección 11.2.

La evaluación económica compara dos casos. El caso actual consideraría los cuatro pozos en paralelo, incluido el pozo 5. El caso propuesto, o caso optimizado, considera los cuatro pozos independientes, además de una bomba adicional en la sentina donde descargan para impulsar el agua el resto del trayecto.

Se usa un modelo hidráulico realizado por la empresa para los cuatro pozos en paralelo, para usarlo como base para identificar el caudal que podría entregar cada pozo en dicha configuración. Luego, se propone en la optimización una bomba distinta en el pozo 5 capaz de suplir la demanda a futuro según lo que determina la empresa.

Las consideraciones para realizar la evaluación económica de San Esteban son las siguientes:

- Se usan las horas promedio de uso mensuales en el período 2022-2023, y se estima que las bombas operan esas mismas horas cada mes en adelante.

- La potencia y el caudal de las bombas se mantiene constante. La potencia es considerada para el caudal calculado en este trabajo.
- La potencia estimada en la sentina corresponde a una única bomba, que en la realidad corresponde a una configuración de dos bombas en paralelo. Esto se debe a que aún no se ha hecho el diseño de dicha sentina. Además, esta suposición es igual para ambos casos, por lo que no altera la comparación. La bomba opera el tiempo necesario para que no desborde la sentina.
- Las horas de uso de la bomba en el pozo 5 son menores en la propuesta de optimización, ya que el caudal promedio que entrega es mayor.
- En esta evaluación económica no se consideran los costos de inversión, por ejemplo, de infraestructura, piping, eléctricos, obras civiles, entre otros. El análisis de inversión de estos proyectos corresponde a otra área de análisis que escapa del alcance técnico operacional que ofrece este trabajo.
- El costo marginal de producción de agua es de $72 \left[\frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \right]$, entregado por la empresa.
- El factor energético es $52,4 \left[\frac{\text{CLP}}{\text{kWh}} \right]$

El resumen de la evaluación económica se detalla en la Tabla 8, mientras que el desglose completo se encuentra en Anexo A: San Esteban.

Tabla 8: Resumen evaluación económica San Esteban

SPAP San Esteban (evaluado a 2 años)	
Caudal inicial (m3/h)	Caudal optimizado (m3/h)
501	630
Caudal promedio recuperado (m3/h)	
129	
Volumen inicial (m3)	Volumen optimizado (m3)
5.782.933	5.919.343
Volumen recuperado (m3)	
136.409	
Costo optimizado agua (\$/m3)	
72	
Ahorro agua recuperada (\$)	
9.821.481	
Energía inicial (kWh)	Energía optimizada (kWh)
4.891.172	4.715.632
Energía recuperada (kWh)	
175.540	
Costo inicial energía (\$)	Costo optimizado energía (\$)
256.297.414	247.099.094
Ahorro energético (\$)	
9.198.320	
Ahorro total (\$)	
19.019.801	

Como se puede ver en la tabla anterior, la independización de los pozos permite un ahorro debido al aumento del volumen de agua recuperado, además de un ahorro energético al mejorar la eficiencia de las

bombas. Ambos ahorros son del mismo orden de magnitud. En total se tiene un ahorro por agua producida de 9.821.481 [CLP] y un ahorro energético de 9.198.320 [CLP], para un total de 19.019.801 [CLP] en dos años.

12 Caso 2: SPAP Las Delicias

12.1 Diagnóstico de la situación actual

El SPAP Las Delicias suministra de agua la comuna de Vicuña, en la provincia de Elqui, Región de Coquimbo, Chile. El sistema consiste en tres pozos, el pozo N°587 construido en 1962, el pozo N°586 construido el año 1963, y el pozo N°3 construido el año 2005. Las tres motobombas trabajan en paralelo, e impulsan el agua más de un kilómetro de distancia hasta la planta de tratamiento. En esta sección, se refiere a los pozos y las motobombas de Las Delicias indistintamente como P3, P586 y P587. Un diagrama de la situación actual se presenta en la Figura 32.

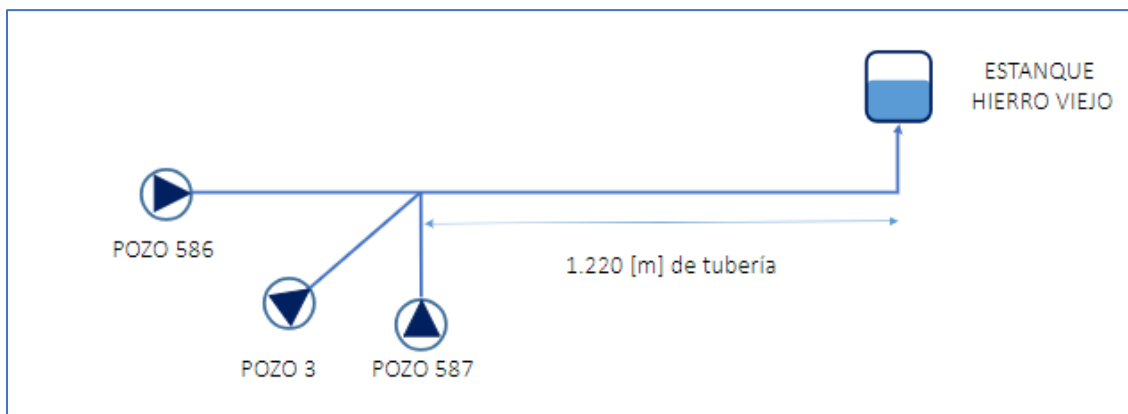


Figura 32: Diagrama de situación actual en Vicuña.

Al igual que para el caso de San Esteban, se plantea instalar una sentina para reunir el caudal de los tres pozos, que se instalaría donde los tres flujos de las bombas se unen. Como consecuencia de esto, las bombas quedan sobredimensionadas para su función, puesto que la curva característica del sistema ya no considera las pérdidas de carga correspondientes a los más de mil metros de tubería.

Se identifica dentro del estudio de los antecedentes, que el pozo P587 se seca al operar con un caudal mayor a $22 \left[\frac{L}{s} \right]$, por lo cual se tendrá en cuenta para la solución propuesta en adelante.

Se presenta en la Tabla 9 el resumen de las bombas instaladas y en funcionamiento actualmente en el sistema.

Tabla 9: Resumen de puntos de operación actuales en Las Delicias

Pozo	Q [$\frac{L}{s}$]	H [m]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Eficiencia [%]
P3	24	91	42	44	72%
P586	23	90	50	33	90%
P587	23	95	50	33	90%
Total	70	-	-	109	-

Se nota inmediatamente que la bomba en P3 es la más potente, pero debe restringirse su frecuencia para adecuarse al sistema, por lo que opera en un punto de baja eficiencia.

12.2 Análisis técnico

Las preguntas por resolver son las siguientes: ¿Es necesario reemplazar las bombas por bombas de menor potencia? ¿Es posible independizar las bombas sin perjudicar la eficiencia energética del sistema?

Para responder esta pregunta se procede por recopilar la información actual de las bombas. Debido a la antigüedad, no se encuentran las curvas de las bombas, excepto P3.

Se conoce el modelo de P586, y se tiene antecedentes sobre las presiones y caudales que entregó la bomba por su cuenta. Con esto se pudo encontrar la curva de la bomba en el catálogo del productor, según su punto de operación estimado a partir de las presiones y caudales medidos en terreno.

Para P587, no se conoce el modelo de la bomba. Sin embargo, si se tienen las mediciones también en terreno de su presión y caudal, por lo que se puede estimar su punto de operación. Se usa el catálogo descrito anteriormente para identificar una bomba con características similares, y se usa su curva como estimación para la operación del equipo del pozo P587.

Una vez recopilada esta información, se procede a determinar las curvas para distintas frecuencias, usando como base las frecuencias de 45 [Hz], 40 [Hz] y 35 [Hz]. Las curvas H-Q permiten identificar el nuevo punto de operación para cada bomba según la frecuencia, usando la nueva curva de sistema hasta la sentina. Luego se calculan las curvas de potencia y de eficiencia para cada frecuencia con las leyes de afinidad vistas en la sección 10.10, corregidas con la eficiencia en la sección 10.9. Esto se hace con el fin de identificar el rango de operación satisfactorio, como se describe en la sección 10.12, para finalmente corregir las frecuencias de forma que las tres bombas operen en este rango. Se presenta en la Tabla 10 el resumen de los nuevos puntos de operación para cada bomba.

Tabla 10: Resumen de nuevos puntos de operación Las Delicias

Pozo	Q [$\frac{L}{s}$]	H [m]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Eficiencia [%]
P3	30	44	33	23	79%
P586	16	42	34	11	88%
P587	16	45	34	11	88%
Sentina	80	40	50	63	70%
Total	62	-	-	108	-

Se determina que el caudal de la bomba debe ser de $80 \left[\frac{L}{s} \right]$, porque debe ser mayor al caudal total que entregan los pozos.

Se nota de la tabla anterior que el caudal del sistema es bastante menor al actual. El problema es que, para asegurar la confiabilidad de las motobombas instaladas en este momento, se requiere bajar bastante las frecuencias. Teniendo en cuenta que esta zona tiene un estrés hídrico bastante alto, si se decide usar esta solución, se podrían operar las bombas durante más tiempo, lo que no sería problema en cuanto a la energía debido a la menor potencia requerida. Otra opción es forzar las bombas a trabajar en puntos de operación lejanos a su punto óptimo, sabiendo que el equipo va a fallar pronto, y una vez que falle se instalen bombas más apropiadas al sistema. Todo esto con el fin de suplir la demanda lo mejor posible, y así evitar el costo de camiones aljibe, siempre teniendo en cuenta que no se sequen los pozos.

12.3 Evaluación económica

Este caso es el más sensible a cambios de operación. Como se identificó en el análisis técnico, el caudal total es menor una vez se instala la sentina, por lo que se debe adaptar una nueva filosofía de operación para alcanzar la misma demanda. Para demostrarlo, se presentan dos evaluaciones económicas distintas.

La primera, denominada como caso optimista, considera que la filosofía de operación cambia, usando lo más posible la bomba P3. La segunda, denominada como caso pesimista, considera que la operación de las bombas se mantiene igual a las condiciones vistas hasta ahora en los pozos. A esto se incluyen los costos por compra de camiones aljibe para suplir la demanda, en el caso que no se logre.

Las consideraciones para realizar la evaluación económica de Las Delicias son las siguientes:

- La evaluación económica optimista considera que la operación de las bombas cambia. La bomba P3 opera 650 horas cada mes, mientras que las otras dos bombas operan tal que las horas de uso totales sean iguales a las vistas durante el período 2022-2023. La evaluación económica pesimista considera las mismas horas de operación a futuro que las vistas en 2022-2023.
- La potencia de las bombas se mantiene constante, para el caudal calculado para este trabajo, en los casos antes y después de las propuestas, a pesar que la potencia cambie con el caudal. Se hace esto ya que el cambio es mínimo, y la complejidad al estimar la potencia para cada caudal es muy alta en comparación.
- La potencia estimada en la sentina corresponde a una única bomba, que en la realidad corresponde a una configuración de dos bombas en paralelo. La bomba en la sentina opera el tiempo necesario para que no se desborde.
- Existe una leve diferencia entre el volumen calculado de los pozos y el volumen que sale del estanque en el período 2022-2023. Se estima que al reducir el volumen que sale del estanque en un 9%, se puede llegar a un resultado similar a la demanda real, que permite estimar la demanda de camiones aljibe.
- En esta evaluación económica no se consideran los costos de inversión, por ejemplo, de infraestructura, piping, eléctricos, obras civiles, entre otros. El análisis de inversión de estos proyectos corresponde a otra área de análisis que escapa del alcance técnico operacional que ofrece este trabajo.
- El costo marginal de producción de agua es de $55 \left[\frac{CLP}{m^3} \right]$, entregado por la empresa.

- El costo del camión aljibe es de 3.500 $[\frac{CLP}{m^3}]$.
- El factor energético es 45,7 $[\frac{CLP}{kWh}]$

Ambas evaluaciones económicas se presentan en la Tabla 11, y el detalle en Anexo B: Las Delicias.

Tabla 11: Resumen evaluación económica Las Delicias

SPAP Las Delicias (evaluado a 2 años), optimista		SPAP Las Delicias (evaluado a 2 años), pesimista	
Caudal inicial (m3/h)	Caudal optimizado (m3/h)	Caudal inicial (m3/h)	Caudal optimizado (m3/h)
236	223	236	223
Caudal promedio recuperado (m3/h)		Caudal promedio recuperado (m3/h)	
-13		-13	
Volumen inicial (m3)	Volumen optimizado (m3)	Volumen inicial (m3)	Volumen optimizado (m3)
2.848.230	2.897.050	2.848.230	2.717.726
Volumen recuperado (m3)		Volumen recuperado (m3)	
48.820		-130.504	
Costo optimizado recuperado (\$)		Costo optimizado recuperado (\$)	
55		55	
Ahorro agua recuperada (\$)		Ahorro agua recuperada (\$)	
2.685.078		0	
Costo inicial aljibes (\$)	Costo optimizado aljibes (\$)	Costo inicial aljibes (\$)	Costo optimizado aljibes (\$)
121.467.017	90.567.649	121.467.017	592.639.295
Ahorro alternativo (\$)		Ahorro alternativo (\$)	
30.899.368		-471.172.278	
Energía inicial (kWh)	Energía optimizada (kWh)	Energía inicial (kWh)	Energía optimizada (kWh)
1333.104	1263.790	63.107.456	59.956.192
Energía recuperada (kWh)		Energía recuperada (kWh)	
69.315		3.151.264	
Costo inicial (\$)	Costo optimizado (\$)	Costo inicial (\$)	Costo optimizado (\$)
67.670.895	64.348.062	67.670.895	62.340.412
Ahorro energético (\$)		Ahorro energético (\$)	
3.322.833		5.330.483	
Ahorro total (\$)		Ahorro total (\$)	
36.907.279		-465.841.795	

Como se puede ver, si se mantiene la operación actual al usar la propuesta, se ve un gran ahorro energético. Sin embargo, el costo por camiones aljibe es tan alto que el resultado termina siendo peor que la condición actual. Se destaca entonces la importancia de adecuar la filosofía de operación a la solución propuesta. La propuesta optimista entrega un ahorro total de 36.907.279 [CLP], donde el ahorro por evitar el uso de camiones aljibe es de 30.899.368 [CLP], o alrededor de un 80% del ahorro total, lo que refuerza el hecho que en este caso la cantidad de agua producida es clave.

13 Caso 3: SPAP Liceo

13.1 Diagnóstico de la situación actual

El SPAP Liceo suministra de agua la comuna de Nogales, en la provincia de Quillota, Región de Valparaíso, Chile. El sistema en la actualidad tiene solamente un pozo en funcionamiento, que se llama Pozo Liceo, construido el año 1989. Un diagrama de la situación actual se presenta en la Figura 33.

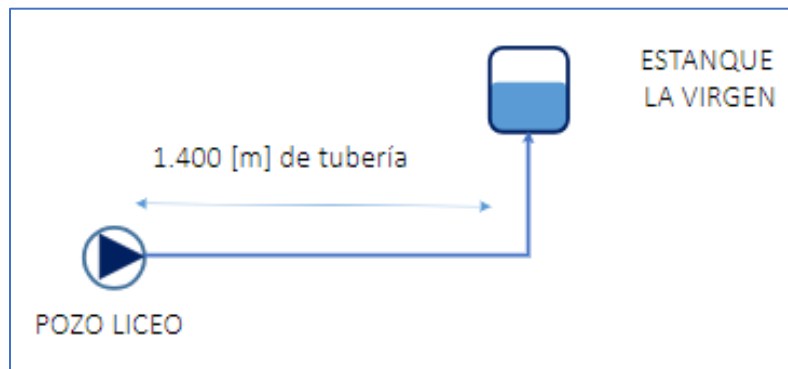


Figura 33: Diagrama de situación actual en Liceo Nogales.

Las bombas instaladas en este pozo suelen tener problemas por sobrecalentamiento, pero hasta ahora no se han instalado con camisa refrigerante. Se debe cambiar la bomba que está instalada actualmente para poder asegurar la continuidad del servicio.

13.2 Análisis técnico

La problemática por resolver es la siguiente: ¿Cuál es la elección óptima para una bomba en este pozo? ¿Puede refrigerarse dicha bomba con una camisa refrigerante?

Para responder esta pregunta, se comienza por identificar el punto de operación actual de la bomba. Se recopila la información sobre el nivel dinámico actual, la diferencia de altura hasta el estanque, el largo de la tubería, su diámetro, con lo cual se construye la curva del sistema como se describe en la sección 10.6.

Se identifica que la bomba se restringía con una válvula para regular el caudal, hasta $12 \frac{[L]}{[s]}$. Esto hace que la bomba opere muy lejos del BEP, lo que empeora el problema de sobrecalentamiento del motor y reduce la vida útil de la bomba. Esta situación se muestra en la Figura 34.

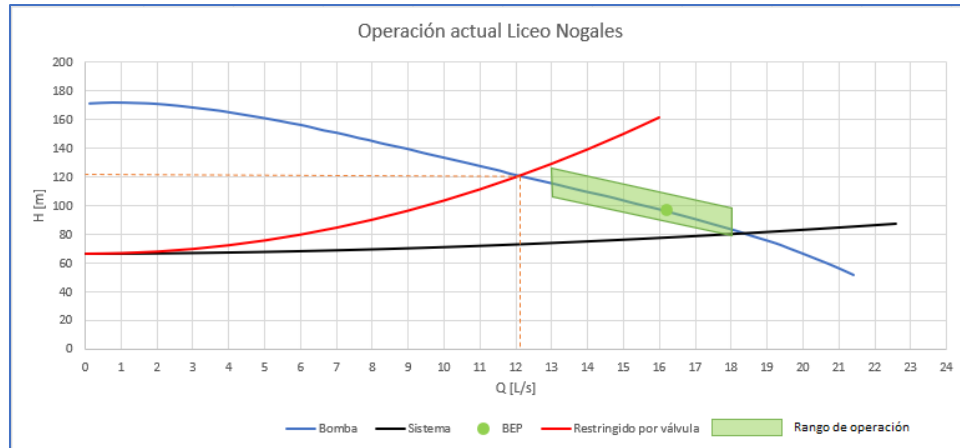


Figura 34: Operación anterior Liceo Nogales.

Durante la ejecución de este análisis se instaló variador de frecuencia en el pozo Liceo, disminuyendo algunos de los problemas ya comentados, pero esto no es suficiente para resolver la totalidad de estos, ya que la bomba seguiría operando lejos del BEP. Sin embargo, el variador es útil para poder adaptarse al cambio del nivel dinámico de aquí en adelante.

Para identificar caudal de diseño de la nueva bomba, se estudian las pruebas de bombeo del pozo, con lo que se crean la curva de gasto variable, la curva de agotamiento y la curva de gasto constante. Estas curvas se encuentran en Anexo C: Liceo.

La curva de gasto variable muestra que el caudal no se estabiliza para $25 \left[\frac{L}{s} \right]$. Luego, con la curva de agotamiento se remarca incluso que a partir de los $20 \left[\frac{L}{s} \right]$, el nivel dinámico del pozo aumenta en gran medida.

Al realizar la prueba de gasto constante, se escogió un caudal constante de $15 \left[\frac{L}{s} \right]$. Dicha prueba cumple con lo dispuesto en el artículo 23 de la Resolución DGA N°425 de 2007, como se describe en la sección 10.4, y la norma NCh 777/2:2000. La prueba no fue realizada para $20 \left[\frac{L}{s} \right]$, por lo tanto, no se puede justificar lo mismo para dicho caudal.

Es más, si se usa la curva de gasto variable como referencia, se nota que el descenso de las últimas 3 horas es mayor a $2 \left[\frac{cm}{h} \right]$ lo que es un indicio que para ese caudal el pozo no lograría estabilizar el nivel dinámico. Estas pruebas tienen varios años, por lo cual el comportamiento del pozo actualmente puede ser incluso peor que cuando se realizaron.

Dicho esto, como medida conservadora, se considera de nuevo un caudal de diseño cercano a los $15 \left[\frac{L}{s} \right]$, y se determina que durante la operación el caudal no supere los $20 \left[\frac{L}{s} \right]$.

Para asegurar que la bomba pueda operar durante un largo tiempo, se consideran dos curvas de sistema. La primera es la actual, que considera un nivel dinámico muy cercano a la succión de la bomba por lo que no puede aumentar más que esto. La segunda es la curva suponiendo que tras una limpieza al pozo se pueda recuperar el nivel dinámico hasta los valores indicados en las pruebas de bombeo, lo cual es una suposición optimista. La elección de la nueva bomba entonces busca que la bomba pueda operar de manera continua y por un largo tiempo, considerando las fluctuaciones del nivel dinámico. Sin embargo, la elección se hace

con la suposición que el sistema de impulsión se mantiene fijo en el tiempo, y no se añaden otros pozos u otras conexiones. Considerando esto, se encuentra en un catálogo la bomba KSB UPA 150C-60/9, con un motor UMA 150E 13/21. El gráfico con las curvas de esta bomba y las dos curvas de sistema se puede encontrar en Anexo C: Liceo. La muestra los rangos de operación y los puntos de operación de la bomba elegida, en casos optimista y pesimista.

Tabla 12: Puntos y rangos de operación nueva bomba Liceo Nogales.

Rangos de operación				
Frecuencia (Hz)	QBEP (L/s)	Qmin (L/s)	Qmax (L/s)	
50 Hz	17,2	13,8	18,9	
48 Hz	16,5	13,3	18	
47 Hz	16,2	12,1	17,7	
Puntos de operación				
Datos	Pesimista		Optimista	
Frecuencia (Hz)	48	50	47	50
Caudal (L/s)	13,5	15	16,7	18,7
H (m)	75	78	61	64,5
Eficiencia (%)	75%	77%	78%	77%
Potencia (kW)	13,13	14,94	12,79	15,31

Como se puede ver, la elección permite que la bomba, usando un variador de frecuencia, pueda funcionar dentro de un rango alto de confiabilidad, teniendo en cuenta las variaciones del nivel dinámico en el tiempo.

El siguiente paso es calcular la velocidad de refrigeración fuera del motor al añadir una camisa refrigerante. El catálogo del motor escogido indica que se necesita una velocidad mínima de $0,2 \left[\frac{m}{s} \right]$ al exterior del motor para lograr la refrigeración. Se calcula la velocidad del agua usando la ecuación (1), teniendo en cuenta que, en este caso, el área es el anillo entre el exterior del motor y el interior de la camisa refrigerante.

El caso más crítico es para $13,5 \left[\frac{L}{s} \right]$, que es el menor caudal identificado de los puntos de operación. Se calcula con una camisa de 160 [mm] de diámetro, considerando que el motor tiene un diámetro externo 145 [mm]. La velocidad resultante es de $3,8 \left[\frac{m}{s} \right]$ fuera del motor, por lo tanto, es suficiente para refrigerarlo.

Para finalizar, se debe asegurar que la motobomba pueda entrar en el pozo. Para ello se usa una planilla realizada en conjunto con la empresa. Los cálculos se encuentran en Anexo C: Liceo.

La holgura entre la motobomba y el pozo es de 107,7 [mm], suficiente para instalar la motobomba en el pozo de 45 [m] de profundidad, considerando que para pozos de menos de 200 [m] de profundidad, la holgura debe ser de por lo menos 101 [mm].

13.3 Evaluación económica

Para la evaluación económica de Liceo Nogales, se realizó una evaluación para los próximos dos años, de forma similar a los casos anteriores. En este caso, al igual que para la SPAP Las Delicias, se debe ver el impacto de la compra de aljibes para cubrir la demanda.

Las consideraciones para realizar la evaluación económica de Liceo Nogales son las siguientes:

- Se usan las horas promedio de uso mensuales en el período 2022-2023, y se estima que la bomba opera esas mismas horas cada mes en adelante.
- La potencia de las bombas se mantiene constante, para el caudal calculado para este trabajo, en los casos antes y después de las propuestas, aunque la potencia cambie con el caudal. Se hace esto ya que el cambio es mínimo, y la complejidad al estimar la potencia para cada caudal es muy alta en comparación.
- No se considera en la evaluación económica los costos de inversión para la compra de nuevas bombas, variadores de frecuencia, cambios de infraestructura, o cualquier otra inversión necesaria para lograr el cambio de la configuración. Sólo tienen en cuenta los costos de operación una vez puesta en marcha la propuesta.
- En esta evaluación económica no se consideran el costo de compra de una nueva motobomba.
- El costo marginal de producción de agua es de $30 \left[\frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \right]$, entregado por la empresa.
- El costo del camión aljibe es de $3.500 \left[\frac{\text{CLP}}{\text{m}^3} \right]$.
- El factor energético es $46 \left[\frac{\text{CLP}}{\text{kWh}} \right]$.

Tabla 13: Resumen evaluación económica Liceo Nogales

SPAP Liceo Nogales (evaluado a 2 años)	
Caudal inicial (m3/h)	Caudal optimizado (m3/h)
50	54
Caudal promedio recuperado (m3/h)	
4	
Volumen inicial (m3)	Volumen optimizado (m3)
684.338	731.397
Volumen recuperado (m3)	
47.059	
Costo optimizado recuperada (\$/m3)	
30	
Ahorro agua recuperada (\$)	
1.411.760	
Costo inicial aljibes (\$)	Costo optimizado aljibes (\$)
8.384.902	0
Ahorro alternativo (\$)	
8.384.902	
Energía inicial (kWh)	Energía optimizada (kWh)
415.327	190.058
Energía recuperada (kWh)	
225.869	
Costo inicial energía (\$)	Costo optimizado energía (\$)
20.939.449	9.568.236
Ahorro energético (\$)	
11.371.152	
Ahorro total (\$)	
21.167.815	

Con la solución propuesta, se estima que se puede evitar el uso de camiones aljibe durante los próximos años. El resumen de la evaluación se encuentra en la Tabla 13, mientras que el desglose completo se encuentra en Anexo C: Liceo.

Como se puede ver en la Tabla 13, el ahorro por agua producida es de 1.411.760 [CLP], el ahorro por evitar uso de camiones aljibes es de 8.384.902 [CLP], y el ahorro energético es de 11.371.152 [CLP], para un total de 21.167.815 [CLP]. Se nota que prácticamente la mitad del ahorro es el energético, debido a usar un variador de frecuencia en vez de una válvula para regular el caudal, incluso cuando en este caso se tiene riesgo de camiones aljibe. Es importante destacar que los camiones aljibe en este caso se usan para temporadas críticas de demanda alta.

14 Caso 4: SPAP El Tambo

14.1 Diagnóstico de la situación actual

El pozo El Tambo N°4 fue construido el año 2018, en la comuna de San Felipe, provincia de San Felipe, Región de Valparaíso, Chile. Forma parte del SPAP El Tambo, un sistema de cinco pozos. Las proyecciones realizadas por la empresa durante el año indican que el sistema no sería capaz de suplir la demanda a partir de noviembre. Un diagrama de la situación actual se presenta en la Figura 35.

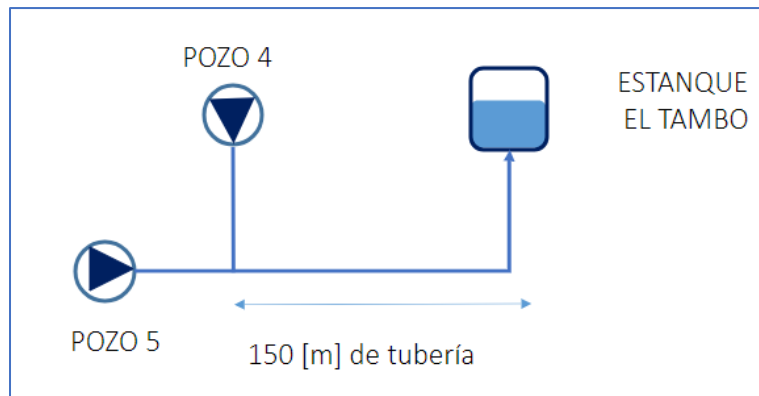


Figura 35: Diagrama de pozos 4 y 5 SPAP El Tambo.

Cuando se realizó el pozo P4 el año 2018, las pruebas de gasto variable indicaron que el pozo es capaz de extraer hasta $80 \left[\frac{L}{s} \right]$. Se diseñó el pozo con un caudal de $50 \left[\frac{L}{s} \right]$, ya que esto fue lo que se comprometió dentro de la empresa. Para el mes de septiembre de 2022, el caudal que entrega es solo de $25 \left[\frac{L}{s} \right]$.

Para solucionarlo, se propone optimizar los pozos 4 y 5 de El Tambo, en esta sección llamados P4 y P5. Los pozos P4 y P5 son pozos gemelos, significa que están instalados en un mismo acuífero, con dos motobombas similares y misma profundidad de la bomba. En la Figura 36 se puede ver cómo el comportamiento de ambos pozos es prácticamente el mismo.

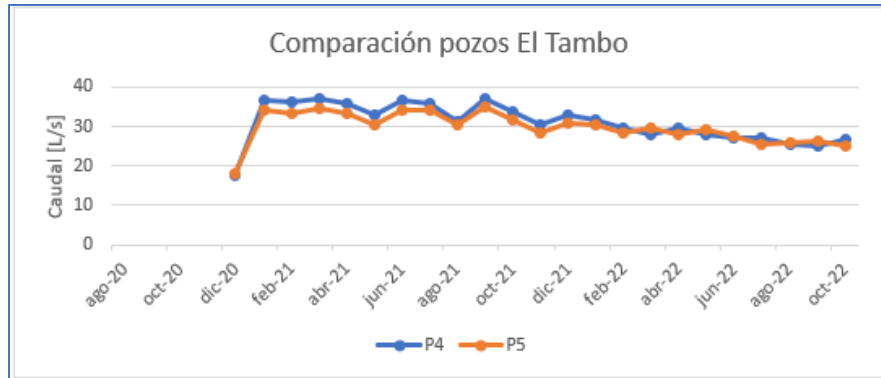


Figura 36: Comparación entre pozos P4 y P5 El Tambo.

Para que el trabajo se pueda resolver rápidamente y además que no sea una inversión enorme, se forma un proyecto en dos etapas, de aquí en adelante llamadas etapa A y etapa B. La primera etapa A es el cambio de la bomba P5, que como se ve a más adelante, hace necesario también un aumento de la capacidad eléctrica para alimentar la nueva bomba de mayor potencia, y preparar la instalación para la segunda bomba. La segunda etapa B es el cambio de la bomba P4. La Tabla 14 resume las dos etapas.

Tabla 14: Etapas del proyecto en El Tambo

Etapas A	Etapas B
Cambio de bomba P5	Cambio de bomba P4
Aumento de capacidad eléctrica	-

Entre los meses de septiembre y diciembre de 2022, la empresa definió la alternativa de optimización para el pozo P5. Se identificó el nuevo punto de operación de la bomba, las tareas a realizar, los tiempos, los costos, etc. Para identificar el punto de operación de la bomba, se aplicó en su momento un modelo hidráulico con el software Watercad. En la Tabla 15 se resumen los resultados una vez terminada la Etapa A, obtenidos en un momento previo al comienzo del presente trabajo. Se nota que la potencia es mucho mayor a la inicial, lo que justifica el aumento de la capacidad eléctrica de la Etapa A.

Tabla 15: Situación P5 El Tambo

Situación P5	Antes de Etapa A	Después de Etapa A
Caudal [L/s]	25,2	50
Presión [m]	120	172
Profundidad bomba [m]	102	140
Nivel dinámico [m]	85	93
Potencia [kW]	48	132

14.2 Análisis técnico

La problemática por resolver es la siguiente: ¿Cómo se debe optimizar el pozo P4? ¿Se instala una bomba idéntica a la bomba instalada en P5, por ser pozos gemelos?

El análisis que se hace en este trabajo es verificar que el sistema funcione una vez se termine la etapa B del proyecto. Para hacer este análisis, se hace un modelo hidráulico del sistema en el software Epanet 2.2. Se considera que las pérdidas por los accesorios en el sistema son despreciables, por lo que se cambia el factor C de Hazen-Williams para calibrar los resultados del modelo con los resultados reales.

El primer modelo que se hace es la situación previa a la primera etapa, es decir el sistema en octubre 2022. Este primer modelo es la base sobre la cual se construyen los demás modelos. Una vez realizado el modelo, se puede comparar con los datos reales del sistema, y así verificar que el modelo esté correcto, como una calibración.

Luego, con el modelo base hecho, se realiza un segundo modelo, correspondiente al sistema una vez terminada la etapa B. Los datos de entrada del nuevo modelo se pueden encontrar en Anexo D: El Tambo.

Tabla 16: Resumen de modelos hidráulicos El Tambo

Modelos hidráulicos	Modelo octubre 2022		Modelo post-Etapa B	
	P4	P5	P4	P5
Q [$\frac{L}{s}$]	25,6	24,4	68,6	68,4
H [m]	106	105	104	103
Qtot [$\frac{L}{s}$]	50		137	
Velocidad máxima [$\frac{m}{s}$]	1,6		4,36	

Como se puede ver en la Tabla 16, una vez terminada la etapa B, el flujo más del doble al que se tenía originalmente. El problema de esto es que la velocidad en la tubería alcanza un valor mucho mayor al límite considerado de $2.4 \frac{m}{s}$ como se define en la sección 10.7. Además, las bombas operan muy lejos de su punto óptimo de operación.

De este modelo se entiende que el uso de las dos bombas en paralelo, como se tenía planeado para la Etapa B, requiere de un cambio. En la práctica, este sistema ya está dando el caudal que se requiere con la bomba P5 instalada, por lo tanto, se propone que la bomba P4 quede de respaldo en caso de falla.

Para hacer un análisis más completo, se proponen otras dos alternativas. La alternativa 1 es evaluar el cambio de tubería para evitar las altas velocidades del fluido. La alternativa 2 corresponde a instalar las bombas nuevas, pero usar un variador de frecuencia para regular los caudales y así evitar que la velocidad aumente más de lo que el sistema pueda soportar.

La alternativa 1 consta en calcular el diámetro de la tubería que conecta ambas bombas, de forma que la velocidad nunca sea mayor a $2.4 \frac{m}{s}$, usando la ecuación (2). Considerando que ambas bombas operan cerca de su punto de operación óptimo, el caudal total es de $102 \frac{L}{s}$, y el diámetro mínimo para asegurar la velocidad es de 233 [mm]. El problema, es que, por reducir la velocidad, disminuyen también las pérdidas

de carga, por lo tanto, el punto de operación se aleja se sale de la curva, como se vio en la sección 10.5. Esta alternativa entonces no es viable por sí sola.

La alternativa 2 propone usar los variadores de frecuencia. Se hace el cálculo de los nuevos puntos de operación usando las leyes de afinidad, las ecuaciones (11), (12) y (13) vistas en la sección 10.8. A partir de estas ecuaciones, se identifica un nuevo punto de operación con el modelo realizado Epanet. Finalmente, se verifica que las bombas estén dentro del rango de operación, como se define en la sección 10.12.

En la Tabla 17 se resume el resultado del nuevo punto de operación para ambas bombas. La tabla de rango de operación se encuentra en Anexo D: El Tambo.

Tabla 17: Resumen de bombas El Tambo

Pozo	Q [$\frac{L}{s}$]	v [$\frac{m}{s}$]	H [m]	Frecuencia [Hz]	Potencia [kW]	Eficiencia [%]
P4	36,9	1,17	113,5	40	49,6	84%
P5	36,1	1,15	115,1	40	49,2	83%
Total	73	2,3	-	-	98,3	-

Solo se presenta el resultado para 40 [Hz], ya que para 35 [Hz] la presión no es suficiente para el sistema, y para la frecuencia de 45 [Hz] la velocidad supera al máximo establecido.

En este nuevo sistema propuesto, la velocidad máxima de 2,3 [$\frac{m}{s}$] se acerca mucho al límite definido como 2,4 [$\frac{m}{s}$], por lo que hay que tener cuidado que las tuberías no sufran fallas.

Por otro lado, se encuentra el pozo 1. Este pozo se encuentra conectado en paralelo a los dos anteriores, pero desde que se habilitó la nueva bomba en P5, disminuyó su caudal tanto que actualmente no se encuentra en uso.



Figura 37: Fotografía satelital de pozos en SPAP El Tambo. De la empresa

El nivel dinámico en el pozo 1 ha aumentado hasta llegar casi al nivel de la bomba. Si se quisiera volver a habilitar en el futuro, se propone lo siguiente.

- Hacer una limpieza al pozo para recuperar el nivel dinámico, sobre todo porque es un pozo antiguo, construido el año 1997.
- Para no impactar el funcionamiento de P4 y P5, instalar una nueva tubería a la salida del pozo. Esta tubería se puede instalar a un costado de la tubería actual. Así se puede aprovechar la infraestructura existente, y el hecho que los pozos y el estanque se encuentran cercanos entre ellos.

15 Evaluación por riesgo

Para esta evaluación, se plantean tres posibles riesgos. El primer riesgo es que falle una motobomba. El segundo riesgo es que ocurra una rotura, fuga, u otra falla en las tuberías. El tercer riesgo es que la eficiencia del sistema sea baja. La métrica de probabilidad se realiza en función de tres factores que permiten estimar la probabilidad de estas fallas. El primero es el punto de operación en comparación al rango de operación de la bomba, el segundo es la velocidad del agua en la tubería, y el tercero es la potencia específica. En la Tabla 18 se presenta la métrica de probabilidad desarrollada para este caso.

Tabla 18: Métrica de probabilidad

Métrica de probabilidad	Magnitud del indicador	Rango de operación $\left[\frac{L}{s}\right]$	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Potencia específica $\left[\frac{kW}{L/s}\right]$
Probabilidad baja	1	$90\% Q_{BEP} \leq Q \leq 105\% Q_{BEP}$	$0,9 \leq v \leq 2,4$	$P_s \leq 1$
Probabilidad media	3	$80\% Q_{BEP} \leq Q \leq 110\% Q_{BEP}$	$2,4 < v \leq 3,5$ o $v < 0,9$	$1 < P_s \leq 1,5$
Probabilidad alta	5	$Q < 80\% Q_{BEP}$ o $Q > 110\% Q_{BEP}$	$v > 3,5$	$P_s > 1,5$

El valor para el rango de operación se estima en base a la Figura 26, de confiabilidad en función del punto de operación de la bomba y del BEP, o punto de máxima eficiencia. El valor para la velocidad se estima a partir de la Tabla 1, de velocidades recomendadas para aplicaciones de agua. El valor para la potencia específica se estima en función a los valores calculados en este trabajo. La potencia específica más alta es de $1,94 \left[\frac{kW}{L/s}\right]$, mientras que la más baja es de $0,46$, por lo tanto, se considera que para valores menores a 1 la probabilidad es baja, para valores entre 1 y 1,5 es media, y para valores mayores a 1,5 la probabilidad es alta.

Para el impacto, se consideran ocho factores. Se consideran los factores medioambiental, comunidad, reputación de la empresa, continuidad del servicio, salud y seguridad operacional, financiero, normativo y de calidad.

En la Tabla 19 se presenta la métrica de impacto para los tres riesgos y para las cuatro localidades estudiadas.

Tabla 19: Métrica de impacto

RIESGOS	Medio ambiente	Comunidad	Reputación	Continuidad	Salud y Seguridad Ocupacional	Financiero	Normativo	Calidad
Riesgo: Falla de motobomba								
EL TAMBO	1	1	1	4	1	3	Véase continuidad	NO APLICA
DELICIAS	1	1	1	4	1	3	Véase continuidad	NO APLICA
SAN ESTEBAN	1	1	1	4	1	3	Véase continuidad	NO APLICA
NOGALES	1	1	1	5	1	3	Véase continuidad	NO APLICA
Riesgo: Falla en tuberías								
EL TAMBO	1	2	2	3	3	1	1	NO APLICA
DELICIAS	1	2	2	3	3	1	1	NO APLICA
SAN ESTEBAN	1	2	2	3	3	1	1	NO APLICA
NOGALES	1	2	2	5	3	1	1	NO APLICA
Riesgo: Baja eficiencia								
EL TAMBO	1	1	3	NO APLICA	NO APLICA	3	NO APLICA	NO APLICA
DELICIAS	1	1	3	NO APLICA	NO APLICA	3	NO APLICA	NO APLICA
SAN ESTEBAN	1	1	3	NO APLICA	NO APLICA	3	NO APLICA	NO APLICA
NOGALES	1	1	3	NO APLICA	NO APLICA	3	NO APLICA	NO APLICA

El impacto depende de cada localidad. Por ejemplo, el impacto en la continuidad es muy alto en Nogales, ya que el pozo Liceo es el único pozo en uso actualmente en la localidad.

Para las ponderaciones en la probabilidad, se considera lo siguiente:

- En el riesgo de falla de la motobomba, se considera sólo el criterio del rango de operación.
- Para el riesgo de falla de las tuberías, se considera sólo el criterio de velocidad.
- Para el riesgo de baja eficiencia, se considera en partes iguales el rango de operación y la potencia específica, ya que la potencia específica es dependiente del sistema en el que se evalúa, y que una bomba opere lejos del punto de operación óptimo implica una baja eficiencia.

Para el caso de la matriz residual, se considera lo siguiente:

- Para el riesgo de falla de motobomba, tanto el impacto como la probabilidad se reducen en 1.
- Para el riesgo de falla en tuberías, tanto el impacto como la probabilidad se reducen en 1.
- Para el riesgo de baja eficiencia, solo la probabilidad disminuye en 1.

Esto es en base a los distintos implementos en la empresa para disminuir el riesgo, como lo son las mantenencias correctivas, el cambio de equipos, etc. En el caso de la baja eficiencia no se afecta el impacto, ya que no se ha visto alguna medida para evitar la reducción de la eficiencia directamente.

La Tabla 20 corresponde a la matriz de riesgo para el caso inherente, la Tabla 21 corresponde a la matriz de riesgo residual, y la Tabla 22 corresponde a la matriz de riesgo esperada.

Tabla 20: Matriz de riesgo inherente

		Matriz de Riesgo Inherente				
PROBABILIDAD	0	0	5	6	1	
	0	0	2	0	0	
	0	0	1	0	1	
	0	0	1	0	0	
	0	0	3	2	0	
	IMPACTO					

Tabla 21: Matriz de riesgo residual

		Matriz de Riesgo Residual				
PROBABILIDAD	0	0	0	0	0	
	0	1	10	1	0	
	0	0	2	0	0	
	0	0	1	1	0	
	0	2	4	0	0	
	IMPACTO					

Tabla 22: Matriz de riesgo esperada

		Matriz de Riesgo Esperado				
PROBABILIDAD	0	0	0	0	0	
	0	0	0	0	0	
	0	1	3	0	0	
	0	0	2	0	0	
	0	2	12	2	0	
	IMPACTO					

Se puede ver que la matriz de riesgo esperada, una vez consideradas las propuestas, disminuye principalmente la probabilidad de ocurrencia del riesgo. Si se considera la casilla en amarillo como riesgo bajo, hay un cambio de 4 casos con riesgo bajo a 14 casos con riesgo bajo en comparación al riesgo residual.

16 Propuestas de indicadores, parámetros de medición y recomendaciones

16.1 Indicadores

16.1.1 Caudal específico

Un indicador que permite ver el cambio una vez realizada una mantención es el caudal específico. La ecuación para calcularlo es la siguiente:

$$Q_s = \frac{Q}{NE - ND} \left[\frac{L/s}{m} \right]$$

Donde:

Q_s : Caudal específico en $\left[\frac{L/s}{m} \right]$

Q : caudal en $\left[\frac{L}{s} \right]$

NE : Nivel estático en [m]

ND : Nivel dinámico en [m]

La ventaja de este indicador es comparar una vez realizado un trabajo de mantenimiento preventivo. El caudal específico debe ser mayor una vez que se hace la mantención, principalmente por la disminución del nivel dinámico. Incluso, es posible que una vez se haga la mantención el caudal de la bomba sea también mayor.

También es recomendado calcular este caudal específico en las pruebas de bombeo, para medir el mejor caudal específico al que puede llegar el pozo, en condiciones ideales.

16.1.2 Potencia específica

De forma análoga, la potencia específica permite evaluar rápidamente el costo operacional de una solución, y comparar propuestas entre sí. La ecuación para calcularla es la siguiente:

$$P_s = \frac{P_{\text{bomba}}}{Q} \left[\frac{\text{kW}}{L/s} \right]$$

Donde:

P_s : Potencia específica en $\left[\frac{\text{kW}}{L/s} \right]$

P_{bomba} : Potencia de la bomba, sin incluir eficiencias del motor y otros componentes, en [kW]

Q: Caudal en $\left[\frac{L}{s}\right]$

La ventaja de este indicador es que entrega una idea del rendimiento del pozo, permite evaluar un pozo tras una intervención y permite comparar pozos entre sí para identificar brechas, oportunidades o incluso si una bomba está sobredimensionada.

Se usa la potencia de la bomba en vez de la potencia total para simplificar, ya que no se necesita conocer la eficiencia del motor, acoples etc. Se puede usar la potencia total para calcular la potencia específica con el mismo fin, pero es importante que la comparación sea siempre entre potencias del mismo tipo.

16.2 Parámetros de medición

16.2.1 Presión a la salida de la bomba

Como se vio en la sección 10.6.3, identificar bien el punto de operación es una de las tareas clave para hacer una buena optimización de fuentes de producción de agua. La inclusión de un manómetro a la salida de cada bomba, junto al nivel dinámico que se mide continuamente, permite hacer una estimación rápida y certera de la presión de operación de la bomba, que junto al caudal entrega el punto de operación.

16.2.2 Frecuencia del motor

Tener un punto de operación es útil, pero no es suficiente para entender las condiciones de la bomba. Si se conoce el punto de operación concreto, se conoce la frecuencia real de la motobomba en terreno, y además se tienen las curvas de la bomba, se puede notar un GAP entre la operación real y la teórica.

Si el punto de operación real se aleja mucho del punto teórico de la bomba, esto puede indicar que la bomba tiene daños internos, o tiene una falla funcional debido a su edad.

16.2.3 Potencia del motor

Actualmente, la potencia del motor es un indicador que se puede medir con facilidad en terreno, pero no se incluye dentro de los indicadores. La importancia de la potencia del motor es que permite un cálculo rápido de los costos operacionales, si se conoce o se estima un costo por unidad de energía, como se en la evaluación económica de cada caso.

Otra ventaja de tener el dato de la potencia del motor es que, en teoría, debe variar de la misma forma que el caudal. Alguna variación entre el caudal y la potencia puede indicar que la bomba no está funcionando de la forma esperada.

Una última ventaja, relacionada a lo anterior, es que sirve como respaldo para asegurar que la bomba no está funcionando en las condiciones esperadas, junto a la frecuencia. Como se vio en la sección 10.6, cuando las bombas envejecen, la pendiente de su curva característica aumenta, o se vuelve más empinada, lo que

significa que para una misma presión entrega un caudal menor. Si se tiene definido el punto de operación, y se nota que este punto no está en la curva del proveedor, la potencia sirve como respaldo para justificar que, en efecto, la bomba está operando en un punto de operación distinto al que se espera porque ha perdido sus condiciones se han deteriorado, por la edad o por daños internos en la bomba.

16.3 Recomendaciones

16.3.1 Rango de operación

Para determinar el rango de operación, se debe conocer el BEP, conocido como el punto en la curva H-Q de mayor eficiencia. El BEP viene indicado junto con las curvas de las bombas, para la frecuencia nominal que en Chile es de 50 [Hz]. Para frecuencias distintas, como cambia la curva H-Q, cambia también el BEP, como se vio en la sección 10.6. Se puede pedir al proveedor que incluya curvas a distintas frecuencias para facilitar el cálculo.

Si no están disponibles, se pueden calcular las nuevas curvas H-Q usando las ecuaciones (11), (12) y (13). Las ecuaciones (9), (10) y (14) permiten calcular las nuevas curvas de potencia y eficiencia. Con esto se puede estimar el nuevo BEP viendo el punto máximo de la curva de eficiencia.

El caudal correspondiente al BEP se usa para determinar el rango de operación, como se vio en la sección 10.12.

Se define el rango satisfactorio de operación como $R_Q(f) = [Q_{\min}(f), Q_{\max}(f)] \left[\frac{L}{s} \right]$, donde:

$$Q_{\min}(f) = 0,8 \cdot Q_{\text{BEP}}(f)$$

$$Q_{\max}(f) = 1,1 \cdot Q_{\text{BEP}}(f)$$

$$30 \leq f \leq 50 \text{ [Hz]}$$

$Q_{\text{BEP}}(f)$: Caudal correspondiente a la máxima eficiencia a una frecuencia f , en $\left[\frac{L}{s} \right]$

$Q_{\min}(f)$: Caudal mínimo para la bomba a una frecuencia f , en $\left[\frac{L}{s} \right]$

$Q_{\max}(f)$: Caudal máximo para la bomba a una frecuencia f , en $\left[\frac{L}{s} \right]$

El rango de operación se desplaza hacia menores caudales a medida que baja la frecuencia de operación y viceversa. No se recomienda operar a mayores a 50 [Hz] ni menores a 30 [Hz].

16.3.2 Holgura dentro del pozo

Cuando se hace un cambio de motobomba en un pozo, a veces la nueva motobomba instalada es de mayores dimensiones a la que se instaló originalmente. Por lo tanto, resulta importante determinar si hay espacio suficiente en el pozo para este nuevo equipo, y los componentes que trae. Dentro de este cálculo, se debe incluir la camisa refrigerante, que en la mayoría de los casos es necesaria para asegurar que la bomba pueda

enfriarse efectivamente. Para calcular el diámetro de la camisa refrigerante se pueden usar las ecuaciones (15) y (16) vistas en la sección 10.14 Para este cálculo debe estimarse un diámetro de camisa, cercano al diámetro de la bomba para que use menos espacio dentro del pozo, y que cumpla con la condición de velocidad vista en la sección antes mencionada.

La Figura 38 indica los demás componentes que deben tenerse en cuenta para el cálculo. En dicha figura, el aire corresponde a las líneas de aire para la medición del nivel dinámico.

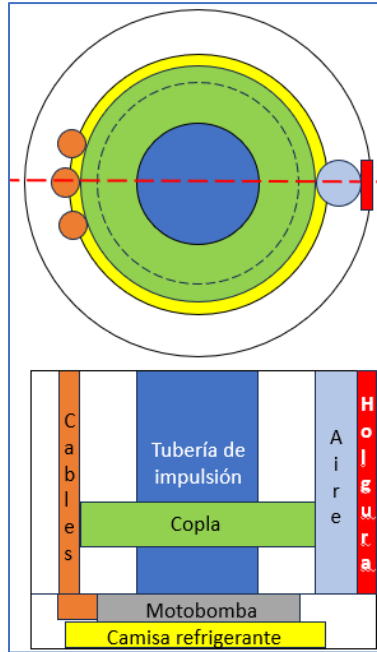


Figura 38: Esquema de los componentes dentro del pozo.

Dependiendo del tamaño del equipo, hay dos posibilidades para el espacio que ocupan todos los componentes. El primer caso es que la tubería de impulsión, la copla, y la línea de aire o los cables (dependiendo de cuál sea más grande) usen más espacio dentro del pozo, como se ve en la Figura 38. El segundo caso es que la motobomba con la camisa refrigerante sean los componentes que usan más espacio.

El cálculo de la holgura depende de cada caso, según la geometría, el tipo de bomba, las conexiones, los materiales que se usen, si usa camisa refrigerante, la granulometría del pozo, etc.

Sin embargo, la norma chilena NCh777/2:2000 indica lo siguiente para pozos profundos:

Para pozos de 200 metros de profundidad o menos, la holgura entre el pozo y los componentes debe ser de 4 pulgadas. Para pozos de mayor profundidad, la holgura del pozo debe ser de 6 pulgadas.

Esta holgura es vista con relación a los diámetros. Por ejemplo, si un pozo de 150 metros de profundidad ocupa 8 pulgadas de diámetro máximo entre todos los componentes, el diámetro del pozo debe ser de un mínimo de 10 pulgadas.

Como ejemplo, se presenta la Tabla 23. En general, la metodología consiste en identificar el mayor diámetro que usan los componentes de la motobomba, sea la cámara de refrigeración, la suma de los componentes anexos, o la motobomba sola. Esto se compara al diámetro del pozo existente, teniendo en cuenta la holgura determinada por la norma.

Tabla 23: Ejemplo de cálculo de instalación en pozo

Componentes	Diámetro [mm]
Diámetro Exterior de bomba (o motor, el mayor)	292,2
Diámetro interior camisa refrigeración	315,00
Diámetro exterior camisa	334,40
Diámetro Exterior tubería impulsión vertical	219,08
Línea de aire (depende del sensor hidrostático)	32
Cable (depende del tipo que venga con la mbba)	23,9
Suma de copla a impulsión	50
Diámetro de unión vertical (diám. Exterior tubería vertical+línea de aire/cable+copla)	301,08
Diámetro mayor (Dext camisa o unión vertical)	334,4
Profundidad del pozo [m]	300
Holgura [mm]	152,4
Diámetro del pozo [pulg]	18
Diámetro del pozo [mm]	457
Diámetro mínimo del pozo [mm]	486,8
Condición de instalación	No se puede instalar

La Tabla 13 funciona de la siguiente manera. Se debe identificar el máximo diámetro exterior de la motobomba, el diámetro exterior de la tubería de impulsión, el diámetro de las líneas de aire y de los cables eléctricos, y el diámetro adicional añadido por la copla entre la bomba y la tubería de impulsión. Se suman todos estos diámetros para identificar un diámetro llamado “diámetro de unión vertical”. Luego se identifica otro diámetro, el diámetro externo de la camisa, conociendo el diámetro interior de la camisa, que debe calcularse para asegurar que la velocidad del agua fuera del motor sea suficiente para lograr la refrigeración, y se suma su espesor. El mayor entre el diámetro de unión vertical y el diámetro externo de la camisa es el diámetro crítico y con el cual se compara la holgura con el pozo.

Luego se identifica la holgura que se necesita en el pozo, como se indicó anteriormente. En este caso, la holgura debe ser igual o mayor a 6 pulgadas, o 152,4 milímetros. A esta holgura se le suma el diámetro mayor, o crítico, para identificar el diámetro mínimo que debe tener el pozo. Finalmente, se compara este diámetro con el diámetro del pozo habilitado. Si el diámetro mínimo calculado es mayor al diámetro del pozo habilitado, como se ve en la Tabla 13, entonces no se recomienda instalar este equipo en el pozo. En caso contrario, es seguro para habilitar.

17 Conclusiones

En el desarrollo de este trabajo, se han visto sistemas de producción de agua potable que a primera vista parecen similares, pero al aplicar métodos de mejora, comienzan a notarse los detalles particulares de cada uno que afectan la eficacia de cada solución. Esto permite formar una idea en cuanto al alcance de las propuestas, y permite entregar recomendaciones para su uso. En este sentido, primero se evaluará cada caso por separado, analizando sus resultados. Luego se hará una conclusión que recopile todo el aprendizaje extraído de estos casos para proponer recomendaciones generales para los sistemas de pozos profundos.

En el SPAP San Esteban, entre las distintas propuestas, la propuesta de independizar las tres bombas resulta la más llamativa, ya que da más caudal y permite mejor flexibilidad. El caudal que entrega esta propuesta es prácticamente igual al anterior. Sin embargo, al añadir el nuevo Pozo 5 en el trabajo, se nota un aumento de hasta $35 \left[\frac{L}{s} \right]$ en el sistema, en comparación al uso de las cuatro bombas en paralelo. Se nota en este caso que la independización de las bombas permite un aumento considerable en el caudal total del sistema con un solo pozo adicional, y permite incluso mejorar la eficiencia y la confiabilidad de las bombas instaladas actualmente.

El ahorro conseguido debido a la mayor producción de agua es comparable al ahorro producido por la mejor eficiencia en los pozos, incluso al tener una bomba adicional en la sentina. El ahorro en costos operacionales calculado para los próximos dos años de funcionamiento es de alrededor de 19 millones de pesos.

En el SPAP Las Delicias, la propuesta de instalar una sentina para independizar los pozos entrega un caudal menor al anterior. Esto implica un cambio de filosofía de operación para que el volumen total de agua sea igual al anterior, usando las bombas durante más horas del día. Este aumento se justifica ya que los costos energéticos son menores, al operar en una menor potencia, incluso contando una bomba adicional para la sentina. Se nota en este caso que la independización no trae beneficios en cuanto al caudal que extrae el sistema, pero si permite una mejor eficiencia y confiabilidad para las bombas instaladas actualmente.

Los costos en esta localidad son altos debido al aporte alternativo con camiones aljibe, por lo que la eficiencia energética nunca sería capaz de solventarlo. No obstante, el uso de bombas en un punto más eficiente aumenta su vida útil, lo que reduce las detenciones del pozo y por lo tanto reduce también el uso de camiones aljibe por emergencias. El ahorro en costos operacionales calculado para los próximos dos años, considerando que se adopte una nueva filosofía de operación, es de 37 millones de pesos.

De estos dos casos evaluados con la instalación de una sentina, se identifica que es posible aumentar las horas de uso de las bombas para contrarrestar el caudal promedio reducido, sin aumentar los costos operacionales.

En el SPAP Liceo, la localidad necesita también aporte de camiones aljibe en parte debido al funcionamiento errático del equipo, que falla periódicamente por falta de refrigeración del motor. La elección de la nueva bomba considera la instalación de un variador de frecuencia y de una camisa refrigerante, además de poder adaptarse a los cambios del nivel dinámico con los años. Estas tres consideraciones permiten operar esta bomba de forma constante, y asegurando una mayor vida útil, lo que resulta crítico al ser la única bomba en operación en esta localidad. La instalación de un variador de frecuencia evita el problema de restringir el caudal de la bomba con una válvula reguladora, lo que aporta beneficios energéticos y por lo tanto financieros. La elección de una nueva bomba puede entregar un

aumento de hasta $1 \left[\frac{L}{s} \right]$ en promedio. El ahorro en costos operacionales calculado para los próximos dos años es de 21 millones de pesos.

En el SPAP El Tambo, debido a un estudio previo se escogieron dos bombas de potencia mucho mayor a la necesaria, por lo que se propone instalar la bomba P4, pero reducir la frecuencia de ambas bombas para evitar altas velocidades en la tubería. Esto reduce en gran medida el riesgo de fuga o rotura de las tuberías, con la intención de asegurar la continuidad del servicio. Se destaca en este caso la importancia de revisar el sistema hidráulico una vez realizada una mantención a un pozo o un cambio de bomba de capacidades distintas, para evitar riesgos como los vistos en este trabajo.

Teniendo todos estos casos en cuenta, se concluye lo siguiente: el pilar fundamental que une los cuatro casos de este trabajo es el rango de operación y la confiabilidad asociada a éste. Se ha logrado encontrar un nuevo punto de operación para todas las bombas, el cual asegura una buena eficiencia y busca una mayor vida útil.

La principal propuesta de mejora en este trabajo es la independización de pozos que trabajan en paralelo. En los casos vistos, se ha evaluado la opción de instalar una sentina donde los flujos convergen, porque resulta más práctico que instalar tuberías completamente nuevas. Sin embargo, dependiendo del sistema, se debe tener abierta la opción de descargar desde el pozo directamente al estanque de forma independiente, si el sistema lo permite.

En cuanto a la independización de las bombas, mediante la instalación de una sentina se identifica lo siguiente: en sistemas de 3 o menos pozos en paralelo, la opción no resulta recomendable. Pero en sistemas de más de 3 pozos en paralelo, esta opción no solo aporta mayor caudal para el sistema, sino que también permite mayor flexibilidad en la operación, reduce la dependencia en una bomba más potente en el sistema, y puede mejorar la vida útil de las bombas al facilitar su uso cerca de su punto óptimo de eficiencia. Aun cuando esta propuesta implica la inversión en una o más bombas para la sentina, el costo energético puede ser incluso menor al inicial debido al uso de las bombas en frecuencias menores a la nominal, por lo tanto, menor potencia. Sólo se han visto dos casos de independización en este trabajo, sin embargo, la teoría hidráulica indica que mientras más bombas se instalan en paralelo menos caudal adicional se puede extraer en total, lo que se corrobora comparando el caso en Las Delicias con San Esteban. Por lo tanto, se presume que esto es más notorio aún en casos con más bombas en paralelo.

Para la independización de las bombas, se debe tener en cuenta que todo el análisis realizado en este trabajo es con las bombas que están en operación actualmente en esos pozos, que fueron elegidas con el propósito de usarse en paralelo, y por lo tanto quedan sobredimensionadas al independizarse. Una vez que cumplan su vida útil y deban cambiarse, la independización permite extraer el caudal que se quiera del pozo con una buena elección de bomba, que es en parte lo que se menciona con mayor flexibilidad del sistema. Se debe tener en cuenta la vida útil del pozo también, y extraer agua del acuífero de forma que sea sustentable a largo plazo.

En casos que esta propuesta no sea satisfactoria, otra forma de aumentar el caudal de un sistema es reduciendo la curva del sistema, y la mejor forma de hacer esto es aumentando del diámetro de la tubería, o el equivalente que es instalar una segunda tubería en paralelo. Se recomienda de todas formas incluir en dicho análisis el rango de operación, para asegurar la vida útil de las bombas, y volver a analizar las presiones y velocidades máximas en las tuberías para evitar fugas o roturas, como se hizo para el caso de El Tambo.

La comparación entre la matriz de riesgo inherente y la esperada permite visualizar cómo estas propuestas reducen en gran medida la probabilidad que ocurran tres riesgos muy comunes en estos sistemas: que se produzcan roturas o fugas en la tubería, que falle una motobomba, o que operen en bajas eficiencias.

Los indicadores propuestos, los parámetros de medición y las recomendaciones están pensadas para agilizar las respuestas ante problemas, además de ayudar en la priorización de tareas al aplicarse, por ejemplo, junto a una matriz de riesgo.

Finalmente, la eficiencia energética de las motobombas y la optimización de los pozos son dos conceptos que son inseparables. Asegurar la vida útil de las motobombas es uno de los principales desafíos en la optimización, ya que una intervención correctiva es muy costosa, y en ese sentido, operar una bomba en un punto óptimo de eficiencia permite extender la vida útil del equipo sin necesidad de detener su operación.

18 Referencias

- Alvarado, R. (22 de Marzo de 2022). Chile lidera la crisis hídrica en América Latina. *Universidad de Chile*. Obtenido de <https://uchile.cl/noticias/184816/dia-mundial-del-agua-chile-lidera-la-crisis-hidrica-en-america-latina>
- Bachus, L., & Custodio, A. (2003). *Know and Understand Centrifugal Pumps*. Elsevier.
- Baeza, E. (2020). *Aspectos técnicos y experiencia extranjera en materia de Eficiencia Hídrica*. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. Obtenido de https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/29039/1/Informe_Eficiencia_Hidrica.pdf
- Barringer, H. (2003). A Life Cycle Cost Summary. *International Conference of Maintenance Societies*. Perth. Obtenido de <https://plant-maintenance.com/articles/LifeCycleCostSummary.pdf>
- Cidad, E. (2016). *El ciclo urbano del agua*. Obtenido de Agua ecosocial: <https://aguaecosocial.com/ciclo-urbano-del-agua/>
- Franklin Electric. (27 de Abril de 2022). *Cooling sleeves and calculation of cooling flow*. Obtenido de <https://franklinwater.eu/more/service/franklin-aid-technical-newsletter/2022/04/cooling-sleeves-and-calculation-of-cooling-flow/>
- Goulds Water Technology. (2012). *Lineshaft and Submersible Turbine Pumps*.
- Grundfos. (2016). *Pump Handbook*. Grundfos.
- Hassan, A. F. (2015). *Experimental and Computational Study of Semi-open Centrifugal Pump*. Military Technical College. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/293806626_Experimental_and_Computational_Study_of_Semi-open_Centrifugal_Pump
- Johnson, E. (1975). *El agua subterránea y los pozos* (Primera ed.). Edward E. Johnson Inc.
- Karassik, I. (1989). *Centrifugal Pump Clinic* (Segunda ed.). Taylor & Francis Group.
- Maldonado, Y. (12 de Marzo de 2021). *¿Qué es el nivel freático?* Obtenido de <https://geologiaweb.com/ingenieria-geologica/nivel-freatico/>
- Olmo, M., & Nave, R. (s.f.). *Bernoulli Equation*. Obtenido de HyperPhysics: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/pber.html>
- Ordoñez, J. J. (2011). Cartilla técnica: ciclo hidrológico. *Global Water Partnership*, 8. Obtenido de https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf
- Organización Panamericana de la Salud. (1966). Bombas para agua potable. *Publicación científica No. 145*. Obtenido de <https://iris.paho.org/handle/10665.2/1188?locale-attribute=pt>
- Palgrave, R. (2003). *Troubleshooting Centrifugal Pumps & their systems*. Elsevier.
- Performance Machine Group SpA. (2019). *Guía Gestión de Integridad de Activos para Infraestructura Industrial*. Agencia de Sostenibilidad Energética. Obtenido de <https://www.agenciase.org/biblioteca/>

- Safety Culture. (20 de Julio de 2023). *Guía para entender la matriz de riesgo 5x5*. Obtenido de Safety Culture: <https://safetyculture.com/es/temas/evaluacion-de-riesgos/matriz-de-riesgo/>
- Simunovic, P. (2017). *Informe técnico de construcción y pruebas de bombeo P1, Quillota*. Aquist Hidrogeológica.
- Temming, M. (15 de Marzo de 2022). Let's learn about Earth's secret stash of underground water. *Science News Explores*. Obtenido de <https://www.snexplores.org/article/lets-learn-about-earths-secret-stash-of-underground-water>
- Tuhorse. (s.f.). *Pump Sleeves*. Obtenido de Tuhorse: <https://www.tuhorse.us/pump-sleeve-flow-sleeve-flow-inducer-sleeve-pump-shroud/>
- U.S Department of Energy. (1997). Determining electric motor load and efficiency. *Motor Challenge*. Obtenido de <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/10097517.pdf>
- Water systems - Maximum Flow Velocities*. (12 de Julio de 2023). Obtenido de Engineering Toolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/flow-velocity-water-pipes-d_385.html
- White, F. (2008). *Mecánica de Fluidos* (Sexta ed.). McGraw-Hill.

19 Anexos

19.1 Anexo A: San Esteban

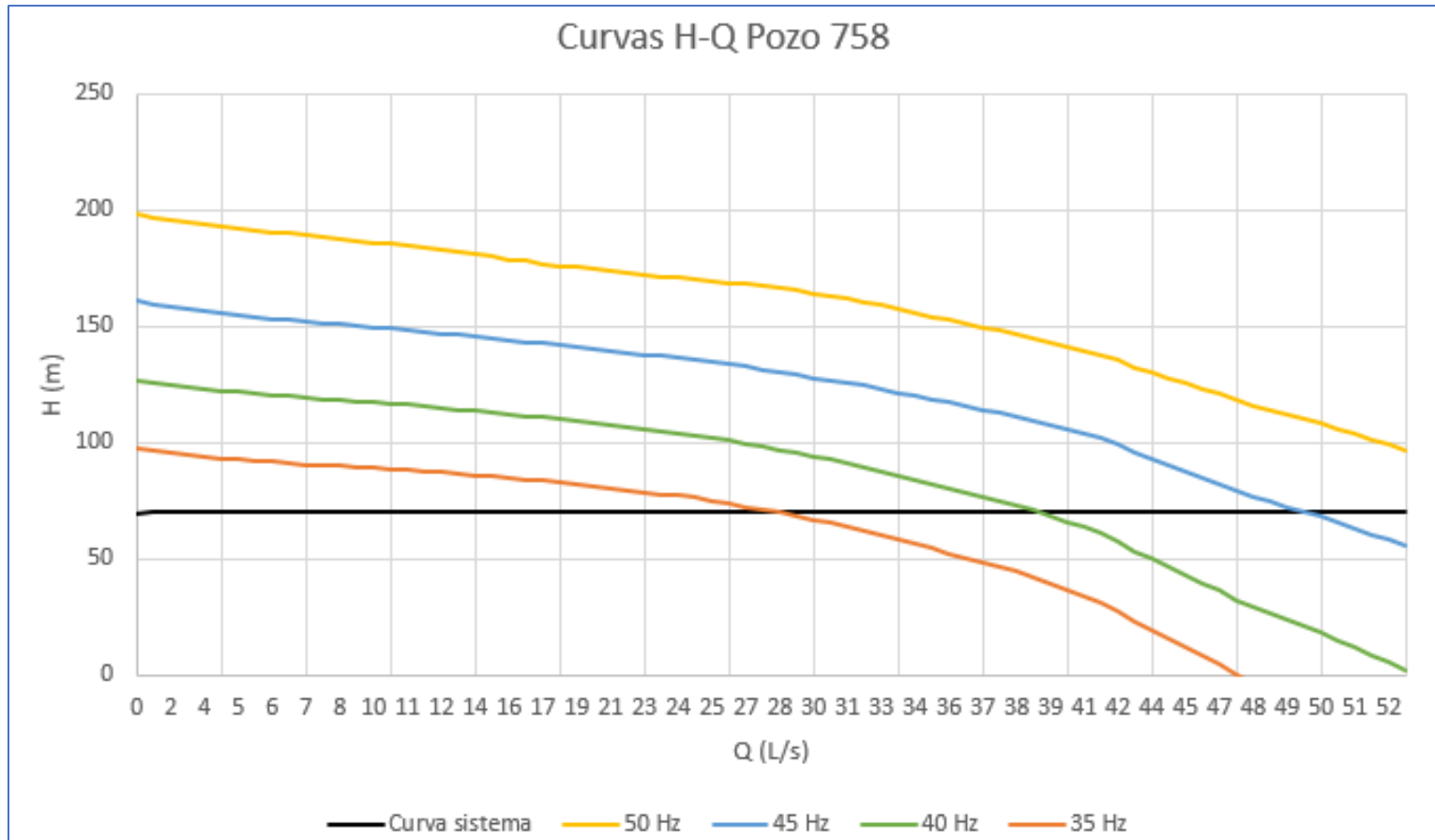


Figura 39: Curvas H-Q de P758 según frecuencia, independiente

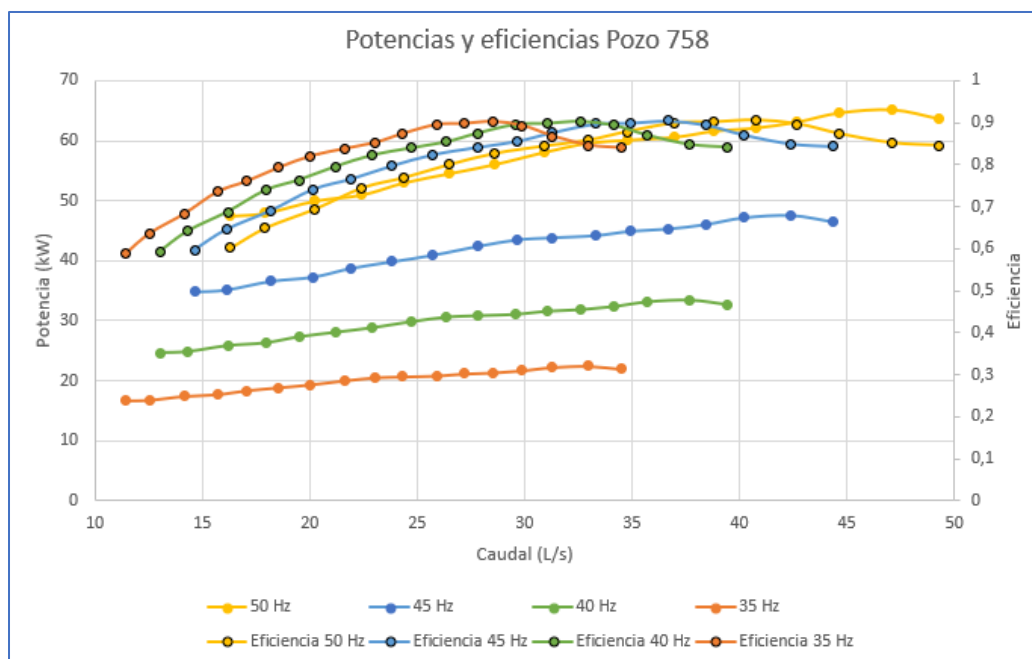


Figura 40: Curvas de potencia y eficiencia P758 según frecuencia

Tabla 24: Rangos de operación de P758 según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P758)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	40,7	100	Entre 33 y 44 L/s
	32,6	80	
	44,8	110	
45 Hz	36,7	100	Entre 30 y 40 L/s
	29,4	80	
	40,4	110	
40 Hz	32,6	100	Entre 27 y 35 L/s
	26,1	80	
	35,9	110	
35 Hz	28,5	100	Entre 23 y 31 L/s
	22,8	80	
	31,4	110	

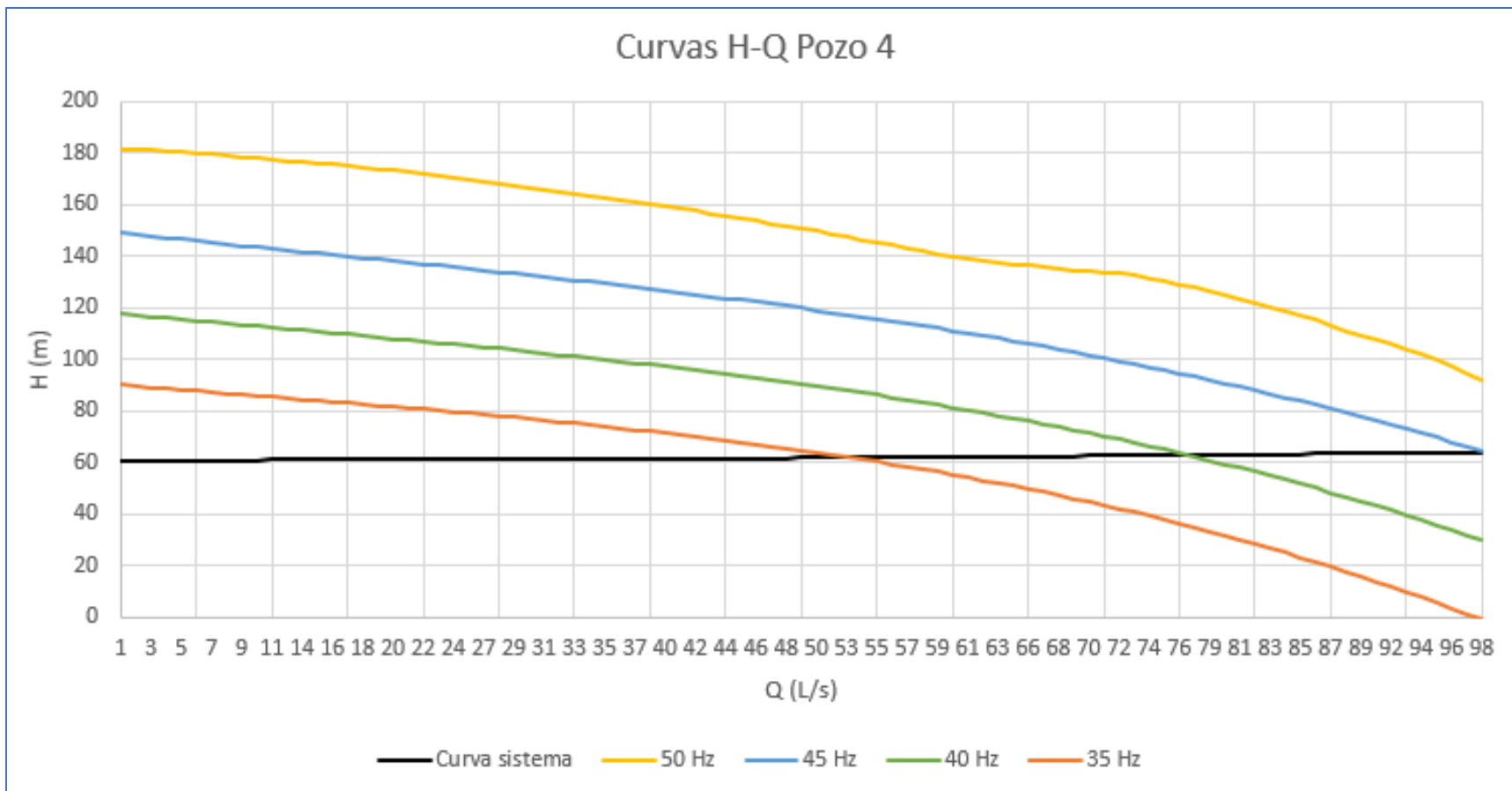


Figura 41: Curvas H-Q de P4 según frecuencia, independiente

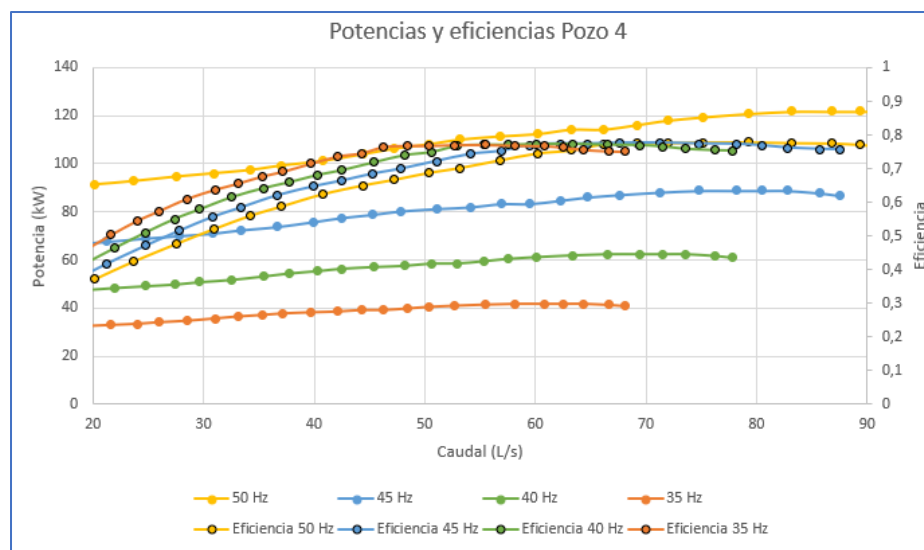


Figura 42: Curvas de potencia y eficiencia P4 según frecuencia

Tabla 25: Rangos de operación P4 según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P4)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	79,2	100	Entre 64 y 87 L/s
	63,4	80	
	87,1	110	
45 HZ	71,3	100	Entre 58 y 78 L/s
	57,0	80	
	78,4	110	
40 Hz	63,4	100	Entre 51 y 69 L/s
	50,7	80	
	69,7	110	
35 Hz	55,5	100	Entre 45 y 61 L/s
	44,4	80	
	61,1	110	

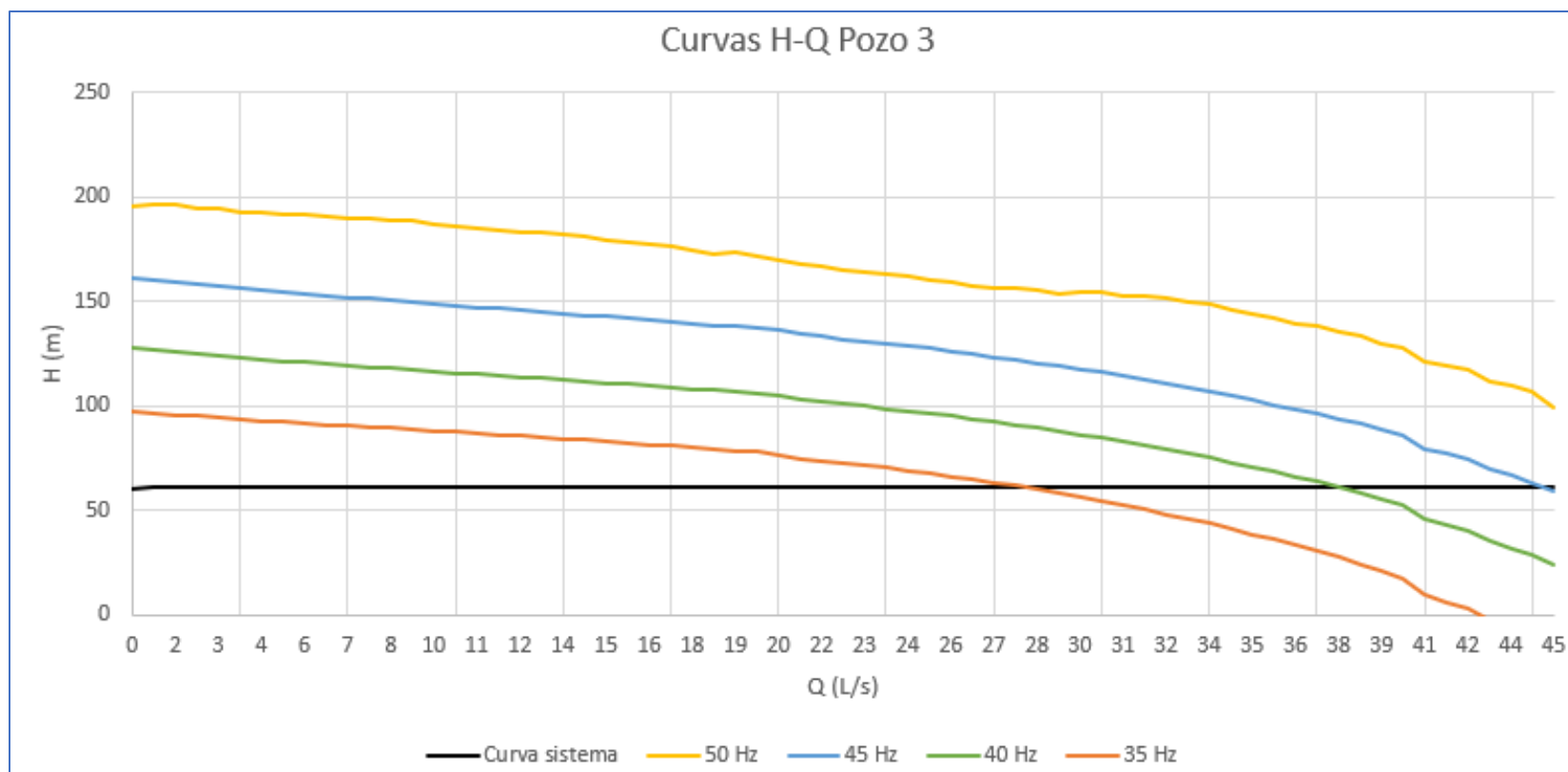


Figura 43: Curvas H-Q de P3 (San Esteban) según frecuencia, independiente

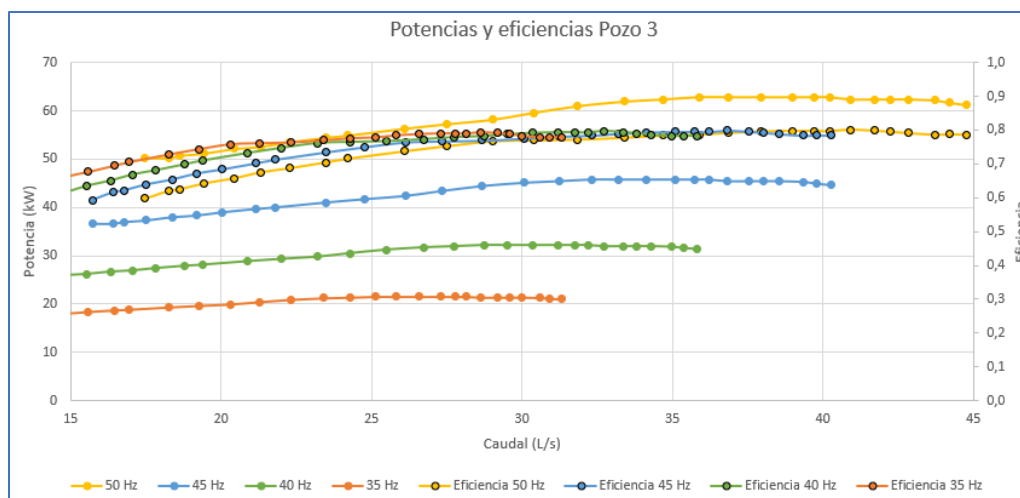


Figura 44: Curvas de potencia y eficiencia P3 (San Esteban) según frecuencia

Tabla 26: Rangos de operación P3 (San Esteban) según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P3)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	40,9	100	Entre 33 y 44 L/s
	32,7	80	
	45,0	110	
45 HZ	36,8	100	Entre 30 y 40 L/s
	29,4	80	
	40,5	110	
40 Hz	32,7	100	Entre 27 y 35 L/s
	26,2	80	
	36,0	110	
35 Hz	28,6	100	Entre 23 y 31 L/s
	22,9	80	
	31,5	110	

Tabla 27: Evaluación de probabilidad de riesgo en San Esteban

SPAP San Esteban					
VELOCIDAD	Q [L/s]	Din [mm]	A [m2]	v [m/s]	Probabilidad
Inherente	110	250	0,04908739	2,2	1
Esperada	109	250	0,04908739	2,2	1
RANGO OPERACIÓN	Pozo	QBEP Nominal [L/s]	Q [L/s]	F [Hz]	Probabilidad
Inherente	P3	40,9	45	50	5
	P4	79,2	40	50	5
	P758	40,7	25	50	5
Esperada	P3	40,9	28	35	1
	P4	79,2	52	35	1
	P758	40,7	29	35	1
POTENCIA ESPECIFICA	Pozo	Q [L/s]	P [kW]	Ps [kW/L/s]	Probabilidad
Inherente	P3	45	42,7	0,95	1
	P4	40	70	1,75	5
	P758	25	36,4	1,46	3
Esperada	P3	28	21,7	0,78	1
	P4	52	41,4	0,80	1
	P758	29	21,4	0,74	1

Tabla 28: Evaluación económica completa SPAP San Esteban

	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sept-23	oct-23	nov-23	dic-23	ene-24	feb-24	mar-24	abr-24	may-24	jun-24	jul-24	ago-24	sept-24	oct-24	nov-24	dic-24	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25
POZO 3																								
Horas de uso mensual(hr)	537	462	452	490	541	595	570	625	638	587	632	551	537	462	452	490	541	595	570	625	638	587	632	551
Volumen mensual (m3)	117.377	99.947	98.304	105.602	112.501	117.955	111.419	114.802	109.899	103.599	53.928	44.914	117.377	99.947	98.304	105.602	112.501	117.955	111.419	114.802	109.899	103.599	53.928	44.914
Producción actual (m3/h)	197	195	196	194	187	178	176	165	155	159	77	73	197	195	196	194	187	178	176	165	155	159	77	73
Producción optimizada (m3/h)	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
Prod. optimizada corregida (m3/h)	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	89	87	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	89	87
Volumen optimizado (m3)	54.130	46.570	45.562	49.392	54.533	59.976	57.456	63.000	64.310	59.170	56.121	47.982	54.130	46.570	45.562	49.392	54.533	59.976	57.456	63.000	64.310	59.170	56.121	47.982
Potencia actual (kW)	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Potencia optimizada (kW)	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
POZO 4																								
Horas de uso mensual(hr)	541,00	462,00	454,00	490,00	542,00	590,00	573,00	625,00	638,00	586,00	634,00	559,00	541,00	462,00	454,00	490,00	542,00	590,00	573,00	625,00	638,00	586,00	634,00	559,00
Volumen mensual (m3)	88.440	74.750	73.847	80.330	88.147	96.566	92.301	107.779	102.958	96.890	162.297	144.087	88.440	74.750	73.847	80.330	88.147	96.566	92.301	107.779	102.958	96.890	162.297	144.087
Producción actual (m3/h)	147	146	146	148	146	147	145	155	145	149	230	232	147	146	146	148	146	147	145	155	145	149	230	232
Producción optimizada (m3/h)	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187	187
Prod. optimizada corregida (m3/h)	167	166	167	167	167	167	166	171	166	168	187	187	167	166	167	167	167	167	166	171	166	168	187	187
Volumen optimizado (m3)	90.436	76.881	75.725	82.012	90.397	98.679	95.168	107.000	106.048	98.450	118.685	104.645	90.436	76.881	75.725	82.012	90.397	98.679	95.168	107.000	106.048	98.450	118.685	104.645
Potencia actual (kW)	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Potencia optimizada (kW)	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
POZO 758																								
Horas de uso mensual(hr)	402	352	336	348	404	554	544	614	638	508	534	402	402	352	336	348	404	554	544	614	638	508	534	402
Volumen mensual (m3)	33.966	29.436	28.248	28.205	33.368	48.088	46.276	54.963	53.214	43.413	45.566	33.359	33.966	29.436	28.248	28.205	33.368	48.088	46.276	54.963	53.214	43.413	45.566	33.359
Producción actual (m3/h)	76	75	76	73	74	78	77	81	75	77	77	75	76	75	76	73	74	78	77	81	75	77	77	75
Producción optimizada (m3/h)	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104	104
Prod. optimizada corregida (m3/h)	90	90	90	89	89	91	90	92	90	91	91	90	90	90	90	89	89	91	90	92	90	91	91	90
Volumen optimizado (m3)	36.269	31.621	30.251	30.858	36.105	50.558	49.221	56.784	57.250	46.053	48.380	35.996	36.269	31.621	30.251	30.858	36.105	50.558	49.221	56.784	57.250	46.053	48.380	35.996
Potencia actual (kW)	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Potencia optimizada (kW)	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
NUEVA SENTINA																								
Producción sentina (m3/h)	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2	493,2
Horas de uso sentina (hr)	476	424	417	438	477	534	519	569	571	522	562	492	476	424	417	438	477	534	519	569	571	522	562	492
Volumen sentina (m3)	234.834	209.071	205.538	216.262	235.035	263.213	255.845	280.785	281.608	257.673	277.185	242.622	234.834	209.071	205.538	216.262	235.035	263.213	255.845	280.785	281.608	257.673	277.185	242.622
Potencia sentina (kW)	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201	201
POZO 5 (SIN INDEPENDIZAR)																								
Producción estimada (m3/h)	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8	100,8
Hrs de uso mensual estimadas (hr)	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
Volumen mensual estimado (m3)	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200	25.200
Potencia estimada (kW)	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558	95,09558
POZO 5 (CON INDEPENDIZAR)																								
Producción estimada (m3/h)	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270	270
Hrs de uso mensual estimadas (hr)	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Volumen mensual estimado (m3)	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000	54.000
Potencia estimada (kW)	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185	157,185
TOTAL VOLUMENES																								
Total actual (m3)	241.004	208.921	205.559	217.923	235.814	261.548	250.197	274.990	264.665	244.712	260.812	225.323	241.004	208.921	205.559	217.923	235.814	261.548	250.197	274.990	264.665	244.712	260.812	225.323
Total optimizado (m3)	234.834	209.071	205.538	216.262	235.035	263.213	255.845	280.785	281.608	257.673	277.185	242.622	234.834	209.071	205.538	216.262	235.035	263.213	255.845	280.785	281.608	257.673	277.185	242.622
Volumen recuperado (m3)	-6.170	151	-21	-1.661	-780	1.665	5.648	5.795	16.944	12.961	16.373	17.299	-6.170	151	-21	-1.661	-780	1.665	5.648	5.795	16.944	12.961	16.373	17.299
Vol. recuperado acumulado (m3)	56.519	56.670	56.649	54.988	54.208	55.874	61.522	67.317	84.261	97.222	113.595	130.894	124.724	124.875	124.854	123.193	122.413	124.078	129.727	135.522	152.465	165.427	181.800	199.099
Costo total volúmenes (\$)	-444.237	10.850	-1.512	-119.592	-56.141	119.896	406.688	417.230	1.219.956	933.224	1.178.839	1.245.540	-444.237	10.850	-1.512	-119.592	-56.141	119.896	406.688	417.230	1.219.956	933.224	1.178.839	1.245.540
TOTAL ENERGÍAS																								
Energía total actual (kWh)	194.255	170.483	166.955	177.636	195.119	219.067	212.640	231.699	236.794	214.234	228.290	198.415	194.255	170.483	166.955	177.636	195.119	219.067	212.640	231.699	236.794	214.234	228.290	198.415
Energía total optimizada (kWh)	188.003	168.986	166.275	174.316	188.329	208.903	203.817	220.893	223.134	204.756	217.731	192.673	188.003	168.986	166.275	174.316	188.329	208.903	203.817	220.893	223.134	204.756	217.731	192.673
Valor energético (\$/kWh)	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4	52,4
Costo total actual (\$)	10.178.954	8.933.288	8.748.444	9.308.118	10.224.219	11.479.085	11.142.362	12.141.029	12.408.022	11.225.867	11.962.390	10.396.929	10.178.954	8.933.288	8.748.444	9.308.118	10.224.219	11.479.085	11.142.362	12.141.029	12.408.022	11.225.867	11.962.390	10.396.929
Costo total optimizado (\$)	9.851.371	8.854.854	8.712.785	9.134.154	9.868.448	10.946.515	10.679.986	11.574.801	11.692.233	10.729.222	11.409.091	10.096.086	9.851.371	8.854.854	8.712.785	9.134.154	9.868.448	10.946.515	10.679.986	11.574.801	11.692.233	10.729.222	11.409.091	10.096.086
AHORRO																								
Ahorro total (\$)	-116.655	89.285	34.148	54.372	299.630	652.467	869.064	983.458	1.935															

19.2 Anexo B: Las Delicias

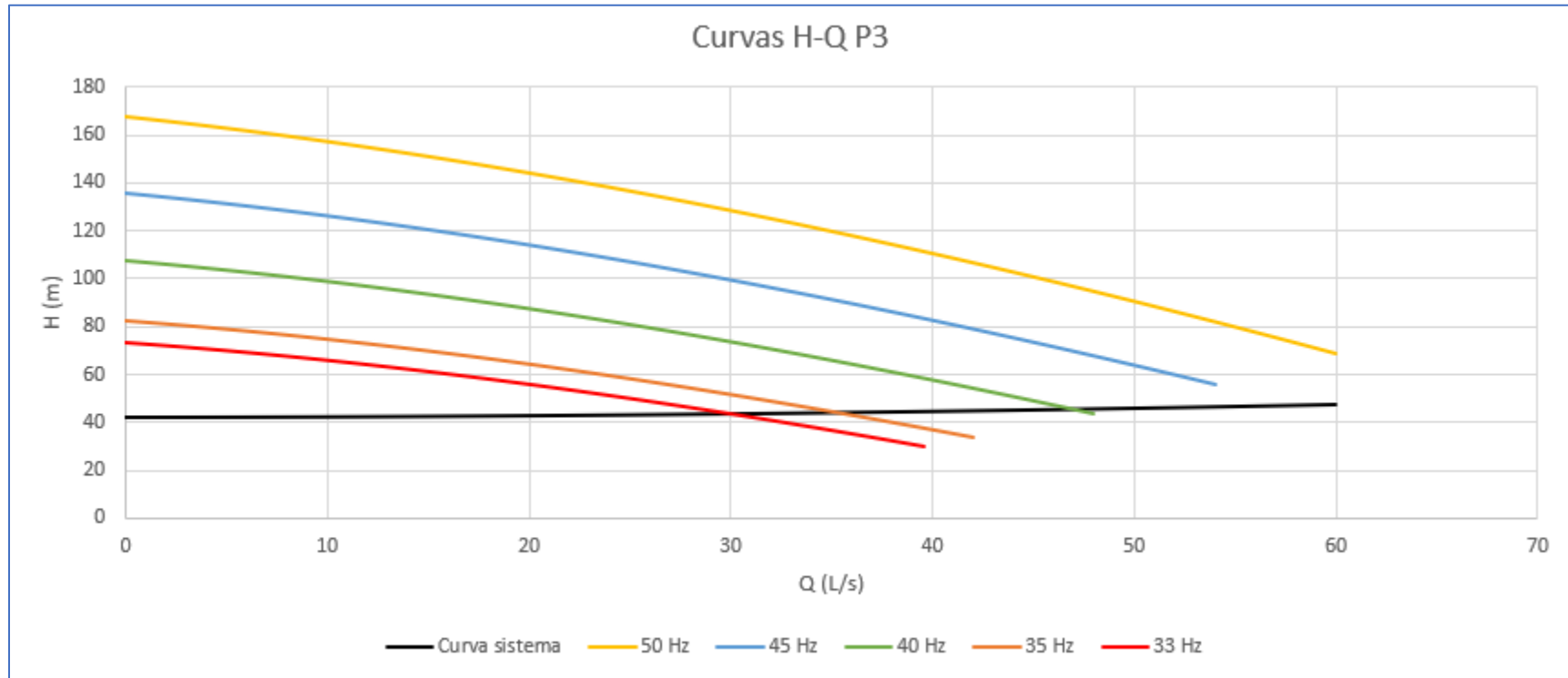


Figura 45: Curvas H-Q de P3(Las Delicias) según frecuencia, independiente

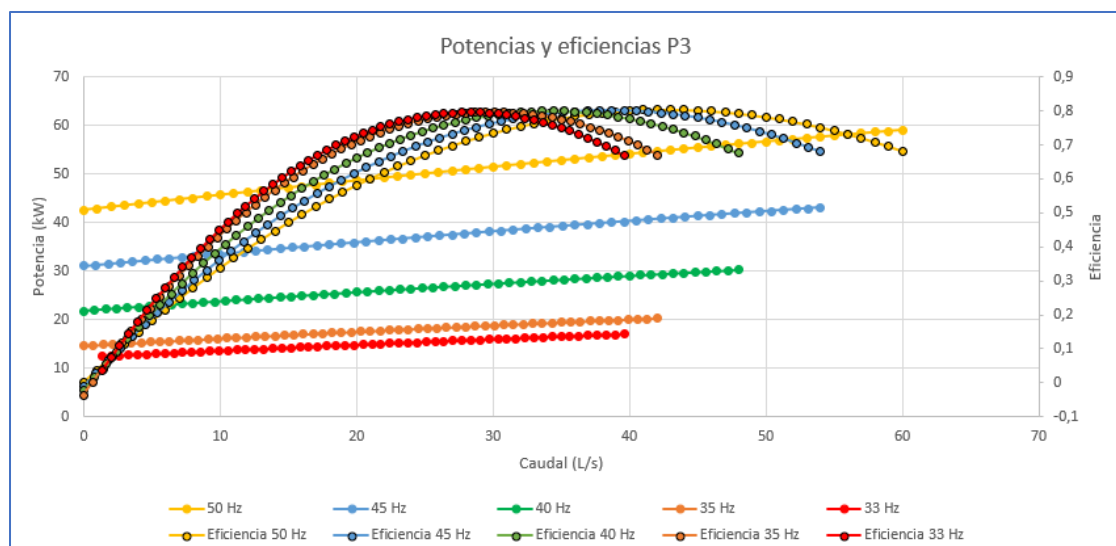


Figura 46: Curvas de potencia y eficiencia P3 (Las Delicias) según frecuencia

Tabla 29: Rangos de operación de P3 (Las Delicias) según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P3)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	43,0	100	Entre 35 y 47 L/s
	34,4	80	
	47,3	110	
45 HZ	38,7	100	Entre 31 y 42 L/s
	31,0	80	
	42,6	110	
40 Hz	34,4	100	Entre 28 y 37 L/s
	27,5	80	
	37,8	110	
35 Hz	30,1	100	Entre 25 y 33 L/s
	24,1	80	
	33,1	110	
33 Hz	29,7	100	Entre 24 y 32 L/s
	23,8	80	
	32,7	110	

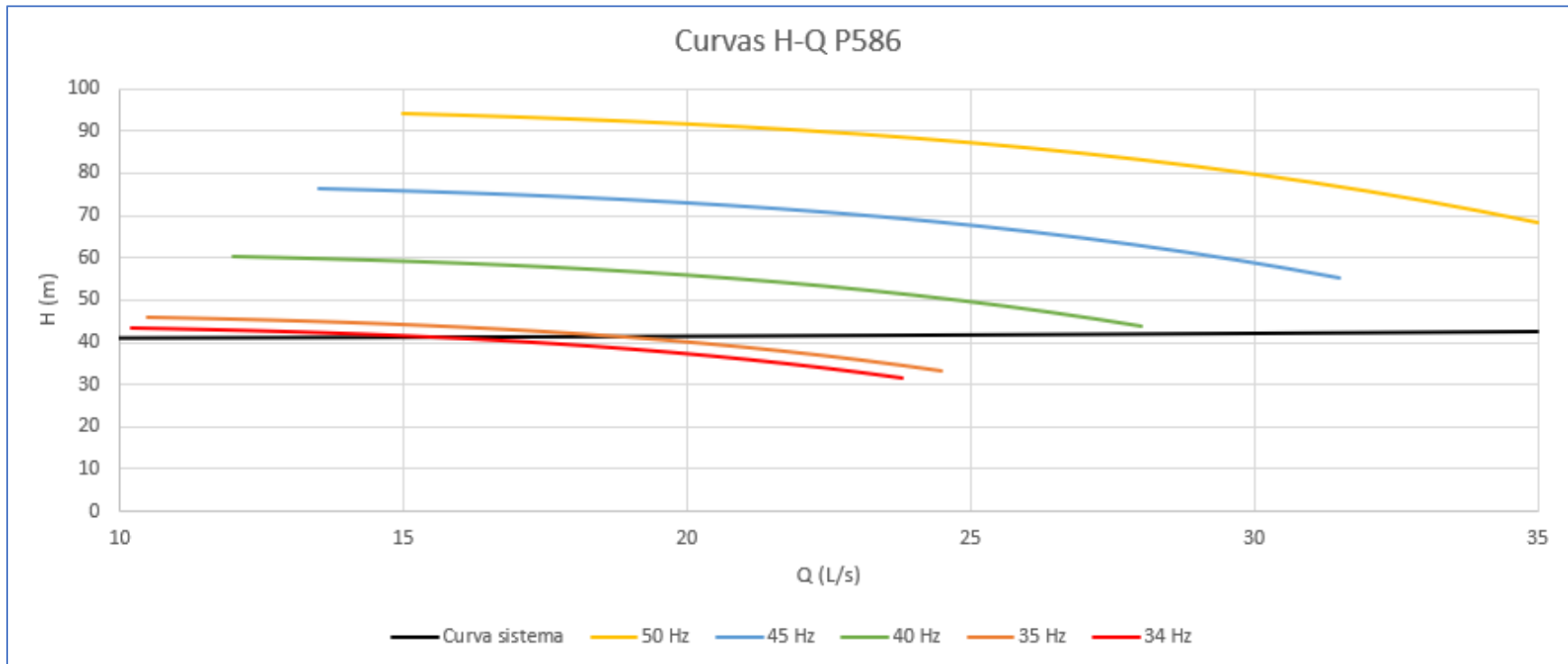


Figura 47: Curvas H-Q de P586 según frecuencia, independiente

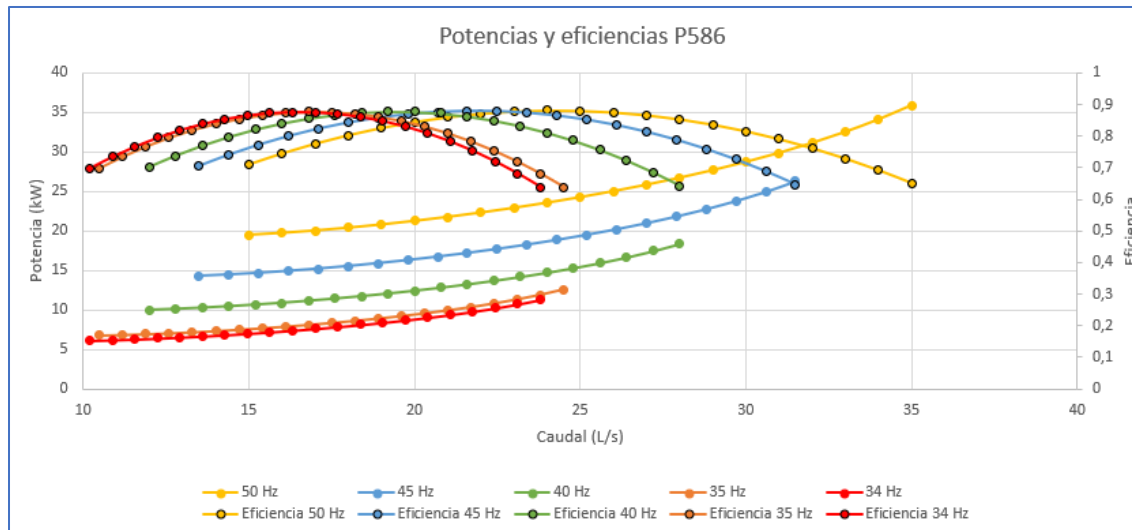


Figura 48: Curvas de potencia y eficiencia P586 según frecuencia

Tabla 30: Rangos de operación de P586 según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P586)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	24,0	100	Entre 20 y 26 L/s
	19,2	80	
	26,4	110	
45 HZ	21,6	100	Entre 18 y 23 L/s
	17,3	80	
	23,8	110	
40 Hz	19,2	100	Entre 16 y 21 L/s
	15,4	80	
	21,1	110	
35 Hz	16,8	100	Entre 14 y 18 L/s
	13,4	80	
	18,5	110	
34 Hz	16,3	100	Entre 14 y 17 L/s
	13,0	80	
	17,9	110	

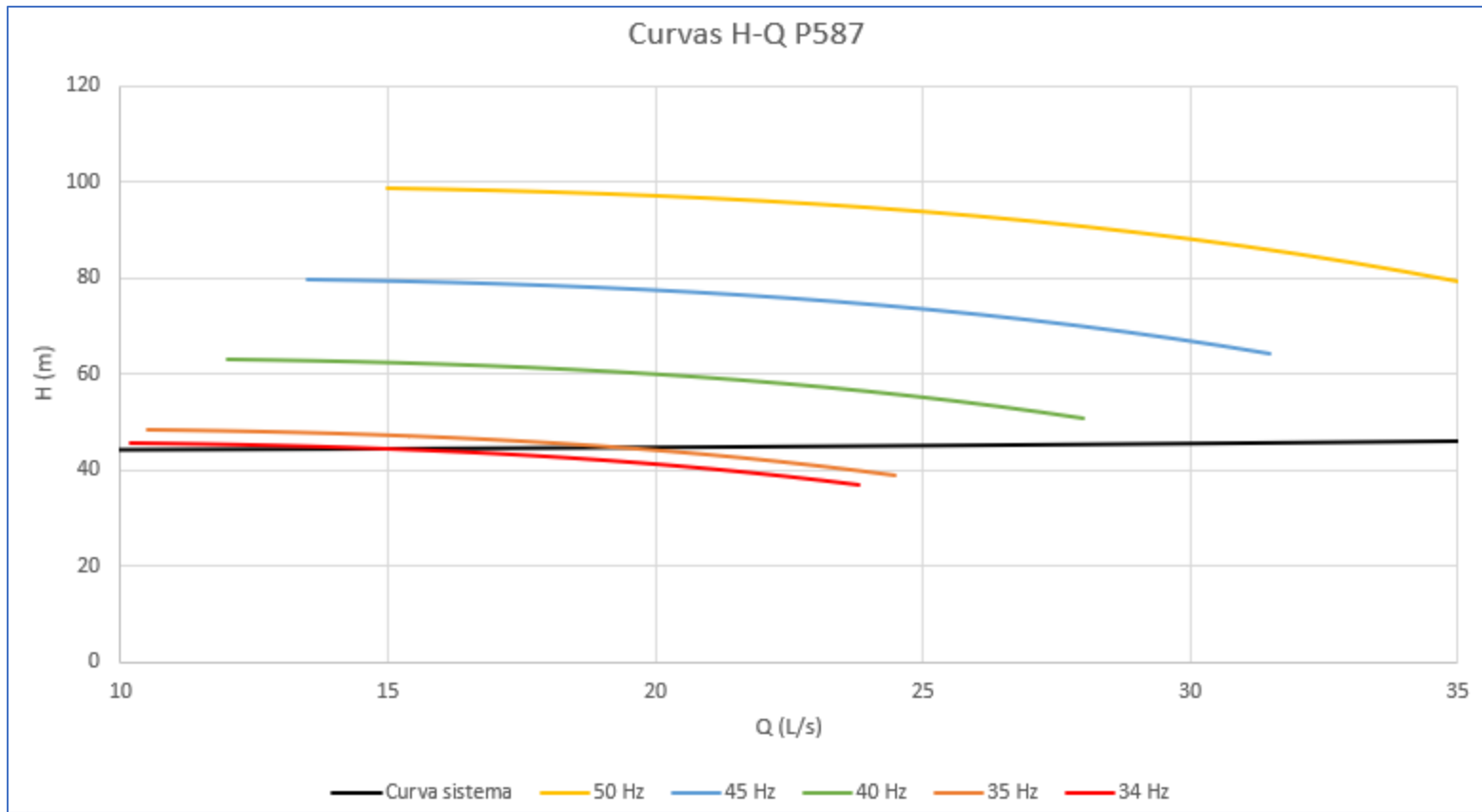


Figura 49: Curvas H-Q de P587 según frecuencia, independiente

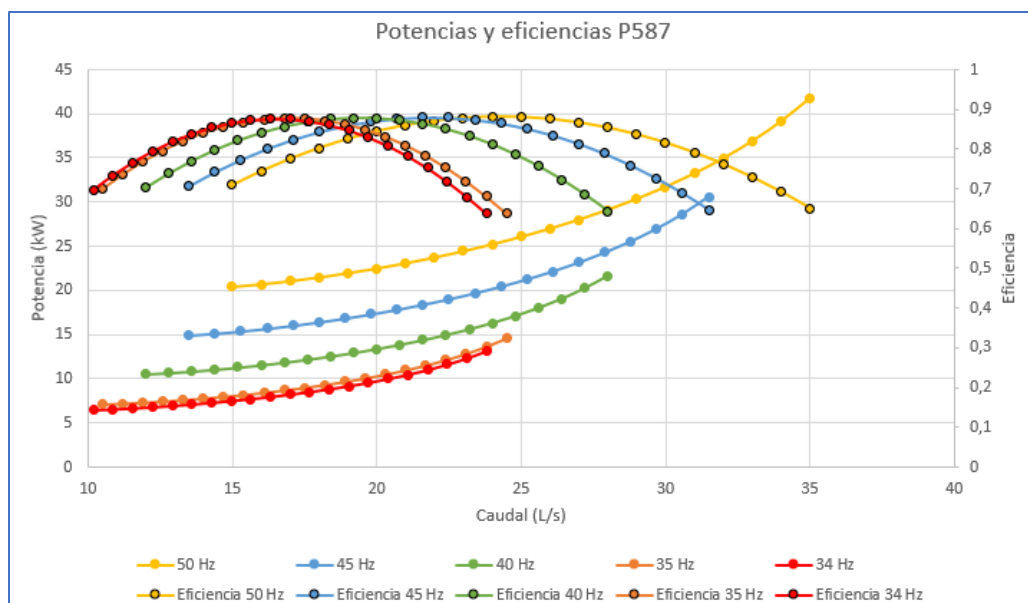


Figura 50: Curvas de potencia y eficiencia P587 según frecuencia

Tabla 31: Rangos de operación de P587 según frecuencia

RANGOS DE OPERACIÓN (P587)			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	24,0	100	Entre 20 y 26 L/s
	19,2	80	
	26,4	110	
45 HZ	21,6	100	Entre 18 y 23 L/s
	17,3	80	
	23,8	110	
40 Hz	19,2	100	Entre 16 y 21 L/s
	15,4	80	
	21,1	110	
35 Hz	16,8	100	Entre 14 y 18 L/s
	13,4	80	
	18,5	110	
34 Hz	16,3	100	Entre 14 y 17 L/s
	13,0	80	
	17,9	110	

Tabla 32: Evaluación de probabilidad de riesgo en Las Delicias

SPAP Las Delicias					
VELOCIDAD	Q [L/s]	Din [mm]	A [m2]	v [m/s]	Probabilidad
Inherente	70	304,8	0,0730	1,0	1
Esperada	62	304,8	0,0730	0,8	3
RANGO OPERACIÓN	Pozo	QBEP Nominal [L/s]	Q [L/s]	F [Hz]	Probabilidad
Inherente	P3	43	23,8	42	5
	P586	24	23,2	50	1
	P587	24	22,9	50	1
Esperada	P3	43	30	33	3
	P586	24	16	34	1
	P587	24	16	34	1
POTENCIA ESPECIFICA	Pozo	Q [L/s]	P [kW]	Ps [kW/L/s]	Probabilidad
Inherente	P3	23,8	31	1,28	3
	P586	23,2	23	0,99	1
	P587	22,9	23	1,00	3
Esperada	P3	30	16,1	0,54	1
	P586	16	7,4	0,46	1
	P587	16	7,93	0,50	1

Tabla 33: Evaluación económica optimista completa SPAP Las Delicias

	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sept-23	oct-23	nov-23	dic-23	ene-24	feb-24	mar-24	abr-24	may-24	jun-24	jul-24	ago-24	sept-24	oct-24	nov-24	dic-24	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25
POZO 3																								
Horas de uso mensual(hr)	566	523	546	485	490	541	605	641	582	479	325	238	566	523	546	485	490	541	605	641	582	479	325	238
Horas de uso optimizado (hr)	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650
Volumen mensual (m3)	39.209	35.458	39.985	36.994	35.206	37.050	40.135	48.658	41.480	38.217	27.361	20.397	39.209	35.458	39.985	36.994	35.206	37.050	40.135	48.658	41.480	38.217	27.361	20.397
Producción actual (m3/h)	69	68	73	76	72	68	66	76	71	80	84	86	69	68	73	76	72	68	66	76	71	80	84	86
Producción optimizada (m3/h)	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108
Volumen optimizado (m3)	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200	70.200
Potencia actual (k/w)	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
Potencia optimizada (k/w)	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23
POZO 586																								
Horas de uso mensual(hr)	513,00	446,00	447,00	490,00	438,00	513,00	592,00	571,00	653,00	558,00	736,00	711,00	513,00	446,00	447,00	490,00	438,00	513,00	592,00	571,00	653,00	558,00	736,00	711,00
Horas de uso optimizado (hr)	364,00	328,00	294,00	336,50	393,50	478,00	534,00	576,00	625,00	458,00	474,00	400,50	364,00	328,00	294,00	336,50	393,50	478,00	534,00	576,00	625,00	458,00	474,00	400,50
Volumen mensual (m3)	45.081	38.769	41.159	40.805	34.683	38.829	42.903	41.491	43.974	43.280	58.583	59.411	45.081	38.769	41.159	40.805	34.683	38.829	42.903	41.491	43.974	43.280	58.583	59.411
Producción actual (m3/h)	88	87	92	85	79	76	72	73	67	78	80	84	88	87	92	85	79	76	72	73	67	78	80	84
Producción optimizada (m3/h)	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Volumen optimizado (m3)	20.966	18.893	16.934	19.382	22.666	27.533	30.758	33.178	36.000	26.381	27.302	23.069	20.966	18.893	16.934	19.382	22.666	27.533	30.758	33.178	36.000	26.381	27.302	23.069
Potencia actual (k/w)	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Potencia optimizada (k/w)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
POZO 587																								
Horas de uso mensual(hr)	299	337	245	358	509	552	521	590	665	529	537	502	299	337	245	358	509	552	521	590	665	529	537	502
Horas de uso optimizado (hr)	364	328	294	337	394	478	534	576	625	458	474	401	364	328	294	337	394	478	534	576	625	458	474	401
Volumen mensual (m3)	24.998	27.462	21.382	33.054	44.877	46.292	42.497	43.717	45.373	40.399	43.343	41.603	24.998	27.462	21.382	33.054	44.877	46.292	42.497	43.717	45.373	40.399	43.343	41.603
Producción actual (m3/h)	84	81	87	92	88	84	82	74	68	76	81	83	84	81	87	92	88	84	82	74	68	76	81	83
Producción optimizada (m3/h)	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
Volumen optimizado (m3)	20.966	18.893	16.934	19.382	22.666	27.533	30.758	33.178	36.000	26.381	27.302	23.069	20.966	18.893	16.934	19.382	22.666	27.533	30.758	33.178	36.000	26.381	27.302	23.069
Potencia actual (k/w)	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
Potencia optimizada (k/w)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
NUEVA SENTINA																								
Producción sentina (m3/h)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288
Horas de uso sentina (hr)	389	375	361	378	401	435	457	474	494	427	433	404	389	375	361	378	401	435	457	474	494	427	433	404
Potencia sentina (k/w)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63
ALJIBES																								
Demanda "real" estanque (m3)	111.147	102.315	102.211	111.208	116.980	120.735	127.667	135.755	135.044	123.450	128.502	119.899	111.702	102.826	102.722	111.764	117.565	121.339	128.306	136.434	135.720	124.067	129.144	120.498
Volumen aljibes actual (m3)	1.859	627	0	354	2.214	0	2.132	1.889	4.217	1.554	0	0	2.414	1.138	196	910	2.799	0	2.771	2.568	4.893	2.171	0	0
Volumen aljibes optimizado (m3)	0	0	0	2.243	1.449	0	0	0	0	488	3.697	3.561	0	0	0	2.799	2.034	0	0	0	0	1.106	4.339	4.161
Costo aljibes (\$/m3)	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Costo actual aljibes (\$)	6.505.305	2.193.957	0	1.238.983	7.748.467	0	7.462.985	6.610.716	14.760.885	5.438.650	0	0	8.450.372	3.984.467	684.720	3.185.123	9.795.615	0	9.697.162	8.986.425	17.124.162	7.599.023	0	0
Costo optimizado aljibes (\$)	0	0	0	7.851.183	5.070.267	0	0	0	0	1.709.050	12.938.980	12.464.011	0	0	0	9.797.323	7.117.415	0	0	0	0	3.869.423	15.187.759	14.562.239
Ahorro aljibes (\$)	6.505.305	2.193.957	0	-6.612.200	2.678.200	0	7.462.985	6.610.716	14.760.885	3.729.600	-12.938.980	-12.464.011	8.450.372	3.984.467	684.720	-6.612.200	2.678.200	0	9.697.162	8.986.425	17.124.162	3.729.600	-15.187.759	-14.562.239
TOTAL VOLUMENES																								
Total actual (m3)	109.288	101.688	102.526	110.854	114.766	122.171	125.535	133.866	130.827	121.896	129.287	121.411	109.288	101.688	102.526	110.854	114.766	122.171	125.535	133.866	130.827	121.896	129.287	121.411
Total optimizado (m3)	112.133	107.986	104.069	108.965	115.531	125.266	131.717	136.555	142.200	122.962	124.805	116.338	112.133	107.986	104.069	108.965	115.531	125.266	131.717	136.555	142.200	122.962	124.805	116.338
Volumen recuperado (m3)	2.845	6.298	1.543	-1.889	765	3.095	6.182	2.689	11.373	1.066	-4.482	-5.073	2.845	6.298	1.543	-1.889	765	3.095	6.182	2.689	11.373	1.066	-4.482	-5.073
Ahorro volumen recuperado (\$)	156.464	346.368	84.854	0	42.086	170.203	339.999	147.906	625.515	58.608	0	0	156.464	346.368	84.854	0	42.086	170.203	339.999	147.906	625.515	58.608	0	0
Ahorro vol. Recup. acumulado (\$)	156.464	502.832	587.686	587.686	629.772	799.975	1.139.974	1.287.880	1.913.395	1.972.003	1.972.003	1.972.003	2.128.467	2.474.835	2.559.689	2.559.689	2.601.775	2.771.978	3.111.977	3.259.883	3.885.398	3.944.006	3.944.006	3.944.006
TOTAL ENERGÍAS																								
Energía total actual (k/w/h)	51.341	48.515	46.527	48.666	52.466	58.565	62.931	66.076	68.664	56.586	55.988	50.226	51.341	48.515	46.527	48.666	52.466	58.565	62.931	66.076	68.664	56.586	55.988	50.226
Energía total optimizada (k/w/h)	49.012	47.091	45.758	47.902	50.604	54.012	56.054	57.577	60.475	53.724	56.099	53.587	49.012	47.091	45.758	47.902	50.604	54.012	56.054	57.577	60.475	53.724	56.099	53.587
Valor energético (\$/k.w/h)	45,7	45,7	68,55	68,55	68,55	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	68,55	68,55	68,55	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7
Costo total actual (\$)	2.346.303	2.217.136	3.189.436	3.336.084	3.596.525	2.676.421	2.875.934	3.019.693	3.137.958	2.586.000	2.558.645	2.295.315	2.346.303	2.217.136	3.189.436	3.336.084	3.596.525	2.676.421	2.875.934	3.019.693	3.137.958	2.586.000	2.558.645	2.295.315
Costo total optimizado (\$)	2.239.826	2.152.044	3.136.698	3.283.688	3.468.922	2.468.367	2.561.668	2.631.271	2.763.697	2.455.180	2.563.732	2.448.938	2.239.826	2.152.044	3.136.698	3.283.688	3.468.922	2.46						

Tabla 34: Evaluación económica pesimista completa SPAP Las Delicias

	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sept-23	oct-23	nov-23	dic-23	ene-24	feb-24	mar-24	abr-24	may-24	jun-24	jul-24	ago-24	sept-24	oct-24	nov-24	dic-24	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25	
POZO 3																									
Horas de uso mensual (hr)	566	523	546	485	490	541	605	641	582	479	325	238	566	523	546	485	490	541	605	641	582	479	325	238	
Hrs uso optimizado (hr)	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	650	
Volumen mensual (m3)	33.209	35.458	33.385	36.934	35.206	37.050	40.135	48.658	41.480	38.217	27.361	20.397	39.209	35.458	33.385	36.934	35.206	37.050	40.135	48.658	41.480	38.217	27.361	20.397	
Prod. actual (m3/h)	63	68	73	76	72	68	66	76	71	80	84	86	69	68	73	76	72	68	66	76	71	80	84	86	
Prod. optimizado (m3/h)	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	108	
Vol. optimizado (m3)	61.128	56.484	58.368	52.380	52.920	58.428	65.340	69.228	62.856	51.732	35.100	25.704	61.128	56.484	58.368	52.380	52.920	58.428	65.340	69.228	62.856	51.732	35.100	25.704	
Potencia actual (kW)	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	
Pot. optimizada (kW)	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	23	
POZO 586																									
Horas de uso mensual (hr)	513,00	446,00	447,00	480,00	438,00	513,00	592,00	571,00	653,00	558,00	736,00	711,00	513,00	446,00	447,00	480,00	438,00	513,00	592,00	571,00	653,00	558,00	736,00	711,00	
Hrs uso optimizado (hr)	364,00	328,00	294,00	336,50	393,50	478,00	534,00	576,00	625,00	458,00	474,00	400,50	364,00	328,00	294,00	336,50	393,50	478,00	534,00	576,00	625,00	458,00	474,00	400,50	
Volumen mensual (m3)	45.081	38.763	41.159	40.805	34.683	38.829	42.303	41.431	43.374	43.280	58.583	53.411	45.081	38.763	41.159	40.805	34.683	38.829	42.303	41.431	43.374	43.280	58.583	53.411	
Prod. actual (m3/h)	88	87	92	85	79	76	72	73	67	78	80	84	88	87	92	85	79	76	72	73	67	78	80	84	
Prod. optimizado (m3/h)	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	
Vol. optimizado (m3)	29.549	25.690	25.747	27.648	25.229	29.549	34.099	32.890	37.613	32.141	42.394	40.954	29.549	25.690	25.747	27.648	25.229	29.549	34.099	32.890	37.613	32.141	42.394	40.954	
Potencia actual (kW)	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	
Pot. optimizada (kW)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
POZO 587																									
Horas de uso mensual (hr)	299	337	245	358	509	552	521	590	665	529	537	502	299	337	245	358	509	552	521	590	665	529	537	502	
Hrs uso optimizado (hr)	364	328	294	337	374	394	478	534	625	458	474	401	364	328	294	337	374	394	478	534	625	458	474	401	
Volumen mensual (m3)	24.398	27.462	21.382	33.054	44.877	46.292	42.437	43.717	45.373	40.399	43.343	41.603	24.398	27.462	21.382	33.054	44.877	46.292	42.437	43.717	45.373	40.399	43.343	41.603	
Prod. actual (m3/h)	84	81	87	92	88	84	82	74	68	76	81	83	84	81	87	92	88	84	82	74	68	76	81	83	
Prod. optimizado (m3/h)	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58	
Vol. optimizado (m3)	17.222	19.411	14.112	20.621	29.318	31.795	30.010	33.384	38.304	30.470	30.331	28.915	17.222	19.411	14.112	20.621	29.318	31.795	30.010	33.384	38.304	30.470	30.331	28.915	
Potencia actual (kW)	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	
Pot. optimizada (kW)	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
NUEVA SENTINA																									
Prod. sentina (m3/h)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	
Horas de uso sentina (hr)	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	
Potencia sentina (kW)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	
NUEVA SENTINA																									
Prod. sentina (m3/h)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	
Horas de uso sentina (hr)	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	
Potencia sentina (kW)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	
NUEVA SENTINA																									
Prod. sentina (m3/h)	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	288	
Horas de uso sentina (hr)	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	375	353	343	349	373	416	449	473	482	397	376	332	
Potencia sentina (kW)	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	63	
ALIBES																									
Demanda "real" TK (m3)	111.147	102.315	102.211	111.208	116.390	120.735	127.667	135.755	135.044	123.450	128.502	119.839	111.702	102.826	102.722	111.764	117.565	121.339	128.306	136.434	135.720	124.067	129.144	120.438	
Vol. aljibes actual (m3)	1.859	627	0	354	2.214	0	2.132	1.889	4.217	1.554	0	0	2.414	1.158	196	910	2.799	0	2.771	2.568	4.893	2.171	0	0	
Vol. aljibes opt. (m3)	3.247	790	3.383	10.559	9.513	963	0	0	0	3.107	20.077	24.326	3.803	1.242	3.894	11.115	10.098	1.567	0	332	0	9.724	20.719	24.326	
Costo aljibes (\$/m3)	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Costo total aljibes (\$)	6.505.305	2.193.957	0	1.238.983	7.748.467	0	7.462.985	6.610.716	14.760.885	5.438.650	0	0	8.450.372	3.984.467	684.720	3.185.123	3.795.615	0	9.697.162	8.986.425	17.124.162	7.599.023	0	0	
Costo opt. aljibes (\$)	11.366.105	2.555.157	11.841.835	36.357.183	33.294.267	0	0	0	0	31.873.450	70.268.980	85.140.811	13.311.172	4.345.667	13.630.520	38.903.323	33.341.415	5.484.918	0	1.161.825	0	34.033.823	72.517.759	87.239.039	
Ahorro aljibes (\$)	-4.860.800	-361.200	-11.841.835	-35.718.200	-25.545.800	-3.372.048	7.462.985	6.610.716	-14.760.885	-26.434.800	-70.268.980	-85.140.811	-4.860.800	-361.200	-12.945.800	-35.718.200	-25.545.800	-5.484.918	0	7.824.600	17.124.162	-26.434.800	-72.517.759	-87.239.039	
TOTAL VOLUMENES																									
Total actual (m3)	103.288	101.688	102.526	110.854	114.766	122.171	125.535	133.866	130.827	121.896	129.287	121.411	109.288	101.688	102.526	110.854	114.766	122.171	125.535	133.866	130.827	121.896	129.287	121.411	
Total optimizado (m3)	107.839	101.585	98.827	100.649	107.467	119.772	129.449	136.102	138.773	114.343	108.425	95.573	107.839	101.585	98.827	100.649	107.467	119.772	129.449	136.102	138.773	114.343	108.425	95.573	
Vol. recuperado (m3)	-1.389	-103	-3.639	-10.205	-7.239	-2.399	3.314	2.236	7.946	-7.553	-20.862	-25.838	-1.389	-103	-3.639	-10.205	-7.239	-2.399	3.314	2.236	7.946	-7.553	-20.862	-25.838	
Ahorro vol. Recup. Acc. (\$)	0	0	0	0	0	0	215.259	122.958	437.019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	215.259	122.958	437.019	0	0	0	
Aho. vol. Recup. Acc. (\$)	775.236	775.236	775.236	775.236	775.236	775.236	390.435	1.113.453	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	1.550.472	
TOTAL ENERGIAS																									
Energía tot. actual (kWh)	51.341	48.515	46.527	48.666	52.466	58.565	62.931	66.076	68.664	56.586	55.388	50.226	51.341	48.515	46.527	48.666	52.466	58.565	62.931	66.076	68.664	56.586	55.388	50.226	
Energía tot. opt. (kWh)	48.086	45.831	44.612	46.084	48.841	52.811	55.558	57.478	59.726	51.840	52.518	43.048	48.086	45.831	44.612	46.084	48.841	52.811	55.558	57.478	59.726	51.840	52.518	43.048	
Valor energético (\$/kWh)	45,7	45,7	68,55	68,55	68,55	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	68,55	68,55	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	45,7	
Costo total actual (\$)	2.346.303	2.217.156	3.189.436	3.336.084	3.596.525	2.676.421	2.875.934	3.019.693	3.137.958	2.586.000	2.558.645	2.295.315	2.346.303	2.217.156	3.189.436	3.336.084	3.596.525	2.676.421							

19.3 Anexo C: Liceo

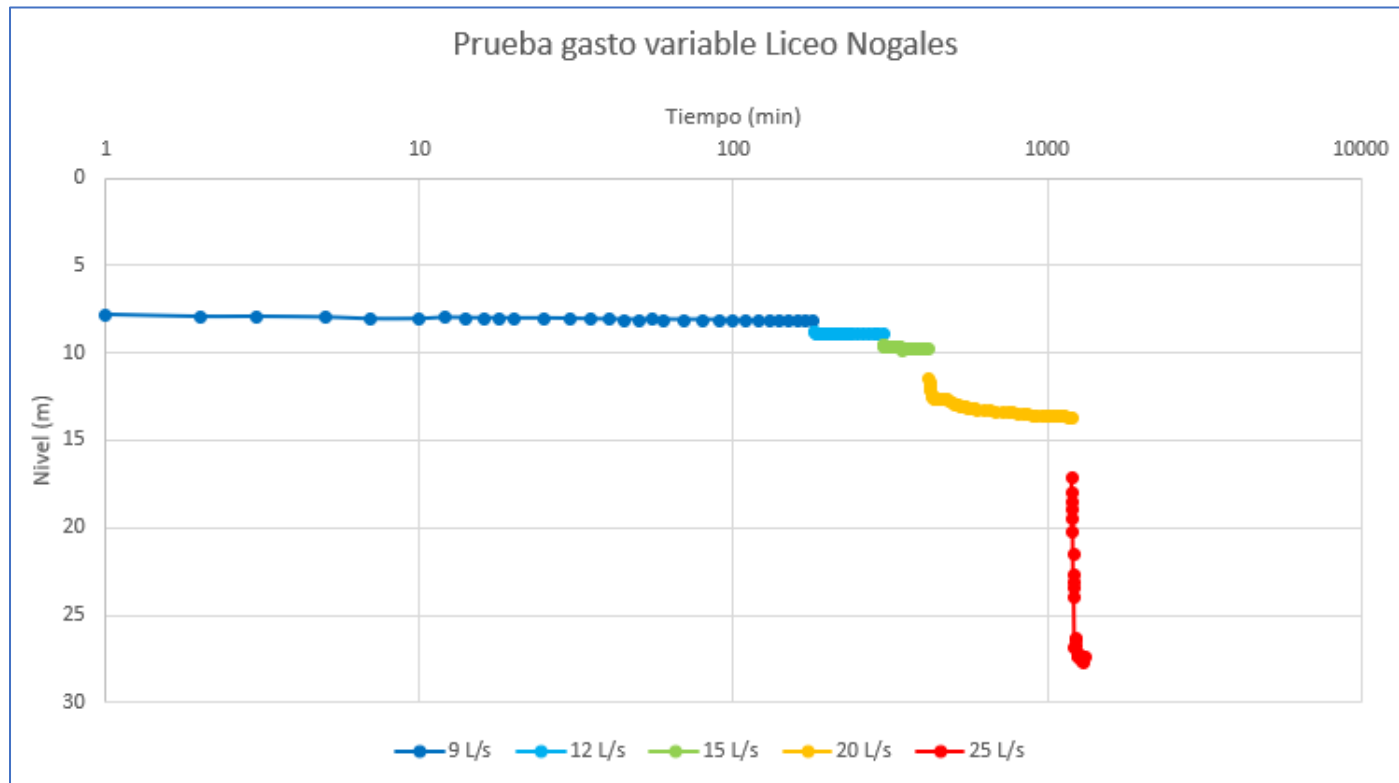


Figura 51: Prueba de gasto variable Liceo Nogales

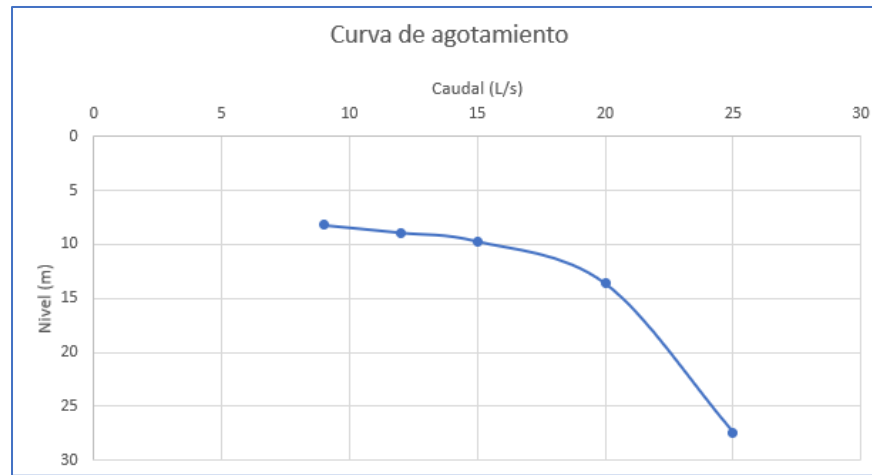


Figura 52: Curva de agotamiento Liceo Nogales

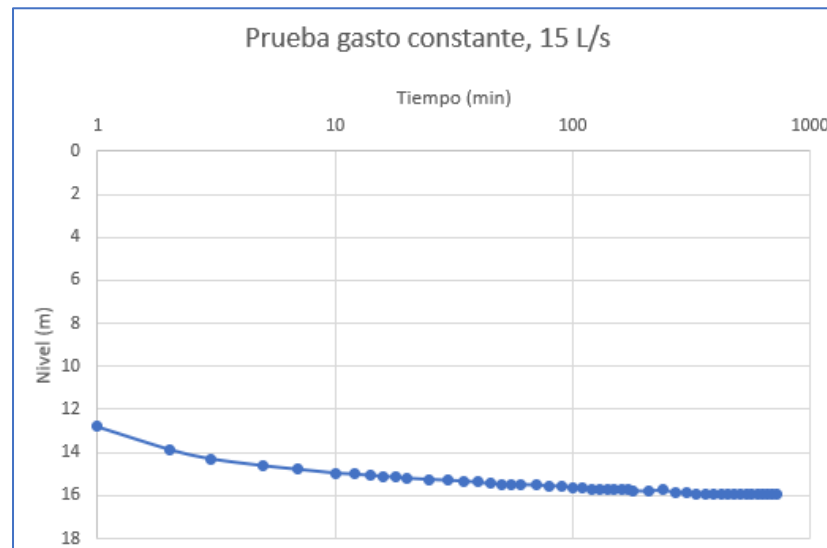


Figura 53: Prueba de gasto constante a 15 L/s, Liceo Nogales

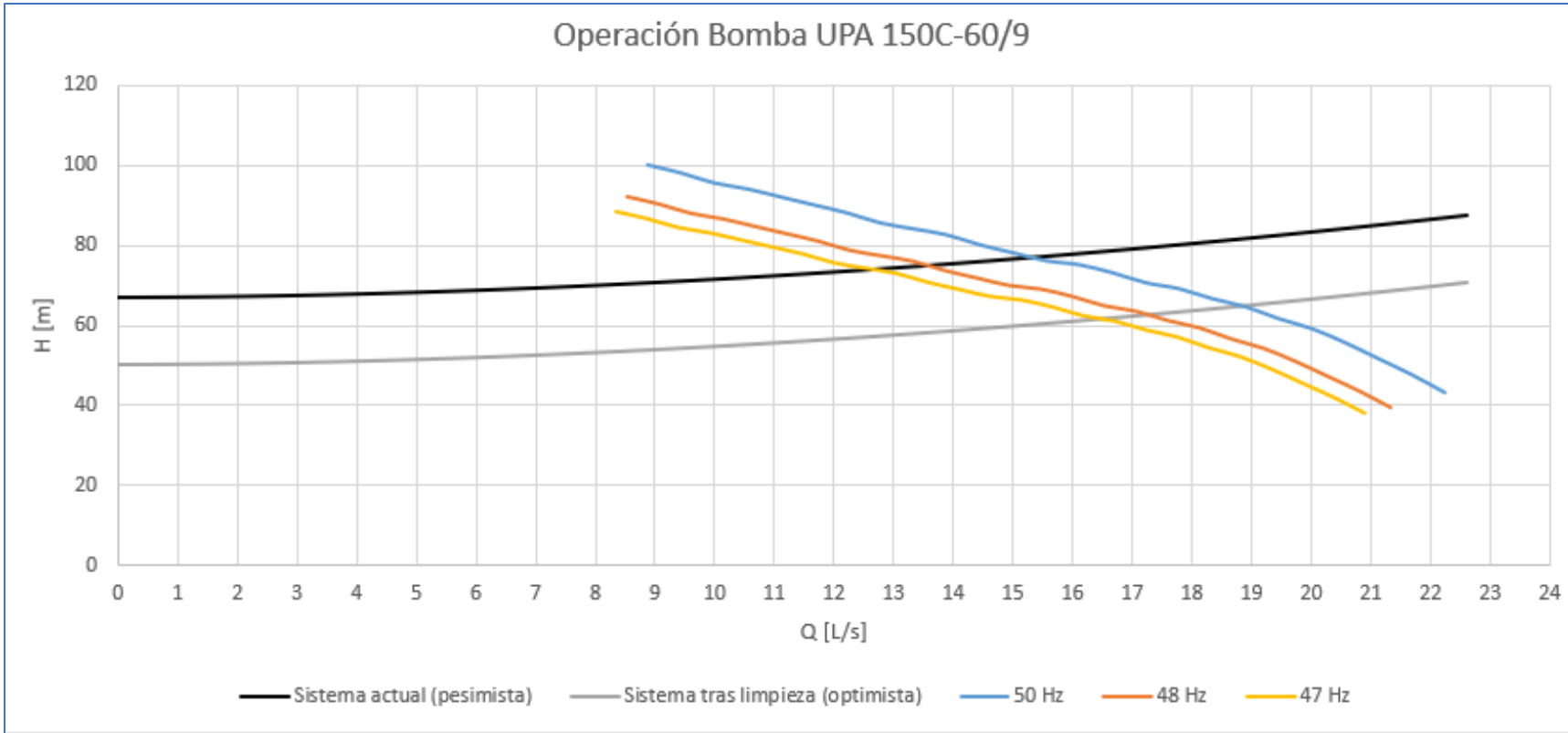


Figura 54: Curvas H-Q y de sistema con nueva propuesta

Tabla 35: Cálculo de nueva holgura en pozo Liceo

Componentes	Dato particular del proyecto	Diámetro [mm]
Diámetro Exterior de motobomba	UPA 150C-60 /9	145
Diámetro interior camisa refrigeración	6 in	160,00
Diámetro exterior camisa	Se suma 2 veces el espesor	172,40
Diámetro Exterior tubería impulsión vertical	4 in, de planos	114,3
Línea de aire	Estándar	32
Cable	4 cables de 2,5 mm ²	2,5
Copla	Estándar	50
Diámetro de unión vertical (diám. Exterior tubería vertical+línea de aire/cable+copla)	Línea de aire es mayor, no se calcula con el cable	196,3
Diámetro mayor (Dext camisa o unión vertical)	Unión vertical es mayor en este caso que camisa	196,3
Profundidad del pozo [m]	De planos	44,84
Holgura [mm]	Por norma 777/2	101,6
Diámetro del pozo [in]	12 in, de planos	12
Diámetro del pozo [mm]		304
Diámetro mínimo del pozo [mm]	Suma entre Dmayor y holgura	297,9
Condición de instalación	Dmin > Dpozo?	Se puede instalar

Tabla 36: Evaluación de probabilidad de riesgo en Liceo

SPAP Liceo Nogales						
VELOCIDAD	Q [L/s]	Din [mm]	A [m2]	v [m/s]	Probabilidad	
Inherente	12		150	0,01767146	0,7	3
Esperado (optimista)	16,7		150	0,01767146	0,9	1
RANGO OPERACIÓN	Pozo	QBEP Nominal [L/s]	Q [L/s]	F [Hz]	Probabilidad	
Inicial	PL		17,2	12	50	5
Esperado (optimista)	PL		17,2	16,7	47	1
POTENCIA ESPECIFICA	Pozo	Q [L/s]	P [kW]	Ps [kW/L/s]	Probabilidad	
Inicial	PL		12	23,3	1,94	5
Esperado (optimista)	PL		16,7	15,31	0,92	1

Tabla 37: Evaluación económica completa SPAP Liceo

	may-23	jun-23	jul-23	ago-23	sept-23	oct-23	nov-23	dic-23	ene-24	feb-24	mar-24	abr-24	may-24	jun-24	jul-24	ago-24	sept-24	oct-24	nov-24	dic-24	ene-25	feb-25	mar-25	abr-25
POZO LICEO																								
Horas de uso mensual (h)	527	401	374	420	462	630	674	731	636	652	663	598	527	401	374	420	462	630	674	731	636	652	663	598
Volumen mensual (m3)	22.769	19.598	21.044	22.469	15.305	32.515	38.343	39.236	34.019	33.864	33.601	29.406	22.769	19.598	21.044	22.469	15.305	32.515	38.343	39.236	34.019	33.864	33.601	29.406
Producción actual (m3/h)	43,2	48,9	56,3	53,5	33,1	51,6	56,9	53,7	53,5	51,9	50,7	49,2	43,2	48,9	56,3	53,5	33,1	51,6	56,9	53,7	53,5	51,9	50,7	49,2
Volumen aljibes (m3)	22	0	0	0	0	0	0	0	254	293	363	266	22	0	0	0	0	0	0	0	254	293	363	266
Demanda Nogales (m3)	22.791	19.598	21.044	22.469	15.305	32.515	38.343	39.236	34.273	34.157	33.964	29.672	22.791	19.598	21.044	22.469	15.305	32.515	38.343	39.236	34.273	34.157	33.964	29.672
Producción optimizada (m3/h)	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5	57,5
P. optimizada corregida (m3/h)	50,4	53,2	56,9	55,5	45,3	54,6	57,2	55,6	55,5	54,7	54,1	53,3	50,4	53,2	56,9	55,5	45,3	54,6	57,2	55,6	55,5	54,7	54,1	53,3
Volumen optimizado (m3)	26.538	21.330	21.276	23.312	20.937	34.373	38.552	40.638	35.298	35.680	35.865	31.898	26.538	21.330	21.276	23.312	20.937	34.373	38.552	40.638	35.298	35.680	35.865	31.898
Ahorro volumen recuperado (\$ m3 optimizado vs demanda (m3)	113.082	51.953	6.971	25.278	168.969	55.745	6.281	42.057	38.360	54.488	67.922	74.775	113.082	51.953	6.971	25.278	168.969	55.745	6.281	42.057	38.360	54.488	67.922	74.775
	3.747	1.732	232	843	5.632	1.858	209	1.402	1.024	1.524	1.901	2.226	3.747	1.732	232	843	5.632	1.858	209	1.402	1.024	1.524	1.901	2.226
ALJIBES																								
Valor m3 aljibe (\$/m3)	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500	3.500
Costo actual aljibes (\$)	77.677	0	0	0	0	0	0	0	890.000	1.024.500	1.269.032	931.241	77.677	0	0	0	0	0	0	0	890.000	1.024.500	1.269.032	931.241
Costo optimizado aljibes (\$)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ahorro aljibes (\$)	77.677	0	0	0	0	0	0	0	890.000	1.024.500	1.269.032	931.241	77.677	0	0	0	0	0	0	0	890.000	1.024.500	1.269.032	931.241
ENERGÍA																								
Potencia actual (kW)	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7	30,7
Valor energético (\$/kWh)	46	46	69	69	69	46	46	46	46	46	46	46	46	46	69	69	69	46	46	46	46	46	46	46
Potencia optimizada (kW)	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14	14
Costo energético actual (\$)	746.017	567.653	794.148	891.823	981.006	891.823	954.110	1.034.798	900.317	922.966	938.538	846.524	746.017	567.653	794.148	891.823	981.006	891.823	954.110	1.034.798	900.317	922.966	938.538	846.524
Costo energético optimizado (\$)	340.893	259.389	362.886	407.519	448.271	407.519	435.981	472.852	411.401	421.750	428.866	386.820	340.893	259.389	362.886	407.519	448.271	407.519	435.981	472.852	411.401	421.750	428.866	386.820
Ahorro energético (\$)	405.124	308.263	431.261	484.304	532.734	484.304	518.128	561.946	488.917	501.216	509.672	459.705	405.124	308.263	431.261	484.304	532.734	484.304	518.128	561.946	488.917	501.216	509.672	459.705
TOTAL																								
Ahorro total (\$)	595.883	360.216	438.232	509.582	701.704	540.049	524.410	604.004	1.417.277	1.580.204	1.846.627	1.465.721	595.883	360.216	438.232	509.582	701.704	540.049	524.410	604.004	1.417.277	1.580.204	1.846.627	1.465.721
Ahorro acumulado (\$)	595.883	956.099	1.394.332	1.903.914	2.605.617	3.145.666	3.670.076	4.274.079	5.691.356	7.271.560	9.118.187	10.583.907	11.179.791	11.540.007	11.978.239	12.487.821	13.189.525	13.729.573	14.253.983	14.857.987	16.275.264	17.855.468	19.702.094	21.167.815

19.4 Anexo D: El Tambo

Tabla 38: Datos para modelo hidráulico El Tambo

Datos entrada MH El Tambo			
	P4	P5	Terreno
Cota terreno (m)	704	703	
Dist. Pozo-union (m)	63,5	64,2	
CT unión (m)			704
CT 60° (m)			704
CT 90° (m)			705
CT Estanque (m)			704
CT Estanque arriba (m)			709
C de H-W (-)			120
Diámetros tubería (mm)			200
Situación actual			
Nivel dinámico	92,9	92,85	
Profundidad bomba	140	140	
Caudal	65	65	
PARA EPANET			
CT P-Terreno (m)	564	563	
CT ND-Terreno (m)	611,1	610,15	

Tabla 39: Rango de operación bombas El Tambo

RANGOS DE OPERACIÓN El Tambo			
Frecuencia	Q (L/s)	%BEP	Rango
50 Hz	51	100	Entre 41 y 56 L/s
	40,8	80	
	56,1	110	
45 HZ	45,9	100	Entre 37 y 50 L/s
	36,7	80	
	50,5	110	
40 Hz	41	100	Entre 33 y 44 L/s
	32,6	80	
	44,9	110	
35 Hz	35,7	100	Entre 29 y 39 L/s
	28,6	80	
	39,3	110	

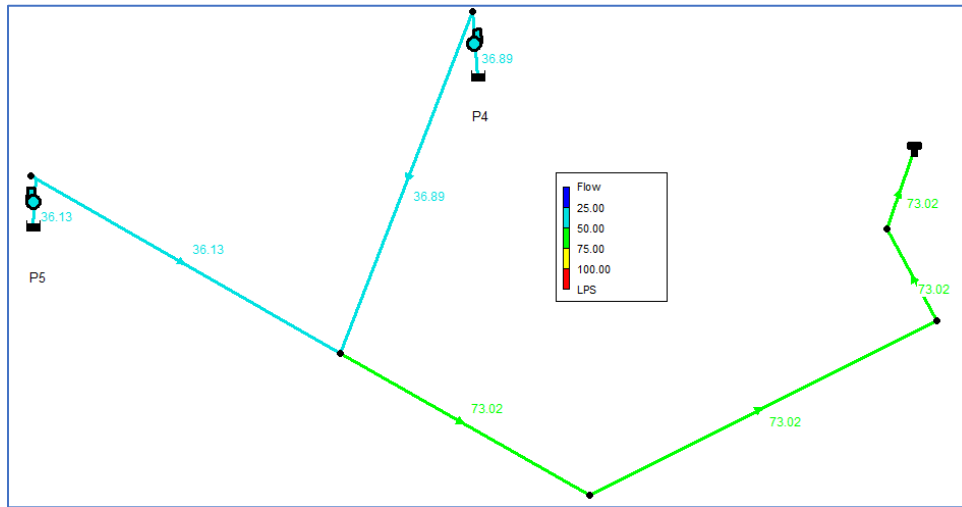


Figura 55: Caudal modelo hidráulico El Tambo, 40 [Hz]

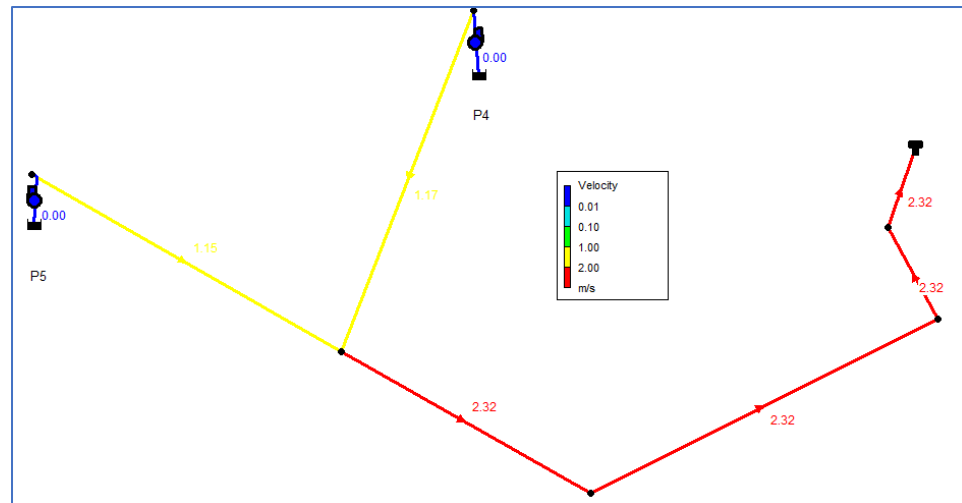


Figura 56: Velocidad modelo hidráulico El Tambo, 40 [Hz]

Tabla 40: Evaluación de probabilidad de riesgo en El Tambo

SPAP El Tambo					
VELOCIDAD	Q [L/s]	Din [mm]	A [m2]	v [m/s]	Probabilidad
Inherente	137	200	0,0314	4,4	5
Esperada	73	200	0,0314	2,3	1
RANGO OPERACIÓN	Pozo	QBEP Nominal [L/s]	Q [L/s]	F [Hz]	Probabilidad
Inherente	P4	50	25	50	5
	P5	50	25	50	5
Esperada	P4	50,8	36,9	40	1
	P5	50,8	36,1	40	3
POTENCIA ESPECIFICA	Pozo	Q [L/s]	P [kW]	Ps [kW/L/s]	Probabilidad
Inherente	P4	25,6	41,7	1,63	5
	P5	24,4	41,7	1,71	5
Esperada	P4	36,1	49,2	1,36	3
	P5	36,1	49,2	1,36	3