



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

**OPTIMIZACIÓN HORARIA DE UN SISTEMA DE IMPULSIÓN DE AGUA
DE MAR EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS Y COSTOS
ENERGÉTICOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

JUAN MARTIN PAQUAY ARRUEZ

PROFESOR GUÍA:
Ricardo Opazo Contreras

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
Mauricio Rebolledo González
Alberto de la Fuente Stranger
José Manuel Infante Cousiño

SANTIAGO DE CHILE
2023

OPTIMIZACIÓN HORARIA DE UN SISTEMA DE IMPULSIÓN DE AGUA DE MAR EN FUNCIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS Y COSTOS ENERGÉTICOS.

Dentro de Chile, la actividad minera cuenta con diversos procesos que estimulan su desarrollo, donde la extracción e impulsión de agua ha llegado a ser fundamental dentro de ella. Por esto mismo, como objetivo principal, se busca definir un modelo de un sistema de impulsión de agua de mar que resguarde tanto el costo de inversión como el de operación, con énfasis en el costo energético operacional del sistema de impulsión. Para esto, se evalúa inicialmente los costos de la energía en Chile, y, además, las variables y parámetros técnicos presentes en los sistemas de impulsión de agua de mar. Dentro de la gran cantidad de variables presentes en los sistemas de impulsión de agua de mar, solo se consideran las de mayor relevancia. Además, el sistema de impulsión debe cumplir con una gran cantidad de normas y criterios hidráulicos, mecánicos y energéticos. De esta forma, se busca definir un modelo hidráulico que optimice un sistema de impulsión de agua de mar, teniendo en cuenta los costos de inversión y los costos de operación. Dado que existen distintos costos de la energía, se establece que el modelo entregue 4 alternativas a cada una de las modelaciones que este realiza. Estas 4 alternativas son el caso 24/7, el caso Solar, el caso Mixto Solar y finalmente el caso Mixto 24/7. A continuación se presentan las características de cada uno de los casos mencionados (ver tabla n° 1).

Tabla 1: Características de cada uno de los casos del modelo
Fuente: Elaboración propia

Caso	Funcionamiento	Contrato	Características
24/7	24 hrs diarias	Bloque A, B y C, costo: 65 [USD/MWh]	Caudal constante
Solar	10 hrs bloque solar	Bloque B, costo: 35 [USD/MWh]	Caudal constante durante el día, se apaga de noche
Mixto Solar	24 hrs diarias	Bloque A, B y C, costo: 80 [USD/MWh]	Caudal variable entre día y la noche (velocidad mínima)
Mixto 24/7	24 hrs diarias	Bloque A, B y C, costo: 80 [USD/MWh]	Caudal variable entre día y la noche (velocidad nominal)

Dentro de los proyectos que se modelaron, se tiene el Proyecto Orcoma, el Proyecto Tente en el Aire, el Proyecto Planta de Desalinización Minera Los Pelambres y el Proyecto Planta de Desalinización RT Sulfuros.

Uno de los resultados más relevantes es que, a pesar de que el costo de la energía en el bloque solar es aproximadamente un 50 % del costo de los otros bloques, el costo energético en el modelamiento del caso Solar es el más alto en la gran mayoría de los escenarios. Finalmente, el tener un caudal variable entre el día y la noche, como se tiene en el caso Mixto Solar, genera un costo final de elevar 1 [m^3] de agua más económico en comparación con las otras 3 alternativas presentadas.

Para ustedes, mamá y papá

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mi familia, la cual estuvo siempre pendiente y apoyándome durante mi carrera universitaria.

A mi polola, por escucharme hablarle de algo que es completamente nuevo para ella, apoyarme y entenderme todos los días.

A mis amigos que al igual que mi familia, siempre estuvieron presente, ayudándome en las distintas cosas que necesitase.

A mis profesores de la comisión y a todos los de la empresa SQM que fueron parte del desarrollo de este trabajo.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
2. Antecedentes de estudio	6
2.1. Antecedentes de estudio del sector energético	7
2.1.1. Funcionamiento y normativa del Sistema Eléctrico de Chile	7
2.1.1.1. Sistemas eléctricos	7
2.1.1.2. Oferta de energía eléctrica a nivel nacional: centrales convencionales y centrales de energías renovables no convencionales	9
2.1.1.3. Consumo y clientes	10
2.1.1.3.1. Cliente Regulado	10
2.1.1.3.2. Cliente Libre	10
2.2. Antecedentes de estudio del sector hidráulico	11
2.3. Antecedentes de estudio del sector ambiental	12
2.3.1. Normativa ambiental aplicada en Chile	12
2.3.1.1. Permisos Ambientales Sectoriales (PAS)	15
2.4. Antecedentes de estudio del sector proyectos	19
2.4.1. Proyectos mineros con impulsión de agua de mar	20
3. Antecedentes	23
3.1. Bloques de suministro horario de energía	23
3.2. Casos de funcionamiento del modelo	24
3.3. Variables del modelo	25
3.3.1. Variables asociadas al trazado de impulsión	25
3.3.1.1. Cota estática (dH_i)	25
3.3.1.2. Largo del trazado (L)	25
3.3.2. Variables generales	26
3.3.2.1. Temperatura del agua de mar (T)	26
3.3.2.2. Densidad del agua de mar (ρ)	26
3.3.2.3. Viscosidad dinámica del agua de mar (μ)	27
3.3.2.4. Peso específico del agua de mar (γ)	27
3.3.2.5. Gravedad (g)	27
3.3.2.6. Densidad del acero (ρ_{acero})	27
3.3.2.7. Tensión admisible del acero (S_{acero})	27
3.3.2.8. Módulo elástico del agua de mar (K)	27
3.3.2.9. Módulo de Young del acero (E_{acero})	28
3.3.3. Variables hidráulicas	28
3.3.3.1. Pérdidas de carga (h_f y h_s)	29

3.3.3.2.	Número de Reynolds (Re)	30
3.3.3.3.	Factor de fricción (f)	31
3.3.3.4.	Diámetro externo e interno tubería (d_{ext} y d_{int})	31
3.3.3.5.	Schedule de la tubería (Sch)	33
3.3.3.6.	Espesor de la tubería ($e_{tuberia}$)	34
3.3.3.7.	Revestimiento de la tubería	34
3.3.3.8.	Espesor del revestimiento (e_{rev})	35
3.3.3.9.	Rugosidad de la tubería (ϵ)	35
3.3.3.10.	Velocidad del fluido (v)	36
3.3.3.11.	Carga dinámica total (TDH)	36
3.3.3.12.	Volumen de agua de mar a elevar diariamente (V)	36
3.3.3.13.	Caudal a elevar (Q)	36
3.3.3.14.	Curva de requerimiento del sistema	37
3.3.3.15.	Curva característica de la bomba	38
3.3.3.16.	Leyes de afinidad	39
3.3.3.17.	Estación de bombeo	40
3.3.3.18.	Caudal y altura de operación del sistema	41
3.3.3.19.	Sobrepresión de Joukowski ($\Delta H_{joukowski}$)	42
3.3.3.20.	Celeridad de la onda (C)	43
3.3.3.21.	Tiempo crítico (t_c)	43
3.3.3.22.	Potencia hidráulica (Pot_{hid})	44
3.3.3.23.	Eficiencia hidráulica (η_{hid})	44
3.3.4.	Variables mecánicas	44
3.3.4.1.	Potencia mecánica (Pot_{mec})	45
3.3.4.2.	Eficiencia mecánica (η_{mec})	45
3.3.4.3.	Presión interna máxima en tuberías (P_{max})	45
3.3.4.4.	Masa tuberías (m)	45
3.3.4.5.	Golpe de ariete	46
3.3.4.6.	Prendidas y paradas suaves	46
3.3.5.	Variables energéticas	47
3.3.5.1.	Potencia eléctrica requerida ($Pot_{elec-req}$)	47
3.3.5.2.	Eficiencia eléctrica (η_{elec})	47
3.3.5.3.	Potencia eléctrica consumida ($Pot_{elec-con}$)	48
3.3.5.4.	Energía consumida por m^3 por bomba (E_{bomba})	48
3.3.5.5.	Energía consumida por m^3 total (E_{total})	48
3.3.6.	Contratos de energía	49
3.3.7.	Criterios utilizados en el diseño del modelo	51
3.3.7.1.	Velocidad máxima y mínima del agua de mar	51
3.3.7.2.	Presión interna máxima en las tuberías (P_{max})	52
3.3.7.3.	Best Efficiency Point (BEP) y Preferable Operating Range (POR)	53
3.3.7.4.	RPM mínimas del funcionamiento de las bombas	54
3.3.8.	Costos asociados al modelo	54
3.3.8.1.	Costo energético anual ($C_{energetico-anual}$)	55
3.3.8.2.	Costo total del acero utilizado en las tuberías ($C_{tuberias}$)	55
3.3.8.3.	Costo de las bombas centrifugas utilizadas (C_{bomba})	55
3.3.8.4.	Costo del revestimiento interno de las tuberías (C_{revest})	56

3.3.8.5.	Costo de la instalación de los equipos ($C_{instalacion-i}$)	56
3.3.8.6.	Costo del mantenimiento anual de los equipos ($C_{mantenimiento-i}$)	56
3.3.8.7.	Capex y Opex	57
3.3.8.8.	Valor Actual Neto (VAN)	57
3.3.8.9.	Costo final de elevar 1 m^3 de agua (CF)	58
3.3.8.10.	Key Performance Indicator (KPI)	58
4.	Metodología	59
5.	Descripción de los casos de estudio	68
5.1.	Proyectos reales	68
5.1.1.	Proyecto Orcoma	68
5.1.2.	Proyecto Tente en el Aire (TEA)	69
5.1.3.	Proyecto Minera Los Pelambres	70
5.1.4.	Proyecto Planta de Desalinización RT Sulfuros	71
5.2.	Proyectos modificados	71
5.3.	Análisis de sensibilidad	72
6.	Resultados	74
6.1.	Proyectos reales	74
6.1.1.	Proyecto Orcoma	74
6.1.2.	Proyecto TEA	77
6.1.3.	Proyecto Los Pelambres	78
6.1.4.	Proyecto RT Sulfuros	79
6.1.5.	Síntesis proyectos reales	84
6.2.	Proyectos modificados	95
6.2.1.	Proyecto Orcoma modificado	96
6.2.2.	Proyecto TEA modificado	97
6.2.3.	Síntesis proyectos modificados	99
6.3.	Análisis de sensibilidad	111
6.3.1.	TEA	111
6.3.1.1.	Caso 24/7	112
6.3.1.2.	Caso Solar	113
6.3.1.3.	Caso Mixto Solar	114
6.3.1.4.	Caso Mixto 24/7	115
6.3.2.	Síntesis análisis de sensibilidad	116
7.	Análisis de resultados	120
7.1.	Proyectos reales	120
7.2.	Proyectos modificados	125
7.3.	Análisis de sensibilidad	125
8.	Conclusiones	127
	Bibliografía	130
	Anexos	133
A.	Información	133

B.	Código programación Python	137
C.	Resultados	147

Índice de Tablas

1.	Características de cada uno de los casos del modelo	i
3.1.	Diámetros de las tuberías considerados	32
3.2.	Schedules de las tuberías considerados	34
3.3.	Espesor de cada uno de los revestimientos utilizados en el modelo	35
3.4.	Rugosidad de cada uno de los revestimientos utilizados en el modelo	35
3.5.	Resumen licitaciones energéticas año 2021	49
3.6.	Resumen licitaciones energéticas año 2022	49
6.1.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	76
6.2.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	76
6.3.	Costo final de elevar 1 m ³ de agua del Proyecto Orcoma	77
6.4.	Resultados del modelamiento del Proyecto TEA	78
6.5.	Resultados del modelamiento del Proyecto Los Pelambres	79
6.6.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto RT Sulfuros	82
6.7.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 2 a la EB n° 3 del Proyecto RT Sulfuros	82
6.8.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 3 a la EB n° 4 del Proyecto RT Sulfuros	83
6.9.	Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 4 a la planta minera del Proyecto RT Sulfuros	83
6.10.	Costo final de elevar 1 m ³ de agua del Proyecto RT Sulfuros	84
6.11.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso 24/7 Parte 1	85
6.12.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso 24/7 Parte 2	85
6.13.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Solar Parte 1	86
6.14.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Solar Parte 2	86
6.15.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto Solar Parte 1	87
6.16.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto Solar Parte 2	87
6.17.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto 24/7 Parte 1	88

6.18.	Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto 24/7 Parte 2	88
6.19.	KPI de cada proyecto	95
6.20.	Resultados del modelamiento del Proyecto Orcoma modificado	96
6.21.	Resultados del modelamiento del tramo EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado	98
6.22.	Resultados del modelamiento del tramo EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	98
6.23.	Costo final de elevar 1 m ³ de agua del Proyecto TEA modificado	99
6.24.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7	99
6.25.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar	100
6.26.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar	100
6.27.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7	101
6.28.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7	101
6.29.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar	102
6.30.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar	102
6.31.	Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7	103
6.32.	Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua de mar para el caso 24/7	112
6.33.	Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua de mar para el caso Solar	113
6.34.	Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua de mar para el caso Mixto Solar	114
6.35.	Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua de mar para el caso Mixto 24/7	115
6.36.	Síntesis de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua modificando los costos de la energía	116
6.37.	Síntesis de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua modificando los costos del acero	116
6.38.	Síntesis de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua modificando los valores de las pérdidas singulares	117

7.1.	Proyectos reales v/s Modelado	123
A.1.	Extracto de tabla con diámetros nominales, diámetros externos, espesores y schedule de las tuberías	133
A.2.	Modelos de bombas y costos	136

Índice de Ilustraciones

1.1.	Mapa de la zona norte de Chile	1
1.2.	Sources and uses of fresh water in the copper industry in Chile	2
1.3.	Ejemplo de un trazado de impulsión de agua	3
2.1.	Procedimiento de una evaluación de impacto ambiental	19
3.1.	Representación de cada uno de los tipos de regímenes	30
3.2.	Diámetro externo, interno y espesor de una tubería	33
3.3.	Ejemplo de una curva característica de requerimiento del sistema	37
3.4.	Ejemplo de una curva característica de una bomba	38
3.5.	Ejemplo del funcionamiento de las leyes de afinidad	39
3.6.	Funcionamiento de bombas en paralelo	40
3.7.	Ejemplo gráfico n° 1 de como se ve el punto de operación con las curvas de requerimiento del sistema y la característica de la bomba	41
3.8.	Ejemplo gráfico n° 2 de como se ve el punto de operación con las curvas de requerimiento del sistema y la característica de la bomba	42
3.9.	Diagrama de caja y bigote de las licitaciones energéticas años 2021 y 2022	50
3.10.	BEP y POR en una curva característica de una bomba ejemplo	53
4.1.	Diagrama de relación entre variables	64
4.2.	Diagrama de flujo del programa	66
5.1.	Ubicación y trazado del Proyecto Orcoma	69
5.2.	Ubicación y trazado del Proyecto TEA	70
5.3.	Ubicación y trazado del Proyecto Los Pelambres	70
5.4.	Ubicación y trazado del Proyecto RT Sulfuros	71
5.5.	Ubicación y trazado del Proyecto Orcoma modificado	72
5.6.	Ubicación y trazado del Proyecto TEA modificado	72
6.1.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	75
6.2.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	75
6.3.	Perfil de elevación del trazado del Proyecto TEA	77
6.4.	Perfil de elevación del trazado del Proyecto Los Pelambres	78
6.5.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto RT Sulfuros	80
6.6.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 2 a la EB n° 3 del Proyecto RT Sulfuros	80
6.7.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 3 a la EB n° 4 del Proyecto RT Sulfuros	81
6.8.	Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 4 al punto final del Proyecto RT Sulfuros	81
6.9.	Resumen gráfico de los costos energéticos en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	89

6.10.	Resumen gráfico de los costos de las tuberías en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	89
6.11.	Resumen gráfico de los costos de la inversión inicial en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	90
6.12.	Resumen gráfico de los costos operacionales en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	90
6.13.	Resumen gráfico de los valores actuales netos en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	91
6.14.	Resumen gráfico de los costos finales de elevar $1 m^3$ de agua en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales	91
6.15.	Resumen gráfico de los costos energéticos en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	92
6.16.	Resumen gráfico de los costos de las tuberías en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	92
6.17.	Resumen gráfico de los costos de la inversión inicial en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	93
6.18.	Resumen gráfico de los costos operacionales en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	93
6.19.	Resumen gráfico de los valores actuales netos en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	94
6.20.	Resumen gráfico de los costos finales de elevar $1 m^3$ de agua en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales	94
6.21.	Costo de elevar $1 m^3$ de agua desalada	95
6.22.	Perfil de elevación del trazado del Proyecto Orcoma modificado	96
6.23.	Perfil de elevación de la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado	97
6.24.	Perfil de elevación de la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	97
6.25.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7	103
6.26.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7	104
6.27.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar	104
6.28.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar	105
6.29.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar	105
6.30.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar	106
6.31.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7	106
6.32.	Comparación n° 2 entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7	107
6.33.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7	107
6.34.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7	108

6.35.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar	108
6.36.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar	109
6.37.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar	109
6.38.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar	110
6.39.	Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7	110
6.40.	Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7	111
6.41.	Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso 24/7	117
6.42.	Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso Solar	118
6.43.	Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso Mixto Solar	118
6.44.	Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso Mixto 24/7	119
C.1.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	147
C.2.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	148
C.3.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	148
C.4.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	149
C.5.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	149
C.6.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma	150
C.7.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	150
C.8.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	151
C.9.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	151
C.10.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	152
C.11.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	152
C.12.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma	153
C.13.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto TEA	153
C.14.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto TEA	154
C.15.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto TEA	154
C.16.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto TEA	155

C.17.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto TEA	155
C.18.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche del Proyecto TEA	156
C.19.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto Los Pelambres	156
C.20.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto Los Pelambres	157
C.21.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto Los Pelambres	157
C.22.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto Los Pelambres	158
C.23.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto Los Pelambres	158
C.24.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche del Proyecto Los Pelambres	159
C.25.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto RT Sulfuros	159
C.26.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 2 a la EB nº 3 del Proyecto RT Sulfuros	160
C.27.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 3 a la EB nº 4 del Proyecto RT Sulfuros	160
C.28.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 4 al punto final del Proyecto RT Sulfuros	161
C.29.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto Orcoma modificado	161
C.30.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto Orcoma modificado	162
C.31.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto Orcoma modificado	162
C.32.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto Orcoma modificado	163
C.33.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto Orcoma modificado	163
C.34.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 del Proyecto Orcoma modificado	164
C.35.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 1 a la EB nº2 del Proyecto TEA modificado	164
C.36.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto TEA modificado	165
C.37.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto TEA modificado	165
C.38.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto TEA modificado	166
C.39.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto TEA modificado	166
C.40.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto TEA modificado	167

C.41.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	167
C.42.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	168
C.43.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	168
C.44.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	169
C.45.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	169
C.46.	Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado	170
C.47.	Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Orcoma	170
C.48.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Orcoma	171
C.49.	Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto Orcoma	171
C.50.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Orcoma	172
C.51.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Orcoma	172
C.52.	Gráfica de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua en el Proyecto Orcoma	173
C.53.	Gráfica de los costos energético del Proyecto TEA	173
C.54.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto TEA	174
C.55.	Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto TEA	174
C.56.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto TEA	175
C.57.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto TEA	175
C.58.	Gráfica de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua en el Proyecto TEA	176
C.59.	Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Los Pelambres	176
C.60.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Los Pelambres	177
C.61.	Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto Los Pelambres	177
C.62.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Los Pelambres	178
C.63.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Los Pelambres	178
C.64.	Gráfica de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua en el Proyecto Los Pelambres	179
C.65.	Gráfica de los costos energéticos del Proyecto RT Sulfuros	179
C.66.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto RT Sulfuros	180
C.67.	Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto RT Sulfuros	180
C.68.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto RT Sulfuros	181
C.69.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto RT Sulfuros	181
C.70.	Gráfica de los costos finales de elevar 1 m ³ de agua en el Proyecto RT Sulfuros	182
C.71.	Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Orcoma modificado	182
C.72.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Orcoma modificado	183
C.73.	Gráfica de los costos de la inversión inicial del Proyecto Orcoma modificado	183
C.74.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Orcoma modificado	184
C.75.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Orcoma modificado	184
C.76.	Gráfica de los costos final de elevar 1 m ³ de agua en el Proyecto Orcoma modificado	185
C.77.	Gráfica de los costos energéticos del Proyecto TEA modificado	185
C.78.	Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto TEA modificado	186
C.79.	Gráfica de los costos de la inversión inicial del Proyecto TEA modificado	186
C.80.	Gráfica de los costos operacionales del Proyecto TEA modificado	187
C.81.	Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto TEA modificado	187

C.82. Gráfica de los costos finales de elevar $1 m^3$ de agua en el Proyecto TEA modificado188

Capítulo 1

Introducción

Desde hace muchos años la zona centro norte de nuestro país se conoce como un área de gran explotación minera, considerando las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana y Libertador Bernardo O'Higgins como factores claves dentro de ella. La inversión, pudiendo ser chilena como extranjera hacen que Chile sea uno de los principales productores de cobre, litio y yodo a nivel mundial. Considerando la minería en Chile como un gran influyente dentro del ámbito económico del país, dado que es la principal actividad económica, aportando un 11 % del PIB nacional (Muñoz, 2022).

A continuación, se presenta un mapa de la zona norte de Chile (ver figura n° 1.1), pudiendo identificar las regiones mencionadas anteriormente. Las cuales contienen puntos marcados haciendo referencia a las mineras dentro de ellas, como, por ejemplo: Chuquicamata, Centinela, Sierra Gorda y Cerro Negro Norte.



Figura 1.1: Mapa de la zona norte de Chile
Fuente: “*Mapa Minero*”, Consejo Minero, 2023

Si bien la actividad minera del país conlleva grandes impactos positivos en el seno económico, también genera consecuencias hídricas en Chile. Esto dado que la minería representa el 60 % de los usos de agua continental en el norte de Chile (Sonami, 2019). La cual hace tanto uso de aguas superficiales como de aguas subterráneas, dejando el norte de Chile con cantidades de agua muy escasas. El agua en esta área se usa tanto para las maquinas como para el procesamiento de los mismos minerales, donde su utilización es esencial en la industria minera. Actualmente, la industria se encuentra altamente limitada por la cantidad de agua que se necesita dentro del desarrollo minero, en comparación a la cantidad de agua existente en la zona. A continuación se presenta una imagen la cual muestra el cómo se dividen los distintos tipos de agua y en que se usan estos mismos.

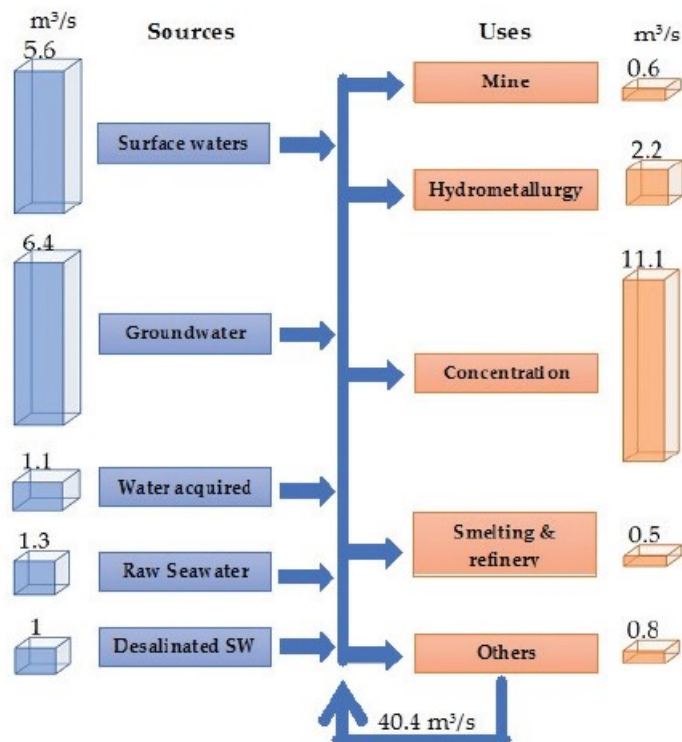


Figura 1.2: Sources and uses of fresh water in the copper industry in Chile
Fuente: “*Innovative Solutions for Seawater Use in Mining Operations*”,
Edelmira Galvez y Luis A. Cisternas, 2007

Como se puede ver en la figura n° 1.2, la mayor cantidad de agua que se usa para el desarrollo minero proviene de aguas tanto superficiales como subterráneas, dado que hacen referencia a un 78 % del total.

El concepto de crisis hídrica se escucha cada vez más en nuestro cotidiano. La gente es consciente de los impactos a nivel mundial que este fenómeno conlleva, los cuales repercuten enormemente en nuestra realidad nacional. Asimismo, para poder mantener el nivel de explotación minera en el país y poder disminuir las grandes cantidades de agua continental que se utilizan en la actualidad, se comienza a utilizar sistemas de extracción e impulsión de agua de mar, para ser utilizada en los distintos procesos mineros. De esta forma, se presenta

una figura de un esquema de un trazado de un sistema de impulsión de agua.

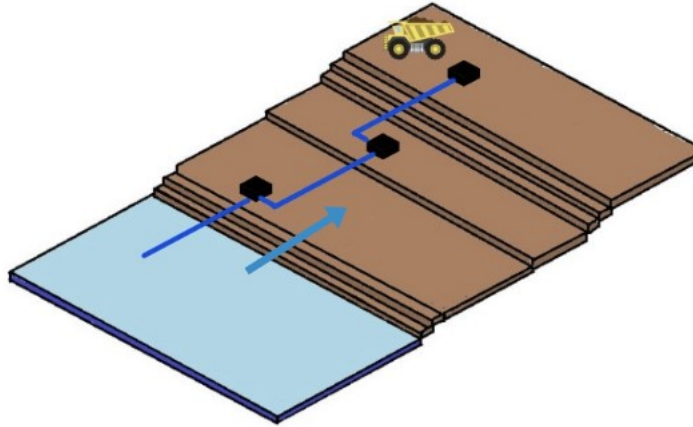


Figura 1.3: Ejemplo de un trazado de impulsión de agua
Fuente: Elaboración propia

La figura n° 1.3 presentada anteriormente, hace referencia a un trazado de extracción e impulsión de agua de mar, donde cómo se puede ver, se tiene la captación de agua desde el mar, y gracias a las estaciones de bombeo (cubos negros) se impulsa a través de bombas hasta la planta minera.

Hoy en día, los futuros proyectos mineros, dado los compromisos ambientales, están cada vez más limitados en utilizar agua continental para su desarrollo, esto fuerza a todas las empresas mineras a implementar en ellos o los que están en proceso de construcción, un sistema de extracción e impulsión de agua de mar. Lo cual conduce al tema propuesto, el modelo hidráulico planteado modela un sistema de impulsión de agua desde el mar hasta la estación minera. Este modelo está sujeto en su mayoría a normas hidráulicas, mecánicas y energéticas, a criterios de construcción y de diseño, variables de entrada, y variables hidráulicas, mecánicas y energéticas.

Si bien la extracción e impulsión de agua de mar como alternativa al uso de agua continental minimiza el impacto que genera el ser humano en el planeta en términos hídricos, sigue generando un gran impacto en gastos energéticos y económicos. Además, el costo de la energía en Chile depende principalmente de dos mercados. El primero, un precio fijo acordado entre el generador de energía y la empresa que compra la energía. Y el segundo depende directamente del Coordinador Eléctrico Nacional (CEN, 2023b), el cual, dada la demanda energética del país, selecciona las plantas generadoras de energía que van a trabajar durante el día. En donde se tienen distintas maneras de generar energía, ya sea solar, hidráulica, eólica, marítima, entre otras, lo que finalmente genera un precio de la energía que varía hora a hora. Este último no aplica en el caso de proyectos mineros, dado que estos utilizan contratos de energía al ser clientes libres, y por lo tanto no se considera dentro del modelo.

La relación que existe entre el modelo hidráulico y el costo de la energía es que la impulsión de agua conlleva un gran gasto energético, por lo cual, lo que se busca es poder minimizarlo junto con los otros costos que conlleva impulsar agua de mar. Para visualizar de mejor forma

esto, existen diversas formas de impulsar el agua de mar. En un primer ejemplo, se tiene el caso donde el agua se impulsa a igual velocidad durante todo el día, donde las bombas de impulsión trabajan a una misma intensidad las 24 horas del día, o en un segundo caso, impulsar solamente durante las horas del día con mayor generación energética solar, donde la energía tiene un costo inferior. Para esto, se tienen que analizar cada uno de los casos de impulsión individualmente, para poder ver cuál es el mejor método de impulsión de agua en donde podamos minimizar el gasto energético y finalmente el costo económico de impulsar grandes cantidades de agua.

Con lo anteriormente mencionado, comprendemos que existe relación directa entre el contrato de energía con el cual el sistema de impulsión esté operando y su costo económico asociado al estar trabajando con bombas para este proceso. De esta forma, el tema que se propone consiste en buscar la optimización dentro de este proceso, contando los costos asociados al tener que elevar 1 $[m^3]$ de agua desde el mar hasta la elevación de alguna estación minera, el cual se lleva a cabo a través de un modelo hidráulico. Este se puede llegar a implementar en futuras construcciones de plantas mineras que requieran la impulsión de agua de mar para su funcionamiento. Esta optimización se realiza considerando los materiales y equipos utilizados en la configuración del sistema de impulsión de agua, la instalación de estos y la operación.

A continuación se presentarán los objetivos de la memoria, donde se tiene un objetivo general y objetivos específicos:

- A modo general:
 - Definir un modelo de impulsión de agua de mar, el cual minimice tanto los costos de inversión como los costos de operación.
- Más específicamente:
 - Determinar el costo de la energía en Chile.
 - Determinar las variables relevantes a incorporar en el modelo hidráulico.
 - Desarrollar un modelo hidráulico de un sistema de impulsión de agua de mar que permita obtener tanto el costo energético como costos de inversión y operación del transporte de agua de mar.
 - Determinar si es que el modelo aplica o no a proyectos reales o proyectos que serán implementados en un futuro.

Finalmente, la metodología que se utilizará durante el desarrollo de la memoria se presenta a continuación:

- Realizar un catastro de información relevante al tema propuesto.
- Revisar en detalle toda la información de la bibliografía recopilada.
- Determinar el precio de la energía en Chile.
- Revisar en detalle proyectos mineros los cuales utilizan hoy en día impulsión de agua de mar y también proyectos que pretendan incorporar una impulsión de agua en un futuro.

- Determinación de las variables relevantes para desarrollar el modelo hidráulico de impulsión de agua de mar.
- Desarrollar un modelo hidráulico de impulsión de agua de mar el cual esté optimizado en término de los costos energéticos de operación asociados. Además de los costos asociados a la inversión inicial y a la mantención.
- Determinar si es que el modelo aplica o no a proyectos actuales o proyectos que se implementarán en un futuro.

Cabe mencionar que este modelo se limita a utilizar solamente tuberías de acero, no considera la instalación eléctrica utilizada en el sistema de impulsión, dentro de las estaciones de bombeo se utilizan solamente bombas centrifugas, no considera ningún tipo de válvulas presentes en el sistema de tuberías y finalmente no se considera ningún otro tipo de obras tanto temporales como permanentes del proyecto, más allá del sistema de impulsión de agua.

Capítulo 2

Antecedentes de estudio

A continuación se presentan los antecedentes de estudio de la memoria, la cual conlleva la revisión de una gran cantidad de información. Dentro de estos antecedentes se tienen normas, paginas de internet, revistas, artículos, tesis o memorias relevantes dentro del tema planteado, finalmente también se consideraron proyectos mineros los cuales posean un sistema de impulsión de agua de mar o estén en búsqueda de su futura implementación.

Para comenzar, estos proyectos conllevan un gran gasto energético y en la mayoría, un gran impacto ambiental en la zona donde se realiza. Además, se entiende que los sistemas de impulsión de agua tanto salada como desalada, conllevan una gran cantidad de variables y normas. Dentro de estas se encuentran:

- Variables energéticas y sus normativas:
 - Tipo de clientes
 - Métodos de generación de energía
 - Legislación de la energía
 - Normativas de la energía
- Variables hidráulicas y sus normas:
 - Velocidad
 - Caudal
 - Diámetro tuberías
 - Cantidad de bombas impulsión
 - Potencia hidráulica
 - Eficiencia hidráulica
 - Normativas hidráulicas
- Variables mecánicas y sus normas:
 - Presión interna máxima dentro de las tuberías
 - Potencia mecánica

- Eficiencia mecánica
- Normativas mecánicas
- Variables ambientales:
 - Normativa
 - Legislación
- Proyectos mineros con sistemas de impulsión de agua

A continuación se presenta un subcapítulo asociado al sector energético, al hidráulico, al ambiental y finalmente proyectos mineros los cuales actualmente poseen un sistema de impulsión de agua de mar o en un futuro contarán con uno.

2.1. Antecedentes de estudio del sector energético

La información presentada a continuación fue recopilada a partir del CEN, Comisión Nacional de la Energía (CNE, 2023b) y de La Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento (ACERA, 2023b) donde este último presenta un libro escrito por La Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) y el Ministerio de Energía llamado: “*Las Energías Renovables no Convencionales en el Mercado Eléctrico Nacional*” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021).

Finalmente, se tiene la tesis llamada “*Diseño de una metodología para la evaluación energética de un equipo electromecánico de bombeo y alocución practica*” (Díaz, 2014, p. 56), de la Universidad Politécnica de Valencia, la cual se utiliza para la determinación del valor de la eficiencia eléctrica del sistema.

2.1.1. Funcionamiento y normativa del Sistema Eléctrico de Chile

A continuación se presentará un breve resumen de qué y cómo son los sistemas eléctricos en Chile, su oferta de energía y el consumo de sus clientes.

2.1.1.1. Sistemas eléctricos

“*Un sistema eléctrico es el conjunto de instalaciones de centrales eléctricas generadoras, líneas de transporte, subestaciones eléctricas y líneas de distribución, interconectadas entre sí, que permite generar, transportar y distribuir energía eléctrica*” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 21). Estos son apodados como sistemas eléctricos interconectados, donde pueden ser clasificados como un “*sistema eléctrico nacional si tiene una capacidad instalada de generación igual o superior a 200 MW (mega watt). Un sistema mediano tiene una capacidad instalada superior a 1.5 MW e inferior a 200 MW y los pequeños tienen una capacidad menor a 1.5 MW*” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 21). A continuación se presentan los principales sistemas eléctricos chilenos: el Sistema Eléctrico Nacional, el Sistema Eléctrico de Aysén y el Sistema Eléctrico de Magallanes, a lo largo de la memoria solo se mencionará el SEN dado que es el más relevante en los proyectos de carácter minero.

- Sistema Eléctrico Nacional (SEN):

- *“Nace en el año 2017, en el momento en que los ex sistemas del norte grande y del centro sur del país, se unificaron. Por las características de la geografía nacional, es un sistema único en cuanto a longitud, alcanzando los 3.100 km y abarcando casi la totalidad del territorio nacional, desde la ciudad de Arica por el norte, hasta la Isla de Chiloé, en el sur”* (CEN, 2023a).
- *“Es el sistema nacional que abastece la zona norte y centro del país. Constituye el 99.31 % de la capacidad total instalada del país”* (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 22).

El SEN está sujeto a una gran cantidad de leyes para su legislación. A continuación se presentan las leyes con las cuales se regula el Sistema Eléctrico y también las leyes del proceso de tarificación:

- Leyes aplicadas al Sistema Eléctrico Nacional:

- *“Ley N° 21.194: Rebaja la rentabilidad de las empresas de distribución y perfecciona el proceso tarifario de distribución eléctrica.*
- *Ley N° 21.185 Crea un mecanismo transitorio de estabilización de precios de la energía eléctrica para clientes sujetos a regulación de tarifas.*
- *Decreto con Fuerza de Ley N° 4, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, de 2007 (D.F.L N°4/20.018): Fija texto refundido, coordinado y sistematizado del Decreto con Fuerza de Ley N° 1, de Minería, de 1982, Ley General de Servicios Eléctricos, en materia de energía eléctrica. Publicado en el Diario Oficial del 5 de febrero de 2007.*
- *Ley 19.613: Modifica la ley N° 18.410, orgánica de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles, y el decreto con fuerza de ley N° 1, de 1982, de Minería, Ley General de Servicios Eléctricos, con el objeto de fortalecer el régimen de fiscalización del sector. Publicado en el Diario Oficial del 8 de junio de 1999.*
- *Ley N° 19.674: Modifica el D.F.L. N° 1, de 1982, de Minería, Ley General de Servicios Eléctricos, con el objeto de regular los cobros por servicios asociados al suministro eléctrico que no se encuentran sujetos a fijación de precios. Publicado en el Diario Oficial del 3 de mayo de 2000.*
- *Ley N° 19.940: Regula sistemas de transporte de energía eléctrica, establece un nuevo régimen de tarifas para sistemas eléctricos medianos e introduce las adecuaciones que indica a la Ley General de Servicios Eléctricos. Publicado en el Diario Oficial del 13 de marzo del 2004.*
- *Ley N° 20.018: Modifica marco normativo del sector eléctrico. Publicado en el Diario Oficial del 19 de mayo de 2005.*
- *Ley N° 20.040: Modifica el decreto con fuerza de ley N°1, de 1982, del Ministerio de Minería, Ley General de Servicios Eléctricos Publicado en el Diario Oficial del 9 de julio de 2005.*
- *Ley N° 20.220: Perfecciona el marco legal vigente con el objeto de resguardar la seguridad del suministro a los clientes regulados y la suficiencia de los sistemas eléctricos. Publicado en el Diario Oficial del 14 de septiembre de 2007.*

– *Ley N° 20.257: Introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Publicado en el Diario Oficial del 1 de abril de 2008”* (CNE, 2023a).

- **Leyes de Tarificación del Sistema Eléctrico Nacional:**

– *“Ley General de Servicios Eléctricos Actualizado a mayo 2008. VERSIÓN NO OFICIAL: Decreto con Fuerza de Ley N° 4, del Ministerio de Economía, Fomento y Reconstrucción, de 2007, que fija texto refundido, coordinado y sistematizado del Decreto con Fuerza de Ley N° 1, de Minería, de 1982, Ley General de Servicios Eléctricos, en materia de energía eléctrica, modificado por las leyes N° 20.220 y 20.257.*

– *Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos Actualizado a mayo 2008. VERSIÓN NO OFICIAL: Decreto Supremo N° 327, del Ministerio de Minería, de 1997, que fija Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos, modificado por los DS N° 158, de Economía, de 2003; DS N° 181, de Economía, de 2004, DS N° 62, de Economía, de 2006, DS N° 26, de Minería, de 2007, y DS N° 4, de Economía, de 2008”* (CNE, 2023a).

2.1.1.2. Oferta de energía eléctrica a nivel nacional: centrales convencionales y centrales de energías renovables no convencionales

En términos generales, en Chile, una central se considera convencional cuando emplea tecnologías tradicionales y que correspondan a soluciones técnicas y comercialmente maduras, ya que se utilizan de hace tiempo. En el caso nacional, se tiene como ejemplo centrales termoeléctricas a carbón, motores diésel, turbinas a gas/petróleo e hidroeléctricas de embalse y pasada.

Además de las energías presentadas anteriormente, existen las energías renovables no convencionales (ERNC) donde como por ejemplo encontramos, la eólica, la solar, la geotérmica, de biomasa, la mareomotriz y finalmente la hídrica (capacidad instalada no mayor a 20 [MW]). Cabe mencionar que las energías convencionales aportan un 60 % de la generación nacional mientras que las no convencionales aportan el 40 % faltante (ACERA, 2023a).

2.1.1.3. Consumo y clientes

El consumo eléctrico está dividido en dos categorías principales: los clientes regulados y los clientes libres, los cuales se detallan a continuación:

2.1.1.3.1. Cliente Regulado

Como características principales se tienen:

- *“Son consumidores de una potencia conectada igual o inferior a 5 [MW].*
- *Aquellos con una potencia entre 500 kW y menos de 5 [MW] y que están ubicados en el área de concesión de una empresa distribuidora a optar a ser cliente libre.*
- *Representan un 38 % del consumo total en el SEN” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 31).*

Las ventas de las compañías generadoras están dirigidas a las empresas distribuidoras. Estas adquieren la energía mediante licitaciones reguladas, donde los precios resultantes se denominan “precios de nudo de largo plazo”. Esto ya que las licitaciones adjudican bloques de energía por plazos prolongados. La Comisión Nacional de Energía (CNE) es el responsable de elaborar las bases de licitaciones, realizar proyecciones de demanda y tiene la responsabilidad, el control y la conducción del proceso. *“Antes de que se instauraran estas licitaciones para clientes regulados, los contratos entre generadores y distribuidoras se realizaban a “precio de nudo de corto plazo”, que corresponde a un precio calculado 2 veces al año (en abril y octubre) por CNE y representaba un promedio de la proyección de costos marginales de los siguientes 48 meses ajustado por los precios del mercado de contratos de clientes libres. En el período en que conviven ambos tipos de contratos de suministro (los antiguos a precio de nudo de corto plazo y los más recientes a precio de nudo de largo plazo), el precio por concepto de energía y potencia que las empresas de distribución deben traspasar a sus clientes regulados corresponde al precio de nudo promedio, el cual es igual al promedio ponderado de los precios de nudo de largo plazo y los precios de nudo de corto plazo. Cabe destacar que el precio de nudo promedio se calcula para cada distribuidora inicialmente por separado y luego se aplica un procedimiento de ajuste a una banda, de modo tal que el precio de energía de ninguna distribuidora exceda en más de un 5 % el precio promedio de todo el sistema” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 31-32).* *“A estos precios de energía y potencia, provenientes del sector de generación-transporte, se le debe sumar un componente asociado al costo de distribución para luego desde estos costos formar la tarifa del cliente regulado. De esta forma, a los precios de energía y potencia, se les agrega el denominado VAD (Valor Agregado de Distribución), calculado en procesos tarifarios en base a costos medios de distribución que se realizan cada 4 años” (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 33).*

2.1.1.3.2. Cliente Libre

Se caracterizan principalmente por la gran cantidad de energía que consumen ya que cuando se consume una potencia mayor a 5 [MW] se pasa a ser cliente libre, estos generalmente son los clientes finales. Asimismo, pactan directamente el precio de la energía con el generador

de esta. Cabe mencionar que los clientes que tengan un consumo energético mayor a 500 kW pueden opcionalmente optar a ser de esta clase. En términos de conveniencia, siempre va a convenir ser cliente libre por sobre el ser cliente regulado, esto ya que el precio que conlleva es más bajo que ser cliente regulado. Finalmente del consumo total de energía en Chile, los clientes libres representan un 61.3 % (GIZ y Ministerio de Energía, 2021, p. 36-37).

2.2. Antecedentes de estudio del sector hidráulico

Para los antecedentes relacionados al sector hidráulico, se revisaron normas y criterios relevantes. Como ejemplo a lo anteriormente mencionado, se tienen normas del American Petroleum Institute (API), del American Water Works Association (AWWA), del American National Standards Institute (ANSI) y de la American Society of Mechanical Engineers (ASME). Además de esto se tienen artículos y libros los cuales indican valores constantes utilizados en el modelo y los cuales indican criterios que se utilizaron en el modelo.

Dentro de las normas, criterios, artículos y libros relevantes, en seguida se enlistan:

- API:
 - API 5L: Specification for Line Pipe
- AWWA:
 - AWWA C213: Fusion-bonded epoxy coatings and linings for steel water pipe and fittings
 - AWWA C222: Standard for polyurethane coating for the interior and exterior of steel water pipes and fittings
 - AWWA C512: Air Release, Air/Vacuum and Combination Air Valves for Water works Service
 - AWWA M51: Manual of Water Supply Practices
 - AWWA M55: Pe pipe-design and installation
- ANSI:
 - ANSI-HI 9.6.3: Rotodynamic (Centrifugal and Vertical) Pumps - Guideline for Allowable Operating Region
- ASME:
 - ASME B36.10M: Welded and Seamless Wrought Steel
- Libro:
 - Pumping Station Design
- Artículos:
 - Seawater Properties

- Effect of minor losses during steady flow in transmission pipelines

En la lista presentada anteriormente, se encuentran en su mayoría, normas y criterios de diseño que se tienen que tener en cuenta a la hora de realizar proyectos de impulsión de agua en el contexto de proyectos mineros. Ya que en estos se detallan las variables a considerar en proyectos de este estilo, como por ejemplo, velocidad de diseño, material de las tuberías, diámetro de las tuberías y otras.

2.3. Antecedentes de estudio del sector ambiental

Dentro de los antecedentes recopilados se tiene inicialmente la legislación ambiental aplicada. La legislación ambiental general en Chile se enmarca en la Ley N° 19.300 (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2022) del año 1994 sobre las Bases Generales del Medio Ambiente, modificada por la Ley 20.417 el año 2010 que crea el Ministerio de Medio Ambiente (MMA, 2023), el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2023b) y Superintendencia de Medio Ambiente (SMA, 2023).

Por otra parte, específicamente en el marco de la Evaluación Ambiental de un Proyecto, existe el Reglamento del Sistema de Evaluación Ambiental (RSEIA), el D.S N° 40/2013 del Ministerio de Medio Ambiente que establece las disposiciones por las cuales se registrará el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA, 2023) y la participación de la comunidad en el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental de un proyecto, en conformidad con lo que señala la Ley N°19.300. En el mismo contexto, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) es el encargado de administrar el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) estableciendo criterios comunes para evaluar cada tipo de proyecto, con el objetivo de asegurar la protección del medio ambiente de manera eficiente y eficaz. Finalmente, el SEIA es un instrumento de gestión ambiental de carácter preventivo que permite a la autoridad determinar antes de la ejecución de un proyecto si cumple con la legislación ambiental vigente y se hace cargo de los potenciales impactos ambientales significativos. Además de esta la Ley N° 19.300 y el D.S N° 40, se utilizó información recopilada de la página del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA, 2023b).

2.3.1. Normativa ambiental aplicada en Chile

La gran mayoría de los proyectos ingenieriles conlleva en su desarrollo cierto grado de impacto ambiental en la zona donde este se realizará, este impacto puede ser de menor o de mayor magnitud. El impacto que se genera en la zona debe ser estudiado y estimado por la empresa la cual va a desarrollar el proyecto y presentar finalmente un documento sobre el estudio ambiental realizado.

En este contexto, para definir si un proyecto ingresa al SEIA, y por qué mecanismo debe ser evaluado, se deben considerar la siguiente normativa ambiental:

- Ley 19.300: Bases Generales del Medio Ambiente (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2022).

- DS 40/2013: Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (MMA, 2013).

En la ley 19.300, específicamente en el artículo 10, se enlistan “*los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, en cualesquiera de sus fases, que deberán someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*” (Ministerio Secretaría General de la Presidencia, 2022, Artículo 10), los cuales se presentarán a continuación:

- “Acueductos, embalses o tranques y sifones que deban someterse a la autorización establecida en el artículo 294 del Código de Aguas, presas, drenaje, desecación, dragado, defensa o alteración, significativos, de cuerpos o cursos naturales de aguas;*
- Líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje y sus subestaciones;*
- Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW;*
- Reactores y establecimientos nucleares e instalaciones relacionadas;*
- Aeropuertos, terminales de buses, camiones y ferrocarriles, vías férreas, estaciones de servicio, autopistas y los caminos públicos que puedan afectar áreas protegidas;*
- Puertos, vías de navegación, astilleros y terminales marítimos;*
- Proyectos de desarrollo urbano o turístico, en zonas no comprendidas en alguno de los planes evaluados según lo dispuesto en el Párrafo 1 Bis;*
- Proyectos industriales o inmobiliarios que se ejecuten en zonas declaradas latentes o saturadas;*
- Proyectos de desarrollo minero, incluidos los de carbón, petróleo y gas comprendiendo las prospecciones, explotaciones, plantas procesadoras y disposición de residuos y estériles, así como la extracción industrial de áridos, turba o greda;*
- Oleoductos, gasoductos, ductos mineros u otros análogos;*
- Instalaciones fabriles, tales como metalúrgicas, químicas, textiles, productoras de materiales para la construcción, de equipos y productos metálicos y curtiembres, de dimensiones industriales;*
- Agroindustrias, mataderos, planteles y establos de crianza, lechería y engorda de animales, de dimensiones industriales;*
- Proyectos de desarrollo o explotación forestal en suelos frágiles, en terrenos cubiertos de bosque nativo, industrias de celulosa, pasta de papel y papel, plantas astilladoras, elaboradoras de madera y aserraderos, todos de dimensiones industriales;*
- Proyectos de explotación intensiva, cultivo, y plantas procesadoras de recursos hidrobiológicos;*
- Producción, almacenamiento, transporte, disposición o reutilización habituales de sustancias tóxicas, explosivas, radioactivas, inflamables, corrosivas o reactivas;*

- o. *Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de aguas o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos;*
- p. *Ejecución de obras, programas o actividades en parques nacionales, reservas nacionales, monumentos naturales, reservas de zonas vírgenes, santuarios de la naturaleza, parques marinos, reservas marinas, humedales urbanos o en cualesquiera otras áreas colocadas bajo protección oficial, en los casos en que la legislación respectiva lo permita;*
- q. *Aplicación masiva de productos químicos en áreas urbanas o zonas rurales próximas a centros poblados, humedales, o a cursos o masas de agua que puedan ser afectadas;*
- r. *Proyectos de desarrollo, cultivo o explotación, en las áreas mineras, agrícolas, forestales e hidrobiológicas que utilicen organismos genéticamente modificados con fines de producción y en áreas no confinadas. El reglamento podrá definir una lista de especies de organismos genéticamente modificados que, como consecuencia de su comprobado bajo riesgo ambiental, estarán excluidos de esta exigencia. El mismo reglamento establecerá el procedimiento para declarar áreas como libres de organismos genéticamente modificados, y*
- s. *Ejecución de obras o actividades que puedan significar una alteración física o química a los componentes bióticos, a sus interacciones o a los flujos ecosistémicos de humedales que se encuentran total o parcialmente dentro del límite urbano, y que impliquen su relleno, drenaje, secado, extracción de caudales o de áridos, la alteración de la barra terminal, de la vegetación azonal hídrica y ripariana, la extracción de la cubierta vegetal de turberas o el deterioro, menoscabo, transformación o invasión de la flora y la fauna contenida dentro del humedal, indistintamente de su superficie” (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2022, Artículo 10).*

Cabe mencionar que el literal aplicable a un proyecto minero corresponde a la letra i). Luego, en el DS 40/2013 (MMA, 2013, Artículo 3) se presenta para cada literal, un mayor detalle del tipo de proyecto en listado en el artículo 10 de la mencionada Ley. A modo de ejemplo se tomará en consideración la letra b) del artículo 3:

- b. *“Líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje y sus subestaciones.*
 - a) *Se entenderá por líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje aquellas líneas que conducen energía eléctrica con una tensión mayor a veintitrés kilovoltios (23 kV).*
 - b) *Se entenderá por subestaciones de líneas de transmisión eléctrica de alto voltaje aquellas que se relacionan a una o más líneas de transporte de energía eléctrica y que tienen por objeto mantener el voltaje a nivel de transporte” (MMA, 2013, Artículo 3, Literal b).*

El instrumento por el cual un Proyecto se somete al SEIA, puede ser a través de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o bien, a través de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) donde la principal diferencia radica si el proyecto genera o presenta o no, a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias (ECC) del artículo 11 de la Ley N°19.300, listados a continuación:

1. *“Riesgo para la salud de la población, debido a la cantidad y calidad de efluentes, emisiones y residuos.*
2. *Efectos adversos significativos sobre la cantidad y calidad de los recursos naturales renovables, incluido el suelo, agua y aire.*
3. *Reasentamiento de comunidades humanas, o alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de los grupos humanos.*
4. *Localización en o próxima a poblaciones, recursos y áreas protegidas, sitios prioritarios para la conservación, humedales protegidos, glaciares, susceptibles de ser afectados, así como el valor ambiental del territorio en que se pretende emplazar.*
5. *Alteración significativa, en términos de magnitud o duración, del valor paisajístico o turístico de una zona.*
6. *Alteración de monumentos, sitios con valor antropológico, arqueológico, histórico y, en general, los pertenecientes al patrimonio cultural” (SEA, 2023c).*

Si el proyecto genera o presenta uno de estos efectos, características o circunstancias, deberá ingresar al SEIA como un Estudio de Impacto Ambiental (EIA).

Otro aspecto relativo a la normativa ambiental aplicable está constituido por la exigencia de los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS). A continuación, se presentará las características de estos:

2.3.1.1. Permisos Ambientales Sectoriales (PAS)

Son autorizaciones o pronunciamientos que tienen o deben ser emitidos por Órganos de la administración del estado con competencia ambiental (OAECA) relacionados con actividades o proyectos los cuales fueron presentados al SEIA para así garantizar que se está cumpliendo con la protección del medio ambiente.

Los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS) son permisos que tienen un objeto de protección ambiental. Estos pueden tener más de un objeto de protección, pueden tener solamente objetos de protección sectorial y existen también los PAS mixtos, los cuales tienen contenido tanto sectorial como ambiental. El listado de los PAS se encuentra entre los artículos 111 y siguientes del D.S N° 40/2013. Las normas referentes a los Permisos Ambientales Sectoriales se ordenan de la siguiente manera:

- *“El nombre del permiso.*

- *La norma sectorial en que se funda, esto es, el artículo y cuerpo normativo que crea el permiso.*
- *Los requisitos para su otorgamiento, que son aquellos criterios que permiten determinar si se resguarda el objeto de protección ambiental del permiso.*
- *Los contenidos técnicos y formales que deben presentarse para acreditar su cumplimiento. Corresponden a los antecedentes que el titular debe entregar para determinar si se da cumplimiento al requisito de otorgamiento” (SEA, 2023a).*

En la página del SEA (SEA, 2023b) se puede encontrar más detalle acerca de cada permiso sectorial. Se presentan a continuación los 20 permisos únicamente ambientales y los 30 permisos mixtos. Además se presenta una guía para el buen cumplimiento de la Ley N°19.300 (Ministerio Secretaria General de la Presidencia, 2022) mencionada anteriormente, la cual establece al SEIA (SEIA, 2023) como el único mecanismo para la obtención de las autorizaciones que actividades o proyectos necesiten en el ámbito del medio ambiente. A continuación se presenta una lista de todos los permisos sectoriales:

- PAS únicamente ambientales:
 - *“Permiso para el vertimiento en las aguas sometidas a jurisdicción nacional desde naves, aeronaves, artefactos navales, construcciones y obras portuarias (artículo 111 RSEIA).*
 - *Permiso para emplazar instalaciones terrestres de recepción de mezclas oleosas, en los puertos y terminales del país (artículo 112 RSEIA).*
 - *Permiso para la instalación de plantas de tratamiento de instalaciones terrestres de recepción de mezclas oleosas cuyas aguas tratadas sean descargadas en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional (artículo 113 RSEIA).*
 - *Permiso para la instalación de un terminal marítimo y de las cañerías conductoras para transporte de sustancias contaminantes o que sean susceptibles de contaminar (artículo 114 RSEIA).*
 - *Permiso para introducir o descargar materias, energía o sustancias nocivas o peligrosas de cualquier especie a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional (artículo 115 RSEIA).*
 - *Permiso para realizar actividades de acuicultura (artículo 116 RSEIA).*
 - *Autorización para realizar repoblación y siembra de especies hidrobiológicas con fines de pesca recreativa (artículo 117 RSEIA).*
 - *Permiso para realizar actividades de acuicultura en áreas de manejo y explotación de recursos bentónicos (artículo 118 RSEIA).*
 - *Permiso para realizar pesca de investigación (artículo 119 RSEIA).*
 - *Permiso para iniciar trabajos de construcción, excavación, o para desarrollar actividades que pudieran alterar el estado natural de un Santuario de la Naturaleza (artículo 120 RSEIA).*
 - *Permiso para ejecutar labores mineras en lugares declarados parques nacionales, reservas nacionales o monumentos naturales (artículo 121 RSEIA).*

- *Permiso para ejecutar labores mineras en covaderas o en lugares que hayan sido declarados de interés histórico o científico (artículo 122 RSEIA).*
- *Permiso para la introducción en el medio natural de especies de fauna silvestre, sea ésta del país o aclimatada, semen, embriones, huevos para incubar y larvas en regiones o áreas del territorio nacional donde no tengan presencia y puedan perturbar el equilibrio ecológico y la conservación del patrimonio ambiental (artículo 123 RSEIA).*
- *Permiso para la caza o captura de ejemplares de animales de especies protegidas para controlar la acción de animales que causen graves perjuicios al ecosistema (artículo 124 RSEIA).*
- *Permiso para la ejecución de labores mineras en sitios donde se han alumbrado aguas subterráneas en terrenos particulares o en aquellos lugares cuya explotación pueda afectar un caudal o la calidad natural del agua (artículo 125 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de toda instalación diseñada para el manejo de lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas (artículo 126 RSEIA).*
- *Permiso para la corta y destrucción del Alerce (artículo 127 RSEIA).*
- *Permiso para la corta o explotación de araucarias vivas (artículo 128 RSEIA).*
- *Permiso para la corta o explotación de Queule -Gomortega keule (Mol.) Baillon-, Pitao -Pitavia punctata (Mol.)-, Belloto del Sur -Beilschmiedia berteriana (Gay) Kostern-, Ruil -Nothofagus alessandrii Espinoza-, Belloto del Norte -Beilschmiedia miersii (Gay) Kostern (artículo 129 RSEIA).*
- *Permiso para realizar nuevas explotaciones o mayores extracciones de aguas subterráneas que las autorizadas, en zonas de prohibición que corresponden a acuíferos que alimentan vegas y bofedales en las Regiones de Arica y Parinacota, de Tarapacá y de Antofagasta (artículo 130 RSEIA)” (SEA, 2023a).*

- PAS mixtos:

- *“Permiso para realizar trabajos de conservación, reparación o restauración de Monumentos Históricos; para remover objetos que formen parte o pertenezcan a un Monumento Histórico; para destruir, transformar o reparar un Monumento Histórico, o hacer construcciones en sus alrededores; o para excavar o edificar si el Monumento Histórico fuere un lugar o sitio eriazos (artículo 131 RSEIA).*
- *Permiso para hacer excavaciones de tipo arqueológico, antropológico y paleontológico (artículo 132 RSEIA).*
- *Permiso para hacer construcciones nuevas en una zona declarada típica o pintoresca, o para ejecutar obras de reconstrucción o de mera conservación (artículo 133 RSEIA).*
- *Permiso para el emplazamiento de instalaciones nucleares y radiactivas (artículo 134 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción y operación de depósitos de relaves (artículo 135 RSEIA).*
- *Permiso para establecer un botadero de estériles o acumulación de mineral (artículo 136 RSEIA).*

- *Permiso para la aprobación del plan de cierre de una faena minera (artículo 137 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra pública o particular destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de desagües, aguas servidas de cualquier naturaleza (artículo 138 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier obra pública o particular destinada a la evacuación, tratamiento o disposición final de residuos industriales o mineros (artículo 139 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de cualquier planta de tratamiento de basuras y desperdicios de cualquier clase o para la instalación de todo lugar destinado a la acumulación, selección, industrialización, comercio o disposición final de basuras y desperdicios de cualquier clase (artículo 140 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción, reparación, modificación y ampliación de relleno sanitario (artículo 141 RSEIA).*
- *Permiso para todo sitio destinado al almacenamiento de residuos peligrosos (artículo 142 RSEIA).*
- *Permiso para el transporte e instalaciones necesarias para la operación del sistema de transporte de residuos peligrosos (artículo 143 RSEIA).*
- *Permiso para instalaciones de eliminación de residuos peligrosos (artículo 144 RSEIA).*
- *Permiso para el sitio de reciclaje de residuos peligrosos (artículo 145 RSEIA).*
- *Permiso para la caza o captura de ejemplares de animales de especies protegidas para fines de investigación, para el establecimiento de centros de reproducción o criaderos y para la utilización sustentable del recurso (artículo 146 RSEIA).*
- *Permiso para la recolección de huevos y crías con fines científicos o de reproducción (artículo 147 RSEIA).*
- *Permiso para corta de bosque nativo (artículo 148 RSEIA).*
- *Permiso para la corta de plantaciones en terrenos de aptitud preferentemente forestal (artículo 149 RSEIA).*
- *Permiso para la intervención de especies vegetales nativas clasificadas de conformidad con el artículo 37 de la Ley N° 19.300, que formen parte de un bosque nativo, o alteración de su hábitat (artículo 150 RSEIA).*
- *Permiso para la corta, destrucción o despejado de formaciones xerofíticas (artículo 151 RSEIA).*
- *Permiso para el manejo de bosque nativo de preservación que corresponda a ambientes únicos o representativos de la diversidad biológica natural del país (artículo 152 RSEIA).*
- *Permiso para la corta de árboles y/o arbustos aislados ubicados en áreas declaradas de protección (artículo 153 RSEIA).*
- *Permiso para realizar exploraciones en terrenos públicos o privados de zonas que alimenten vegas o bofedales en las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y de Antofagasta (artículo 154 RSEIA).*
- *Permiso para la construcción de ciertas obras hidráulicas (artículo 155 RSEIA).*

- Permiso para efectuar modificaciones de cauce (artículo 156 RSEIA).
- Permiso para efectuar obras de regularización o defensa de cauces naturales (artículo 157 RSEIA).
- Permiso para ejecutar obras para la recarga artificial de acuíferos (artículo 158 RSEIA).
- Permiso para extracción de ripio y arena en los cauces de los ríos y esteros (artículo 159 RSEIA).
- Permiso para subdividir y urbanizar terrenos rurales o para construcciones fuera de los límites urbanos (artículo 160 RSEIA)” (SEA, 2023a).

A continuación se presenta un diagrama que muestra el proceso de evaluación de impacto ambiental de un proyecto:

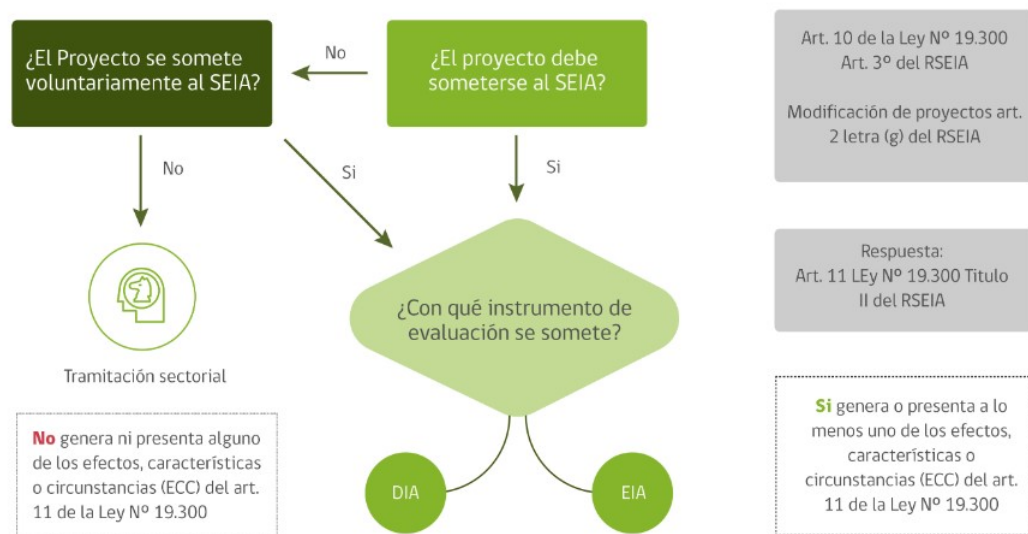


Figura 2.1: Procedimiento de una evaluación de impacto ambiental

Fuente: “¿Cuál es el proceso de evaluación de impacto ambiental?”, SEA

En la figura n° 2.1 se pueden ver las preguntas que hay que realizarse para ver si es que un proyecto tiene que ingresar o no al SEIA y, en tal caso, identificar el método correspondiente.

2.4. Antecedentes de estudio del sector proyectos

Dentro de todos los proyectos que se tienen en el país, solo se buscaron proyectos los cuales estén relacionados con el sector de la minería y que además tengan algún sistema de impulsión de agua.

2.4.1. Proyectos mineros con impulsión de agua de mar

En la página del SEIA (SEIA, 2023) se tienen un gran número de proyectos. Dentro de todos estos, se buscó precisamente proyectos mineros los cuales tengan algún tipo de sistema de impulsión de agua. Dentro de todos los proyectos mineros encontrados, se tienen los siguientes proyectos donde además de nombrarlos, se listan algunas características sobre el sistema de impulsión de agua:

- Proyecto Orcoma:
 - Caudal: 200 [l/s]
 - Largo: 30 [km]
 - Cantidad de estaciones de bombeo: 2
 - Altura: 1100 [m.s.n.m]
 - Transporte: agua de mar
- Proyecto Tente en el Aire (TEA):
 - Caudal: 900 [l/s]
 - Largo: 37 [km]
 - Cantidad de estaciones de bombeo: 1
 - Altura: 900 [m.s.n.m]
 - Transporte: agua de mar
- Proyecto Ciclón Exploradora:
 - Caudal: 8 [l/s]
 - Largo: 49 [km]
 - Cantidad de estaciones de bombeo: 1
 - Altura: 1600 [m.s.n.m]
 - Transporte: agua potable
- Proyecto Inco Minera Los Pelambre:
 - Caudal: 400 [l/s]
 - Largo: 57 [km]
 - Cantidad de estaciones de bombeo: 1
 - Altura: 1000 [m.s.n.m]
 - Transporte: agua desalada
- Proyecto Planta Desaladora RT Sulfuros:
 - Caudal: 1956 [l/s]
 - Largo: 158 [km]

- Cantidad de estaciones de bombeo: 4
- Altura: 3100 [m.s.n.m]
- Transporte: agua desalada
- Proyecto Quebrada Blanca Fase 2:
 - Caudal: 865 [l/s]
 - Largo: 164[km]
 - Cantidad de estaciones de bombeo: 5
 - Altura: 4300 [m.s.n.m]
 - Transporte: agua desalada

A continuación se presentan los capítulos de las EIA y DIA, donde se encuentran las características de cada uno de los proyectos mencionados con un mayor detalle:

- Proyecto Orcoma:
 - *“Capítulo 2 – Descripción de Proyecto – Descripción de las partes, acciones y obras físicas del proyecto – Obras permanentes – Sistema de suministro de agua de mar”* (Orcoma, 2015).
- Proyecto Tente en el Aire (TEA):
 - *“Capítulo 2 – Descripción de Proyecto – Descripción de las partes, acciones y obras físicas del proyecto – Sistema de suministro de agua de mar”* (SQM, 2017).
- Proyecto Ciclón Exploradora:
 - *“Capítulo 1 – Descripción de Proyecto – Definición de las partes, acciones y obras físicas del proyecto – Descripción partes y obras permanentes del proyecto”* (Eco Earth Elements SpA, 2022).
- Proyecto Inco Pelambre:
 - *“Descripción del Proyecto – Descripción de las partes, acciones y obras físicas que componen el proyecto – Obras físicas del Proyecto – Área Punta Chungo Pupio – Obras permanentes – Sistema de impulsión y transporte de agua desalada.*
 - *Descripción del Proyecto – Descripción de las partes, acciones y obras físicas que componen el proyecto – Obras físicas del Proyecto – Área Punta Chungo Pupio – Obras permanentes – Cambio de un tramo de tubería de la impulsión existente Mauro Chacay.*
 - *Descripción del Proyecto – Fase de construcción del proyecto – Partes, obras y acciones de la fase de construcción – Área Punta Chungo Pupio – Obras permanentes – Sistema de impulsión de agua desalada.*
 - *Descripción del proyecto – Fase de operación del proyecto – Partes, obras y acciones de la fase de operación – Área Punta Chungo Pupio – Sistema de impulsión de agua desalada”* (Illanes, 2016).

- Proyecto Planta Desaladora RT Sulfuros:
 - “*Capítulo 1 – Descripción del Proyecto*” (Codelco, 2017).
 - “*Capítulo 1 - Descripción del Proyecto - Partes, acciones y obras físicas que componen el proyecto - Sector Planta Desaladora RT*” (Codelco, 2013).
- Proyecto Quebrada Blanca Fase 2:
 - “*Capítulo 1 – Descripción del Proyecto - Descripción de las partes, acciones y obras físicas - Área Obras Lineales*” (MWH Chile, 2016).

Capítulo 3

Antecedentes

Para comenzar, se presentarán los componentes de un sistema de impulsión de agua de mar. Estos, para el alcance de la presente memoria son, un punto inicial, donde se comienza la impulsión de agua de mar, una estación de bombeo, lo que genera la impulsión de agua de mar, el sistema de tuberías y finalmente un punto final, punto de recepción del agua de mar impulsada. Así mismo, los costos que se incorporan en el modelo, son todos los costos mencionados en la sección Costos asociados al modelo. Donde como se puede ver, se excluyen por ejemplo, los costos asociados a la instalación eléctrica, desalinización del agua, válvulas de venteo, entre otros. De esta forma, los costos finales de elevar $1 m^3$ de agua son considerando solamente los costos que se mencionaron en la sección presentada anteriormente. Luego, los componentes que se comentaron, conllevan distintas variables, las cuales hacen parte del modelo de impulsión de agua de mar. Para el modelo presentado, se modelaron 4 casos distintos, donde cada uno posee distintas características. Lo que el modelo evalúa son estos 4 casos, donde luego este menciona cual de estos es la mejor alternativa económicamente hablando.

3.1. Bloques de suministro horario de energía

Los bloques de suministro de energía son 3, donde estos se distribuyen a lo largo de las 24 horas del día. Se enlistan estos a continuación:

- Bloque A: Horario desde las 23:00 hasta las 07:59.
- Bloque B: Horario desde las 08:00 hasta las 17:59.
- Bloque C: Horario desde las 18:00 hasta las 22:59.

3.2. Casos de funcionamiento del modelo

Enseguida, se presenta cada uno de los casos que fueron modelados, donde se enlistan sus características y el funcionamiento de cada uno:

- Caso 24/7:
 - Impulsión está activa durante las 24 horas del día.
 - Caudal constante.
 - Contrato de energía para los bloques A, B y C.
- Caso Solar:
 - Impulsión está activa solo durante las 10 horas del bloque solar con mayor incidencia de radiación y con mayor generación de energía que son dentro del siguiente horario: [08:00-17:59].
 - Las bombas se encienden y detienen todos los días.
 - Caudal constante durante el funcionamiento.
 - Contrato de energía para el bloque solar (bloque B).
- Caso Mixto Solar:
 - Impulsión está activa durante el día y la noche.
 - Caudal variable entre el día y la noche.
 - Durante las noches impulsa a la velocidad mínima de una bomba presente en la estación de bombeo o a la velocidad mínima por criterio hidráulico igual a 0.6 [m/s] (Monge, 2020).
 - Durante el día impulsa solamente el volumen restante de lo que no se elevó en la noche para cumplir con el volumen objetivo.
 - Presenta dos contratos, durante el día utiliza un contrato para el bloque solar (bloque B) y durante la noche un contrato en los bloques no solares (bloques A y C).
- Caso Mixto 24/7:
 - Impulsión está activa durante el día y la noche.
 - Caudal variable entre el día y la noche.
 - Durante las noches, una bomba impulsa a cierto porcentaje de su capacidad nominal. Donde este porcentaje se establece por el usuario.
 - Durante el día impulsa solamente el volumen restante de lo que no se elevó en la noche para cumplir con el volumen objetivo.
 - Presenta dos contratos, durante el día utiliza un contrato para el bloque solar (bloque B) y durante la noche un contrato en los bloques no solares (bloques A y C).

Cada uno de estos casos conlleva distintas variables, las cuales se repiten en cada caso. Dentro de todas las variables presentes, son pocas las que se modifican caso a caso.

En lo que sigue, se presentarán las variables que se utilizaron en el modelo de impulsión de agua de mar.

3.3. Variables del modelo

Para la presentación de las variables del modelo, se dividirá en secciones, las variables relacionadas directamente al trazado de impulsión, las generales, las hidráulicas, las mecánicas, las energéticas, los criterios de diseño que se consideraron dentro del modelo y finalmente las variables relacionadas a los costos de cada uno de los casos mencionados anteriormente.

3.3.1. Variables asociadas al trazado de impulsión

Las variables asociadas al trazado de impulsión de agua de mar son las variables que vienen directamente del trazado por donde se quiere realizar la impulsión para elevar el agua de mar. Por consiguiente, se en-listan las variables mencionadas:

- Cota estática
- Largo del trazado

A continuación se realizará una pequeña descripción de las variables mencionadas.

3.3.1.1. Cota estática (dH_i)

La cota estática es la altura que se tiene desde el punto inicial del trazado (punto generalmente más bajo) hasta la cota más alta del trazado. Para el cálculo de la cota estática se realiza el siguiente cálculo, presentado en la siguiente ecuación:

$$dH_i = z_{max} - z_{min} \quad (3.1)$$

Donde:

- z_{min} [m.s.n.m]: Altura sobre el nivel del mar mínima del trazado
- z_{max} [m.s.n.m]: Altura sobre el nivel del mar máxima del trazado

3.3.1.2. Largo del trazado (L)

El largo del trazado es la distancia total entre el punto inicial del sistema de impulsión de agua y el punto de recepción del agua elevada. Esta no es la distancia en línea recta, si no que es la distancia siguiendo el trazado ingresado en el modelo. Para el cálculo del largo del trazado se utiliza la siguiente ecuación:

$$L = \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2} \quad (3.2)$$

Donde:

- n [-]: N° de puntos en el trazado
- x_i [m]: Coordenada UTM Este del punto i

- y_i [m]: Coordenada UTM Norte del punto i
- z_i [m]: Elevación del punto i
- x_{i-1} [m]: Coordenada UTM Este del punto i-1
- y_{i-1} [m]: Coordenada UTM Norte del punto i-1
- z_{i-1} [m]: Elevación del punto i-1

3.3.2. Variables generales

Las variables generales, para efectos del modelo, se consideraron como valores constantes. Estas son las siguientes:

- Temperatura del agua
- Densidad del agua de mar
- Viscosidad Dinámica del agua de mar
- Peso Especifico del agua de mar
- Gravedad
- Densidad del acero
- Tensión admisible del acero
- Módulo elástico del agua de mar
- Módulo de Young del acero|

Así mismo, se realizará una descripción de cada una de ellas en donde se justificará su valor en caso de que sea necesario.

3.3.2.1. Temperatura del agua de mar (T)

La temperatura del agua de mar es variable, ya que puede llevar a tener un valor de -2 [°C] en lugares más fríos hasta 30 [°C] en lugares más cálidos. Debido a que el agua de mar tiene distintas temperaturas dependiendo de donde se esté realizando el trabajo, esta se establece para efectos del modelo igual a 20 [°C].

3.3.2.2. Densidad del agua de mar (ρ)

El valor de la densidad del agua de mar depende principalmente de dos factores, el primero es la salinidad de la misma y el segundo es la temperatura del agua. El agua de mar es más densa que el agua pura, dado que el agua pura tiene un valor de 1000 [kg/m³], mientras que un valor aproximado de la densidad del agua de mar, ya que esta presenta distintas salinidades, es igual a 1027 [kg/m³] (ServiQualita, 2016) a una temperatura de 20 [°C].

3.3.2.3. Viscosidad dinámica del agua de mar (μ)

La viscosidad dinámica hace referencia a qué tan resistente es un fluido a la fluencia al momento que se le aplica una fuerza cortante. Si es que el valor de la viscosidad dinámica es mayor, más denso es el fluido. Para efectos del modelo, se establece el valor de la viscosidad dinámica del agua de mar para una temperatura de 20 [°C] igual a 0.00109 [Pa·s] (Engineering ToolBox, 2005).

3.3.2.4. Peso específico del agua de mar (γ)

El peso específico es simplemente la relación entre el peso del agua de mar, dividido en su volumen. Con esto, para calcular el peso específico del agua de mar, se utiliza el valor de la densidad del agua de mar especificado en la sección n° 3.3.2.2 (p. 26) y esta se multiplica por el valor de la gravedad especificado en la sección n° 3.3.2.5. De esta forma el peso específico del agua de mar utilizado en el modelo es igual a 10074.87 [N/m³].

3.3.2.5. Gravedad (g)

La gravedad es un fenómeno que se da de forma natural en la tierra, esta es una fuerza, la cual atrae cuerpos o objetos al centro de la Tierra. El valor de la gravedad depende de a qué altura sobre el nivel del mar se esté, pero para efectos de este modelo, esta se fijará en un valor igual a 9.81 [m/s²].

3.3.2.6. Densidad del acero (ρ_{acero})

La densidad se refiere a la cantidad en volumen que ocupa cierto cuerpo dividido por el peso del mismo. Para efectos del modelo, el valor de la densidad del acero se establece igual a 7850 [kg/m³] (The Piping Mart, 2022).

3.3.2.7. Tensión admisible del acero (S_{acero})

La tensión admisible es la máxima tensión que puede soportar en este caso el acero, antes de llegar a una situación de estrés crítica, lo que serían deformaciones permanentes en el material. El tipo de tuberías más utilizadas en la industria son las tuberías de acero tipo API 5L de grado B y de grado x65. Los valores de tensión admisible en cada caso son; 245000 [Pa] (API, 2018, p. 31) y 450000 [Pa] (API, 2018, p. 31) respectivamente. Por lo que para efectos del modelo, la tensión admisible del acero se estableció igual a 347500 [Pa].

3.3.2.8. Módulo elástico del agua de mar (K)

El módulo de elasticidad es un valor constante, el cual relaciona la tensión versus la deformación del fluido. El valor del módulo elástico del agua de mar se establece igual a $2.34 \cdot 10^9$ [N/m²] (U. Tecnológica de Panamá, 2022).

3.3.2.9. Módulo de Young del acero (E_{acero})

El módulo de Young es un parámetro el cual revela cual es el comportamiento de cierto material en función a una fuerza que se le aplique. Este nuevamente relaciona la tensión versus la deformación. El valor del módulo de Young del acero se establece igual a $2 \cdot 10^{11}$ [N/m²] (Galbarro, 2023).

3.3.3. Variables hidráulicas

En esta subsección, se presentarán todas las variables hidráulicas que se utilizaron dentro del modelo.

Estas se presentan a continuación:

- Pérdidas de carga (fricciónales y singulares)
- Número de Reynolds
- Factor de fricción
- Diámetro externo e interno de la tubería
- Schedule de la tubería
- Espesor de la tubería
- Revestimiento de la tubería
- Espesor del revestimiento
- Rugosidad de la tubería
- Velocidad del fluido
- Carga dinámica total (TDH)
- Volumen de agua de mar a elevar diariamente
- Caudal a elevar
- Curva de requerimiento del sistema
- Curva característica de la bomba
- Leyes de afinidad
- Estaciones de bombeo
- Caudal y altura de operación del sistema
- Sobrepresión de Joukowski
- Celeridad de la onda

- Tiempo crítico
- Potencia hidráulica
- Eficiencia hidráulica

Así mismo, se realizará una descripción de cada una, se detallará el método de cálculo y su utilización en caso de ser necesario.

3.3.3.1. Pérdidas de carga (h_f y h_s)

Las pérdidas de carga dentro de las tuberías son pérdidas de presión del agua de mar que avanza a través de las tuberías debido al roce que se genera entre el fluido con las paredes de las tuberías. Estas se tienen que considerar en el diseño del modelo ya que tienen un impacto en la vida útil de la tubería misma, además de afectar la capacidad que tiene el sistema de impulsar agua de mar a cierta altura deseada.

Se tienen de dos tipos; las friccionales y las singulares, donde como su nombre lo indica, las primeras dependen de la fricción que se produce entre el fluido y las paredes de la tubería, mientras que las segundas se generan en lugares singulares del sistema de tuberías, como puede ser válvulas, codos, reducciones, ensanchamientos, etc... Para el cálculo de las pérdidas friccionales se utilizó la ecuación de Darcy y por otro lado, para el cálculo de las pérdidas singulares, a modo de simplificación para el modelo (ya que estas pérdidas dependen directamente del trazado que se ingrese en el modelo), se estiman como un 10 % (Annan, 2018, p. 4299-4305) de las pérdidas friccionales. A continuación se presentan cada una de las dos formulas mencionadas.

- Pérdidas Friccionales:

$$h_f = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot d_{int}} \quad \rightarrow \text{Ecuación de Darcy} \quad (3.3)$$

- Pérdidas Singulares:

$$h_s = h_f \cdot 10\% \quad (3.4)$$

$$h_s = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{2 \cdot g \cdot d_{int}} \cdot 10\%$$

Donde:

- f [-]: Factor de fricción
- L [m]: Largo del sistema de tuberías
- v [m/s]: Velocidad del fluido
- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería
- g [m/s^2]: Gravedad

3.3.3.2. Número de Reynolds (Re)

El n° de Reynolds, se usa bastante en la mecánica de fluidos ya que indica cómo es el movimiento de un fluido. Este indica que el fluido puede estar en:

- Régimen Turbulento ($4000 < Re$)
- Régimen de Transición ($2300 < Re < 4000$)
- Régimen Laminar ($Re < 2300$)

La siguiente figura ilustra como se ve el flujo en cada uno de los regímenes. Donde el (a) hace referencia al régimen laminar, el (b) al régimen de transición y finalmente el (c) al régimen turbulento.

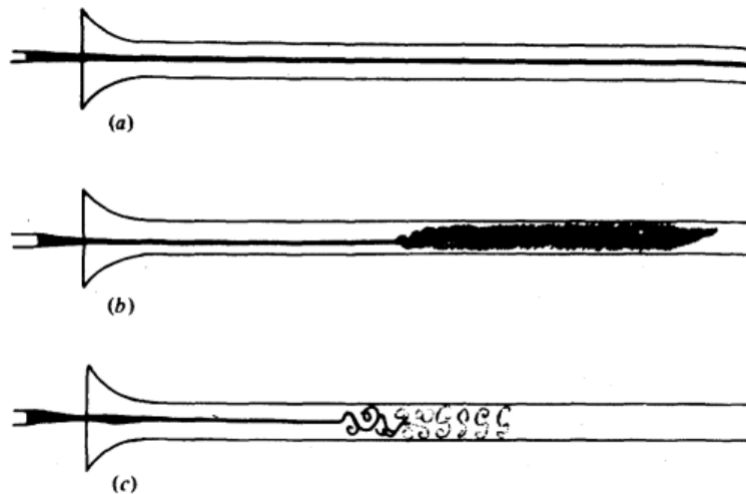


Figura 3.1: Representación de cada uno de los tipos de regímenes
Fuente: “Apunte Hidráulica U.Chile”, A. de la Fuente, 2017

A continuación se presenta la ecuación para el cálculo del n° de Reynolds:

$$Re = \frac{d_{int} \cdot \rho \cdot v}{\mu} \quad (3.5)$$

Donde:

- ρ [kg/m^3]: Densidad del agua de mar
- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería
- μ [$Pa \cdot s$]: Viscosidad dinámica del agua de mar
- v [m/s]: Velocidad del fluido

3.3.3.3. Factor de fricción (f)

Para el cálculo de las pérdidas friccionales es fundamental calcular el valor de la fricción dentro de las tuberías. Para esto, dependiendo del tipo de régimen que posea el fluido, se calcula el valor del factor de fricción utilizando las siguientes ecuaciones:

- Régimen Laminar:

$$f = \frac{64}{Re} \quad \rightarrow \text{Ecuación de Hazen-Poiseuille} \quad (3.6)$$

- Régimen Turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\epsilon}{3.7 \cdot d_{int}} + \frac{2.51}{Re \cdot \sqrt{f}}\right) \quad \rightarrow \text{Ecuación de Colebrook - White} \quad (3.7)$$

- Régimen en Transición:

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad \rightarrow \text{Ecuación de Blasius} \quad (3.8)$$

Donde:

- Re [-]: n° de Reynolds
- ϵ [m]: Rugosidad
- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería

Para el caso donde se tiene régimen turbulento, esta ecuación se debe iterar hasta que el valor de f converja. Para efectos del modelo, se inicia con un valor de f igual a 1 y se itera hasta que la diferencia entre el valor de f en una iteración y la siguiente, sea menor a $1 \cdot 10^{-7}$. Para proyectos mineros, dado los valores de caudales altos, se tiene generalmente un régimen turbulento.

3.3.3.4. Diámetro externo e interno tubería (d_{ext} y d_{int})

Para el diámetro de las tuberías, se tiene que considerar principalmente que sea un diámetro comercial, esto quiere decir que sea un diámetro que se venda en el mercado, no uno que se tenga que solicitar a medida. Para efectos del modelo, se establece que el material de todas las tuberías será en todos los casos el acero. Así mismo, se consideraron los diámetros normados tanto sus diámetros externo como sus espesores. Para esto se consideró la norma ASME B36.10M (ASME, 2015), la cual indica los valores de los diámetros nominales, los diámetros externos y los espesores para los distintos schedules. La norma entrega una gran cantidad de diámetros con distintos espesores, pero para efectos del modelo se limitaron los diámetros a los cuales puedan transportar un caudal igual a 3500 [l/s].

Con lo mencionado anteriormente presenta la siguiente tabla, donde se indican los diámetro nominal tanto en pulgadas (") como en milímetros (mm) de los diámetros utilizados en el modelo:

Tabla 3.1: Diámetros de las tuberías considerados
Fuente: "ASME B36.10M", ASME, 2015

DN ["]	DN [mm]
12	300
14	350
16	400
18	450
20	500
22	550
22	550
24	600
26	650
28	700
30	750
32	800
34	850
36	900
38	950
40	1000
42	1050
44	1100
46	1150

La tabla utilizada de la norma ASME B36.10M se presenta en los anexos A.

A continuación se presenta una figura que ilustra una tubería donde especifica cual es el diámetro externo e interno, el espesor del revestimiento y el espesor de la misma.

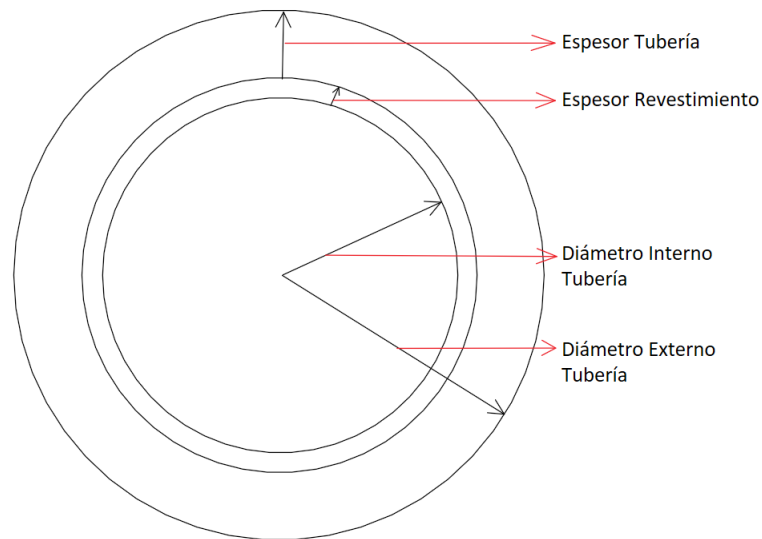


Figura 3.2: Diámetro externo, interno y espesor de una tubería
Fuente: Elaboración propia

Se presenta a continuación la ecuación para el cálculo del diámetro interno de la tubería.

$$d_{int} = d_{ext} - 2 \cdot e_{tub} - 2 \cdot e_{rev} \quad (3.9)$$

Donde:

- d_{ext} [m] = Diámetro externo tubería
- $e_{tubería}$ [m] = Espesor tubería
- e_{rev} [m] = Espesor revestimiento

3.3.3.5. Schedule de la tubería (Sch)

El schedule de la tubería está directamente relacionado con cuánta presión interna puede aguantar la tubería, ya que define el espesor de la tubería. Dentro de los schedules utilizados en el modelo, se consideraron solamente los mencionados en la norma ASME B36.10M (ASME, 2015).

Estos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Schedules de las tuberías considerados.

Fuente: “ASME B36.10M”, ASME, 2015

Schedule (Sch)
5
10
20
30
40
60
80
100
120

Este valor se limita en 120 (valor máximo de la norma), dado que así, las tuberías pueden soportar internamente presiones desde los 800 [mca] hasta presiones superiores a 3000 [mca] y para efectos del modelo, las buenas practicas de ingeniería indican que es recomendable elevar menos de 1000 [mca], lo que está bastante por debajo a las presiones máximas que aguantan las tuberías dentro del modelo.

3.3.3.6. Espesor de la tubería ($e_{tubería}$)

El valor del espesor de la tubería para cada uno de los diámetros seleccionados presentados en la tabla 3.1 se especifica en la norma ASME B36.10M (ASME, 2015), donde en cada uno de los schedules dentro de cada diámetro se especifica el valor del espesor de la tubería. A mayor schedule, el espesor de la tubería es cada vez mayor.

3.3.3.7. Revestimiento de la tubería

El revestimiento interno de la tubería sirve para proteger el acero de la tubería en contra de la corrosión producida por el contacto con el agua salada. Además aumenta la vida útil de la tubería misma. Así mismo, el revestimiento interno de la tubería sirve para reducir el factor de fricción interna que tiene el acero de la tubería, con esto las pérdidas tanto fricciónales como singulares disminuyen. Para efectos del modelo, se consideraron tres tipos de revestimientos distintos, que son los más comunes en Chile, el HDPE, el FBE y finalmente el Poliuretano.

3.3.3.8. Espesor del revestimiento (e_{rev})

El espesor interno dentro de la tubería depende directamente de cada tipo de revestimiento utilizado en el sistema de impulsión. Los valores del espesor de cada revestimiento se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3.3: Espesor de cada uno de los revestimientos utilizados en el modelo
Fuente: Elaboración propia

Revestimiento	Espesor (e_{rev}) [mm]
HDPE	30.480
FBE	0.305
Poliuretano	0.600

Los valores mencionados en la tabla n° 3.3 se tomaron de distintas normas. Para el caso de HDPE este valor se obtuvo de la norma AWWA M55 (AWWA, 2006, p.32), el valor del FBE se tomó de la norma AWWA C213 (AWWA, 2015, p. 6) y finalmente el valor del Poliuretano se adquiere de la norma AWWA C222 (AWWA, 2000, p. 5). Cabe mencionar que el valor de espesor del HDPE depende del diámetro de la tubería, por lo que, para efectos del modelo se tomó un valor aproximado cercano a un diámetro igual a 24 ["].

3.3.3.9. Rugosidad de la tubería (ϵ)

El valor que se considera en la rugosidad de la tubería para el cálculo del factor de fricción, depende del tipo de revestimiento que se utilice en el sistema de impulsión. Los valores de rugosidad de cada revestimiento se presentan a continuación:

Tabla 3.4: Rugosidad de cada uno de los revestimientos utilizados en el modelo
Fuente: Elaboración propia

Revestimiento	Rugosidad (ϵ) [m]
HDPE	$1.524 \cdot 10^{-6}$
FBE	$2.500 \cdot 10^{-5}$
Poliuretano	$1.400 \cdot 10^{-5}$

Los valores mencionados en la tabla n° 3.4 se tomaron de una norma, un estudio realizado y un artículo. Para el caso de HDPE este valor se tomó de la norma AWWA M55 (AWWA, 2006, p.31), el valor del FBE se estableció de una asesoría que solicitó la empresa SQM (Encalada, 2023) y finalmente el valor del Poliuretano se tomó de un artículo llamado “*Extraordinaria protección completa mediante tecnología de recubrimiento integral de poliuretano*” (VolRoll Hydro, 2020).

3.3.3.10. Velocidad del fluido (v)

La velocidad del fluido hace referencia a la velocidad que tiene el agua de mar dentro de sistema de tuberías. Este valor depende directamente de la cantidad de agua a elevar por día, además del diámetro interno utilizado en el sistema de tuberías. La ecuación que se utiliza para su cálculo se muestra a continuación:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot d_{int}^2} \quad (3.10)$$

Donde:

- Q [m^3/s]: Caudal
- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería

3.3.3.11. Carga dinámica total (TDH)

La carga dinámica total, es la altura total a la cual se tiene que impulsar el agua. Esta considera la cota estática que se tiene que elevar además de la suma de las pérdidas tanto singulares como fricciónales.

$$TDH = dH_i + h_f + h_s \quad (3.11)$$

Donde:

- dH_i [m]: Cota estática
- h_f [m]: Pérdidas fricciónales
- h_s [m]: Pérdidas singulares

Es la altura a la cual tienen que operar las bombas para llegar a la altura solicitada por trazado, considerando las pérdidas de presión que se tienen en el sistema de tuberías.

3.3.3.12. Volumen de agua de mar a elevar diariamente (V)

El volumen de agua de mar a elevar diariamente, como bien su nombre lo indica, alude a la cantidad de agua de mar que se tiene que elevar a lo largo de un día. Este generalmente es un dato entregado por los requerimientos de la planta misma y por lo mismo, por el operador de la planta minera.

3.3.3.13. Caudal a elevar (Q)

El caudal de agua de mar a elevar viene directamente del volumen de agua a elevar diariamente, donde al cambiar de unidades se llega a valores de caudal utilizados típicamente. Este para efectos del modelo se mide en [l/s], [m^3/h] y en [m^3/s].

3.3.3.14. Curva de requerimiento del sistema

La curva de requerimiento del sistema es una curva semi-parábólica positiva, donde se gráfica la altura versus el caudal. Esta curva comienza desde la cota estática, donde a medida que el caudal crece se puede ver el efecto que tienen las pérdidas de carga. A continuación se presenta una imagen que representa gráficamente la curva de requerimiento del sistema.

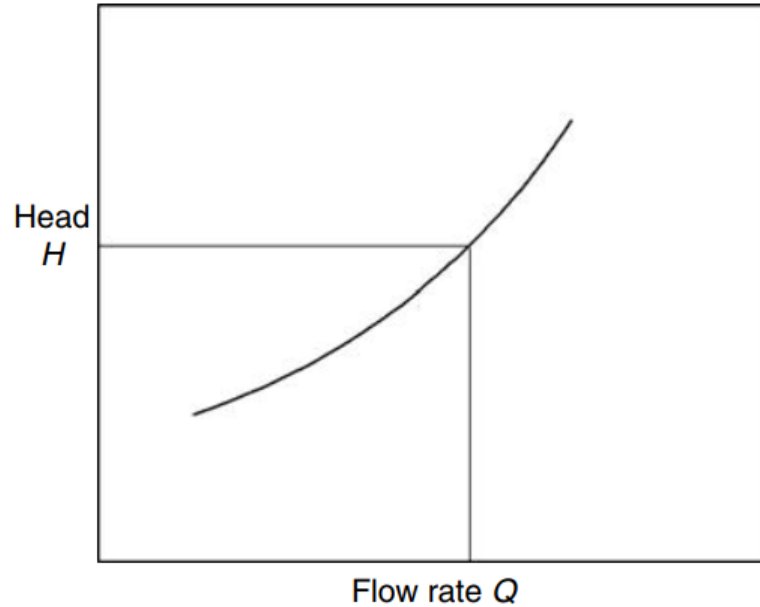


Figura 3.3: Ejemplo de una curva característica de requerimiento del sistema
Fuente: “*Piping Calculation Manual*”, E.Sashi, 2005

La siguiente ecuación, es la ecuación que se utiliza para graficar la curva característica de requerimiento del sistema, la cual proviene de una igualación de de la ecuación de Bernouilli:

$$\begin{aligned}\Delta H &= dH_i + h_s + h_f \\ \Delta H &= dH_i + 0.1 \cdot h_f + h_f \\ \Delta H &= dH_i + 1.1 \cdot h_f \\ \Delta H &= dH_i + \alpha \cdot Q^2\end{aligned}\tag{3.12}$$

Donde:

- dH [m]: Altura a elevar
- dH_i [m]: Altura a elevar por trazado
- Q [m^3/h]: Caudal
- α [s^2/m^5]: Factor por pérdidas
- h_f [m]: Pérdidas friccionales
- h_s [m]: Pérdidas singulares

Donde para el cálculo de α se utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{1.1 \cdot 8 \cdot f \cdot L}{d_{int}^5 \cdot \pi^2 \cdot g} \quad (3.13)$$

Donde:

- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería
- g [m/s^2]: Gravedad
- f [-]: Factor de fricción
- L [m]: Largo de tubería

El factor por pérdidas α toma en consideración las pérdidas de carga tanto friccionales como singulares.

3.3.3.15. Curva característica de la bomba

La curva característica de las bombas centrífugas horizontales es una curva semi-parabólica negativa la cual viene dada por el fabricante de la misma. Esta gráfica la altura de elevación de la bomba en función del caudal de funcionamiento de la bomba. La curva entregada por el fabricante viene dada para ciertas revoluciones por minuto (RPM). Esta se representa como una ecuación cuadrática, de la siguiente forma:

$$dH(Q) = a \cdot Q^2 + b \cdot Q + c \quad (3.14)$$

Donde:

- a , b y c [-]: Factores de la ecuación cuadrática de la curva característica de la bomba

En la siguiente figura, se presenta un ejemplo de una curva característica de una bomba.

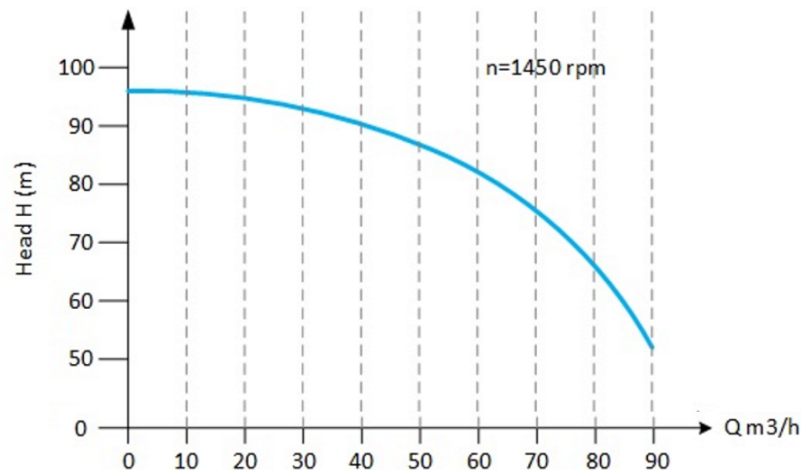


Figura 3.4: Ejemplo de una curva característica de una bomba
Fuente: “*Pump characteristic curve*”, Process Engineer’s Tool, 2023

Para el desarrollo del modelo, se utilizaron bombas de la empresa Ruhrpumpen, donde sus modelos se presentan en los anexos A.

3.3.3.16. Leyes de afinidad

Las leyes de afinidad son tres ecuaciones, donde para el caso del modelo solo se utilizarán dos. Su aplicación se limita al funcionamiento de bombas centrífugas. Estas se presentan a continuación:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{RPM_1}{RPM_2} \quad (3.15)$$

$$\frac{dH_1}{dH_2} = \left(\frac{RPM_1}{RPM_2} \right)^2 \quad (3.16)$$

Donde:

- Q_1 [m^3/h]: Caudal en un punto 1 de la curva característica de la bomba
- Q_2 [m^3/h]: Caudal en un punto 2 de la curva característica de la bomba
- RPM_1 [RPM]: Revoluciones por minuto de funcionamiento para el punto 1
- RPM_2 [RPM]: Revoluciones por minuto de funcionamiento para el punto 2
- dH_1 [m]: Altura en un punto 1 de la curva característica de la bomba
- dH_2 [m]: Altura en un punto 2 de la curva característica de la bomba

El funcionamiento de las leyes de afinidad se ilustra en la siguiente figura:

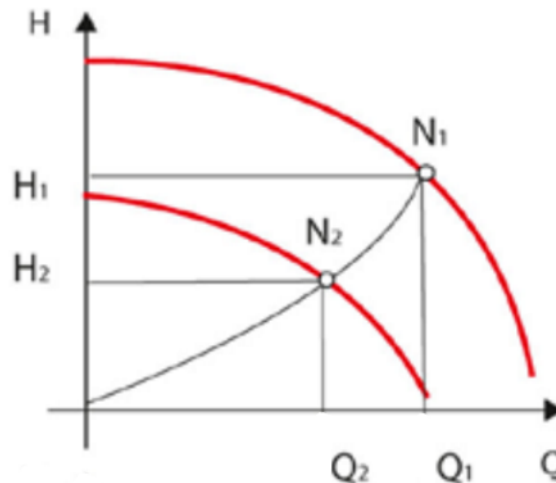


Figura 3.5: Ejemplo del funcionamiento de las leyes de afinidad
 Fuente: “Buenas practicas de eficiencia energética para sistemas de impulsión industrial”, GIZ, 2014

3.3.3.17. Estación de bombeo

La estación de bombeo es una instalación en donde se genera la impulsión del agua. Para el modelo que se presenta, se modela solamente con una estación de bombeo. Esta está compuesta de 1 a 6 bombas funcionando más una en stand-by por si es que alguna llegara a fallar o en caso de tener que realizar mantenencias a un equipo. Este número de bombas presentes en la estación de bombeo se debe principalmente al espacio utilizado por cada bomba dentro de la estación de bombeo, a mayor número de bombas, más grande debe ser la estación de bombeo. Además, el costo de inversión inicial que implica cada una de las bombas aumenta a mayor número de bombas presentes y también el costo relacionado a las mantenencias de cada equipo. Dado que se tiene más de una bomba, estas se configuran en paralelo, para así aumentar el caudal de funcionamiento del sistema. Cabe destacar que todas las bombas presentes en la estación de bombeo son iguales, esto para optimizar en términos de mantención y piezas de repuesto de las bombas.

A continuación se presenta un ejemplo de cómo funcionan las bombas en paralelo en sistemas de impulsión de agua.

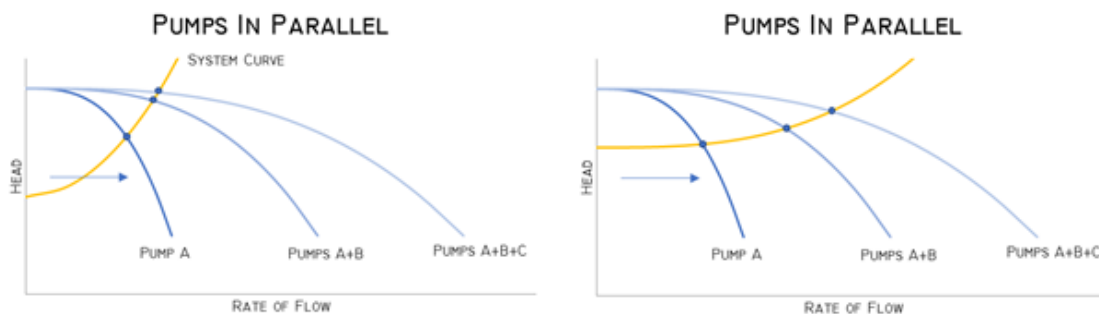


Figura 3.6: Funcionamiento de bombas en paralelo
Fuente: “*Combined Pump & System Curves*”, Engineering Data Library, 2020

Como se puede ver en la figura anterior, la altura de elevación se queda fija para un caudal igual a 0, pero a medida que se agregan bombas en paralelo, el caudal que puede elevar el sistema es mayor.

Se recomienda, por buenas prácticas de ingeniería, que cada estación de bombeo eleve máximo 800 [m.s.n.m], considerando la cota estática más las pérdidas de carga. Esto dado que en caso de tener alturas más grandes, las presiones que se tienen dentro de las tuberías son grandes y provocan que se tengan que utilizar tuberías y piezas especiales en el sistema de tubería con un tamaño superior, lo que complica el traslado e instalación de las mismas. En caso de que se tengan alturas más grandes, conviene instalar una estación de bombeo extra en el trazado.

3.3.3.18. Caudal y altura de operación del sistema

El caudal y altura de operación del sistema son como su nombre lo indica, la carga dinámica total y el caudal al cual se tiene que operar para impulsar el caudal de agua deseado desde el punto inicial hasta el final. Además se tiene la curva de requerimiento del sistema y finalmente la curva característica de la bomba, con esto se utilizan las leyes de afinidad y un variador de frecuencia, el cual está dentro de la estación de bombeo, para hacer que la bomba funcione en el punto de operación del sistema. Para la determinación de a cuántas RPM tiene que funcionar la bomba para llegar al punto solicitado conociendo la curva para ciertas RPM entregada por el fabricante y el punto de operación, se obtiene la siguiente ecuación para las RPM a la cual se tiene que hacer funcionar la bomba:

$$RPM_2 = \frac{\left(\sqrt{-4 \cdot a \cdot c \cdot Q_{op}^2 + (b \cdot Q_{op}^2) + 4 \cdot c \cdot dH_{op}} - b \cdot Q_{op}\right) \cdot RPM_1}{2 \cdot c} \quad (3.17)$$

Donde:

- a, b y c [-]: Factores de la ecuación cuadrática de la curva característica de la bomba a RPM_1
- Q_{op} [m^3/h]: Caudal de operación del sistema
- dH_{op} [m]: Altura de operación del sistema

A continuación se presenta un ejemplo de cómo se ve el punto de operación del sistema:

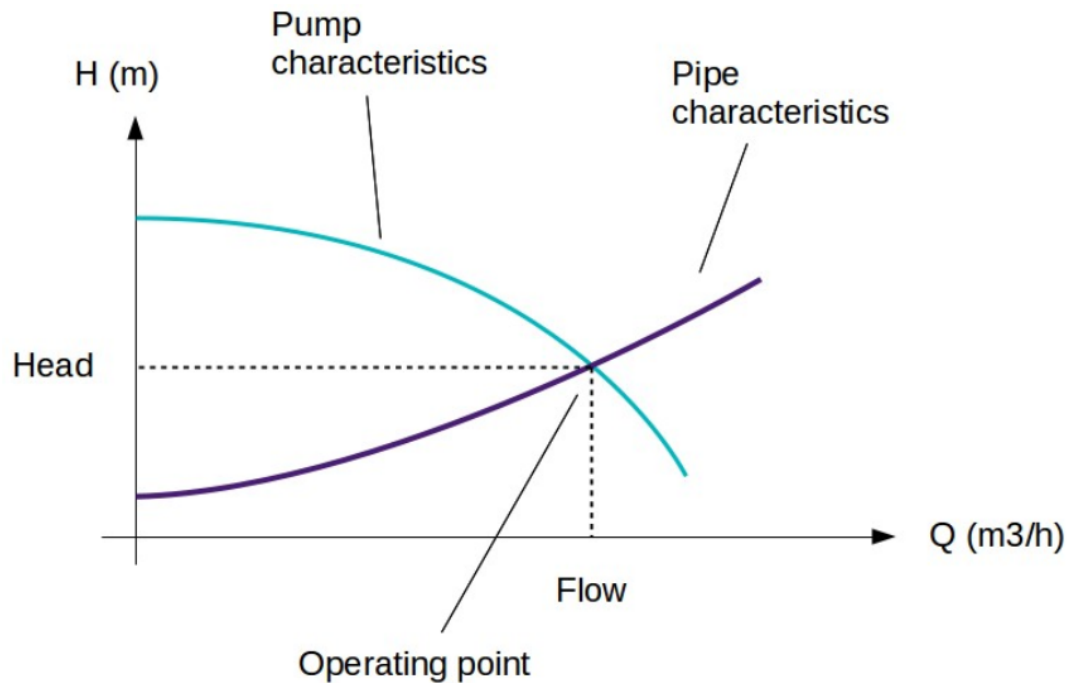


Figura 3.7: Ejemplo gráfico n° 1 de cómo se ve el punto de operación con las curvas de requerimiento del sistema y la característica de la bomba

Fuente: “*Pump characteristic curve*”, Process Engineer’s Tool, 2023

Como se puede ver en la figura n° 3.7 (p. 41), el punto de operación es precisamente donde se intersectan la curva de requerimiento del sistema con la curva característica de la bomba a las RPM requeridas.

Luego, en la siguiente figura se presenta otro ejemplo, en donde se detalla más aún las características de estas gráficas.

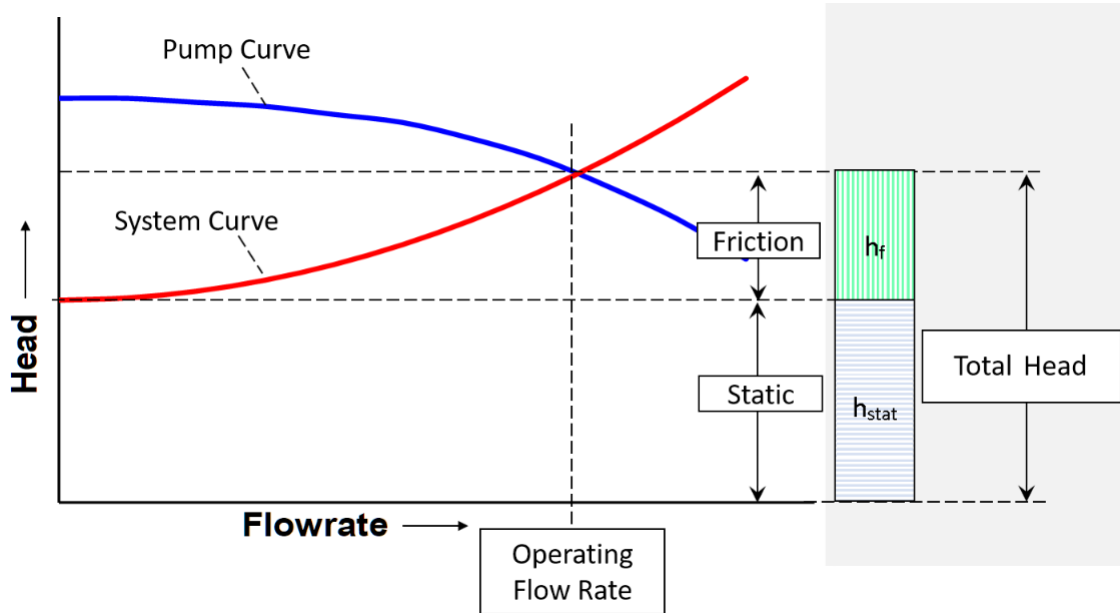


Figura 3.8: Ejemplo gráfico n° 2 de como se ve el punto de operación con las curvas de requerimiento del sistema y la característica de la bomba
Fuente: “*Combined Pump & System Curves*”, Engineering Data Library, 2020

Como se puede apreciar, se tiene que la curva característica de demanda del sistema comienza en la cota estática, y el punto de operación considera las pérdidas de carga dentro de las tuberías.

3.3.3.19. Sobrepresión de Joukowsky ($\Delta H_{joukowsky}$)

Dado que el modelo considera en algunos casos un estado transiente (varía con el tiempo), ya que en algunos casos del modelo, se tiene cierre y apertura de válvulas y/o prendidas y paradas de bombas. Estos cierres o prendidas y paradas, generan una gran presión aguas abajo cuando se realiza de manera repentina. La sobrepresión de Joukowsky cuantifica este aumento que se genera en estos casos. Con el cálculo de esta sobrepresión se logra estimar qué tanto espesor deben tener las tuberías para poder soportar esta carga.

A continuación se presenta el cálculo para estimar esta sobrepresión.

$$\Delta H_{joukowsky} = C \cdot \frac{V}{g} \quad (3.18)$$

Donde:

- V [m/s]: Velocidad del fluido
- C [m/s]: Velocidad de la onda
- g [m/s²]: Gravedad

Se utiliza este método para el cálculo de sobrepresión, dado que es un método de cálculo genérico, no necesita información detallada del sistema de tuberías. Para el cálculo se necesita la velocidad del fluido, diámetro interno de las tuberías, el módulo elástico y la densidad del agua de mar, el módulo de Young del acero y el espesor de las tuberías.

3.3.3.20. Celeridad de la onda (C)

La celeridad de la onda es la velocidad que tiene la onda dentro de la tubería. Esta depende de qué fluido se esta transportando, del material, el espesor y el diámetro interno de la tubería. La ecuación que se utiliza para su cálculo se presenta a continuación:

$$C = \sqrt{\frac{\frac{K}{\rho_0}}{1 + K \cdot \left(\frac{d_{int}}{E \cdot e}\right)}} \quad (3.19)$$

Donde:

- d_{int} [m]: Diámetro interno tuberías
- e [m]: Espesor tuberías
- K [N/m²]: Módulo elástico del agua de mar
- E [N/m²]: Módulo de Young del acero
- ρ_0 [kg/m³]: Densidad del agua de mar

3.3.3.21. Tiempo crítico (t_c)

El tiempo crítico es la cantidad de tiempo que se demora la onda dentro de las tuberías en recorrer el trazado de tuberías de ida y de vuelta. A continuación se presenta la ecuación con la cual se realiza su cálculo:

$$t_c = \frac{2 \cdot L}{C} \quad (3.20)$$

Donde:

- L [m]: Largo tuberías
- C [m/s]: Celeridad de la onda

3.3.3.22. Potencia hidráulica (Pot_{hid})

La potencia hidráulica de la bomba es la relación que existe entre la energía que la bomba le entrega al fluido y el tiempo el cual se demora en entregar esta energía. Para el cálculo de la potencia hidráulica se utiliza la siguiente ecuación:

$$Pot_{hid} = \frac{TDH \cdot Q_{bomba} \cdot \gamma}{1000} \quad (3.21)$$

Donde:

- TDH [m]: Carga dinámica total
- Q_{bomba} [m^3/s]: Caudal por bomba
- γ [N/m^3]: Peso específico del agua

3.3.3.23. Eficiencia hidráulica (η_{hid})

Para el cálculo de la eficiencia hidráulica se necesita inicialmente la curva de eficiencia de la bomba, que la entrega el fabricante, la cual tiene forma de semi-parabola negativa. La eficiencia máxima de la bomba (centrifugas horizontales multietapa) es generalmente 85-87% pero de todas formas, depende de la curva característica que entregue el fabricante. Este indica la cantidad en porcentaje de potencia que se le transmite al fluido en comparación al total que se le suministra directamente al eje de la bomba. Finalmente para su cálculo, se utiliza el caudal la siguiente ecuación:

$$\eta_{hid} = a \cdot Q_{op}^2 + b \cdot Q_{op} + c \quad (3.22)$$

Donde:

- Q_{op} [m^3/h]: Caudal en el punto de operación
- a, b y c [-]: Parámetros de la curva característica de la curva de eficiencia de la bomba

3.3.4. Variables mecánicas

Al igual que para las variables hidráulicas, a continuación se presentan las variables mecánicas utilizadas en el modelo. Nuevamente se detalla la variable en si, su método de cálculo y consideraciones en caso de ser necesario.

- Potencia mecánica
- Eficiencia mecánica
- Presión interna máxima en tuberías
- Masa tuberías
- Golpe de ariete
- Prendidas y paradas suaves

Se procede a presentar y detallar cada una de las variables mencionadas anteriormente.

3.3.4.1. Potencia mecánica (Pot_{mec})

La potencia mecánica es la capacidad que tiene el motor, para realizar cierto trabajo en una cierta cantidad de tiempo. Para su cálculo se utiliza la siguiente ecuación:

$$Pot_{mec} = \frac{Pot_{hid}}{\eta_{hid}} \quad (3.23)$$

Donde:

- Pot_{hid} [kW]: Potencia hidráulica
- η_{hid} [-]: Eficiencia hidráulica

3.3.4.2. Eficiencia mecánica (η_{mec})

La eficiencia mecánica es la cantidad de energía que entrega el equipo en comparación a la cantidad de energía que recibe. Este valor se expresa como porcentaje y para efectos del modelo, dado que se tienen generalmente bombas de grande o mediano tamaño, este valor se establece constante igual a 84 % (Sintech Pumps, 2020).

3.3.4.3. Presión interna máxima en tuberías (P_{max})

La presión interna máxima dentro de las tuberías depende directamente del material de la tubería, para efectos del modelo, se tienen solamente tuberías de acero. Este valor depende también del diámetro externo de la tubería en uso y finalmente de cual el espesor de la tubería, ya que a mayor espesor, mayor presión interna soporta. Para el cálculo de la presión máxima que soporta la tubería internamente se utiliza la siguiente ecuación:

$$P_{max} = \frac{2 \cdot S \cdot e}{d_{ext}} \quad \rightarrow \text{Ecuación de Barlow} \quad (3.24)$$

Donde:

- e [m]: Espesor de la tubería
- S [Pa]: Tensión admisible del acero
- d_{int} [m]: Diámetro interno tubería

Se utiliza este método de cálculo nuevamente dado que es un método de cálculo muy directo, por lo que no se necesita tanta información del sistema de tuberías para su cálculo.

3.3.4.4. Masa tuberías (m)

La masa de las tuberías es la masa total de todo el sistema de tuberías. Para su cálculo, se calcula inicialmente el volumen de acero de todo el sistema y se multiplica por la densidad

del acero. La ecuación para el cálculo de la masa total del sistema de tuberías, se presenta a continuación:

$$m = \frac{\pi}{4} \cdot \rho_{acero} \cdot L \cdot e \cdot (2 \cdot d_e - e) \quad (3.25)$$

Donde:

- ρ_{acero} [kg/m³]: Densidad del acero
- e [m]: Espesor tubería
- d_e [m]: Diámetro externo tubería
- d_i [m]: Diámetro interno tubería
- L [m]: Largo total tubería

Esta calcula el área de la tubería y la multiplica por el largo total del trazado, lo que entrega el volumen total de las tuberías, donde finalmente al multiplicar por la densidad del acero, se obtiene el valor total de la masa del acero utilizado en el trazado.

3.3.4.5. Golpe de ariete

El golpe de ariete es un fenómeno hidráulico el cual se provoca principalmente por variaciones en la velocidad de un fluido el cual está en movimiento. *“Este fenómeno consiste en la propagación de ondas de presión y depresión a lo largo de las conducciones, debido a la transformación de energía cinética en energía de presión y elástica”* (Ingeniería de Fluidos, 2023). Estas variaciones de velocidad y por lo tanto el régimen transiente del fluido se generan cuando las bombas de impulsión se encienden y se detienen de forma brusca. Esto provoca cambios de presión los cuales se van propagando a lo largo de todo el sistema de tuberías. Es de suma importancia que se estudie y controle el golpe de ariete dado que en caso de no controlarlo, este puede generar que las tuberías se destruyan, tanto hacia afuera como hacia adentro de las mismas por efectos de sobrepresión o depresión interna. Para controlar el golpe de ariete, las bombas de impulsión se deben iniciar y detener de forma paulatina, generando prendidas y paradas suaves.

3.3.4.6. Prendidas y paradas suaves

Para evitar los efectos del golpe de ariete presente en el sistema de tuberías, se tienen que realizar prendidas y paradas suaves del sistema de bombeo. Esto consiste en prender la bomba con un variador de frecuencia el cual va aumentando su velocidad paulatinamente, para que no se genere ningún cambio brusco en el funcionamiento de sistema. Para realizar una prendida y parada suave se tiene que proceder de la siguiente manera:

- Prendidas suave:
 - Prender cada una de las bombas en la estación de bombeo en un tiempo total igual a 10 veces el tiempo crítico del sistema de tuberías (Garr, 2008, p. 197).

- Paradas suave:
 - Detener cada una de las bombas en la estación de bombeo en un tiempo total igual a 10 veces el tiempo crítico del sistema de tuberías (Garr, 2008, p. 197).

Cabe mencionar que no se evalúa el caso en donde la energía del sistema de impulsión se corte repentinamente.

3.3.5. Variables energéticas

Nuevamente, al igual que en las variables hidráulicas, se presentaran las variables eléctricas utilizadas en el modelo. Donde al igual que antes, se detallará la variable en si, su método de cálculo y consideraciones en caso de ser necesario.

- Potencia eléctrica requerida
- Eficiencia eléctrica
- Potencia eléctrica consumida
- Energía consumida por m^3 por bomba
- Energía consumida por m^3 total

A continuación de detalla cada una de las variables mencionadas.

3.3.5.1. Potencia eléctrica requerida ($Pot_{elec-req}$)

La potencia eléctrica requerida es la cantidad de energía eléctrica por unidad de tiempo que se necesita para el correcto funcionamiento de las bombas de impulsión. Para su cálculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$Pot_{elec-req} = \frac{Pot_{mec}}{\eta_{mec}} \quad (3.26)$$

Donde:

- Pot_{mec} [kW]: Potencia mecánica
- η_{mec} [-]: Eficiencia mecánica

3.3.5.2. Eficiencia eléctrica (η_{elec})

La eficiencia eléctrica es la cantidad en porcentaje de potencia eléctrica requerida que pasa finalmente a ser la potencia eléctrica que se consume en el sistema de bombeo. Para efectos del modelo este valor se fija en 94 %, dado que generalmente se tienen valores iguales a aproximadamente 97 % como se presenta en un artículo llamado “*Eficiencia Energética en Sistemas de Bombeo*” (Hernandez, 2021) y en una tesis llamada “*Diseño de una metodología para la evaluación energética de un equipo electromecánico de bombeo y alocución practica*” (Díaz, 2014, p. 56) y para asegurarse de este valor, se establece un valor más conservador.

3.3.5.3. Potencia eléctrica consumida ($Pot_{elec-con}$)

La potencia eléctrica consumida es la cantidad de energía por unidad de tiempo que realmente se consume en el funcionamiento de las bombas de impulsión. A continuación se presenta la ecuación que se utiliza para su cálculo:

$$Pot_{elec-con} = \frac{Pot_{elec-req}}{\eta_{elec}} \quad (3.27)$$

Donde:

- $Pot_{elec-req}$ [kW]: Potencia eléctrica requerida
- η_{elec} [-]: Eficiencia eléctrica

3.3.5.4. Energía consumida por m^3 por bomba (E_{bomba})

Es la energía que consume una bomba de impulsión por m^3 de agua impulsado. La energía consumida por m^3 por cada una de las bombas, se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{bomba} = \frac{Pot_{elec-con}}{Q_{bomba}} \quad (3.28)$$

Donde:

- $Pot_{elec-con}$ [kW]: Potencia eléctrica consumida
- Q_{bomba} [m^3/h]: Caudal de operación de una sola bomba

Se utiliza una sola bomba ya que el valor de la potencia hidráulica se calculó para una sola bomba, con esto, el valor de la potencia eléctrica consumida también está calculado para una sola bomba, y finalmente para calcular el valor de la energía consumida por m^3 se tiene que dividir por el caudal de funcionamiento de una sola bomba.

3.3.5.5. Energía consumida por m^3 total (E_{total})

Para el cálculo de la energía total consumida por m^3 total de agua se utiliza la siguiente formula, la cual multiplica la energía consumida por m^3 de agua por bomba por la cantidad de bombas que se tienen presentes en la estación de bombeo.

$$E_{total} = E_{bomba} \cdot n^{\circ} Bombas \quad (3.29)$$

Donde:

- E_{bomba} [kWh/ m^3]: Energía consumida por m^3 por bomba
- n° Bombas [-]: Cantidad de bombas funcionando dentro de la estación de bombeo

Este valor es la energía total que se consume por m^3 impulsado de agua de mar.

3.3.6. Contratos de energía

Los contratos de energía son aquellos acuerdos celebrados entre un generador de energía -vendedor- y un comprador de energía. Existen de distintos tipos, y estos conllevan precios distinto dependiendo del contrato. Para efectos del modelo, solo se utilizaron los siguientes contratos; un contrato que permite utilizar energía durante las 24 horas del día, el segundo caso es en donde solo permite utilizar energía durante el bloque solar (bloque B) el cual tiene un horario de funcionamiento desde las 08:00 hasta las 17:59. Y finalmente uno donde se puede utilizar energía durante los bloques no solares (bloques A y C), con un rango horario desde las 18:00 hasta las 07:59.

Cabe mencionar que el bloque A es desde las 23:00 y las 07:59. Y el bloque C es desde las 18:00 y las 22:59.

Para cada bloque se tiene un costo de energía distinto. Para tener un valor aproximado de estos costos, desde la pagina de Licitaciones Eléctricas (Empresas Eléctricas, 2023) se tienen todas las licitaciones que empresas han realizado cada año. A continuación se presentan dos tablas a modo de resumen de las licitaciones de los años 2021 y 2022, donde se detallan en cada caso, el máximo, el mínimo, el primer cuartil, el tercer cuartil y finalmente un promedio de las licitaciones para cada bloque.

Tabla 3.5: Resumen licitaciones energéticas año 2021
Fuente: Elaboración propia

Año 2021						
Bloque	n° [-]	Máx [USD/MWh]	Mín [USD/MWh]	Q_1 [USD/MWh]	Q_3 [USD/MWh]	\bar{x} [USD/MWh]
A	270	83.000	13.320	33.307	50.991	42.608
B	162	83.000	13.320	32.411	37.321	34.850
C	271	83.000	13.320	33.314	51.060	42.745

Tabla 3.6: Resumen licitaciones energéticas año 2022
Fuente: Elaboración propia

Año 2022						
Bloque	n° [-]	Máx [USD/MWh]	Mín [USD/MWh]	Q_1 [USD/MWh]	Q_3 [USD/MWh]	\bar{x} [USD/MWh]
A	53	89.000	37.190	48.800	72.000	57.610
B	44	72.000	25.000	45.531	50.450	47.768
C	50	89.000	37.190	48.725	64.000	55.987

Como se puede apreciar en las tablas n° 3.5 y 3.6 (p. 49), en los dos casos se tiene que el bloque B tiene un costo menor que los otros dos. De esta forma, con los datos de las licitaciones se presenta la siguiente gráfica, la cual muestra gráficamente los resultados anteriormente presentados:

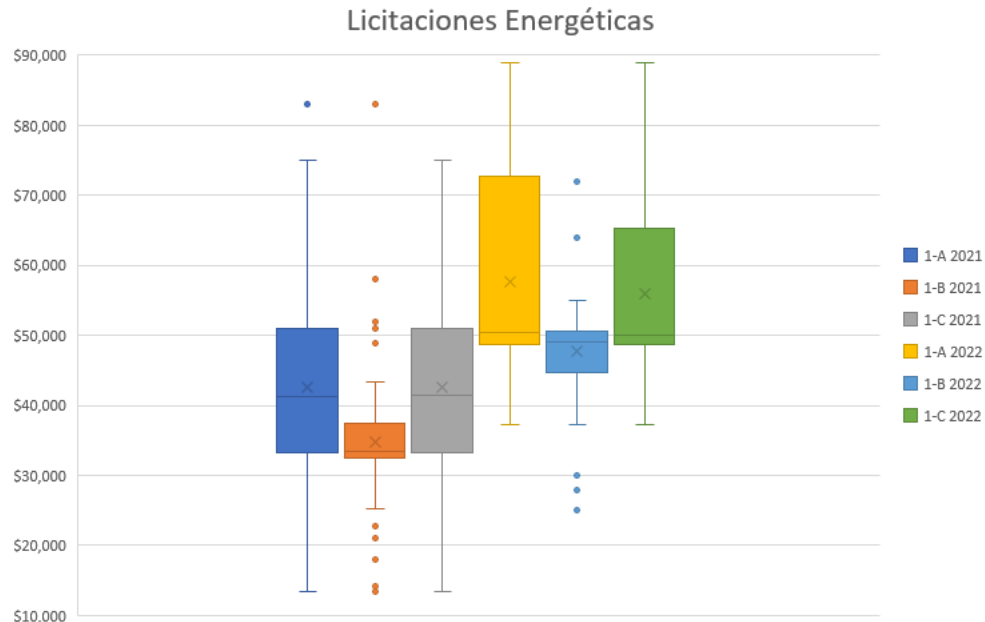


Figura 3.9: Diagrama de caja y bigote de las licitaciones energéticas años 2021 y 2022

Fuente: Elaboración propia

De esta forma, para determinar el costo de cada uno de los contratos, se tiene que realizar una ponderación entre el costo en cada bloque y la cantidad de horas de cada bloque. Esto para cada uno de los años mencionados y finalmente calcular el promedio entre los dos valores de contratos determinados para cada año.

Con esta información se presentan para cada uno de los casos del modelo el valor de los distintos contratos mencionados:

- Contrato para bloques A, B y C: 46.28 [USD/MWh]
- Contrato para bloque B: 41.31 [USD/MWh]
- Contrato para bloques A y C: 49.84 [USD/MWh]

Estas licitaciones son de carácter publico y vienen dadas por fuentes de generación de energías no convencionales.

Los costos de la energía para las empresas privadas no es necesariamente el que se mencionó anteriormente. Dado que esta información es confidencial no se puede referenciar de donde se obtiene la información. Así mismo, la empresa SQM entregó la información de cuales son los costos aproximados para cada uno de los contratos. Estos costos son los siguientes:

- Contrato para bloques A, B y C: 65 [USD/MWh]
- Contrato para bloque B: 35 [USD/MWh]
- Contrato para bloques A y C: 80 [USD/MWh]

Además del costo asociado a cada contrato, se tiene un costo asociado al transporte de la energía comprada. Este valor depende de la distancia de traslado de la energía, pero dado que el modelo es un caso genérico y no necesariamente es fijo, se toma un valor constante igual a 18 [USD/MWh], donde nuevamente fue un valor entregado por la empresa SQM, en cada uno de los contratos.

3.3.7. Criterios utilizados en el diseño del modelo

Para el diseño del modelo se establecen criterios en algunas de las variables mencionadas anteriormente. En la siguiente lista, se presentan todos los criterios de diseño que se consideraron en el modelo de impulsión de agua de mar.

- Velocidad máxima y mínima del agua de mar
- Presión interna máxima tuberías
- Best Efficiency Point (BEP) y Preferable Operating Range (POR)
- RPM mínimas de funcionamiento de las bombas

A continuación se detalla cada uno de los criterios mencionados, y en caso de ser necesario se argumenta el por qué se utiliza este criterio en el modelo.

3.3.7.1. Velocidad máxima y mínima del agua de mar

La velocidad del agua de mar dentro de la tubería se restringe tanto con un límite inferior como superior. El límite inferior se define para que las partículas que pueden existir dentro del agua no depositen en el fondo de las tuberías, además de arrastrar las burbujas de aire que se generan dentro del sistema de tuberías. Por otro lado, el límite superior se establece para que no se generen pérdidas de carga friccional tan elevadas y para aumentar la vida útil tanto del revestimiento interno como del sistema de tuberías. Así, el valor de la velocidad mínima es 0.6 [m/s] (Monge, 2020), mientras que la máxima es 3 [m/s] (Monge, 2020).

3.3.7.2. Presión interna máxima en las tuberías (P_{max})

La presión interna de la tubería se restringe con un valor de presión máximo interno que puede soportar. Si es que se sobrepasan estos límites, las tuberías se dañan y en casos más extremos pueden llegar a reventar. Por esto mismo, a la presión interna de la tubería se le asignan dos criterios. El primer criterio se presenta a continuación:

$$P_{shut-off} < P_{max} \quad (3.30)$$

Donde:

- $P_{shut-off}$ [mca]: Presión de Shut-Off

La presión de shut-off es la presión de la bomba cuando se tiene un caudal igual a 0 [m^3/h].

El segundo criterio para la presión interna de la tubería es el siguiente:

$$TDH + \Delta H_{joukowsky} < P_{max} \quad (3.31)$$

Donde:

- TDH [m]: Carga Dinámica Total
- $\Delta H_{joukowsky}$ [mca]: Sobrepresión de Joukowsky

Esto ya que en caso de que se genere un golpe de ariete dentro de la tubería por prendidas/paradas de las bombas, la tubería soporte el aumento de presión generado.

Cabe mencionar que en casos donde por efectos de prendidas/paradas de las bombas, además de generarse un aumento de la presión dentro de la tubería, también se generan vacíos dentro de la misma. Al igual que antes, estos vacíos pueden generar que la tubería se comprima y esta se rompa hacia el interior de la misma. Para evitar estos casos, dentro del sistema de tuberías se agregan válvulas de venteo. Las cuales tienen características de permitir el ingreso del aire, expulsar aire y expulsar agua en casos que la presión aumente. Dentro de las válvulas de venteo se tienen de 3 tipos, en seguida se definirá cada uno de estas:

- *“Válvula de liberación de aire: un dispositivo hidromecánico diseñado para automáticamente liberar a la atmósfera pequeñas bolsas de aire a medida que se acumulan en puntos altos locales a lo largo de una tubería cuando la tubería o el sistema de tuberías está lleno y opera bajo presión”.*
- *Válvula de aire/vacío: Dispositivo hidromecánico de acción directa, operado por flotador, diseñado para liberar o admitir automáticamente grandes volúmenes de aire durante el llenado o drenaje de una tubería o sistema de tuberías. Esta válvula se abrirá para aliviar las presiones negativas y permanecerá cerrada y no se volverá a abrir para ventilar el aire cuando el sistema esté lleno y bajo presión.*
- *Válvula de aire combinada: un dispositivo que tiene las características de una válvula de liberación de aire y una válvula de aire/vacío” (AWWA, 2007, p. 3).*

Además de esto, la posición de estas es de suma importancia dado que “una ubicación incorrecta puede hacer que la válvula ineficaz” (AWWA, 2001, p. 8).

3.3.7.3. Best Efficiency Point (BEP) y Preferable Operating Range (POR)

El punto de eficiencia máxima de una bomba centrífuga se denomina BEP (Best Efficiency Point). Además de este punto, las bombas presentan una zona preferible para su funcionamiento, la cual se denomina POR (Preferred Operating Range) y se calcula a partir del caudal en el punto del BEP, denominado Q_{BEP} . Así mismo, la zona del POR es entre el 70 % del Q_{BEP} y el 120 % del Q_{BEP} (ANSI, 2012, p. 1). A continuación se presenta una representación gráfica ejemplo del BEP y del POR:

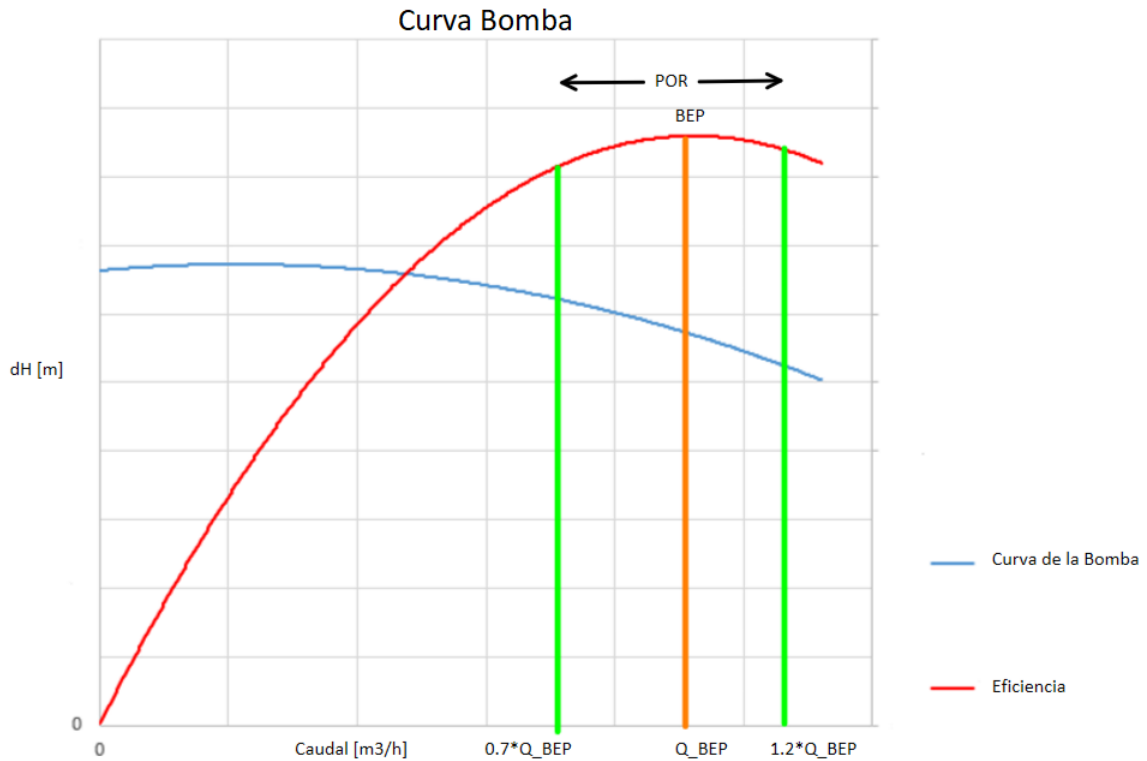


Figura 3.10: BEP y POR en una curva característica de una bomba ejemplo
Fuente: Elaboración propia

En consecuencia, el caudal de operación del sistema, tiene que cumplir al siguiente relación:

$$0.7 \cdot Q_{BEP} < Q_{op} < 1.2 \cdot Q_{BEP} \quad (3.32)$$

Donde:

- Q_{BEP} [m³/h]: Caudal en el punto de eficiencia máximo
- Q_{op} [m³/h]: Caudal en el punto de operación

3.3.7.4. RPM mínimas del funcionamiento de las bombas

La operación de las bombas fuera de sus zonas de operación óptima, genera un gasto excesivo de sus materiales y por lo tanto acorta significativamente la vida útil de la bomba misma. Además de esto, se limita para que no se generen problemas en la refrigeración del motor y para minimizar la cavitación. Para evitar que se genere esto, las bombas centrifugas no pueden operar bajo cierta cantidad de RPM. Así mismo, se establece un valor límite para el funcionamiento de la bomba. Este valor se fija en 15 [Hz], lo que equivale a 900 [RPM] (Garr, 2008, p. 495). Reducir las revoluciones por minuto del funcionamiento de la bomba hace que el caudal nominal en comparación a las RPM predeterminadas de la bomba disminuya aproximadamente un 70 %. Por lo tanto las RPM de operación del sistema tienen que cumplir la siguiente relación:

$$900 < RPM_{op} \quad (3.33)$$

Donde:

- RPM_{op} [RPM]: RPM de la bomba en el punto de operación

Cabe mencionar que este criterio solamente aplica para motores de 4 polos.

3.3.8. Costos asociados al modelo

Finalmente, luego de haber presentado todas las variables que se tienen en el modelo, se presentan los costos que se implementaron en el modelo de un sistema de impulsión de agua de mar.

- Costo energético anual
- Costo total del acero utilizado en las tuberías
- Costo de las bombas centrifugas
- Costo del revestimiento interno de las tuberías
- Costo de la instalación de los equipos (sistema de tuberías, bombas, revestimiento interno)
- Costo del mantenimiento anual de los equipos
- Capex y Opex
- Valor Actual Neto
- Costo final de elevar 1 m^3 de agua
- Key Performance Indicator

A continuación se detalla cada uno de los costos mencionados, donde se presenta su método de cálculo y consideraciones en caso de ser necesario. Cabe mencionar que el costo energético anual es un costo el cual se asocia directamente al costo de operación del proyecto.

3.3.8.1. Costo energético anual ($C_{\text{energetico-anual}}$)

Para el cálculo del costo energético anual se tiene la siguiente ecuación:

$$C_{\text{energetico-anual}} = C_{\text{energia}} \cdot E_{\text{total}} \cdot V_{\text{total}} \cdot 365 \quad (3.34)$$

Donde:

- C_{energia} [USD/kWh]: Costo de la energía
- E_{total} [kWh/ m^3]: Energía total consumida por m^3
- V_{total} [m^3 /día]: Volumen total a elevar diariamente

Lo que finalmente entrega el valor en dólares de cuánto es que se gasta energicamente en un año al impulsar el caudal solicitado a la altura solicitada para el trazado ingresado al modelo.

3.3.8.2. Costo total del acero utilizado en las tuberías (C_{tuberias})

Para el cálculo del precio del acero, se tiene inicialmente que el valor del acero es 2 [USD/kg]. Este valor se obtiene dado que India, el valor del acero es aproximadamente igual a 1.2 [USD/kg], por lo que con el transporte hasta Chile, queda aproximadamente en lo anteriormente mencionado. Con esto se tiene que para el cálculo del costo de las tuberías se utiliza la siguiente ecuación:

$$C_{\text{tuberias}} = 2 \cdot m \quad (3.35)$$

Donde:

- 2 [USD/kg]: Costo del kilo de acero
- m [kg]: Masa total de las tuberías de acero del trazado

Con esto, se obtiene el valor de la inversión de las tuberías para el trazado solicitado. Este costo va asociado a la inversión inicial del proyecto.

3.3.8.3. Costo de las bombas centrífugas utilizadas (C_{bomba})

Para el costo de las bombas centrífugas utilizadas en el modelo, se tiene inicialmente el costo de cada una de las bombas presentes en la estación de bombeo y el n° de bombas presentes. La siguiente ecuación presenta el método de cálculo:

$$C_{\text{bomba}} = C_{\text{bomba}_i} \cdot n^{\circ} \text{Bombas} \quad (3.36)$$

Donde:

- C_{bomba_i} [USD]: Valor de una bomba i
- n° Bombas [-]: Cantidad de bombas presentes en la estación de bombeo

El costo de las bombas centrifugas se asocia a la inversión inicial del proyecto. Donde el costo de cada modelo de bomba, se menciona en los anexos A.

3.3.8.4. Costo del revestimiento interno de las tuberías (C_{revest})

Para determinar el costo del revestimiento interno dentro de las tuberías, se estima a partir del costo total de las tuberías. Este costo se calcula con la siguiente ecuación:

$$C_{revest} = 0.05 \cdot C_{tuberias} \quad (3.37)$$

Donde:

- $C_{tuberias}$ [USD]: Costo total de las tuberías utilizadas

Este valor para la estimación, se obtiene de un artículo llamado “*Evaluation of desalinated seawater vs filtered raw seawater for heap leach copper extraction on mountaintop mines in arid regions*” (P. Goodboy, 2020, p. 12).

3.3.8.5. Costo de la instalación de los equipos ($C_{instalacion-i}$)

Para efectos del modelo, los equipos son las bombas, el revestimiento interno y el sistema de tuberías. Dado que se trata de un modelo, no se puede calcular de forma exacta el valor asociado a la instalación de cada uno de los equipos mencionados. Para esto, se estima el costo de instalación de cada uno de los equipos de la siguiente manera:

$$C_{instalacion-i} = C_{equipo-i} \cdot 0.5 \quad (3.38)$$

Donde:

- $C_{equipo-i}$ [USD]: Valor de adquisición del equipo i (bombas, tuberías o revestimiento interno)

Como se puede ver, la estimación es igual al 50% (Peters, 2002, p. 251) del valor de adquisición de cada uno de los equipos mencionados. Donde el costo de instalación de cada equipo se asocia a la inversión inicial del proyecto.

3.3.8.6. Costo del mantenimiento anual de los equipos ($C_{mantenimiento-i}$)

Al igual que para el caso de la instalación de los equipos, se realiza la estimación de los costos asociados al mantenimiento anual de los equipos con la siguiente ecuación:

$$C_{mantenimiento-i} = C_{equipo-i} \cdot 0.07 \quad (3.39)$$

Donde:

- $C_{equipo-i}$ [USD]: Valor de adquisición del equipo i (bombas, tuberías o revestimiento)

En este caso, el valor del mantenimiento anual corresponde a un 7% (Peters, 2002, p. 273)

del valor de adquisición del equipo. Este costo se asocia directamente al costo de operación del proyecto.

3.3.8.7. Capex y Opex

El Capex y el Opex hacen referencia a la inversión inicial en el proyecto y a los costos de operación del proyecto respectivamente. Para cada uno de estos se presenta a continuación que considera cada uno.

- Capex:
 - Valor de las tuberías
 - Valor de las bombas
 - Valor del revestimiento interno de las tuberías
 - Valor de instalación de cada equipo
- Opex:
 - Valor de la energía consumida
 - Valor de la mantención anual de los equipos presentes en el modelo

Luego, considerando todos estos valores, se calcula cuanto se gasta en el año 0 (de inversión) y en los años siguiente. Estos proyectos tienen una vida útil de 20 años (valor entregado por la empresa SQM), el valor asociado a la operación del sistema va a ser constante considerando la energía y las respectivas mantenciones anuales.

3.3.8.8. Valor Actual Neto (VAN)

Con lo presentado en el Capex y Opex, se calcula el VAN (Valor Actual Neto) el cual representa los gastos de inversión que se realizarán durante los próximos 20 años, traído a un valor actual. El Valor Actual Neto se calcula con la siguiente ecuación:

$$VAN = I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_n}{(1+k)^t} \quad (3.40)$$

Donde:

- F_n [USD]: Flujo de caja en el periodo n
- I_0 [USD]: Inversión inicial en el año 0
- n [años]: n° de periodos
- k [%]: Interés en la inversión

Donde para efectos del modelo, se utiliza una vida útil del proyecto de 20 años y una tasa del 7%, valor entregado por la empresa SQM.

3.3.8.9. Costo final de elevar 1 m^3 de agua (CF)

Para el cálculo del costo final de elevar 1 m^3 de agua, se calcula a partir del Capex y del Opex anual. Dado que el proyecto se calcula para 20 años, el costo final se obtiene con la siguiente ecuación:

$$CF = \frac{(Capex + 20 \cdot Opex)}{20 \cdot 365 \cdot V} \quad (3.41)$$

Donde:

- Capex [USD]: Costo total de la inversión inicial del proyecto
- Opex [USD/año]: Costo anual operacional del proyecto
- V [m^3 /día]: Volumen a elevar diariamente

3.3.8.10. Key Performance Indicator (KPI)

El KPI se utiliza para la comparación de los proyectos. Dado que todos los proyectos tienen una naturaleza distinta, como puede ser el caudal de operación, la altura a elevar o el largo total del trazado de impulsión, este indicador entrega un valor el cual permite realizar comparaciones entre proyectos con distintas características. Este se calcula con la siguiente ecuación:

$$KPI = \frac{CF \cdot 10^9}{L \cdot dH_i} \quad (3.42)$$

Donde:

- CF [USD/ m^3]: Costo final de elevar 1 m^3 de agua
- L [km]: Largo total del trazado
- dH_i [km]: Cota estática

Capítulo 4

Metodología

Para comenzar, la metodología que se utilizó para el desarrollo del modelo es la siguiente:

- Determinación y cálculo de las variables presentes en el modelo de impulsión de agua de mar
- Desarrollo de un modelo de impulsión de agua de mar
- Modelamiento de proyectos reales
- Modelamiento de proyectos modificados
- Análisis de sensibilidad del modelo

Así mismo, se establece inicialmente cuáles serán los inputs del modelo y cuáles serán las variables que iterarán en el modelo. Los inputs del modelo son las variables de entrada del modelo, es la información que necesita el modelo para su funcionamiento. Dentro de los inputs del modelo se tienen, el las coordenadas del trazado (latitud, longitud y elevación de cada punto) y el caudal a elevar diariamente. Luego las variables que se iterarán en el modelo -en adelante, variables iterativas, son, el diámetro nominal de las tuberías, el schedule de las tuberías, la cantidad de bombas presentes en la estación de bombeo, el modelo de bomba presente en la estación de bombeo y finalmente el tipo de revestimiento interno.

Para efectos del cálculo de las variables del modelo, lo primero que se realizó fue determinar qué variables se deben considerar a la hora de crear un modelo de impulsión de agua de mar. Para esto, se comenzó realizando un trazado estándar en Google Earth, para el cual, se obtuvieron las coordenadas de cada uno de los puntos pertenecientes al trazado (latitud y longitud), para los cuales, con la pagina web GPS Visualizer (GPS Visualizer, 2023), se obtuvieron cada una de las alturas (m.s.n.m) de los puntos mencionados. Luego, utilizando el software Excel, se establece una planilla de cálculos, la cual se realiza de tal forma que esta sea solamente dependiente de los inputs y de las variables iterativas. De esta manera, no hay necesidad de establecer nuevas planillas en caso de que se quiera cambiar el trazado y/o el volumen diario ingresado en el modelo. Así, dentro de la planilla se cambian de coordenadas geográficas (latitud, longitud) a coordenadas UTM. En la planilla de cálculo, se realizó a continuación, el perfil longitudinal del trazado definido con anterioridad con las coordenadas

UTM y la elevación de cada punto. Con el perfil longitudinal y las coordenadas del trazado se calculó la cota estática del trazado con la ecuación n° 3.1 de la sección Cota estática (dH_i) (p. 25), donde esta es la diferencia entre la mayor y la menor altura presente en el trazado. Posteriormente se calculó con los valores de las coordenadas, el largo total del trazado con la ecuación n° 3.2 de la sección Largo del trazado (L) (p. 25). Una vez realizado esto, se obtienen dos variables fundamentales para el modelo, la altura a elevar por trazado (cota estática) y el largo del trazado. Luego, el valor del caudal a elevar se fija en un valor inicialmente de 400 [l/s] donde para efectos del alcance del modelo, este considera solamente caudales de hasta 3200 [l/s] aproximadamente.

Una vez determinada la cota estática, el largo del trazado y el caudal de funcionamiento, se procede a definir los diámetros que se utilizarán en las tuberías del modelo. Se decreta que el material de las tuberías es únicamente el acero. Para esto, en la norma ASME B36.10M (ASME, 2015), se entrega una tabla la cual fija los diámetros nominales, diámetros externos y el espesor de la tubería en cada uno de los casos donde el espesor de la tubería cambie. Para efectos del modelo, se seleccionaron de la norma solamente los diámetros los cuales presentan el schedule de la tuberías y además, los diámetros y espesores los cuales son acordes al caudal máximo establecido. Así mismo, se filtra la tabla entregada en la norma ASME B36.10M (ASME, 2015) y se obtiene finalmente la tabla n° A.1 presentada en los anexos A. Antes de determinar la velocidad del fluido, se decretan los tres tipos de revestimientos internos para las tuberías que se utilizarán en el modelo. Estos materiales de revestimiento son los que se presentan en la sección Revestimiento de la tubería (p. 34). Además de esto, cada revestimiento posee un espesor y una rugosidad distinta. Así, inicialmente se fija un revestimiento de HDPE interno en las tuberías, el cual lleva asociado cierto espesor y cierta rugosidad. De esta forma, se define la planilla tal que al establecer un valor de diámetro nominal y uno de schedule, este busque dentro de la tabla n° A.1 estos valores y entregue directamente el valor del espesor de la tubería y el diámetro externo, con los cuales, con la ecuación n° 3.9 (p. 33) y el valor del espesor del revestimiento, se calcula el diámetro interno de la tubería. Así mismo, se establece inicialmente para el modelo un diámetro igual a 20 ["], con un schedule igual a 30. Luego, con la ecuación n° 3.10 de la sección Velocidad del fluido (v) (p. 36) se determina la velocidad interna del fluido dentro de la tubería para los valores inicialmente establecidos.

Se prosigue determinando el n° de Reynolds, para el cual se utiliza la ecuación n° 3.5 presentada en la sección Número de Reynolds (Re) (p. 30). De esta forma, una vez que se tiene los valores tanto de la velocidad como del diámetro interno del sistema de tuberías, se establecen los valores constantes de la temperatura, de la densidad y la viscosidad dinámica del agua de mar así como se menciona en las secciones Temperatura del agua de mar (T) (p. 26), Densidad del agua de mar (ρ) (p. 26) y Viscosidad dinámica del agua de mar (μ) (p. 27) respectivamente. Con el n° de Reynolds tal como se menciona en las secciones Número de Reynolds (Re) (p. 30) y Factor de fricción (f) (p. 31), se determina tanto el tipo de régimen que presenta el agua como el método de cálculo del factor de fricción. Una vez determinado el n° de Reynolds, el revestimiento interno de las tuberías y el valor de rugosidad del revestimiento, se procede a determinar el factor de fricción dentro de las tuberías con las ecuaciones n° 3.6, 3.8 y 3.7 presentadas en la sección Factor de fricción (f) (p. 31) para los casos donde el fluido esté en régimen laminar, transición y turbulento respectivamente.

Una vez que se calculó el factor de fricción dentro de las tuberías, el largo del sistema de tuberías, la velocidad de fluido, el diámetro interno de las tuberías y se estableció el valor de la gravedad así como se presenta en la sección Gravedad (g) (p. 27), se procedió a calcular las pérdidas tanto friccionales como singulares, con las ecuaciones n° 3.3 y 3.4 respectivamente las cuales se presentan en la sección Pérdidas de carga (h_f y h_s) (p. 29). Una vez realizado esto, se continuó calculando la carga dinámica total para el trazado con la ecuación n° 3.11, la cual se menciona en la sección Carga dinámica total (TDH) (p. 36). Con el valor del TDH se determina el punto de operación del sistema de impulsión. Luego, se procede a graficar la curva de requerimiento del sistema, para la cual se utiliza las ecuaciones n° 3.12 y 3.13 detalladas en la sección Curva de requerimiento del sistema (p. 37), donde para los valores de caudales Q , se comienza desde cero y se aumenta hasta llegar al caudal del punto de operación (volumen diario solicitado). Para estos puntos tanto de caudal como de altura de elevación se realiza una línea de tendencia cuadrática para así obtener la ecuación cuadrática de requerimiento del sistema.

Se continúa determinando la cantidad de bombas que funcionarán dentro del modelo, para esto, tal como se presenta en la sección Estación de bombeo (p. 40), se establece en el modelo, que en cada momento se tiene que tener una bomba en stand-by, por si es que alguna otra llegase a fallar o fuese necesaria la mantención de alguna. Así se define entonces, que dentro de la estación de bombeo se tendrán de 1 a 6 bombas funcionando, con 1 en stand-by. En la figura n° 3.6 de la sección Estación de bombeo (p. 40), se detalla el funcionamiento de las bombas instaladas en paralelo dentro de una estación de bombeo. Lo que se realizó a continuación fue, a partir de los catálogos de bombas entregados por un fabricante de bombas, se parametrizó la curva de cada una de las bombas para así, obtener la ecuación característica de cada una. Un ejemplo de estas curvas se presenta en la sección Curva característica de la bomba (p. 38) en la figura n° 3.4. Luego se define la planilla de tal forma que los valores de funcionamiento de la bomba, su gráfica y por lo tanto el punto de operación del sistema, sea variable a partir del n° de bombas presentes en la estación y del modelo de la bomba, para que de esta forma, el sistema de impulsión cambie cuando el modelo itere el número de bombas presentes y el modelo de bomba presente en la estación. El procedimiento mencionado anteriormente es el mismo procedimiento que se realiza para la curva de eficiencia de la bomba, la cual, igualmente se presenta en el catalogo de la bomba en cuestión. De esta forma, se tiene que tanto la curva de la bomba y la curva de eficiencia de la bomba, dependen de la cantidad de bombas que estén en funcionamiento dentro de la estación de bombeo. Ahora bien, la curva de las bombas no cruza directamente la curva de requerimiento del sistema en el punto de operación determinado anteriormente. Por esto, se parametriza la ecuación de la bomba según la cantidad de bombas que estén funcionando. Y luego, se utilizan las ecuaciones n° 3.15, 3.16 y 3.33 detalladas en las secciones Leyes de afinidad (p. 39) y Caudal y altura de operación del sistema (p. 41) para así obtener el valor de las revoluciones por minutos a las cuales los variadores de frecuencia presentes en la estación de bombeo tienen que ya sea aumentar cómo disminuir las RPM a las cuales funciona la bomba originalmente para que esta curva pase exactamente por el punto de operación. Un ejemplo gráfico de esto se presenta en la figura n° 3.5, la cual se puede visualizar en la sección Leyes de afinidad (p. 39). Con las curvas de requerimiento del sistema y la curva característica del sistema de bombas, se realiza una representación gráfica del punto de operación del sistema, tal cual como se presenta en la figura n° 3.7, visualizada en la sección Caudal y altura de operación del sistema (p. 41).

Luego, se establece el valor del peso específico del agua como se presenta en la sección Peso específico del agua de mar (γ) (p. 27) y se calcula el caudal de agua operado por cada una de las bombas dentro de la estación de bombeo. De esta forma se determina la potencia hidráulica de las bombas en funcionamiento con la ecuación n° 3.21 y la eficiencia hidráulica con la ecuación n° 3.22 las cuales se presentan en las secciones Potencia hidráulica (Pot_{hid}) (p. 44) y Eficiencia hidráulica (η_{hid}) (p. 44) respectivamente. Con estos valores, así como se presenta en la sección Potencia mecánica (Pot_{mec}) (p. 45), se calcula la potencia mecánica con la ecuación n° 3.23 y además el valor de la eficiencia mecánica se fija en 84 % tal como se indica en la sección Eficiencia mecánica (η_{mec}) (p. 45). Así mismo, se continúa calculando la potencia eléctrica requerida con la ecuación n° 3.26 (p. 47), donde la eficiencia eléctrica, así como se menciona en la sección Eficiencia eléctrica (η_{elec}) (p. 47) se fija en 94 % y finalmente se calcula la potencia eléctrica total consumida con la ecuación n° 3.27, tal como se detalla en las secciones Potencia eléctrica requerida ($Pot_{elec-req}$) (p. 47), Eficiencia eléctrica (η_{elec}) (p. 47) y Potencia eléctrica consumida ($Pot_{elec-con}$) (p. 48) respectivamente. Una vez que se calcularon todas las variables mencionadas, se procede a calcular la energía por [m^3] consumida por cada una de las bombas en funcionamiento con la ecuación n° 3.28 y luego se calcula la energía consumida total por [m^3] de agua elevado con la ecuación n° 3.29, estas 2 ecuaciones se encuentran detalladas en las secciones Energía consumida por m^3 por bomba (E_{bomba}) (p. 48) y Energía consumida por m^3 total (E_{total}) (p. 48) respectivamente. Todas las variables mencionadas anteriormente se ingresaron a la planilla de cálculo de tal forma que estas se actualicen a medida que se iteren las variables iterativas.

Una vez realizado lo anterior, se definen las variables de cada uno de los casos a modelar. Estos casos establecidos son cuatro, en-listados a continuación:

- Se impulsa las 24 horas del día.
- Se impulsa durante las 10 horas de mayor impacto energético del bloque energético solar.
- Se impulsa durante la noche a la velocidad mínima de funcionamiento de una bomba o a la velocidad establecida por criterio hidráulico y durante las 10 horas del bloque solar bombear lo faltante.
- Se impulsa a velocidad regulable de una bomba durante la noche y durante las 10 horas del bloque solar bombear lo faltante.

Estos casos se detallan en la sección Casos de funcionamiento del modelo (p. 24).

Una vez definido esto, el proceso mencionado anteriormente se realizó 4 veces, una vez para cada uno de los casos de funcionamiento del modelo. Cabe mencionar que para los casos donde se tiene un caudal variable durante el día y la noche, se realizó el procedimiento dos veces, una para el día y otra para la noche.

A estos 4 casos de funcionamiento del modelo se le agrega correspondientemente los valores de la energía, los cuales se detallan en la sección Casos de funcionamiento del modelo (p. 24). De esta forma, con la ecuación n° 3.34, la cual se puede visualizar en la sección Costo energético anual ($C_{energetico-anual}$) (p. 55) se calculan los costos totales de la utilización de energía dentro del sistema de impulsión. Una vez realizado todo lo anterior, se agregaron a

la planilla todas las variables relacionadas a los costo asociados al sistema. Así mismo, se comienza calculando la masa de acero presente en el sistema de tuberías con la ecuación n° 3.25, detallada en la sección Masa tuberías (m) (p. 45), donde el valor de la densidad del acero se presenta en la sección Densidad del acero (ρ_{acero}) (p. 27). Así, con el valor de la masa total del acero, se calcula, así como se menciona en la sección Costo total del acero utilizado en las tuberías ($C_{tuberias}$) (p. 55), el costo asociado al acero de las tuberías con la ecuación n° 3.35. Para el cálculo asociado al costo de las bombas, el fabricante de la bomba, detalla en su ficha técnica el valor de cada bomba utilizada, por lo que el costo asociado a las bombas presentes en la estación se calcula con la ecuación n° 3.36, la cual se menciona en la sección Costo de las bombas centrífugas utilizadas (C_{bomba}) (p. 55). Asimismo, con la ecuación n° 3.37, la cual se presenta en la sección Costo del revestimiento interno de las tuberías (C_{revest}) (p. 56), se calcula el costo total del revestimiento interno del sistema de tuberías. Luego, se establece que la instalación de cada uno de estos equipos, donde se consideran solamente las bombas, las tuberías y el revestimiento interno, conlleva un valor de instalación, este se calcula con la ecuación n° 3.38, la cual se puede visualizar en la sección Costo de la instalación de los equipos ($C_{instalacion-i}$) (p. 56). Además del costo de instalación, estos equipos mencionados, conllevan un costo asociado a la mantención anual de cada uno de estos, el cual se calcula con la ecuación n° 3.39 presentada en la sección Costo del mantenimiento anual de los equipos ($C_{mantenimiento-i}$) (p. 56). Finalmente, en virtud de lo expuesto, se establece que tanto los costos de los equipos como la instalación de estos, hacen parte del Capex del proyecto mientras que el costo asociado al gasto energético y el de mantención anual de los equipos hacen parte del Opex del proyecto. Así mismo, se procede calculando el VAN, así como se presenta en la sección Valor Actual Neto (VAN) (p. 57), con la ecuación n° 3.40 y el valor del costo final con la ecuación n° 3.41 presentada en la sección Costo final de elevar 1 m^3 de agua (CF) (p. 58).

A continuación, se ingresaron a la planilla de cálculos todas las condiciones que se tiene que cumplir dentro del modelo y por lo tanto los criterios de diseño que se implementaron en el modelo. El primer criterio se presenta en la sección Velocidad máxima y mínima del agua de mar (p. 51) donde se tiene que la velocidad dentro del modelo se limita tanto por un mínimo como por un máximo. El segundo criterio es el de la presión interna máxima dentro de las tuberías, la cual se especifica en la sección Presión interna máxima en las tuberías (P_{max}) (p. 52). Así mismo, se establece nuevamente en la planilla que la presión interna dentro de las tuberías debe ser mayor tanto a la presión de shut-off como a la suma del TDH y la sobrepresión de Joukowsky. Inicialmente, se establece el valor de la tensión admisible del acero tal como se indica en la sección Tensión admisible del acero (S_{acero}) (p. 27), donde con el espesor, el valor de la gravedad y el diámetro externo de las tuberías, se calcula la presión interna máxima dentro de la tubería mediante la ecuación n° 3.24, especificada en la sección Presión interna máxima en tuberías (P_{max}) (p. 45). Para la determinación de la presión de shut-off, esta se encuentra directamente desde la curva característica de la bomba, dado que se tiene cuando $Q=0$. Mientras que para el cálculo de la sobrepresión de Joukowsky se determinó inicialmente la celeridad de la onda, esta se calcula a partir de la ecuación n° 3.19, detallada en la sección Celeridad de la onda (C) (p. 43), donde se establece el valor del modulo de Young del acero así como se menciona en la sección Módulo de Young del acero (E_{acero}) (p. 28), así el modulo elástico del agua de mar tal como se muestra en la sección Módulo elástico del agua de mar (K) (p. 27) y finalmente, con el valor del diámetro interno, la densidad del agua y el espesor de las tuberías. Con la celeridad, la gravedad y el valor

de la velocidad del fluido se determina entonces la sobrepresión de Joukowsky mediante la ecuación n° 3.18, la cual se presenta en la sección Sobrepresión de Joukowsky ($\Delta H_{joukowsky}$) (p. 42). Así mismo, una vez que se tiene el valor de la celeridad, se calcula el tiempo crítico mediante la ecuación n° 3.20, presentada en la sección Tiempo crítico (t_c) (p. 43). Este valor se calcula para luego calcular el tiempo de paradas y de prenda de bombas. El tercer criterio dentro del modelo es el que se presenta en la sección Best Efficiency Point (BEP) y Preferable Operating Range (POR) (p. 53) donde se decreta que el caudal de operación está limitado con un mínimo y con un máximo de su caudal nominal. Finalmente, el último criterio dentro del modelo es la cantidad de RPM mínimas a las cual pueden funcionar las bombas. Esto se detalla en la sección RPM mínimas del funcionamiento de las bombas (p. 54), donde las RPM de operación de las bombas tiene que ser superiores a 900 [RPM]. Finalmente, se establece la planilla de cálculos de tal forma que en caso de que no se cumpla uno o más de estos criterios anteriormente mencionados, al momento donde la planilla calcula el valor del costo final (CF), este entregue la palabra “ERROR”.

A continuación, en la figura n° 4.1 se puede visualizar un diagrama, en el cual se puede ver la relación presentada anteriormente de la mayoría de las variables presentes en el modelo. Donde se detallan las variables iterativas y las consecuencias de realizar el proceso iterativo.

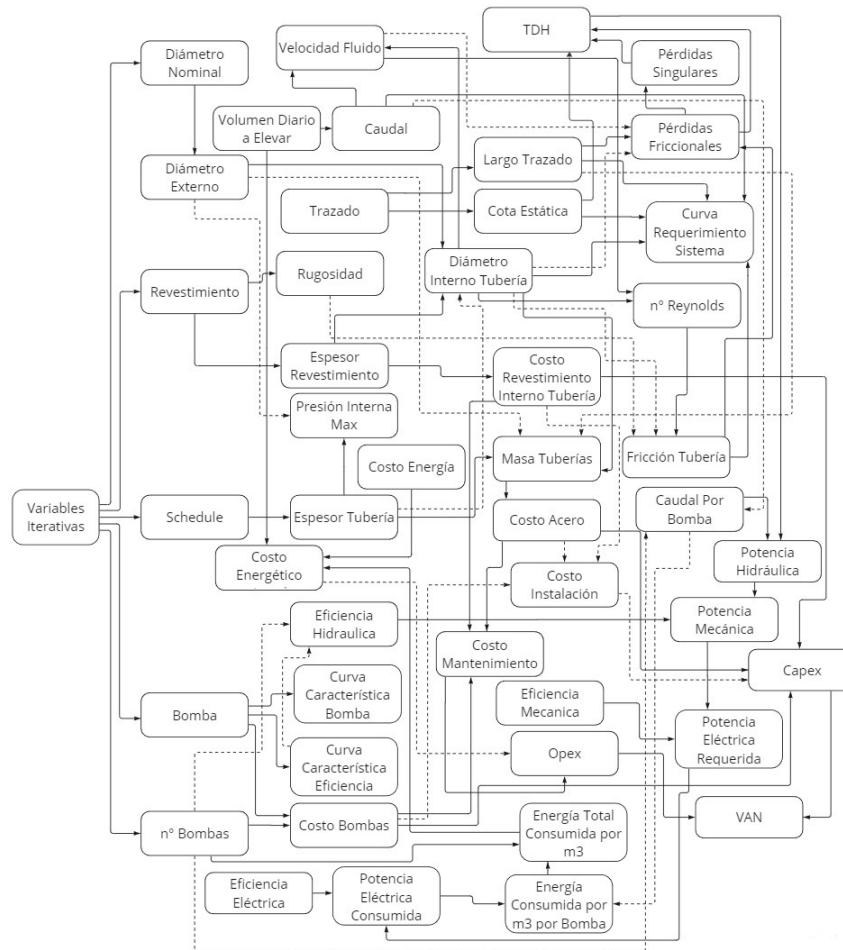


Figura 4.1: Diagrama de relación entre variables
Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado todo lo anterior, se procede a definir el código del modelo. Este código se realizó en el software Jupyter Notebook, en donde se programa con el lenguaje Python. El código escrito se presenta en los anexos. Donde como se puede ver, se comenzó importando todas las librerías utilizadas en el modelo, a continuación se presentan con una breve descripción de cada una:

- *xlwings*: Se utiliza para interactuar de manera automática entre Python y la planilla de cálculos.
- *tkinter*: Se utiliza para crear interfaces gráficas.
- *numpy*: Se utiliza para cálculos numéricos con arrays y matrices.
- *matplotlib*: Se utiliza para crear gráficos de datos.
- *math*: Se utiliza para importar funciones matemáticas, raíces, logaritmos, etc...
- *prettytable*: Se utiliza para crear tablas sencillas.

Luego, el código se establece de tal manera que vez que este se ejecute, le solicite al usuario que indique cual es el nombre de la planilla de cálculo creado anteriormente. Así mismo, el código crea la variable con el nombre de la planilla de datos entregado por el usuario. Una vez que se realizó lo anterior, se define que el código cree 7 variables que son las 7 paginas de la planilla de datos donde se tienen los datos de interés para el código. El código entrega un mensaje el cual indica que la iteración ha comenzado, donde lo primero que realiza es crear 4 listas de las variables iterativas, donde el código toma las listas de un rango de celdas del archivo de la planilla. Estas 4 listas son, los nombres de los modelos de las bombas, los tipos de revestimiento, la cantidad de bombas por estación y el rango de diámetros nominales presentes en el modelo. Posteriormente, el código toma a partir de la planilla de cálculo dos rangos de datos, el largo del trazado y la elevación de cada uno de los puntos, para así graficar el perfil de elevación del trazado. Una vez graficado el perfil de elevación del trazado ingresado, el código entrega un mensaje el cual indica el largo total del trazado y la cota estática del trazado. Así mismo, el código tiene dos funciones principales, la primera se llama como se puede ver en el código presentado en los anexos B, “inicioIteración”, la cual comienza ingresando a la planilla de datos el valor de caudal a elevar y fija un valor estándar del Valor Actual Neto en cada uno de los casos. Luego el código hace que la planilla de cálculos quede en blanco, fijando para todos los casos todas las variables iterativas como espacios vacíos. Luego el código realiza la iteración completa, en cada uno de los 4 casos, donde a medida que los valores de los costo final sean menores que el costo final impuesto inicialmente, el código guarda estas variables hasta el caso en donde se tenga un costo final menor o directamente si ese valor ya es el mínimo costo final que se tiene según esta configuración de caudal y trazado. A continuación, se decreta el código de tal manera que agregue para cada caso en una tabla las configuraciones con las cuales se tiene el menor costo final para cierto caudal, presentando así finalmente el caso donde se tenga el menor costo final. Además de esto, se tiene la función “crearGrafico”, en la cual se ingresan los datos a partir de la planilla de cálculos para que se grafique tanto la curva característica de la bomba, la curva de requerimiento del sistema, el punto de operación y la curva de eficiencia de la bomba.

A continuación, en la figura nº 4.2 se puede visualizar un diagrama, en el cual se puede ver las acciones que realiza el código de Python. Se detalla desde el inicio del programa, todas las acciones y tomas de decisiones que realiza, hasta llegar al final de la iteración.

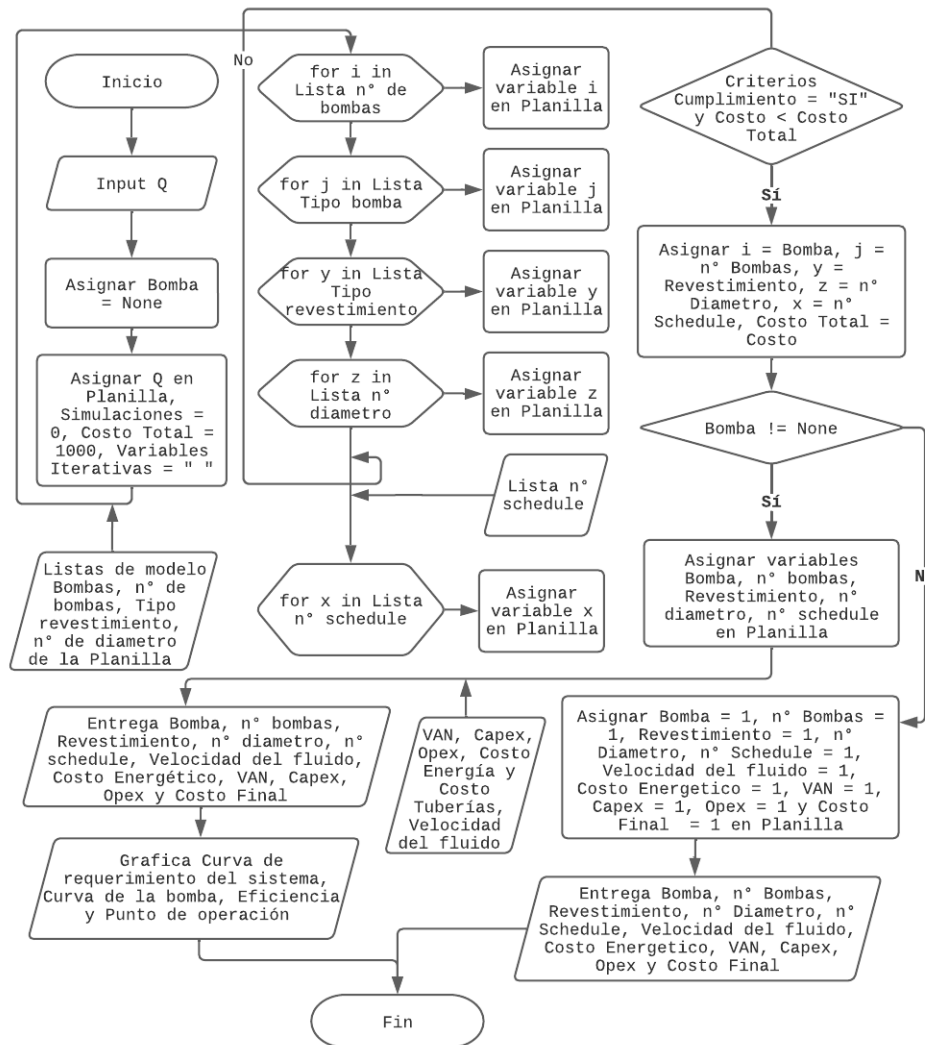


Figura 4.2: Diagrama de flujo del programa

Fuente: Elaboración propia

Una vez realizado el modelo y el código, se procede a modelar los proyectos reales. Estos son 4 proyectos los cuales se detallan en la sección Proyectos reales (p. 68). De esta forma, se modelan los proyectos reales con sus características de diseño y sus trazados.

Asimismo se modelaron los proyectos modificados, tal como se menciona en la sección Proyectos modificados (p. 71), estos son proyectos reales pero a los cuales se le realizaron modificaciones. Inicialmente se modificó el Proyecto Orcoma, el cual originalmente posee dos estaciones de bombeo, donde para la realización de la modelación, ahora solo posee la estación de bombeo nº 1 como estación de bombeo principal. Para el segundo proyecto, se modificó el Proyecto TEA, donde este inicialmente posee una estación de bombeo y para el

modelamiento, se le agregó una segunda estación a la mitad del trazado. Esto con la finalidad de poder comparar las diferencias que se tienen a la hora de tener una estación de bombeo o dos estaciones de bombeo en un trazado.

Para finalizar, así como se indica en la sección Análisis de sensibilidad (p. 72) se realizó el análisis de sensibilidad del modelo. Para su realización, se modeló el tramo completo del trazado del Proyecto TEA. Donde se mantuvieron las características y el caudal del proyecto original. Mientras que se introdujeron variaciones en algunas de las variables más representativas del modelo. Para el desarrollo, los valores de los costos de la energía, los costos del acero y el valor de las pérdidas singulares se aumentaron y disminuyeron en un 10 % para cada modelación. Así, se obtienen 27 modelaciones distintas dado que estas variables pueden estar en un estado alto, uno medio y uno bajo. La manera en la cual se realizó el análisis de sensibilidad, es analizando cada una de las combinaciones posibles dentro de las variables que se presentaron. De esta forma se tendrán casos por ejemplo en donde todas las variables estén en un caso alto, todas en un caso bajo, una en estado alto, otra en medio y la otra en bajo, etc... Con estos resultados se realizaron histogramas para cada uno de los casos del modelo.

Capítulo 5

Descripción de los casos de estudio

En este capítulo se detallarán las características y en algunos casos, modificaciones de los distintos sistemas de impulsión de agua de mar que se modelaron en el desarrollo de la memoria.

5.1. Proyectos reales

Para comenzar, se tienen 4 proyectos reales que fueron modelados. Estos son el Proyecto Orcoma, el Proyecto Tente en el Aire, el Proyecto Inco Minera Los Pelambres y finalmente el Proyecto Planta de Desalinización RT Sulfuros. Para futuras menciones a estos proyectos se les llamará Proyecto Orcoma, Proyecto TEA, Proyecto Los Pelambres y finalmente, Proyecto RT Sulfuros.

Para cada uno de estos, a partir de las EIA se tienen algunas características de los trazados de impulsión de agua que presentan. Estos proyectos se modelaron inicialmente tal cual como se presentan en sus respectivas EIA y DIA. A continuación se presentan las características de cada uno.

5.1.1. Proyecto Orcoma

El proyecto se localiza en la región de Tarapacá, en la comuna de Huara. La información relacionada con el Proyecto Orcoma realizado por SQM se encuentra en su Estudio de Impacto Ambiental (Orcoma, 2015).

A continuación se presenta la ubicación del proyecto y el trazado de este.



Figura 5.1: Ubicación y trazado del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

Este trazado tiene un largo total de 30 [km] aproximadamente y consta de 2 estaciones de bombeo. Para este proyecto se solicita elevar un caudal igual a 200 [l/s] a una altura igual a 1100 [m].

Para este caso, se modeló dos veces. La primera desde la estación de bombeo (EB) n° 1 a la EB n° 2 y la segunda desde la EB n° 2 al punto final de la planta minera, tal como se puede ver en la figura n° 5.1.

5.1.2. Proyecto Tente en el Aire (TEA)

El proyecto se localiza en la región de Tarapacá, más precisamente en las comunas de Iquique y Pozo Almonte. La información relacionada con el Proyecto TEA (realizado por SQM) se encuentra en su Estudio de Impacto Ambiental (SQM, 2017).

En seguida, se presenta tanto la ubicación del proyecto como el trazado desde la estación de bombeo hasta la planta minera.



Figura 5.2: Ubicación y trazado del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

En este caso, la longitud del trazado es de aproximadamente 37 [km], y se solicita elevar un caudal igual a 900 [l/s] a una altura de 900 [m].

Tal como se puede ver en la figura n° 5.2, en esta ocasión se realizó un solo modelamiento, este es el tramo desde la EB n° 1 hasta la planta minera.

5.1.3. Proyecto Minera Los Pelambres

En este caso, el proyecto se desarrolla en la provincia del Choapa, en la comuna de Salamanca. La información relacionada con el Proyecto Los Pelambre, realizado por Antofagasta Minerals, se encuentra en su Estudio de Impacto Ambiental (Illanes, 2016). A continuación, se presenta la ubicación del proyecto y el trazado de este.

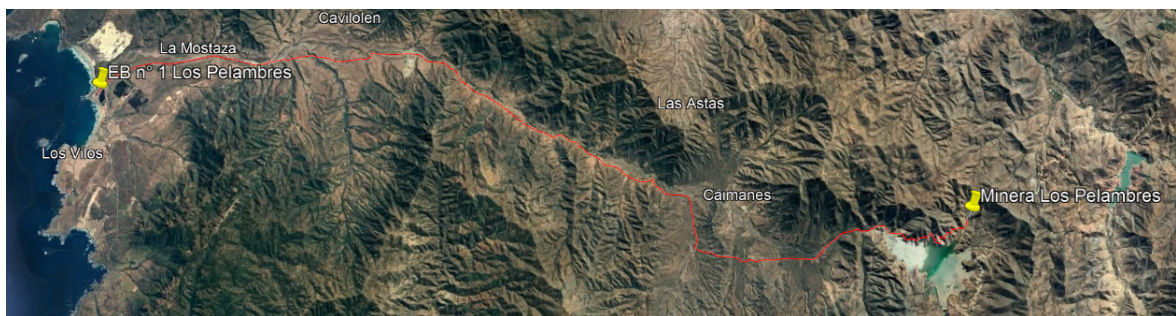


Figura 5.3: Ubicación y trazado del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

En esta situación, se requiere elevar un caudal de 400 [l/s] a una altura aproximada de 1000 [m] por un trazado de aproximadamente 57 [km] de largo.

Al igual que en el caso anterior, como se puede ver en la figura n° 5.3, se tiene una sola estación de bombeo. Por lo que, para este caso, se modeló una sola vez.

5.1.4. Proyecto Planta de Desalinización RT Sulfuros

Finalmente, este proyecto se desarrolla en la región de Antofagasta, en la comuna de Tocopilla y María Elena. La información relacionada con el proyecto Planta de Desalinización RT Sulfuros, realizado por Codelco, se encuentra en su Estudio de Impacto Ambiental (Codelco, 2013) y su Declaración de Impacto Ambiental (Codelco, 2017). A continuación, se presenta la ubicación del proyecto y el trazado del mismo.



Figura 5.4: Ubicación y trazado del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

Por último, en este caso se solicita elevar un caudal de 1956 [l/s] por un trazado de longitud aproximada de 158 [km] a una altura de 3100 [m] aproximadamente.

De esta forma, como se puede ver en la figura n° 5.4, se tienen 4 estaciones de bombeo. Por lo tanto, se modeló 4 veces, correspondientes a los tramos desde la EB n° 1 a la EB n° 2, desde la EB n° 2 a la EB n° 3, desde la EB n° 3 a la EB n° 4 y finalmente desde la EB n° 4 hasta la planta minera.

5.2. Proyectos modificados

Los Proyectos Modificados que se modelaron son proyectos reales pero con ciertas modificaciones realizadas. El primer caso es el Proyecto Orcoma, el cual ahora en vez de tener dos estaciones de bombeo, tendrá una sola al inicio del trazado. Luego, el segundo caso es el Proyecto TEA, que pasa de tener una sola estación de bombeo a tener dos, la segunda aproximadamente a la mitad del trazado. Las otras características del trazado permanecen igual al caso real. Para efectos del desarrollo, se les llamará Proyecto Orcoma modificado y Proyecto TEA modificado.

A continuación se presentan las figuras n° 5.5 y n° 5.6, las cuales ilustran los trazados mencionados que fueron modelados.

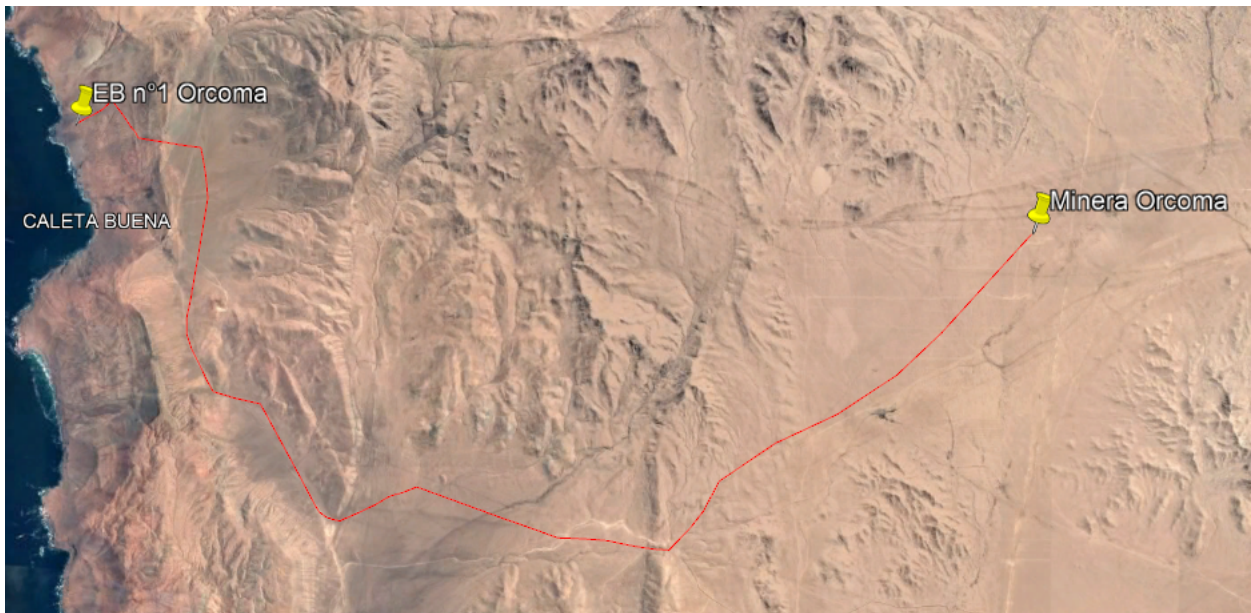


Figura 5.5: Ubicación y trazado del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia



Figura 5.6: Ubicación y trazado del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

5.3. Análisis de sensibilidad

Para el desarrollo del análisis de sensibilidad, se modeló el tramo completo del trazado del Proyecto TEA. En esta instancia, se mantuvieron las características y el caudal del proyecto original sin cambios. Sin embargo, para comprender mejor la influencia de ciertas variables en el resultado final del modelo, se introdujeron variaciones en algunas de ellas.

Las variables que se modificaron son las siguientes, donde se detalla cual es la variación que se le realizó:

- Energía: Los costos de la energía en los distintos bloques (ver la sección Contratos de energía (p. 49)), aumentan y disminuyen en un 10 %.
- Pérdidas Singulares: El valor de las pérdidas singulares del sistema de tuberías, presentado en la sección Pérdidas de carga (h_f y h_s) (p. 29) aumenta y disminuye en un 10 %.
- Costo del acero: El costo por kilogramo de acero en las tuberías aumenta y disminuye (ver la sección Costo total del acero utilizado en las tuberías ($C_{tuberias}$) (p. 55)) su valor en un 10 %.

Una vez que se ha modificado cada una de las variables mencionadas, se procede a modelar nuevamente el tramo del Proyecto TEA, teniendo en cuenta la variación específica de cada variable en el análisis de sensibilidad. Para cada modelación, se obtendrá un nuevo conjunto de resultados que reflejarán cómo el cambio en cada variable afecta el resultado final del proyecto (costo final). Cada vez que se realiza una modelación, se recopilan los resultados, lo que permitirá comparar y evaluar el impacto de las variaciones de cada variable en los resultados.

Capítulo 6

Resultados

En este capítulo se presentan todos los resultados de los distintos sistemas de impulsión de agua, los cuales fueron detallados en el capítulo Descripción de los casos de estudio (p. 68). Cabe mencionar que dentro de los resultados, las representaciones gráficas relevantes de los costos asociados a cada configuración entregada por el modelo, al igual que las curvas de funcionamiento del sistema de bombeo relevantes se presentan en los anexos C.

6.1. Proyectos reales

Se comenzará presentando los proyectos reales que se modelaron, estos son el Proyecto Orcoma, el Proyecto TEA, el Proyecto Los Pelambres y finalmente el Proyecto RT Sulfuros.

6.1.1. Proyecto Orcoma

Para comenzar, se modeló el Proyecto Orcoma, donde como se detalló anteriormente (p. 68) se tienen dos estaciones de bombeo en el trazado.

Los perfiles de elevación de los dos tramos se presentan a continuación en las figuras n° 6.1 y n° 6.2.

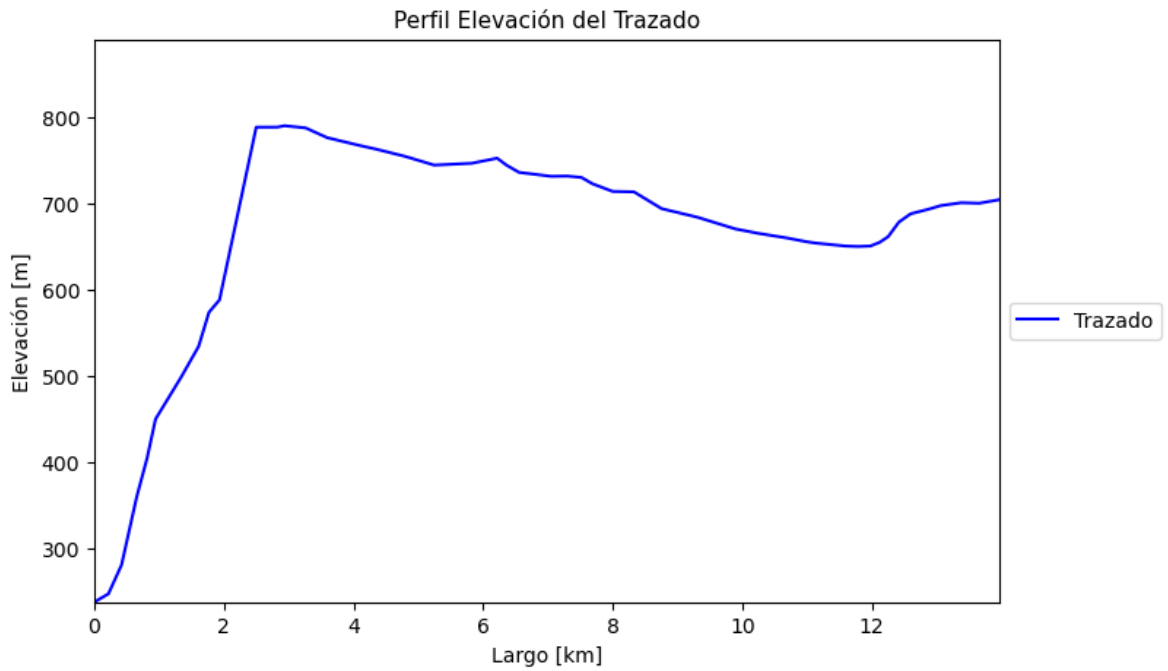


Figura 6.1: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

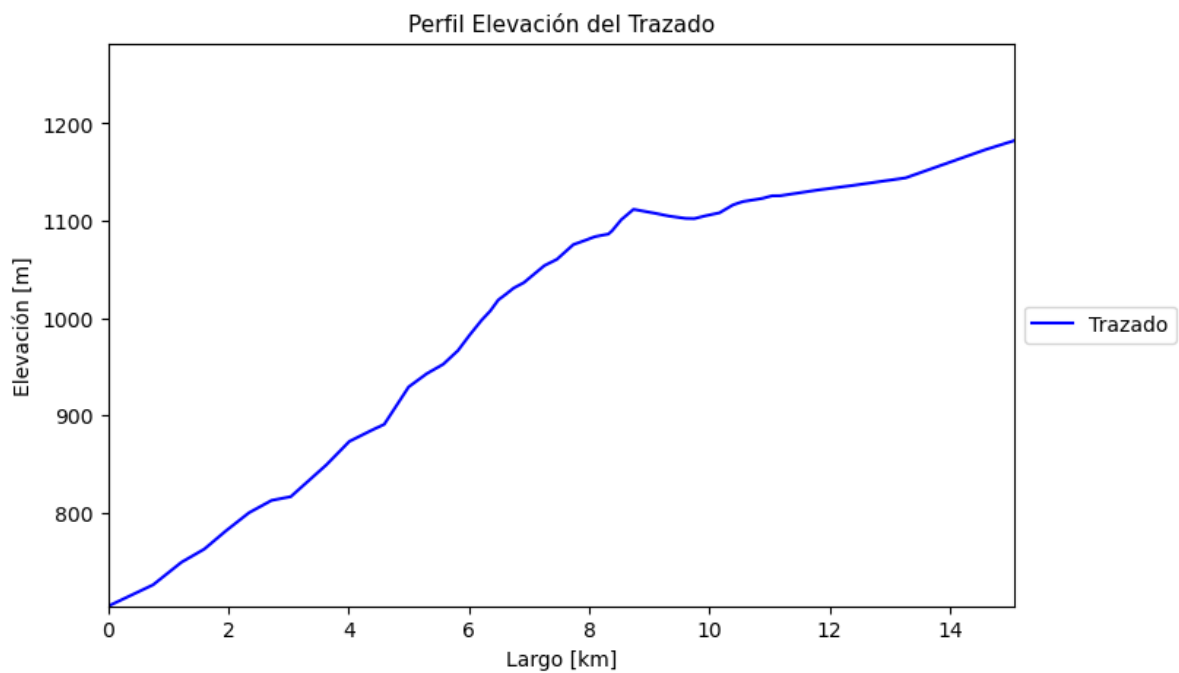


Figura 6.2: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

Los principales resultados del modelo se presentan a continuación, donde se detalla para cada uno de los tramos y para cada uno de los casos modelados la configuración del sistema de impulsión de agua de mar y algunos de los costos asociados (ver tablas n° 6.1 y n° 6.2).

Tabla 6.1: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 1 a EB n° 2			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 5	Bomba 6
n° de bombas	1	1	1	2
Diámetro tuberías ["]	22	26	24	22
Schedule tuberías	10	10	5	10
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	0.836	1.689	0.792	1.066
Precio tuberías [USD]	\$ 1,215,392	\$ 1,652,840	\$ 1,158,424	\$ 1,215,392
Energía [USD/año]	\$ 1,302,731	\$ 827,684	\$ 1,255,311	\$ 1,636,991
VAN [USD]	\$ 18,444,952	\$ 14,323,571	\$ 17,690,151	\$ 23,769,290
Capex [USD]	\$ 3,107,495	\$ 3,717,296	\$ 2,938,575	\$ 4,300,748
Opex [USD/año]	\$ 1,447,747	\$ 1,001,157	\$ 1,392,444	\$ 1,837,693
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.254	\$ 0.188	\$ 0.244	\$ 0.326

Tabla 6.2: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 2 a punto final			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 2	Bomba 8	Bomba 5	Bomba 6
n° de bombas	1	1	1	2
Diámetro tuberías ["]	22	24	22	20
Schedule tuberías	5	10	5	5
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	0.831	1.681	0.943	1.286
Precio tuberías [USD]	\$ 988,564	\$ 1,431,738	\$ 988,564	\$ 897,986
Energía [USD/año]	\$ 1,134,989	\$ 738,693	\$ 1,102,493	\$ 1,456,911
VAN [USD]	\$ 16,134,011	\$ 12,709,644	\$ 15,671,402	\$ 21,114,457
Capex [USD]	\$ 2,750,241	\$ 3,268,174	\$ 2,671,046	\$ 3,800,834
Opex [USD/año]	\$ 1,263,333	\$ 891,208	\$ 1,227,142	\$ 1,634,284
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.222	\$ 0.167	\$ 0.216	\$ 0.289

En el caso del Proyecto Orcoma, dado que este tiene dos tramos modelados, a continuación se presenta la suma de los costos de elevar 1 $[m^3]$ de agua de cada tramo, para cada uno de los casos, para así obtener el precio total de elevar 1 $[m^3]$ de agua del Proyecto Orcoma.

Tabla 6.3: Costo final de elevar 1 m^3 de agua del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Costo final $[USD/m^3]$	\$ 0.476	\$ 0.355	\$ 0.460	\$ 0.615

6.1.2. Proyecto TEA

Así como se modeló el Proyecto Orcoma, ahora se presentan los resultados del modelamiento del Proyecto TEA. Tal como se mencionó anteriormente (p. 68), este proyecto solo cuenta con una estación de bombeo principal al inicio del trazado. La siguiente figura (ver figura n° 6.3), ilustra el perfil de elevación del trazado mencionado.

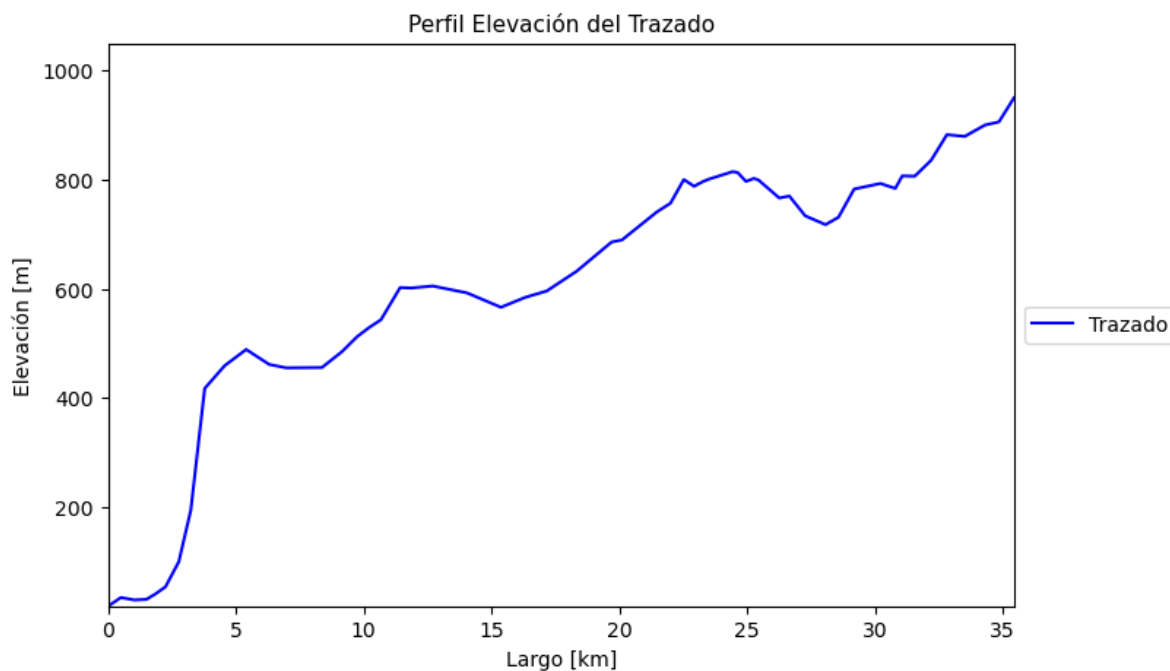


Figura 6.3: Perfil de elevación del trazado del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presentan los resultados del modelamiento del Proyecto TEA en la tabla n° 6.4, donde se detallan las configuraciones del sistema de impulsión de agua y los costo asociados a estas configuraciones en cada uno de los casos del modelo.

Tabla 6.4: Resultados del modelamiento del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

Tramo	Trazado total			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 8	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	2	4	3	3
Diámetro tuberías ["]	36	46	46	42
Schedule tuberías	30	60	40	40
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.423	2.115	1.316	1.691
Precio tuberías [USD]	\$ 12,576,390	\$ 27,216,300	\$ 19,289,910	\$ 17,608,146
Energía [USD/año]	\$ 19,316,881	\$ 25,377,938	\$ 15,530,373	\$ 16,017,851
VAN [USD]	\$237,272,050	\$339,571,577	\$214,925,450	\$216,131,497
Capex [USD]	\$ 21,834,188	\$ 47,321,962	\$ 33,723,826	\$ 31,075,047
Opex [USD/año]	\$ 20,335,810	\$ 27,586,296	\$ 17,104,151	\$ 17,468,020
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.755	\$ 1.055	\$ 0.662	\$ 0.670

6.1.3. Proyecto Los Pelambres

Al igual que para el Proyecto TEA, aquí se tiene una sola estación de bombeo. De esta forma se presenta el perfil de elevación desde la EB n° 1 a la planta minera:

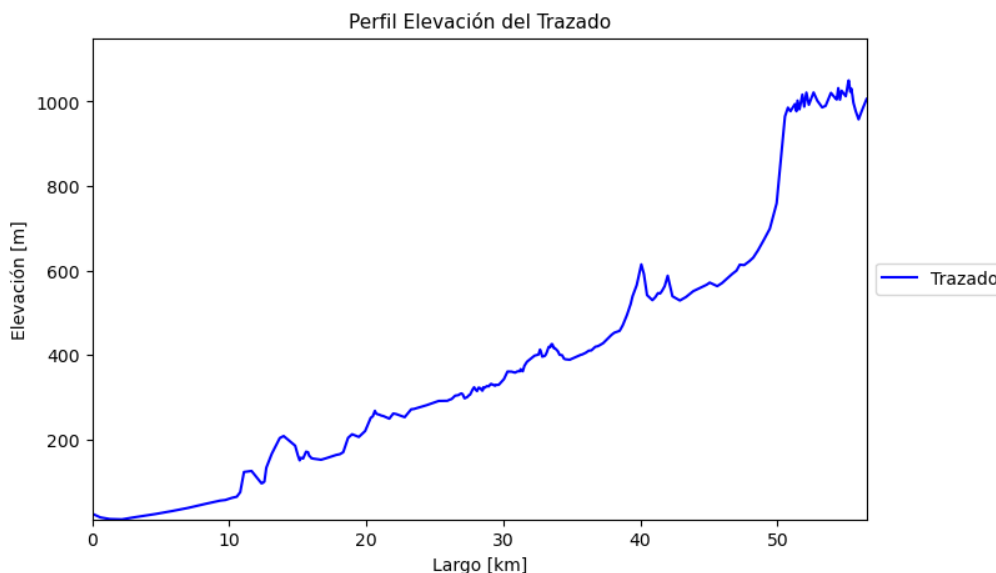


Figura 6.4: Perfil de elevación del trazado del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

Continuando con el desarrollo, se presentan las configuraciones de los sistemas de impulsión de agua en cada caso y algunos de los respectivos costos asociados:

Tabla 6.5: Resultados del modelamiento del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

Tramo	Trazado total			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 8	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 8
n° de bombas	1	2	1	1
Diámetro tuberías ["]	28	34	26	28
Schedule tuberías	20	40	20	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.046	1.708	1.672	0.89
Precio tuberías [USD]	\$12,471,700	\$ 20,834,738	\$10,684,086	\$12,471,700
Energía [USD/año]	\$ 4,854,404	\$ 6,452,395	\$ 4,950,888	\$ 4,842,010
VAN [USD]	\$82,295,863	\$120,724,371	\$79,261,338	\$82,164,554
Capex [USD]	\$20,656,114	\$ 35,042,857	\$17,941,508	\$20,656,114
Opex [USD/año]	\$ 5,818,356	\$ 8,087,729	\$ 5,788,158	\$ 5,805,962
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.543	\$ 0.780	\$ 0.530	\$ 0.542

6.1.4. Proyecto RT Sulfuros

Así como en el Proyecto Orcoma, se tiene en este caso un trazado de impulsión de agua con más de una estación de bombeo, este presenta 4 estaciones.

Dado esto, a continuación se presentan los perfiles de elevación de los 4 tramos del trazado total, desde la EB n° 1 a la EB n° 2, desde la EB n° 2 a la EB n° 3, desde la EB n° 3 a la EB n° 4 y finalmente desde la EB n° 4 a la planta minera (ver figuras n° 6.5, n° 6.6, n° 6.7 y n° 6.8 respectivamente (p. 80 y 81)).

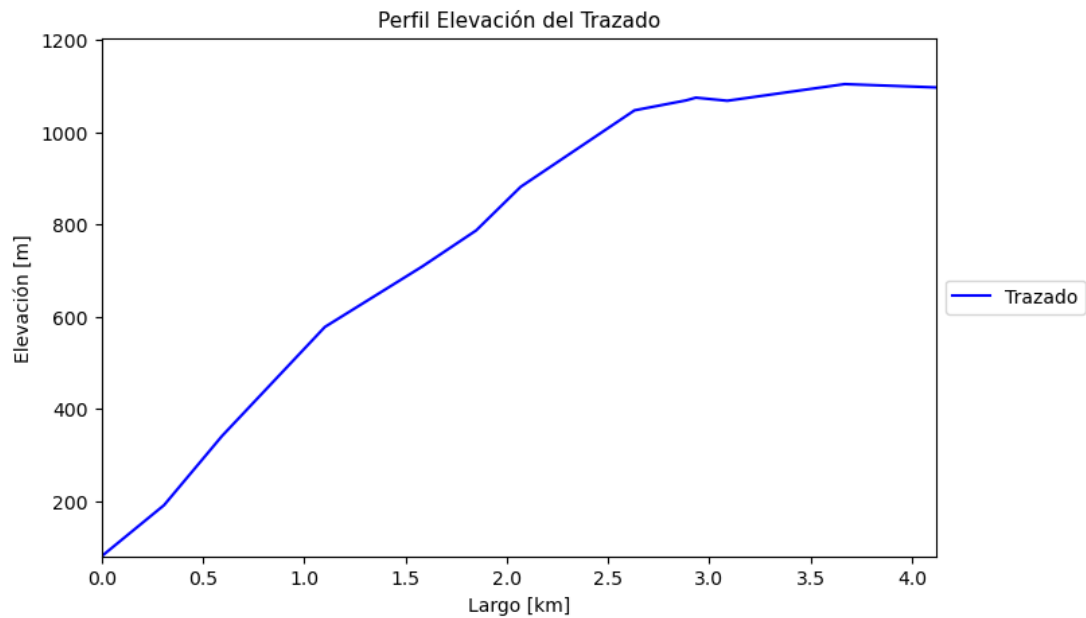


Figura 6.5: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

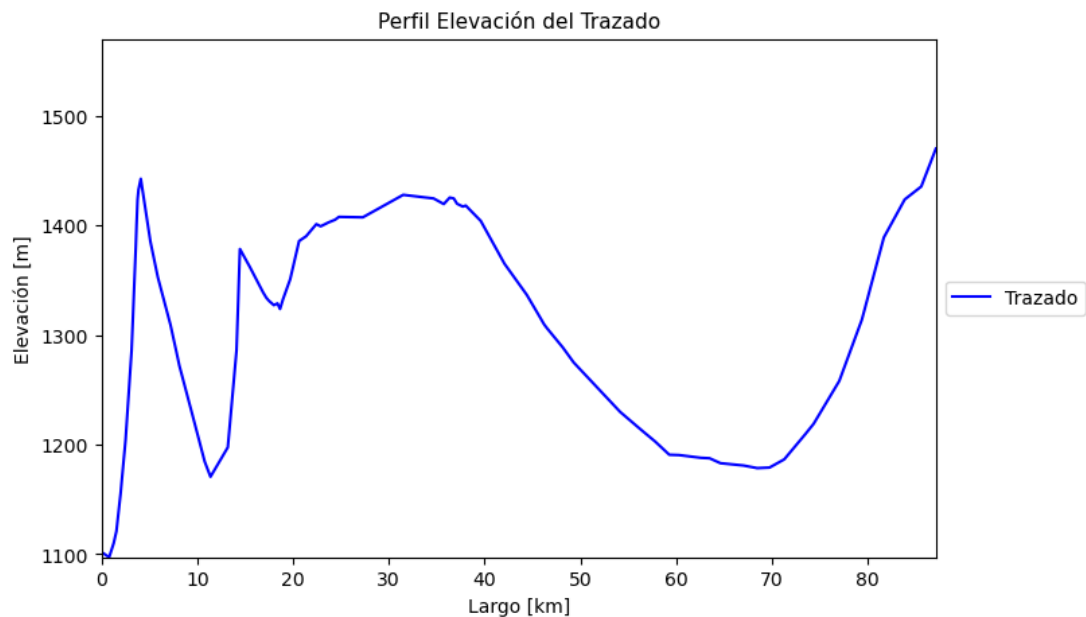


Figura 6.6: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 2 a la EB n° 3 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

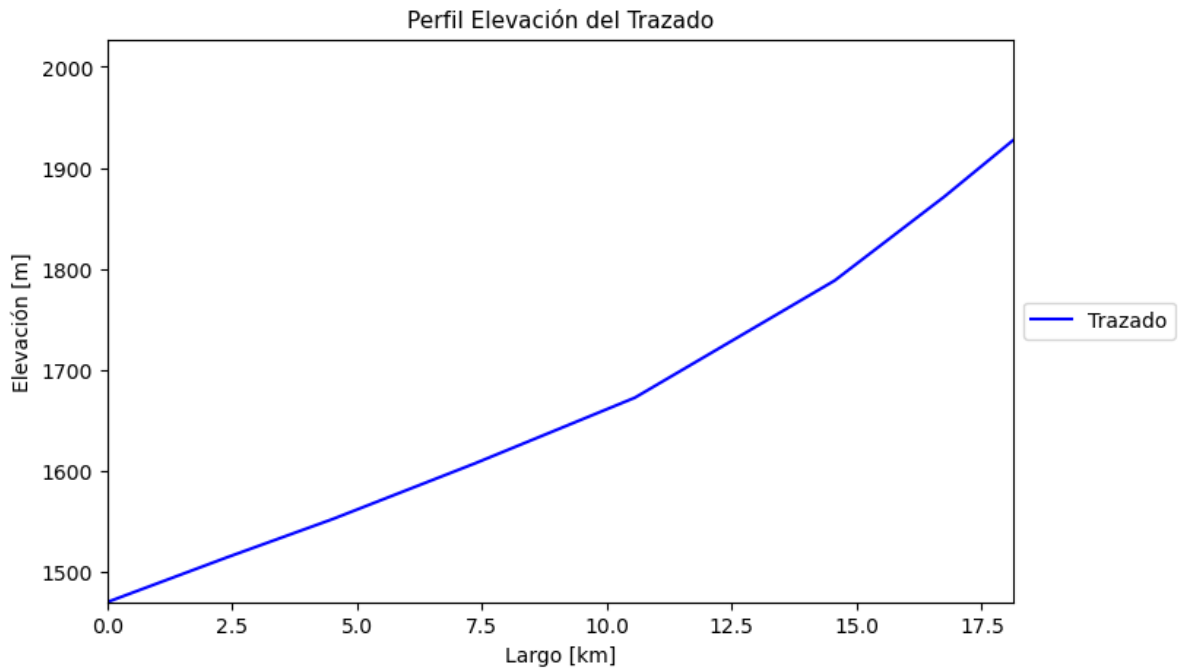


Figura 6.7: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 3 a la EB n° 4 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

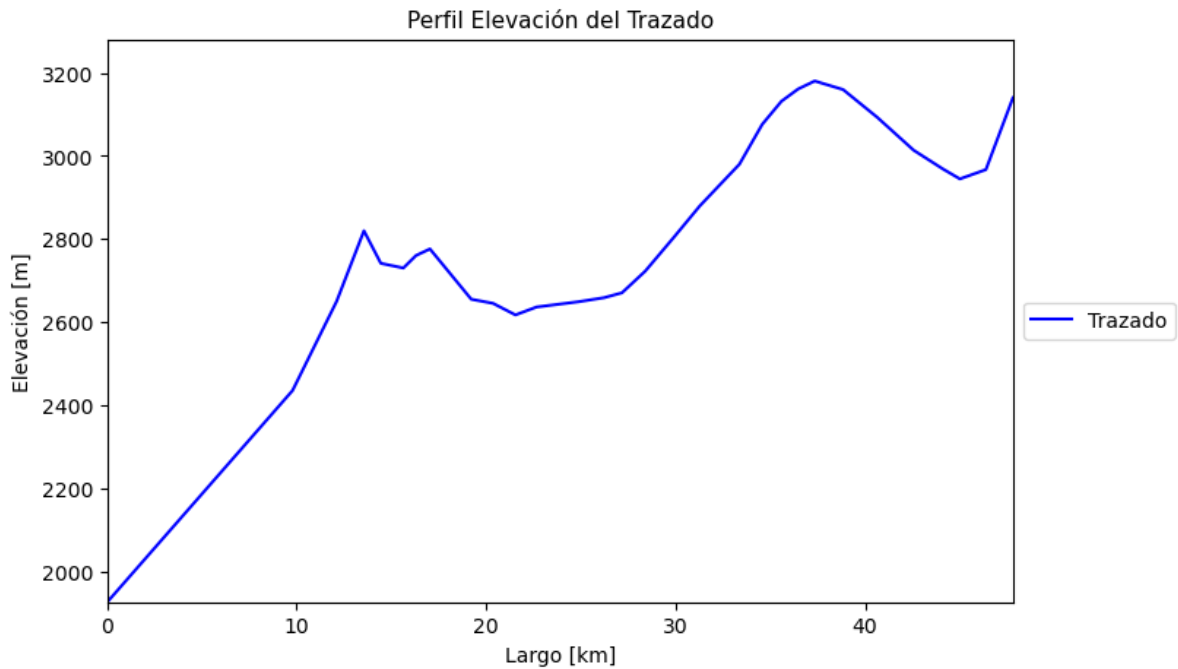


Figura 6.8: Perfil de elevación del tramo desde la EB n° 4 al punto final del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

Luego se presentan en formato de tabla los resultados del modelamiento para cada uno

de los tramos del trazado, donde para cada uno se detalla la configuración utilizada en cada uno de los casos y algunos los costos asociados a esas configuraciones (ver tablas n° 6.6, n° 6.7, n° 6.8 y n° 6.9 (p. 82 y 83)).

Tabla 6.6: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 1 a EB n° 2			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Casos	24/7	N/D	N/D	N/D
Bomba	Bomba 1	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	4	N/D	N/D	N/D
Diámetro tuberías ["]	46	N/D	N/D	N/D
Schedule tuberías	60	N/D	N/D	N/D
Revestimiento tuberías	Poliuretano	N/D	N/D	N/D
Velocidad fluido [m/s]	1.915	N/D	N/D	N/D
Precio tuberías [USD]	\$ 3,161,984	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	\$ 87,544,905	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	\$941,553,628	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	\$ 9,436,415	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	\$ 87,985,271	N/D	N/D	N/D
Costo final [USD/m ³]	\$ 1.434	N/D	N/D	N/D

Tabla 6.7: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 2 a la EB n° 3 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 2 a EB n° 3			
	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Casos	24/7	N/D	N/D	N/D
Bomba	Bomba 1	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	4	N/D	N/D	N/D
Diámetro tuberías ["]	46	N/D	N/D	N/D
Schedule tuberías	20	N/D	N/D	N/D
Revestimiento tuberías	Poliuretano	N/D	N/D	N/D
Velocidad fluido [m/s]	1.873	N/D	N/D	N/D
Precio tuberías [USD]	\$ 35,597,520	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	\$ 45,092,717	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	\$568,156,766	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	\$ 60,522,384	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	\$ 47,917,095	N/D	N/D	N/D
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.826	N/D	N/D	N/D

Tabla 6.8: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 3 a la EB n° 4 del Proyecto RT Sulfuros

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 3 a EB n° 4			
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 1	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	4	N/D	N/D	N/D
Diámetro tuberías ["]	46	N/D	N/D	N/D
Schedule tuberías	20	N/D	N/D	N/D
Revestimiento tuberías	Poliuretano	N/D	N/D	N/D
Velocidad fluido [m/s]	1.873	N/D	N/D	N/D
Precio tuberías [USD]	\$ 7,403,722	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	\$ 41,598,623	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	\$464,781,675	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	\$ 16,117,152	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	\$ 42,350,757	N/D	N/D	N/D
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.700	N/D	N/D	N/D

Tabla 6.9: Resultados del modelamiento del tramo desde la EB n° 4 a la planta minera del Proyecto RT Sulfuros

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 4 a punto final			
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 1	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	4	N/D	N/D	N/D
Diámetro tuberías ["]	46	N/D	N/D	N/D
Schedule tuberías	60	N/D	N/D	N/D
Revestimiento tuberías	Poliuretano	N/D	N/D	N/D
Velocidad fluido [m/s]	1.915	N/D	N/D	N/D
Precio tuberías [USD]	\$ 36,703,070	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	\$ 114,133,195	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	\$1,302,174,665	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	\$ 62,263,625	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	\$ 117,038,831	N/D	N/D	N/D
Costo final [USD/m ³]	\$ 1.948	N/D	N/D	N/D

Dado que se tiene más de una estación de bombeo, se presenta la siguiente tabla (ver tabla n° 6.10), donde se detalla el costo asociado a elevar 1 $[m^3]$ de agua para cada uno de los casos modelados desde la EB n° 1 hasta la planta minera del Proyecto RT Sulfuros.

Tabla 6.10: Costo final de elevar 1 m^3 de agua del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Costo final [USD/ m^3]	\$ 4.907	N/D	N/D	N/D

6.1.5. Síntesis proyectos reales

Para sintetizar la gran cantidad de tablas y de figuras presentadas, se presentan a continuación tablas en forma de resumen (ver tablas n° 6.11, n° 6.12, n° 6.13, n° 6.14, n° 6.15, n° 6.16, n° 6.17 y n° 6.18 (p. 85, 86, 87 y 88)), en las cuales se puede ver para cada tramo modelado en cada uno de los casos, sus configuraciones del sistema de impulsión de agua y algunos de sus costos asociados. Cabe destacar que para una correcta visualización de las tablas, se abreviaron algunas palabras en las tablas. De esta forma se presentan las palabras completas a continuación:

- Orc: Orcoma
- pto final: punto final
- Diam tub: Diámetro tuberías
- Sch tub: Schedule tuberías
- Rev tub: Revestimiento tuberías
- Vel fluido: Velocidad fluido
- Precio tub: Precio tuberías
- Cost fin: Costo final
- RT Sulf: RT Sulfuros

Y las tablas mencionadas:

Tabla 6.11: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso 24/7 Parte 1

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc	Total TEA	Total Los Pelambres
Casos	24/7	24/7	24/7	24/7
Largo [km]	13.963	15.066	35.443	56.510
Cota estática [m]	552	478	931	1039
Caudal [l/s]	200	200	900	400
Bomba	Bomba 2	Bomba 2	Bomba 8	Bomba 8
n° de bombas	1	1	2	1
Diam tub ["]	22	22	36	28
Sch tub	10	5	30	20
Rev tub	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Vel fluido [m/s]	0.836	0.831	1.423	1.046
Precio tub [USD]	\$ 1,215,392	\$ 988,564	\$ 12,576,390	\$ 12,471,700
Energía [USD/año]	\$ 1,302,731	\$ 1,134,989	\$ 19,316,881	\$ 4,854,404
VAN [USD]	\$ 18,444,952	\$ 16,134,011	\$237,272,050	\$ 82,295,863
Capex [USD]	\$ 3,107,495	\$ 2,750,241	\$ 21,834,188	\$ 20,656,114
Opex [USD/año]	\$ 1,447,747	\$ 1,263,333	\$ 20,335,810	\$ 5,818,356
Cost fin [USD/m ³]	\$ 0.254	\$ 0.222	\$ 0.755	\$ 0.543

Tabla 6.12: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso 24/7 Parte 2

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 RT Sulf	EB 2 a EB 3 RT Sulf	EB 3 a EB 4 RT Sulf	EB 4 a pto final RT Sulf
Casos	24/7	24/7	24/7	24/7
Largo [km]	4.118	87.135	18.123	47.797
Cota estática [m]	1024	373	457	1254
Caudal [l/s]	1956	1956	1956	1956
Bomba	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	4	4	4	4
Diam tub ["]	46	46	46	46
Sch tub	60	20	20	60
Rev tub	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Vel fluido [m/s]	1.915	1.873	1.873	1.915
Precio tub [USD]	\$ 3,161,984	\$ 35,597,520	\$ 7,403,722	\$ 36,703,070
Energía [USD/año]	\$ 87,544,905	\$ 45,092,717	\$ 41,598,623	\$ 114,133,195
VAN [USD]	\$ 941,553,628	\$ 568,156,766	\$ 464,781,675	\$ 1,302,174,665
Capex [USD]	\$ 9,436,415	\$ 60,522,384	\$ 16,117,152	\$ 62,263,625
Opex [USD/año]	\$ 87,985,271	\$ 47,917,095	\$ 42,350,757	\$ 117,038,831
Cost fin [USD/m ³]	\$ 1.434	\$ 0.826	\$ 0.700	\$ 1.948

Tabla 6.13: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Solar Parte 1

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc	Total TEA	Total Los Pelambres
Casos	Solar	Solar	Solar	Solar
Largo [km]	13.963	15.066	35.443	56.510
Cota estática [m]	552	478	931	1039
Caudal [l/s]	200	200	900	400
Bomba	Bomba 1	Bomba 8	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	1	1	4	2
Diam tub ["]	26	24	46	34
Sch tub	10	10	60	40
Rev tub	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Vel fluido [m/s]	1.689	1.681	2.115	1.708
Precio tub [USD]	\$ 1,652,840	\$ 1,431,738	\$ 27,216,300	\$ 20,834,738
Energía [USD/año]	\$ 827,684	\$ 738,693	\$ 25,377,938	\$ 6,452,395
VAN [USD]	\$ 14,323,571	\$ 12,709,644	\$339,571,577	\$ 120,724,371
Capex [USD]	\$ 3,717,296	\$ 3,268,174	\$ 47,321,962	\$ 35,042,857
Opex [USD/año]	\$ 1,001,157	\$ 891,208	\$ 27,586,296	\$ 8,087,729
Cost fin [USD/m ³]	\$ 0.188	\$ 0.167	\$ 1.055	\$ 0.780

Tabla 6.14: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Solar Parte 2

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 RT Sulf	EB 2 a EB 3 RT Sulf	EB 3 a EB 4 RT Sulf	EB 4 a pto final RT Sulf
Casos	Solar	Solar	Solar	Solar
Largo [km]	4.118	87.135	18.123	47.797
Cota estática [m]	1024	373	457	1254
Caudal [l/s]	1956	1956	1956	1956
Bomba	N/D	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	N/D	N/D	N/D	N/D
Diam tub ["]	N/D	N/D	N/D	N/D
Sch tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Rev tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Vel fluido [m/s]	N/D	N/D	N/D	N/D
Precio tub [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
Cost fin [USD/m ³]	N/D	N/D	N/D	N/D

Tabla 6.15: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto Solar Parte 1

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc	Total TEA	Total Los Pelambres
Casos	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar
Largo [km]	13.963	15.066	35.443	56.510
Cota estática [m]	552	478	931	1039
Caudal [l/s]	200	200	900	400
Bomba	Bomba 5	Bomba 5	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	1	1	3	1
Diam tub ["]	24	22	46	26
Sch tub	5	5	40	20
Rev tub	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Vel fluido [m/s]	0.792	0.943	1.316	1.672
Precio tub [USD]	\$ 1,158,424	\$ 988,564	\$ 19,289,910	\$ 10,684,086
Energía [USD/año]	\$ 1,255,311	\$ 1,102,493	\$ 15,530,373	\$ 4,950,888
VAN [USD]	\$ 17,690,151	\$ 15,671,402	\$214,925,450	\$ 79,261,338
Capex [USD]	\$ 2,938,575	\$ 2,671,046	\$ 33,723,826	\$ 17,941,508
Opex [USD/año]	\$ 1,392,444	\$ 1,227,142	\$ 17,104,151	\$ 5,788,158
Cost fin [USD/m ³]	\$ 0.244	\$ 0.216	\$ 0.662	\$ 0.530

Tabla 6.16: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto Solar Parte 2

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 RT Sulf	EB 2 a EB 3 RT Sulf	EB 3 a EB 4 RT Sulf	EB 4 a pto final RT Sulf
Casos	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar
Largo [km]	4.118	87.135	18.123	47.797
Cota estática [m]	1024	373	457	1254
Caudal [l/s]	1956	1956	1956	1956
Bomba	N/D	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	N/D	N/D	N/D	N/D
Diam tub ["]	N/D	N/D	N/D	N/D
Sch tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Rev tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Vel fluido [m/s]	N/D	N/D	N/D	N/D
Precio tub [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
Cost fin [USD/m ³]	N/D	N/D	N/D	N/D

Tabla 6.17: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto 24/7 Parte 1

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc	Total TEA	Total Los Pelambres
Casos	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7
Largo [km]	13.963	15.066	35.443	56.510
Cota estática [m]	552	478	931	1039
Caudal [l/s]	200	200	900	400
Bomba	Bomba 6	Bomba 6	Bomba 1	Bomba 8
n° de bombas	2	2	3	1
Diam tub ["]	22	20	42	28
Sch tub	10	5	40	20
Rev tub	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Vel fluido [m/s]	1.066	1.286	1.691	0.89
Precio tub [USD]	\$ 1,215,392	\$ 897,986	\$ 17,608,146	\$ 12,471,700
Energía [USD/año]	\$ 1,636,991	\$ 1,456,911	\$ 16,017,851	\$ 4,842,010
VAN [USD]	\$ 23,769,290	\$ 21,114,457	\$ 216,131,497	\$ 82,164,554
Capex [USD]	\$ 4,300,748	\$ 3,800,834	\$ 31,075,047	\$ 20,656,114
Opex [USD/año]	\$ 1,837,693	\$ 1,634,284	\$ 17,468,020	\$ 5,805,962
Cost fin [USD/m ³]	\$ 0.326	\$ 0.289	\$ 0.670	\$ 0.542

Tabla 6.18: Resumen de las configuraciones y algunos costos asociados para cada tramo en el caso Mixto 24/7 Parte 2

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a EB 2 RT Sulf	EB 2 a EB 3 RT Sulf	EB 3 a EB 4 RT Sulf	EB 4 a pto Fin RT Sulf
Casos	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7
Largo [km]	4.118	87.135	18.123	47.797
Cota estática [m]	1024	373	457	1254
Caudal [l/s]	1956	1956	1956	1956
Bomba	N/D	N/D	N/D	N/D
n° de bombas	N/D	N/D	N/D	N/D
Diam tub ["]	N/D	N/D	N/D	N/D
Sch tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Rev tub	N/D	N/D	N/D	N/D
Vel fluido [m/s]	N/D	N/D	N/D	N/D
Precio tub [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Energía [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
VAN [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Capex [USD]	N/D	N/D	N/D	N/D
Opex [USD/año]	N/D	N/D	N/D	N/D
Cost fin [USD/m ³]	N/D	N/D	N/D	N/D

De esta misma forma se muestra de manera gráfica (ver figuras n° 6.9, n° 6.10, n° 6.11, n° 6.12, n° 6.13 y n° 6.14 (p. 89, 90 y 91)) algunos de los costos asociados a las tablas presentadas anteriormente, donde se separa por costo los distintos tramos modelados en cada uno de los casos.

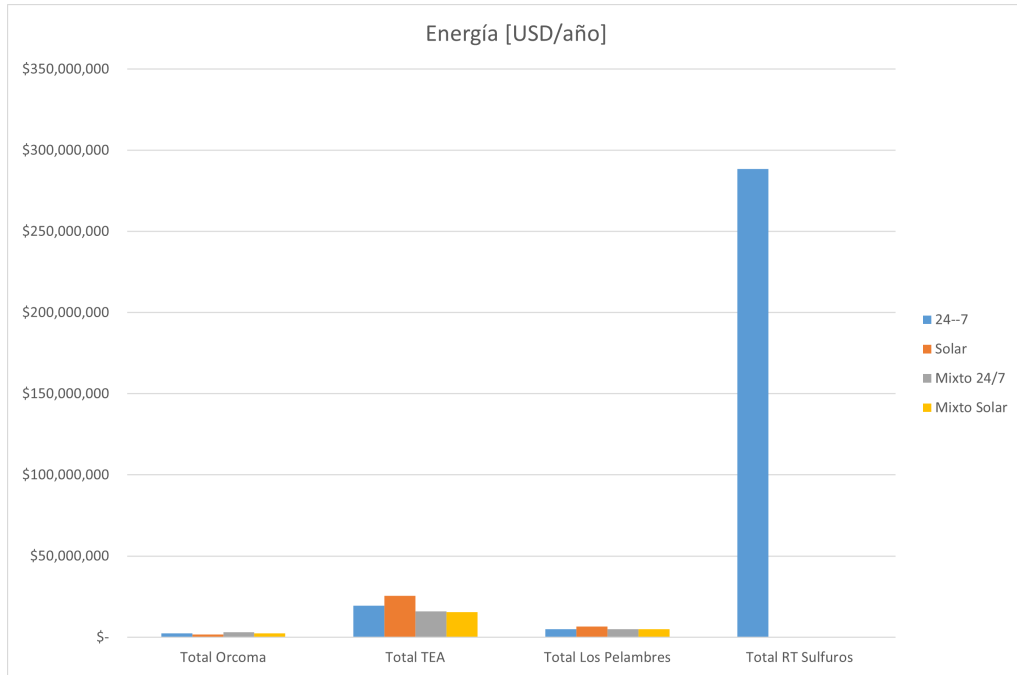


Figura 6.9: Resumen gráfico de los costos energéticos en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales

Fuente: Elaboración propia

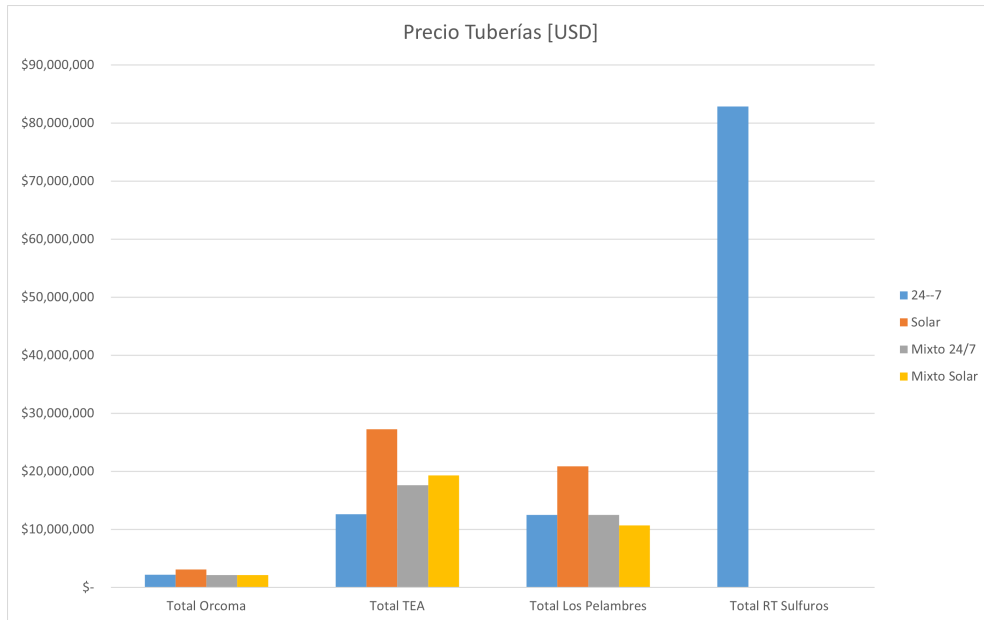


Figura 6.10: Resumen gráfico de los costos de las tuberías en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales

Fuente: Elaboración propia

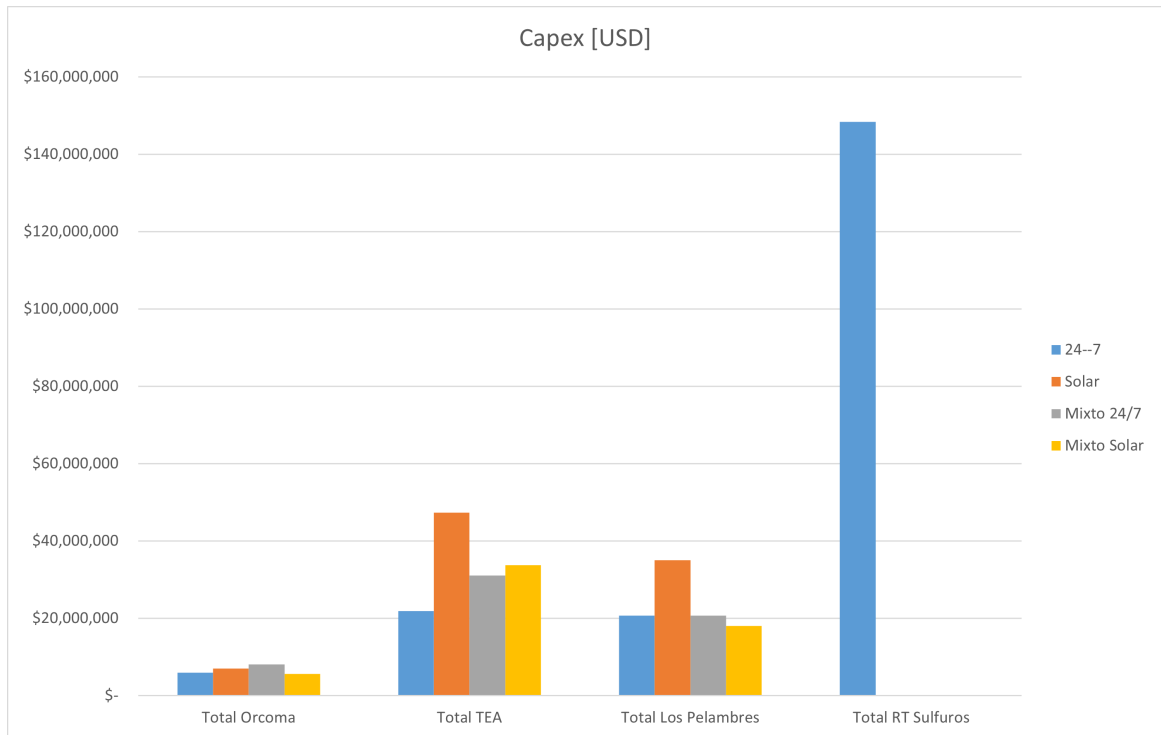


Figura 6.11: Resumen gráfico de los costos de la inversión inicial en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

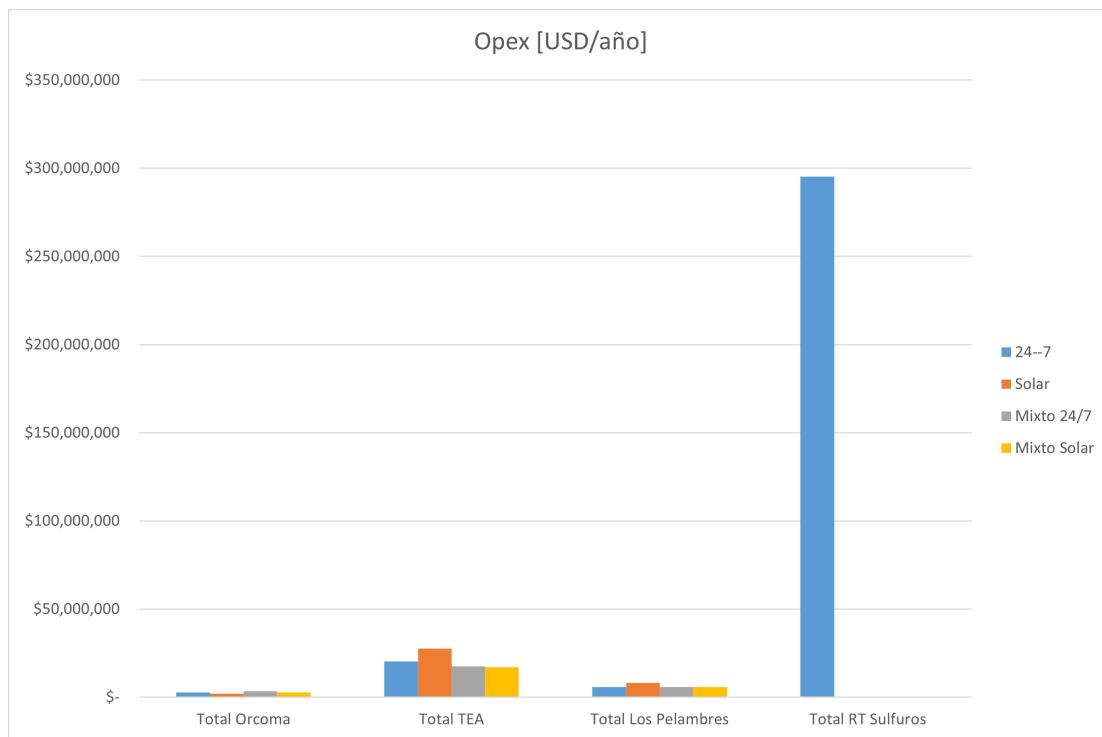


Figura 6.12: Resumen gráfico de los costos operacionales en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

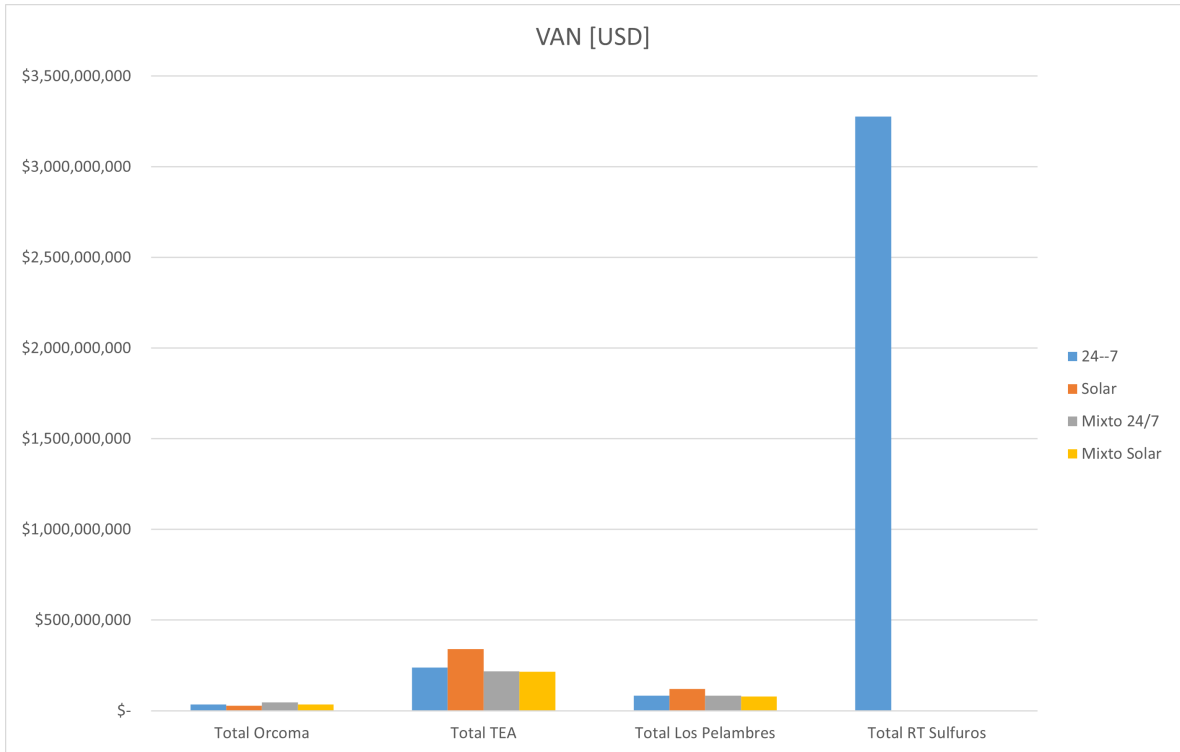


Figura 6.13: Resumen gráfico de los valores actuales netos en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

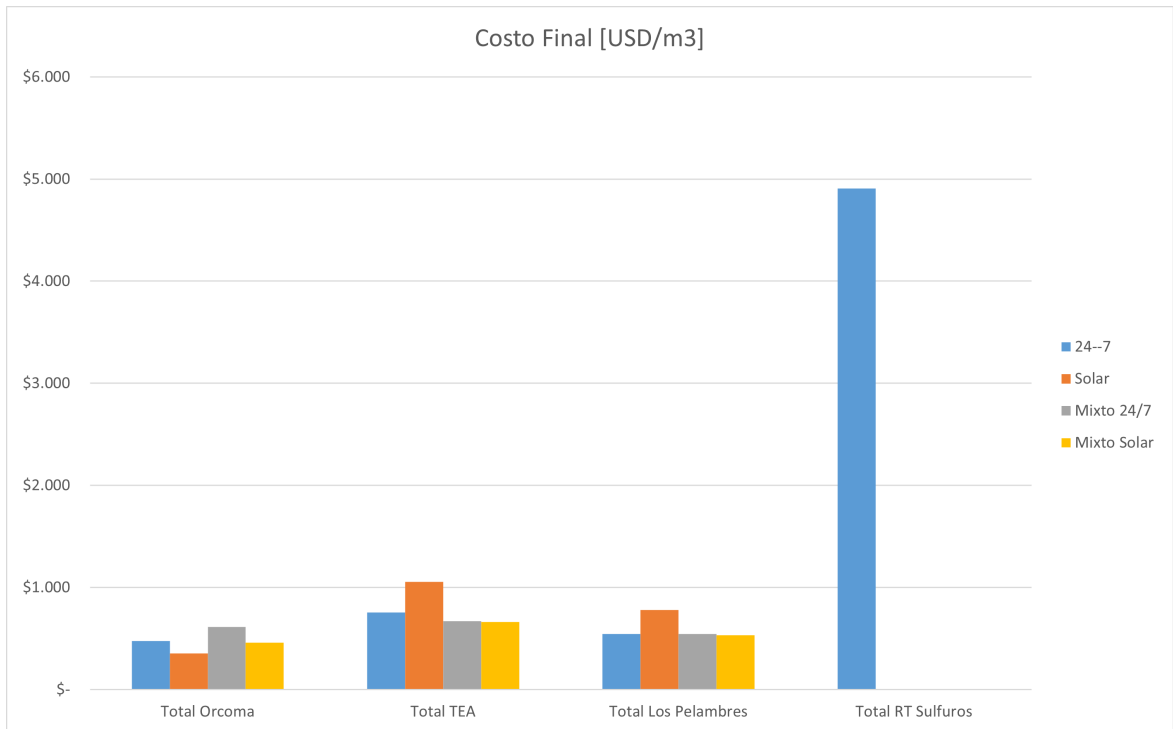


Figura 6.14: Resumen gráfico de los costos finales de elevar 1 m³ de agua en cada uno de los tramos en la modelación de los proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

Dado que el gran valor del Proyecto RT Sulfuros es tan elevado, a continuación se presentarán en las figuras n° 6.15, 6.16, 6.17, 6.18, 6.19 y 6.20 (p. 92, 93 y 94) las mismas gráficas anteriores pero sin este proyecto. De esta manera se visualizarán de mejor manera.

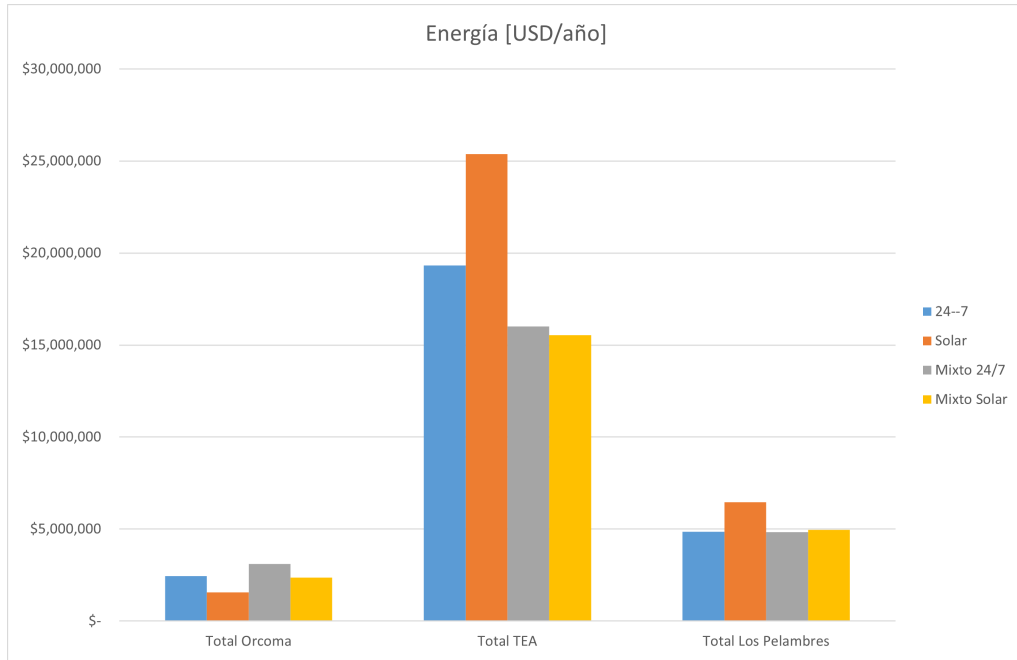


Figura 6.15: Resumen gráfico de los costos energéticos en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

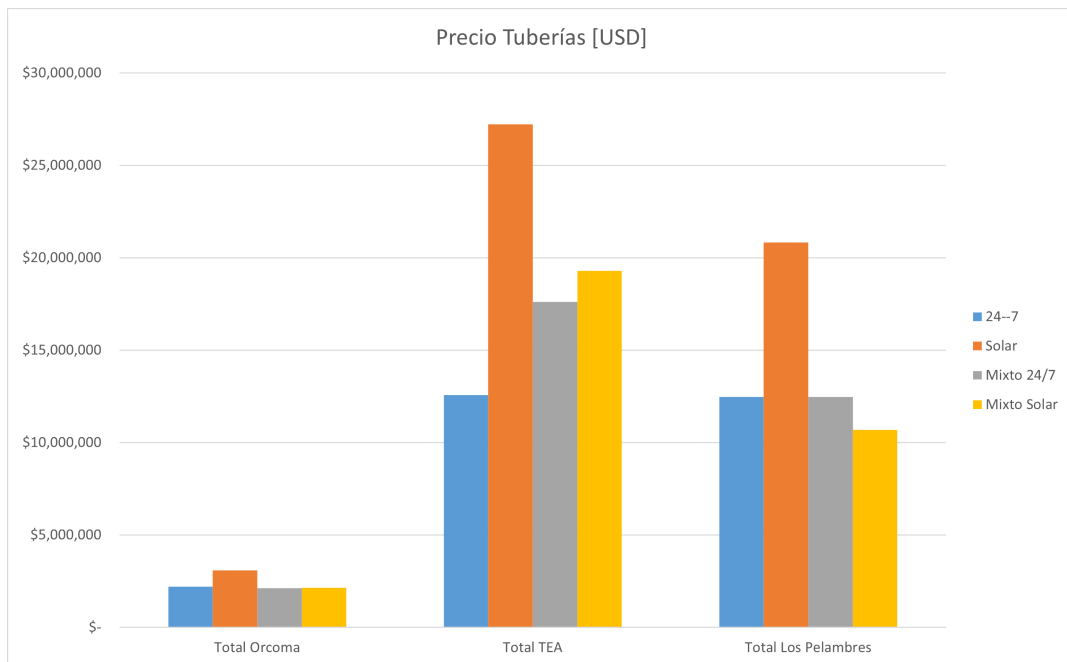


Figura 6.16: Resumen gráfico de los costos de las tuberías en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

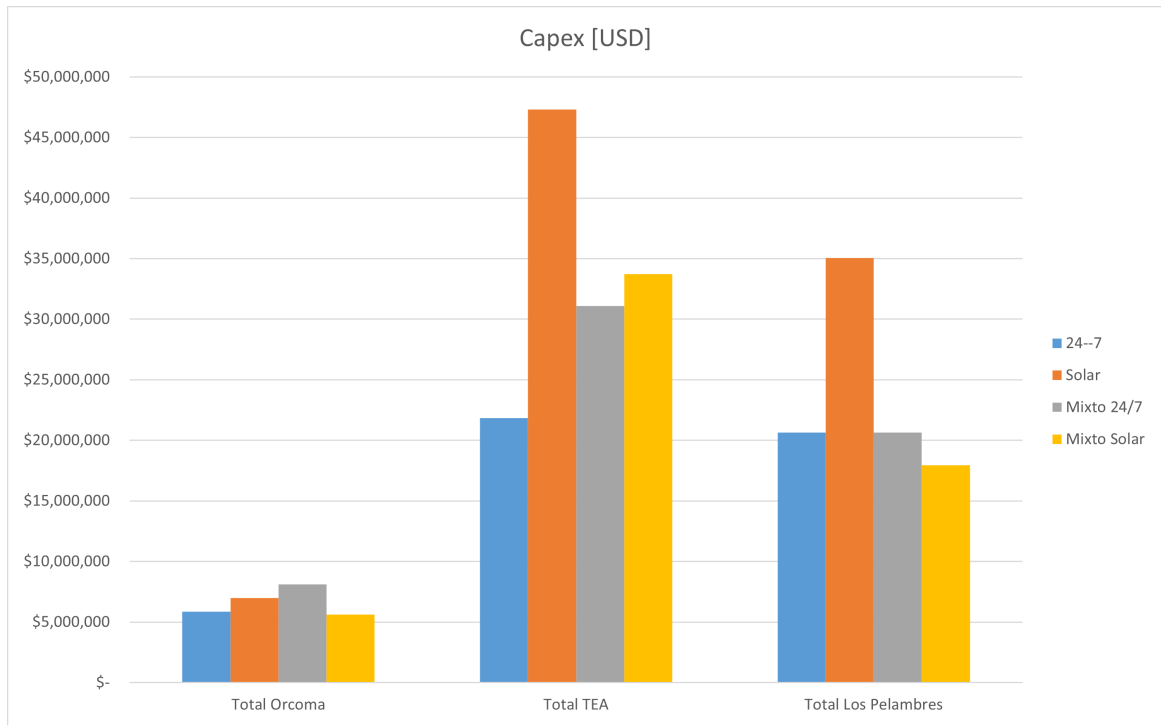


Figura 6.17: Resumen gráfico de los costos de la inversión inicial en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

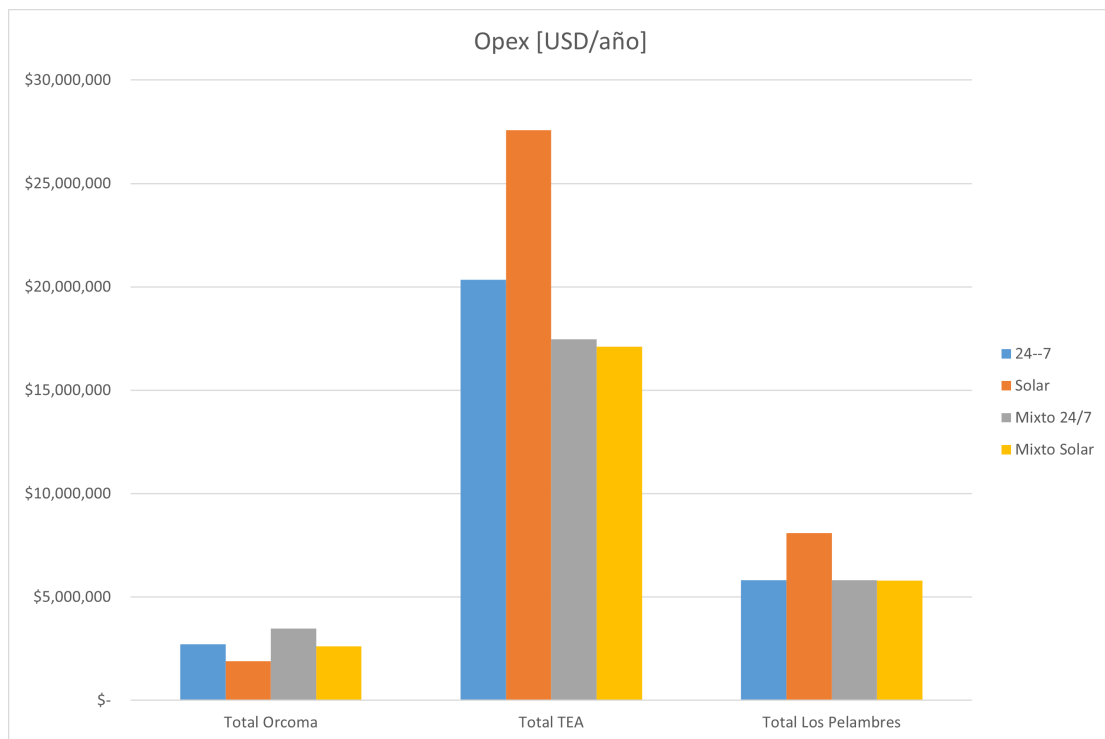


Figura 6.18: Resumen gráfico de los costos operacionales en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

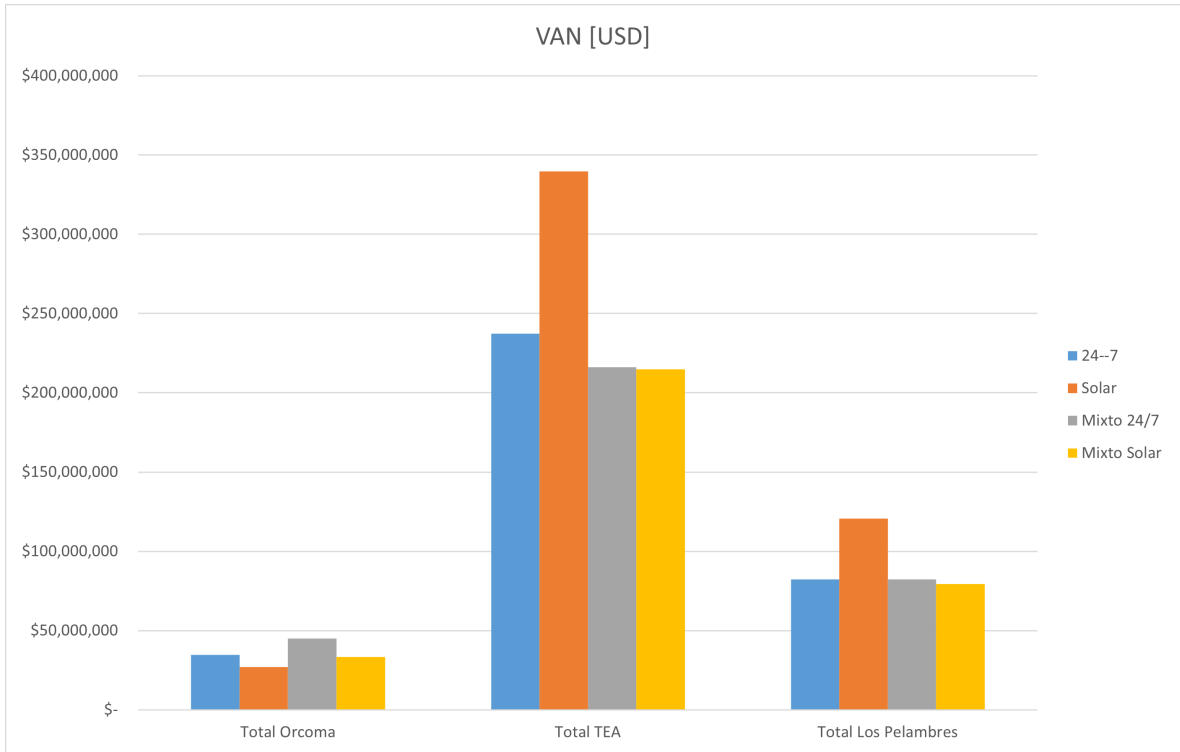


Figura 6.19: Resumen gráfico de los valores actuales netos en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

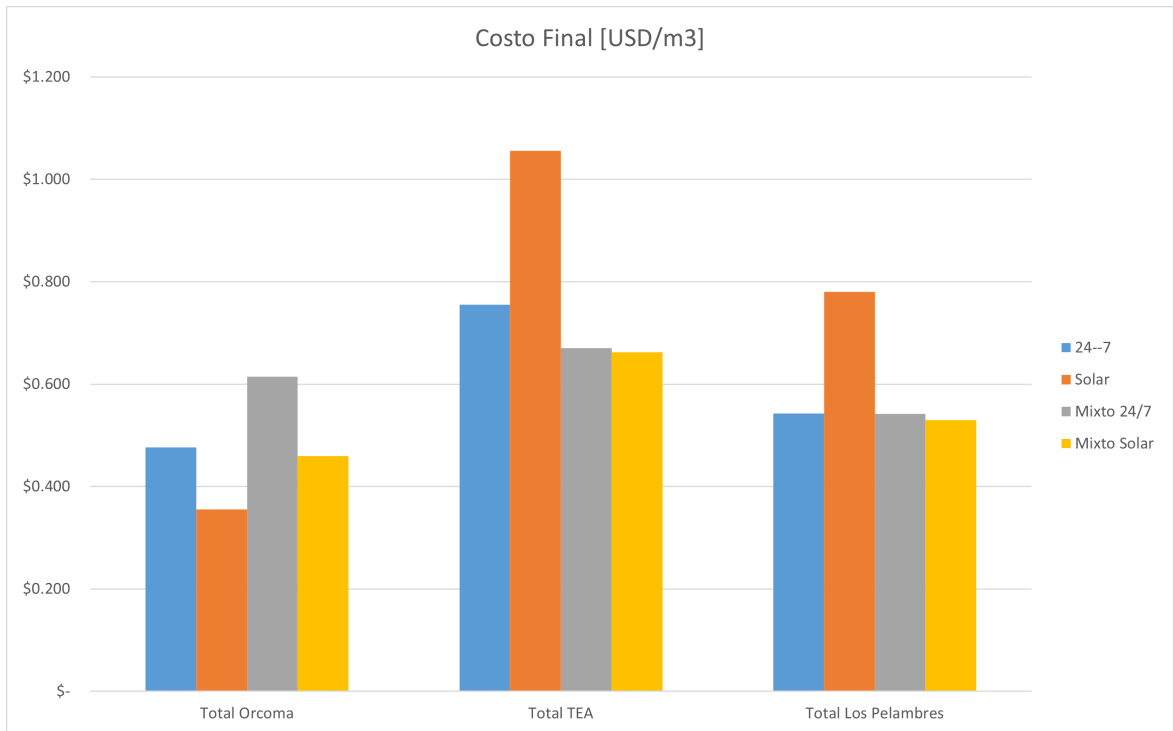


Figura 6.20: Resumen gráfico de los costos finales de elevar 1 m³ de agua en cada uno de los tramos en la modelación de ciertos proyectos reales
Fuente: Elaboración propia

Además de las tablas y gráficas presentadas anteriormente, se presenta a continuación una figura (ver figura n° 6.21) la cual detalla un promedio de los costos finales de elevar 1 [m³] de agua desalada de los Proyectos Orcoma, TEA y Los Pelambres. Además de estos costos, se proyecta un aumento en el Capex, donde se consideran ahora todos los costos incluidos en proyectos con sistemas de impulsión de agua.

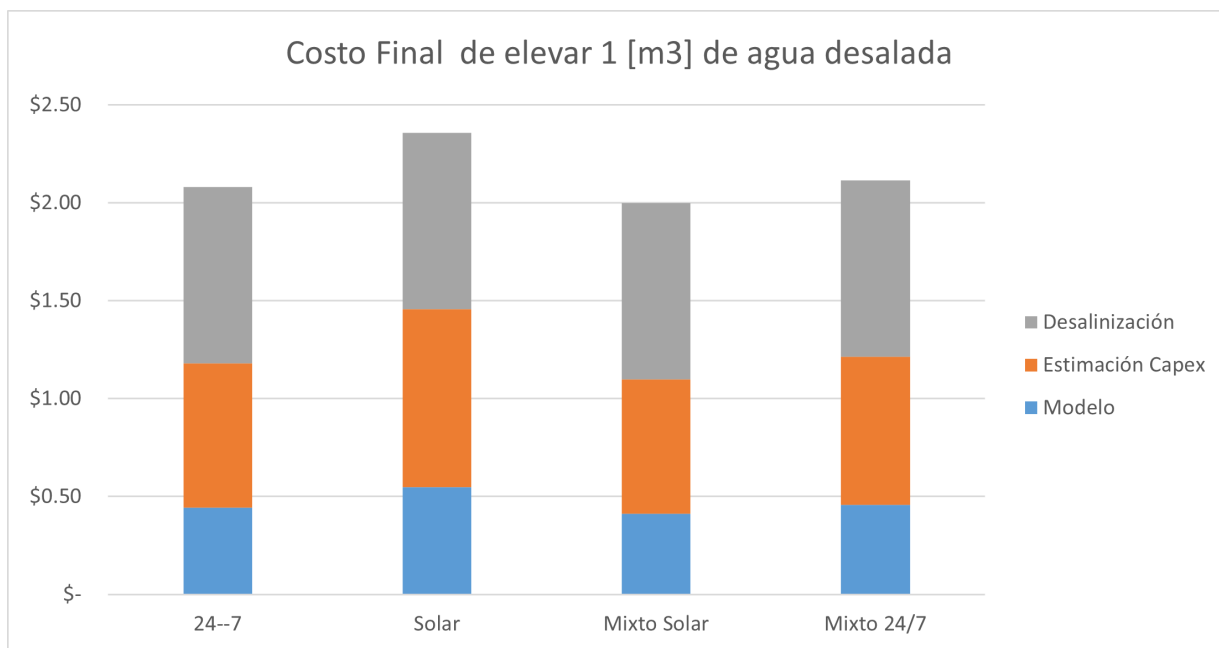


Figura 6.21: Costo de elevar 1 m³ de agua desalada
Fuente: Elaboración propia

Luego, se presenta a continuación una tabla (ver tabla n° 6.19) la cual indica los Key Performance Indicators (KPI) promedio de cada uno de los proyectos reales que fueron modelados.

Tabla 6.19: KPI de cada proyecto
Fuente: Elaboración propia

Proyecto	Largo [km]	Altura [km]	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7	KPI [USD/km ⁵]
Orcoma	29.600	1.060	\$ 0.480	\$ 0.360	\$ 0.460	\$ 0.610	\$ 1.520 · 10 ⁷
TEA	36.500	0.930	\$ 0.755	\$ 1.055	\$ 0.662	\$ 0.670	\$ 2.310 · 10 ⁷
Los Pelambres	56.510	1.039	\$ 0.543	\$ 0.780	\$ 0.530	\$ 0.542	\$ 1.020 · 10 ⁷
RT Sulfuros	158.300	3.116	\$ 4.910	N/D	N/D	N/D	\$ 9.900 · 10 ⁶

6.2. Proyectos modificados

Al igual que para los proyectos reales, se presenta inicialmente el trazado del sistema de impulsión que fue modelado. En este caso se comienza presentando el perfil de elevación del Proyecto Orcoma modificado.

6.2.1. Proyecto Orcoma modificado

Se presenta inicialmente el trazado el cual se modeló. En este caso se comienza presentando el perfil de elevación del Proyecto Orcoma modificado:

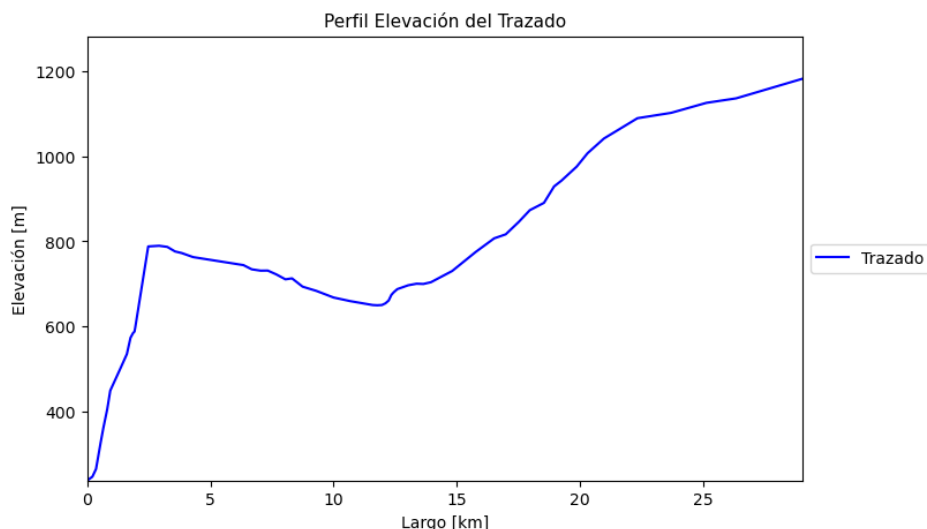


Figura 6.22: Perfil de elevación del trazado del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

Luego los resultados del modelamiento para cada caso, donde se detallan algunos de los costos asociados a la configuración óptima entregada por el modelo se presentan a continuación en la figura n° 6.20.

Tabla 6.20: Resultados del modelamiento del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

Tramo	Trazado total			
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 2	Bomba 1	Bomba 5	Bomba 6
n° de bombas	1	1	1	2
Diámetro tuberías ["]	18	26	18	22
Schedule tuberías	20	20	20	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.266	1.716	1.436	1.079
Precio tuberías [USD]	\$ 2,567,780	\$ 5,486,370	\$ 2,567,780	\$ 3,779,924
Energía [USD/año]	\$ 2,354,694	\$ 1,444,494	\$ 2,283,415	\$ 2,820,856
VAN [USD]	\$32,772,530	\$29,880,893	\$31,899,042	\$42,347,209
Capex [USD]	\$ 5,237,506	\$ 9,755,105	\$ 5,158,311	\$ 8,339,886
Opex [USD/año]	\$ 2,599,111	\$ 1,899,732	\$ 2,524,136	\$ 3,210,051
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.454	\$ 0.379	\$ 0.441	\$ 0.575

6.2.2. Proyecto TEA modificado

Tal como se mencionó anteriormente en la sección Proyectos modificados del capítulo Descripción de los casos de estudio (p. 68), ahora se tienen dos estaciones de bombeo. Así, se presenta a continuación (ver figuras n° 6.23 y n° 6.24) el perfil de elevación de los tramos del Proyecto TEA modificado, donde se tiene inicialmente el tramo desde la EB n° 1 a la EB n° 2 y luego desde la EB n° 2 a la planta minera.

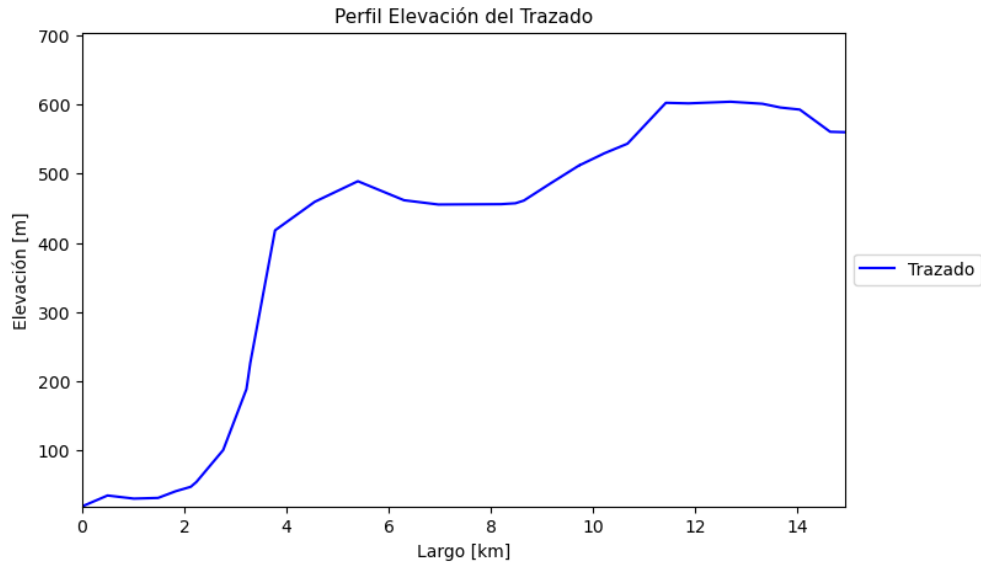


Figura 6.23: Perfil de elevación de la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

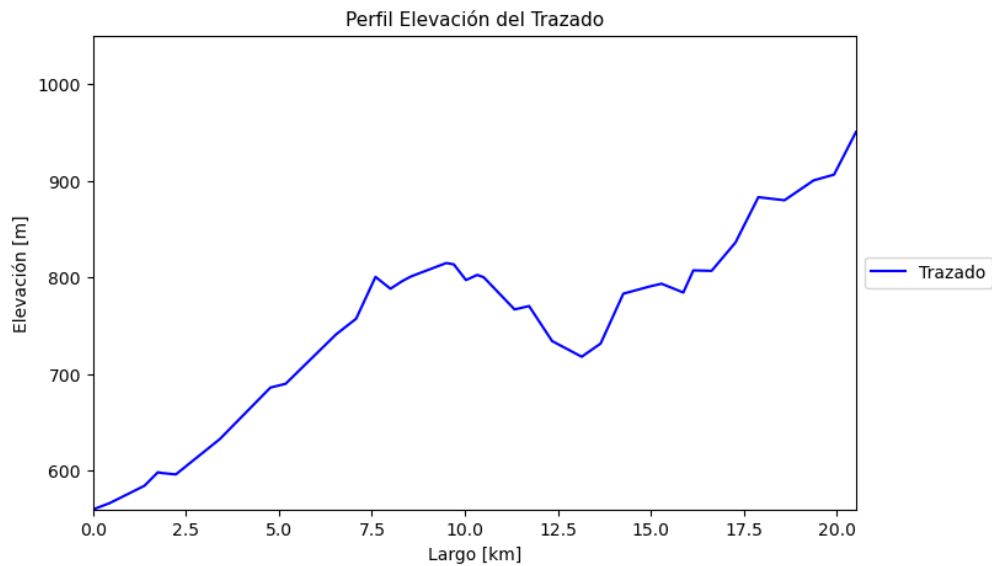


Figura 6.24: Perfil de elevación de la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

Así mismo, se presentan a continuación los resultados en forma de tabla (ver tablas n° 6.21 y n° 6.22), donde se detallan para cada caso modelado, la configuración utilizada y algunos de los costos asociados a cada una de estas.

Tabla 6.21: Resultados del modelamiento del tramo EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 1 a EB n° 2			
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 8	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	2	4	3	3
Diámetro tuberías ["]	42	46	46	42
Schedule tuberías	20	20	20	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.035	2.068	1.298	1.675
Precio tuberías [USD]	\$ 5,567,866	\$ 6,098,456	\$ 6,098,456	\$ 5,567,866
Energía [USD/año]	\$ 11,698,424	\$ 15,479,000	\$ 9,667,501	\$ 9,898,389
VAN [USD]	\$140,066,318	\$184,997,859	\$121,765,903	\$122,963,107
Capex [USD]	\$ 10,795,763	\$ 14,061,358	\$ 12,947,286	\$ 12,111,606
Opex [USD/año]	\$ 12,202,226	\$ 16,135,196	\$ 10,271,708	\$ 10,463,597
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.449	\$ 0.593	\$ 0.385	\$ 0.390

Tabla 6.22: Resultados del modelamiento del tramo EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB n° 2 a punto final			
Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 8	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	2	4	3	3
Diámetro tuberías ["]	44	46	46	42
Schedule tuberías	10	20	10	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	0.932	2.068	1.279	1.675
Precio tuberías [USD]	\$ 4,924,190	\$ 8,380,850	\$ 5,145,276	\$ 7,651,682
Energía [USD/año]	\$ 7,872,521	\$ 10,894,007	\$ 6,556,978	\$ 6,823,437
VAN [USD]	\$98,019,652	\$141,796,356	\$86,569,521	\$95,291,618
Capex [USD]	\$ 9,781,973	\$ 17,656,129	\$11,446,027	\$15,393,617
Opex [USD/año]	\$ 8,329,013	\$ 11,717,959	\$ 7,091,126	\$ 7,541,806
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.311	\$ 0.444	\$ 0.270	\$ 0.293

Luego, dado que se tiene más de una estación de bombeo, se presenta la siguiente tabla (ver tabla n° 6.23) donde para cada caso, se detalla los costos totales de elevar 1 [m³] de agua.

Tabla 6.23: Costo final de elevar 1 m³ de agua del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

Casos	24/7	Solar	Mixto Solar	Mixto 24/7
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.760	\$ 1.037	\$ 0.655	\$ 0.683

6.2.3. Síntesis proyectos modificados

Se presentan a modo de resumen, las tablas n° 6.24, n° 6.25, n° 6.26 y n° 6.27 (p. 99, 100 y 101), donde se detallan tanto las configuraciones como algunos de sus costos para cada uno de los casos y de los tramos modelados en el Proyecto Orcoma modificado. Esto mismo se realizó para el Proyecto TEA modificado, para el cual se presentan las tablas n° 6.28, n° 6.29, n° 6.30 y n° 6.31 (p. 101, 102 y 103). Además en todas las tablas mencionadas, se puede ver la comparación entre el Proyecto real con el modificado. Tal como se menciono anteriormente, para efectos de visualizar bien el contenido de las tablas, la palabra “Orcoma” fue abreviada por “Orc”, la palabra “punto” por “pto” y finalmente, la palabra “modificado” por “mod”. Estas tablas se presentan a continuación:

Tabla 6.24: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7
Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final Orc mod	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc
Casos	24/7	24/7	24/7
Bomba	Bomba 2	Bomba 2	Bomba 2
n° de Bombas	1	1	1
Diámetro tuberías ["]	18	22	22
Schedule tuberías	20	10	5
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.266	0.836	0.831
Precio tuberías [USD]	\$ 2,567,780	\$ 1,215,392	\$ 988,564
Energía [USD/año]	\$ 2,354,694	\$ 1,302,731	\$ 1,134,989
VAN [USD]	\$ 32,772,530	\$ 18,444,952	\$ 16,134,011
Capex [USD]	\$ 5,237,506	\$ 3,107,495	\$ 2,750,241
Opex [USD/año]	\$ 2,599,111	\$ 1,447,747	\$ 1,263,333
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.454	\$ 0.254	\$ 0.222

Tabla 6.25: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final Orc mod	EB 1 a EB 2 Orcoma	EB 2 a pto final Orc
Casos	Solar	Solar	Solar
Bomba	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 8
n° de bombas	1	1	1
Diámetro tuberías ["]	26	26	24
Schedule tuberías	20	10	10
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.716	1.689	1.681
Precio tuberías [USD]	\$ 5,486,370	\$ 1,652,840	\$ 1,431,738
Energía [USD/año]	\$ 1,444,494	\$ 827,684	\$ 738,693
VAN [USD]	\$ 29,880,893	\$ 14,323,571	\$ 12,709,644
Capex [USD]	\$ 9,755,105	\$ 3,717,296	\$ 3,268,174
Opex [USD/año]	\$ 1,899,732	\$ 1,001,157	\$ 891,208
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.379	\$ 0.188	\$ 0.167

Tabla 6.26: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final Orc mod	EB 1 a EB 2 Orc	EB 2 a pto final Orc
Casos	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar
Bomba	Bomba 5	Bomba 5	Bomba 5
n° de bombas	1	1	1
Diámetro tuberías ["]	18	24	22
Schedule tuberías	20	5	5
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.436	0.792	0.943
Precio tuberías [USD]	\$ 2,567,780	\$ 1,158,424	\$ 988,564
Energía [USD/año]	\$ 2,283,415	\$ 1,255,311	\$ 1,102,493
VAN [USD]	\$ 31,899,042	\$ 17,690,151	\$ 15,671,402
Capex [USD]	\$ 5,158,311	\$ 2,938,575	\$ 2,671,046
Opex [USD/año]	\$ 2,524,136	\$ 1,392,444	\$ 1,227,142
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.441	\$ 0.244	\$ 0.216

Tabla 6.27: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final Orc mod	EB 1 a EB 2 Orcoma	EB 2 a pto final Orc
Casos	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 6	Bomba 6	Bomba 6
n° de bombas	2	2	2
Diámetro tuberías ["]	22	22	20
Schedule tuberías	20	10	5
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.079	1.066	1.286
Precio tuberías [USD]	\$ 3,779,924	\$ 1,215,392	\$ 897,986
Energía [USD/año]	\$ 2,820,856	\$ 1,636,991	\$ 1,456,911
VAN [USD]	\$ 42,347,209	\$ 23,769,290	\$ 21,114,457
Capex [USD]	\$ 8,339,886	\$ 4,300,748	\$ 3,800,834
Opex [USD/año]	\$ 3,210,051	\$ 1,837,693	\$ 1,634,284
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.575	\$ 0.326	\$ 0.289

Tabla 6.28: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final TEA	EB 1 a EB 2 TEA mod	EB 2 a pto final TEA mod
Casos	24/7	24/7	24/7
Bomba	Bomba 8	Bomba 8	Bomba 8
n° de bombas	2	2	2
Diámetro tuberías ["]	36	42	44
Schedule tuberías	30	20	10
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.423	1.035	0.932
Precio tuberías [USD]	\$ 12,576,390	\$ 5,567,866	\$ 4,924,190
Energía [USD/año]	\$ 19,316,881	\$ 11,698,424	\$ 7,872,521
VAN [USD]	\$ 237,272,050	\$ 140,066,318	\$ 98,019,652
Capex [USD]	\$ 21,834,188	\$ 10,795,763	\$ 9,781,973
Opex [USD/año]	\$ 20,335,810	\$ 12,202,226	\$ 8,329,013
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.755	\$ 0.449	\$ 0.311

Tabla 6.29: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final TEA	EB 1 a EB 2 TEA mod	EB 2 a pto final TEA mod
Casos	Solar	Solar	Solar
Bomba	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	4	4	4
Diámetro tuberías ["]	46	46	46
Schedule tuberías	60	20	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	2.115	2.068	2.068
Precio tuberías [USD]	\$ 27,216,300	\$ 6,098,456	\$ 8,380,850
Energía [USD/año]	\$ 25,377,938	\$ 15,479,000	\$ 10,894,007
VAN [USD]	\$ 339,571,577	\$ 184,997,859	\$ 141,796,356
Capex [USD]	\$ 47,321,962	\$ 14,061,358	\$ 17,656,129
Opex [USD/año]	\$ 27,586,296	\$ 16,135,196	\$ 11,717,959
Costo final [USD/m ³]	\$ 1.055	\$ 0.593	\$ 0.444

Tabla 6.30: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final TEA	EB 1 a EB 2 TEA mod	EB 2 a pto final TEA mod
Casos	Mixto Solar	Mixto Solar	Mixto Solar
Bomba	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	3	3	3
Diámetro tuberías ["]	46	46	46
Schedule tuberías	40	20	10
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.316	1.298	1.279
Precio tuberías [USD]	\$ 19,289,910	\$ 6,098,456	\$ 5,145,276
Energía [USD/año]	\$ 15,530,373	\$ 9,667,501	\$ 6,556,978
VAN [USD]	\$ 214,925,450	\$ 121,765,903	\$ 86,569,521
Capex [USD]	\$ 33,723,826	\$ 12,947,286	\$ 11,446,027
Opex [USD/año]	\$ 17,104,151	\$ 10,271,708	\$ 7,091,126
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.662	\$ 0.385	\$ 0.270

Tabla 6.31: Comparación de tanto la configuración del sistema de impulsión de agua como algunos de los costos asociados entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7

Fuente: Elaboración propia

Tramo	EB 1 a pto final TEA	EB 1 a EB 2 TEA mod	EB n° 2 a pto final TEA mod
Casos	Mixto 24/7	Mixto 24/7	Mixto 24/7
Bomba	Bomba 1	Bomba 1	Bomba 1
n° de bombas	3	3	3
Diámetro tuberías ["]	42	42	42
Schedule tuberías	40	20	20
Revestimiento tuberías	Poliuretano	Poliuretano	Poliuretano
Velocidad fluido [m/s]	1.691	1.675	1.675
Precio tuberías [USD]	\$ 17,608,146	\$ 5,567,866	\$ 7,651,682
Energía [USD/año]	\$ 16,017,851	\$ 9,898,389	\$ 6,823,437
VAN [USD]	\$ 216,131,497	\$ 122,963,107	\$ 95,291,618
Capex [USD]	\$ 31,075,047	\$ 12,111,606	\$ 15,393,617
Opex [USD/año]	\$ 17,468,020	\$ 10,463,597	\$ 7,541,806
Costo final [USD/m ³]	\$ 0.670	\$ 0.390	\$ 0.293

Luego, se puede observar en las figuras n° 6.25, n° 6.26, n° 6.27, n° 6.28, n° 6.29, n° 6.30, n° 6.31, n° 6.32, n° 6.33, n° 6.34, n° 6.35, n° 6.36, n° 6.37, n° 6.38, n° 6.39 y n° 6.40 (p. 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110 y 111) los resultados de forma gráfica, donde se ilustra una comparación directa entre el proyecto real con el proyecto modificado, tanto para el Proyecto Orcoma como el Proyecto TEA. Donde se ve la diferencia entre el real y el modificado de algunos de los costos relacionados a la modelación en cada uno de los casos modelados.

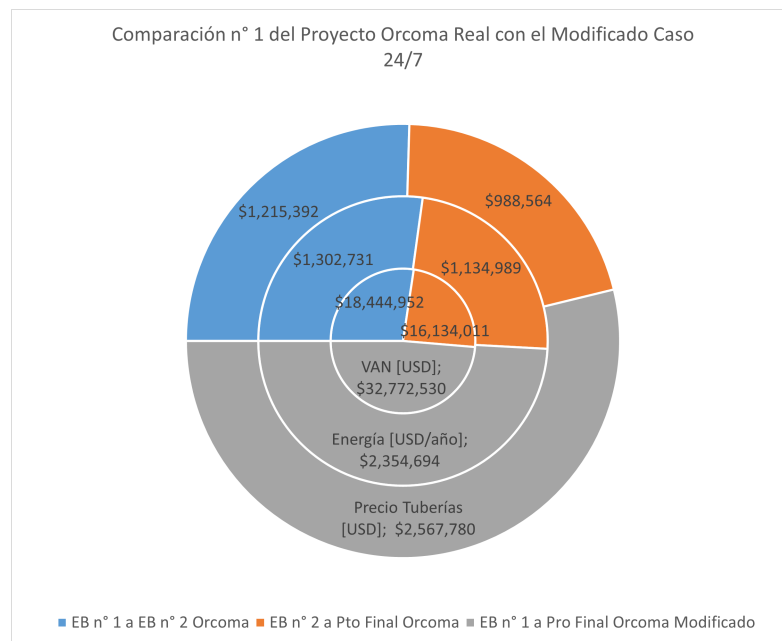


Figura 6.25: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7

Fuente: Elaboración propia

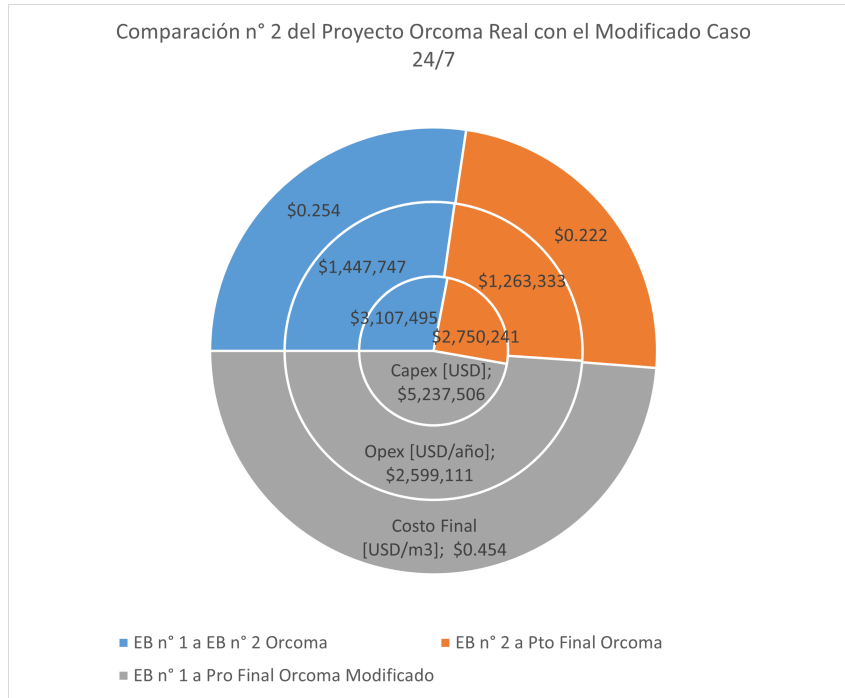


Figura 6.26: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso 24/7
Fuente: Elaboración propia

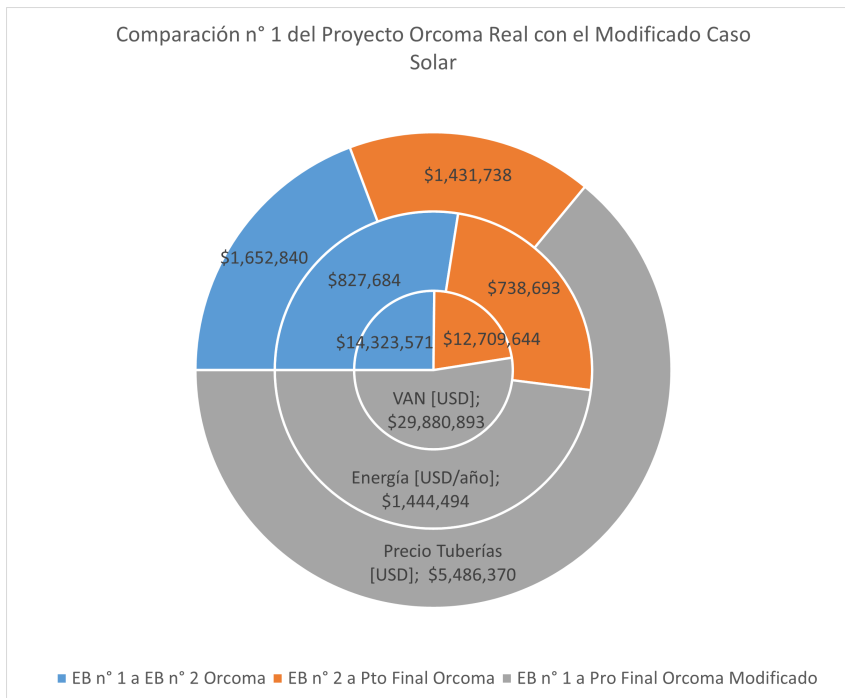


Figura 6.27: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar
Fuente: Elaboración propia

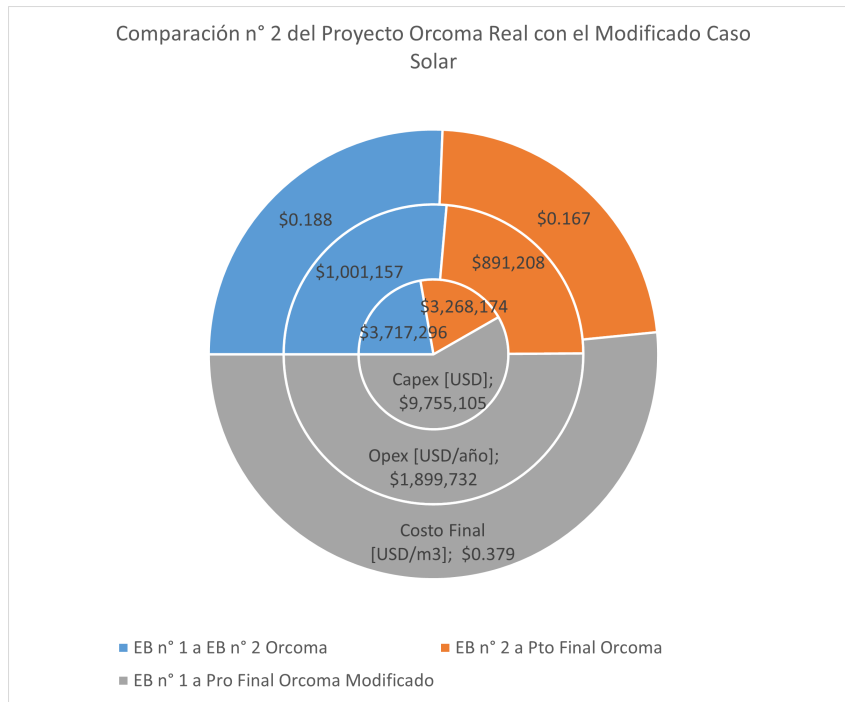


Figura 6.28: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Solar
 Fuente: Elaboración propia

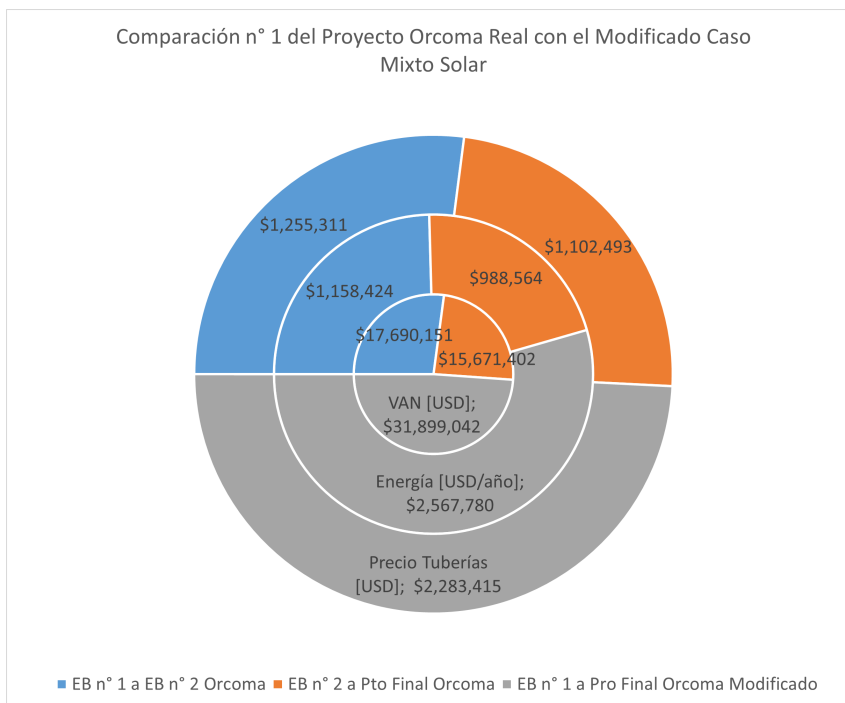


Figura 6.29: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar
 Fuente: Elaboración propia

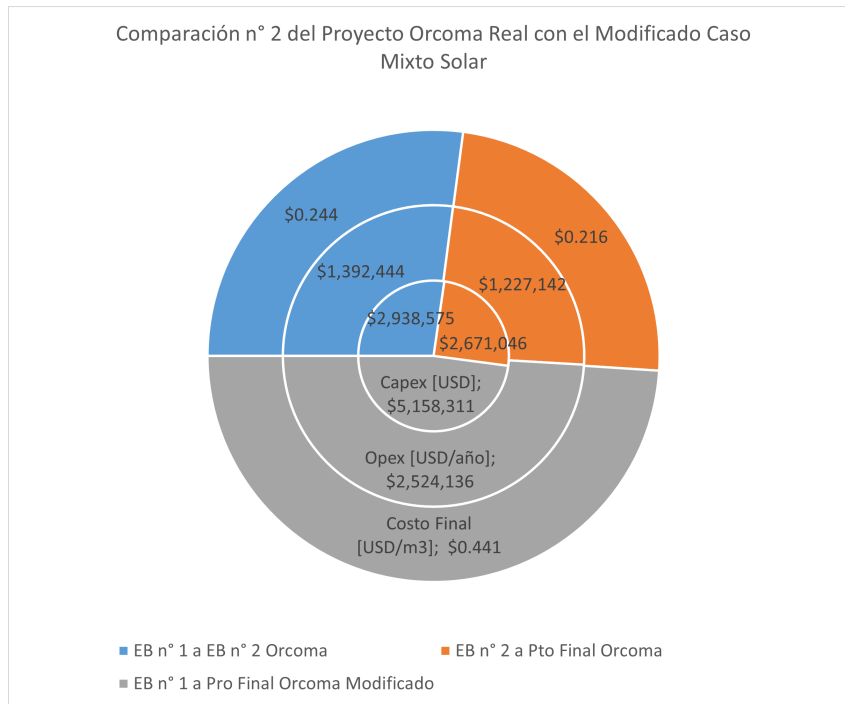


Figura 6.30: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto Solar
 Fuente: Elaboración propia

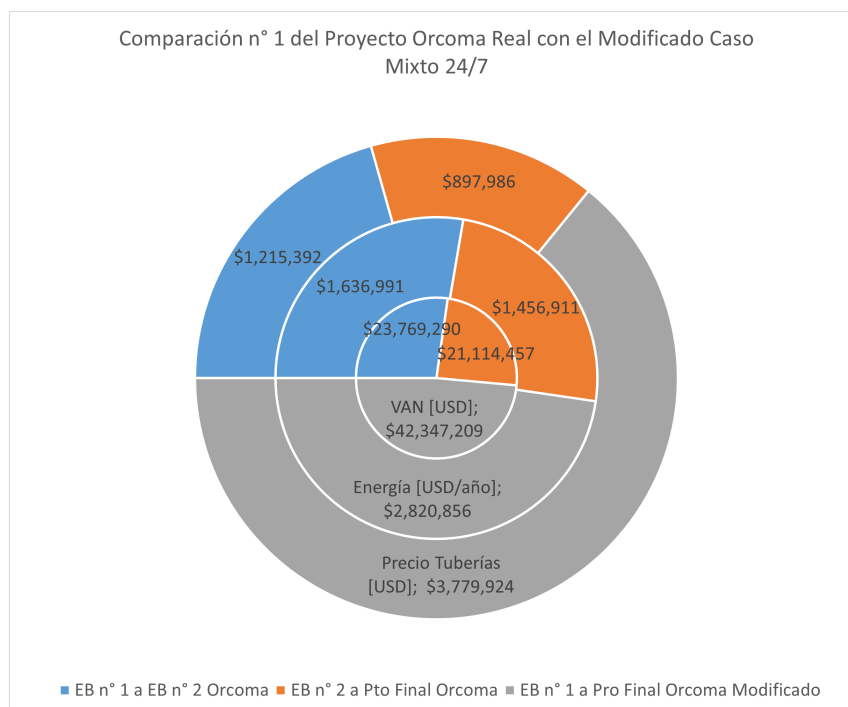


Figura 6.31: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7
 Fuente: Elaboración propia

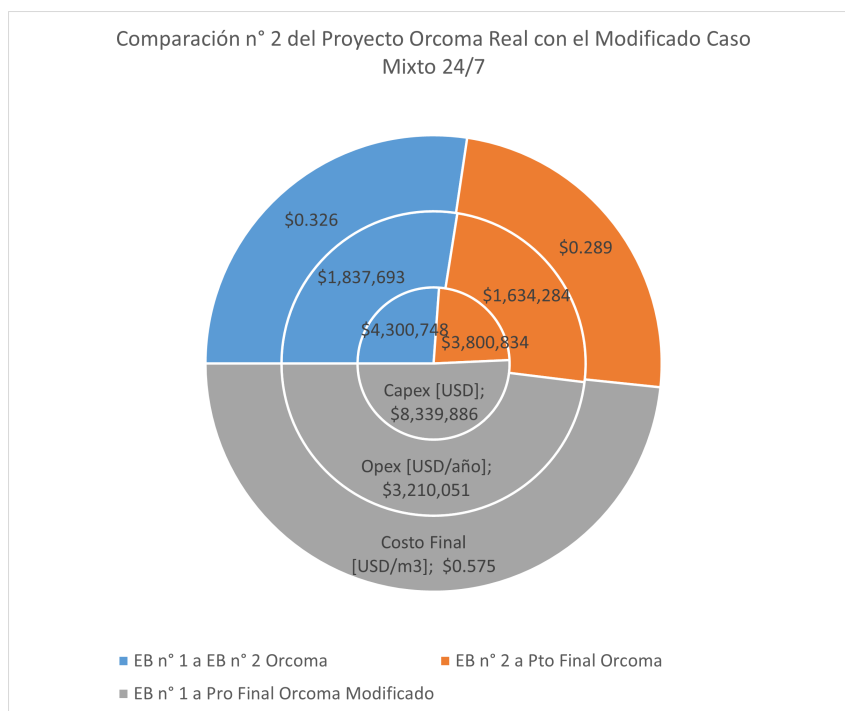


Figura 6.32: Comparación n° 2 entre el Proyecto Orcoma real y el Proyecto Orcoma modificado en el caso Mixto 24/7
 Fuente: Elaboración propia

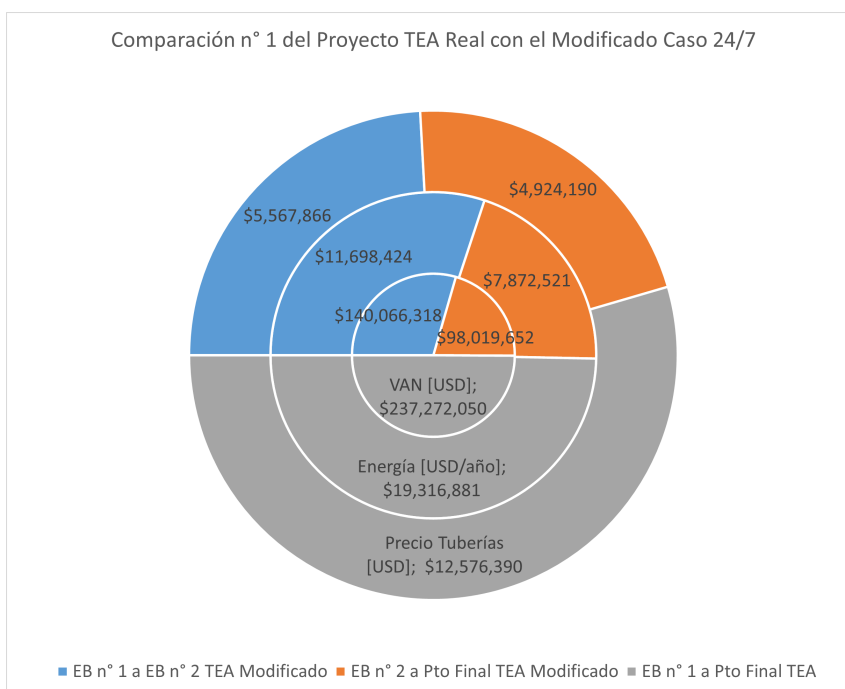


Figura 6.33: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7
 Fuente: Elaboración propia

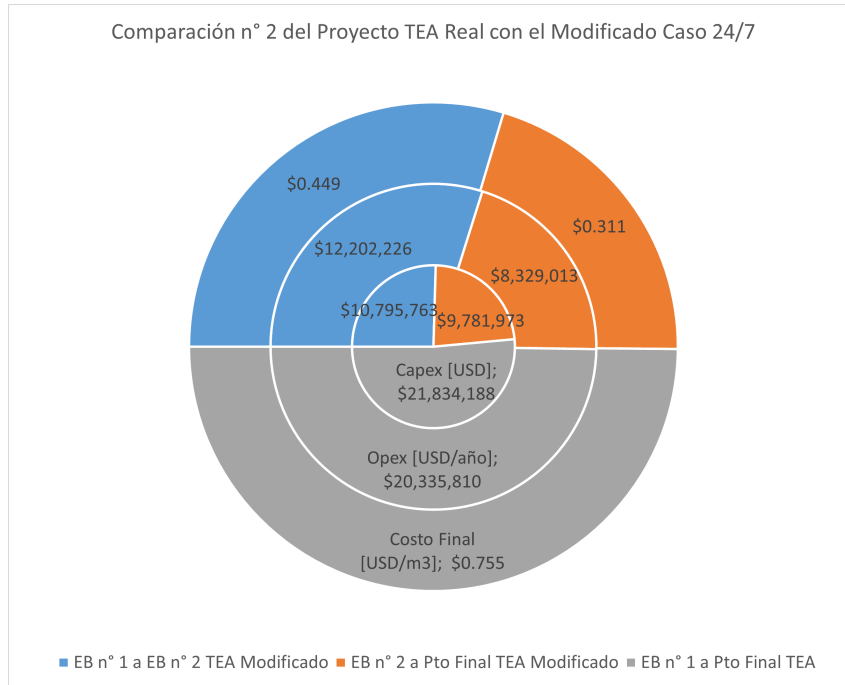


Figura 6.34: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso 24/7
 Fuente: Elaboración propia

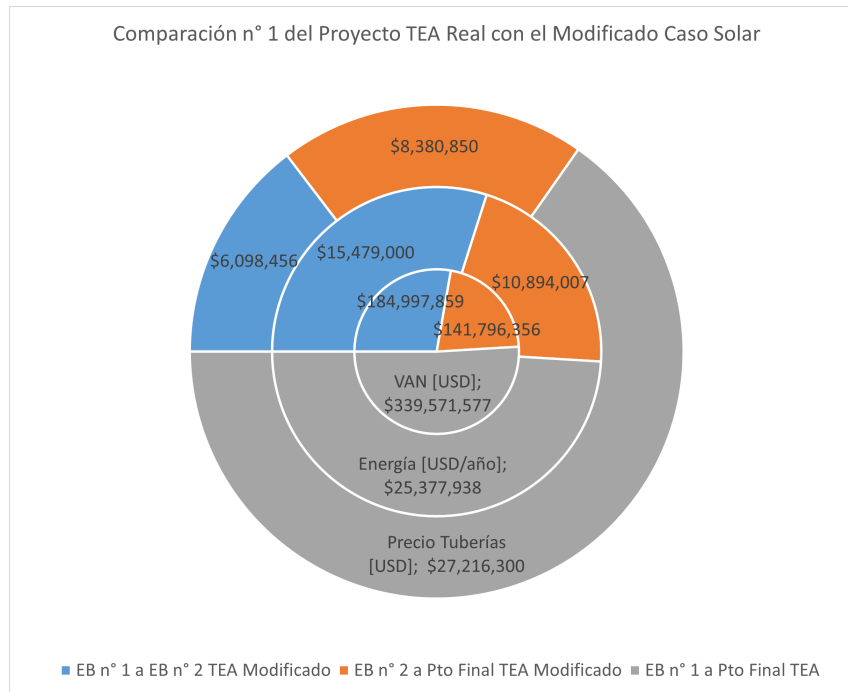


Figura 6.35: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar
 Fuente: Elaboración propia

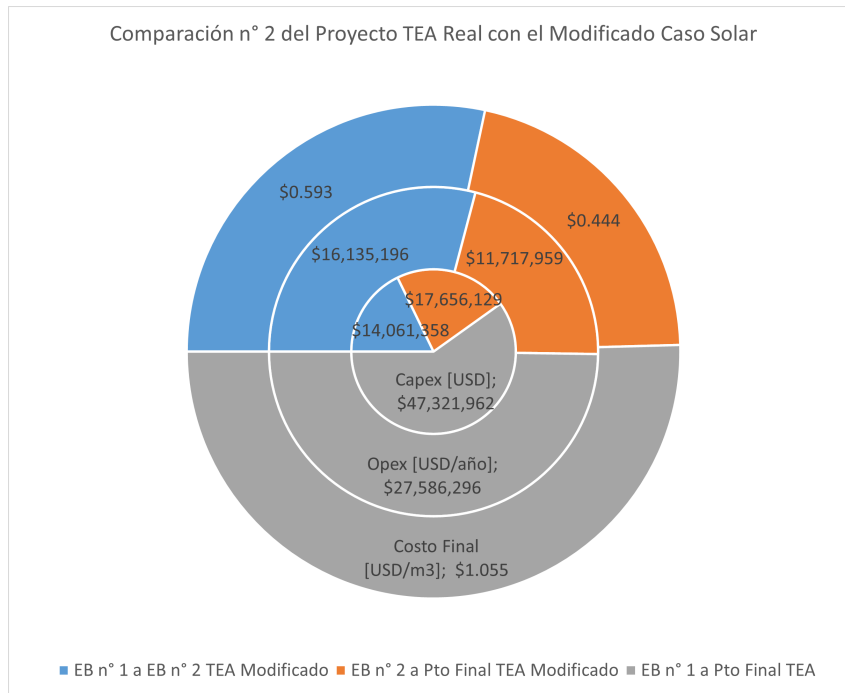


Figura 6.36: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Solar
Fuente: Elaboración propia

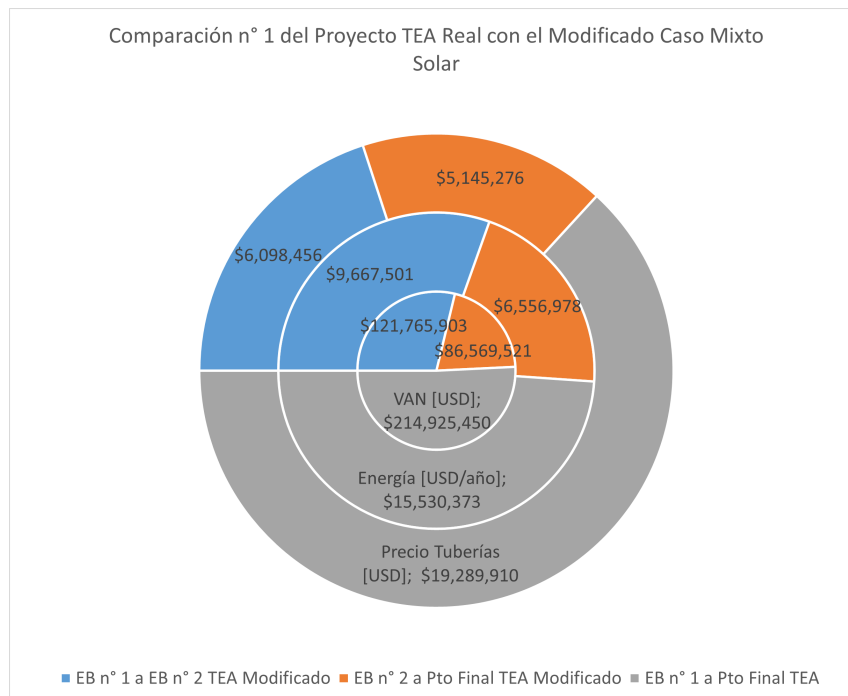


Figura 6.37: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar
Fuente: Elaboración propia

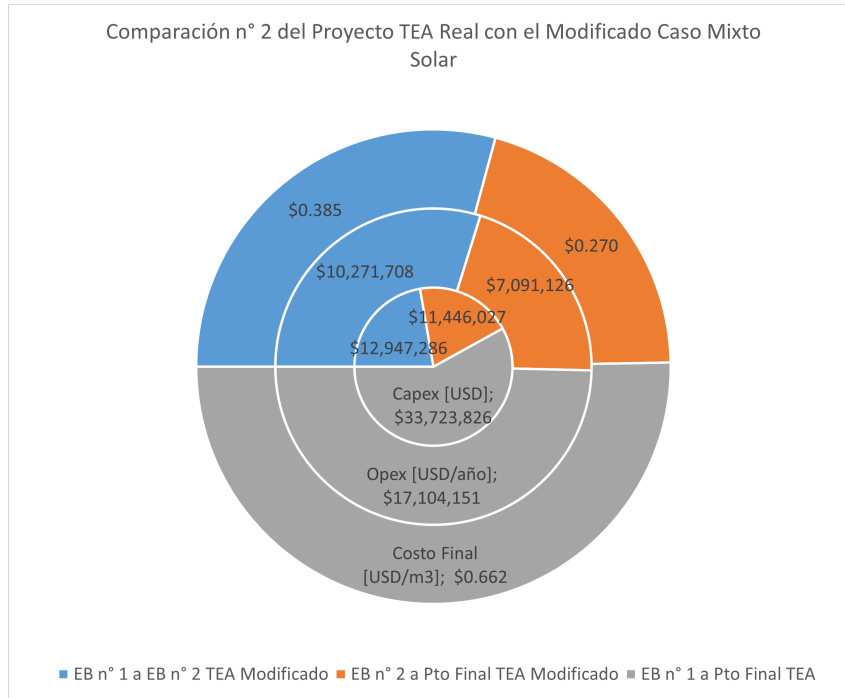


Figura 6.38: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto Solar
Fuente: Elaboración propia

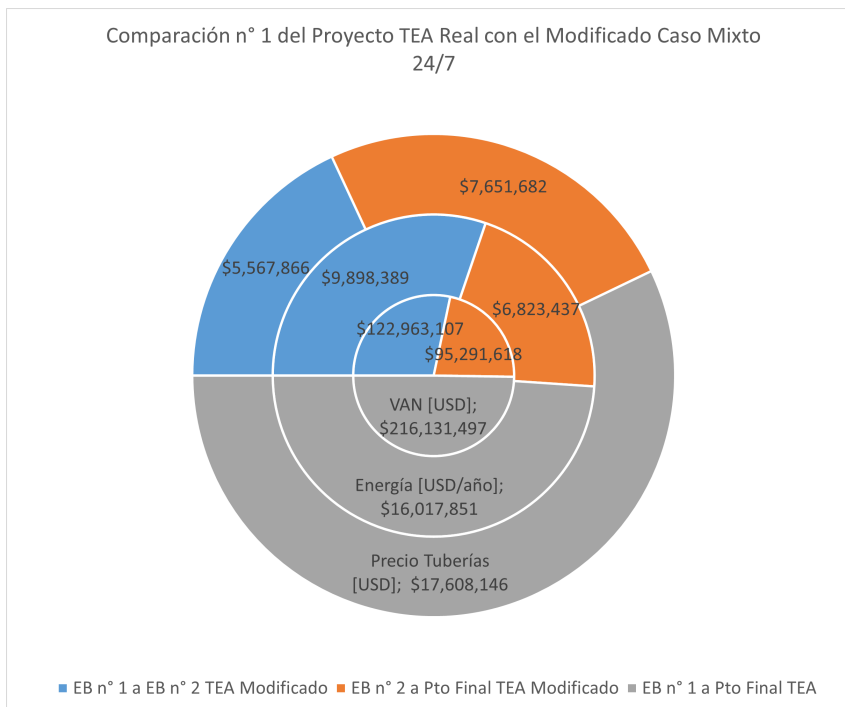


Figura 6.39: Comparación n° 1 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7
Fuente: Elaboración propia

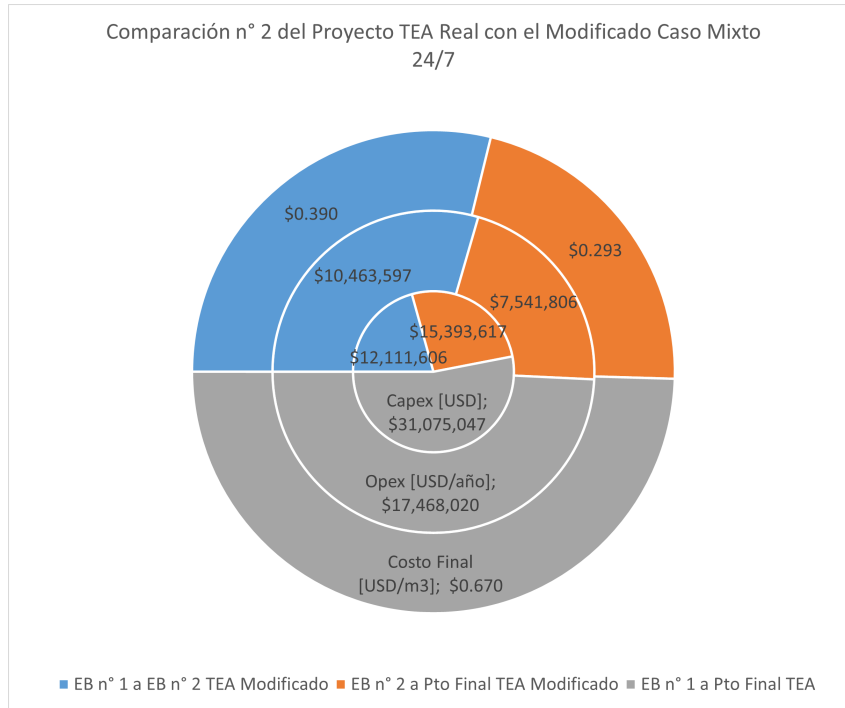


Figura 6.40: Comparación n° 2 de costos entre el Proyecto TEA real y el Proyecto TEA modificado en el caso Mixto 24/7
Fuente: Elaboración propia

6.3. Análisis de sensibilidad

Al igual que en las secciones anteriores, los detalles de las variables que se varían para realizar el análisis de sensibilidad y cuanto es que varían, están descritas en el capítulo Descripción de los casos de estudio (p. 68). De esta forma, se presentan a continuación los resultados del análisis de sensibilidad del modelo realizado al trazado del Proyecto TEA.

6.3.1. TEA

Se presentan los resultados del Costo final de elevar 1 [m³] de agua de mar del Proyecto TEA, para cada uno de los casos modelados, en el desarrollo del análisis de sensibilidad del modelo.

6.3.1.1. Caso 24/7

A continuación, se exponen una tabla (ver tabla n° 6.32) donde se pueden ver los resultados de la modelación para los distintos casos con los costos asociados a la configuración entregada por el modelo, una vez modificados las variables del análisis de sensibilidad para el caso 24/7.

Tabla 6.32: Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua de mar para el caso 24/7

Fuente: Elaboración propia

Combinación (Energía/Costo Acero/Pérdidas Singulares)	Costo final [USD/ m^3]
Alto/Alto/Alto	0.815
Alto/Alto/Medio	0.815
Alto/Alto/Bajo	0.815
Alto/Medio/Alto	0.807
Alto/Medio/Medio	0.807
Alto/Medio/Bajo	0.807
Alto/Bajo/Alto	0.798
Alto/Bajo/Medio	0.798
Alto/Bajo/Bajo	0.798
Medio/Alto/Alto	0.762
Medio/Alto/Medio	0.762
Medio/Alto/Bajo	0.761
Medio/Medio/Alto	0.755
Medio/Medio/Medio	0.755
Medio/Medio/Bajo	0.755
Medio/Bajo/Alto	0.747
Medio/Bajo/Medio	0.746
Medio/Bajo/Bajo	0.746
Bajo/Alto/Alto	0.709
Bajo/Alto/Medio	0.708
Bajo/Alto/Bajo	0.708
Bajo/Medio/Alto	0.702
Bajo/Medio/Medio	0.702
Bajo/Medio/Bajo	0.701
Bajo/Bajo/Alto	0.695
Bajo/Bajo/Medio	0.695
Bajo/Bajo/Bajo	0.694

6.3.1.2. Caso Solar

De esta forma, se presentan los costos finales, una vez que se modificaron las variables para el caso Solar.

Tabla 6.33: Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua de mar para el caso Solar

Fuente: Elaboración propia

Combinación (Energía/Costo Acero/Pérdidas Singulares)	Costo final [USD/ m^3]
Alto/Alto/Alto	1.130
Alto/Alto/Medio	1.129
Alto/Alto/Bajo	1.128
Alto/Medio/Alto	1.115
Alto/Medio/Medio	1.114
Alto/Medio/Bajo	1.114
Alto/Bajo/Alto	1.101
Alto/Bajo/Medio	1.100
Alto/Bajo/Bajo	1.099
Medio/Alto/Alto	1.071
Medio/Alto/Medio	1.070
Medio/Alto/Bajo	1.069
Medio/Medio/Alto	1.056
Medio/Medio/Medio	1.055
Medio/Medio/Bajo	1.055
Medio/Bajo/Alto	1.041
Medio/Bajo/Medio	1.041
Medio/Bajo/Bajo	1.040
Bajo/Alto/Alto	1.012
Bajo/Alto/Medio	1.011
Bajo/Alto/Bajo	1.010
Bajo/Medio/Alto	0.997
Bajo/Medio/Medio	0.996
Bajo/Medio/Bajo	0.996
Bajo/Bajo/Alto	0.982
Bajo/Bajo/Medio	0.982
Bajo/Bajo/Bajo	0.981

6.3.1.3. Caso Mixto Solar

Luego, se muestran en la siguiente tabla (ver tabla n° 6.34) los costos de elevar 1 m^3 de agua, una vez que se realizaron los ajustes a las variables mencionadas anteriormente, para el caso Mixto Solar.

Tabla 6.34: Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua de mar para el caso Mixto Solar
Fuente: Elaboración propia

Combinación (Energía/Costo Acero/Pérdidas Singulares)	Costo final [USD/ m^3]
Alto/Alto/Alto	0.711
Alto/Alto/Medio	0.711
Alto/Alto/Bajo	0.711
Alto/Medio/Alto	0.701
Alto/Medio/Medio	0.700
Alto/Medio/Bajo	0.700
Alto/Bajo/Alto	0.690
Alto/Bajo/Medio	0.690
Alto/Bajo/Bajo	0.690
Medio/Alto/Alto	0.673
Medio/Alto/Medio	0.672
Medio/Alto/Bajo	0.672
Medio/Medio/Alto	0.662
Medio/Medio/Medio	0.662
Medio/Medio/Bajo	0.662
Medio/Bajo/Alto	0.652
Medio/Bajo/Medio	0.652
Medio/Bajo/Bajo	0.652
Bajo/Alto/Alto	0.634
Bajo/Alto/Medio	0.634
Bajo/Alto/Bajo	0.634
Bajo/Medio/Alto	0.624
Bajo/Medio/Medio	0.624
Bajo/Medio/Bajo	0.624
Bajo/Bajo/Alto	0.614
Bajo/Bajo/Medio	0.613
Bajo/Bajo/Bajo	0.613

6.3.1.4. Caso Mixto 24/7

Así mismo, se presentan los resultados en forma de tabla (ver tabla n° 6.35), donde se pueden apreciar los costos finales de elevar 1 m^3 de agua, modificando las distintas variables para el caso Mixto 24/7.

Tabla 6.35: Resultados del análisis de sensibilidad de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua de mar para el caso Mixto 24/7
Fuente: Elaboración propia

Combinación (Energía/Costo Acero/Pérdidas Singulares)	Costo final [USD/ m^3]
Alto/Alto/Alto	0.719
Alto/Alto/Medio	0.719
Alto/Alto/Bajo	0.719
Alto/Medio/Alto	0.710
Alto/Medio/Medio	0.709
Alto/Medio/Bajo	0.709
Alto/Bajo/Alto	0.700
Alto/Bajo/Medio	0.700
Alto/Bajo/Bajo	0.700
Medio/Alto/Alto	0.680
Medio/Alto/Medio	0.680
Medio/Alto/Bajo	0.679
Medio/Medio/Alto	0.670
Medio/Medio/Medio	0.670
Medio/Medio/Bajo	0.670
Medio/Bajo/Alto	0.661
Medio/Bajo/Medio	0.661
Medio/Bajo/Bajo	0.661
Bajo/Alto/Alto	0.640
Bajo/Alto/Medio	0.639
Bajo/Alto/Bajo	0.639
Bajo/Medio/Alto	0.631
Bajo/Medio/Medio	0.631
Bajo/Medio/Bajo	0.631
Bajo/Bajo/Alto	0.622
Bajo/Bajo/Medio	0.622
Bajo/Bajo/Bajo	0.621

6.3.2. Síntesis análisis de sensibilidad

Dentro de la síntesis del análisis de sensibilidad, se presentan inicialmente 3 tablas (ver tablas n° 6.36, 6.37 y 6.38 (p. 116 y 117)), en donde en estas se detallan para cada uno de los casos del modelo, los resultados promedio de elevar 1 [m^3] de agua para cada variable en los casos donde estas están en el valor alto, medio y bajo, y las respectivas variaciones con respecto al valor medio.

Tabla 6.36: Síntesis de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua modificando los costos de la energía

Fuente: Elaboración propia

Energía				
Casos	Resultados	Bajo	Medio	Alto
24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.702	0.754	0.807
	Variación [%]	-6.997 %	-	6.941 %
Solar	Costo final [USD/ m^3]	0.996	1.055	1.114
	Variación [%]	-5.594 %	-	5.597 %
Mixto Solar	Costo final [USD/ m^3]	0.624	0.662	0.700
	Variación [%]	-5.795 %	-	5.797 %
Mixto 24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.631	0.670	0.709
	Variación [%]	-5.904 %	-	5.854 %

Tabla 6.37: Síntesis de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua modificando los costos del acero

Fuente: Elaboración propia

Costo Acero				
Casos	Resultados	Bajo	Medio	Alto
24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.746	0.755	0.762
	Variación [%]	-1.078 %	-	0.956 %
Solar	Costo final [USD/ m^3]	1.041	1.055	1.070
	Variación [%]	-1.383 %	-	1.383 %
Mixto Solar	Costo final [USD/ m^3]	0.652	0.662	0.672
	Variación [%]	-1.563 %	-	1.564 %
Mixto 24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.661	0.670	0.679
	Variación [%]	-1.408 %	-	1.348 %

Tabla 6.38: Síntesis de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua modificando los valores de las pérdidas singulares

Fuente: Elaboración propia

Pérdidas Singulares				
Casos	Resultados	Bajo	Medio	Alto
24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.754	0.754	0.754
	Variación [%]	-0.035 %	-	0.028 %
Solar	Costo final [USD/ m^3]	1.055	1.055	1.056
	Variación [%]	-0.060 %	-	0.063 %
Mixto Solar	Costo final [USD/ m^3]	0.662	0.662	0.662
	Variación [%]	-0.020 %	-	0.022 %
Mixto 24/7	Costo final [USD/ m^3]	0.670	0.670	0.670
	Variación [%]	-0.043 %	-	0.038 %

De esta forma, se presentan 4 figuras (ver figuras n° 6.41, 6.42, 6.43 y 6.44 (p. 117, 118 y 119)), las cuales grafican en histogramas los resultados de todos los costos finales para cada uno de los 4 casos del modelo.

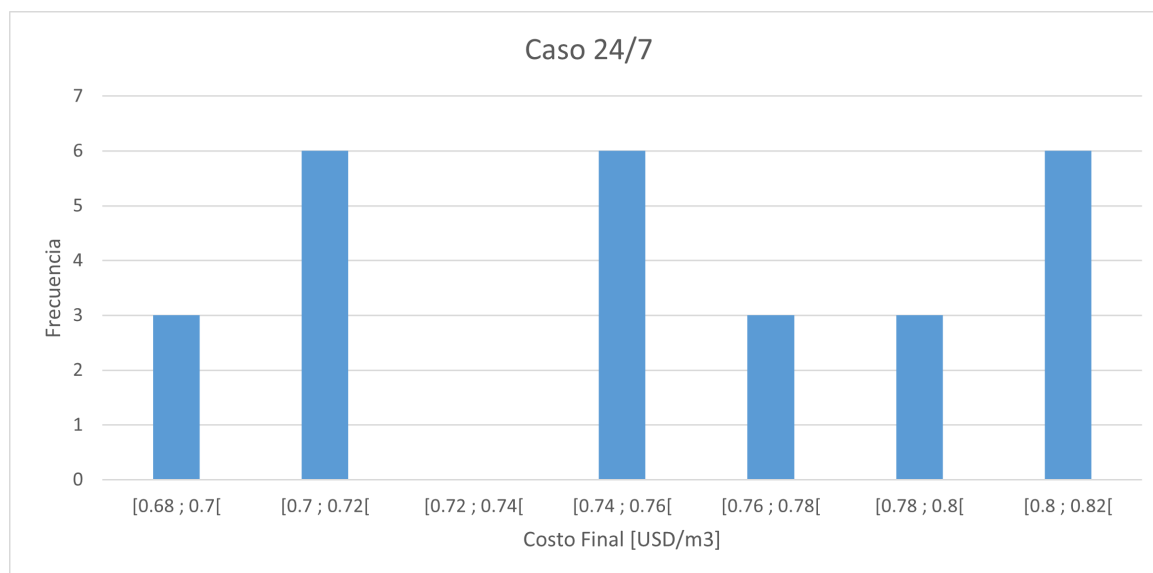


Figura 6.41: Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso 24/7

Fuente: Elaboración propia

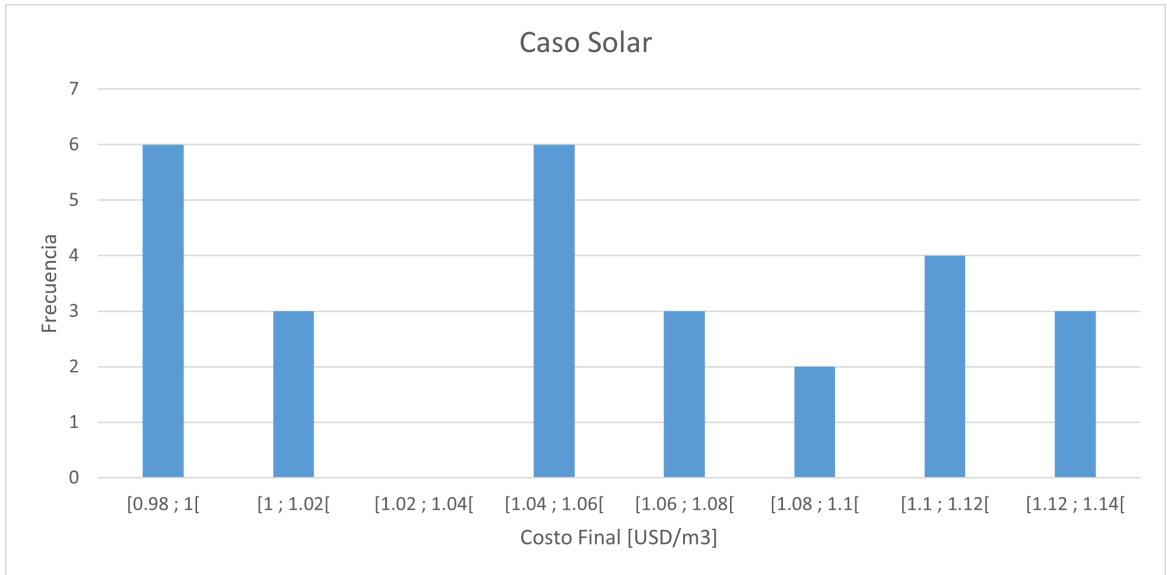


Figura 6.42: Resultados gráficos del costo de elevar $1 m^3$ de agua en el caso Solar
Fuente: Elaboración propia

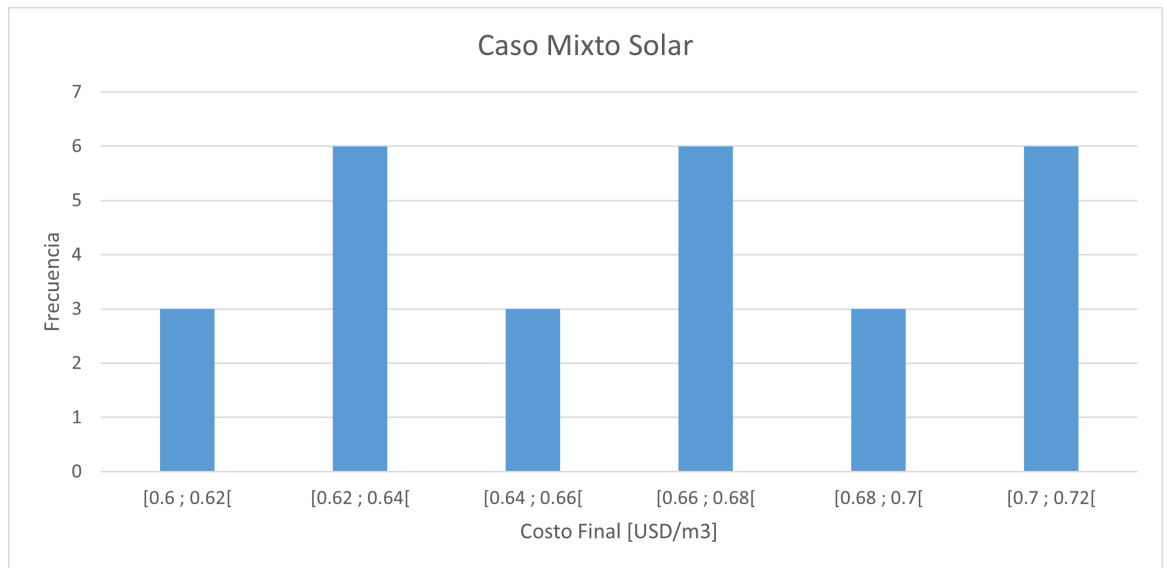


Figura 6.43: Resultados gráficos del costo de elevar $1 m^3$ de agua en el caso Mixto Solar
Fuente: Elaboración propia

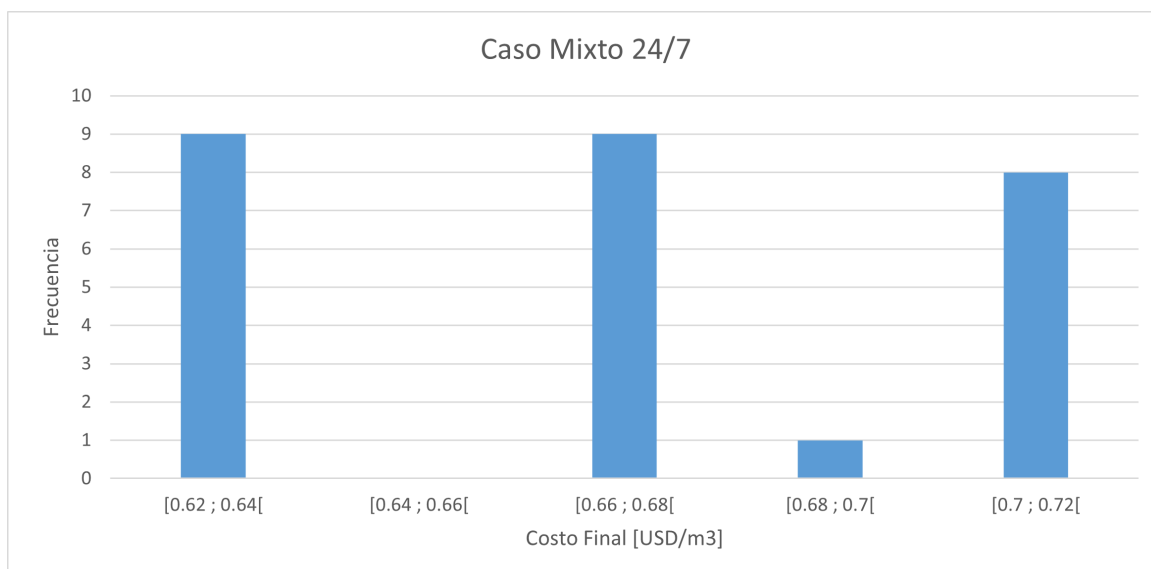


Figura 6.44: Resultados gráficos del costo de elevar 1 m^3 de agua en el caso Mixto 24/7

Fuente: Elaboración propia

Capítulo 7

Análisis de resultados

7.1. Proyectos reales

Para comenzar, en la sección Síntesis proyectos reales se puede ver en la figura n° 6.9 (p. 89) la diferencia de costos energéticos en los distintos tramos para cada uno de los casos modelados. Se puede evidenciar la diferencia abismal que existe entre el Proyecto RT Sulfuros y el resto de los proyectos. Esto mencionado, se genera dado que el valor de la energía requerida depende de múltiples factores. Dentro de estos se encuentra el caudal solicitado, la distancia total del trazado y de la altura a elevar. Aunque principalmente, el valor de la energía requerida y por lo tanto, el costo energético anual depende del caudal a elevar, como podemos ver en la figura 6.15 (p. 92), se puede ver para el caso del Proyecto TEA con el Proyecto Minera Los Pelambres, este último presenta un largo mayor que TEA, pero ambos poseen una altura a elevar similar, así mismo, el Proyecto TEA requiere un caudal de 900 [l/s] mientras que el Proyecto Los Pelambres uno de 400 [l/s]. Así, la diferencia de los costos energético anuales es de aproximadamente 3.5 veces, donde además, para el caso del Proyecto TEA, dentro de la estación de bombeo contiene 2 bombas de impulsión mientras que el Proyecto Los Pelambres posee una sola. Esto mismo se puede apreciar comparando el Proyecto Orcoma con el Proyecto TEA. Estos presentan un largo y una altura a elevar el agua similar. Aún así, dado el gran caudal requerido en el Proyecto TEA, los costos energéticos son aproximadamente 6 a 8 veces más grandes. De esta forma, los principales influyentes en el gasto energético y por lo tanto en los costos relacionados a la energía utilizada, son la cantidad de bombas centrífugas dentro de la estación de bombeo, el caudal solicitado y la elevación a la cual hay que elevar el agua. Donde cabe destacar que en este último depende el largo del trazado, pero este tiene una menor influencia. Luego, podemos ver que en la mayoría de los casos, el caso con mayor costo energético es el caso Solar, el cual posee el costo de la energía más económico. Esto, dado que generalmente el caudal de funcionamiento del caso Solar es entre 2 a 3 veces más grande que en el resto de los casos, lo que provoca que se necesite un mayor número de bombas dentro de las estaciones de bombeo e implica que se generen mayores pérdidas de carga, aumentando la carga dinámica total (TDH). Con lo anteriormente mencionado, se genera un gran aumento en el costo energético del proyecto. Finalmente, en casi todos los proyectos, se tiene para el caso 24/7 que los costos energéticos son iguales o mayores que en los casos Mixto Solar y Mixto 24/7, donde estos últimos dos presentan costos muy similares entre ellos.

Luego, si es que se analiza el costo de las tuberías (ver figura n° 6.10 (p. 89)), se puede apreciar nuevamente la gran diferencia entre el Proyecto RT Sulfuros con el resto de los proyectos. Esto al igual que antes, ocurre por el gran caudal que requiere el proyecto, además de su largo la altura de elevación a la cual se tiene que impulsar el agua. De esta forma, en cada uno de los proyectos se puede evidenciar (ver figura n° 6.16 (p. 92)) que para los casos donde el largo del trazado es mayor o donde se tiene un caudal a elevar mayor, se tienen costos más altos. Esto se genera dado que el largo hace que aumente el valor de las pérdidas de carga y por lo tanto aumente el TDH. Al aumentar el TDH se genera un aumento en la presión que debe soportar el sistema de tuberías, lo que implica un aumento en el espesor de la misma. Un aumento en el espesor de las tuberías hace que la masa total de acero crezca, alzando de esta forma, el costo total del acero. A su vez, un factor que genera impacto en el costo de las tuberías es el caudal requerido por el proyecto. Se tiene que el Proyecto TEA necesita un caudal mayor que el resto de los proyectos, lo que se traduce en la mayoría de los casos, un costo de tuberías mayor. Además de esto, se puede visualizar que el caso 24/7 posee generalmente el costo de tuberías menor (o igual a un caso Mixto Solar o Mixto 24/7), lo que se debe principalmente a que en el resto de los casos, el caudal a elevar durante el día es mayor, lo que aumenta las pérdidas de carga y la presión que tienen que soportar las tuberías, generando como se mencionó anteriormente un costo más elevado.

Analizando el caso del Capex y del Opex en cada tramo para cada uno de los casos y para cada proyecto modelado, al igual que se comentó anteriormente, el Proyecto RT Sulfuros presenta costos más elevados que los otros 3 proyectos, debido a las características del proyecto. De esta forma, en las figuras n° 6.16 y n° 6.17 (p. 92 y 93) se puede apreciar que el Capex está directamente condicionado por el costo de las tuberías. Esto dado que en la mayoría de los casos el valor de las tuberías y su instalación es igual al 50 % o más del Capex total. De esta forma las gráficas del precio de tuberías y del Capex son muy similares en todos los proyectos para cada uno de los casos. Así mismo, el valor del Opex está influenciado por el valor de las tuberías. Esto ya que el mantenimiento anual de las tuberías hace que este valor aumente significativamente. Pero el costo operacional no solo está condicionado por las tuberías, si no que también se ve influenciado casi en su totalidad por el costo de la energía utilizada en el sistema de impulsión. Luego, al igual que antes, el valor tanto del Capex como del Opex depende del caudal requerido, del largo del trazado y de la carga dinámica total. Esto debido que a mayor presiones y caudales de funcionamiento, además de que el costo de las tuberías aumente, se necesitan mayores bombas dentro de las estaciones de bombeo y por lo tanto además de tener un Capex mayor, el costo energético aumenta también. Un mayor número de bombas dentro de las estaciones de bombeo aumenta tanto el Capex como el Opex por el mantenimiento mismo de las bombas. Aquí, nuevamente el caso Solar es el más costoso, tanto en el Capex como en el Opex, debido a que como se mencionó anteriormente las presiones y los caudales de funcionamiento son mayores que en los otros casos. Esto se ve directamente reflejado en el gráfico del Valor Actual Neto (ver figura n° 6.19 (p. 94)), dado que la tendencia de las gráficas del Capex y del Opex se repiten para el caso del VAN. Al igual que antes, en los gráficos del Capex, Opex y VAN (ver figuras n° 6.17, n° 6.18 y n° 6.19 (p. 93 y 94) respectivamente) se puede apreciar que el caso Solar es el más costoso y luego están los otros 3 casos, donde dependiendo del proyecto se tiene un caso más económicos que los otros, pero generalmente son muy similares.

Viendo el gráfico n° 6.14 (p. 91), nuevamente el Proyecto RT Sulfuros destaca muy por

sobre el resto de los proyectos. Así mismo, en la figura n° 6.20 (p. 94) se pueden observar los costos finales de elevar 1 [m³] de agua para cada caso de los proyectos reales modelados, donde destaca nuevamente el caso Solar como el más costoso. Como se mencionó anteriormente, esto es generado debido a que el gran caudal, provoca que las presiones sean más grandes que en cualquier otro caso, lo que genera que se tengan tuberías con mayor espesor y además, una mayor cantidad de bombas dentro de las estaciones de bombeo. Lo que influye directamente en un aumento en el gasto de inversión inicial y un costo operacional mayor que en los otros casos modelados. Al tener un costo en equipos muy grandes para el caso Solar, la mantención de estos equipos hace que el Opex aumente significativamente. Cabe mencionar que un caudal más grande afecta en mayor proporción en el costo final, dado que genera costos más grandes tanto en las tuberías como en los costos energéticos. Además de esto, podemos ver que el costo de elevar 1 [m³] de agua depende también, del largo del tramo y del TDH, donde esta última depende igualmente de que tan largo es el trazado, dado que si es muy largo, provoca que se tengan mayores pérdidas de carga y por lo tanto el TDH aumenta. Luego, el costo final es influenciado prácticamente en su totalidad por el costo de operación del sistema de impulsión y este es influenciado directamente por el gasto energético del sistema, dado que el costo de la energía utilizada anualmente es aproximadamente un 90-95 % del costo operacional anual de todo el sistema de impulsión.

Cabe mencionar que cuando al modelo se le entregan ya sean trazados o caudales de funcionamiento que no están dentro de su alcance y de su diseño, el modelo, al verificar que no cumple con los criterios de diseño, este no considera estos casos. Esto se puede ver para el modelamiento del Proyecto RT Sulfuros, donde el único caso que se modeló fue el caso 24/7, dado que para todo el resto, la velocidad del agua dentro de las tuberías durante el día era superior a 3, alcanzando valores de hasta 5 [m/s]. Esto mencionado se puede evidenciar en las tablas n° 6.14, n° 6.16 y n° 6.18 (p. 86, 87 y 88). Para los casos donde no se encuentre alguna configuración posible, el modelo entrega N/D en la configuración, lo cual tiene como significado “No Determinado”.

Además, se tiene en casi todos los resultados del modelo, que las velocidades del fluido son entre 0.8 y 2, esto tiene sentido, dado que si se tuviesen velocidades más bajas, podría disminuir el diámetro de la tubería para aumentar así la velocidad y tener un costo en las tuberías menor. Mientras que para velocidades más altas, estas comienzan a generar mayores pérdidas de carga en el sistema de impulsión, lo que genera un aumento en las presiones de las tuberías, lo que provoca que las tuberías posean un espesor mayor aumentando así su costo. Además, para velocidades más grandes, el costo energético del sistema de impulsión aumenta, lo que provoca por su parte, un aumento también en los costos operacionales del sistema provocando un aumento en el costo final de elevar 1 [m³] de agua. De esta forma, al mantener las velocidades en este rango, se busca encontrar el óptimo entre que la velocidad sea muy baja y pueda disminuir el diámetro y que la velocidad sea muy alta y aumente tanto los costos de las tuberías como el costo energético.

Si es que se comparan las características de los sistemas de impulsión de agua con los resultados del modelo, se pueden evidenciar diferencias.

De esta forma se presentan a continuación las características de los modelos reales y de los resultados del modelo.

Tabla 7.1: Proyectos reales v/s Modelado
Fuente: Elaboración propia

Proyecto	Q_r	Bombas en EB_r	d_r	Q_m	Bombas en EB_m	d_m
Orcoma	400	2	32	200	2	22
TEA	900	7	34	900	3	36
Los Pelambres	450	5	24	400	2	28
RT Sulfuros	1956	-	48	1956	5	46

Donde:

- Q_r [l/s]: Caudal de diseño del proyecto real
- Bombas en EB_r [-]: n° de bombas de diseño en la estación de bombeo en el proyecto real
- d_r ["]: Diámetro de las tuberías de diseño del proyecto real
- Q_m [l/s]: Caudal de diseño para el modelo
- Bombas en EB_m [-]: n° de bombas en la estación de bombeo modelado
- d_m ["]: Diámetro de las tuberías entregado por el modelo

La diferencia que se observa entre los proyectos reales y los resultados del modelo puede atribuirse a varios factores. Inicialmente, las disparidades podrían surgir debido a diferentes criterios de diseño empleados en el desarrollo del sistema de impulsión para cada proyecto en particular. Cada empresa puede haber aplicado enfoques distintos, lo que resulta en soluciones variadas en términos de dimensionamiento y configuración. Además, para el caso particular del Proyecto Orcoma destaca la relevancia del caudal de diseño, que es el doble del caudal que utilizó en el modelamiento. Esta diferencia en los caudales puede influir en el diámetro de diseño y en las características del sistema. Asimismo, las restricciones eléctricas en cada proyecto pueden también desempeñar un papel significativo. Estas limitaciones pueden llevar a la toma de distintas decisiones, como aumentar el diámetro de diseño para reducir la velocidad del agua y, de esta forma, disminuir el gasto energético del sistema de impulsión. De todas formas, es importante destacar que no se presentan mayores discrepancias entre los diámetros de los proyectos reales y los diámetros calculados por el modelo. En el caso de las bombas en las estaciones de bombeo, al igual que antes, las diferencias pueden deberse a distintos criterios de diseño adoptados por cada empresa responsable del proyecto o como se mencionó anteriormente, por limitaciones eléctricas.

Los costos finales que se presentan dentro de los costos asociados a las distintas configuraciones que se encuentran en el capítulo Resultados (p. 74), son los costos de elevar 1 [m^3] de agua para los distintos casos en los que se realizó una modelación. Estos costos finales

son menores a los costos reales que se tienen en los sistemas de impulsión de agua. Esto viene dado ya que el modelo no considera todos los costos que se tienen en los proyectos reales. Tomando un ejemplo para el Proyecto TEA, el modelo considera un costo total para las tuberías aproximadamente igual a 13.000.000 [USD], mientras que el proyecto real considera un costo total igual a 15.000.000 [USD] (valor entregado por la empresa SQM). Esto es bastante cercano al costo que entrega el modelo. De esta forma, dentro de los costos no considerados se tienen, el hormigón, piezas especiales para las tuberías, revestimiento para las uniones, equipos eléctricos, válvulas, cables, canalizaciones, instrumentación, costos de administración, instalación eléctrica, etc...

Continuando con la idea anterior, los costos de desalinización y elevación de agua en un sistema operativo las 24 horas del día (caso 24/7) con costos energéticos de 50 y 100 [USD/MWh], se estipulan en 1.9 y 2.6 [USD/ m^3] (N. Garcia, 2017) respectivamente. Dado que el modelo tiene un costo de la energía igual a 65 [USD/MWh] para el caso 24/7, los costos de desalinizar e impulsar agua se estiman iguales a 2.11 [USD/ m^3] siguiendo la misma tendencia anteriormente mencionada. Comparando con los resultados del modelo, se tienen valores de elevar 1 [m^3] de agua en promedio iguales a 0.4-0.6 [USD/ m^3], donde esta diferencia es debida ya que el modelo no considera todos los costos que están asociados a los sistemas de desalinización e impulsión de agua. Si consideramos directamente los costos finales para el caso 24/7 del Proyecto TEA, estos son iguales a 0.755 [USD/ m^3], lo cual está por debajo de lo que se menciona anteriormente. Ahora bien, si es que se considera el Capex total del proyecto TEA el cual tiene un costo igual a 300.000.000 [USD] (valor entregado por la empresa SQM), el costo final se eleva a 1.25 [USD/ m^3], aumentando así en un 66 %. Y finalmente si es que se agregan los costos de desalinizar el agua, 0.6-1.2 [USD/ m^3] (N. Garcia, 2017), se obtiene un costo final para el Proyecto TEA igual a 1.85-2.45 [USD/ m^3]. El valor igual a 2.11 [USD/ m^3] está incluido en este rango. De esta forma, dentro de los costos finales promedios, si se le agrega el costo de desalinizar el agua, estos valores se elevan a 1-1.8 [USD/ m^3] aproximadamente y si se le agregan a los costos finales un aumento de un 66 %, se obtienen valores de 1.7-2.8 [USD/ m^3] dependiendo de cada caso, costos los cuales están cercanos al rango 1.9 y 2.6 [USD/ m^3] que se menciono inicialmente. Esto, se puede ver gráficamente en la figura n° 6.21, presentada en la sección Síntesis proyectos reales (p. 84).

Para finalizar, es importante destacar el análisis del KPI presentado en la tabla n° 6.19 presentada en la sección Síntesis proyectos reales (p. 84). Este KPI se calcula utilizando la ecuación n° 3.42 que se encuentra en la subsección Key Performance Indicator (KPI) (p. 58). El valor obtenido mediante esta ecuación permite realizar comparaciones directas entre proyectos. El KPI relaciona factores clave como el Capex, Opex, longitud, altura a elevar y caudal solicitado en cada uno de los proyectos modelados. En función de los resultados obtenidos, podemos observar que el Proyecto RT Sulfuros presenta el KPI más bajo, lo que indica una mayor eficiencia en su diseño en comparación con los otros proyectos. A continuación, le sigue el Proyecto Los Pelambres, luego el Proyecto TEA y finalmente el Proyecto Orcoma, en ese orden de mayor a menor eficiencia. Esta información resulta invaluable para tomar decisiones informadas sobre la viabilidad y la optimización de los proyectos en cuestión. Así, se pueden priorizar aquellos con un diseño más eficiente, lo que potencialmente puede conducir a mejores resultados y ahorros en recursos.

7.2. Proyectos modificados

En la sección Proyectos modificados (p. 95) se tienen dos proyectos, el Proyecto Orcoma modificado, que cuenta con 1 estación de bombeo y el Proyecto TEA modificado, el cual cuenta con 2 estaciones de bombeo de bombeo. Se comparan estos proyectos mencionados con el Proyecto Orcoma real, el cual posee 2 estaciones de bombeo y con el Proyecto TEA real, el cual posee 1 sola estación de bombeo.

Inicialmente, como se puede observar en las tablas n° 6.24, n° 6.25, n° 6.26, n° 6.27, n° 6.28, n° 6.29, n° 6.30 y n° 6.31 de la sección Síntesis proyectos modificados (p. 99, 100, 101, 102 y 103) se tiene que en casi todos los casos, tanto en el Proyecto Orcoma modificado como el Proyecto TEA modificado, el modelo de bomba y la cantidad de bombas dentro de las estaciones son los mismos que en el caso real. Luego, una de las grandes variaciones entre el real con el modificado es el caso del espesor de las tuberías, dado que este aumenta cuando la cantidad de EB disminuye, mientras que disminuye si es que se aumenta de 1 estación a 2 estaciones.

Así mismo, se puede apreciar en la figuras n° 6.25, n° 6.26, n° 6.27, n° 6.28, n° 6.29, n° 6.30, n° 6.31, n° 6.32, n° 6.33, n° 6.34, n° 6.35, n° 6.36, n° 6.37, n° 6.38, n° 6.39 y n° 6.40 (p. 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110 y 111) presentadas en la sección Síntesis proyectos modificados, que comparando el Proyecto Orcoma modificado con el real, se presenta en la mayoría de los casos que el costo energético cuando se tienen 2 estaciones de bombeo es mayor que cuando solo se tiene una. Esto generado dado que en los casos donde se tienen múltiples estaciones de bombeo, el número de bombas de impulsión es mayor, por lo que el consumo energético es mayor. Además de esto, se presentan costos de operación mayores que cuando solo se tiene una sola estación de bombeo, generado nuevamente por el aumento de los costos de energía. Al mismo tiempo, el costo de inversión inicial es menor para los casos donde se tienen 2 estaciones de bombeo, dado que los costos de las tuberías son casi siempre más económicos que cuando se tiene una sola estación de bombeo. Esto es provocado por que cuando se tienen 2 estaciones de bombeo, la presión interna de las tuberías disminuye, por lo que el espesor también disminuye y finalmente el costo asociado a las tuberías del sistema de impulsión de agua disminuye también. Asimismo, se tiene tanto un VAN como un costo final de elevar 1 m^3 de agua mayor cuando se tienen 2 estaciones de bombeo. Esto es generado por el aumento que se provoca en el costo operacional cuando se tiene más de una estación de bombeo.

Cabe mencionar que las diferencias ya sea en cada uno de los casos como en los dos proyectos modelados, son mínimas, ya que no se presentan diferencias abismales en términos de costos en los casos donde se tengan ya sea 1 estación de bombeo como 2 estaciones de bombeo. Estas diferencias entre cada uno de los casos en la mayoría de los casos es de $\pm 1-2\%$.

7.3. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad tiene como propósito proporcionar una visión más completa y robusta del comportamiento del modelo ante cambios en estas variables específicas. Al com-

prender la magnitud de su influencia, podremos tomar decisiones más informadas y ajustar el proyecto de manera adecuada para optimizar sus resultados.

Comenzando con el análisis de sensibilidad realizado para el Proyecto TEA, en prácticamente todas las configuraciones después de realizar alguna variación en las variables, se obtienen sistemas de impulsión muy similares. Estas configuraciones muestran cambios en algunos casos, como los diámetros de las tuberías. Es de suma importancia destacar que, aunque las configuraciones sean similares entre ellas, pequeños cambios en los diámetros de las tuberías y sus espesores pueden tener efectos significativos en el rendimiento y en los costos asociados al sistema de impulsión. Por lo tanto, es fundamental evaluar cuidadosamente las implicancias que genera cada variación y realizar una comparación detallada de los resultados.

En el presente análisis, se evaluarán individualmente las distintas variables, comenzando con las variaciones realizadas al costo de la energía. Como se muestra en la tabla n° 6.36, presentada en la sección Síntesis análisis de sensibilidad (p. 116), modificaciones en el costo de la energía es la variación que más influye en el costo final de elevar 1 $[m^3]$ de agua. Esto debido a que una variación de un $\pm 10\%$ en los costos de la energía provoca variaciones del $\pm 7-6\%$, en el costo final de elevar 1 m^3 de agua, dependiendo de cada caso.

Por otro lado, en el caso de las variaciones en el costo del acero utilizado en el sistema de tuberías, estas provocan cambios de alrededor de $\pm 1-2\%$ en el costo final, por lo que son variaciones significativamente menores que en el caso de la energía.

Así mismo, al analizar las variaciones ocasionadas por las pérdidas singulares, se observa que estas apenas generan una variación en el costo final de $\pm 0.02-0.06\%$. Es decir, esta variable tienen un impacto insignificante en el costo final de elevar agua.

En resumen, en orden de importancia, se encuentran los costos de las tuberías y, finalmente, el valor de las pérdidas singulares, siendo esta última prácticamente insignificante.

Luego, en la subsección Síntesis análisis de sensibilidad se presentan las figuras n° 6.41, n° 6.42, n° 6.43 y n° 6.44 (p. 117, 118 y 119). Estas figuras confirman lo mencionado anteriormente, ya que cada una muestra tres grupos distintos. El primer grupo es el grupo central, que representa los escenarios en los que el valor de la energía se mantiene sin variaciones. A continuación, el grupo de la izquierda muestra los casos en los que el valor de la energía disminuye, y por último, el grupo de la derecha representa los escenarios en los que el valor de la energía aumenta.

Finalmente, estas figuras indican los intervalos de los valores del costo final de elevar 1 $[m^3]$ de agua en cada uno de los casos evaluados. Así mismo, se puede observar que para el caso 24/7 el valor del costo final se encuentra entre 0.68 y 0.82 $[\text{USD}/m^3]$, para el caso Solar, el valor del costo final oscila entre 0.98 y 1.14 $[\text{USD}/m^3]$. Asimismo, para el caso Mixto Solar, los valores del costo final se encuentran entre 0.60 y 0.72 $[\text{USD}/m^3]$ y finalmente en el caso Mixto 24/7 el valor del costo final está entre 0.62 y 0.72 $[\text{USD}/m^3]$.

Capítulo 8

Conclusiones

Se determinaron los costos de la energía para cada bloque horario, los cuales se corroboraron con datos reales del mercado. Con estos datos se logró calcular el costo energético anual para cada una de las modelaciones realizadas. Donde este costo está incluido en los costos asociados a la operación del sistema de impulsión de agua.

Se determinó con éxito las variables relevantes al modelo de un sistema de impulsión de agua. Donde además se establecieron las relaciones entre estas variables para el correcto funcionamiento del modelo.

Con los costos energéticos y el resto de las variables importantes que se incorporaron en el modelo, fue posible desarrollar un modelo hidráulico, el cual entrega una configuración la cual detalla la cantidad de bombas presentes en la estación de bombeo, el modelo de las bombas presentes, el diámetro interno de la tubería, el espesor de esta, el revestimiento interno de las tuberías, además de los costos de inversión y de operación asociados.

Se logró verificar si es que el modelo aplica o no aplica en proyectos reales, donde principalmente la modelación se realizó con éxito, considerando que los criterios de diseño pueden no ser los mismos utilizados por las distintas empresas que realizaron los proyectos reales. Donde el modelo revisa si es que se cumplen o no los criterios de diseño, dejando fuera de los resultados los casos en donde estos no se cumplan. Además de esto, se tiene que el modelo entrega costos finales aplicables a la realidad, donde si se le agregan todos los costos iniciales y los costos operacionales, además de incorporar el sistema de desalinización, se obtienen valores cercanos a los que se encuentran actualmente en la realidad.

De esta forma se logró definir un modelo de un sistema de impulsión de agua, el cual minimiza los costos energéticos, los costos de inversión y los de operación. Donde finalmente minimiza el costo total que se tiene que considerar para elevar $1 m^3$ de agua desde un punto a otro.

El modelo desarrollado se realizó de tal forma que sea de muy sencilla utilización. Como se mencionó en desarrollo del informe, para su funcionamiento necesita un archivo kmz, el cual detalla la longitud, la latitud y la elevación de los puntos del trazado y el caudal de funcionamiento del sistema de impulsión de agua. Una vez que se le entregan estas dos variables,

el modelo relaciona más de 40 variables automáticamente, considerando 4 restricciones para el correcto funcionamiento del sistema de impulsión y que el modelo sea lo más eficiente y longevo posible.

Si bien el modelo considera más de 40 variables y un análisis técnico económico, hay variables que se excluyeron en su alcance pero que se tienen que considerar de todas formas en el desarrollo de un sistema de impulsión de agua. Una de estas es por ejemplo la incorporación de las válvulas de venteo, las cuales ayudan a liberar sobre presiones en las tuberías o a rellenar vacíos dentro de las tuberías. Estas válvulas son vitales para que el proyecto sea viable en el tiempo, dado que si no se utilizan las tuberías pueden dañarse de forma irreparable. Otra variable que no se considera en el modelo es todo el sistema eléctrico que conllevan estos sistemas de impulsión, lo que aumenta significativamente el costo total del proyecto. Además de esto, se tienen variables las cuales al ser un caso genérico, no se lograron definir de manera extremadamente precisa. Dentro de estas se tienen los costos de mantención y de instalación de los equipos.

De los resultados del modelo, la conclusión más importante es que independientemente de que el costo de la energía durante el bloque solar sea aproximadamente un 50 % o menos del costo en los otros bloques, el costo energético en el modelamiento del caso Solar es el más elevado en la gran mayoría de los casos. Esto debido a que el caudal de funcionamiento aumenta en aproximadamente 2 o 3 veces el valor requerido, por lo que se necesita una mayor cantidad de bombas en paralelo. De esta forma, dado un mayor caudal y un mayor número de bombas, la cantidad de energía que requiere el sistema de impulsión para su funcionamiento aumenta significativamente y con esto los costos energéticos. Además de poseer un costo energético mayor, el gran caudal que conlleva el caso Solar, hace que el costo de inversión aumente, por el aumento del diámetro y espesor de las tuberías de acero.

Así mismo, dentro de los costos más influyentes dentro del modelo, son los costos asociados a las tuberías de acero y el costo de la energía anual utilizada por el sistema de impulsión. Donde este último es el que más afecta al Opex del proyecto y de esta forma, provoca que el Opex tenga una influencia mayor en el VAN y en el costo final de elevar 1 [m^3] de agua que los costos de inversión inicial del proyecto. Esto se puede evidenciar en el análisis de sensibilidad realizado, dado que en este, la energía es la variable que presenta mayores variaciones en el costo final de elevar 1 m^3 de agua.

Posibles incorporaciones al modelo son, el desarrollo de un modelo de un sistema de impulsión de agua el cual indique la cantidad de estaciones de bombeo óptimas y sus localizaciones. Además, se puede incorporar para las tuberías, el cambio de material dentro de zonas del trazado que se tengan presiones más bajas, las cuales tuberías de HDPE puedan soportar de buena manera, lo que influiría de gran manera en el costo de inversión inicial en los proyectos. Otra variable asociada a los costos del sistema de impulsión de agua, es incorporar los costos asociados a la instalación eléctrica. Así mismo, se puede realizar un análisis de sensibilidad mucho más detallado de la gran variedad de variables que se tienen dentro del modelo.

Finalmente, este modelo es un acercamiento inicial a como debiera ser el sistema de impulsión final, donde dada la gran cantidad de criterios que se le pueden incluir al diseño de un sistema de impulsión de agua de mar, esto hace un esquema inicial de como debiera ser

el sistema de impulsión de agua final.

Bibliografía

- American National Standards Institute 9.6.3. (2012). *Rotodynamic (centrifugal and vertical) pumps - guideline for allowable operating region*. (p. 1)
- American Petroleum Institute. (2018). *Specification for line pipe 5l*.
- American Water Works Association C213. (2015). *Fusion-bonded epoxy coatings and linings for steel water pipe and fittings*. (p. 6)
- American Water Works Association C222. (2000). *Standar for polyurethane coating for the interior and exterior of steel water pipe and fittings*. (p. 5)
- American Water Works Association C512. (2007). *Air release, air/vacuum, and combination air valves for waterworks service*. (p. 13)
- American Water Works Association M51. (2001). *Manual of water supply*. (p. 13)
- American Water Works Association M55. (2006). *Pe pipe-design and installation*.
- Annan, M. (2018). Effect of minor losses during steady flow in transmission pipelines – case study “water transmission system upgrade in northern saudi arabia”. , 4299-4305. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016818302278>)
- Asociación Chilena de Energías Renovables y Almacenamiento. (2023b). (<https://acera.cl/>)
- Asociación Chilena de Energía Renovables y Almacenamiento. (2023a). *Estadísticas generación de energía*. (<https://acera.cl/estadisticas-generacion-de-energia/>)
- Codelco. (2013). *Estudio de impacto ambiental proyecto planta desaladora rt sulfuros*. (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=8210094>)
- Codelco. (2017). *Declaración de impacto ambiental proyecto planta desaladora rt sulfuros*. (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2132655860>)
- Comisión Nacional de Energía. (2023a). *Normativas eléctricas*. (<https://www.cne.cl/normativas/electrica/>)
- Comisión Nacional de Energía. (2023b). (<https://www.cne.cl/>)
- Consultor Ingeniería Marcelo Encalada Zárata. (2023). *Asesoría proyecto*. (p. 14)
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2023a). *Sistema eléctrico nacional*. (<https://www.coordinador.cl/sistema-electrico/>)
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2023b). (<https://www.coordinador.cl/>)
- de Minería, S. N. (2019). *Informe consumo de agua en minería*. (<https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2022/05/Agua-en-Mineria-2019-2020-VF.pdf>)
- Díaz, J. (2014). *Diseño de una metodología para la evaluación energética de*

- un equipo electromecánico de bombeo y aplicación practica.* ([https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/54865/Trabajo % 20Final % 20de % 20Grado _14343658534396399807792480692362.pdf?sequence=2](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/54865/Trabajo%20Final%20de%20Grado_14343658534396399807792480692362.pdf?sequence=2))
- Eco Earth Elements SpA. (2022). *Estudio de impacto ambiental proyecto ciclón exploradora.* (<https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=0e/42/6c3d7be31d4ccf1c859be7e907e0a5b06574>)
- Empresas Eléctricas. (2023). *Empresas eléctricas a.g.* (<https://www.licitacioneselectricas.cl/>)
- Engineering ToolBox. (2005). Seawater - properties. (https://www.engineeringtoolbox.com/sea-water-properties-d_840.html)
- Galbarro, H. R. (2023). *Características mecánicas del acero.* (<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html>)
- Garr, J. (2008). *Pumping station design* (3rd ed.). (p. 495)
- GIZ y Ministerio de Energía. (2021). *Las energías renovables en el mercado eléctrico chileno.* (p. 195)
- Goodboy, K. P. (2020). *Evaluation of desalinated seawater vs. filtered raw seawater for heap leach copper extraction on mountaintop mines in arid regions.* (https://www.deswater.com/DWT_articles/vol_194_papers/194_2020_1.pdf)
- GPS Visualizer. (2023). *Gps visualizer elevation.* (<https://www.gpsvisualizer.com/elevation>)
- Hernandez, H. (2021). *Eficiencia energética en sistemas de bombeo.* (<https://www.disraelgroup.com/post/eficiencia-energetica-en-sistemas-de-bombeo>)
- Ingeniería de Fluidos. (2023). *Que es el golpe de ariete ?* (<https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>)
- Jaime Illanes y Asociados. (2016). *Estudio de impacto ambiental proyecto los pelambres.* (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2131370199>)
- Ministerio del Medio Ambiente. (2013). *Decreto supremo nº40: Reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental.* (p. 126). (<https://bcn.cl/2ep4b>)
- Ministerio del Medio Ambiente. (2023). (<https://mma.gob.cl/>)
- Ministerio Secretaria General de la Presidencia. (2022). *Ley 19.300: Ley sobre bases generales del medio ambiente.* (p. 50). (<https://bcn.cl/32lk3>)
- Monge, M. A. (2020). De las conducciones y algunos aspectos relacionados con su calculo. (<https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/conducciones-y-algunos-aspectos-relacionados-calculo>)
- Muñoz, P. (2022). *Modulo i - clase 1 - introducción.* (https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2022/1/CI5115/1/material_docente/detalle?id=5224361)
- MWH Chile. (2016). *Estudio de impacto ambiental proyecto quebrada blanca fase 2.* (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2131794108>)
- Nicolas Garcia Bernal. (2017). *Costo económico del uso de agua desalada en la minería chilena.*

- Orcoma. (2015). *Estudio de impacto ambiental proyecto orcoma*. (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2130977149>)
- Peters, M. (2002). *Plant design and economics for chemical engineers* (5th ed.).
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023a). *Permisos y pronunciamientos ambientales sectoriales*. (<https://www.sea.gob.cl/documentacion/permisos-autorizaciones-ambientales/permisos-pronunciamientos-ambientales-sectoriales>)
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023b). (<https://sea.gob.cl/>)
- Servicio de Evaluación Ambiental. (2023c). *¿declaración o estudio de impacto ambiental?* (<https://www.sea.gob.cl/sea/declaracion-estudio-impacto-ambiental>)
- ServiQualita. (2016). La densidad del agua de mares y océanos. (<https://serviqualita.es/index.php/inicio/blog/item/151-la-densidad-del-agua-de-mares-y-oceanos>)
- Sintech Pumps. (2020). *¿cómo medir la eficiencia de una bomba centrífuga?* (<https://www.sintechpumps.com/bombas-centrifugas/como-medir-la-eficiencia-de-una-bomba-centrifuga/?lang=es>)
- Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. (2023). *Buscar proyecto*. (<https://seia.sea.gob.cl/busqueda/buscarProyectoAction.php>)
- SQM. (2017). *Estudio de impacto ambiental proyecto tente en el aire*. (<https://seia.sea.gob.cl/documentos/documento.php?idDocumento=2142169168>)
- Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile. (2023). (<https://portal.sma.gob.cl/>)
- The American Society of Mechanical Engineers. (2015). *The american society of mechanical engineers*. (p. 7-15)
- The Piping Mart. (2022). The density of carbon steel. (<https://blog.thepipingmart.com/metals/the-density-of-carbon-steel/>)
- Universidad Tecnológica de Panamá. (2022). *Mecánica de fluidos*. (<https://www.studocu.com/latam/document/universidad-tecnologica-de-panama/mecanica-de-fluidos/asignacion-n03-mecanica-de-fluidos/14422243>)
- VolRoll Hydro. (2020). *Extraordinaria proyección mediante tecnología de recubrimiento integral de poliuretano*. (p. 2). (https://www.vonroll-hydro.world/files/content/downloads/Broschueren/rohre-und-formstuecke/ecopur/191007_vonRoll_ECOPUR_ES.pdf)

Anexos

Anexo A. Información

Tabla A.1: Extracto de tabla con diámetros nominales, diámetros externos, espesores y schedule de las tuberías
Fuente: “ASME B36.10M” ASME, 2015

DN ["]	DN [mm]	d_{ext} [mm]	Schedule (Sch)	Espesor (ε) [mm]	d_{int} [mm]
12	300	328.8	5	3.96	324.84
12	300	328.8	10	4.57	324.23
12	300	328.8	20	6.35	322.45
12	300	328.8	30	8.38	320.42
12	300	328.8	40	10.31	318.49
12	300	328.8	60	14.27	314.53
12	300	328.8	80	17.48	311.32
12	300	328.8	100	21.44	307.36
12	300	328.8	120	25.4	303.4
14	350	355.6	5	3.96	351.64
14	350	355.6	10	6.35	349.25
14	350	355.6	20	7.92	347.68
14	350	355.6	30	9.53	346.07
14	350	355.6	40	11.13	344.47
14	350	355.6	60	15.09	340.51
14	350	355.6	80	19.05	336.55
14	350	355.6	100	23.83	331.77
14	350	355.6	120	27.79	327.81
16	400	406.4	5	4.19	402.21
16	400	406.4	10	6.35	400.05
16	400	406.4	20	7.92	398.48
16	400	406.4	30	9.53	396.87
16	400	406.4	40	12.7	393.7
16	400	406.4	60	16.66	389.74
16	400	406.4	80	21.44	384.96

DN ["]	DN [mm]	d_{ext} [mm]	Schedule (Sch)	Espesor (ε) [mm]	d_{int} [mm]
16	400	406.4	100	26.19	380.21
16	400	406.4	120	30.96	375.44
18	450	457	5	4.19	452.81
18	450	457	10	6.35	450.65
18	450	457	20	7.92	449.08
18	450	457	30	11.13	445.87
18	450	457	40	14.27	442.73
18	450	457	60	19.05	437.95
18	450	457	80	23.83	433.17
18	450	457	100	29.36	427.64
18	450	457	120	34.93	422.07
20	500	508	5	4.78	503.22
20	500	508	10	6.35	501.65
20	500	508	20	9.53	498.47
20	500	508	30	12.7	495.3
20	500	508	40	15.09	492.91
20	500	508	60	20.62	487.38
20	500	508	80	26.19	481.81
20	500	508	100	32.54	475.46
20	500	508	120	38.1	469.9
22	550	559	5	4.78	554.22
22	550	559	10	6.35	552.65
22	550	559	20	9.53	549.47
22	550	559	30	12.7	546.3
22	550	559	60	22.23	536.77
22	550	559	80	28.58	530.42
22	550	559	100	34.93	524.07
22	550	559	120	41.28	517.72
24	600	610	5	5.54	604.46
24	600	610	10	6.35	603.65
24	600	610	20	9.53	600.47
24	600	610	30	14.27	595.73
24	600	610	40	17.48	592.52
24	600	610	60	24.61	585.39
24	600	610	80	30.96	579.04
24	600	610	100	38.89	571.11
24	600	610	120	46.02	563.98
26	650	610	10	7.92	602.08
26	650	610	20	12.7	597.3

DN ["]	DN [mm]	d_{ext} [mm]	Schedule (Sch)	Espesor (ε) [mm]	d_{int} [mm]
26	650	610	30	15.88	594.12
26	650	610	40	17.48	592.52
26	650	610	60	24.61	585.39
26	650	610	80	30.96	579.04
28	700	711	10	7.92	703.08
28	700	711	20	12.7	698.3
28	700	711	30	15.88	695.12
28	700	711	40	17.48	693.52
28	700	711	60	24.61	686.39
28	700	711	80	30.96	680.04
30	750	762	10	6.35	755.65
30	750	762	20	7.92	754.08
30	750	762	30	12.7	749.3
30	750	762	40	17.48	744.52
30	750	762	60	25.4	736.6
30	750	762	80	28.58	733.42
32	800	813	10	7.92	805.08
32	800	813	20	12.7	800.3
32	800	813	30	15.88	797.12
32	800	813	40	17.48	795.52
32	800	813	60	25.4	787.6
32	800	813	80	28.58	784.42
34	850	864	10	7.92	856.08
34	850	864	20	12.7	851.3
34	850	864	30	15.88	848.12
34	850	864	40	17.48	846.52
34	850	864	60	25.4	838.6
34	850	864	80	28.58	835.42
36	900	914	10	7.92	906.08
36	900	914	20	12.7	901.3
36	900	914	30	15.88	898.12
36	900	914	40	19.05	894.95
36	900	914	60	25.4	888.6
36	900	914	80	28.58	885.42
38	950	965	10	8.74	956.26
38	950	965	20	14.27	950.73
38	950	965	30	17.48	947.52
38	950	965	40	19.05	945.95
38	950	965	60	26.97	938.03

DN ["]	DN [mm]	d_{ext} [mm]	Schedule (Sch)	Espesor (ε) [mm]	d_{int} [mm]
38	950	965	80	30.18	934.82
40	1000	1016	10	8.74	1007.26
40	1000	1016	20	14.27	1001.73
40	1000	1016	30	17.48	998.52
40	1000	1016	40	19.05	996.95
40	1000	1016	60	26.97	989.03
40	1000	1016	80	30.18	985.82
42	1050	1067	10	8.74	1058.26
42	1050	1067	20	14.27	1052.73
42	1050	1067	30	17.48	1049.52
42	1050	1067	40	19.05	1047.95
42	1050	1067	60	26.97	1040.03
42	1050	1067	80	30.18	1036.82
44	1100	1118	10	8.74	1109.26
44	1100	1118	20	14.27	1103.73
44	1100	1118	30	17.48	1100.52
44	1100	1118	40	19.05	1098.95
44	1100	1118	60	26.97	1091.03
44	1100	1118	80	30.18	1087.82
46	1150	1168	10	8.74	1159.26
46	1150	1168	20	14.27	1153.73
46	1150	1168	30	17.48	1150.52
46	1150	1168	40	19.05	1148.95
46	1150	1168	60	26.97	1141.03
46	1150	1168	80	30.18	1137.82

Tabla A.2: Modelos de bombas y costos
Fuente: Elaboración propia

Bomba	Modelo	Costo [USD]
Bomba 1	SM 14x27 (A) BB3	\$ 742,715.00
Bomba 2	SM 8x15 (A) BB3	\$ 795,502.00
Bomba 3	SM 6x12 (A) BB3	\$ 515,619.00
Bomba 4	SM 10x17 (A) BB3	\$ 742,715.00
Bomba 5	SM 12x17 (A) BB3	\$ 742,705.00
Bomba 6	SMBB3	\$ 795,502.00
Bomba 7	SM 411	\$ 322,262.00
Bomba 8	ZMS I	\$ 675,458.00

Anexo B. Código programación Python

Código B.1: Código del modelo
Fuente: Elaboración propia

```
1
2 #-----#
3
4 #Importación de librerías
5
6 import xlwings as xw
7 import tkinter as tk
8 from tkinter.filedialog import askopenfilename
9 import numpy as np
10 import matplotlib.pyplot as plt
11 from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg
12 import math
13 from math import sqrt
14 from prettytable import PrettyTable
15
16 #-----#
17
18 #Ventana que solicita al usuario ingresar la planilla
19
20 root = tk.Tk()
21 root.withdraw()
22
23 #Establecimiento de la variable Planilla
24
25 Planilla = xw.Book(askopenfilename())
26
27 #-----#
28
29 #Establecimiento de las hojas de la planilla
30
31 Cur_Sis_Bom = Planilla.sheets['Curvas Sistema-Bomba']
32 Var_de_Ent = Planilla.sheets['Variables de Entrada']
33 Tuberias = Planilla.sheets['Tuberias']
34 Bombas = Planilla.sheets['Bombas']
35 Esp_Tub_Ace = Planilla.sheets['Especificaciones Tuberia Acero']
36 Cri_Cum = Planilla.sheets['Criterios Cumplimiento']
37 Cap_Ope = Planilla.sheets['Capex y Opex']
38
39 print('#-----#')
40
41 #Comienzo iteración
42 print('Comienzo iteración')
43
44 print('#-----#')
45
46 #Establecimiento de las listas de las variables iterativas y del trazado
```

```

47 Lis_Tip_Bom = Bombas.range('S7:S14').value
48 Lis_Tip_Rev = Tuberias.range('K15:K17').value
49 Lis_Num_Bom = [1,2,3,4,5,6]
50 Lis_Num_Dia = Esp_Tub_Ace.range('AB4:AB21').value
51 Lis_Dis = [i for i in Var_de_Ent.range('AR5:AR1000').value if i is not None]
52 Lis_Ele = [i for i in Var_de_Ent.range('G5:G1000').value if i is not None]
53
54
55 fig1, ax1 = plt.subplots(figsize=(8,5))
56
57 #Establecimiento de las variables de la gráfica y los limites de los ejes
58
59 ax1.plot(Lis_Dis,Lis_Ele,color='blue',label = "Trazado")
60 ax1.set_ylim(min(Lis_Ele),max(Lis_Ele)+100)
61 ax1.set_xlim(0, max(Lis_Dis))
62 ax1.legend(loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5))
63
64 #Establecimiento de los nombres de los ejes y el titulo del gráfico
65
66 ax1.set_xlabel('Largo [km]', fontsize=10)
67 ax1.set_ylabel('Elevación [m]', fontsize=10)
68 ax1.set_title('Perfil Elevación del Trazado',fontsize=11)
69
70 #Presentación del perfil de elevación del trazado ingresado
71
72 plt.show()
73
74 #-----#
75
76 #Se muestra el largo del trazado graficado y la cota estática del trazado
77
78 print('#-----#')
79 print('-El largo total del trazado es: ' + str(round(Var_de_Ent.range('AV3').value,3)) + '
↳ [km]')
80 print('-La diferencia de altura total del trazado es: ' + str(round(Var_de_Ent.range('AV4'
↳ ).value,3)) + ' [km]')
81 #-----#
82
83 #-----#
84
85 #Establecimiento de la función inicioIteracion, se le ingresa un caudal Q [l/s] y realiza la
↳ iteración de las variables, evalúa los casos donde el CF es más económico y entrega la
↳ configuración más económica
86
87 def inicioIteracion(x):
88
89 #Establecimiento en la planilla los modelos de las bombas como vació, para reiniciar la
↳ planilla
90
91 Bomba_Fin_Uti = None
92 Bomba_Fin_Uti1 = None
93 Bomba_Fin_Uti2 = None

```

```

94     Bomba_Fin_Uti3 = None
95
96     #Se muestra el avance de la iteración
97
98     print('#----- Caso ' + str(x) + '[l/s] -----#')
99
100    #La variable del caudal ingresado se establece en la planilla pero en [m3/día]
101
102    Var_de_Ent.range('AV6').value = int(x) * 86.4
103
104    #La variable del numero de simulaciones se establece en 0 y la del CF se establece elevada
    ↪ , para luego buscar valores más económicos
105
106    Num_Sim = 0
107    Val_Cos, Val_Cos1, Val_Cos2, Val_Cos3 = 10000, 10000, 10000, 10000
108
109    #Se realiza un reinicio de la planilla
110
111    #Caso 24/7
112
113    Var_de_Ent.range('AX3').value, Var_de_Ent.range('AX4').value, Var_de_Ent.range('
    ↪ AX5').value,\
114    Var_de_Ent.range('AX6').value, Var_de_Ent.range('AZ4').value = ', ', ', ', ', '
115
116    #Caso Solar
117
118    Var_de_Ent.range('AX14').value, Var_de_Ent.range('AX15').value, Var_de_Ent.range
    ↪ ('AX16').value,\
119    Var_de_Ent.range('AX17').value, Var_de_Ent.range('AZ15').value, = '=AX3', '=AX4'
    ↪ , '=AX5', '=AX6', '=AZ4'
120
121    #Caso Mixto Solar
122
123    Var_de_Ent.range('AX25').value, Var_de_Ent.range('AX26').value, Var_de_Ent.range
    ↪ ('AX27').value,\
124    Var_de_Ent.range('AX28').value, Var_de_Ent.range('AZ26').value, = '=AX3', '=AX4'
    ↪ , '=AX5', '=AX6', '=AZ4'
125
126    #Caso Mixto 24/7
127
128    Var_de_Ent.range('AX46').value, Var_de_Ent.range('AX47').value, Var_de_Ent.range
    ↪ ('AX48').value,\
129    Var_de_Ent.range('AX49').value, Var_de_Ent.range('AZ47').value, = '=AX3', '=AX4'
    ↪ , '=AX5', '=AX6', '=AZ4'
130
131    #Comienzo de la iteración desde el código hacia la planilla
132    #Se iteran el numero de cantidad de bombas
133
134    for i in Lis_Num_Bom:
135        Var_de_Ent.range('AX4').value = i
136
137    #Se itera el modelo de la bomba

```

```

138
139     for j in Lis_Tip_Bom:
140         Var_de_Ent.range('AX3').value = j
141
142     #Se itera el tipo de revestimiento interno
143
144     for y in Lis_Tip_Rev:
145         Var_de_Ent.range('AZ4').value = y
146
147     #Se itera el valor del diametro de la tubería
148
149     for z in Lis_Num_Dia:
150         Var_de_Ent.range('AX6').value, Var_de_Ent.range('AX5').value = '', z
151
152     #Se establece la lista de los valores de schedule para el diametro que se itera
153
154         Lis_Num_Sch = Tuberias.range('K20:K28').value
155         Lis_Num_Sch = [i for i in Lis_Num_Sch if i is not None]
156
157     #Se itera el valor del schedule de la tubería
158
159         for x in Lis_Num_Sch:
160
161     #Se calcula el numero de simulaciones totales y se calcula el avance en porcentaje de lo
162     ↪ simulado, para presentar el avance
163
164         Tot_Sim = 4*128*len(Lis_Num_Bom)*len(Lis_Tip_Bom)*len(
165     ↪ Lis_Tip_Rev)
166         Num_Sim+=4
167         Por_Num_Sim = (Num_Sim/Tot_Sim)*100
168         print(f"#-----Iterando: {int(Por_Num_Sim)}\ %-----#", end="\r")
169         Var_de_Ent.range('AX6').value = x
170
171     #Se evalúa en cada caso el valor del CF en la iteración actual y la compara con el valor
172     ↪ del CF anterior, en caso de ser menor y de cumplir los criterios de diseño, guarda la
173     ↪ configuración para tener ese valor de CF menor para cada uno de los casos
174
175         if Cri_Cum.range('D11').value == 'SI' and Cap_Ope.range('D20').
176     ↪ value <= Val_Cos:
177             Bomba_Fin_Uti, Can_Bombas_Fin_Uti, Tipo_Rev_Fin_Uti,
178     ↪ Dia_Fin_Uti, Sch_Fin_Uti = j, i, y, z, x
179             Val_Cos = Cap_Ope.range('D20').value
180             Vel_Flu = Var_de_Ent.range('AZ3').value
181             if Cri_Cum.range('D22').value == 'SI' and Cap_Ope.range('D40').
182     ↪ value <= Val_Cos1:
183                 Bomba_Fin_Uti1, Can_Bombas_Fin_Uti1, Tipo_Rev_Fin_Uti1,
184     ↪ Dia_Fin_Uti1, Sch_Fin_Uti1 = j, i, y, z, x
185                 Val_Cos1 = Cap_Ope.range('D40').value
186                 Vel_Flu1 = Var_de_Ent.range('AZ14').value
187                 if Cri_Cum.range('D33').value == 'SI' and Cap_Ope.range('D60').
188     ↪ value <= Val_Cos2:

```

```

180         Bomba_Fin_Uti2, Can_Bombas_Fin_Uti2, Tipo_Rev_Fin_Uti2,
↪ Dia_Fin_Uti2, Sch_Fin_Uti2 = j, i, y, z, x
181         Val_Cos2 = Cap_Ope.range('D60').value
182         Vel_Flu2 = Var_de_Ent.range('AZ25').value
183         if Cri_Cum.range('D53').value == 'SI' and Cap_Ope.range('D80').
↪ value <= Val_Cos3:
184         Bomba_Fin_Uti3, Can_Bombas_Fin_Uti3, Tipo_Rev_Fin_Uti3,
↪ Dia_Fin_Uti3, Sch_Fin_Uti3 = j, i, y, z, x
185         Val_Cos3 = Cap_Ope.range('D80').value
186         Vel_Flu3 = Var_de_Ent.range('AZ46').value
187
188 #Para el caso donde la bomba final es distinta de vacío, se guardan la configuración del
↪ sistema para lograr esto y se guardan los valores del Capex, Opex, Costo Tuberías,
↪ Gasto Energético Anual y el VAN para cada uno de los casos
189
190     if Bomba_Fin_Uti != None:
191         Var_de_Ent.range('AX3').value, Var_de_Ent.range('AX4').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX5').value, \
192         Var_de_Ent.range('AX6').value, Var_de_Ent.range('AZ4').value =
↪ Bomba_Fin_Uti, Can_Bombas_Fin_Uti, \
193         Dia_Fin_Uti, Sch_Fin_Uti, Tipo_Rev_Fin_Uti
194         Van = Cap_Ope.range('F4').value
195         Capex = Cap_Ope.range('G4').value
196         Opex = Cap_Ope.range('H4').value
197         Energia = Cap_Ope.range('D12').value
198         Tub = Cap_Ope.range('D4').value
199     if Bomba_Fin_Uti1 != None:
200         Var_de_Ent.range('AX14').value, Var_de_Ent.range('AX15').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX16').value, \
201         Var_de_Ent.range('AX17').value, Var_de_Ent.range('AZ15').value, =
↪ Bomba_Fin_Uti1, Can_Bombas_Fin_Uti1, \
202         Dia_Fin_Uti1, Sch_Fin_Uti1, Tipo_Rev_Fin_Uti1
203         Van1 = Cap_Ope.range('F24').value
204         Capex1 = Cap_Ope.range('G24').value
205         Opex1 = Cap_Ope.range('H24').value
206         Energia1 = Cap_Ope.range('D32').value
207         Tub1 = Cap_Ope.range('D24').value
208     if Bomba_Fin_Uti2 != None:
209         Var_de_Ent.range('AX25').value, Var_de_Ent.range('AX26').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX27').value, \
210         Var_de_Ent.range('AX28').value, Var_de_Ent.range('AZ26').value, =
↪ Bomba_Fin_Uti2, Can_Bombas_Fin_Uti2, \
211         Dia_Fin_Uti2, Sch_Fin_Uti2, Tipo_Rev_Fin_Uti2
212         Van2 = Cap_Ope.range('F44').value
213         Capex2 = Cap_Ope.range('G44').value
214         Opex2 = Cap_Ope.range('H44').value
215         Energia2 = Cap_Ope.range('D52').value
216         Tub2 = Cap_Ope.range('D44').value
217     if Bomba_Fin_Uti3 != None:
218         Var_de_Ent.range('AX46').value, Var_de_Ent.range('AX47').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX48').value, \

```

```

219     Var_de_Ent.range('AX49').value, Var_de_Ent.range('AZ47').value, =
↪ Bomba_Fin_Uti3, Can_Bombas_Fin_Uti3,\
220     Dia_Fin_Uti3, Sch_Fin_Uti3, Tipo_Rev_Fin_Uti3
221     Van3 = Cap_Ope.range('F64').value
222     Capex3 = Cap_Ope.range('G64').value
223     Opex3 = Cap_Ope.range('H64').value
224     Energia3 = Cap_Ope.range('D72').value
225     Tub3 = Cap_Ope.range('D64').value
226
227     #Para el caso donde la bomba final es igual a vacío, quiere decir que no existe una
↪ configuración del sistema que cumpla con los criterios del modelo, de esta forma se
↪ crean solamente valores 1 para cada uno de los casos
228
229     if Bomba_Fin_Uti == None:
230         Var_de_Ent.range('AX3').value, Var_de_Ent.range('AX4').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX5').value,\
231         Var_de_Ent.range('AX6').value, Var_de_Ent.range('AZ4').value, Bomba_Fin_Uti,
↪ Can_Bombas_Fin_Uti,\
232         Dia_Fin_Uti, Sch_Fin_Uti, Tipo_Rev_Fin_Uti = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
233         Val_Cos, Vel_Flu, Van, Capex, Opex, Energia, Tub = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
234         if Bomba_Fin_Uti1 == None:
235             Var_de_Ent.range('AX14').value, Var_de_Ent.range('AX15').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX16').value,\
236             Var_de_Ent.range('AX17').value, Var_de_Ent.range('AZ15').value,
↪ Bomba_Fin_Uti1, Can_Bombas_Fin_Uti1,\
237             Dia_Fin_Uti1, Sch_Fin_Uti1, Tipo_Rev_Fin_Uti1 = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
238             Val_Cos1, Vel_Flu1, Van1, Capex1, Opex1, Energia1, Tub1 = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
239             if Bomba_Fin_Uti2 == None:
240                 Var_de_Ent.range('AX25').value, Var_de_Ent.range('AX26').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX27').value,\
241                 Var_de_Ent.range('AX28').value, Var_de_Ent.range('AZ26').value,
↪ Bomba_Fin_Uti2, Can_Bombas_Fin_Uti2,\
242                 Dia_Fin_Uti2, Sch_Fin_Uti2, Tipo_Rev_Fin_Uti2= 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
243                 Val_Cos2, Vel_Flu2, Van2, Capex2, Opex2, Energia2, Tub2 = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
244                 if Bomba_Fin_Uti3 == None:
245                     Var_de_Ent.range('AX46').value, Var_de_Ent.range('AX47').value, Var_de_Ent.
↪ range('AX48').value,\
246                     Var_de_Ent.range('AX49').value, Var_de_Ent.range('AZ47').value,
↪ Bomba_Fin_Uti3, Can_Bombas_Fin_Uti3,\
247                     Dia_Fin_Uti3, Sch_Fin_Uti3, Tipo_Rev_Fin_Uti3= 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
248                     Val_Cos3, Vel_Flu3, Van3, Capex3, Opex3, Energia3, Tub3 = 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1
249
250                 print('#-----#')
251
252     #Se entregan los resultados de cada uno de los casos
253
254     tabla.add_row(["Bomba", str(Bomba_Fin_Uti), str(Bomba_Fin_Uti1), str(
↪ Bomba_Fin_Uti2), str(Bomba_Fin_Uti3)])
255     tabla.add_row(["n° de Bombas", str(int(Can_Bombas_Fin_Uti)), str(int(
↪ Can_Bombas_Fin_Uti1)), str(int(Can_Bombas_Fin_Uti2)), str(int(
↪ Can_Bombas_Fin_Uti3))])

```

```

256     tabla.add_row(["Diámetro Tuberías [']", str(int(Dia_Fin_Uti)), str(int(Dia_Fin_Uti1)
↪ ), str(int(Dia_Fin_Uti2)), str(int(Dia_Fin_Uti3))]
257     tabla.add_row(["Schedule Tuberías", str(int(Sch_Fin_Uti)), str(int(Sch_Fin_Uti1)),
↪ str(int(Sch_Fin_Uti2)), str(int(Sch_Fin_Uti3))]
258     tabla.add_row(["Revestimiento Tuberías", str(Tipo_Rev_Fin_Uti), str(
↪ Tipo_Rev_Fin_Uti1), str(Tipo_Rev_Fin_Uti2), str(Tipo_Rev_Fin_Uti3))]
259     tabla.add_row(["Velocidad Fluido [m/s]", str(round(Vel_Flu,3)), str(round(Vel_Flu1
↪ ,3)), str(round(Vel_Flu2,3)), str(round(Vel_Flu3,3))]
260     tabla.add_row(["Precio Tuberías [USD]", str(round(Tub,0)), str(round(Tub1,0)), str(
↪ round(Tub2,0)), str(round(Tub3,0))]
261     tabla.add_row(["Energía [USD/año]", str(round(Energia,0)), str(round(Energia1,0)),
↪ str(round(Energia2,0)), str(round(Energia3,0))]
262     tabla.add_row(["VAN [USD]", str(round(Van,0)), str(round(Van1,0)), str(round(Van2
↪ ,0)), str(round(Van3,0))]
263     tabla.add_row(["Capex [USD]", str(round(Capex,0)), str(round(Capex1,0)), str(round(
↪ Capex2,0)), str(round(Capex3,0))]
264     tabla.add_row(["Opex [USD/año]", str(round(Opex,0)), str(round(Opex1,0)), str(
↪ round(Opex2,0)), str(round(Opex3,0))]
265     tabla.add_row(["Costo Final [USD/m3]", str(round(Val_Cos,4)), str(round(Val_Cos1
↪ ,4)), str(round(Val_Cos2,4)), str(round(Val_Cos3,4))]
266
267     print(tabla)
268     tabla.clear_rows()
269
270     #Se grafican los resultados en cada caso
271
272     print('#-----#')
273
274     #Caso 24/7
275
276     if Bomba_Fin_Uti != 1:
277         print('#-----#')
278         fig2, ax2 = plt.subplots(figsize=(8,5))
279         twin_ax2 = ax2.twinx()
280         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D6:K6').value, Cur_Sis_Bom.range('D7:K7').
↪ value,\
281                     Cur_Sis_Bom.range('N8:R8').value, Cur_Sis_Bom.range('N9:R9').value,\
282                     Cur_Sis_Bom.range('M12:Q12').value, Cur_Sis_Bom.range('M13:Q13').
↪ value,\
283                     ax2, twin_ax2, 'Caso: 24/7')
284         print('#-----#')
285
286     #Caso Solar
287
288     if Bomba_Fin_Uti1 != 1:
289         print('#-----#')
290         fig3, ax3 = plt.subplots(figsize=(8,5))
291         twin_ax3 = ax3.twinx()
292         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D47:K47').value, Cur_Sis_Bom.range('D48:K48').
↪ value,\
293                     Cur_Sis_Bom.range('N49:R49').value, Cur_Sis_Bom.range('N50:R50').
↪ value,\

```



```

294         Cur_Sis_Bom.range('M53:Q53').value, Cur_Sis_Bom.range('M54:Q54').
↪ value,\
295         ax3,twin_ax3,'Caso: Solar')
296     print('#-----#')
297
298 #Caso Mixto Solar
299
300     if Bomba_Fin_Uti2 != 1:
301         print('#-----#')
302         fig4, ax4 = plt.subplots(figsize=(8,5))
303         twin_ax4 = ax4.twinx()
304         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D129:K129').value, Cur_Sis_Bom.range('D130:
↪ K130').value,\
305                 Cur_Sis_Bom.range('N131:R131').value, Cur_Sis_Bom.range('N132:R132
↪ ').value,\
306                 Cur_Sis_Bom.range('M135:Q135').value, Cur_Sis_Bom.range('M136:
↪ Q136').value,\
307                 ax4,twin_ax4,'Caso: Mixto Solar Día')
308         print('#-----#')
309         fig5, ax5 = plt.subplots(figsize=(8,5))
310         twin_ax5 = ax5.twinx()
311         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D88:K88').value, Cur_Sis_Bom.range('D89:K89').
↪ value,\
312                 Cur_Sis_Bom.range('N90:R90').value, Cur_Sis_Bom.range('N91:R91').
↪ value,\
313                 Cur_Sis_Bom.range('M94:Q94').value, Cur_Sis_Bom.range('M95:Q95').
↪ value,\
314                 ax5,twin_ax5,'Caso: Mixto Solar Noche')
315         print('#-----#')
316
317 #Caso Mixto 24/7
318
319     if Bomba_Fin_Uti3 != 1:
320         print('#-----#')
321         fig6, ax6 = plt.subplots(figsize=(8,5))
322         twin_ax6 = ax6.twinx()
323         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D211:K211').value, Cur_Sis_Bom.range('D212:
↪ K212').value,\
324                 Cur_Sis_Bom.range('N213:R213').value, Cur_Sis_Bom.range('N214:R214
↪ ').value,\
325                 Cur_Sis_Bom.range('M217:Q217').value, Cur_Sis_Bom.range('M218:
↪ Q218').value,\
326                 ax6,twin_ax6,'Caso: Mixto 24/7 Día')
327         print('#-----#')
328         fig7, ax7 = plt.subplots(figsize=(8,5))
329         twin_ax7 = ax7.twinx()
330         crearGrafico(Cur_Sis_Bom.range('D170:K170').value, Cur_Sis_Bom.range('D171:
↪ K171').value,\
331                 Cur_Sis_Bom.range('N172:R172').value, Cur_Sis_Bom.range('N173:R173
↪ ').value,\
332                 Cur_Sis_Bom.range('M176:Q176').value, Cur_Sis_Bom.range('M177:
↪ Q177').value,\

```

```

333         ax7,twin_ax7,'Caso: Mixto 24/7 Noche')
334     print('#-----#')
335     print('#-----#')
336
337     if Val_Cos < Val_Cos1 and Val_Cos < Val_Cos2 and Val_Cos < Val_Cos3:
338         print('#----- El mejor caso es --> 24/7 -----#')
339     if Val_Cos1 < Val_Cos and Val_Cos1 < Val_Cos2 and Val_Cos1 < Val_Cos3:
340         print('#----- El mejor caso es --> Solar -----#')
341     if Val_Cos2 < Val_Cos and Val_Cos2 < Val_Cos1 and Val_Cos2 < Val_Cos3:
342         print('#----- El mejor caso es --> Mixto Solar -----#')
343     if Val_Cos3 < Val_Cos and Val_Cos3 < Val_Cos1 and Val_Cos3 < Val_Cos2:
344         print('#----- El mejor caso es --> Mixto 24/7 -----#')
345
346     print('#-----#')
347
348     #Establecimiento de la función crearGrafico, la cual se le ingresan las listas de valores a
349     ↪ graficar y los nombres tanto de los ejes como del título del gráfico
350
351     def crearGrafico(list1,list2,list3,list4,list5,list6,ejep,ejes,titulo):
352
353         #Establecimiento de las listas con las cuales se trabajara para graficarlas
354
355         x_lista_1 = list1
356         y_lista_1 = list2
357         x_lista_2 = list3
358         y_lista_2 = list4
359         Lis_Por_Efi = list5
360         Lis_Cau_Efi = list6
361
362         #Se ajustan los puntos a una curva cuadrática
363
364         fit_1 = np.polyfit(x_lista_1, y_lista_1, 2)
365         fit_2 = np.polyfit(x_lista_2, y_lista_2, 2)
366         fit_3 = np.polyfit(Lis_Cau_Efi,Lis_Por_Efi,2)
367
368         #Puntos de intersección de las dos curvas
369
370         delta = ((fit_1[1]-fit_2[1])**2)-4*((fit_1[0]-fit_2[0])*((fit_1[2]-fit_2[2])))
371         x_int = ((-(fit_1[1]-fit_2[1]))+sqrt(delta))/(2*(fit_1[0]-fit_2[0]))
372         y_int = fit_1[0]*(x_int**2)+fit_1[1]*x_int+fit_1[2]
373
374         #Se establecen 3 funciones para las líneas de tendencia de el ajuste previamente realizado
375
376         tend_1 = np.poly1d(fit_1)
377         tend_2 = np.poly1d(fit_2)
378         tend_3 = np.poly1d(fit_3)
379
380         #Se establecen datos equiespaciados para los x de cada gráfica y además se agrega una
381         ↪ extrapolación en cada caso
382
383         x_range_1 = np.linspace(x_lista_1[0], x_lista_1[-1], 100)
384         x_range_2 = np.linspace(x_lista_2[0], x_lista_2[-1], 100)

```

```

383 x_range_3 = np.linspace(Lis_Cau_Efi[0], Lis_Cau_Efi[-1], 100)
384 x_range_extrapol_1 = np.linspace(x_lista_1[-1], 8000, 100)
385 x_range_extrapol_2 = np.linspace(x_lista_2[-1], 8000, 100)
386 x_range_extrapol_3 = np.linspace(Lis_Cau_Efi[-1], 8000, 100)
387
388 #Calcular los valores de la línea de tendencia previamente creadas
389
390 tend_y_1 = tend_1(x_range_1)
391 tend_y_2 = tend_2(x_range_2)
392 tend_y_3 = tend_3(x_range_3)
393 tend_y_extrapol_1 = tend_1(x_range_extrapol_1)
394 tend_y_extrapol_2 = tend_2(x_range_extrapol_2)
395 tend_y_extrapol_3 = tend_3(x_range_extrapol_3)
396
397 #Reinicio de la gráfica
398
399 ejep.clear()
400 ejes.clear()
401
402 #Muestra las curvas realizadas en la gráfica
403
404 ejep.plot(x_range_1, tend_y_1, color='orange',label='Curva Sistema')
405 ejep.plot(x_range_2, tend_y_2, color='green',label='Curva Bomba')
406 ejep.plot(x_range_extrapol_1, tend_y_extrapol_1, color='orange')
407 ejep.plot(x_range_extrapol_2, tend_y_extrapol_2, color='green')
408 ejes.plot(x_range_3, tend_y_3, color='red',label='Eficiencia')
409 ejes.plot(x_range_extrapol_3, tend_y_extrapol_3, color='red')
410 ejep.plot(x_int,y_int,'ro',label='Punto Funcionamiento')
411 ejep.vlines(x = x_int, color = 'r', ymin = 0, ymax = y_int, linestyle = '--', linewidth
↪ = 1)
412 ejep.hlines(y = y_int, color = 'r', xmin = 0, xmax = x_int, linestyle = '--', linewidth
↪ = 1)
413
414 leyenda = ejep.plot(x_range_1, tend_y_1, color='orange',label='Curva Sistema') +
↪ ejep.plot(x_range_2, tend_y_2, color='green',label='Curva Bomba') + ejes.plot(
↪ x_range_3, tend_y_3, color='red',label='Eficiencia') + ejep.plot(x_int,y_int,'ro',
↪ label='Punto Funcionamiento')
415 leyendas = [l.get_label() for l in leyenda]
416
417 #Se establecen nombres a los ejes y al titulo del gráfico
418
419 ejep.set_xlabel('Caudal [m3/h]', fontsize=10)
420 ejep.set_ylabel('Altura Total [m]', fontsize=10)
421 ejes.set_ylabel('Eficiencia [%]', fontsize=10)
422 ejep.set_title('Gráfico Sistema vs Bomba -- '+str(titulo), fontsize=11)
423
424 #Posicionamiento de la leyenda del gráfico
425
426 ejep.legend(leyenda,leyendas,loc='center left', bbox_to_anchor=(1, 0.5),
↪ borderaxespad=4)
427
428 #Establecimiento los límites de los ejes

```

```

429     ejep.set_ylim(0, y_int + 300)
430     ejep.set_xlim(0, x_int + 100)
431     ejes.set_ylim(0,1)
432
433
434     #Se muestra la gráfica creada
435
436     plt.show()
437     #-----#
438
439     #Se define la variable tabla junto a la primera línea de la tabla
440
441     tabla = PrettyTable()
442     tabla.field_names = ["Casos", "24/7", "Solar", "Mixto Solar", "Mixto 24/7"]
443
444     #Se establece la lista de caudales a modelar
445
446     lista_caudales = [200]
447
448     #Se itera la lista de caudales utilizando la función inicioIteracion
449
450     for i in lista_caudales:
451         \%time inicioIteracion(i)
452
453

```

Anexo C. Resultados

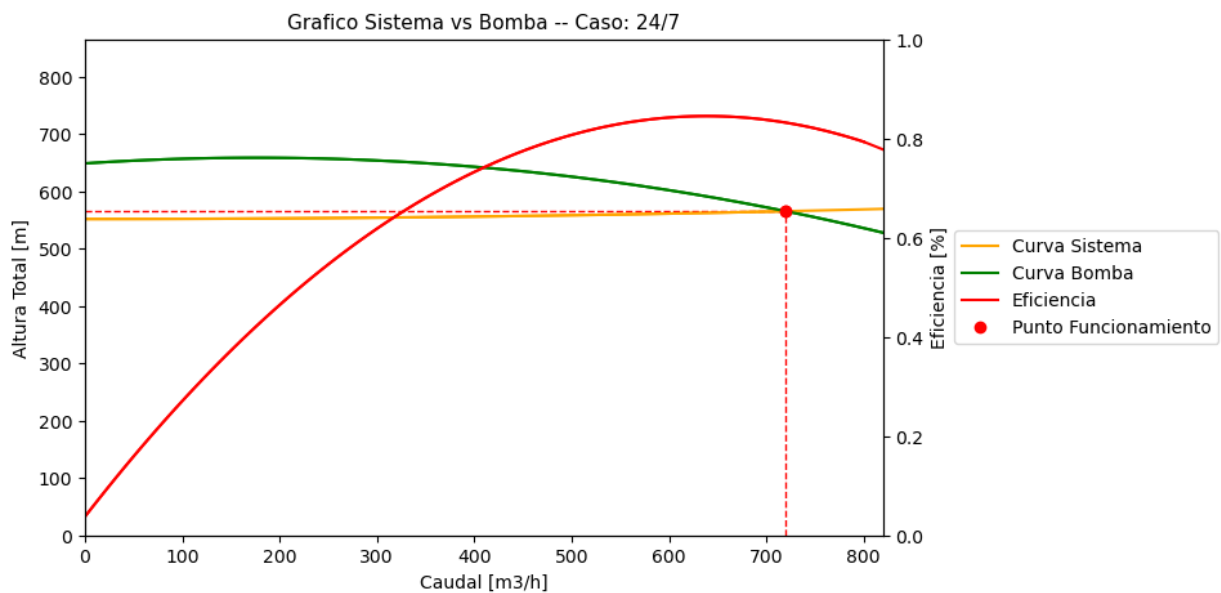


Figura C.1: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

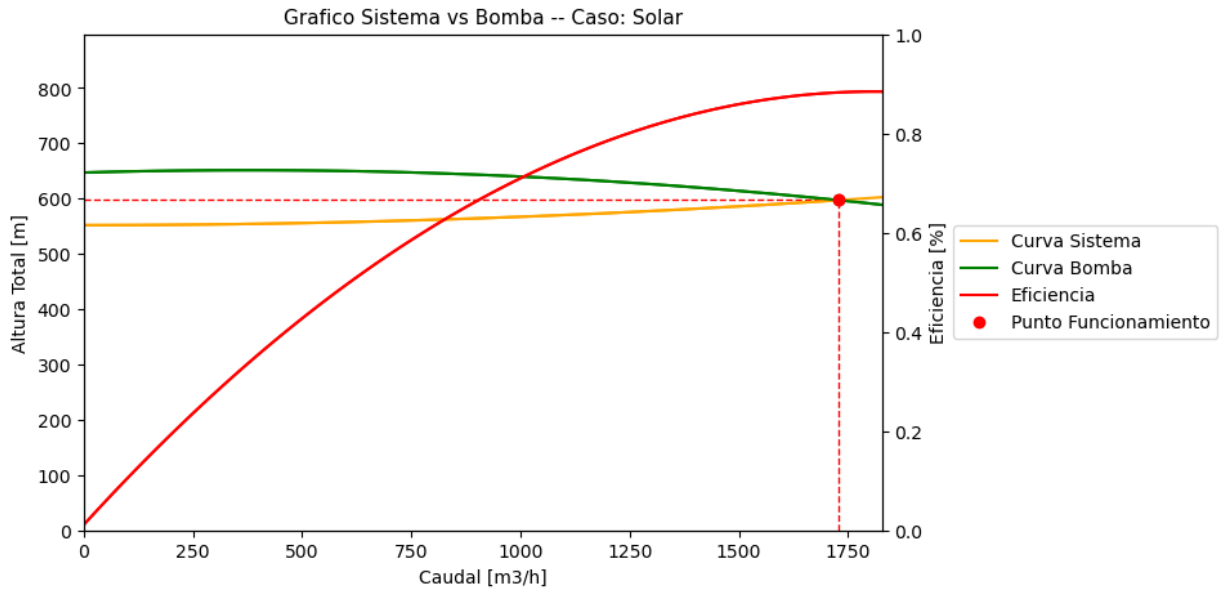


Figura C.2: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

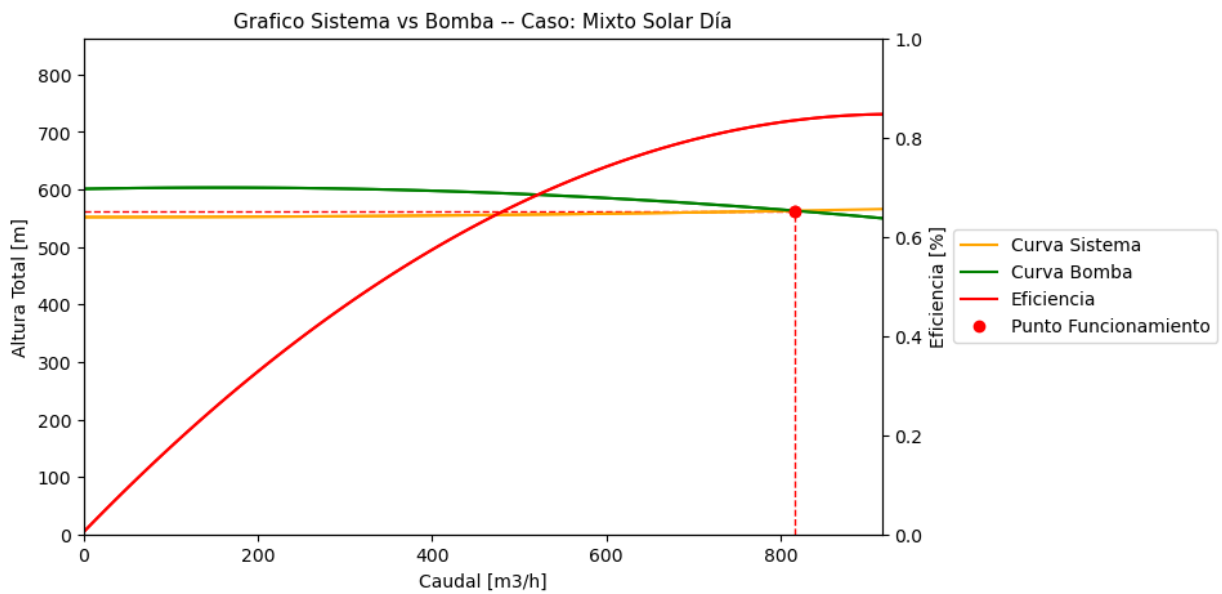


Figura C.3: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

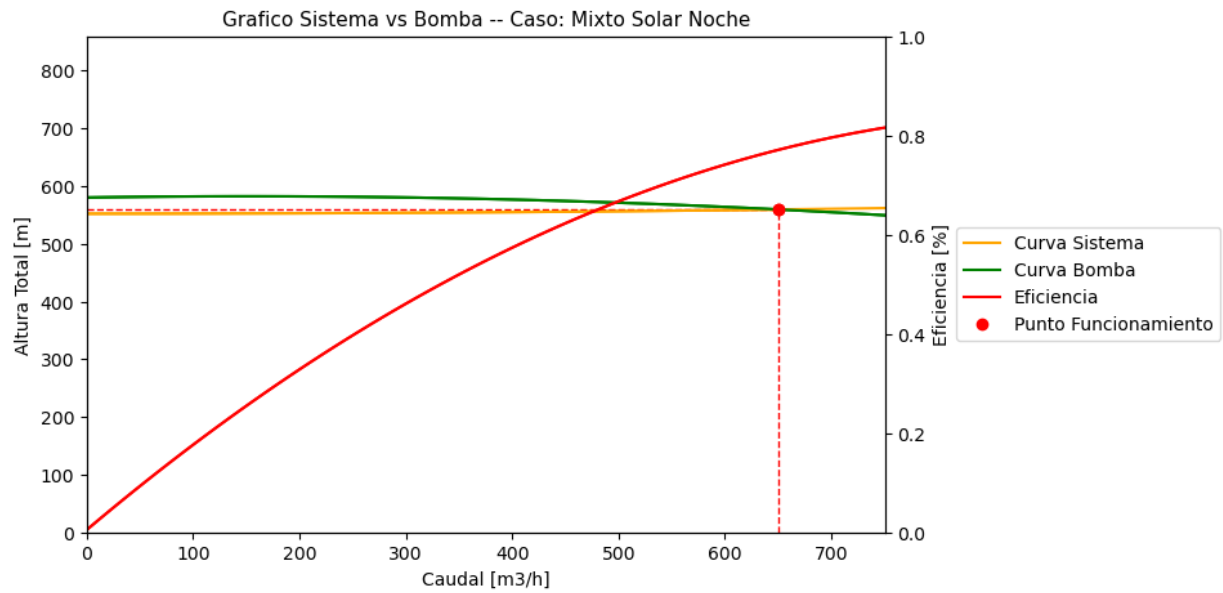


Figura C.4: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

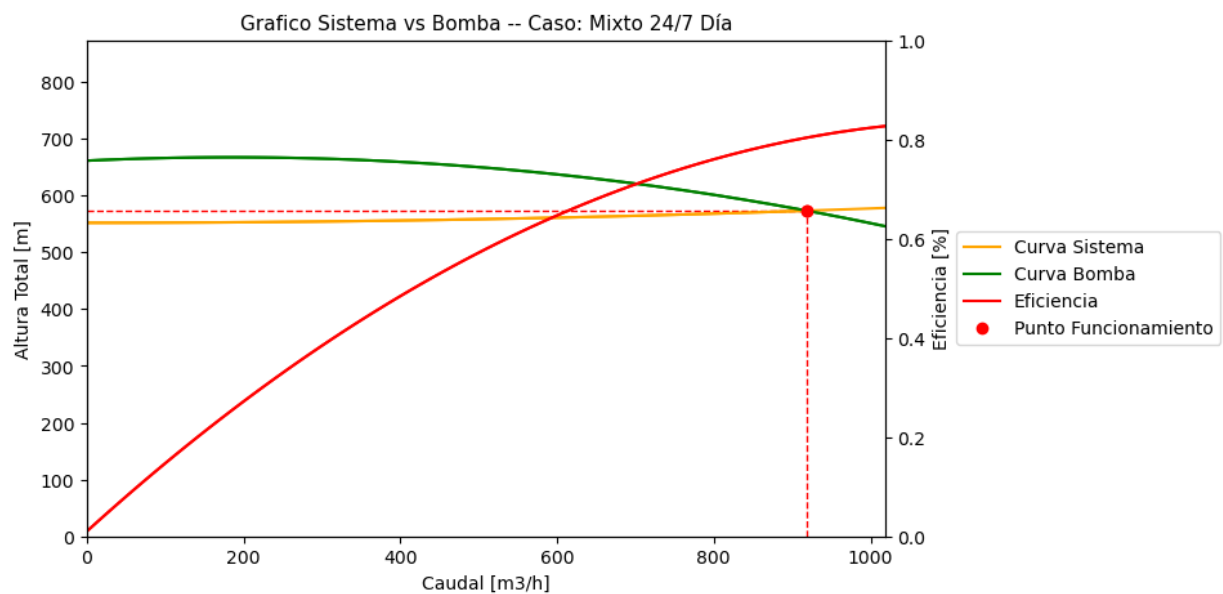


Figura C.5: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

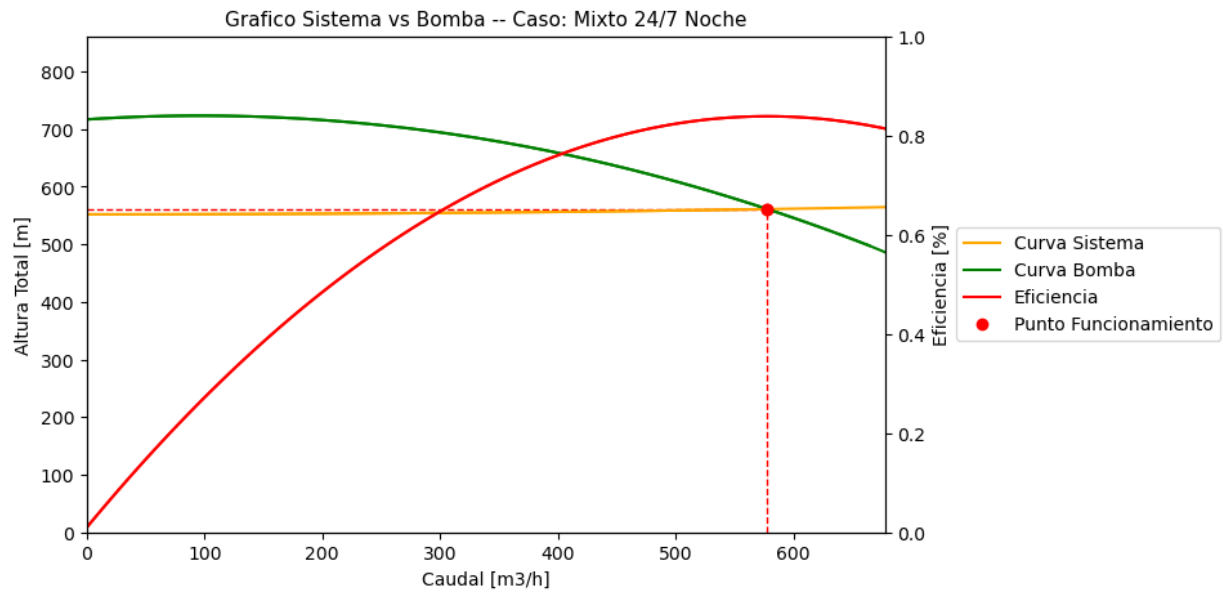


Figura C.6: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde al EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

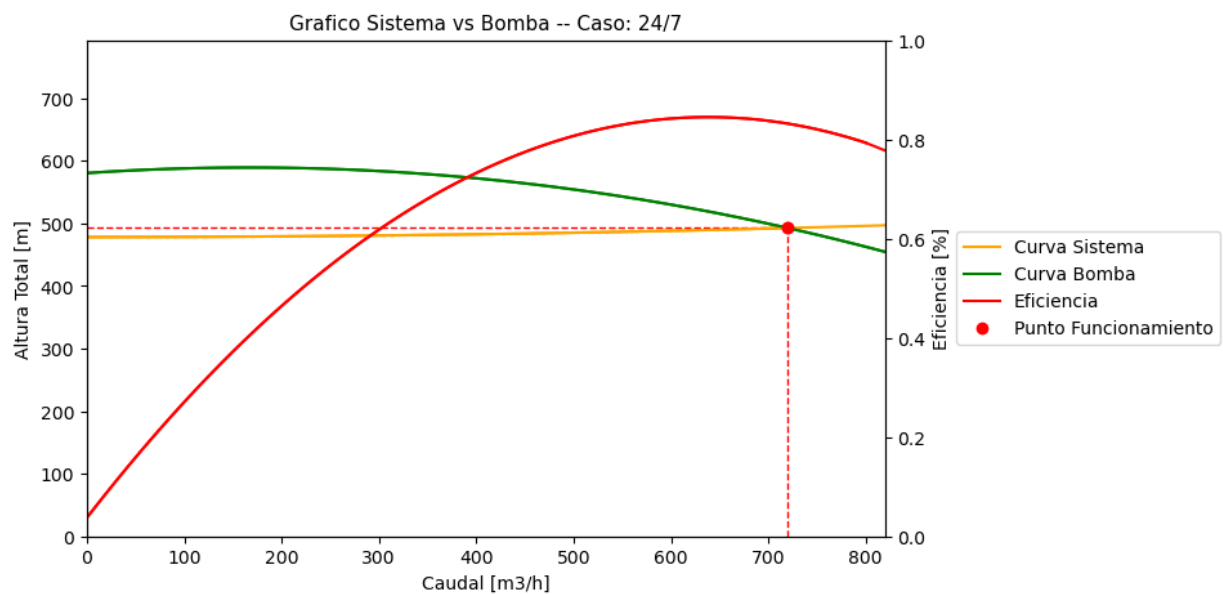


Figura C.7: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

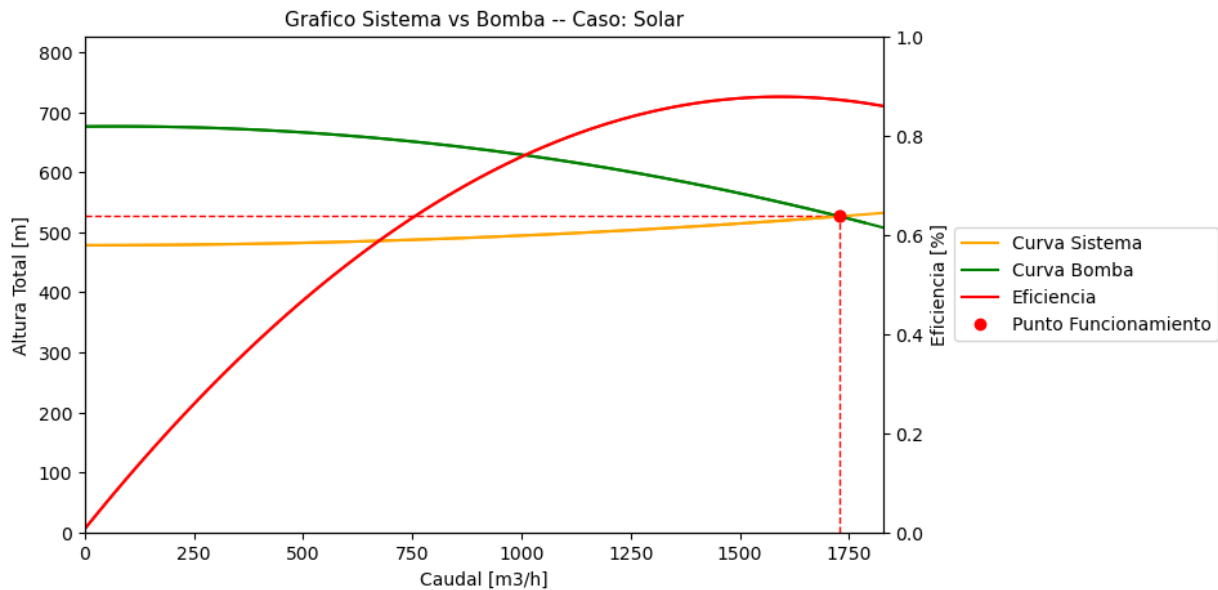


Figura C.8: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

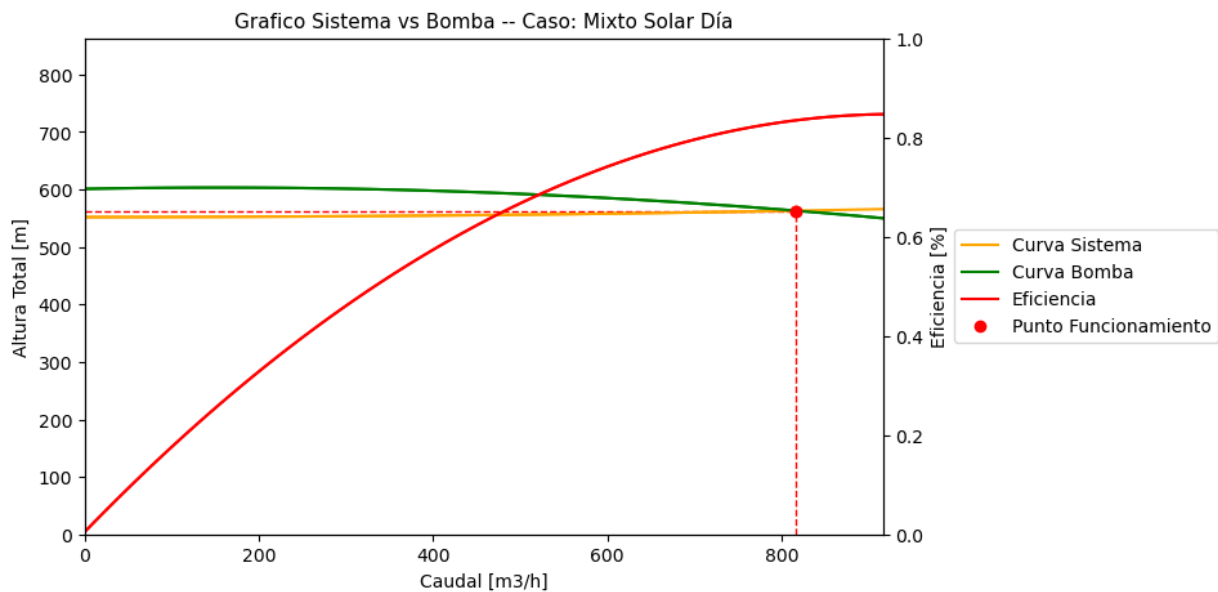


Figura C.9: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

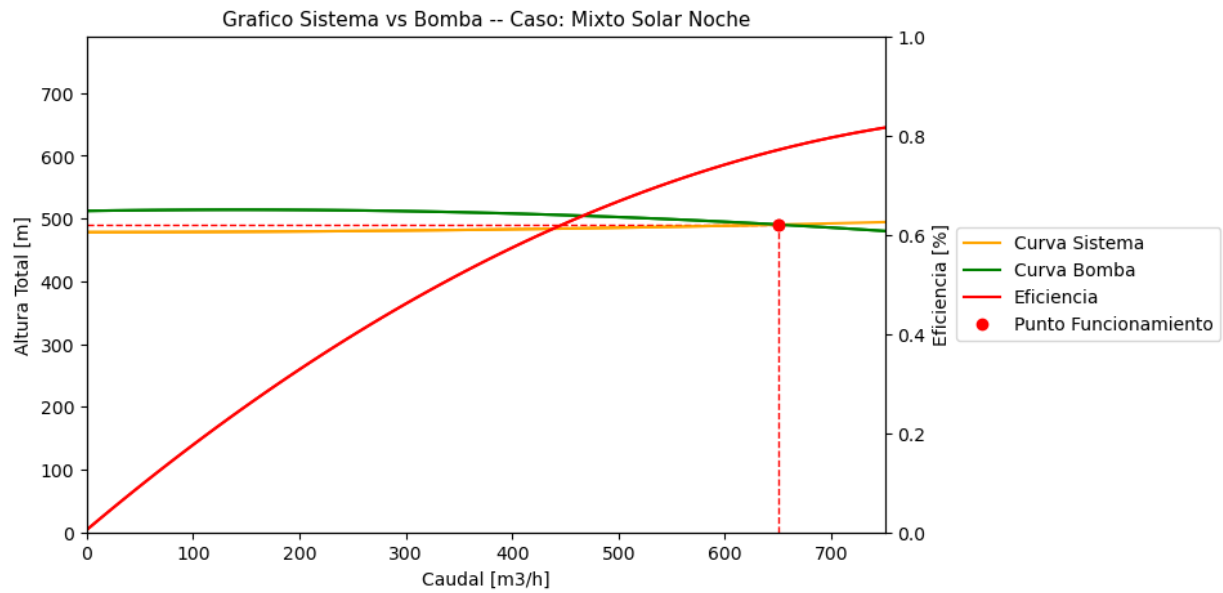


Figura C.10: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

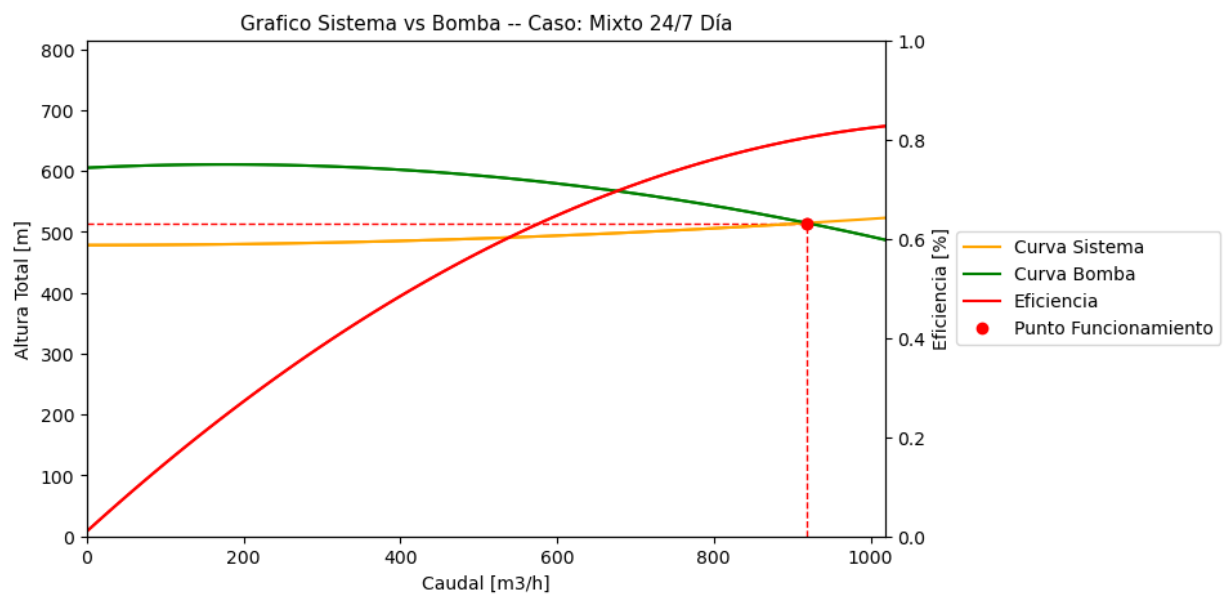


Figura C.11: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

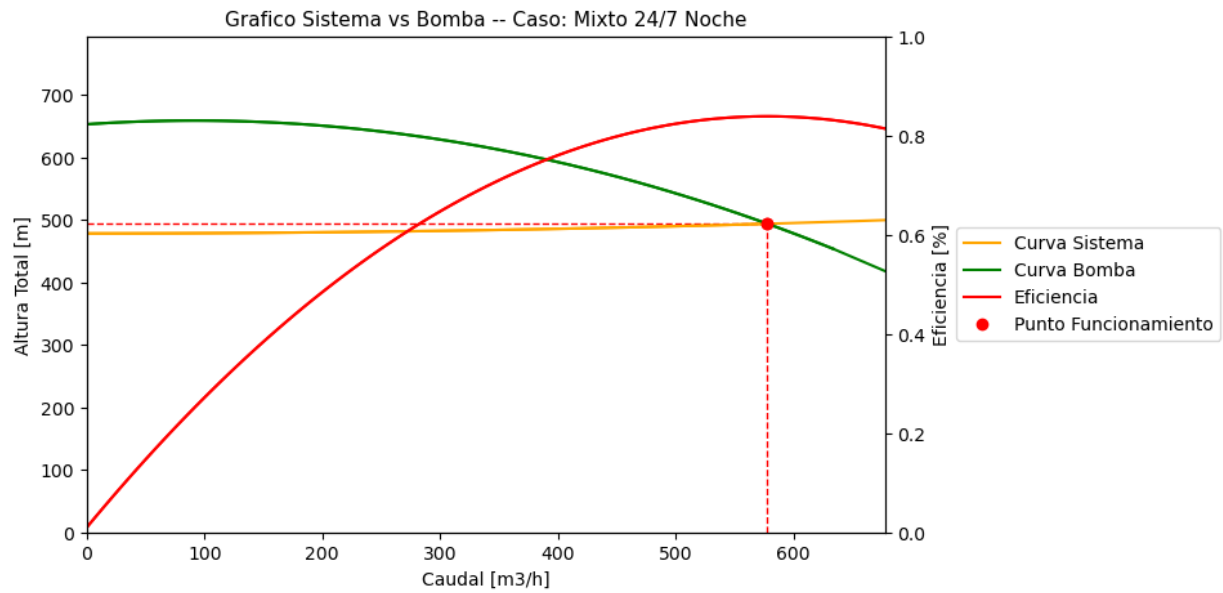


Figura C.12: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde al EB n° 2 al punto final del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

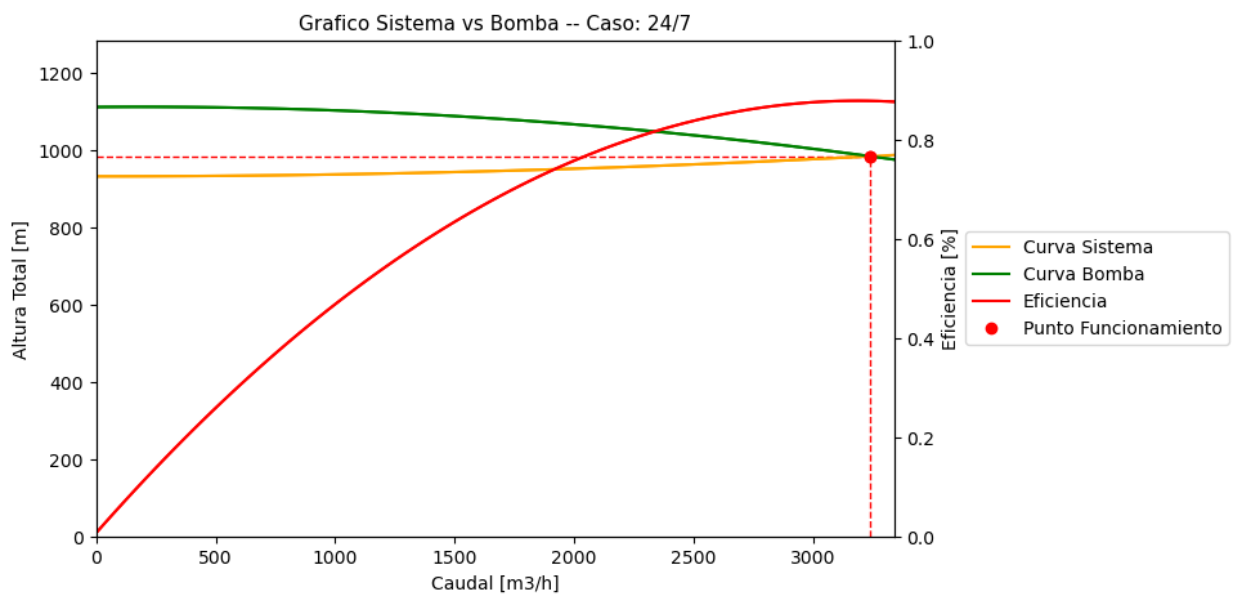


Figura C.13: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

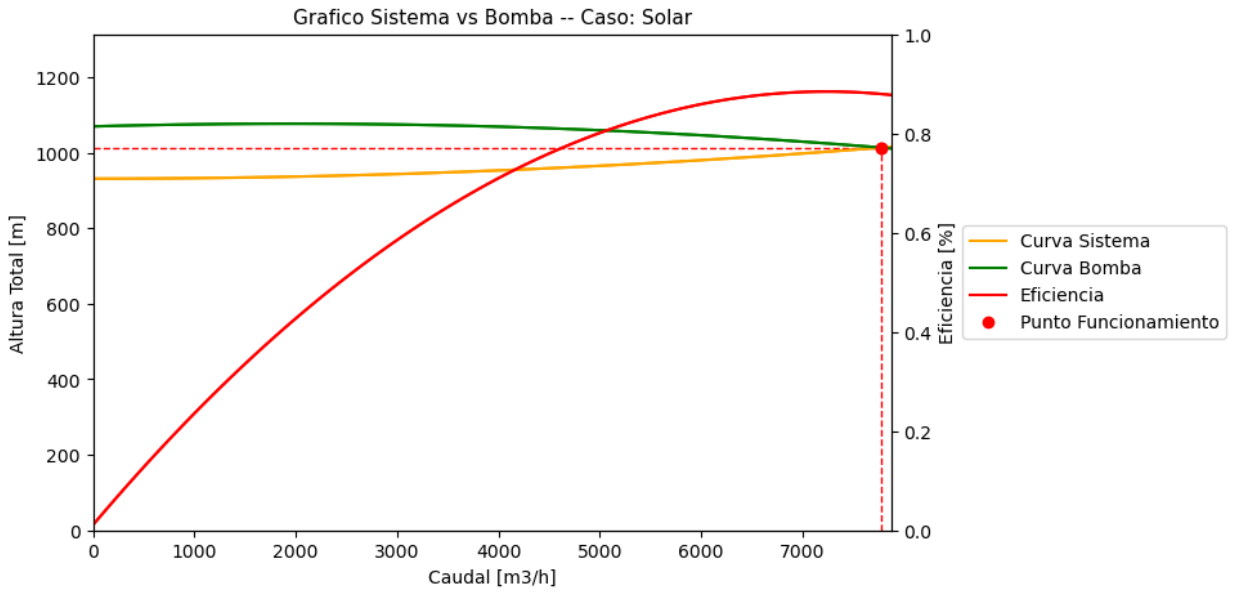


Figura C.14: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto TEA

Fuente: Elaboración propia

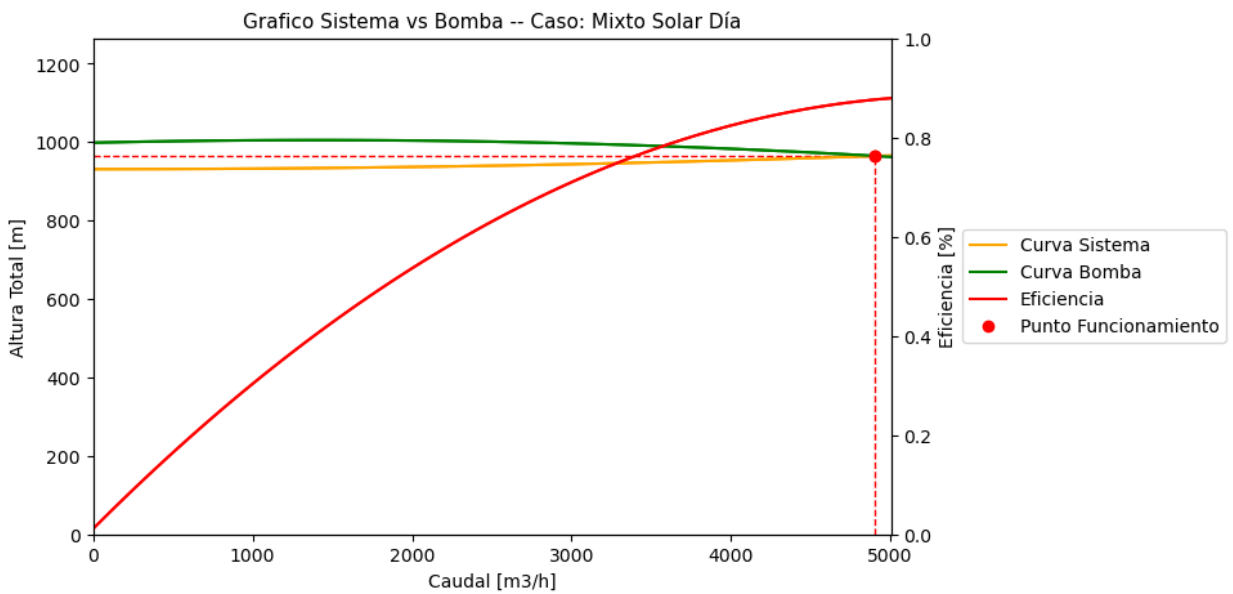


Figura C.15: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto TEA

Fuente: Elaboración propia

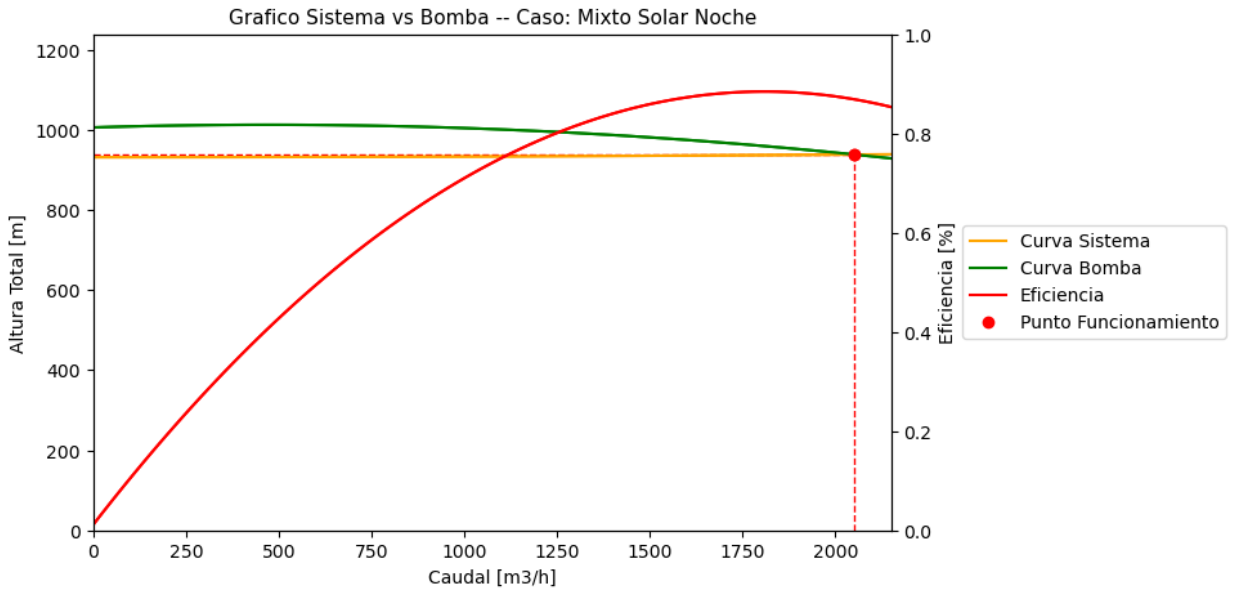


Figura C.16: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto TEA
 Fuente: Elaboración propia

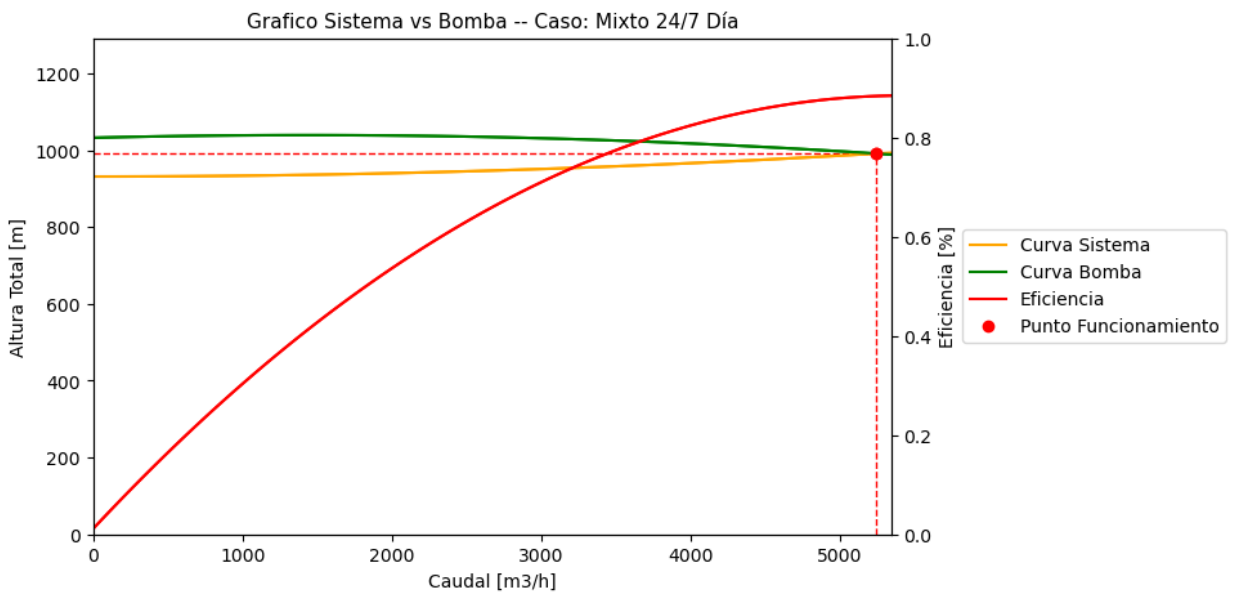


Figura C.17: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto TEA
 Fuente: Elaboración propia

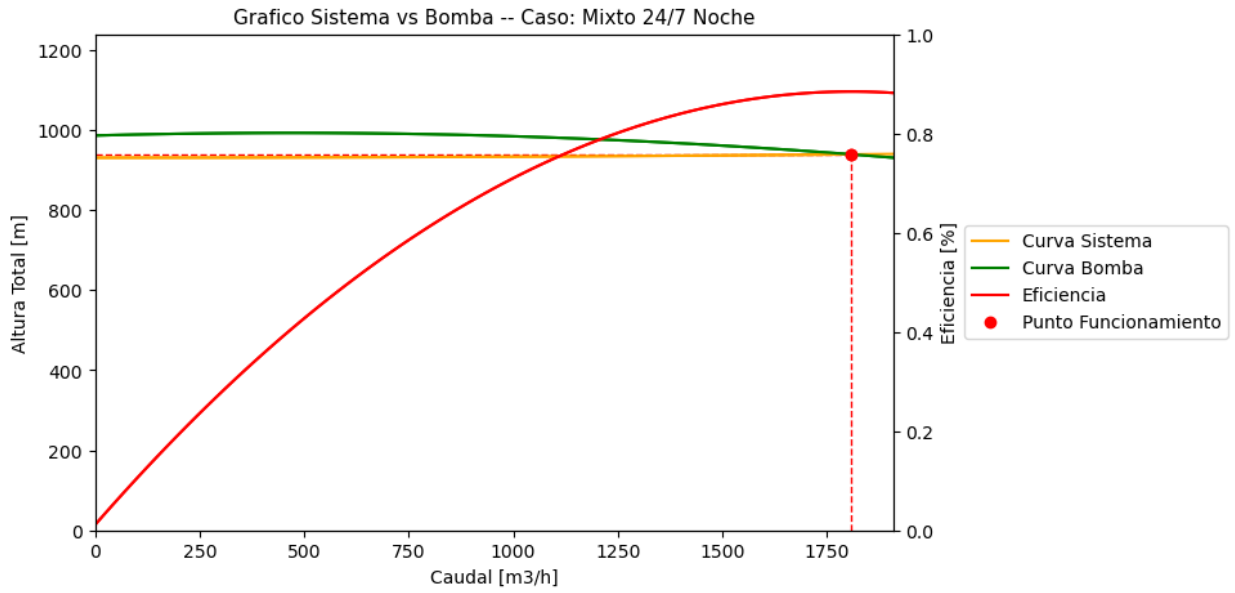


Figura C.18: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche del Proyecto TEA

Fuente: Elaboración propia

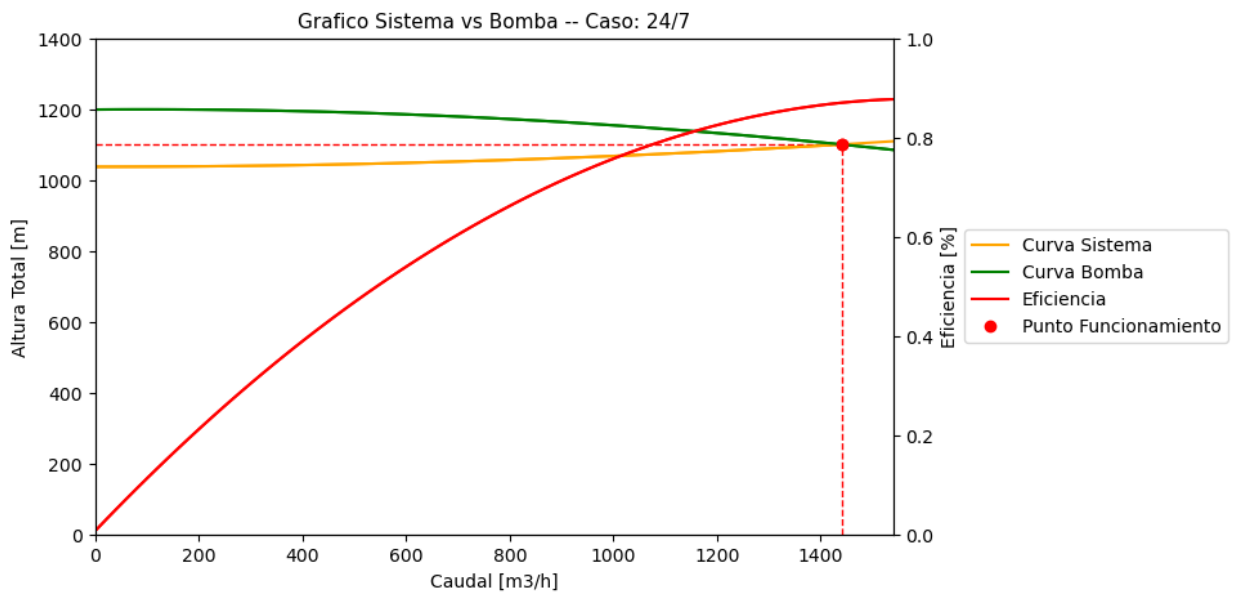


Figura C.19: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto Los Pelambres

Fuente: Elaboración propia

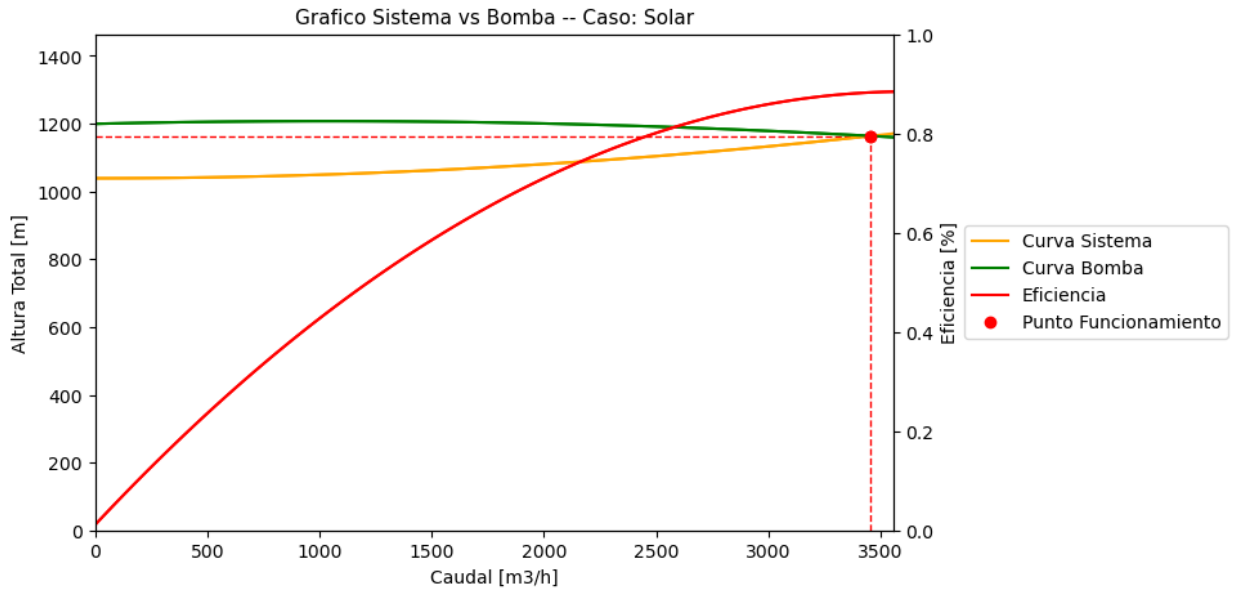


Figura C.20: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

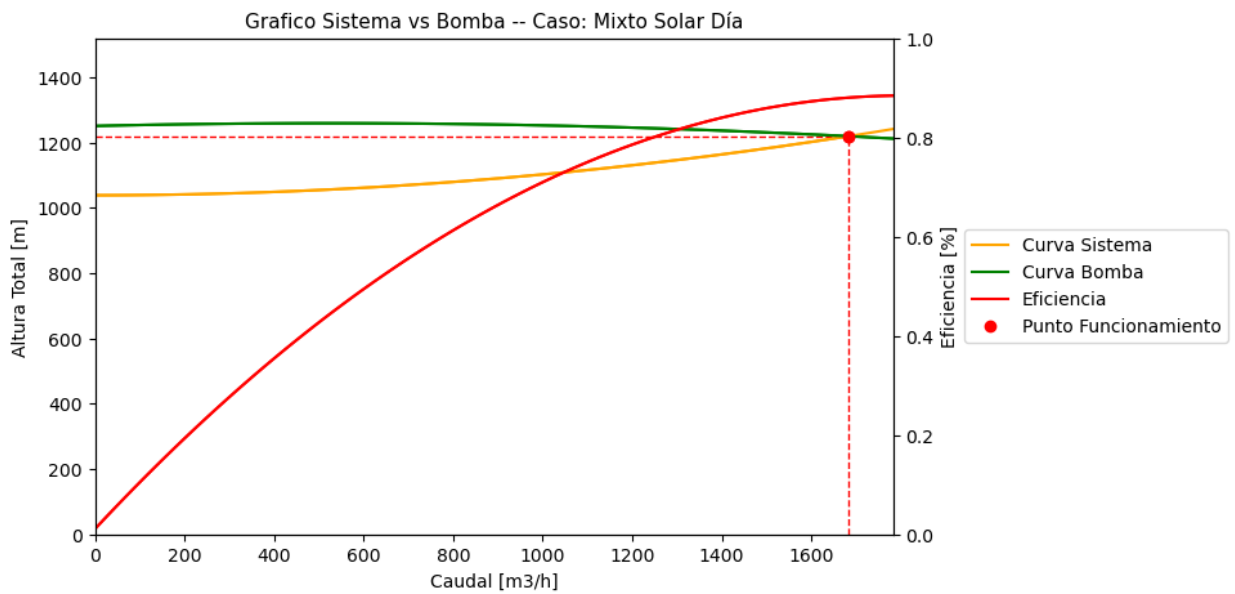


Figura C.21: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

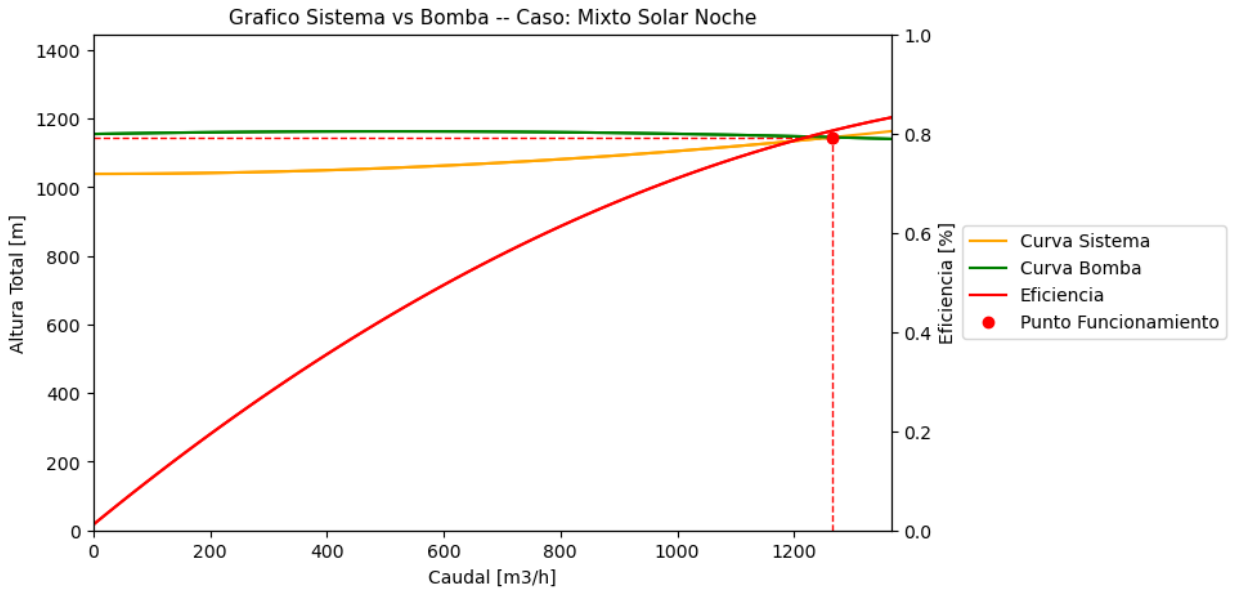


Figura C.22: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto Los Pelambres
 Fuente: Elaboración propia

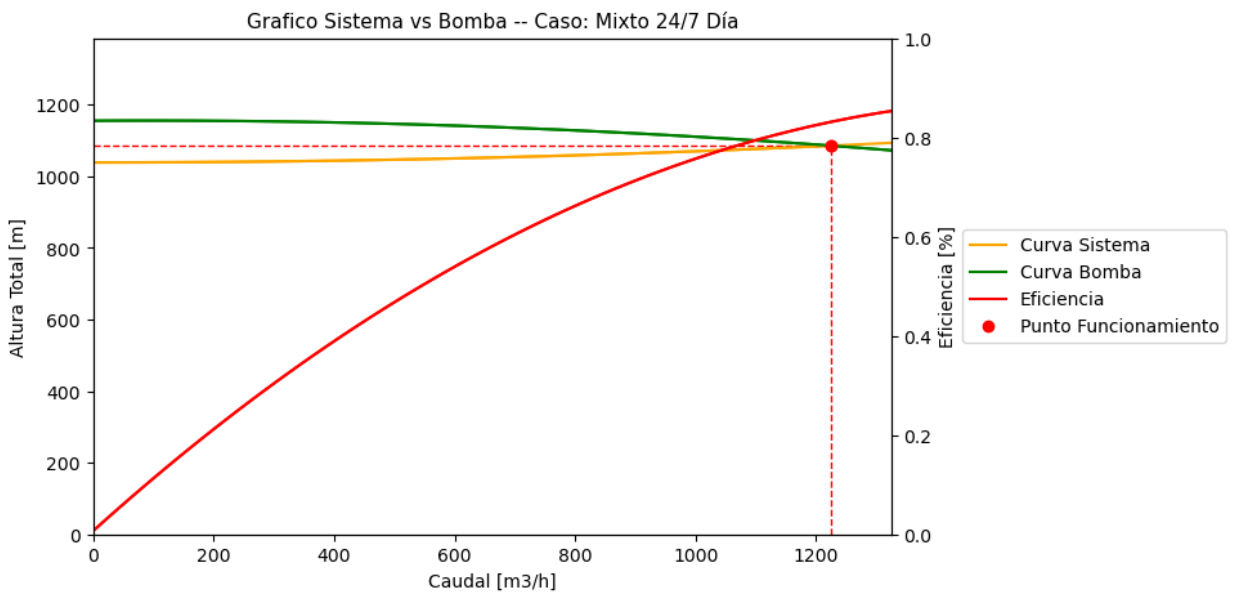


Figura C.23: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto Los Pelambres
 Fuente: Elaboración propia

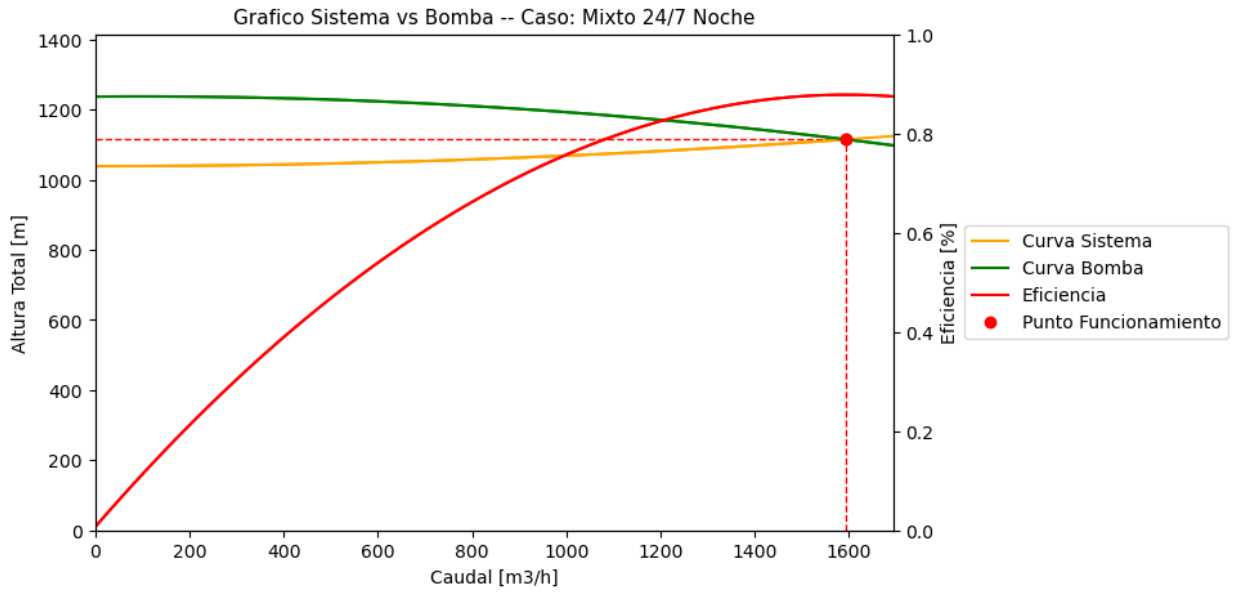


Figura C.24: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

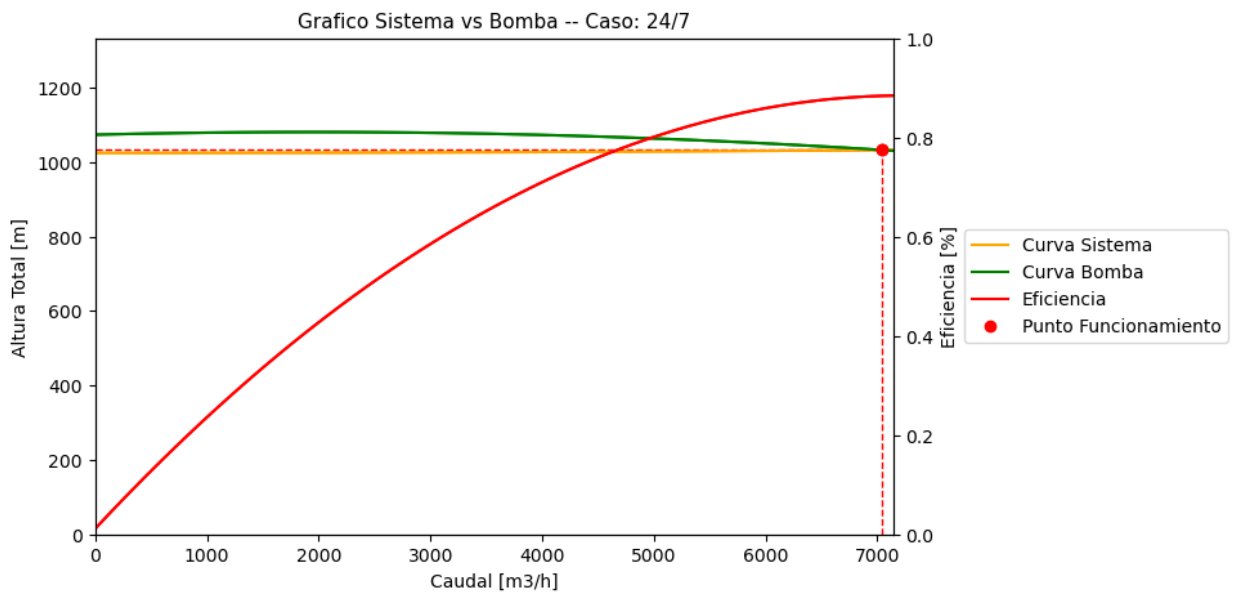


Figura C.25: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB nº 1 a la EB nº 2 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

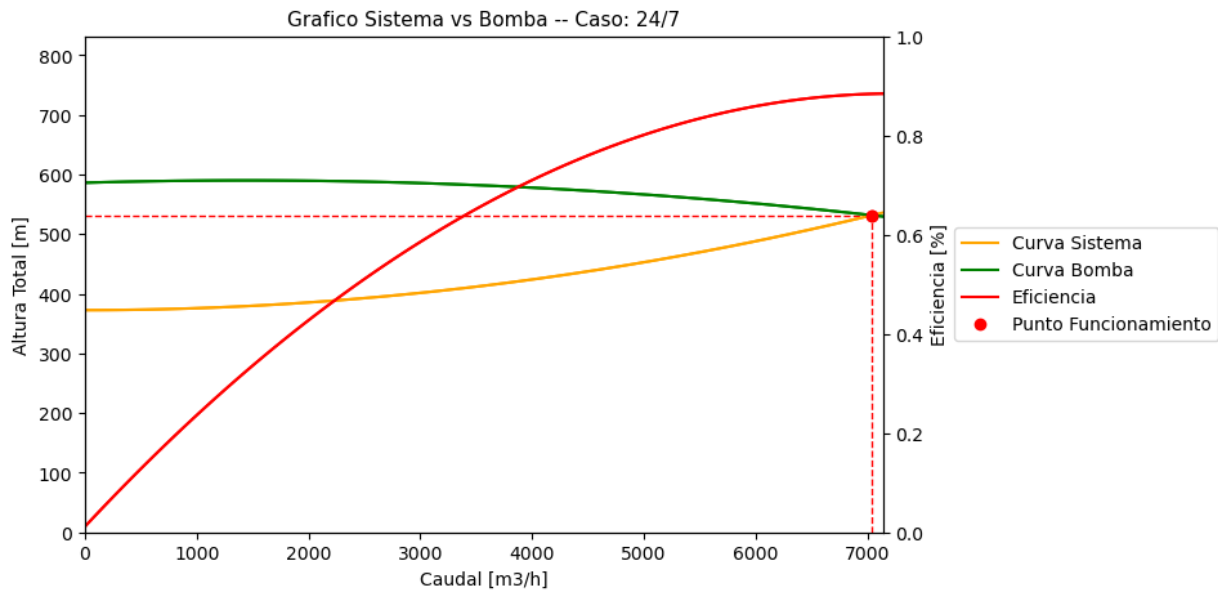


Figura C.26: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 2 a la EB n° 3 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

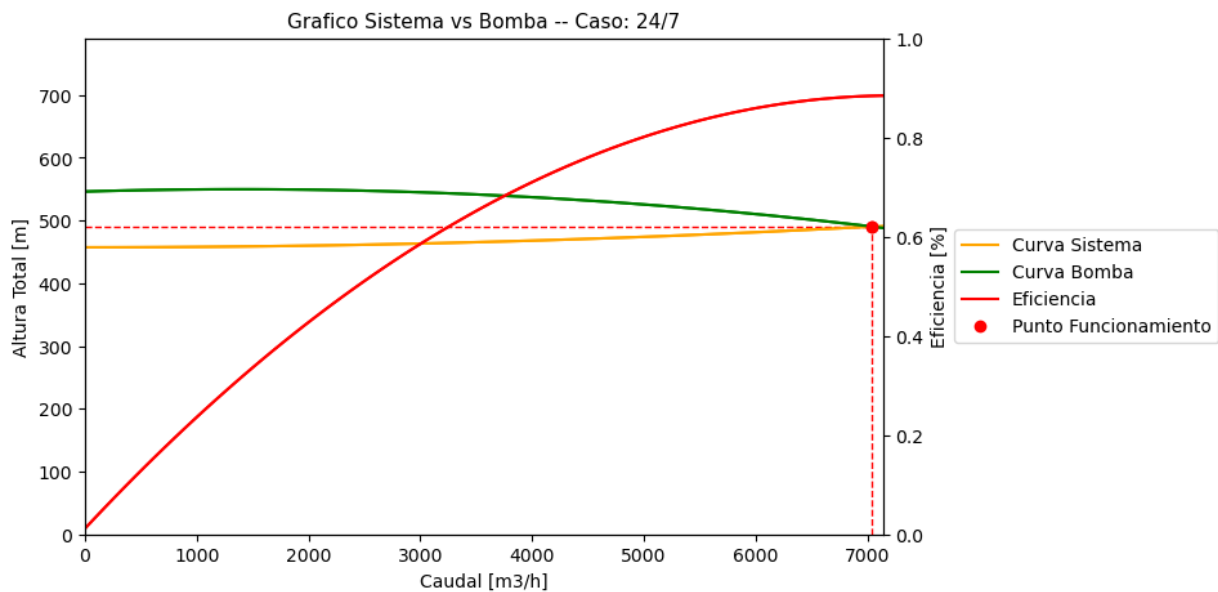


Figura C.27: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 3 a la EB n° 4 del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

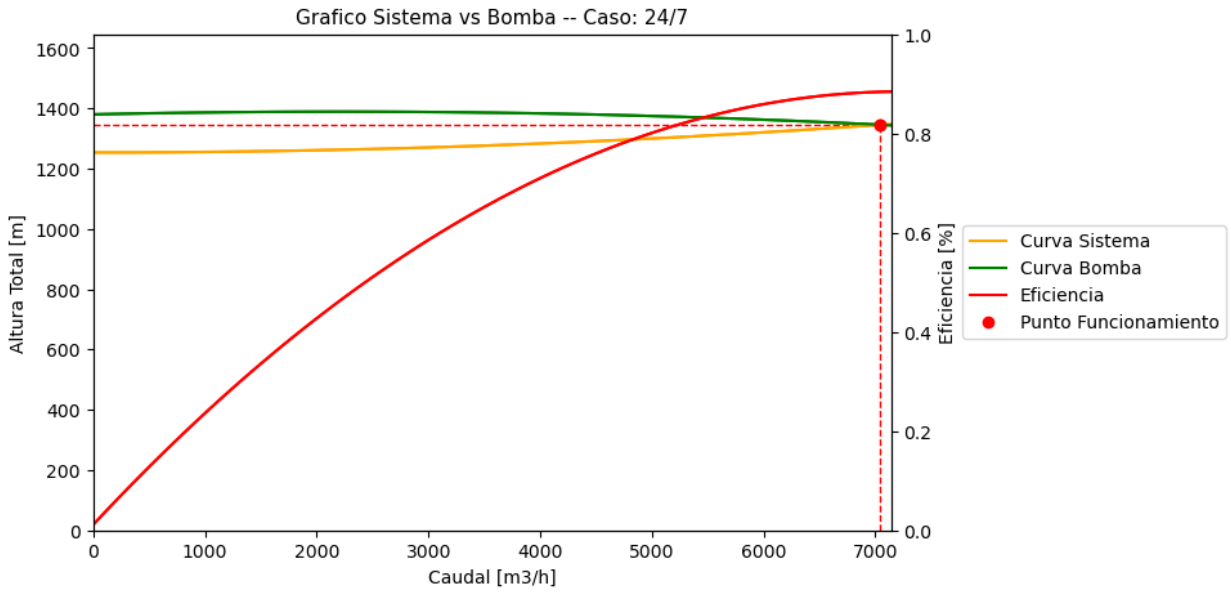


Figura C.28: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 4 al punto final del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

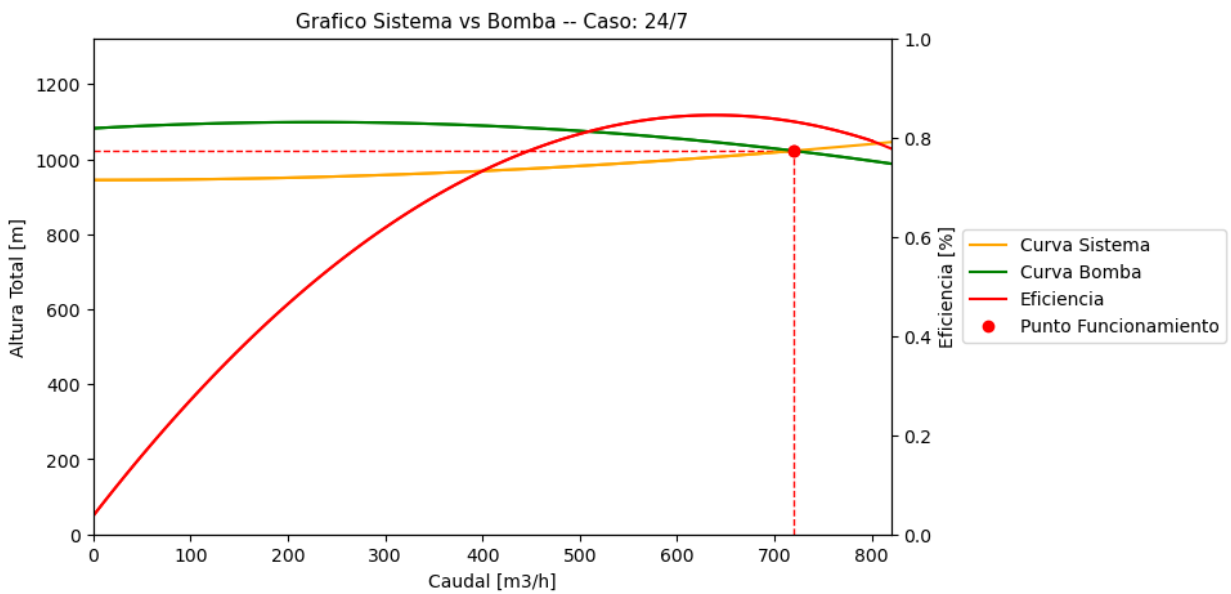


Figura C.29: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

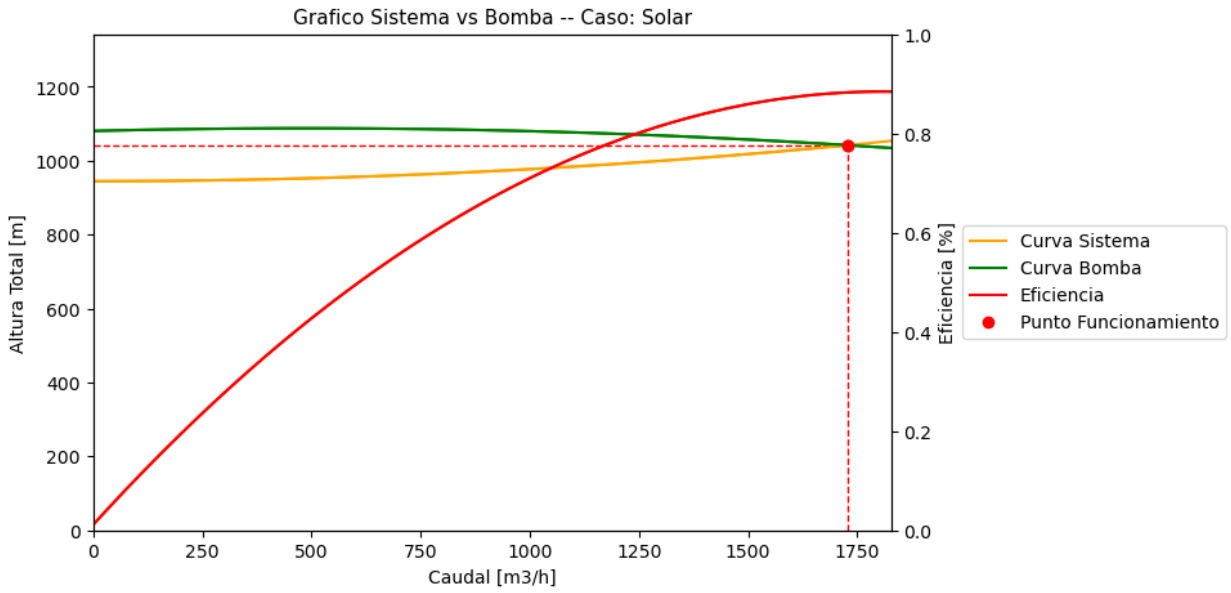


Figura C.30: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

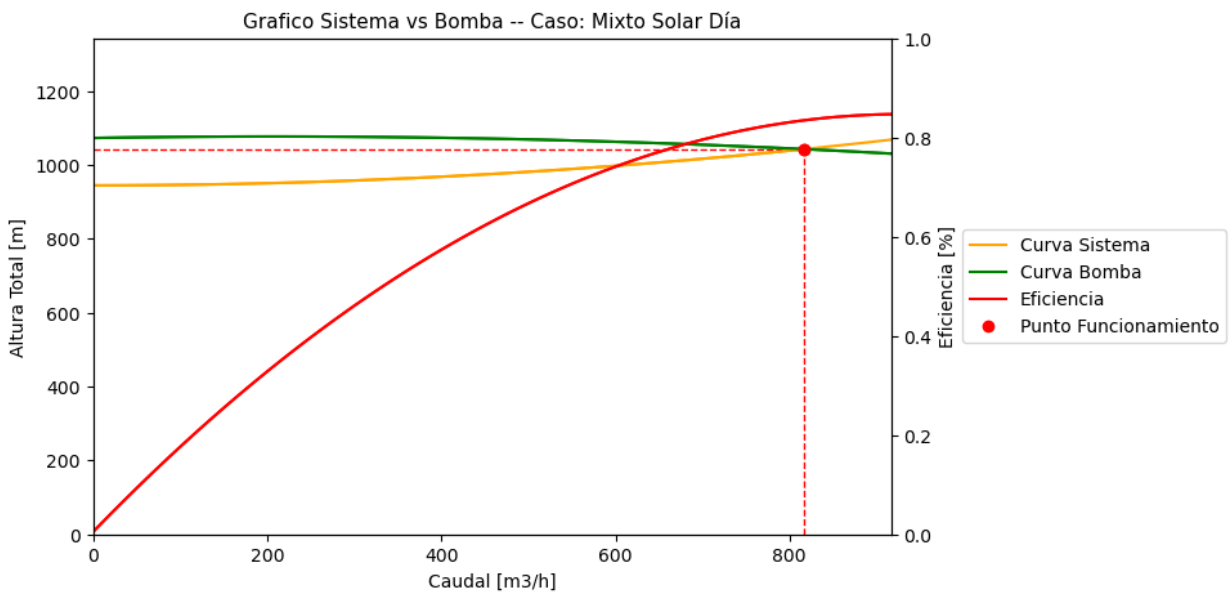


Figura C.31: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

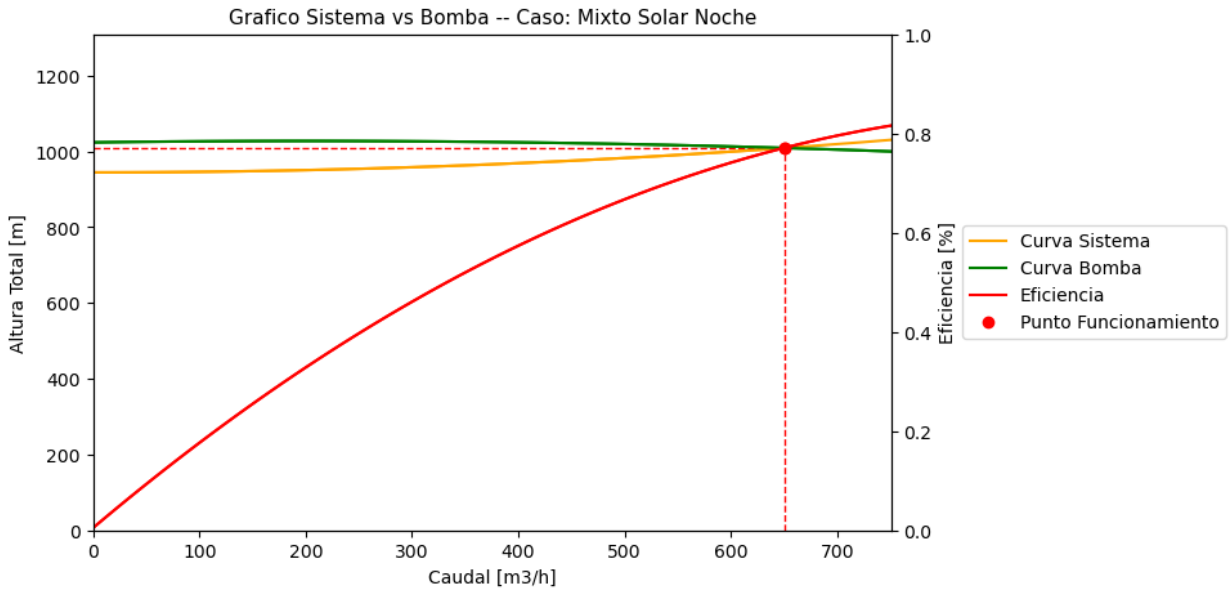


Figura C.32: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

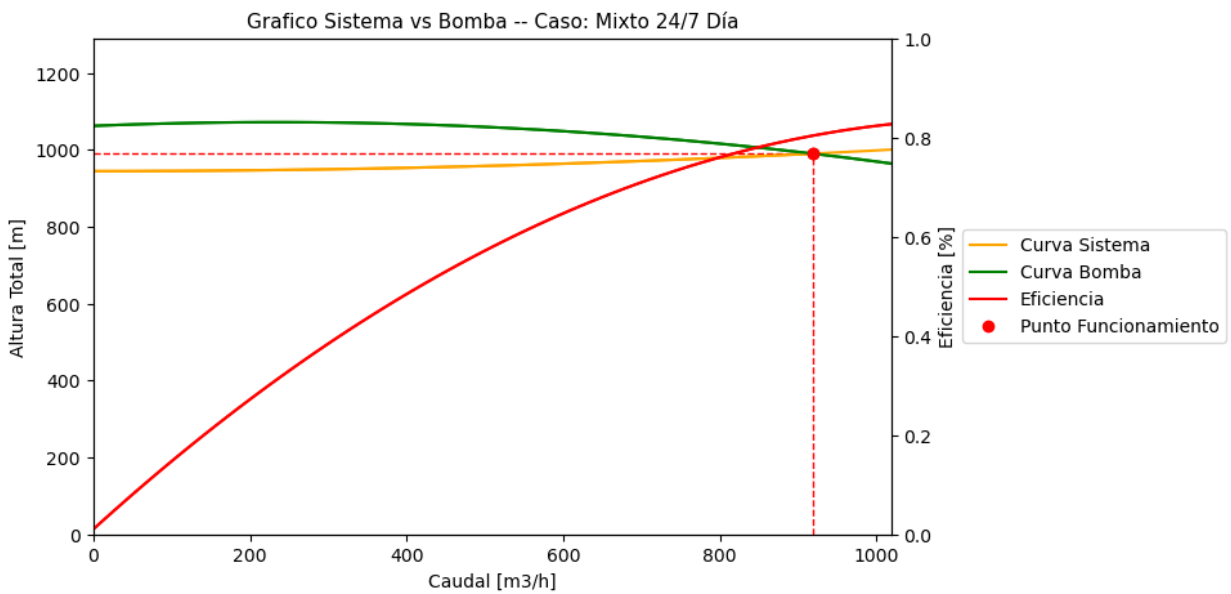


Figura C.33: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

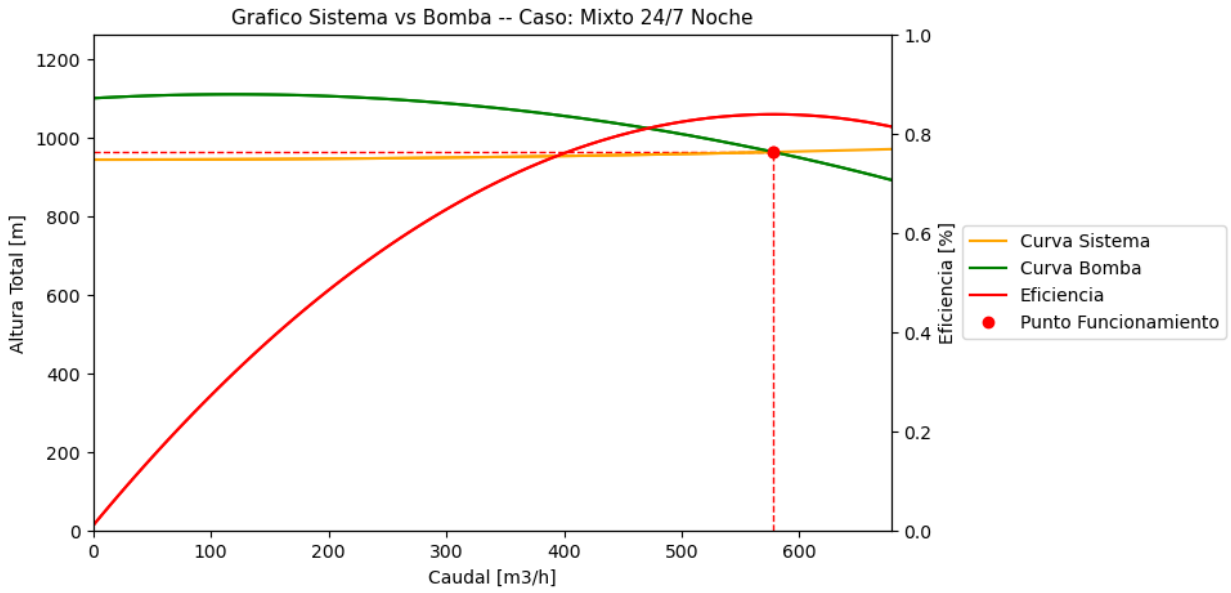


Figura C.34: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

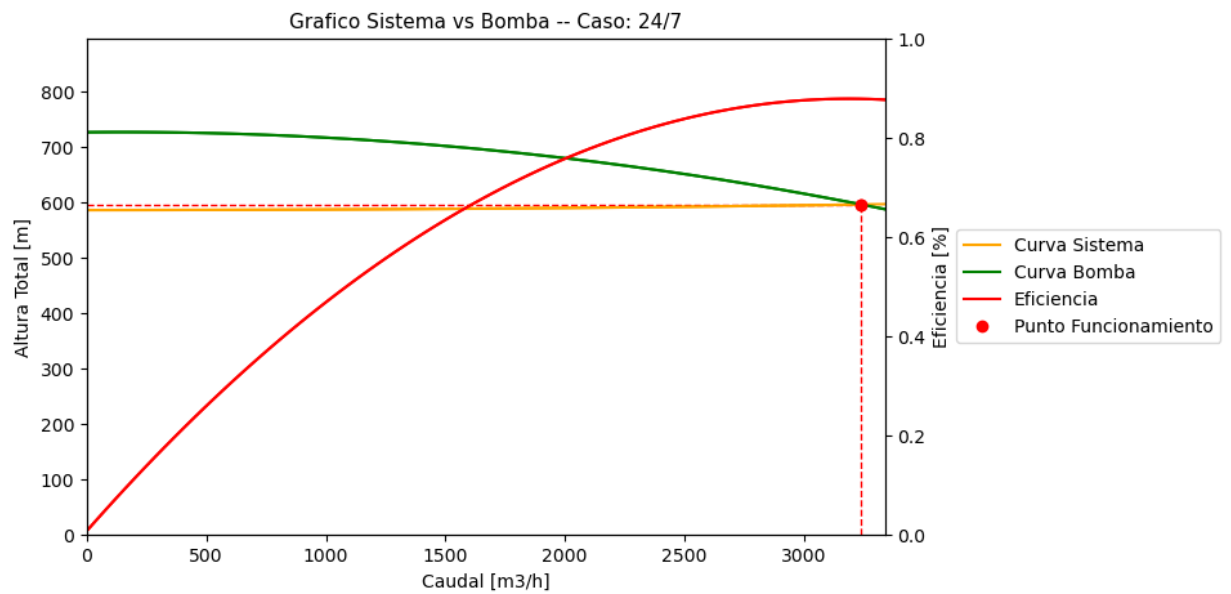


Figura C.35: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 1 a la EB n°2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

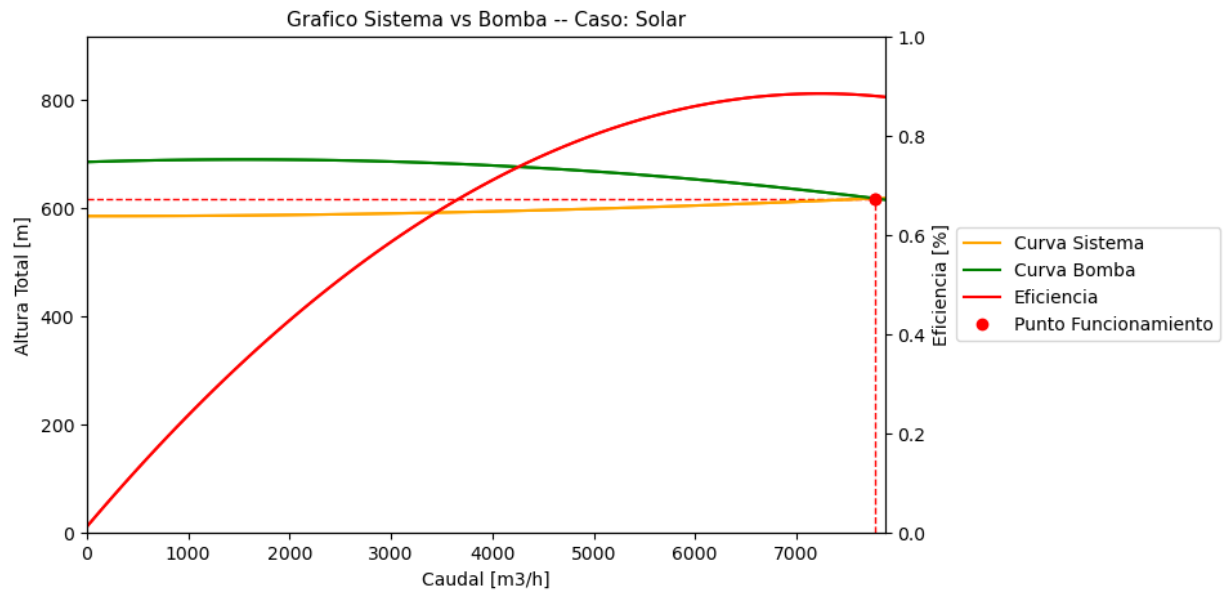


Figura C.36: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

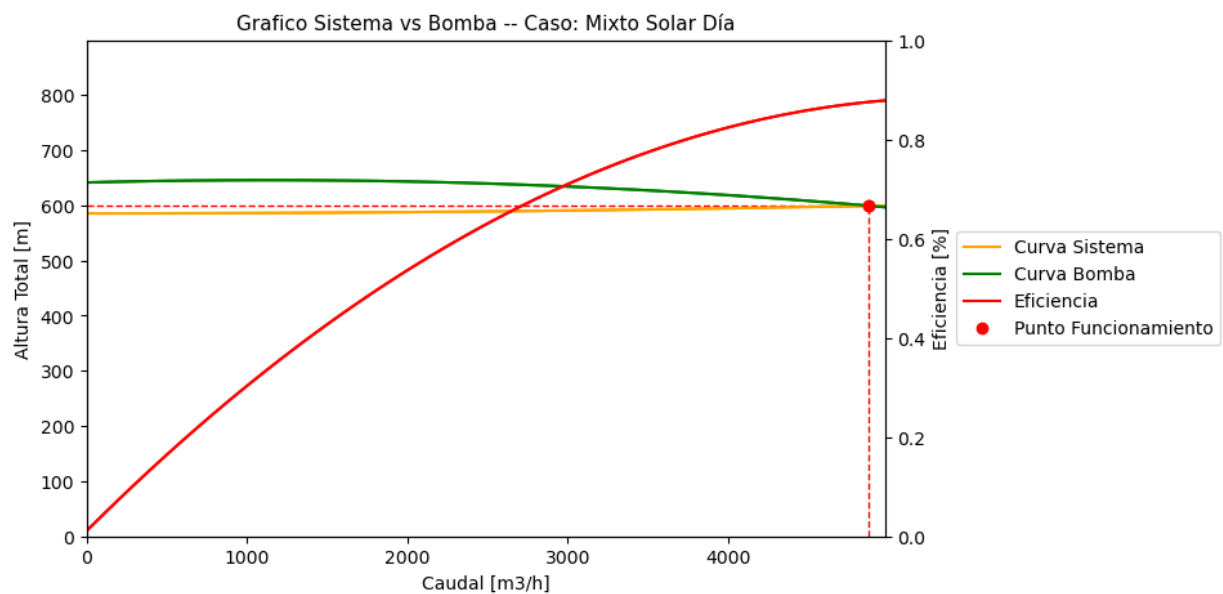


Figura C.37: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

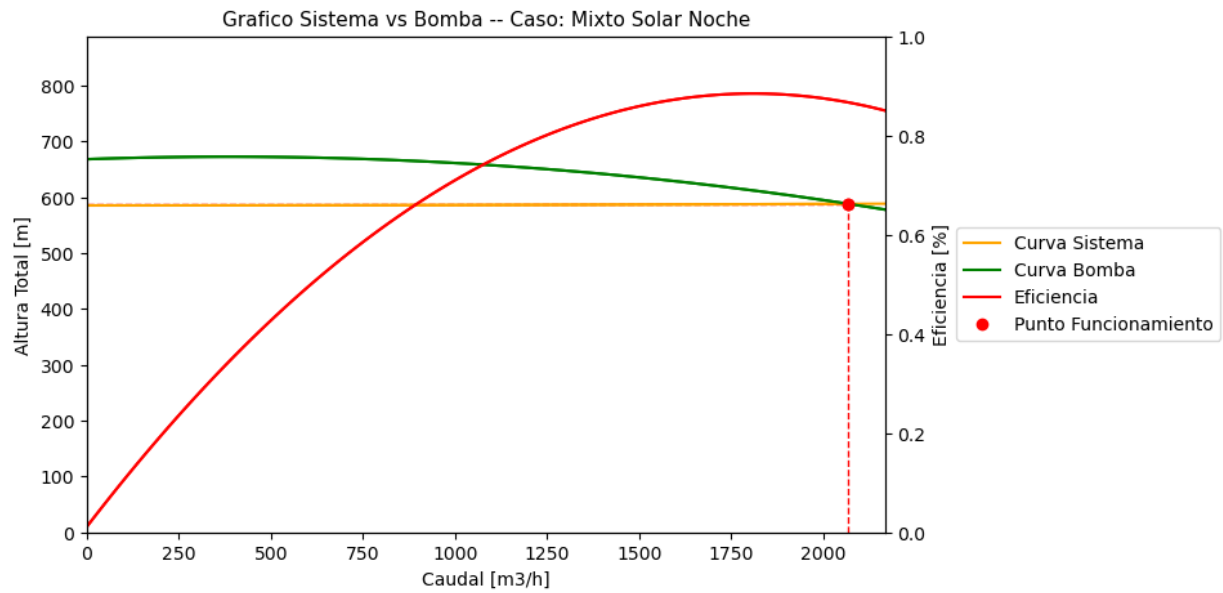


Figura C.38: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

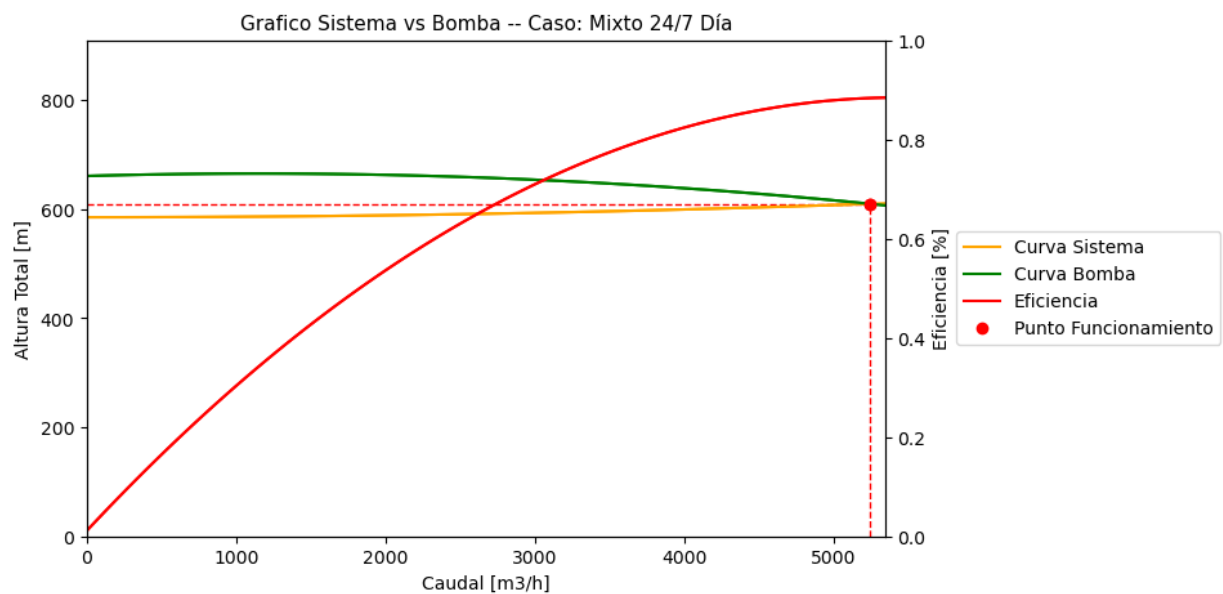


Figura C.39: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

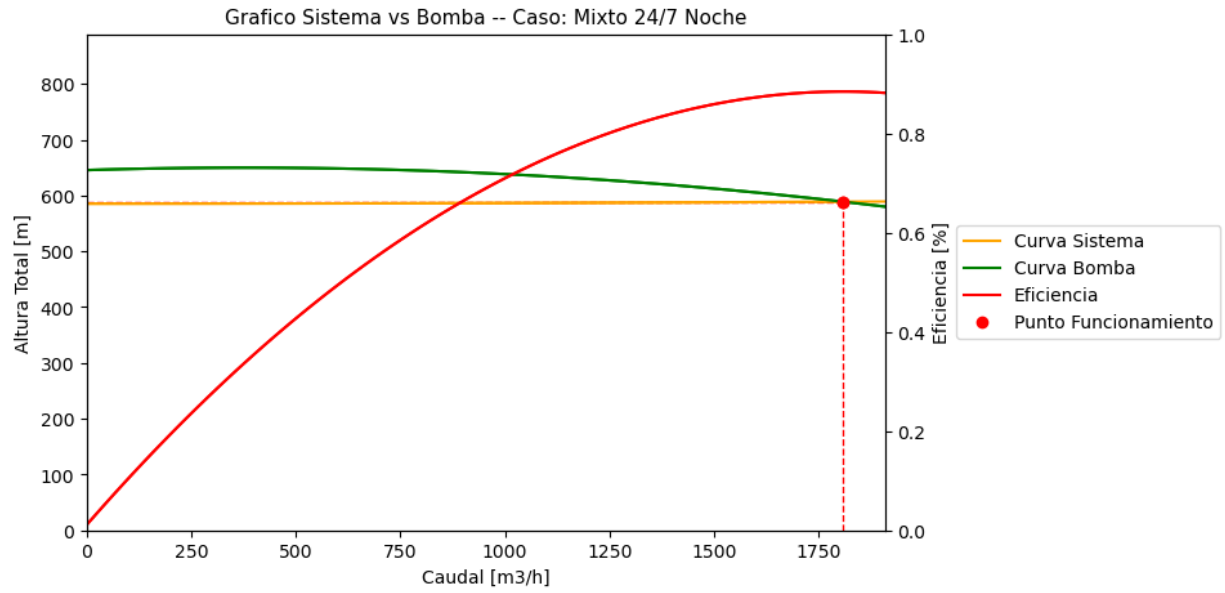


Figura C.40: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde la EB n° 1 a la EB n° 2 del Proyecto TEA modificado
 Fuente: Elaboración propia

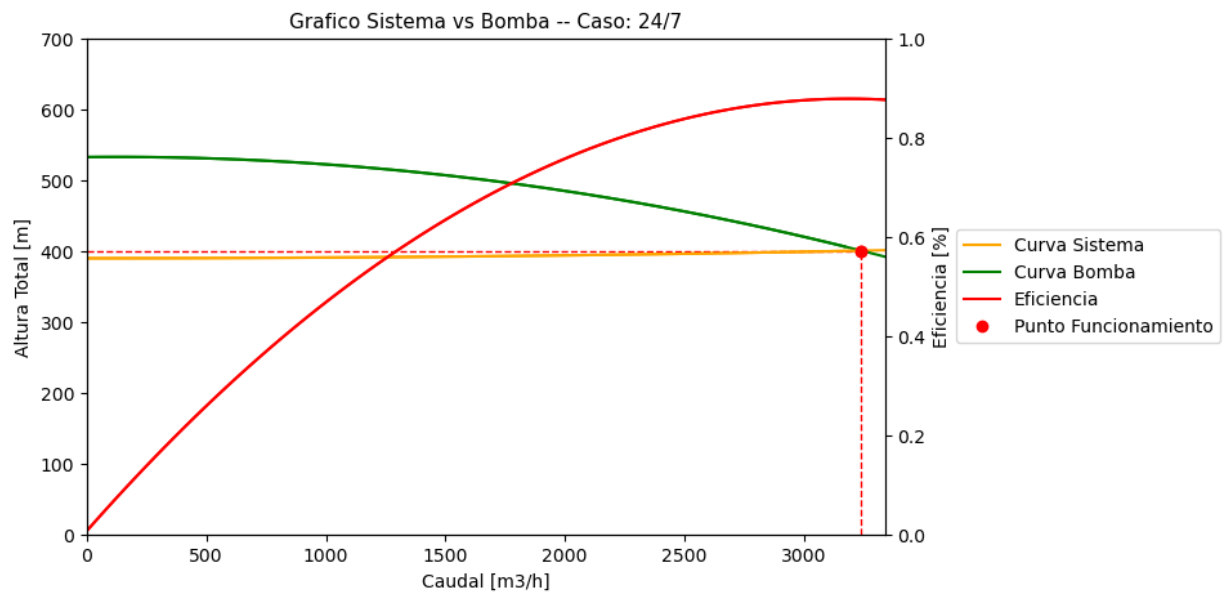


Figura C.41: Gráfica de la operación de la bomba en el caso 24/7 desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
 Fuente: Elaboración propia

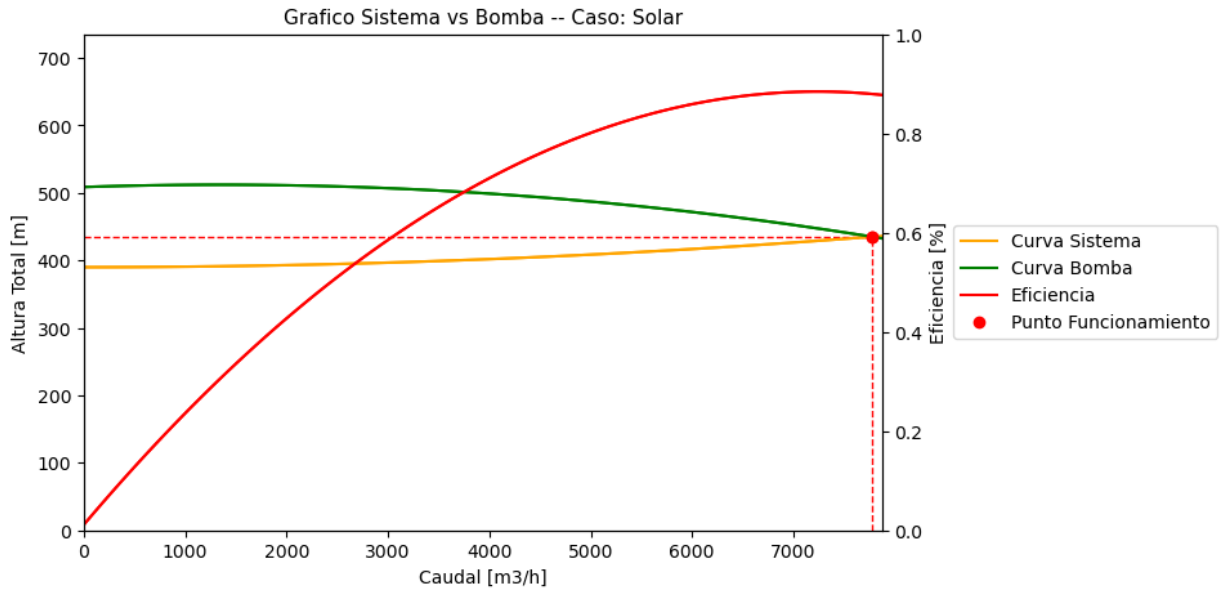


Figura C.42: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Solar desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

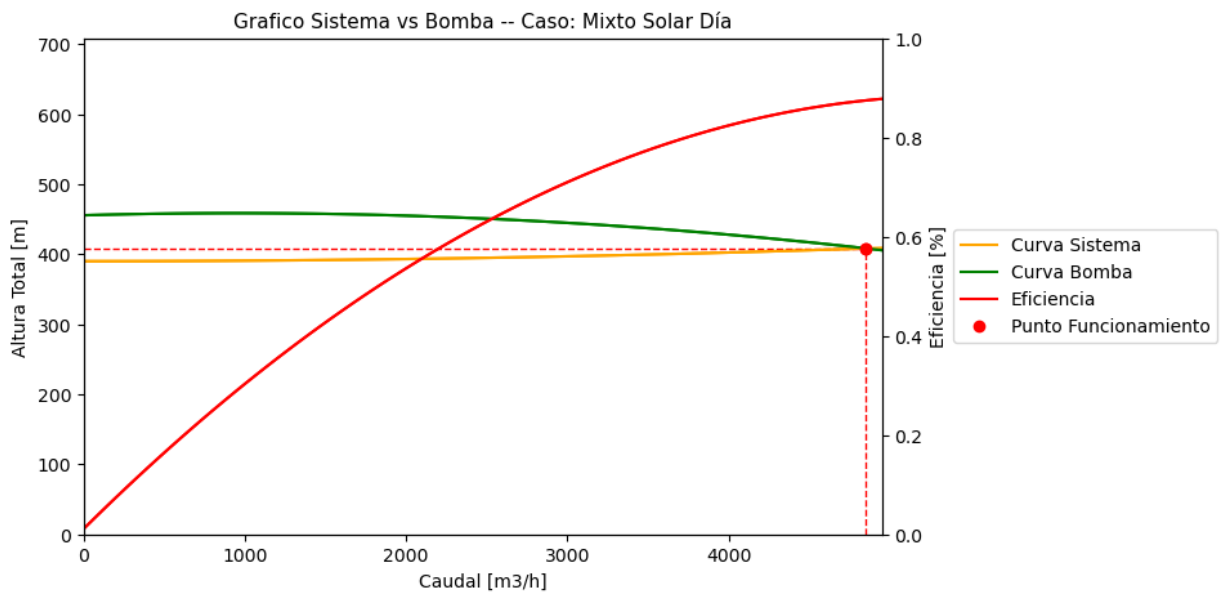


Figura C.43: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de día desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

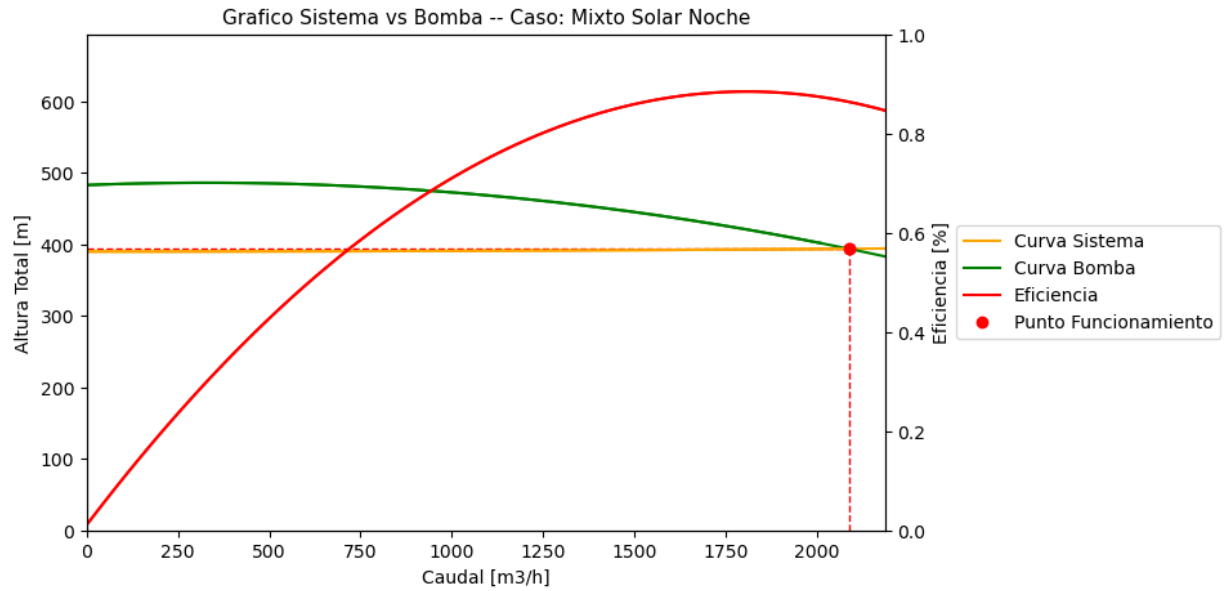


Figura C.44: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto Solar de noche desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

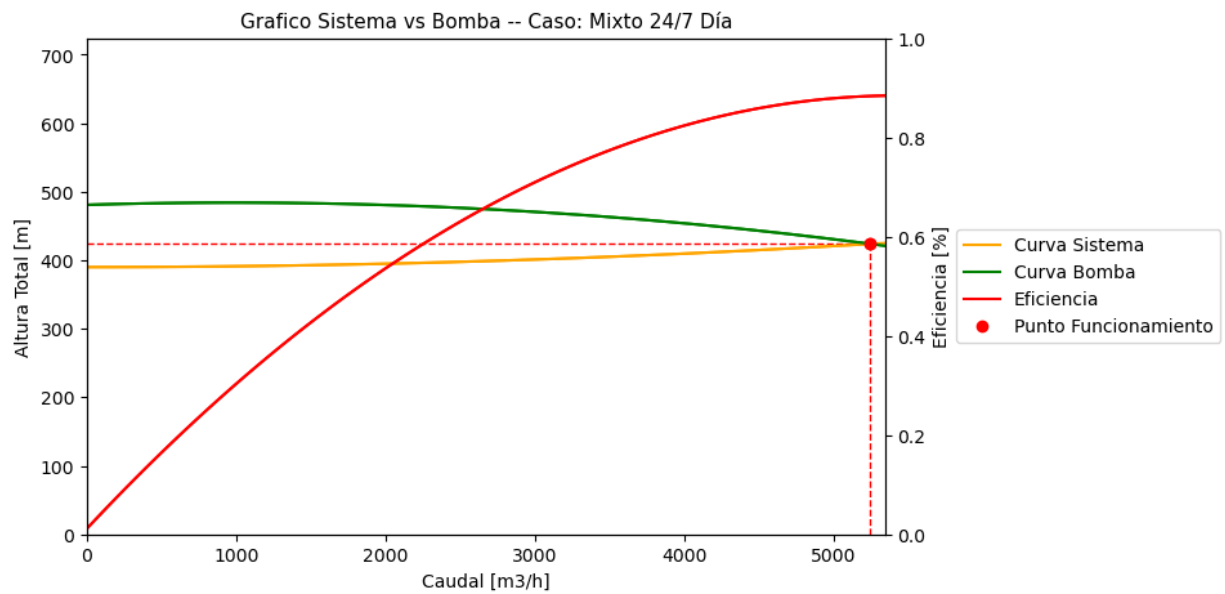


Figura C.45: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de día desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

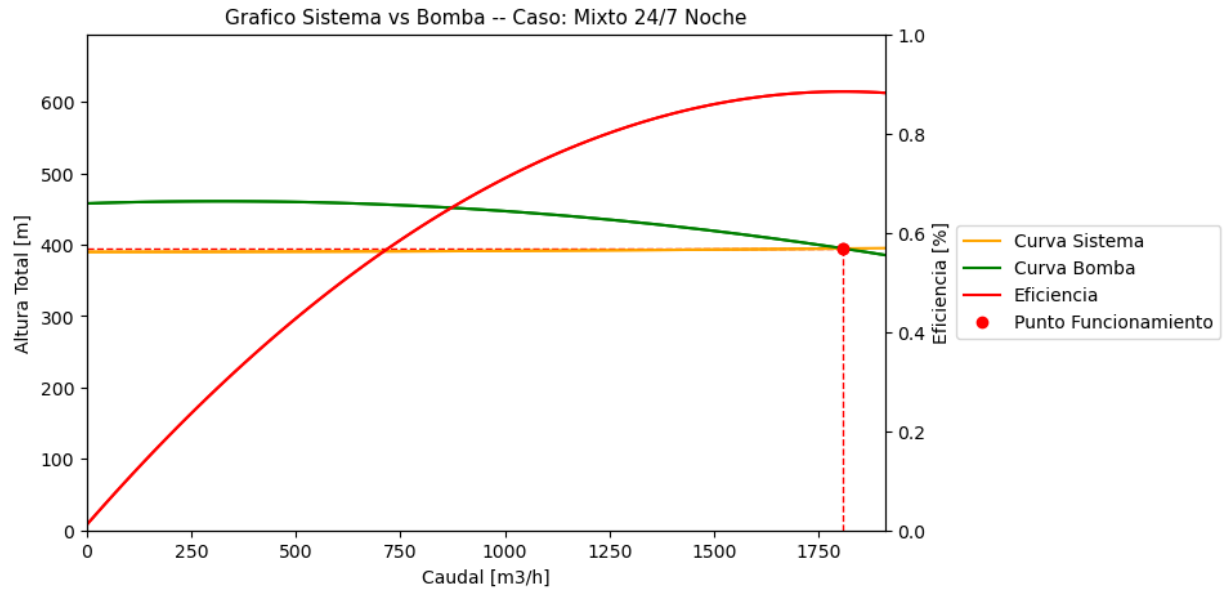


Figura C.46: Gráfica de la operación de la bomba en el caso Mixto 24/7 de noche desde la EB n° 2 al punto final del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

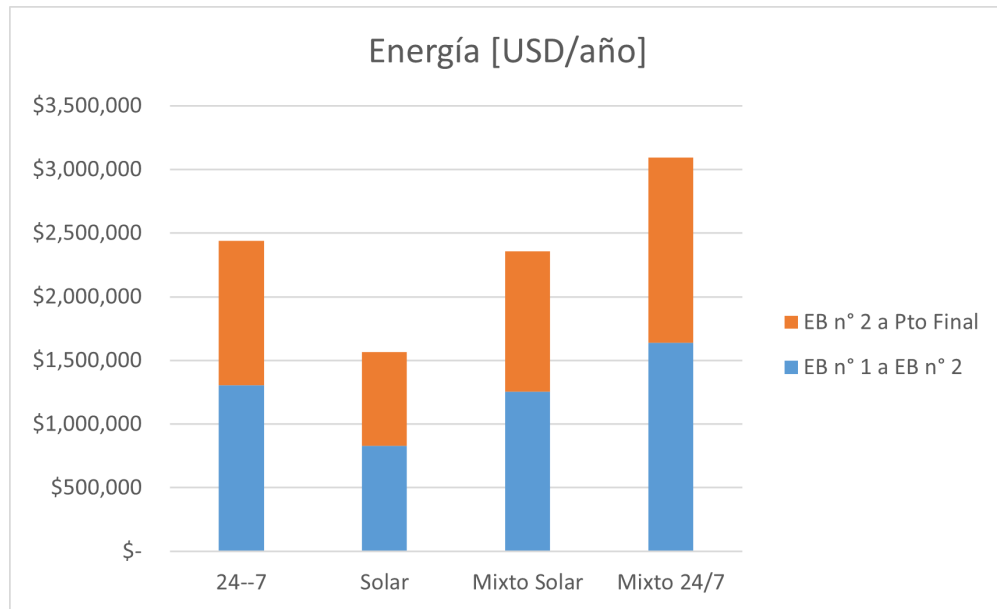


Figura C.47: Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

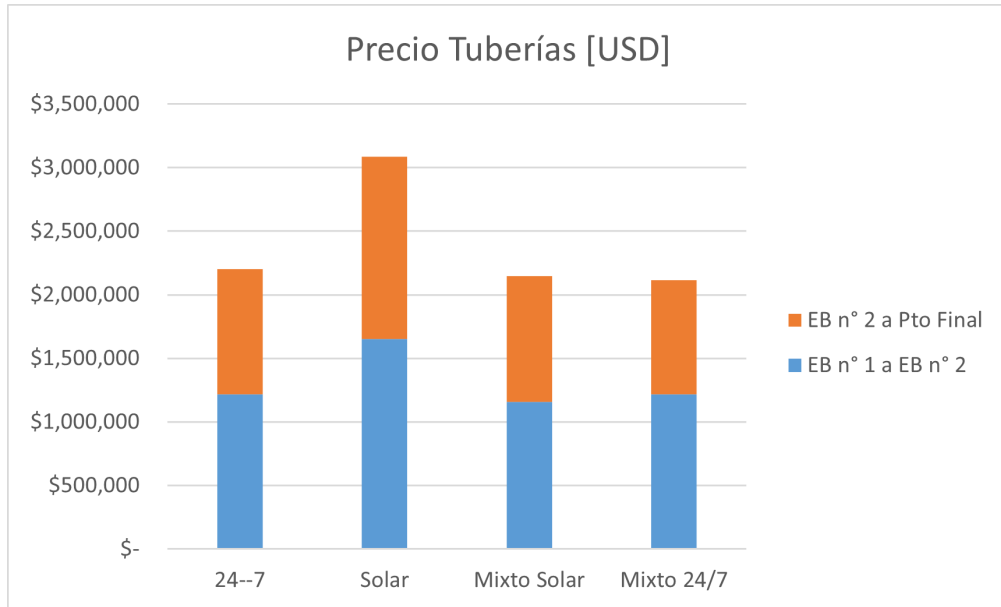


Figura C.48: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

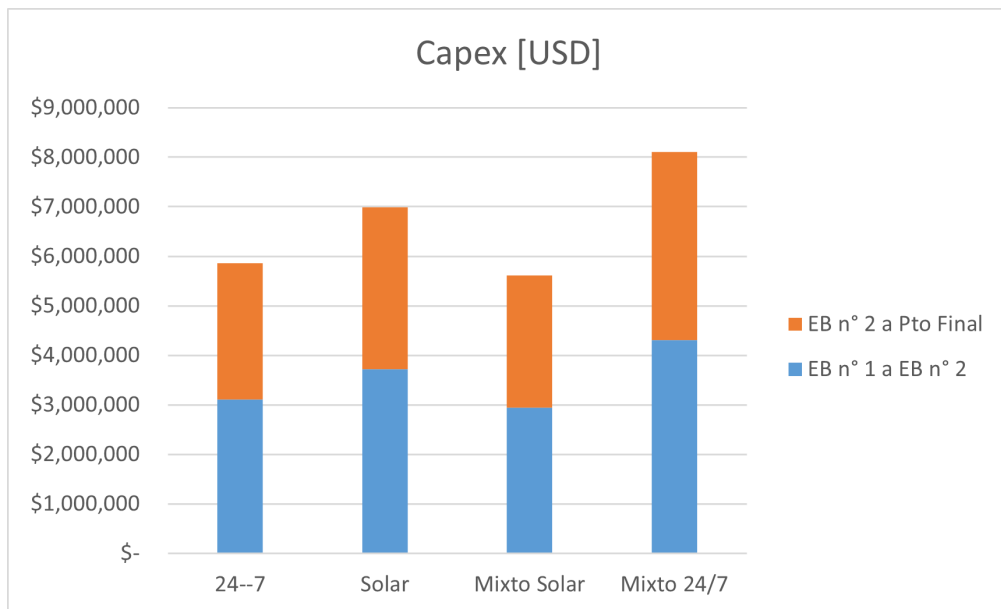


Figura C.49: Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

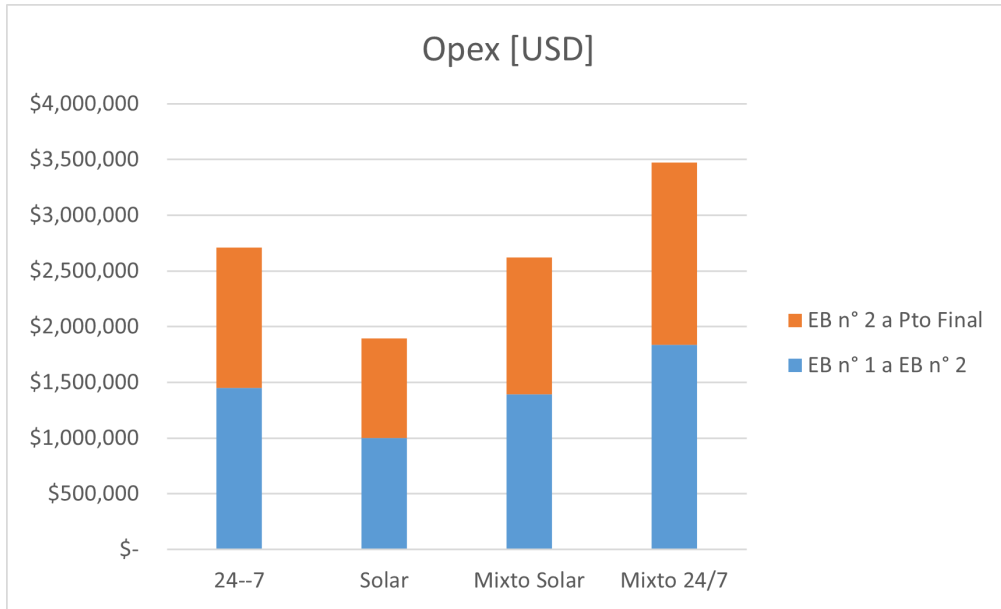


Figura C.50: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

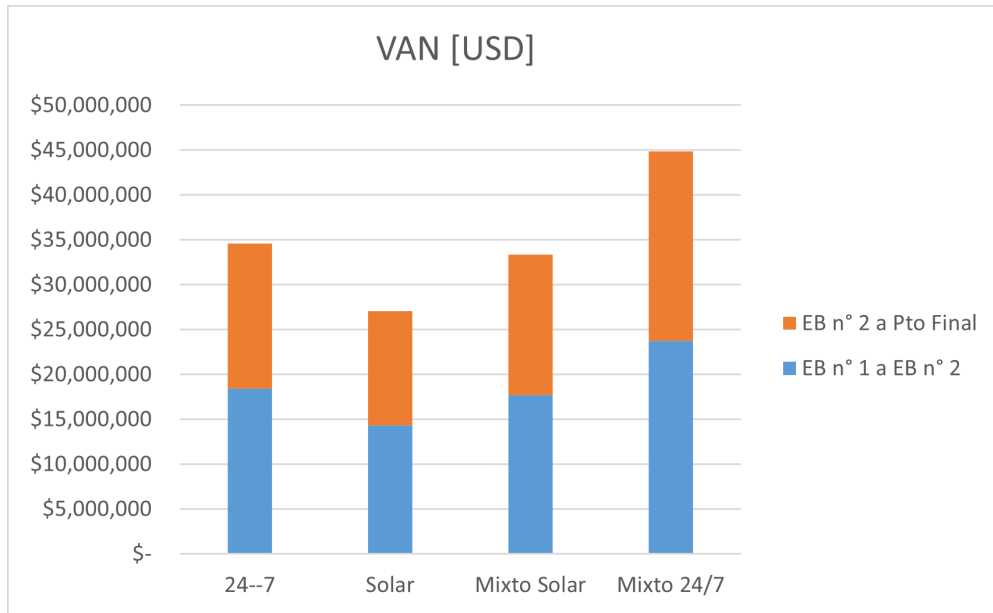


Figura C.51: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

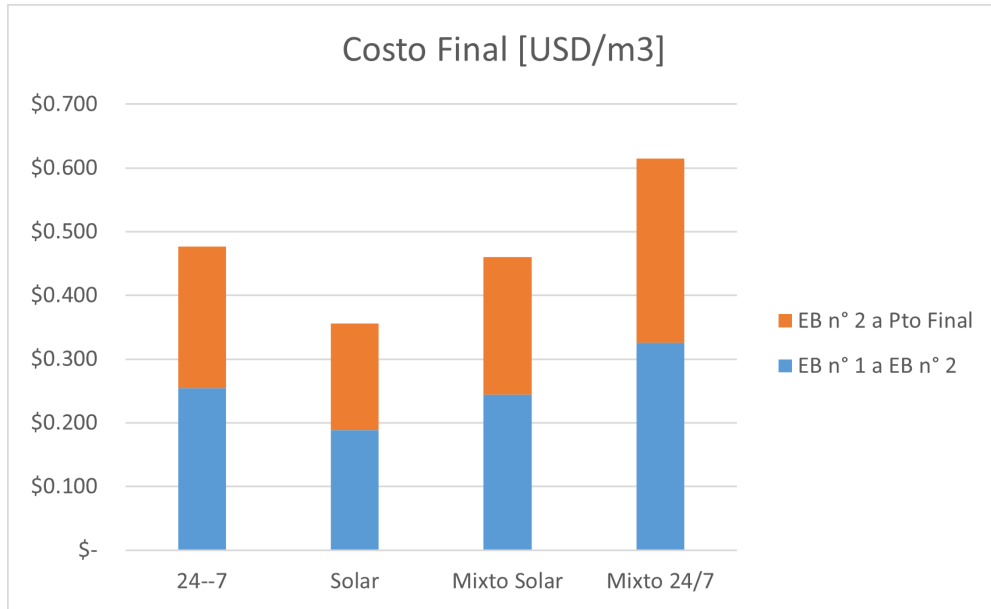


Figura C.52: Gráfica de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto Orcoma
Fuente: Elaboración propia

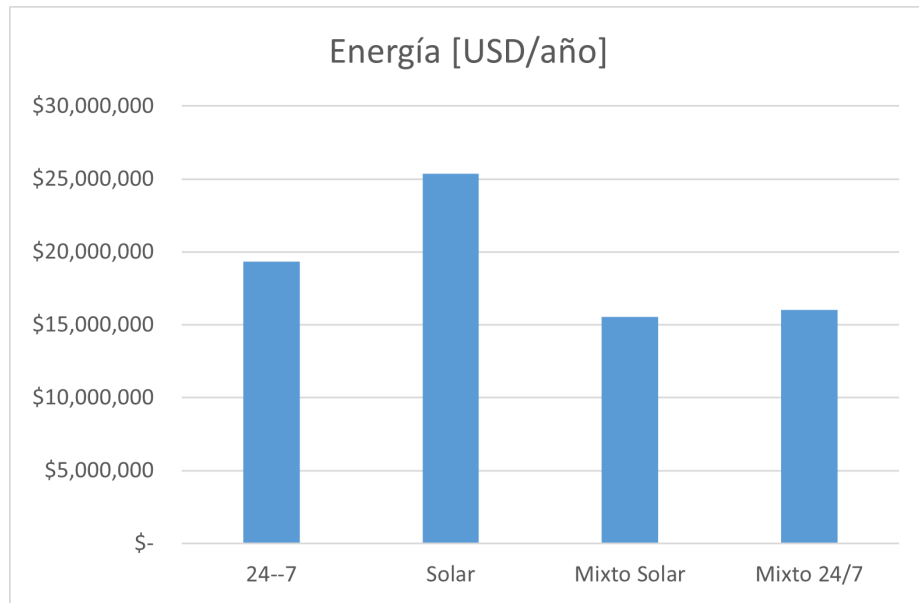


Figura C.53: Gráfica de los costos energético del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

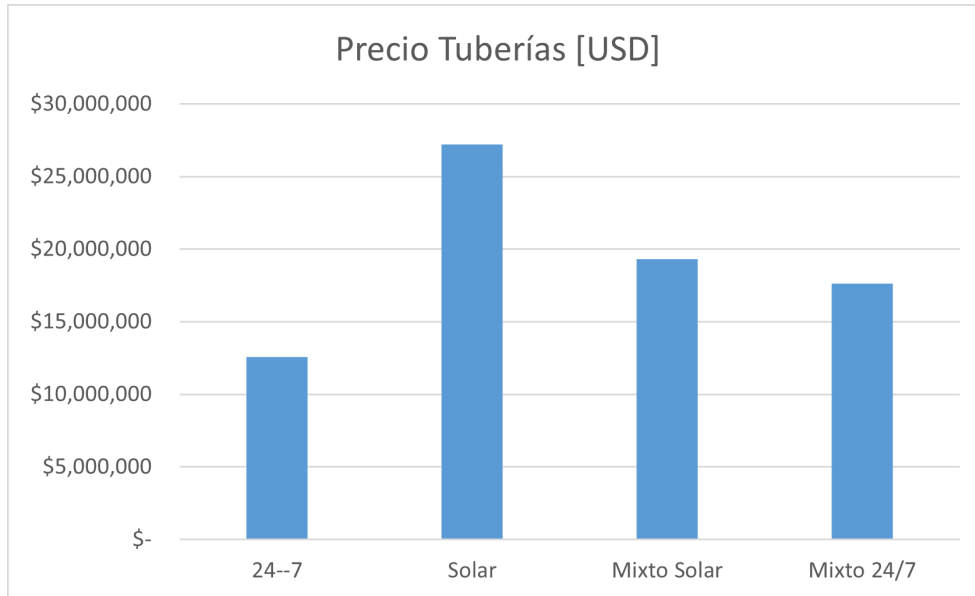


Figura C.54: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

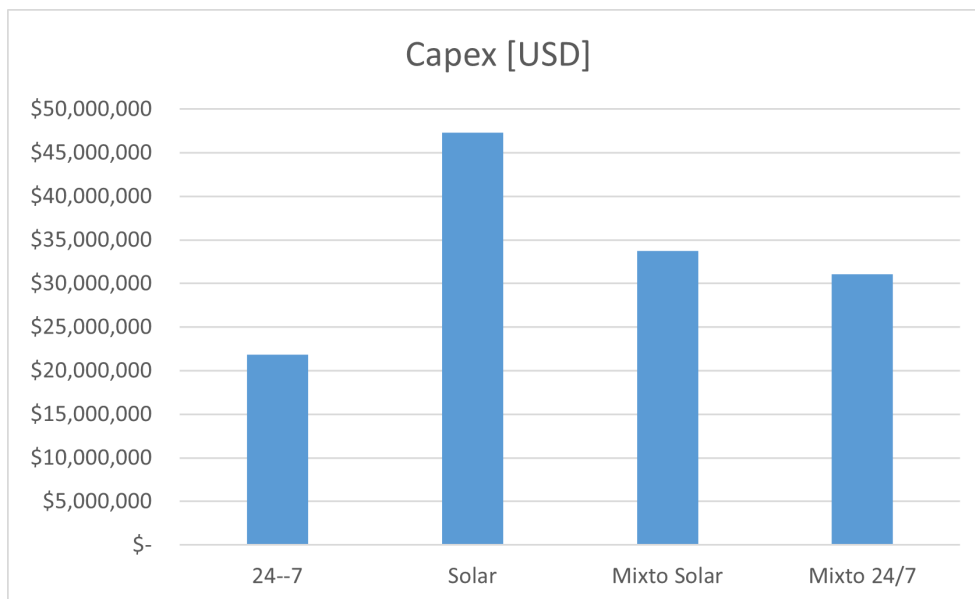


Figura C.55: Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

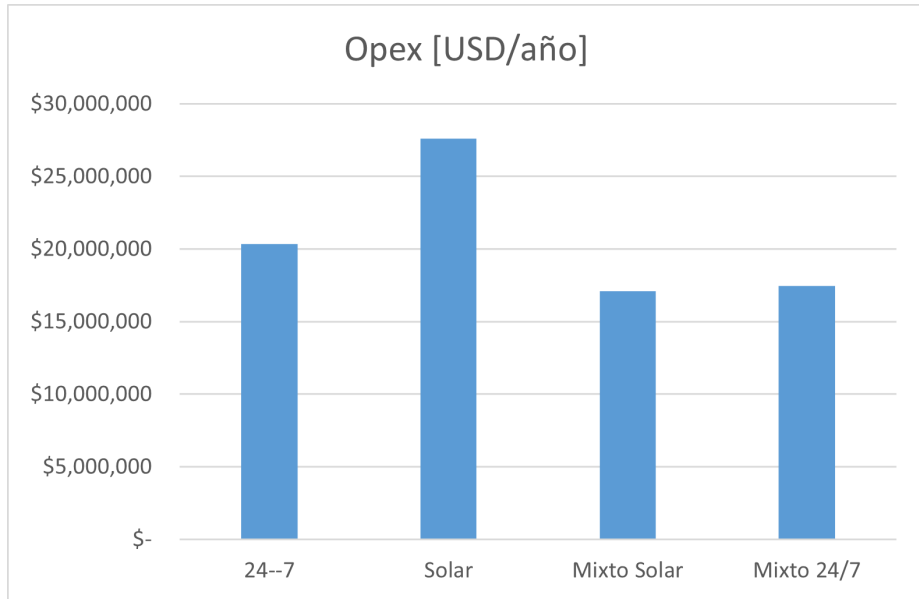


Figura C.56: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

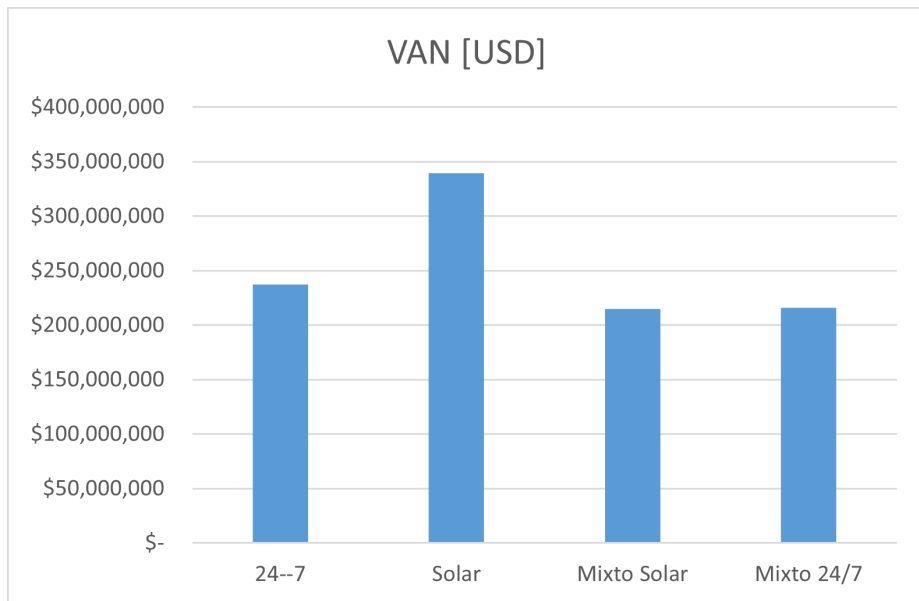


Figura C.57: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto TEA
Fuente: Elaboración propia

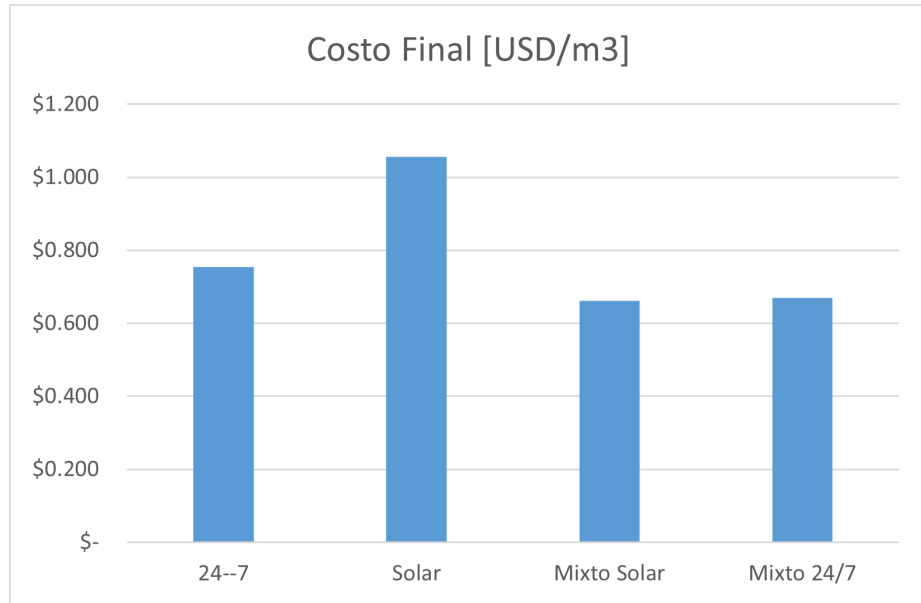


Figura C.58: Gráfica de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto TEA

Fuente: Elaboración propia

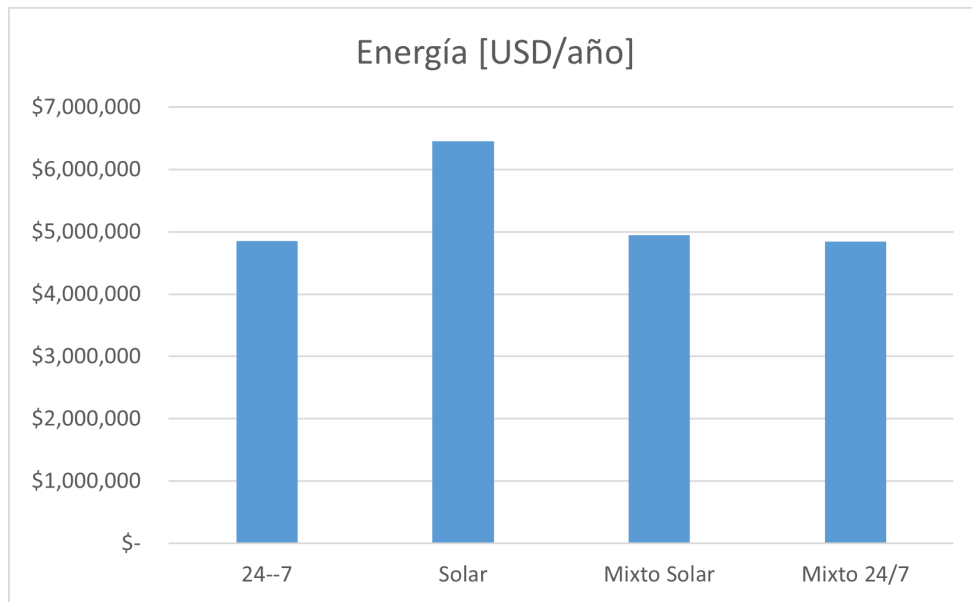


Figura C.59: Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Los Pelambres

Fuente: Elaboración propia

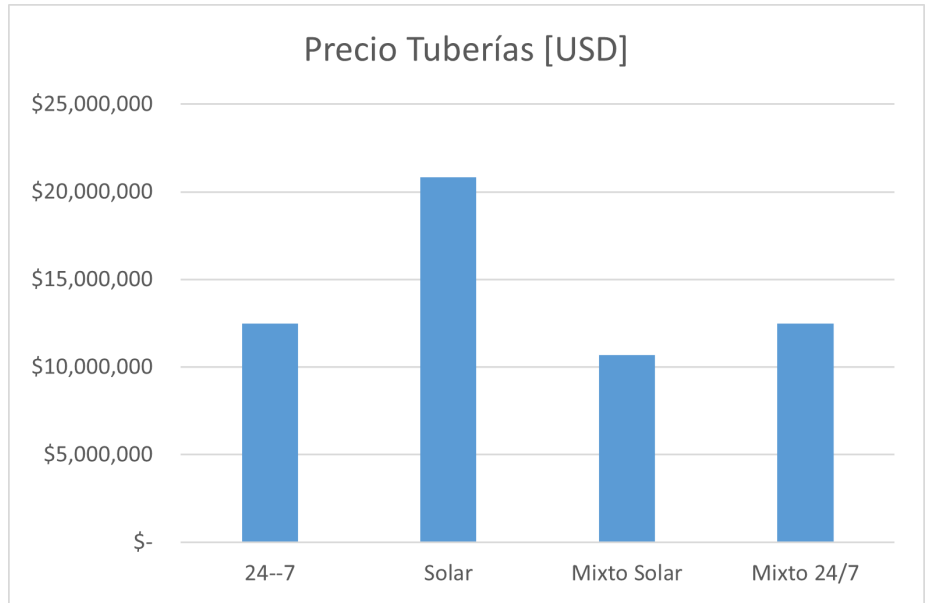


Figura C.60: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

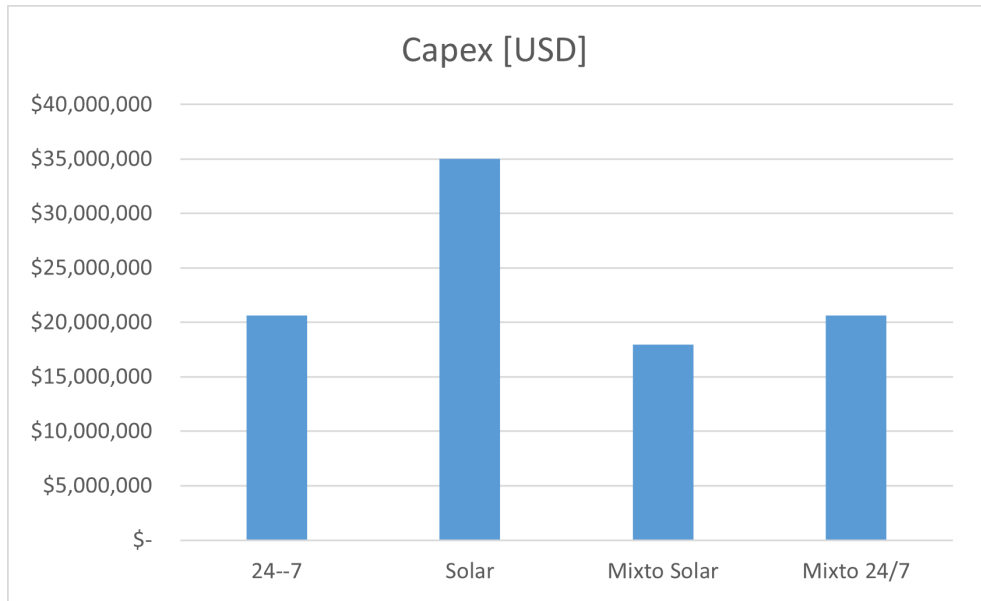


Figura C.61: Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

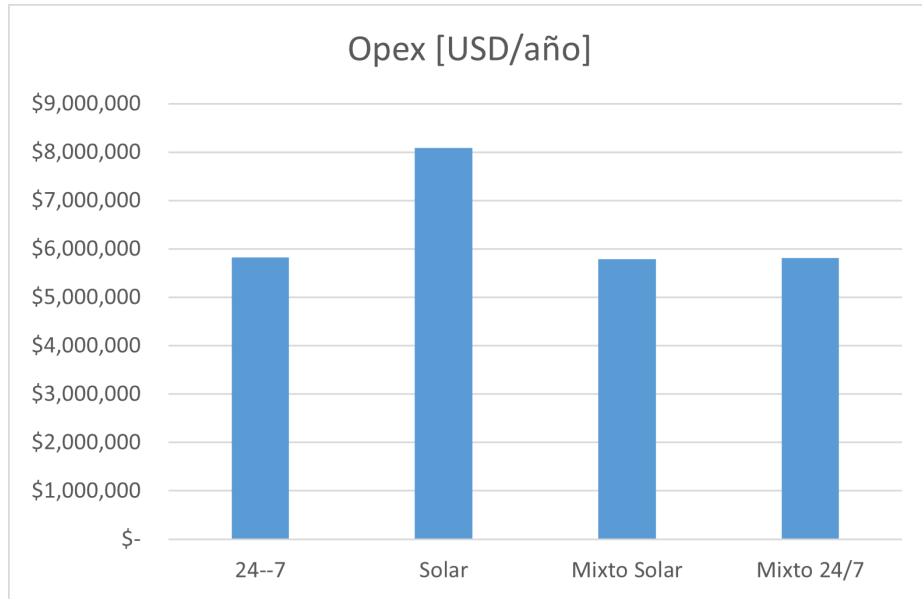


Figura C.62: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

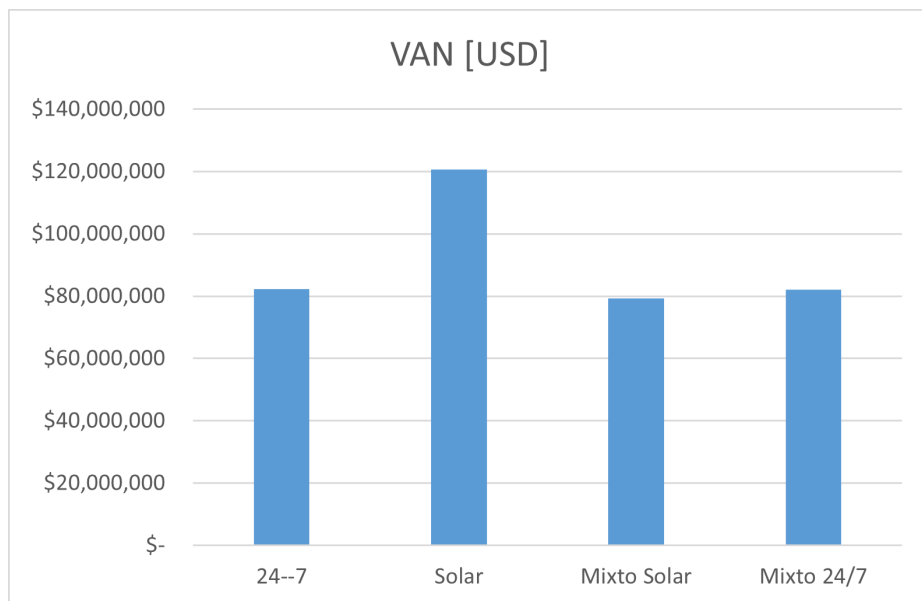


Figura C.63: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

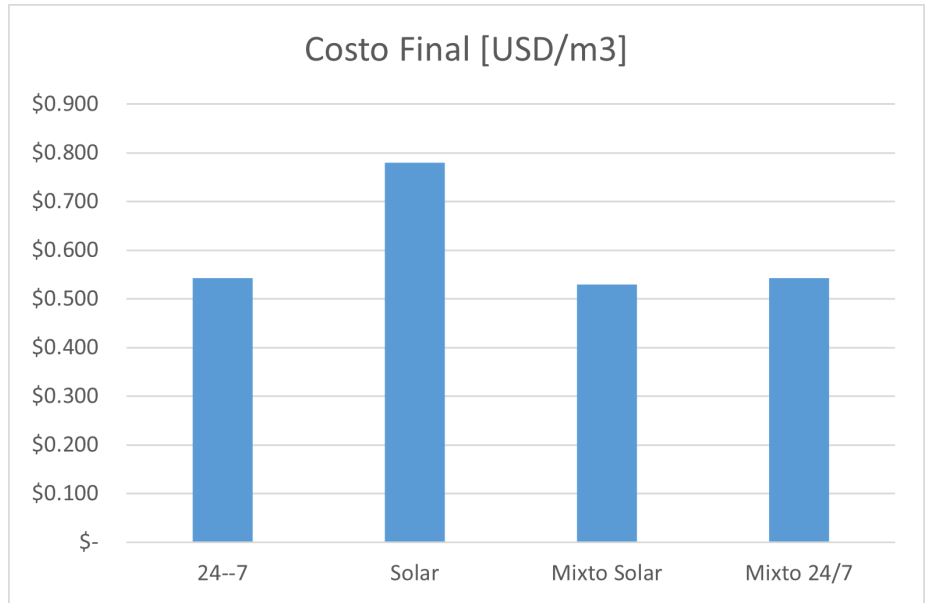


Figura C.64: Gráfica de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto Los Pelambres
Fuente: Elaboración propia

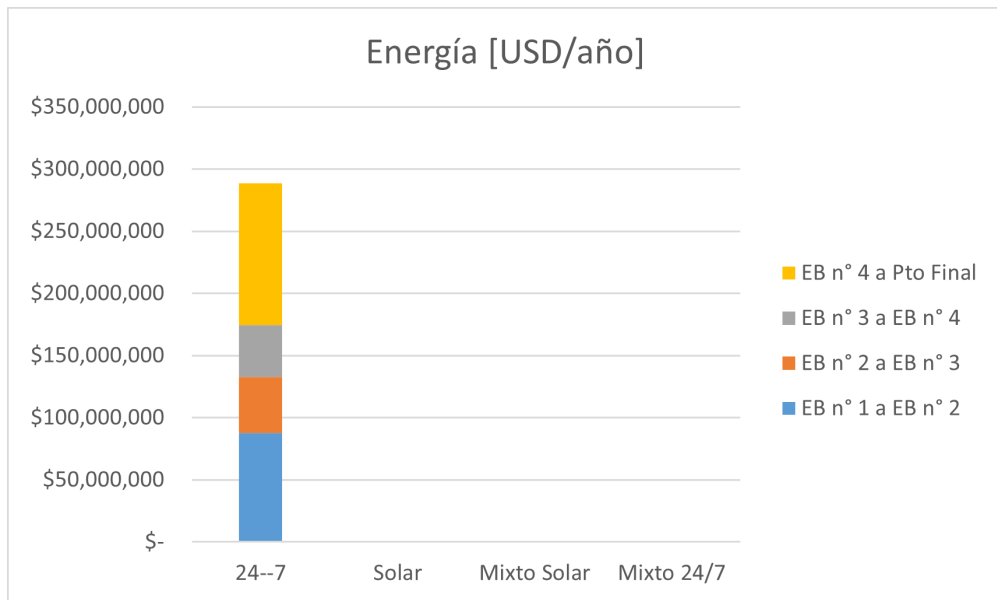


Figura C.65: Gráfica de los costos energéticos del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

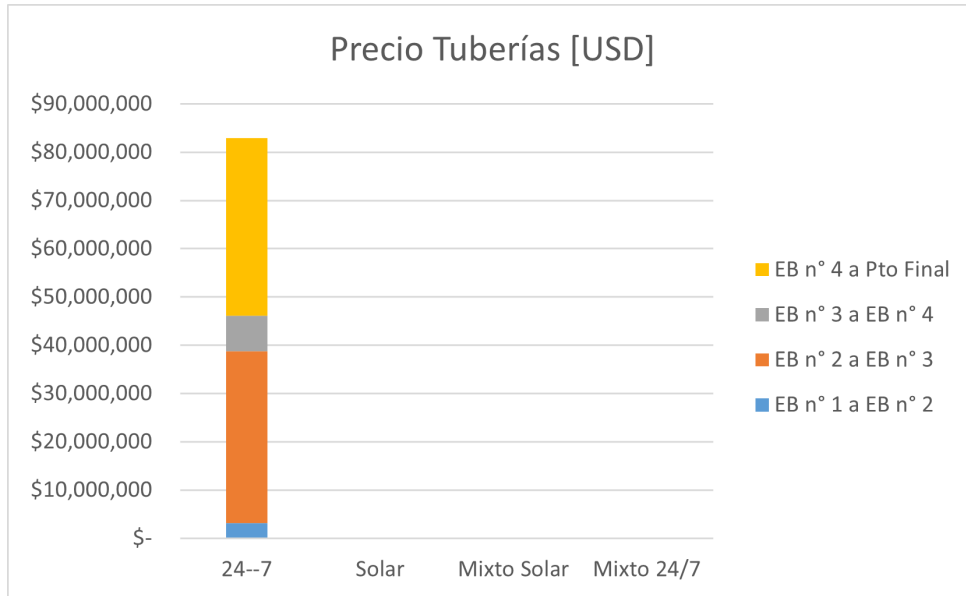


Figura C.66: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

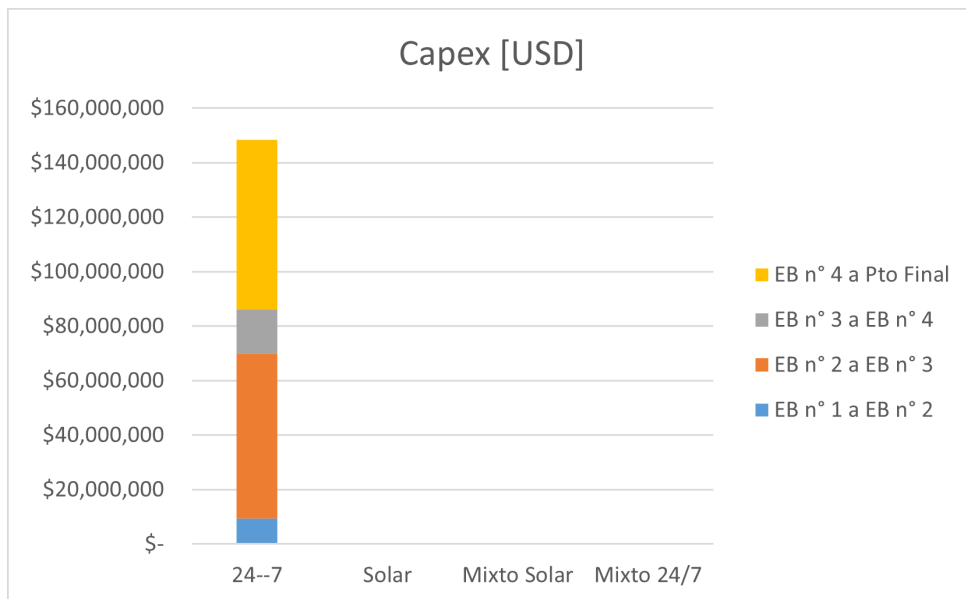


Figura C.67: Gráfica de los costos de inversión inicial del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

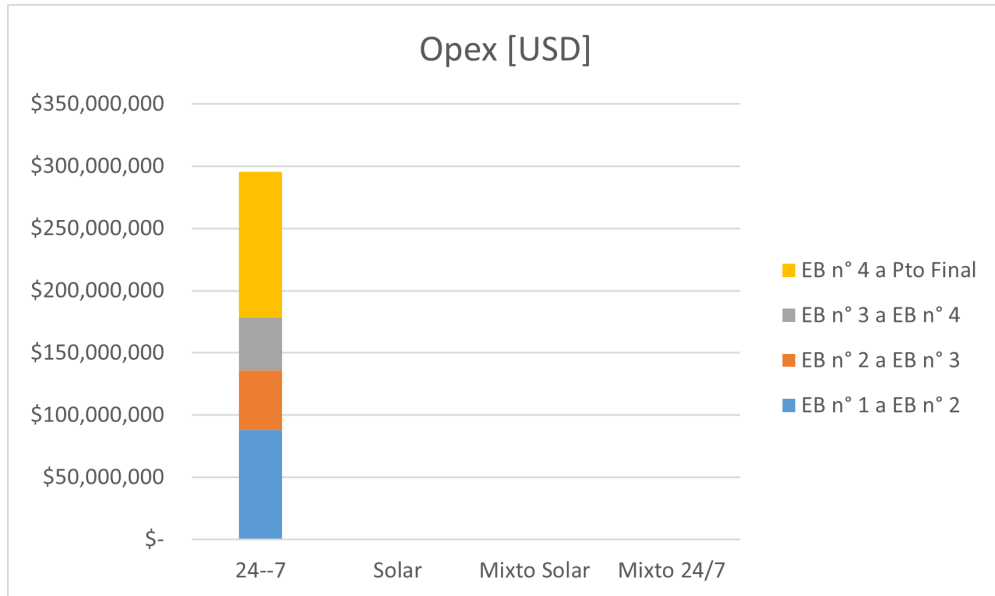


Figura C.68: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

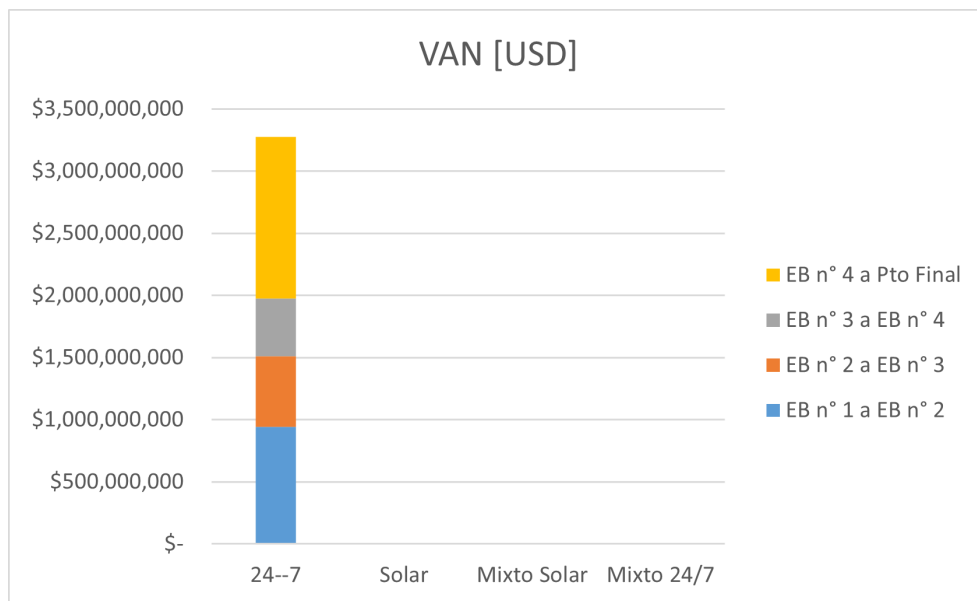


Figura C.69: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

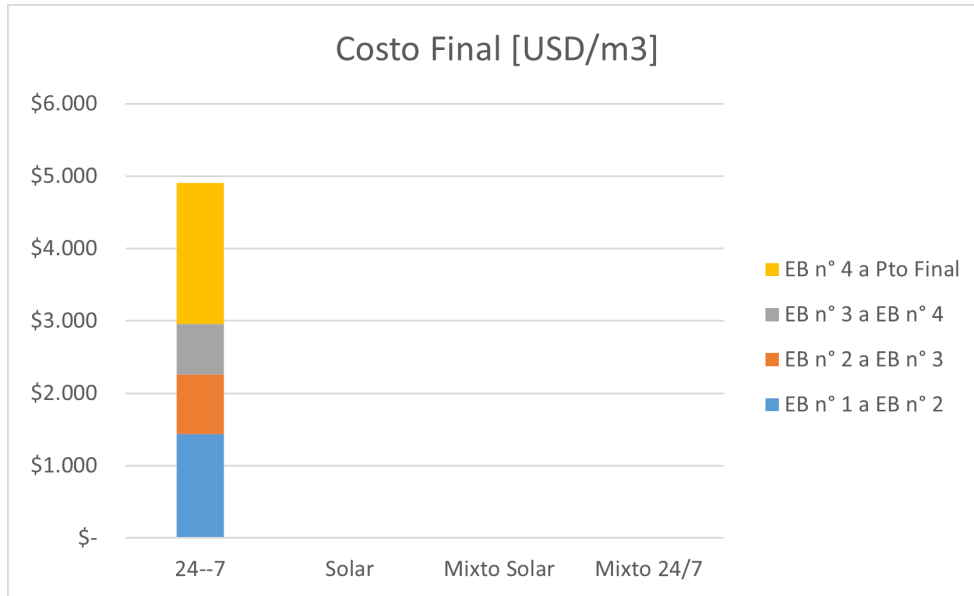


Figura C.70: Gráfica de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto RT Sulfuros
Fuente: Elaboración propia

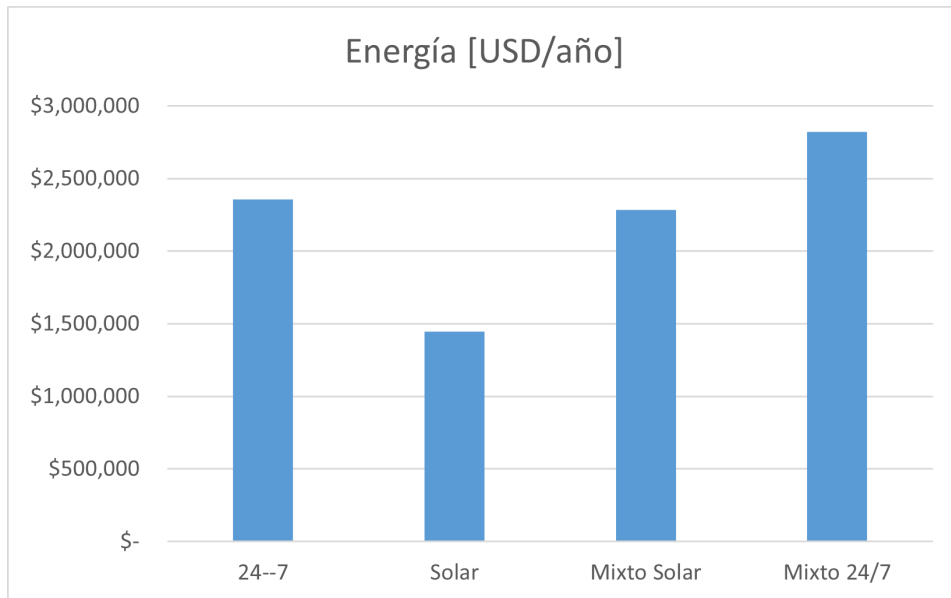


Figura C.71: Gráfica de los costos energéticos del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

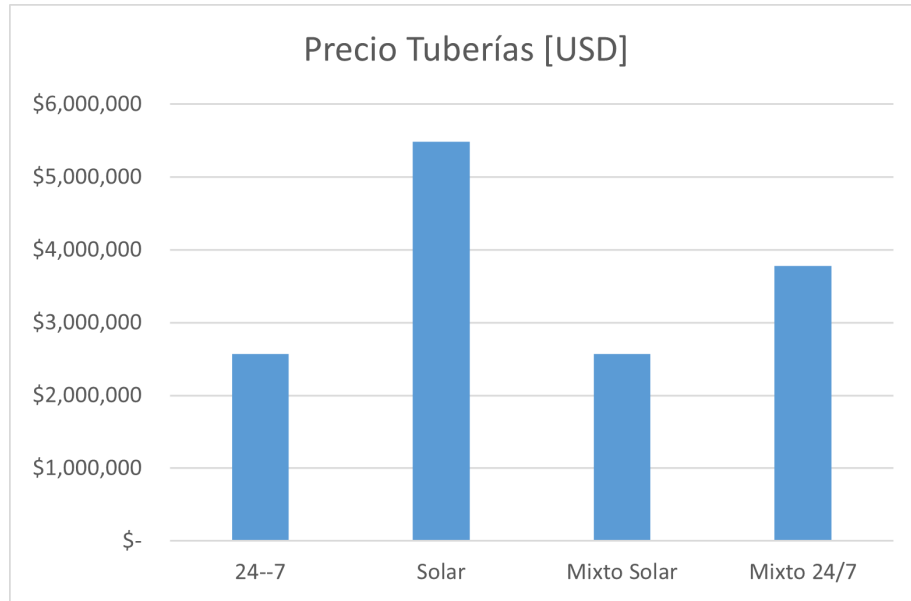


Figura C.72: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

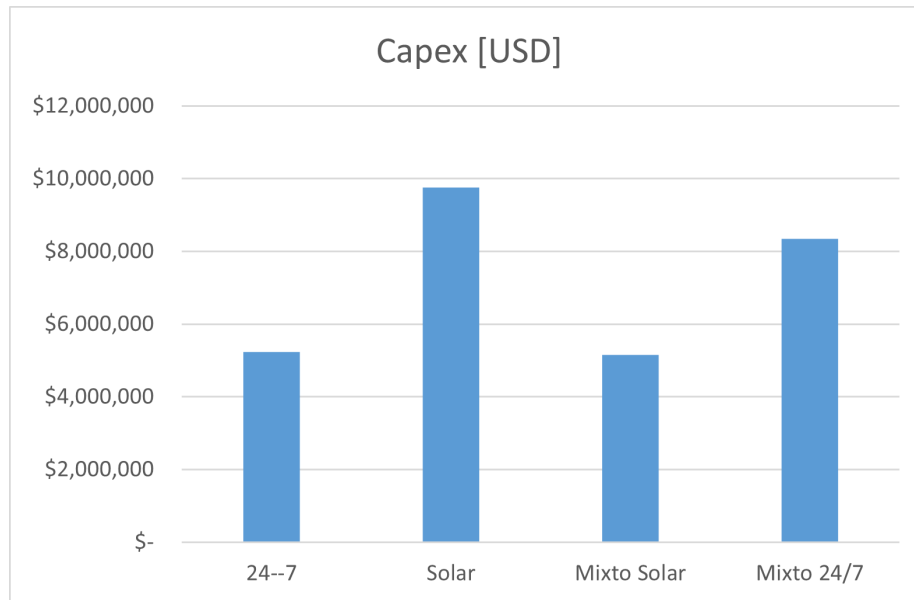


Figura C.73: Gráfica de los costos de la inversión inicial del Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

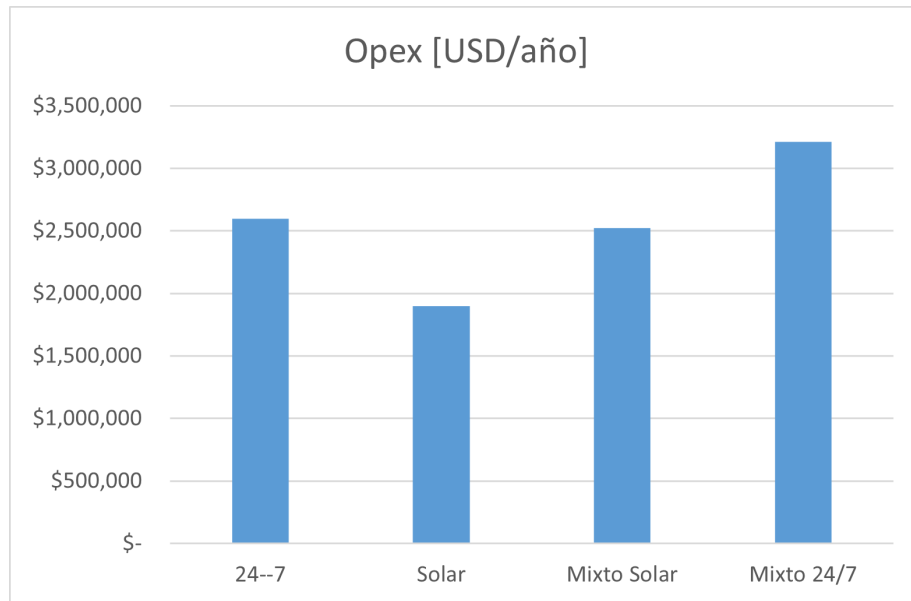


Figura C.74: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto Orcoma modificado
 Fuente: Elaboración propia

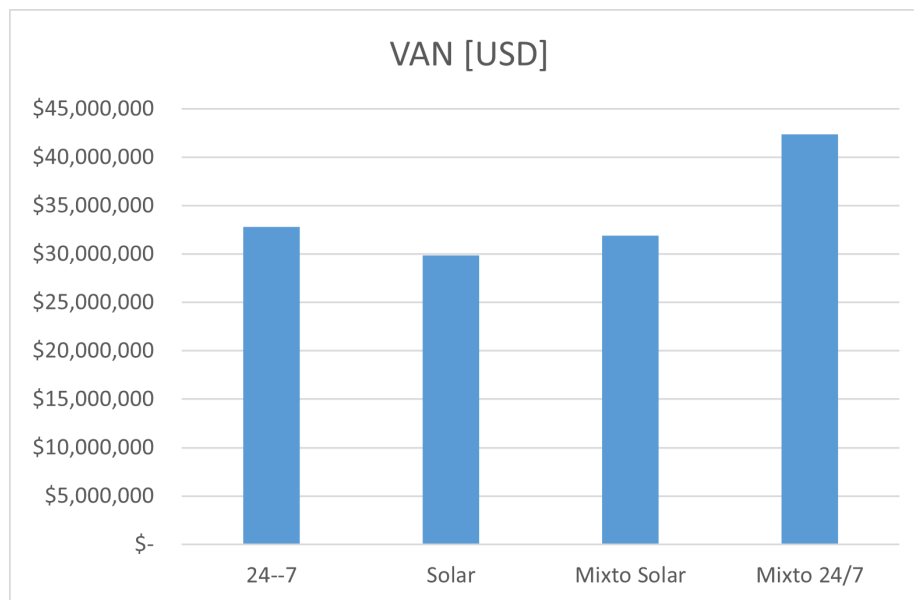


Figura C.75: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto Orcoma modificado
 Fuente: Elaboración propia

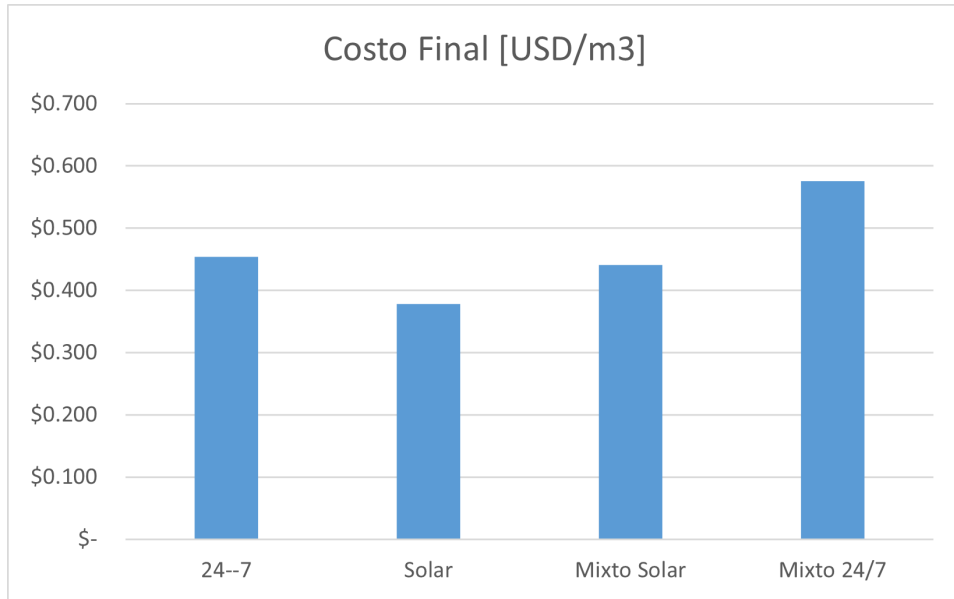


Figura C.76: Gráfica de los costos final de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto Orcoma modificado
Fuente: Elaboración propia

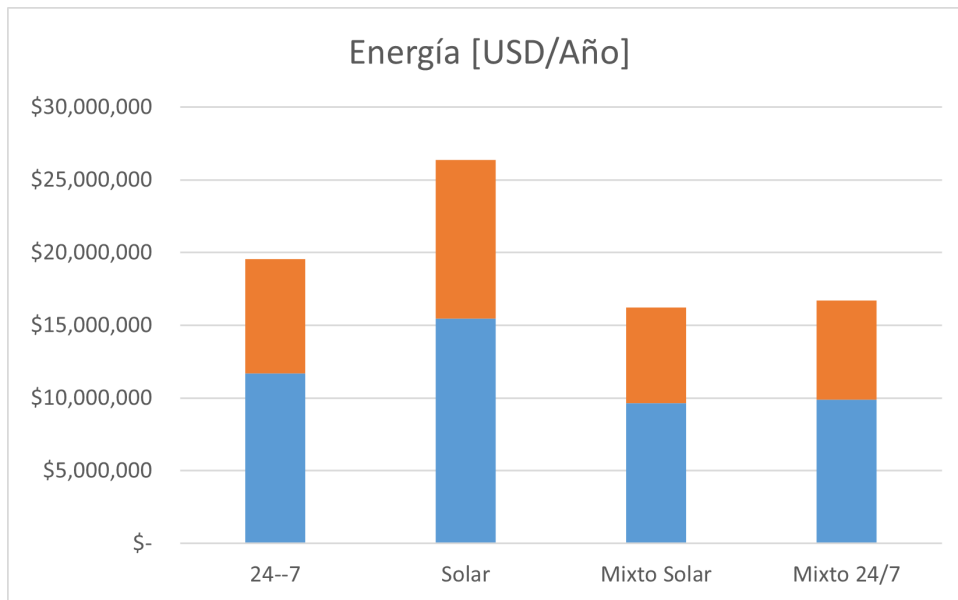


Figura C.77: Gráfica de los costos energéticos del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

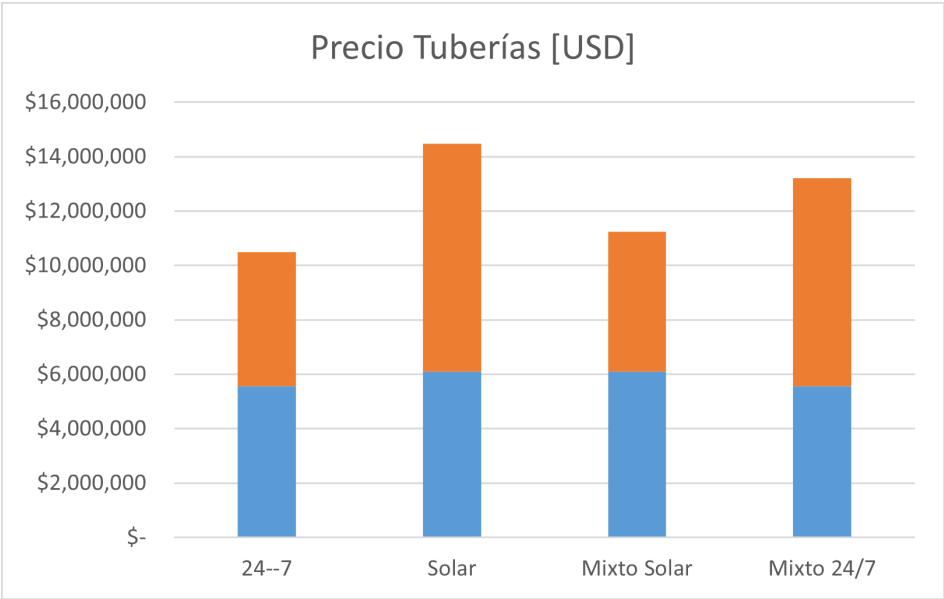


Figura C.78: Gráfica de los costos de las tuberías del Proyecto TEA modificado
 Fuente: Elaboración propia

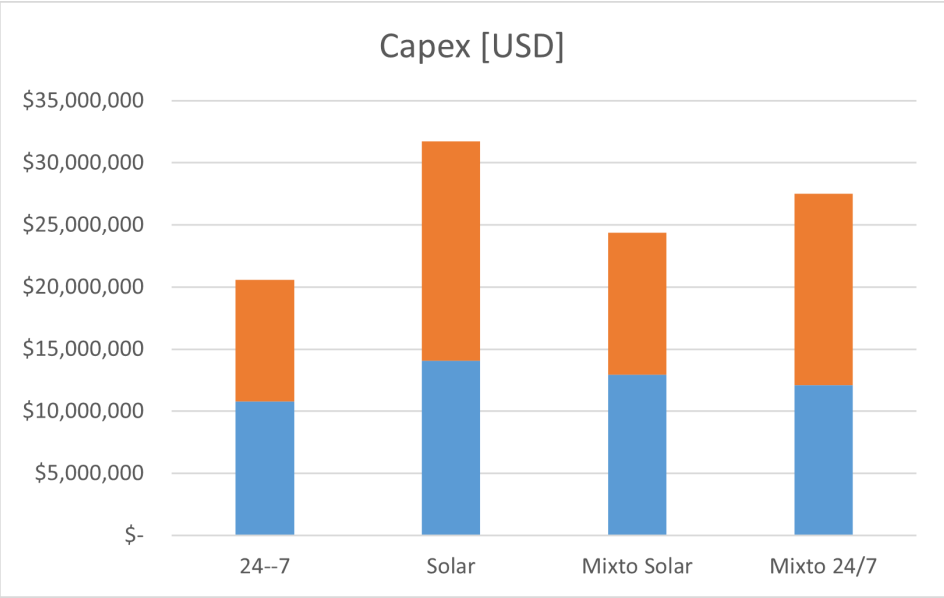


Figura C.79: Gráfica de los costos de la inversión inicial del Proyecto TEA modificado
 Fuente: Elaboración propia

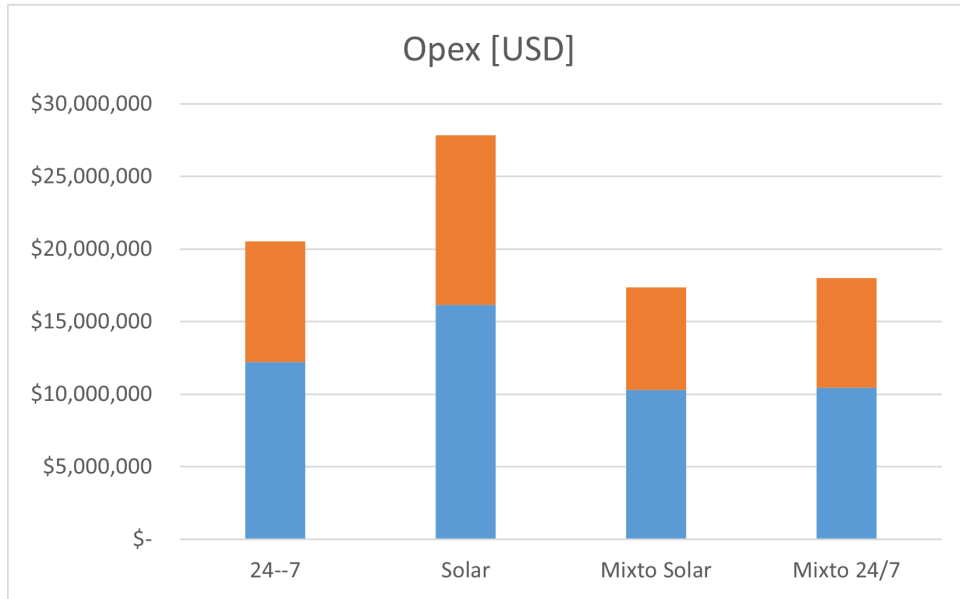


Figura C.80: Gráfica de los costos operacionales del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

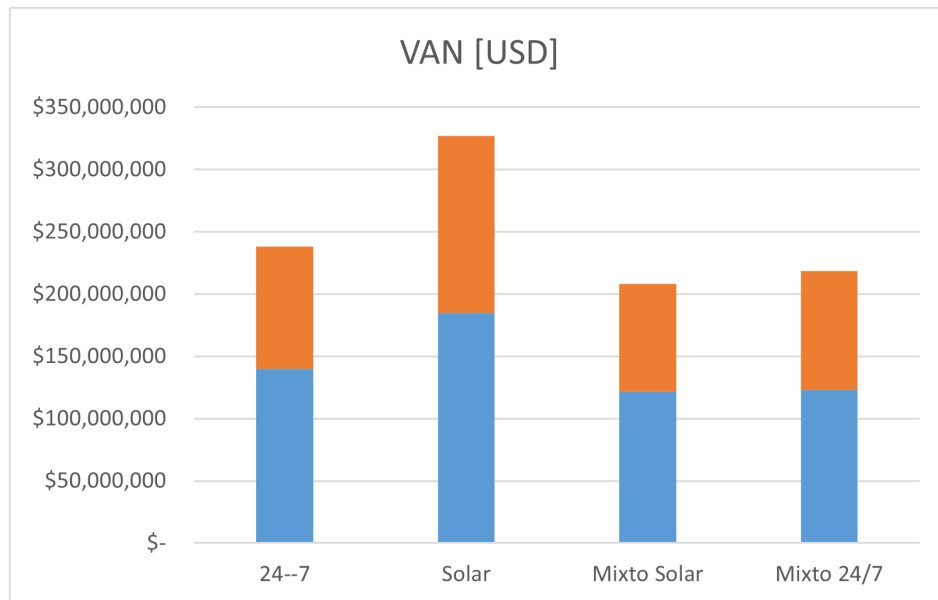


Figura C.81: Gráfica de los valores actuales netos (VAN) del Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia

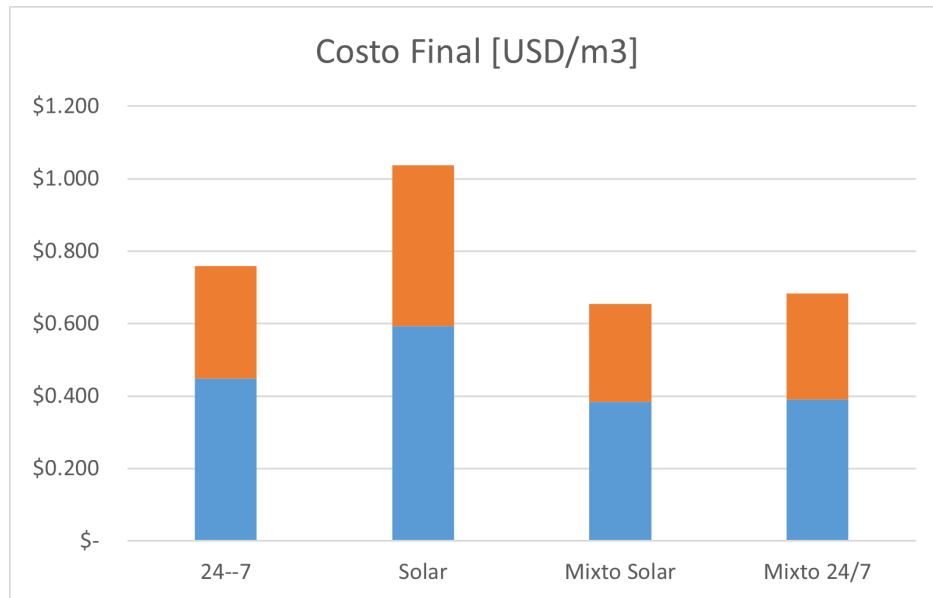


Figura C.82: Gráfica de los costos finales de elevar 1 m^3 de agua en el Proyecto TEA modificado
Fuente: Elaboración propia