



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

FACTIBILIDAD DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES DEL NORTE DE CHILE

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

SEBASTIÁN IGNACIO VILLAGRÁN MORALES

PROFESOR GUÍA:
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
WILLIAMS CARDERÓN MUÑOZ
ROBERTO ROMÁN LATORRE

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: SEBASTIÁN IGNACIO VILLAGRÁN MORALES
FECHA: 12/5/2017
PROF. GUÍA: RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ**

FACTIBILIDAD DE DESALINIZACIÓN DE AGUA DE MAR PARA PEQUEÑAS COMUNIDADES DEL NORTE DE CHILE

El origen y continuación de la humanidad se ha basado en el agua. A pesar de ser el agua uno de los recursos más abundantes en el mundo cubriendo tres cuartos de la superficie del planeta, solo alrededor de un 3% es agua dulce, el otro 97% corresponde a agua salada de los océanos. Buscando aprovechar este recurso es que se ha desarrollado el proceso de desalinización por osmosis inversa incorporando variantes en las energías que alimentan el proceso con el objetivo que económico y medio ambientalmente sean atractivos.

El objetivo general del trabajo de título es realizar un estudio de factibilidad técnico-económico del proceso de osmosis inversa con apoyo de energía renovables eólica y solar fotovoltaica con el fin de establecer la viabilidad de un proyecto de este tipo en una localidad del norte de Chile.

Debido a que la osmosis inversa no es un proceso térmico, lo cual implica que no existen mayores transientes, se propone la estrategia de desalinizar agua de mar con apoyo de energías no térmicas como las renovables eólica y solar fotovoltaica en los periodos en los cuales estén disponibles con el fin de disminuir los altos costos asociados a la energía necesaria en la producción. Estos costos equivalen a un tercio del total en una planta normal sin energías renovables de apoyo por concepto del consumo energético. Por las razones antes mencionadas, se propone una metodología de incorporar energías renovables en configuración *On Grid* de modo que la eólica sea el pilar principal, siendo la solar fotovoltaica un complemento sin sobrepasar la potencia requerida por la osmosis inversa para que finalmente la red eléctrica solo aporte la energía faltante al sistema, logrando reducir en algunos casos como los estudiados hasta un 40% de la energía consumida si solo estuviese conectada a la red eléctrica.

De cinco localidades estudiadas en el norte de Chile, Mejillones presenta las mejores oportunidades de generar energía a partir de energía eólica y solar fotovoltaica, y más aún para un proceso que hace más factible la realización de un proyecto como es la desalinización debido a la necesidad de acceso al agua que presenta la zona norte de Chile.

La inversión para la planta con el menor consumo específico de energía de 2,77 [kWh/m³] se estima en US\$ 5.733.935, para un consumo específico de 2,89 [kWh/m³] es de US\$ 5.760.341 y finalmente para un consumo específico de 3,06 [kWh/m³] es de US\$ 5.800.925. En todos los casos el aerogenerador utilizado fue el Aeronautica 29-225, ya que, su evaluación económica fue mayor sobre otros aerogeneradores siendo los VAN de US\$ \$ 2.446.639, US\$ \$ 2.366.207 y US\$ 2.263.281 para los distintos consumos específicos respectivamente.

Dedicatoria

Quiero dedicarle este trabajo a toda mi familia, en especial a mis hermanos y a mis padres a quienes quiero profundamente por las grandes personas que son.

Dedico especialmente este trabajo a Lisette y expresar la gran admiración que siento por ella, además de ser la persona más hermosa que conozco, te adoro.

Agradecimientos

Gracias a los profesores de mi comisión, en especial a mi profesor guía Ramón Frederick por su paciencia y gran disponibilidad. A mis amigos y compañeros del Departamento de Mecánica.

Agradezco especialmente a mis padres por el apoyo incondicional y la oportunidad de estudiar que me dieron.

Agradezco especialmente a Lisette por la inmensa paciencia, apoyo incondicional y ayuda en éste largo camino. Gracias por todo.

Tabla de Contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	1
1.1.1	Objetivo General	1
1.1.2	Objetivos Específicos	1
1.2	Alcances	2
2	Metodología	3
2.1	Recopilaciones de Antecedentes	3
2.2	Evaluación de Disponibilidad de Energías Eólicas y Fotovoltaicas	3
2.3	Modelo Computacional	3
2.4	Dimensionamiento de la Planta de Osmosis	3
2.5	Evaluaciones Técnico-Económicas	3
2.6	Recursos	3
2.6.1	Recursos no Financieros	3
2.6.2	Recursos Financieros	3
3	Antecedentes	4
3.1	Osmosis Inversa	4
3.2	Planta desalinizadora por osmosis inversa	5
3.2.1	Equipos y Componentes	8
3.2.2	Requisitos de NORMA CHILENA para Agua Potable NCH409/1	12
3.3	Energía Eólica	13
3.3.1	Central eólica	16
3.4	Energía Solar Fotovoltaica	17
3.4.1	Características de paneles fotovoltaicos	17
3.4.2	Distancia entre paneles	19
3.4.3	Orientación de paneles fotovoltaicos	20
3.4.4	Centrales fotovoltaicas	21
3.5	Central eléctrica mixta Eólica - Solar	22
3.5.1	Complementación estacional de energía solar y eólica	22
3.5.2	Características de una central mixta	23
3.5.3	Bases para el proyecto de una central mixta eólica-fotovoltaica	25
4	Desarrollo	30

4.1	Zonas de aplicación	30
4.1.1	Modelo de estimación de población.....	31
4.1.2	Tasa de crecimiento de la población.....	32
4.1.3	Estimación de la población al año 2036.....	33
4.1.4	Recurso solar	33
4.1.5	Recurso eólico	42
4.1.6	Abastecimiento de agua a zonas de estudio.....	47
4.2	Esquema general de planta de osmosis inversa	48
4.3	Creación del modelo	50
4.3.1	Supuestos del modelo	50
4.3.2	Balances de energía y masa	50
4.3.3	Parámetros de entrada	54
4.4	Dimensión y selección de equipos	55
4.4.1	Sistema energético.....	55
4.4.2	Sistema Osmosis Inversa	58
4.4.3	Parámetros de operación de la planta de OI	70
4.5	Evaluación económica.....	71
4.5.1	Ingresos operacionales.....	71
4.5.2	Costos Variables	71
4.5.3	Costos fijos	73
4.5.4	Costos de inversión	74
5	Resultados	77
5.1	Zona de aplicación.....	77
5.2	Creación, ajuste y validación del modelo.....	80
5.2.1	Validación del modelo.....	80
5.3	Casos de estudio.....	83
5.4	Evaluación económica.....	85
6	Discusión	88
7	Conclusiones.....	89
8	Bibliografía	90
	Anexos.....	92
	Anexo A: Tablas de recurso solar	92
	Anexo B: Índice de disponibilidad energética para desalinizar agua.....	95

Anexo C: Estimación de Población	102
Anexo D: Parámetros de operación	103
Anexo E: Evaluación Económica.....	105
Anexo F: Cotización	112

Índice de Tablas

TABLA 3.1: REQUISITOS FÍSICOS.....	12
TABLA 3.2: CONTENIDO MÁXIMO DE ELEMENTOS Y SUBSTANCIAS QUÍMICAS.....	12
TABLA 3.3: REQUISITOS RADIATIVOS.....	13
TABLA 3.4: ALTURAS Y DIÁMETROS TÍPICOS DE AEROGENERADORES.....	29
TABLA 4.1: LOS 18 CENSOS NACIONALES DE POBLACIÓN, CHILE: AÑOS, POBLACIÓN TOTAL Y TASAS DE CRECIMIENTO ANUAL.	32
TABLA 4.2: ESTIMACIÓN DE POBLACIÓN AL AÑO 2036 (EP).....	33
TABLA 4.3: ESTIMACIÓN DE DEMANDA DE AGUA AL AÑO 2036 (EP)	47
TABLA 4.4: PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA SOLAR FOTOVOLTAICO (EP).....	54
TABLA 4.5: PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA EVALUACIÓN ENERGÉTICA EÓLICA (EP)	55
TABLA 4.6: PARÁMETROS GENERALES DE FUNCIONAMIENTO DE LA PLANTA DE OI (EP)	55
TABLA 4.7: APORTES DE POTENCIA HORARIO DE LAS DISTINTAS FUENTES DE ENERGÍA PARA UN DÍA DE ENERO PARA CONSUMO ESPECÍFICO DE 2,77 [KWH/M ³] DE PLANTA DE OI (EP)	56
TABLA 4.8: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PANEL FOTOVOLTAICO SOLARWORLD SW 285 (EP).....	57
TABLA 4.9: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE OI (EP).....	59
TABLA 4.10: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DEL FILTRO MULTIMEDIA (EP)	60
TABLA 4.11: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL FILTRO MULTIMEDIA (EP).....	60
TABLA 4.12: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DEL FILTRO BASKET (EP).....	61
TABLA 4.13: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL FILTRO BASKET (EP)	61
TABLA 4.14: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE LA UNIDAD DE ULTRA FILTRACIÓN (EP)	62
TABLA 4.15: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA UFU (EP).....	62
TABLA 4.16: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE OI (EP).....	63
TABLA 4.17: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE ALIMENTACIÓN OI (EP).....	63
TABLA 4.18: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE FILTRACIÓN DE MICRO CARTUCHOS (EP) ..	64
TABLA 4.19: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA DE ALTA PRESIÓN (EP)	65
TABLA 4.20: DIFERENCIA ENTRE POTENCIA DEMANDADAS ENTRE CONFIGURACIÓN CON Y SIN INTERCAMBIADOR (EP)	66
TABLA 4.21: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA BOOSTER (CIRCULATION PUMP) (EP)	66
TABLA 4.22: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL SISTEMA DE MEMBRANAS DE OI (EP)	67
TABLA 4.23: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN SELECCIONADO PX-220 (EP)	68
TABLA 4.24: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA CIRCULACIÓN POST OI (EP).....	68
TABLA 4.25: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO DE PERMEADO (EP)	69
TABLA 4.26: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LA BOMBA A POST TRATAMIENTO (EP)	69
TABLA 4.27: DESCRIPCIÓN DE ELEMENTOS CONSTITUYENTES DEL SISTEMA DE POST TRATAMIENTO (EP)	69
TABLA 4.28: PARÁMETROS DE OPERACIÓN DE LOS DISTINTOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE OI (EP).....	70
TABLA 4.29: TARIFAS DEL AGUA POTABLE EN LA COMUNA DE MEJILLONES PARA CONSUMOS LEÍDOS DESPUÉS DEL 6 DE ENERO DEL 2016 POR LA EMPRESA DISTRIBUIDORA AGUAS ANTOFAGASTA (EP).....	71
TABLA 4.30: TARIFA ELÉCTRICA BT2 DE POTENCIA CONTROLADA DEL DISTRIBUIDOR ELECDA.....	73
TABLA 4.31: ESTIMACIÓN DE COSTOS DE PERSONAL EN PESOS CHILENOS Y DÓLARES MENSUAL Y ANUALMENTE (EP)	73

TABLA 4.32: COSTO DESGLOSADO DE LA PLANTA DE OI EN US\$ (EP)	75
TABLA 4.33: ESTIMACIÓN DE COSTOS A PARTIR DE LOS COSTOS TOTALES DE INVERSIÓN [26].....	76
TABLA 4.34: ESTIMACIÓN DE COSTOS A PARTIR DE LOS COSTOS TOTALES DE INVERSIÓN [26].....	76
TABLA 5.1: RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE PLANO INCLINADO [W/M2] [9]	81
TABLA 5.2: ENERGÍA GENERADA POR PANELES FOTOVOLTAICOS [KW] (EP)	82
TABLA 5.3: COMPARACIÓN ENTRE SIMULACIÓN Y MODELO DE GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA (EP)	82
TABLA 5.4: RESUMEN COMPARATIVO ANUAL DE GENERACIÓN ELÉCTRICA (EP)	83
TABLA 5.5: CONSUMOS ELÉCTRICOS DE LAS BOMBAS DEL SISTEMA DE OI CON RENDIMIENTO 0,8 (EP) ..	83
TABLA 5.6: CONSUMOS ELÉCTRICOS DE LAS BOMBAS DEL SISTEMA DE OI CON RENDIMIENTO 0,7 (EP) ..	84
TABLA 5.7: CONSUMOS ELÉCTRICOS DE LAS BOMBAS DEL SISTEMA DE OI CON RENDIMIENTO 0,6 (EP) ..	84
TABLA 5.8: DISTINTAS CONFIGURACIONES DEL SISTEMA ENERGÉTICO SEGÚN SU CONSUMO ESPECÍFICO (EP)	85
TABLA 5.9: EVALUACIONES ECONÓMICAS PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS (EP)	86
TABLA 5.10: SENSIBILIDAD DEL VAN RESPECTO AL PRECIO DE VENTA DEL AGUA (EP).....	86
TABLA A.1: RADIACIÓN SOLAR INTERANUAL EN TOCOPILLA (EP).	92
TABLA A.2: RADIACIÓN SOLAR ANUAL EN TOCOPILLA (EP).	92
TABLA A.3: RADIACIÓN SOLAR INTERANUAL EN MEJILLONES (EP).	92
TABLA A.4: RADIACIÓN SOLAR ANUAL EN MEJILLONES (EP).	92
TABLA A.5: RADIACIÓN SOLAR INTERANUAL EN TALTAL (EP).....	93
TABLA A.6: RADIACIÓN SOLAR ANUAL EN TALTAL (EP).	93
TABLA A.7: RADIACIÓN SOLAR INTERANUAL EN CHAÑARAL (EP).	93
TABLA A.8: RADIACIÓN SOLAR ANUAL EN CHAÑARAL (EP).	93
TABLA A.9: RADIACIÓN SOLAR INTERANUAL EN CALDERA (EP).	94
TABLA A.10: RADIACIÓN SOLAR ANUAL EN CALDERA (EP).	94
TABLA B.1: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 26[M]DE ALTURA EN TOCOPILLA (EP).	95
TABLA B.2: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 57[M]DE ALTURA EN TOCOPILLA (EP).	95
TABLA B.3: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 76[M]DE ALTURA EN TOCOPILLA (EP).	95
TABLA B.4: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 96[M]DE ALTURA EN TOCOPILLA (EP).	96
TABLA B.5: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 26[M]DE ALTURA EN MEJILLONES (EP).	96
TABLA B.6: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 57[M]DE ALTURA EN MEJILLONES (EP).	96
TABLA B.7: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 76[M]DE ALTURA EN TOCOPILLA (EP).	97
TABLA B.8: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 96[M]DE ALTURA EN MEJILLONES (EP).	97
TABLA B.9: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 26[M]DE ALTURA EN TALTAL (EP).	97
TABLA B.10: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 57[M]DE ALTURA EN TALTAL (EP)	98

TABLA B.11: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 76[M]DE ALTURA EN TALTAL (EP)	98
TABLA B.12: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 96[M]DE ALTURA EN TALTAL (EP)	98
TABLA B.13: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 26[M]DE ALTURA EN CHAÑARAL (EP)	99
TABLA B.14: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 57[M]DE ALTURA EN CHAÑARAL (EP)	99
TABLA B.15: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 76[M]DE ALTURA EN CHAÑARAL (EP)	99
TABLA B.16: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 96[M]DE ALTURA EN CHAÑARAL (EP)	100
TABLA B.17: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 26[M]DE ALTURA EN CALDERA (EP)	100
TABLA B.18: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 57[M]DE ALTURA EN CALDERA (EP)	100
TABLA B.19: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 76[M]DE ALTURA EN CALDERA (EP)	101
TABLA B.20: ÍNDICE DE ENERGÍA DISPONIBLE POR VOLUMEN DE AGUA A DESALINIZAR A 96[M]DE ALTURA EN CALDERA (EP)	101
TABLA C.1: ESTIMACIÓN DE HABITANTES Y DEMANDA DE AGUA A TRAVÉS DE LOS AÑOS DE ESTUDIO DEL AÑO 2016 AL 2026	102
TABLA C.2: ESTIMACIÓN DE HABITANTES Y DEMANDA DE AGUA A TRAVÉS DE LOS AÑOS DE ESTUDIO DEL AÑO 2027 AL 2036	102
TABLA D.1: DIMENSIONES SUGERIDOS POR LA NORMA API 650	104
TABLA E.1: COSTOS DE TRATAMIENTOS QUÍMICOS EN EL HORIZONTE DE EVALUACIÓN DE 20 AÑOS	105
TABLA E.2: CONSUMO ELÉCTRICO HORARIO A LO LARGO DEL AÑO	106
TABLA E.3: RESUMEN DE CONSUMO Y COSTOS ASOCIADOS A CONSUMO ELÉCTRICO DE TARIFA BT2 ...	107
TABLA E.4: TARIFA ELÉCTRICA DEL DISTRIBUIDOR ELECDA PARA MEJILLONES.....	108
TABLA E.5: COSTO DEL TERRENO EN MEJILLONES	108
TABLA E.6: PRECIO DE DISTINTOS MODELOS DE AEROGENERADORES	111

Índice de Figuras

FIGURA 2.1: DIAGRAMA DE METODOLOGÍA DE TRABAJO (EP).	3
FIGURA 3.1: OSMOSIS.	4
FIGURA 3.2: OSMOSIS INVERSA.	4
FIGURA 3.3: TREN DE PRE TRATAMIENTO [2].	6
FIGURA 3.4: BOMBA CENTRÍFUGA DE ALTA PRESIÓN.	8
FIGURA 3.5: FILTRO DUAL MEDIA.	9
FIGURA 3.6: MEMBRANA DE OSMOSIS INVERSA.	9
FIGURA 3.7: TURBINA PELTON EN PROCESO DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA [4].	11
FIGURA 3.8: INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN [5]	11
FIGURA 3.9: POTENCIA DE SALIDA TÍPICA DE UNA TURBINA EÓLICA A VELOCIDAD ESTACIONARIA.....	15
FIGURA 3.10: CENTRAL EÓLICA	16
FIGURA 3.11: PANEL SOLAR MONOCRISTALINO	18
FIGURA 3.12: PANEL SOLAR POLICRISTALINO	18
FIGURA 3.13: SEPARACIÓN ENTRE PANELES SOLARES	19
FIGURA 3.14: ENERGÍA V/S HORA DE UNA INSTALACIÓN CON Y SIN SEGUIMIENTO	21
FIGURA 3.15: CENTRAL FOTOVOLTAICA	21
FIGURA 3.16: CICLO DE VELOCIDAD DEL VIENTO A 93 METROS EN CERCANÍAS A TOCOPILLA [8]	22
FIGURA 3.17: PROMEDIO MENSUAL DE RADIACIÓN INCIDENTE, SEPARADA EN SUS COMPONENTES EN CERCANÍAS A TOCOPILLA [9].....	23
FIGURA 3.18: MATRIZ FOTOVOLTAICAS Y TURBINAS EÓLICAS EN MORBACH, ALEMANIA	23
FIGURA 3.19: DIAGRAMA DE CENTRAL MIXTA EÓLICA – FOTOVOLTAICA [10].	24
FIGURA 3.20: ESQUEMA DE LA ORIENTACIÓN DE UN PANEL FOTOVOLTAICO DETERMINADO POR SU ÁNGULO ALPHA (α) [12].....	25
FIGURA 3.21: ÁNGULO DE INCLINACIÓN (β) ENTRE PANEL FOTOVOLTAICO Y PLANO HORIZONTAL [12].	26
FIGURA 3.22: DISPOSICIÓN GENERAL DE UN PANEL FOTOVOLTAICO EN ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN [12].	26
FIGURA 3.23: TIPO DE TORRES: TUBULAR, CELOSÍA Y MÁSTIL TENSADO (DE IZQUIERDA A DERECHA) [14].	28
FIGURA 4.1: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL EN TOCOPILLA [9].	34
FIGURA 4.2: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL EN MEJILLONES [9].	35
FIGURA 4.3: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL EN TALTAL [9].	37
FIGURA 4.4: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL EN CHAÑARAL [9].	38
FIGURA 4.5: RADIACIÓN GLOBAL HORIZONTAL EN CALDERA [9].	40
FIGURA 4.6: ESQUEMA GENERAL DE PLANTA DE OSMOSIS INVERSA CON APOYO DE ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR FOTOVOLTAICA (EP).....	48
FIGURA 4.7: ESQUEMA EN DETALLE DE LA PLANTA DE OSMOSIS INVERSA (EP).	49
FIGURA 4.8: FLUJOS A TRAVÉS DE UNA MEMBRANA DE OI (EP).	53
FIGURA 4.9: APORTES DE POTENCIA DE LAS DISTINTAS FUENTES DE ENERGÍA PARA UN DÍA DE ENERO PARA CONSUMO ESPECÍFICO DE 2,77 [KWH/M ³] DE PLANTA DE OI (EP).....	57
FIGURA 4.10: FILTRO MULTIMEDIA AQUAPURE (EP).....	60
FIGURA 4.11: FILTRO DE MALLA STF 2004 (EP).....	61

FIGURA 4.12: UNIDAD DE ULTRA FILTRACIÓN INDUSTRIAL DE PUREAQUA.....	62
FIGURA 4.13: SISTEMA DE FILTRACIÓN DE MICRO CARTUCHOS. A LA IZQUIERDA SE OBSERVA EL RECIPIENTE DE ACERO INOXIDABLE VISTO SUPERIORMENTE CON LOS CARTUCHOS INSTALADOS EN SU INTERIOR. A LA DERECHA SE TIENE UNA VISIÓN FRONTAL DEL RECIPIENTE (EP).	63
FIGURA 4.14: BOMBA DE ALTA PRESIÓN (HP) PARA.....	64
FIGURA 4.15: DIAGRAMA DE PROCESO DE OI CON INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN (PX DEVICE). LA BOMBA BOOSTER (CIRCULATION PUMP) PERMITE LEVANTAR LA DIFERENCIA DE PRESIÓN ENTRE EL PUNTO C Y D.	65
FIGURA 4.16: SISTEMA INDUSTRIAL DE RECIPIENTES CON LAS MEMBRANAS RESPECTIVAS PARA REALIZAR OI	67
FIGURA 4.17: VISTA INTERIOR EN EXPLOSIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE PRESIÓN DE LOS MODELOS Q SERIES [5].....	68
FIGURA D.0.1: DIAGRAMA DE PÉRDIDA DE CARGA PARA FILTROS BASKET CON MALLA DE INOX. 34 MICRAS	103

Índice de Gráficos

GRÁFICO 4.1: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DE LOS AÑOS [9].....	34
GRÁFICO 4.2: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DEL AÑO [9].....	35
GRÁFICO 4.3: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DE LOS AÑOS [9].....	36
GRÁFICO 4.4: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DEL AÑO [9].....	36
GRÁFICO 4.5: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DE LOS AÑOS [9].....	37
GRÁFICO 4.6: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DEL AÑO [9].....	38
GRÁFICO 4.7: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DE LOS AÑOS [9].....	39
GRÁFICO 4.8: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DEL AÑO [9].....	39
GRÁFICO 4.9: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DE LOS AÑOS [9].....	40
GRÁFICO 4.10: VARIACIÓN DE LA RADIACIÓN A TRAVÉS DEL AÑO [9].....	41
GRÁFICO 4.11: RADIACIÓN SOLAR GLOBAL ANUAL PARA CADA LOCALIDAD [9].	42
GRÁFICO 4.12: VELOCIDAD MEDIA MENSUAL PARA EL CICLO ANUAL EN TOCOPILLA [8].	42
GRÁFICO 4.13: VELOCIDAD MEDIA MENSUAL PARA EL CICLO ANUAL EN MEJILLONES [8].	43
GRÁFICO 4.14: VELOCIDAD MEDIA MENSUAL PARA EL CICLO ANUAL EN TALTAL [8].	43
GRÁFICO 4.15: VELOCIDAD MEDIA MENSUAL PARA EL CICLO ANUAL EN CHAÑARAL [8].	44
GRÁFICO 4.16 VELOCIDAD MEDIA MENSUAL PARA EL CICLO ANUAL EN CALDERA [8].	44
GRÁFICO 4.17: ENERGÍA EÓLICA MEDIA MENSUAL DISPONIBLE PARA TODAS LAS LOCALIDADES A 26 [M] [8].	45
GRÁFICO 4.18: ENERGÍA EÓLICA MEDIA MENSUAL DISPONIBLE PARA TODAS LAS LOCALIDADES A 57 [M] [8].	46
GRÁFICO 4.19: ENERGÍA EÓLICA MEDIA MENSUAL DISPONIBLE PARA TODAS LAS LOCALIDADES A 78 [M] [8].	46
GRÁFICO 4.20: ENERGÍA EÓLICA MEDIA MENSUAL DISPONIBLE PARA TODAS LAS LOCALIDADES A 96 [M] [8].	47
GRÁFICO 5.1: COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE A LO LARGO DEL AÑO CONSIDERANDO VIENTOS A 26[M] DE ALTURA (EP).	78
GRÁFICO 5.2: COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE A LO LARGO DEL AÑO CONSIDERANDO VIENTOS A 57[M] DE ALTURA (EP).	78
GRÁFICO 5.3: COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE A LO LARGO DEL AÑO CONSIDERANDO VIENTOS A 76[M]DE ALTURA (EP).	79
GRÁFICO 5.4: COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE A LO LARGO DEL AÑO CONSIDERANDO VIENTOS A 96[M]DE ALTURA (EP).	79
GRÁFICO 5.5: COMPORTAMIENTO DEL ÍNDICE DE DISPONIBILIDAD ENERGÉTICA SOLAR A LO LARGO DEL AÑO (EP).	80
GRÁFICO 5.6: VARIACIÓN DEL VAN (MILES DE DÓLARES) EN FUNCIÓN DEL PRECIO DE VENTA DEL AGUA (EP)	87

Nomenclatura

API	American Petroleum Institute
CE	Consumo Específico
INE	Instituto Nacional de Estadísticas
EP	Elaboración Propia
\dot{m}_{ae}	Flujo de agua de entrada
OI	Osmosis Inversa
OMS	Organización Mundial de la Salud
STC	Standard Test Conditions
TDS	Sólidos Totales Disueltos
UFU	Unidad de Ultra Filtración

1 Introducción

Chile vive un momento crucial en su historia, se enfrenta al enorme desafío de generar las condiciones adecuadas para llegar a ser un país desarrollado en la próxima década. La aspiración del Gobierno de Chile es acelerar la incorporación de las energías renovables no convencionales (ERNC) en nuestra matriz energética, de manera que éstas puedan alcanzar un mayor porcentaje de representación de la misma [1], para que sectores económicos presenten un crecimiento sostenido, siendo el agua un recurso necesario dentro de este desafío.

Es de conocimiento que el norte de Chile presenta una gran escasez de agua, lo cual limita el desarrollo de actividades productivas, así como el bienestar de las poblaciones. Las fuentes de agua en el norte grande provienen principalmente de agua subterránea que se extrae de acuíferos, ríos que atraviesan ciertas cuencas y en menor medida el agua de mar por algún proceso que permita la desalinización de ésta.

El proceso de desalinización por osmosis inversa presenta la desventaja de ser económicamente poco atractiva, no por el costo de inversión, sino por el costo de producción referente al alto consumo de energía que requiere, representando un tercio del proceso total aproximadamente. Dada la ventaja que los procesos asociados al aprovechamiento de este tipo de energías renovables (eólica y solar fotovoltaica) no están sujetos a grandes transientes, como tampoco el proceso de osmosis inversa, existe la posibilidad de concentrar la producción de agua desalinizada en períodos de disponibilidad de la energía renovable.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es estudiar la factibilidad técnico-económica de desalinización de agua de mar por osmosis inversa en una comunidad seleccionada del norte de Chile con el apoyo de energías renovables eólica y solar.

1.1.2 Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- A. Obtener datos para las energías eólica y solar en 5 localidades del norte de Chile.
- B. Determinar el consumo de agua potable esperado de las poblaciones estudiadas.
- C. Identificar las poblaciones con las máximas energías renovables disponibles, como un complemento entre ambas con el fin de maximizarlas y ser parte de la energía total requerida en el proceso de desalinización.
- D. Seleccionar la localidad en la cual se proyectará la planta de osmosis inversa.
- E. Realizar un análisis de factibilidad técnico-económico de la implementación de desalinización en la localidad seleccionada con apoyo de energía eólica y fotovoltaica a través de uno o más indicadores económicos.

1.2 Alcances

Los alcances del estudio quedan definidos por:

- Se estudiarán sólo localidades costeras.
- La alimentación para la desalinización se realizará con agua de mar.
- Se incorporará un intercambiador de presión para recuperar energía.
- El análisis de factibilidad técnico-económico se realizará solo a una localidad.
- El proyecto será evaluado a 20 años.

2 Metodología

La metodología de trabajo que se realizó durante el desarrollo del Trabajo de Título es la siguiente y se muestra en la Figura 2.1.

2.1 Recopilaciones de Antecedentes

En esta primera parte se hizo una recopilación de antecedentes referentes no solo a los aspectos técnicos, como ya se mostró en el capítulo 2, sino que también antecedentes demográficos entregados por el Instituto Nacional de estadística (INE) de pequeñas localidades del norte de Chile y los usos asociados del agua que ellas tienen.

2.2 Evaluación de Disponibilidad de Energías Eólicas y Fotovoltaicas

Con los datos de las localidades potenciales a proyectar la planta de desalinización, se procede a realizar un análisis del recurso energético disponible entre fuentes eólicas y solar fotovoltaica, de modo de calificar las localidades de acuerdo a su disponibilidad energética.

2.3 Modelo Computacional

Se procede a realizar un modelo computacional que permita estimar las dimensiones de la planta a proyectar. En primera instancia se procede a validar el modelo comparándolo con una planta similar.

2.4 Dimensionamiento de la Planta de Osmosis

Con el modelo completo validado se pueden evaluar los casos o localidades en estudio. Dichos casos difieren principalmente en la cantidad de agua meta a producir, determinada por la cantidad de población. Lo anterior permite determinar finalmente las dimensiones de la planta a proyectar.

2.5 Evaluaciones Técnico-Económicas

Finalmente se procede a realizar una evaluación económica conceptual con el objetivo de poder estimar cuánto cuesta una planta de las dimensiones antes calculadas.

2.6 Recursos

2.6.1 Recursos no Financieros

En primera instancia no se consideran recursos financieros para el desarrollo de esta memoria.

2.6.2 Recursos Financieros

En primera instancia no se consideran recursos financieros para el desarrollo de esta memoria.

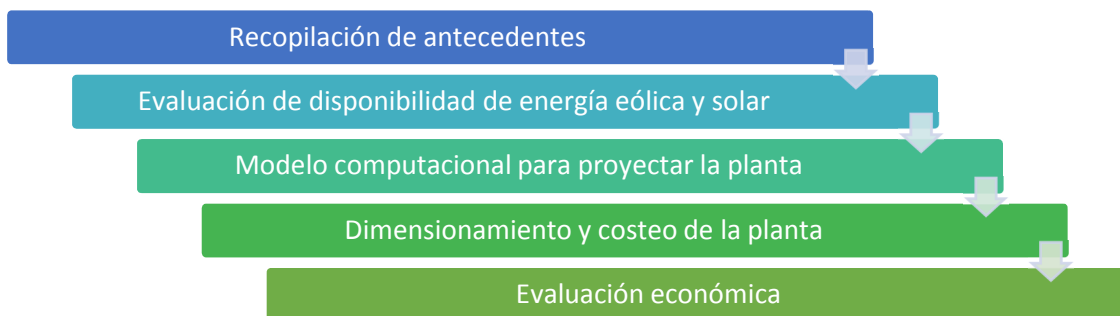


Figura 2.1: Diagrama de metodología de trabajo (EP).

3 Antecedentes

3.1 Osmosis Inversa

La osmosis es un proceso natural, en la cual dos sustancias con diferentes concentraciones separadas por una membrana semipermeable alcanzan el equilibrio transcurrido un tiempo adecuado para que esto ocurra. Para el interés del presente trabajo consideremos un recipiente como el ilustrado en la Figura 3.1 en donde inicialmente ambos lados de la membrana semipermeable tienen la misma cantidad de agua, pero con concentraciones diferentes de sales, teniendo así el lado izquierdo una menor concentración que el lado derecho. Transcurrido el tiempo se hará presente el fenómeno de osmosis, fluyendo agua pura a través de la membrana desde donde hay menor concentración (Lado izquierdo) hacia donde existe una mayor concentración (Lado derecho), el proceso se detendrá hasta que la concentración de sales en ambos lados sea la misma o hasta que la presión hidrostática lo permita.

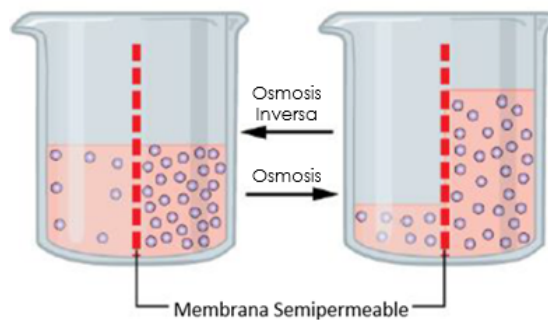


Figura 3.1: Osmosis¹.

Luego si aplicamos una presión igual a la presión osmótica en el lado con mayor concentración de sales, este aumento de presión detendrá el flujo desde la zona de menor concentración a la zona de mayor concentración, es más, si aplicamos una presión mayor a la presión osmótica, como se ilustra en la Figura 3.2 incrementamos el potencial químico de la solución más concentrada ocasionando que el flujo de agua sea de esta zona a la zona de menor concentración. A este proceso se le conoce como osmosis inversa.

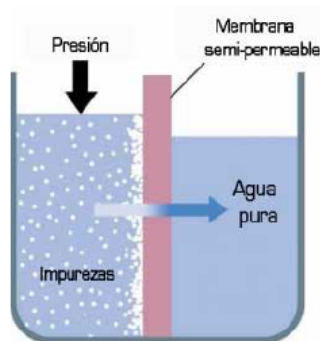


Figura 3.2: Osmosis inversa².

¹ Fuente: Wiki Libros, https://es.wikibooks.org/wiki/Archivo:0307_Osmosis.jpg

² Fuente: PUREPRO, <http://www.purepro-ecuador.com/osmosis.htm>

Existen distintos tipos de membranas, la más utilizada en el proceso de osmosis inversa es la membrana en espiral, la cual está compuesta por un espaciador, la membrana y una guía. Del proceso de desalinización se obtienen dos productos: permeado y salmuera concentrada, siendo en la mayoría de los casos el permeado el producto deseado y la salmuera el rechazo de la desalación.

En cuanto a la composición de la membrana, se compone por tres capas finas:

- a. La primera y de mayor porosidad sirve de base a la membrana y está hecha de poliéster.
- b. La segunda es una capa intermedia micro porosa hecha de polisulfona.
- c. La tercera capa, localizada en la parte superior, es una capa ultra delgada de poliamida que está en contacto con el agua a desalar y es la que separará el agua de alimentación en los flujos de permeado y salmuera. Esta capa de poliamida es muy fina. En su caso ideal, rechazaría el 100% de las sales adheridas a las moléculas de agua.

Una planta desalinizadora cuenta con varios tubos de presión apilados paralelamente con el objeto de poder incrementar la capacidad ya que un solo tubo de presión con siete membranas en su interior, no puede permear por si solo todo el caudal que se desea, ya que las membranas tienen cierta capacidad de permeado, así como un límite en el caudal de alimentación, por esta razón suele dividirse el caudal de alimentación en varios tubos de presión.

3.2 Planta desalinizadora por osmosis inversa

El proceso de desalación del agua por osmosis inversa se desarrolla en varias etapas, las cuales son:

a. Alimentación

El agua de alimentación es bombeada al sistema, para esto es necesario agregar bombas al sistema para que la presión a la entrada de las membranas sea la adecuada para el proceso. En plantas desalinizadoras industriales la toma de agua se realiza por medio de pozos o por tomas abiertas.

Existen distintos tipos de tomas de agua, estos dependen de las condiciones geográficas de la locación. Se pueden clasificar por el tipo de agua que se obtiene (salobre, agua de mar o residual) así como también por las características de la toma (pozos, superficial o móviles).

Es importante mencionar que la localización adecuada de la toma de agua por medio de una buena planeación puede evitar tratamientos adicionales en puntos posteriores.

b. Pre tratamiento del agua

Para determinar el o los pre tratamientos adecuados se requiere realizar un análisis al agua de alimentación que se empleará. Se divide en procesos físicos como la filtración gruesa y filtración fina; así como los pre tratamientos químicos como la modificación de pH y cloración.

El pre tratamiento de la planta desalinizadora piloto consta de las siguientes actividades [2]:

- Modificación de pH (acidificación).
- Cloración.

- Dosificación de coagulante.
- Filtración gruesa.
- Filtración fina.
- Decoloración.

En la Figura 3.3 se ilustran los procesos realizados en el pre tratamiento.

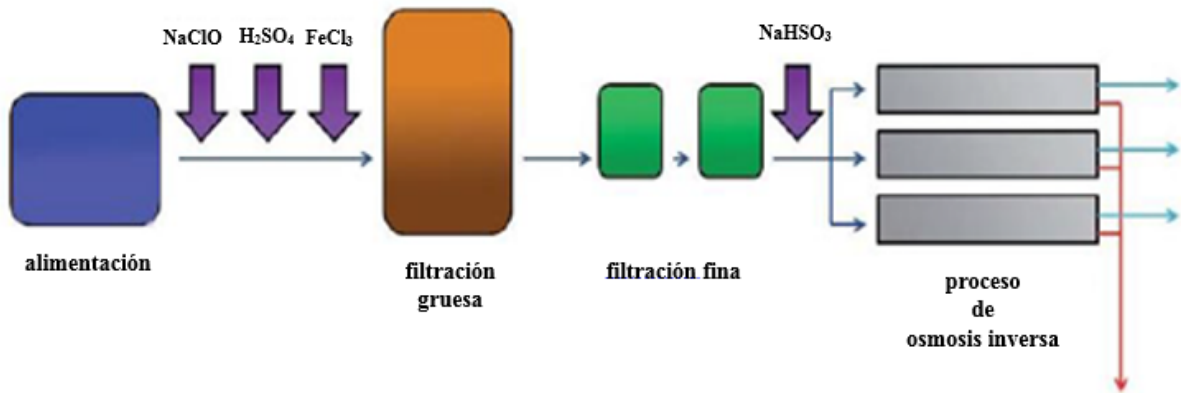


Figura 3.3: Tren de pre tratamiento [2].

A continuación, se explica cada etapa:

a) La eliminación de bacterias y actividad biológica en general se inhibe por medio de la desinfección (cloración) del agua de alimentación, se realiza utilizando alguno de los siguientes reactivos:

- Cloro (Cl_2)
- Hipoclorito sódico (NaClO)
- Hipoclorito de calcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$)

b) Se dosifica ácido con el fin de disminuir el pH del agua de alimentación para facilitar la remoción de sales. El disminuir el pH tiene como objetivo evitar la precipitación de algunos compuestos como carbonato de calcio y así eliminar con más eficiencia algunos tipos de contaminantes de la planta desalinizadora.

Para evitar la incrustación de calcio, magnesio, etc. en las membranas se acidifica el agua. Para la acidificación del agua se utilizan los siguientes reactivos principalmente:

- Ácido sulfúrico (H_2SO_4)
- Ácido clorhídrico (HCl)

- c) Durante la operación de la planta desalinizadora se ha utilizado las técnicas de coagulación y floculación para aumentar la eficiencia del proceso de filtrado. Los principales compuestos utilizados para la coagulación son los siguientes:
- Cloruro férrico (FeCl_3)
 - Sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$)
- d) La filtración gruesa se lleva a cabo en un filtro multimedia este filtro se encarga de eliminar los sólidos suspendidos en el agua, este filtro multimedia contiene distintos tipos de arena con diferentes tamaños de grano cada una. El filtro multimedia o filtro arena se utiliza para filtrar partículas macro métricas del agua de alimentación.
- e) Se realiza una filtración fina utilizando filtros cartucho de polipropileno termo fusionado. En este punto se elimina toda materia que contenga el agua de tamaño micrométrico y que el filtro multimedia no haya filtrado.
- f) La última actividad del pre tratamiento del agua es la de cloración en donde se utilizan compuestos como el bisulfito de sodio NaHSO_3 para eliminar el cloro libre residual del proceso de cloración, la dosificación de este compuesto depende de la concentración de la solución y del cloro libre que se encuentra en el agua a tratar.

c. Desalación por osmosis inversa

Depende de La concentración de sales (Determina la Presión osmótica), temperatura, valencia iónica, tamaño de moléculas, tendencias de unión con hidrogeno.

Un parámetro fundamental dentro del proceso de osmosis inversa es la presión osmótica, representa la presión necesaria para que el disolvente de una solución fluya a través de una membrana semipermeable.

La temperatura afecta de manera importante el flujo del agua a través de la membrana, al incrementar la temperatura, el transporte de agua y de sales incrementa exponencialmente, mientras que el rechazo de sales se reduce ligeramente.

d. Post tratamiento del agua producto

Después de los procesos de pre tratamiento y desalinización, el agua producto carece de cloro y contiene una cantidad muy pequeña de minerales, recurriendo a la remineralización y la recarbonatación para adecuar los niveles de minerales y que el agua producto sea potable.

e. Disposición del agua de rechazo

El producto de rechazo del proceso de osmosis inversa el cual corresponde a la salmuera contiene elementos que pueden ocasionar problemas ambientales, en el caso de las plantas desalinizadoras de agua de mar el producto contiene una concentración de sólidos disueltos totales entre 70.000 y 80.000 [mg/L], al igual que un pH de entre 7 y 9. Por lo tanto, dicho producto de rechazo tiene que recibir cierto tratamiento para poder ser devuelto al medio ambiente o ser devuelto hacia el mar abierto por

medio de difusores que permitan disminuir a concentraciones similares a la natural como ciertos estudios españoles sugieren [3].

f. Distribución

Una vez que el agua obtenida del proceso tiene la calidad deseada y cumple las normas para ser consumida por el ser humano se procede a su distribución o almacenaje. Las redes de agua potable van enterradas en el suelo y generalmente siguen los altos y bajos que tienen las ciudades y son almacenadas en copas de agua de donde se procede a alimentar la ciudad de forma gravitacional, sin embargo, cuando las ciudades tienen poblaciones en cerros se necesitan motobombas extras para poder subir el agua a estanques más altos. En algunos casos no es posible la construcción de estanques de almacenamiento de agua, en esos casos se reemplazan por plantas presurizadas que tienen por función aumentar la presión del agua y así abastecer a esos lugares más elevados.

3.2.1 Equipos y Componentes

A continuación, se describen los principales equipos y componentes utilizados en la mayoría de las plantas desalinizadoras instaladas en el mundo y que son esenciales para un correcto funcionamiento de estas.

3.2.1.1 Bombas

Cuando la toma de agua de mar se encuentra a una cierta altura del nivel del mar se utiliza una bomba de toma de agua que permite la elevación de ésta al nivel requerido, que usualmente corresponde a una zona de depósito de alimentación a la planta. Cabe destacar que esta bomba se ubica en primera línea de la instalación y es el componente con el que parte el ciclo de desalinización. La bomba tiene la función principal de entregar cierta cantidad de energía a un flujo, que se traduce en un aumento de la velocidad y presión, cuyos valores van a depender del tamaño y potencias de la bomba.

En una planta se utilizan bombas en diversos puntos con el fin de manejar los flujos del circuito, sin embargo, existen bombas esenciales detectadas en casi todas las plantas. Entre estas se encuentra la bomba de toma de agua mencionada anteriormente, la bomba de alta presión (la de mayor potencia en el ciclo) que va a permitir la entrada del fluido a las membranas de osmosis reversible y finalmente la bomba de expulsión que va a entregar el agua desalinizada (o a veces potable).

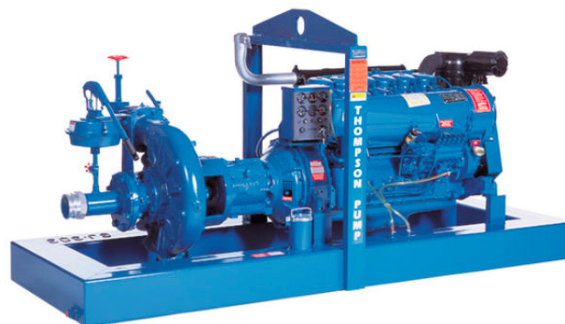


Figura 3.4: Bomba centrífuga de alta presión³.

³ Fuente: THOMPSON PUMP, <http://www.directindustry.es/prod/thompson-pump/product-62694-681961.html>

3.2.1.2 Pretratamiento

En esta etapa del ciclo de desalinización, el agua proveniente del mar es sometido a diversos procesos de filtración con el fin de disminuir la cantidad de sólidos indeseados. En la mayoría de las plantas en el mundo consta en primera instancia de filtros de arena o anillas que van a permitir retener elementos como algas y sólidos de un tamaño considerable presentes en el agua. Por otro lado, es usual que previo a estos procesos de filtración se introduzcan químicos que van a permitir una mejor degradación de los elementos indeseados, por ejemplo, se incluye sulfato férrico como coagulantes y ácido sulfúrico que va a regular el pH del fluido.



Figura 3.5: Filtro dual media⁴.

3.2.1.3 Membranas de Osmosis Inversa

Este componente corresponde al elemento crucial en el ciclo de desalinización y es el que va a permitir la separación de las sales con el agua posteriormente potable. Estas membranas utilizadas son semipermeables y van a permitir el intercambio de sales mediante el proceso de osmosis reversible mencionado en la sección 3.1. Estas unidades se instalan en grandes cantidades en una planta (que va a depender fuertemente de la capacidad de agua desalinizada que se desea obtener en un periodo de tiempo dado) y poseen una forma cilíndrica como se muestra en la Figura 3.6 donde el agua de mar entra por una cara del tubo para luego salir la salmuera por el otro extremo.



Figura 3.6: Membrana de osmosis inversa⁵.

⁴ Fuente: CormSquare, <http://cormsquare.com/Corporate-Services/Facility-Management-Services-/37930/Water-Treatment-Plant-Services->

⁵ Fuente: GWC, <https://gwc.com.ar/tienda/membrana-baja-presion-hidronautics-40-esp2-ld/>

La ventaja de la utilización de estos componentes es la obtención de agua con muy buena calidad, incluso se llega a obtener agua destilada. Por otro lado, la desventaja es que se necesita un periodo de pre-tratamiento para asegurar una mejor calidad.

3.2.1.4 Post-tratamiento

El tipo de proceso post-tratamiento va a depender totalmente del tipo de uso que se le dará al agua de expulsión. Existen tres tipos de aguas que se requieren normalmente: Agua potable, Aguas de regadío y Aguas de Proceso. Una descripción general de las propiedades que se desea en cada tipo de aguas se muestra a continuación.

Agua potable

El cloruro de Sodio y el Boro pueden ser reducidos añadiendo un segundo paso de membranas de osmosis reversible. Luego de este paso las concentraciones de Calcio residual y Magnesio son cercanos a cero. Por esto se debe remineralizar y conseguir una dureza residual típica de 8°D (100 [mg/L CaCO₃]).

Aguas de regadío

Se desea un equilibrio entre Sodio, Calcio y Magnesio permitiendo una buena filtración al suelo. Se debe eliminar el Boro ya que se considera como tóxico para las plantas. También se desea una buena concentración de Calcio y Magnesio por lo que se evita un segundo paso por membranas.

Aguas de proceso

Los requerimientos vienen dados principalmente por el fabricante de la maquinaria que hace uso del agua como por ejemplo un intercambiador de calor, una caldera, dilución de agua, etc.

Finalmente, para esta planta se requiere una expulsión de agua potable que se obtiene por diversos procesos de post-tratamiento. Entre estos se encuentra la desgasificación para eliminar el CO₂ que contiene el agua y que las membranas no pueden retener. Luego viene un proceso de alcalinización con el fin de incrementar el pH añadiendo principalmente NaOH. Más tarde una pasivación cuyo fin es la eliminación de la acción corrosiva del agua frente a los metales y se termina con una cloración del agua.

3.2.1.5 Recuperación de Energía

Finalmente se tiene la recuperación de energía a partir de la presión de la salmuera expulsada luego del proceso de permeado por las membranas de osmosis inversa. Para esto existen diversos procesos, pero el más utilizado es la utilización de una turbina Pelton (ver Figura 3.7) que a través de los recursos hidráulicos (Presión y caudal) se obtiene cierta cantidad de energía que puede ser aprovechada por el mismo ciclo para un suministro a los diversos componentes que lo necesiten (Bombas) o puede ser utilizado como un suministro extra a la red local de energía aumentando de esta forma los ingresos del proyecto. En la Figura 3.7 se muestra un diagrama de funcionamiento de la recuperación de energía de la presión del agua de desecho (agua con residuos salinos) en una planta de osmosis inversa.

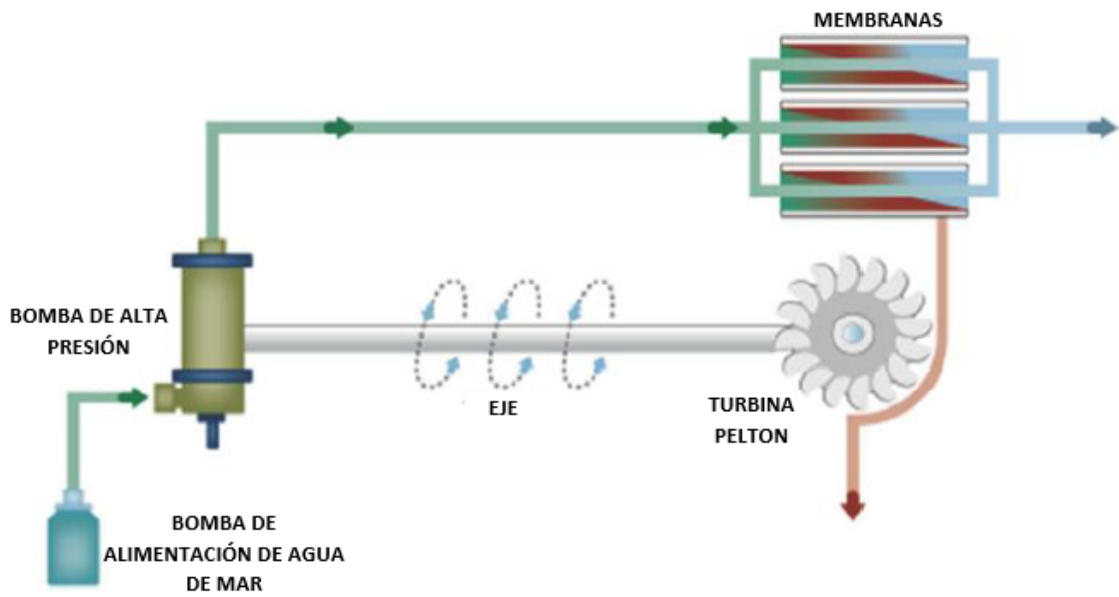


Figura 3.7: Turbina Pelton en proceso de recuperación de energía [4].

En la actualidad se están masificando los intercambiadores de presión (ver Figura 3.8) debido a su alta eficiencia en el proceso de recuperación de energía.

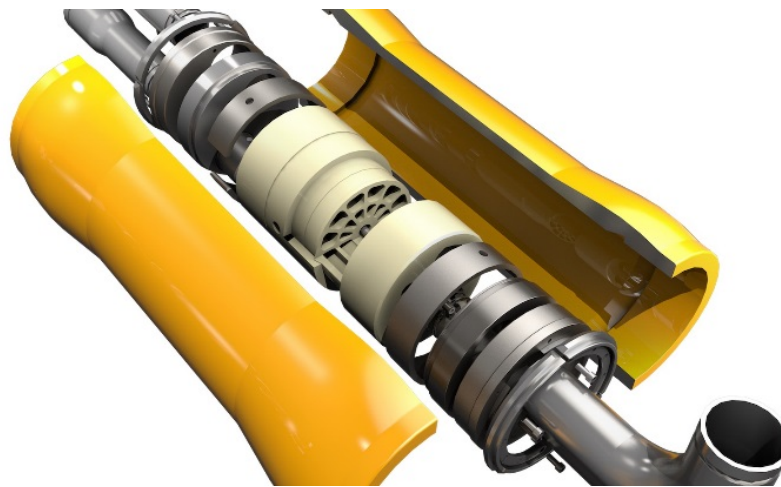


Figura 3.8: intercambiador de presión [5]

3.2.2 Requisitos de NORMA CHILENA para Agua Potable NCH409/1

Cabe destacar que la NORMA CHILENA [6] define el agua potable como “agua que cumple con los requisitos físicos, químicos, radiactivos y bacteriológicos prescritos en esta norma que aseguran su inocuidad y aptitud para el consumo humano”. Para ello establece lo siguiente:

3.2.2.1 Requisitos Físicos

El agua potable debe cumplir con los requisitos físicos indicados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Requisitos Físicos

REQUISITO	UNIDAD	LIMITE MÁXIMO
Turbiedad	Unidades nefelométricas (formazina)	5
Color verdadero	Unidades de escala platino-cobalto	20
Olor	—	Inodora
Sabor	—	Insípida

Fuente: NORMA CHILENA para Agua Potable NCH409/1 [6].

3.2.2.2 Requisitos Químicos

El agua potable debe tener un pH comprendido entre 6,0 y 8,5; y no debe contener elemento o sustancias químicas en concentraciones totales mayores que las indicadas en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Contenido Máximo de Elementos y Sustancias Químicas

SUSTANCIA	EXPRESADO COMO	LIMITE MAXIMO
Amoniaco	N	0,25
Arsénico	As	0,05
Cadmio	Cd	0,01
Cianuro	CN-	0,2
Cloruros	Cl	250*
Cobre	Cu	1,0*
Compuestos fenólicos	Fenol	0,002
Cromo hexavalente	Cr	0,05
Detergente	SAAM	0,5
Flúor	F-	1,5
Hierro	Fe	0,3*
Magnesio	Mg	125
Manganeso	Mn	0,10*
Mercurio	Hg	0,001
Nitratos	N	10*
Nitritos	N	1
Plomo	Pb	0,05
Residuos sólidos filtrables	-	1 000*
Selenio	Se	0,01
Sulfatos	SO4-2	250*
Zinc	Zn	5,0*

Fuente: NORMA CHILENA para Agua Potable NCH409/1 [6].

3.2.2.3 Requisitos Radiactivos

El agua potable no debe contener sustancias radiactivas en concentraciones mayores que las indicadas en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Requisitos Radiactivos

ELEMENTOS RADIATIVOS	LIMITE MAXIMO (pCi/l*)
Estroncio 90	10,0
Radium 226	3,0
Actividad Beta total (excluyendo Sr-90, Ra-226 y otros emisores alfa)	1000,0
Actividad Beta total (incluyendo Sr-90, corregida para el K-40 y otros)	50,0
Actividad Alfa total (incluyendo Ra-226 y otros emisores alfa)	15,0

Fuente: NORMA CHILENA para Agua Potable NCH409/1 [6].

3.2.2.4 Requisitos Bacteriológicos

El agua potable debe estar exenta de microorganismos de origen fecal, cuya presencia se establece en base a la determinación de gérmenes del grupo coliforme [6]. Sin embargo, cuando se trate de agua distribuida por redes, se considera como potable desde el punto de vista bacteriológico, a aquella que cumpla simultáneamente con las condiciones que se indican en los puntos 7.1.1 y 7.1.2 de la NORMA CHILENA 409/1. Of.84.

3.3 Energía Eólica

Este tipo de energía clasificada dentro de las energías renovables no convencionales (ERNC) consiste en transferir la energía cinética de masas de aire desplazadas de zonas de alta presión atmosférica hacia áreas adyacentes de baja presión, con velocidades que son proporcionales a al gradiente de presión producido.

Su aprovechamiento consiste en transformar la energía cinética con la cual el aire se mueve y hacer rotar las hélices de un aerogenerador para transformarse en energía rotacional y finalmente por medio de un generador en energía eléctrica.

El viento que llega a las hélices de un aerogenerador posee una energía cinética por unidad de tiempo igual a:

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \frac{dm}{dt} \cdot v^2 \quad (3.1)$$

Donde:

$\frac{dE_c}{dt}$: variación de energía cinética en el tiempo

$\frac{dm}{dt}$: cambio de caudal másico de aire en el tiempo

v : velocidad del aire

El caudal másico de aire se puede definir como:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot \frac{dVol}{dt} \quad (3.2)$$

$$\frac{dVol}{dt} = A \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.3)$$

Reemplazando (3.3) en (3.2) y utilizando la definición de derivada de la posición en el tiempo como la velocidad, se tiene:

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot v \quad (3.4)$$

Donde:

ρ : densidad del aire.

A: área barrida por las aspas de las hélices.

$\frac{dVol}{dt}$: variación del volumen a través de A en el tiempo.

$\frac{dx}{dt}$: variación de la posición del aire en la dirección paralela a la normal de A en el tiempo (velocidad).

Por lo tanto, reemplazando (3.4) en (3.1) se obtiene la variación de la energía cinética en el tiempo como:

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.5)$$

La potencia eléctrica generada se define como:

$$P_{el} = \eta \cdot \frac{dE_c}{dt} \quad (3.6)$$

Finalmente, reemplazando (3.5) en (3.6) se obtiene:

$$P_{el} = \frac{1}{2} \cdot \eta \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3.7)$$

Donde:

P_{el} : potencia eléctrica generada.

η : eficiencia del modelo de hélice.

Además, la eficiencia del modelo de hélice se puede descomponer en los diversos factores involucrados en la potencia eléctrica generada como se muestra en la ecuación (3.8) [7]:

$$\eta = C_p \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot \eta_{EP} \quad (3.8)$$

Donde:

C_p : rendimiento de la hélice o coeficiente de potencia

η_T : rendimiento del sistema de transmisión

η_G : rendimiento del generador

η_{EP} : rendimiento de equipos de electrónica de potencia

Es importante señalar que existen límites de funcionamiento para los aerogeneradores referente a las velocidades del viento como se muestra en la Figura 3.9. El límite inferior denominada *cut-in speed* es una velocidad tan baja que no produce torque suficiente sobre las aspas como para hacerlas rotar, típicamente es entre 3-4 [m/s]. El límite superior denominado *cut-out speed* es impuesto por un sistema de seguridad de detención que previene la falla por el aumento de esfuerzos debido a las altas velocidades del viento sobre la turbina, típicamente es de 25 [m/s]⁶.

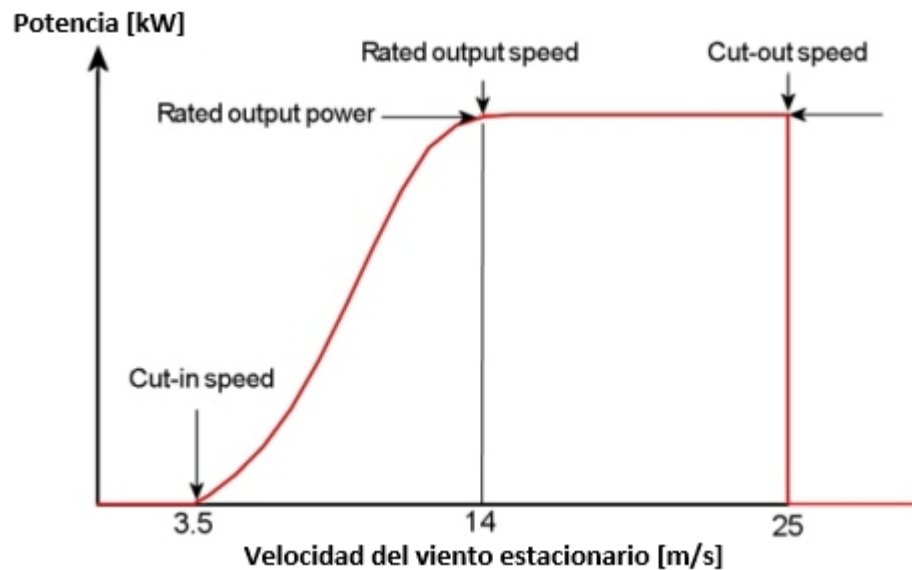


Figura 3.9: Potencia de salida típica de una turbina eólica a velocidad estacionaria⁶

⁶ Fuente: http://www.wind-power-program.com/turbine_characteristics.htm

3.3.1 Central eólica

Este tipo de centrales convierten la energía cinética del viento a través de un grupo de aerogeneradores en energía eléctrica, también son conocidas como parques eólicos.

Las zonas idóneas para este tipo de centrales son generalmente en lugares donde el potencial eólico es alto como bordes costeros o zonas montañosas.

En la Figura 3.10 se muestran los elementos generales que constituyen una central eólica.

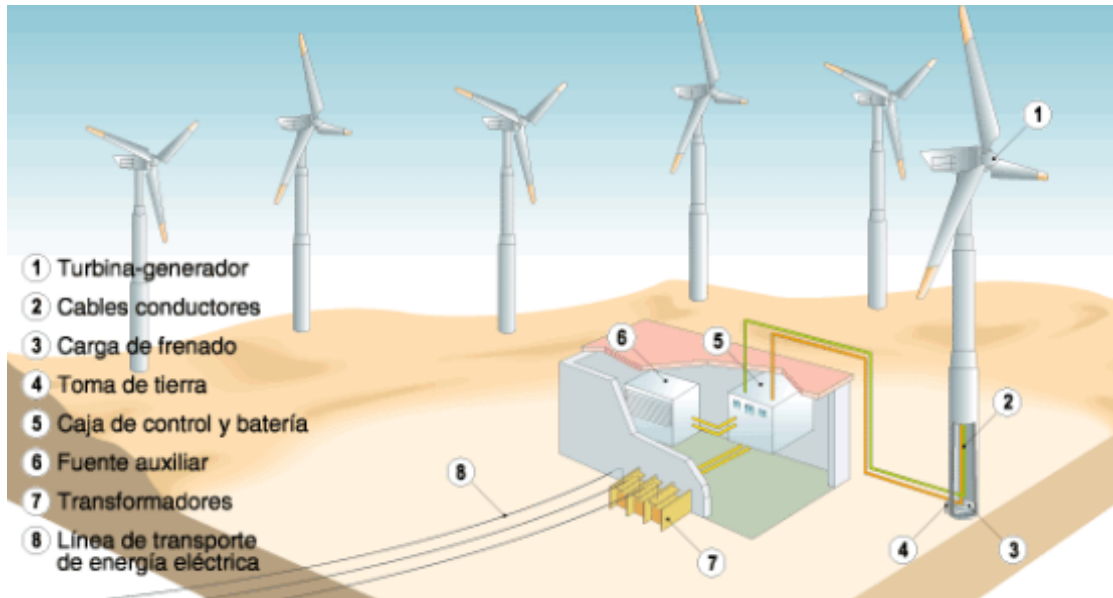


Figura 3.10: Central Eólica⁷

El funcionamiento de un aerogenerador de eje horizontales consiste primero en que sobre una torre soporte (3) se coloca una góndola, que aloja en su interior un generador, el cual está conectado, mediante una caja multiplicadora, a un conjunto de palas (1). La energía eléctrica producida por el giro del generador es transportada mediante cables conductores (2) a un centro de control (5) desde donde, una vez elevada su tensión por los transformadores (7), es enviada a la red general mediante las líneas de transporte de alta tensión (8).

⁷ Fuente: Unesa, <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1344-central-eolica>

3.4 Energía Solar Fotovoltaica

También clasificada como ERNC, debido a que es una energía que se aprovecha de una fuente natural que en este caso corresponde al Sol considerado como inagotable. Consiste básicamente en transformar la radiación solar que reciben los módulos fotovoltaicos produciendo corriente eléctrica la cual puede consumirse directamente, ser almacenada en un sistema de baterías o ser inyectada a la red eléctrica.

La tecnología de los módulos fotovoltaicos funciona con la energía del Sol, utilizando propiedades que poseen ciertos materiales para generar un flujo de electrones cuando incide sobre ellos un flujo de fotones. El proceso consiste primero en dopar una capa de material semiconductor para que posea un exceso de electrones y se dopa otra capa de material semiconductor para que posea una carencia de electrones; luego, las dos capas se juntan, provocando que los electrones excedentes de la primera capa pasen a la otra capa con déficit de electrones, provocando un campo eléctrico cuya barrera impide el paso de más electrones. Al ser estas capas expuestas al Sol, la radiación provoca que los fotones de luz rompan esta barrera, consiguiendo que los electrones pasen a un circuito externo fuera de los semiconductores, creándose corriente eléctrica⁸.

La unidad o módulo más pequeño capaz de producir electricidad a través de la energía del Sol es conocido como célula fotovoltaica. Los paneles fotovoltaicos son un arreglo de células, los cuales se pueden conectar en serie o paralelo, siendo la primera opción para alcanzar un voltaje deseado y la segunda para alcanzar un nivel de potencia necesario⁹.

3.4.1 Características de paneles fotovoltaicos

Generalmente los paneles fotovoltaicos tienen un voltaje de trabajo de 1.5V, 3V, 6V, 12V, 24V o 48V que son múltiplos unos de otros. Cualquier solicitud específica de potencia se puede satisfacer conectando el número de paneles adecuados en serie o paralelo. La asociación en serie permite alcanzar la tensión deseada, mientras que la configuración en paralelo permite alcanzar la potencia solicitada.

3.4.1.1 Tipos de paneles fotovoltaicos

Los paneles se pueden clasificar según los materiales semiconductores y los métodos de fabricación utilizados. En el mercado se pueden encontrar los siguientes tipos de paneles⁸:

Paneles de lámina gruesa

- **Silicio puro monocristalino:**

Basados en secciones de una barra de silicio perfectamente cristalizado en una sola pieza (monocristal). En laboratorio se ha alcanzado un rendimiento máximo de 24,7% para éste tipo de panel siendo en los comercializados del 16%.

⁸ Fuente: Sitiosolar, <http://www.sitiosolar.com/paneles%20fotovoltaicas.htm>

⁹ Fuente: Textos Científicos.com, <http://www.textoscientificos.com/energia/paneles-fotovoltaicos>



Figura 3.11: Panel solar monocristalino

- **Silicio puro policristalino**

Semejantes respecto a materiales con los anteriores, aunque en este caso el proceso de cristalización del silicio es diferente. Los paneles policristalinos se basan en secciones de una barra de silicio que se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales. Son visualmente muy reconocibles por presentar su superficie un aspecto granulado. Se obtiene con ellos un rendimiento en laboratorio del 19.8% y en los módulos comerciales del 14%, inferior que los monocristalinos, pero siendo su precio también más bajo.



Figura 3.12: Panel solar policristalino

Paneles de lámina delgada

- **Silicio amorfo (TFS)**

Basados también en el silicio, pero a diferencia de los dos anteriores, este material no sigue estructura cristalina alguna. Este tipo de paneles son habitualmente empleados para pequeños dispositivos electrónicos (calculadoras, relojes). Su rendimiento máximo alcanzado en laboratorio ha sido del 13% siendo el de los módulos comerciales del 8%.

- **Teluro de cadmio**

Rendimiento en laboratorio 16% y en módulos comerciales 8%.

- **Arseniuro de Galio**

Uno de los materiales más eficientes presenta rendimientos en laboratorio del 25.7% siendo los comerciales del 20%.

- **Diseleniuro de cobre en indio**

Con rendimientos en laboratorio próximos al 17% y en módulos comerciales del 9%.

3.4.2 Distancia entre paneles

Un factor muy importante es la separación entre líneas de captadores. Esta separación se establece de tal forma que, al mediodía solar del día más desfavorable (altura solar mínima) del período de utilización, la sombra de la arista superior debe proyectarse, como máximo, sobre la cresta inferior de la siguiente como muestra la Figura 3.13.

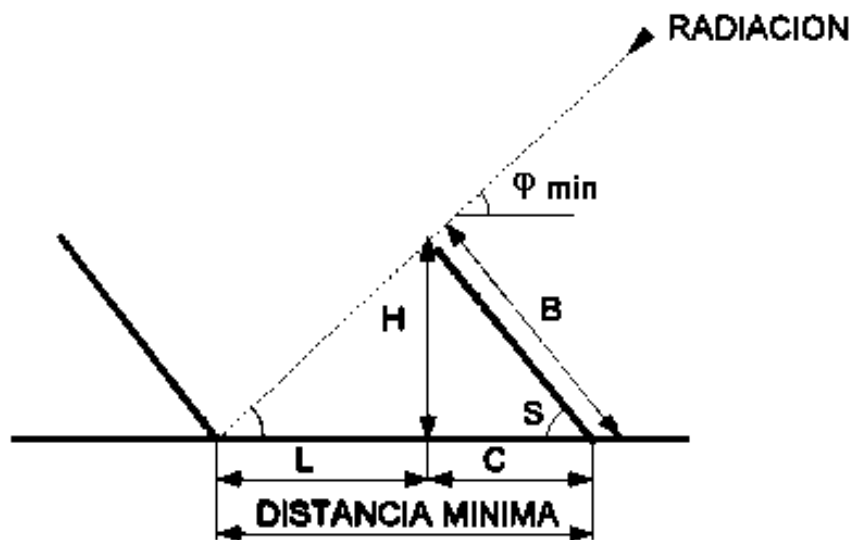


Figura 3.13: Separación entre paneles solares¹⁰

¹⁰ Fuente: Paneles o módulos fotovoltaicos, <http://edii.uclm.es/~arodenas/Solar/componentes.htm>

$$C = B \cdot \cos(s) \quad (3.9)$$

$$H = B \cdot \sen(s) \quad (3.10)$$

La distancia mínima entre líneas de paneles para que la fila anterior no proyecte sombras en la posterior, se determina mediante la fórmula siguiente:

$$tg(\varphi_{mín}) = \frac{H}{L} \quad (3.11)$$

A partir de la Figura 3.13, reemplazando las ecuaciones (3.9) y (3.10) en la ecuación (3.11) se obtiene:

$$tg(\varphi_{mín}) = \frac{B \cdot \sen(s)}{Dist_{mín} - B \cdot \cos(s)} \quad (3.12)$$

Finalmente, despejando de la ecuación (3.12) la distancia mínima entre paneles fotovoltaicos se obtiene:

$$Dist_{mín} = B \cdot \cos(s) + \frac{B \cdot \sen(s)}{tg(\varphi_{mín})} \quad (3.13)$$

Donde:

$Dist_{mín}$: distancia mínima entre paneles fotovoltaicos

s: inclinación del panel solar

B: longitud del panel solar

$\varphi_{mín}$: ángulo mínimo de incidencia (ocurre el 21 de junio en el hemisferio sur)

3.4.3 Orientación de paneles fotovoltaicos

Para un mejor aprovechamiento de la energía solar es necesario la radiación solar incida en el panel con una inclinación lo más perpendicular posible, es por ello que la decisión del ángulo del panel es muy importante en la estrategia de captación de la radiación solar.

Es sabido que la inclinación de los rayos del Sol respecto a un plano horizontal varía respecto a las estaciones del año, como también respecto a las horas del día. La inclinación máxima ocurre en verano y la mínima en invierno.

El tipo de soporte más utilizado en la actualidad es sin seguimiento, el cual dispone de una inclinación que permita un máximo aprovechamiento anual de radiación. Los sistemas de seguimiento solar de uno o dos ejes permiten aumentar el aprovechamiento de la radiación solar como se muestra en la Figura 3.14.

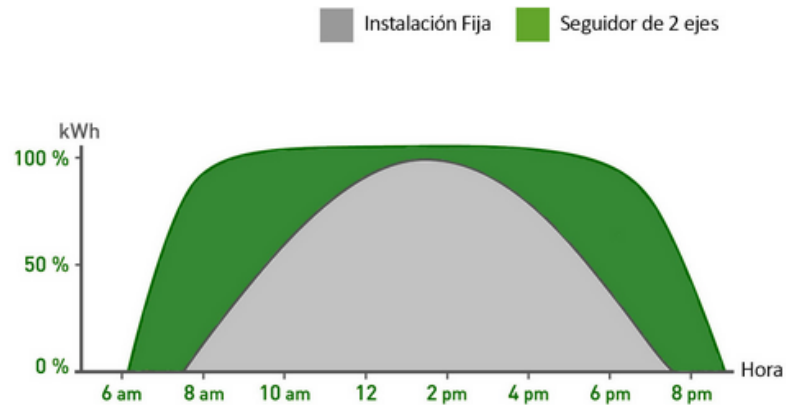


Figura 3.14: Energía v/s hora de una instalación con y sin seguimiento¹¹

Para instalaciones que no emplean sistema de seguimiento se utiliza una inclinación de los paneles fotovoltaicos que permita el mayor aprovechamiento anual, es decir, la inclinación que permite que la potencia media anual sea óptima. Generalmente el grado de inclinación del panel respecto al plano horizontal es igual a la latitud geográfica de la instalación¹⁰.

3.4.4 Centrales fotovoltaicas

Este tipo de centrales son las encargadas de transformar la radiación solar captada por los paneles fotovoltaicos en energía eléctrica. Estas centrales necesitan una zona propicia para su instalación, caracterizada por recibir una alta radiación solar como regiones mediterráneas o desérticas como el norte de Chile.

En la Figura 3.15 se muestran los componentes principales de una central solar fotovoltaica.

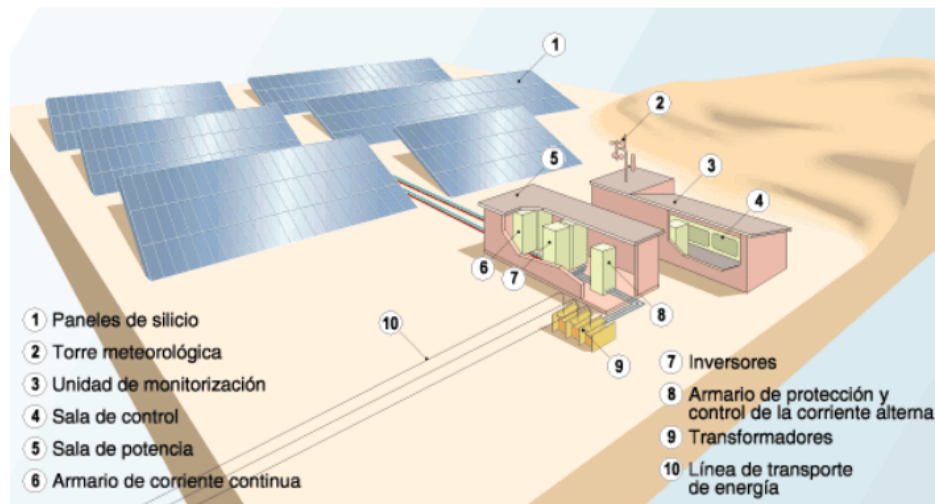


Figura 3.15: Central fotovoltaica¹²

¹¹ Fuente: VALLDREIX GREENPOWER, <http://www.valldoreix-gp.com/category/noticias/>

¹² Fuente: Unesa, <http://www.unesa.es/sector-electrico/funcionamiento-de-las-centrales-electricas/1345-central-fotovoltaica>

En la imagen anterior se puede apreciar que las centrales fotovoltaicas requieren de varios elementos básicos, siendo el principal los paneles fotovoltaicos (1). Como elemento auxiliar se requiere de una torre meteorológica (2) para monitorear las condiciones climáticas para optimizar el aprovechamiento de la radiación. La unidad de monitorización (3) permite supervisar todo el funcionamiento de la central, pues ahí se recibe la información de todos los distintos sistemas de la instalación; los armarios de corriente continua (6) son necesarios para almacenar la corriente que se genera; los inversores (7) permiten transformar la corriente continua a corriente alterna y los armarios de corriente alterna (8), en los cuales la corriente que se genera pasa a los transformadores para elevar la tensión a los niveles deseados.

3.5 Central eléctrica mixta Eólica - Solar

3.5.1 Complementación estacional de energía solar y eólica

Debido a que la radiación solar y velocidad el viento presentan comportamientos que dependen de la estacionalidad del año, es posible encontrar lugares donde la energía eólica y solar sean complementarias a lo largo del año que permitan una posible producción eléctrica más constante.

En las Figura 3.16 y Figura 3.17 se muestra a modo de ejemplo un lugar ubicado en la latitud -21.9° y longitud -70.1° dentro del Norte Grande cercano a Tocopilla que para periodos en los cuales la radiación solar presenta su mínimo, la velocidad del viento presenta sus máximos, por lo tanto, sus potenciales eólicos máximos.

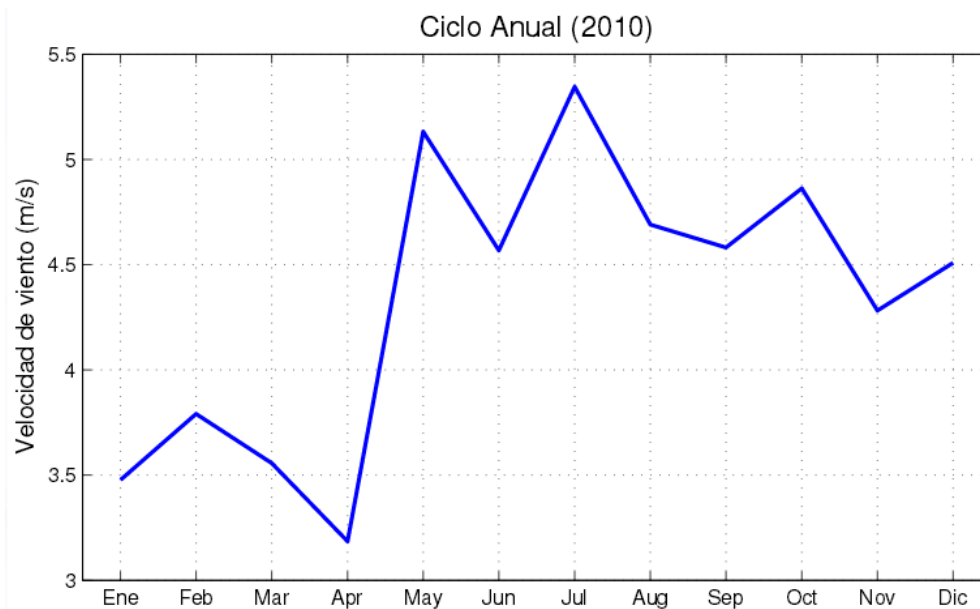


Figura 3.16: Ciclo de velocidad del viento a 93 metros en cercanías a Tocopilla [8]

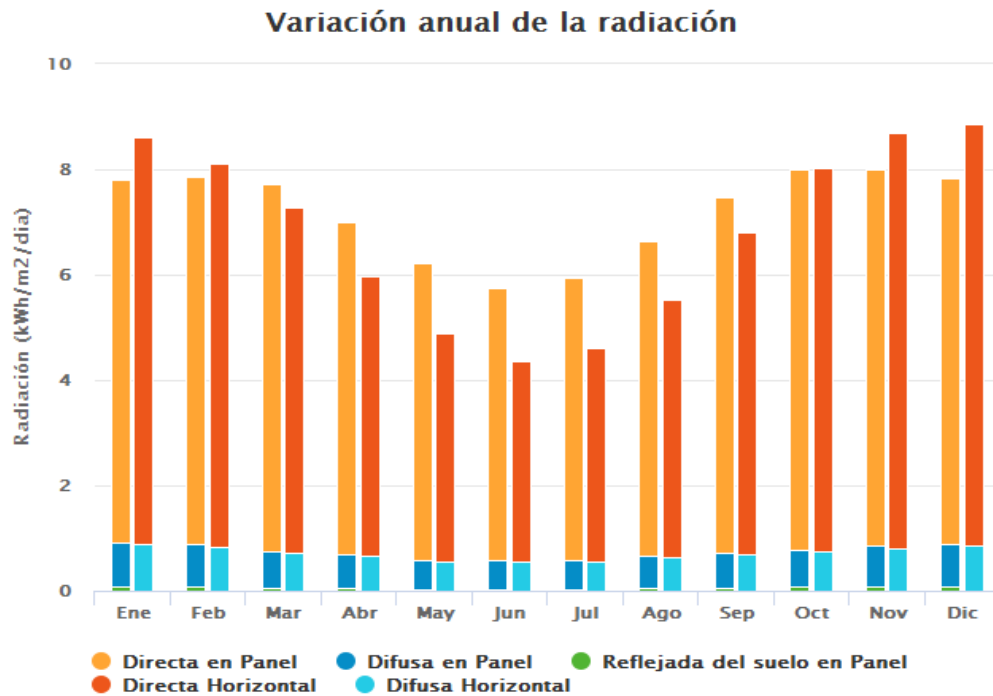


Figura 3.17: Promedio mensual de radiación incidente, separada en sus componentes en cercanías a Tocopilla [9]

3.5.2 Características de una central mixta

Los componentes principales de una central mixta son los paneles fotovoltaicos y los aerogeneradores como se aprecia en la Figura 3.18, cuya cantidad depende directamente de la demanda energética que se desea suplir y del lugar de emplazamiento.



Figura 3.18: Matriz fotovoltaicas y turbinas eólicas en Morbach, Alemania¹³.

¹³ Fuente: MORBACH, <http://www.morbach.de/nc/en/wirtschaft/energielandschaft-morbach2/>

Para ejemplificar el funcionamiento de una central mixta aislada de un sistema eléctrico se muestra la Figura 3.19 indicando los elementos principales que la conforman:



Figura 3.19: Diagrama de central mixta eólica – fotovoltaica [10].

A partir de la Figura 3.19 se puede destacar que los elementos básicos de una central mixta son:

- Aerogenerador
- Panel solar fotovoltaico
- Rectificador
- Regulador eólico
- Regulador fotovoltaico
- Baterías
- Inversor CC/CA

El rectificador permite transformar la corriente alterna proveniente de los aerogeneradores en corriente continua, luego la corriente continua que sale del rectificador pasa a través de un regulador fotovoltaico/eólico que permite gestionar la carga de las baterías para evitar sobrecargas o descargas excesivas que acortan la vida útil de las baterías. Las baterías permiten almacenar energía para el uso posterior en situaciones en las cuales no se pueda generar energía a través del sol o viento. Y finalmente se encuentra el inversor que permite transformar la corriente continua proveniente de los reguladores o baterías en corriente alterna para el consumo de la energía producida [10].

3.5.3 Bases para el proyecto de una central mixta eólica-fotovoltaica

Para una central mixta se debe determinar las dimensiones de la instalación fotovoltaica y eólica como se propone y detallan a continuación:

3.5.3.1 Dimensionamiento de instalación fotovoltaica

Para determinar las dimensiones de la instalación fotovoltaica se proponen los siguientes pasos [11]:

a. Elección del tipo de módulo fotovoltaico

El panel o módulo fotovoltaico puede ser monocristalino de silicio puro, policristalino de silicio puro o de silicio amorfo.

b. Disposición de módulos fotovoltaicos

La disposición queda definida por [12]:

- **Orientación (α)**

Queda definido como el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar (ver Figura 3.20). Valores típicos son 0° para módulos orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste.

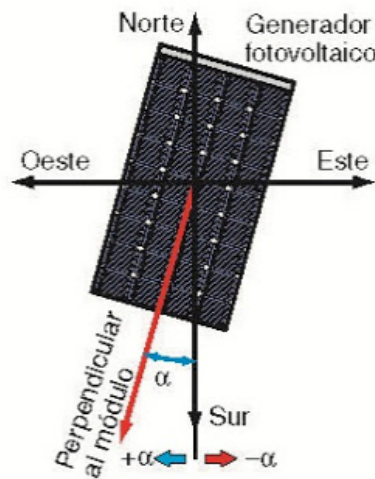


Figura 3.20: Esquema de la orientación de un panel fotovoltaico determinado por su ángulo alpha (α) [12].

- **Inclinación (β)**

Ángulo que forma la superficie de los módulos fotovoltaicos con el plano horizontal (ver Figura 3.21). Su valor es 0° para módulos horizontales y 90° para verticales.

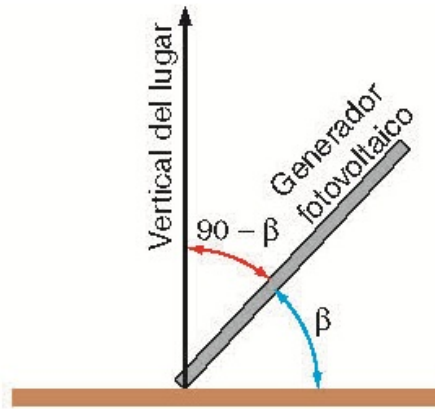


Figura 3.21: Ángulo de inclinación (β) entre panel fotovoltaico y plano horizontal [12].

El ángulo de inclinación óptima para un módulo fotovoltaico fijo, se utiliza la ecuación (3.14), basada en un análisis estadístico de radiación solar para aplicaciones de utilización anual que busca maximizar la captación de energía solar a lo largo del año [12].

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot \varphi \quad (3.14)$$

Donde:

β_{opt} : ángulo de inclinación óptimo [°]

φ : latitud del lugar [°]

La disposición general del panel fotovoltaico queda definida como se muestra en la Figura 3.22.

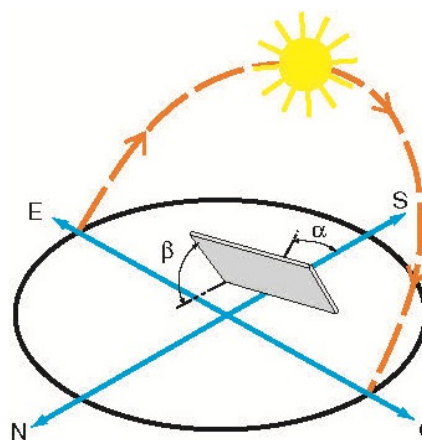


Figura 3.22: Disposición general de un panel fotovoltaico en orientación e inclinación [12].

c. Determinar número de módulos fotovoltaicos

Se determina generalmente según la mayor potencia requerida por el consumo, el día y la hora a la que ello ocurre; para la radiación solar en ese momento. Para esto se requiere conocer la radiación del lugar, el área y eficiencia de los módulos, proporcionados por el fabricante de los paneles seleccionados. Así, se determina el número de módulos a utilizar mediante la siguiente ecuación:

$$P_{3\phi} = N^{\circ}_{módulos} \cdot radiación \cdot A_{módulo} \cdot \eta_{módulo} \quad (3.15)$$

Donde:

$P_{3\phi}$: potencia trifásica [W]

$N^{\circ}_{módulos}$: número de paneles fotovoltaicos necesarios

radiación: radiación del lugar a emplazar la instalación [W/m²]

$A_{módulo}$: área del módulo fotovoltaico [m²]

$\eta_{módulo}$: eficiencia del panel o módulo fotovoltaico

Despejando la ecuación (3.15) se obtiene la ecuación (3.16) que determina el número de paneles fotovoltaicos necesarios para satisfacer una potencia requerida [13]:

$$N^{\circ}_{módulos} = \frac{P_{3\phi}}{radiación \cdot A_{módulo} \cdot \eta_{módulo}} \quad (3.16)$$

d. Conexiones de los paneles

La instalación fotovoltaica a proyectar se divide en varios tramos de conexión entre los diferentes equipos y cajas de conexión que la componen. En dichos tramos, el cableado poseerá diferentes secciones en los conductores, puesto que la carga que circulará por cada uno de ellos será diferente dependiendo los equipos que interconecten, además de la cantidad de paneles fotovoltaicos que se configuren en serie y/o paralelo, lo cual también modifica la corriente y voltajes [11].

3.5.3.2 Dimensionamiento de instalación eólica

Para dimensionar la instalación eólica, es elemental conocer los componentes principales de un aerogenerador, los cuales se nombran a continuación [14]:

- Torre
- Caja de engranajes o multiplicador
- Aspas y buje de hélice
- Sistema de control
- Generador

La torre tiene por función soportar la hélice y la góndola (multiplicador, generador y actuadores del sistema de control) y dar el anclaje necesario al suelo para mantener la estructura en pie. Además, la torre es la que determina la altura a la que se posicionará la góndola, permitiendo a su vez aumentar el largo de las aspas. Dentro de los clásicos tipos de torres encontramos; tubulares, de celosía y de mástil tensado (también las hay híbridas). Ver Figura 3.23.



Figura 3.23: Tipo de torres: tubular, celosía y mástil tensado (de izquierda a derecha) [14].

El multiplicador tiene por función aumentar la velocidad de giro del eje de las aspas, denominado eje de baja velocidad, y transmitirlo a una mayor velocidad al generador, denominado eje de alta velocidad. Esta caja (multiplicador) es necesaria debido al uso de generadores sincrónicos o asíncrónicos en los aerogeneradores conectados a red, por lo tanto, se necesita que la velocidad de giro con la que operan estos aerogeneradores sea elevada, para que produzcan frecuencias eléctricas iguales a 50[Hz] o 60[Hz], dependiendo del país.

La hélice está constituida por las aspas y el buje. Las aspas son las encargadas de captar el viento, mientras que el buje es la pieza que las mantiene unidas. De esta forma, la energía cinética presente en el viento y captada por las aspas, se transfiere al buje que la entrega finalmente al eje como energía mecánica.

a. Elección dimensiones de torre y rotor

La torre y rotor se dimensionan en base a la potencia requerida y a la disponibilidad en el mercado, como se aprecia en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4: Alturas y diámetros típicos de aerogeneradores

Altura Torre [m]	Diámetro Rotor [m]	Potencia Nominal [kW]
22	21	55
31	30	225
35	35	450
35-40	41-44	500
44	43	600
50	48	750
50	54	1000
60	58	1500
64-80	72-76	2000
85	115	5000

Fuente: Mecanotecnia blogspot, Diseño de Centrales Eólicas¹⁴

¹⁴ Fuente: Mecanotecnia, <http://mecanotecnia.blogspot.cl/2011/10/disenio-de-centrales-eolicas.html>

4 Desarrollo

4.1 Zonas de aplicación

El instituto nacional de estadística (INE) define los siguientes conceptos geográficos-censales:

- **Entidad Urbana**

Conjunto de viviendas concentradas con más de 2.000 habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes, con el 50% o más de su población económicamente activa, dedicada a actividades secundarias y/o terciarias. Excepcionalmente, los centros poblados que cumplen funciones de turismo y recreación con más de 250 viviendas concentradas y que no alcanzan el requisito de población se consideran urbanos.

- **Metrópolis**

Es la mayor representación urbana que tiene un país; concentra más de un millón de habitantes que corresponden a un elevado porcentaje de la población total nacional.

- **Ciudad (Cd)**

Entidad urbana que posee más de 5.000 habitantes.

- **Pueblo (Pb)**

Entidad urbana con una población que fluctúa entre 2.001 y 5.000 habitantes, o entre 1.001 y 2.000 habitantes y cumple el requisito de actividad económica.

- **Aldea (Al)**

Asentamiento humano, concentrado con una población que fluctúa entre 301 y 1.000 habitantes; excepcionalmente se asimilan a Aldeas, los centros de turismo y recreación entre 75 y 250 viviendas concentradas, que no alcanzan el requisito para ser considerados como pueblo.

- **Caserío (Cs)**

Asentamiento humano con nombre propio que posee 3 viviendas o más cercanas entre sí, con menos de 301 habitantes y que no forma parte de otra entidad.

De acuerdo a las zonas seleccionadas en la memoria desarrollada por Sebastián Lobos “Evaluación de factibilidad de tecnologías para desalinizar agua, por medio de energía solar térmica, en el norte de Chile.”

[15], las zonas de estudio para esta memoria corresponden a las mismas cinco ciudades seleccionadas en la memoria antes mencionada y son:

- Tocopilla
- Mejillones
- Taltal
- Chañaral
- Caldera

4.1.1 Modelo de estimación de población

Existen distintos métodos de estimación de población futura como lineal, parabólica y exponencial [16]. Las tasas de crecimiento de la población chilena utilizado por el INE se basan en el modelo exponencial.

El modelo de estimación de población exponencial se expresa según la ecuación (4.1) y es utilizada para estimar las poblaciones estudiadas.

$$r = \frac{1}{a} \cdot \ln \left(\frac{P_{t+n}}{P_t} \right) \quad (4.1)$$

Donde:

r: Tasa de crecimiento anual exponencial

a: Amplitud

P_{t+n} : Población futura en el periodo $t+n$

n: años hacia el futuro más allá de t al cual se realiza la estimación

4.1.2 Tasa de crecimiento de la población

Por medio de datos oficiales dispuestos a consulta pública del INE se adjunta en la Tabla 4.1, la cual indica la población total del país además de la tasa de crecimiento anual entre periodos censales. Para determinar una población a futuro se considera la tasa de crecimiento promedio entre todos los censos realizados en la historia de Chile, y así extrapolar a la fecha que se desea determinar, que en este caso corresponde al año 2036.

Tabla 4.1: Los 18 Censos Nacionales de Población, Chile: años, población total y tasas de crecimiento anual.

Orden	Fecha de CENSO	Población país [P _t]	Tasa de crecimiento anual intercensal [% , r]
I	(1831-1834) 1835	1.010.332	
II	1 de octubre 1843	1.083.701	0,88
III	19 de abril 1854	1.439.120	2,69
IV	19 de abril 1865	1.819.223	2,13
V	19 de abril 1875	2.075.971	1,32
VI	26 de noviembre 1885	2.507.005	1,78
VII	28 de noviembre 1895	2.695.625	0,72
VIII	28 de noviembre 1907	3.231.022	1,51
IX	15 de diciembre 1920	3.730.235	1,1
X	27 de noviembre de 1930	4.287.445	1,4
XI	28 de noviembre de 1940	5.023.539	1,58
XII	24 de abril de 1952	5.932.995	1,46
XIII	29 de noviembre de 1960	7.374.115	2,53
XIV	22 de abril de 1970	8.884.768	1,98
XV	21 de abril de 1982	11.329.736	2,02
XVI	22 de abril de 1992	13.348.401	1,64
XVII	24 de abril de 2002	15.634.605	1,24
XVIII	9 de abril al 30 de junio 2012	16.634.603	0,99
		Promedio	1,586

Fuente: Resultados Censo 2012 [17].

4.1.3 Estimación de la población al año 2036

Dado que la memoria tiene como objetivo realizar la evaluación técnico-económica, se determina realizar el análisis a un plazo de 20 años que es un periodo promedio para este tipo de proyectos. Por lo tanto, se debe estimar las poblaciones de interés al año 2036 para determinar así la demanda de agua. En la Tabla 4.2 se muestra un resumen de la estimación de la población que determinará la demanda de agua, en el Anexo C se muestra en detalle la estimación de la extrapolación de habitantes año a año, además de la demanda de agua diaria para cada año.

Tabla 4.2: Estimación de población al año 2036 (EP)

Lugar	Región	Categoría	N° Habitantes Año 2002 [18]	N° Habitantes Año 2012 [17]	N° Habitantes (Extrapolación 2012 al 2016)	N° Habitantes (Extrapolación 2012 al 2036)
Tocopilla	II	Ciudad	23.352	25.091	26.735	36.718
Mejillones	II	Ciudad	7.825	9.752	10.391	14.271
Taltal	II	Ciudad	9.564	13.493	14.377	19.745
Chañaral	III	Ciudad	12.086	14.146	15.073	20.701
Caldera	III	Ciudad	12.776	16.150	17.208	23.634

Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Recurso solar

A través del explorador solar (herramienta para la exploración del recurso solar en Chile) desarrollado por el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile por encargo del Ministerio de Energía del Gobierno de Chile, se obtienen datos asociados a la radiación y generación de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos.

El Explorador Solar entrega información sobre la radiación solar incidente en cualquier punto del país, con resolución espacial de 90 metros. Para cada punto se pueden obtener las series de radiación global y directa. Esto permite conocer la variabilidad del recurso en el tiempo y reducir la incertidumbre en la generación de energía a largo plazo [19].

4.1.4.1 Tocopilla

La locación propuesta para la localidad de Tocopilla se muestra en la Figura 4.1. Para esa locación se evaluó el recurso solar respecto a su variación interanual como también a lo largo del año como es presentado en el Gráfico 4.1 y Gráfico 4.2 respectivamente.

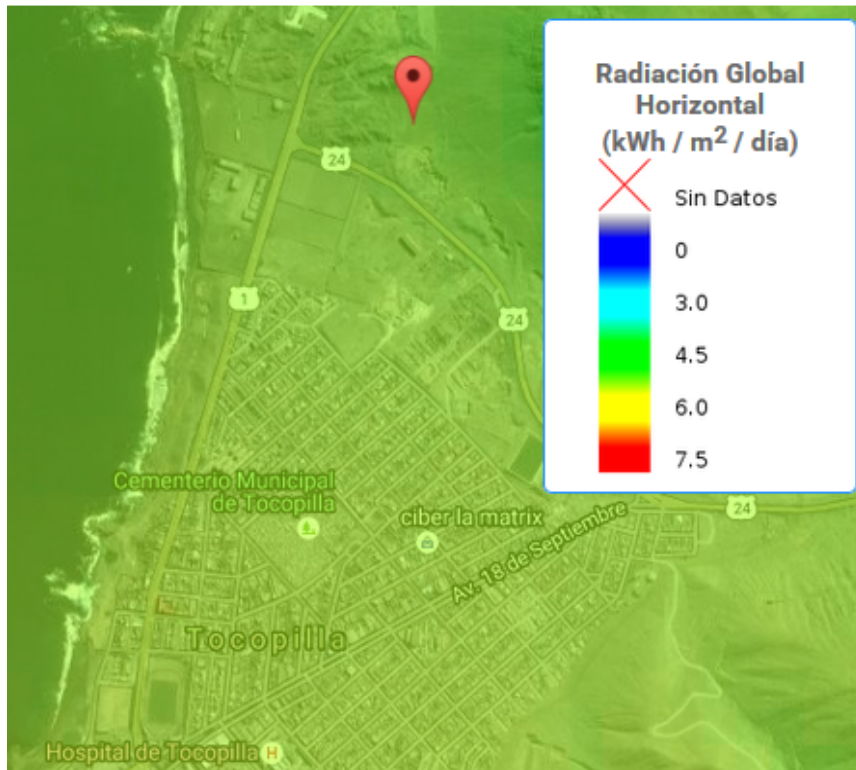


Figura 4.1: Radiación global horizontal en Tocopilla [9].

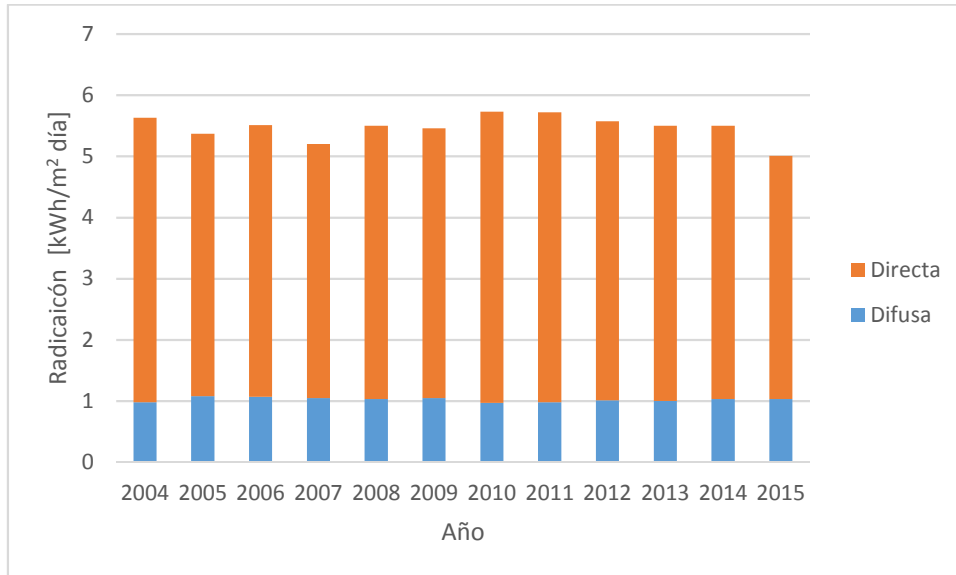


Gráfico 4.1: Variación de la radiación a través de los años [9].

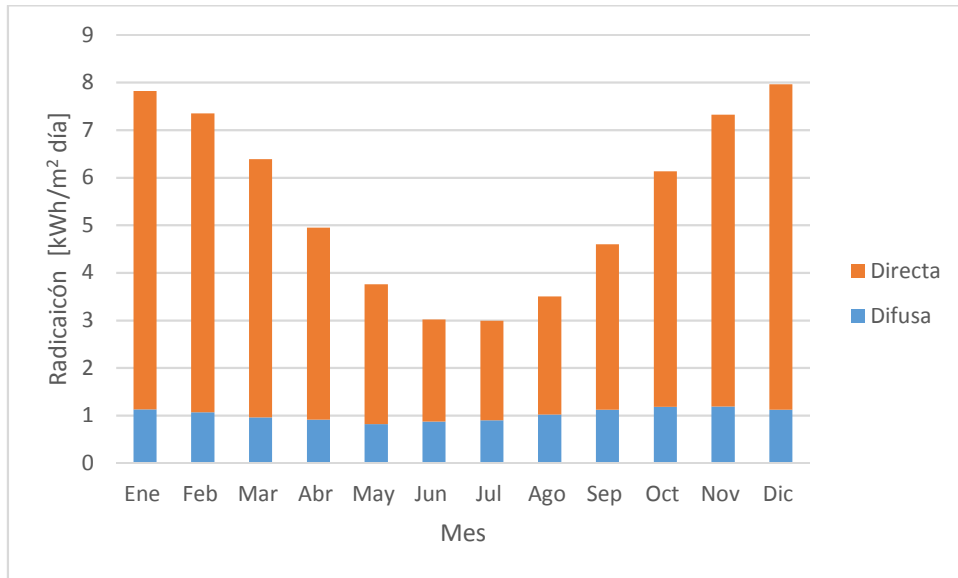


Gráfico 4.2: Variación de la radiación a través del año [9].

4.1.4.2 Mejillones

La locación propuesta para la localidad de Mejillones se muestra en la Figura 4.2. Para esa locación se evaluó el recurso solar respecto a su variación interanual como también a lo largo del año como es presentado en el Gráfico 4.3 y Gráfico 4.4 respectivamente.

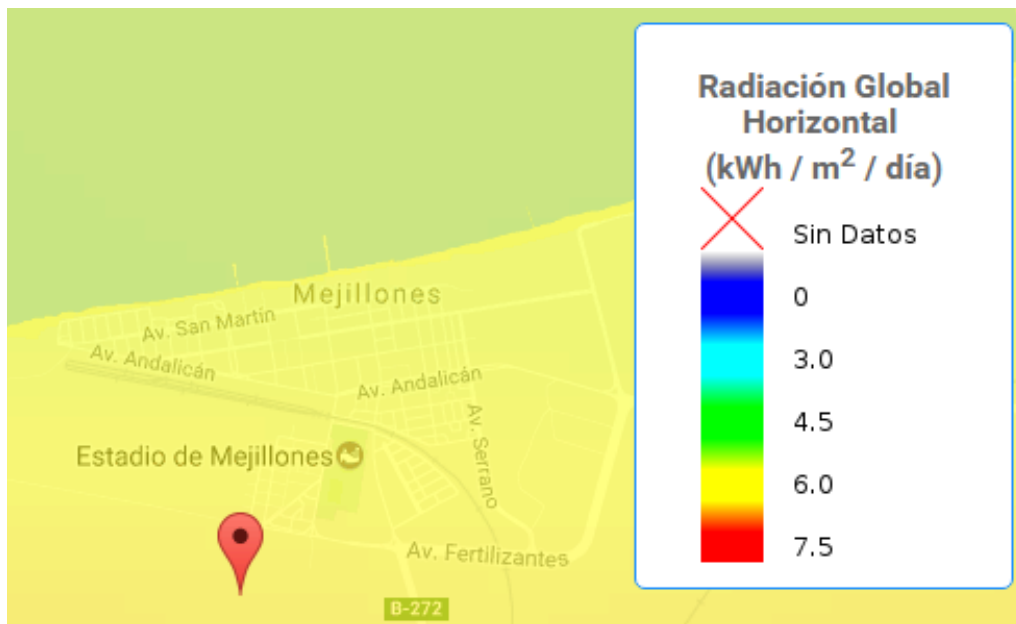


Figura 4.2: Radiación global horizontal en Mejillones [9].

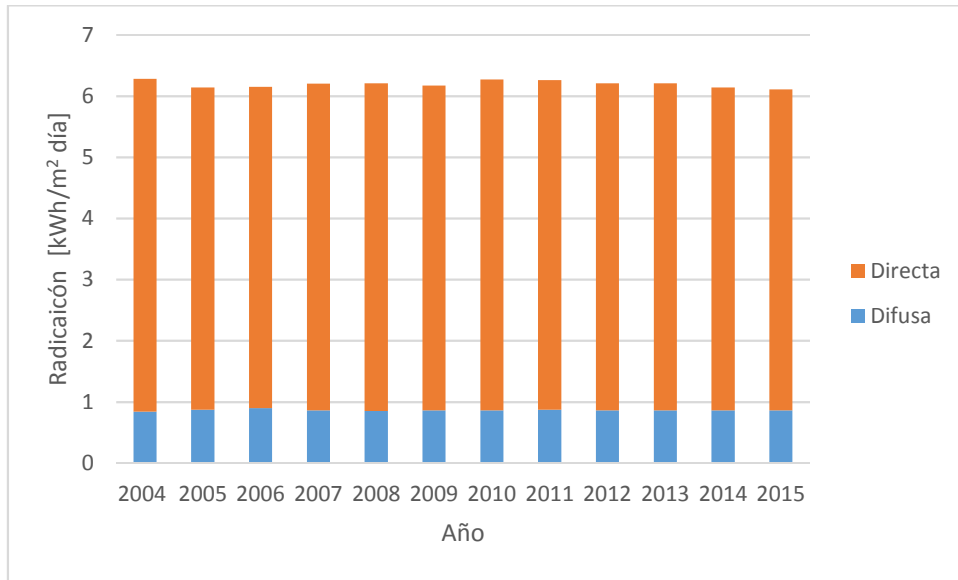


Gráfico 4.3: Variación de la radiación a través de los años [9].

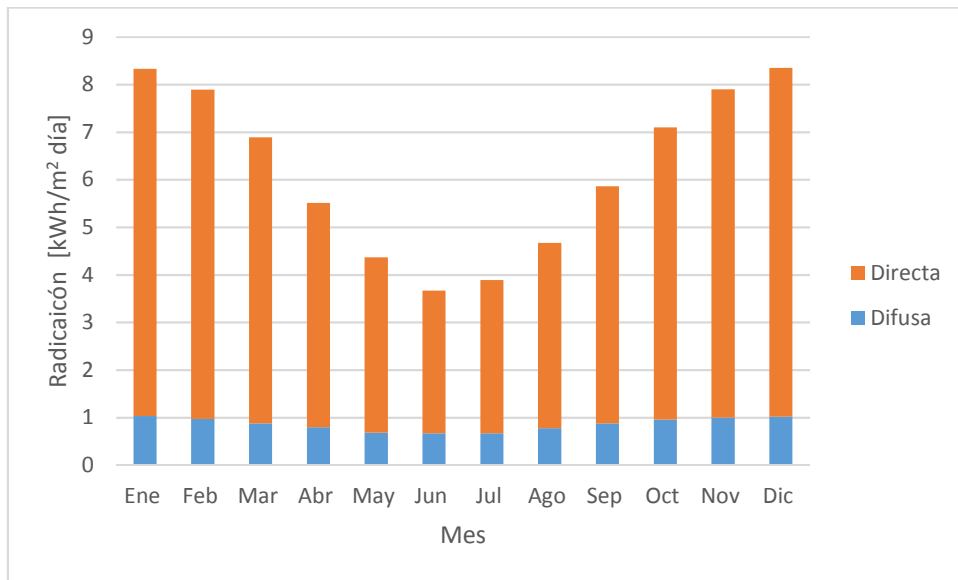


Gráfico 4.4: Variación de la radiación a través del año [9].

4.1.4.3 Taltal

La locación propuesta para la localidad de Taltal se muestra en la Figura 4.3. Para esa locación se evaluó el recurso solar respecto a su variación interanual como también a lo largo del año como es presentado en el Gráfico 4.5 y Gráfico 4.6 respectivamente.

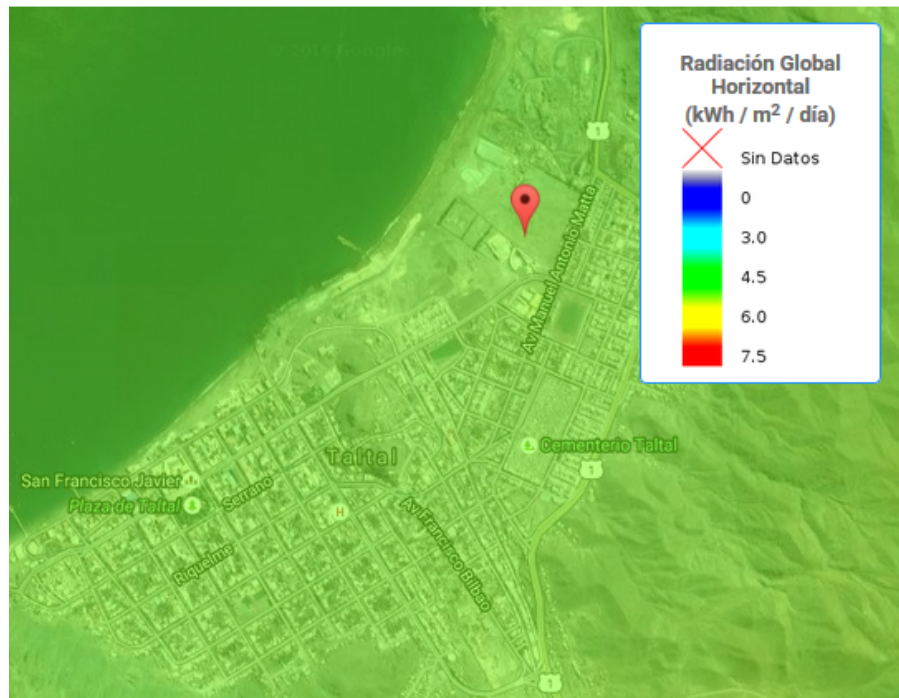


Figura 4.3: Radiación global horizontal en Taltal [9].

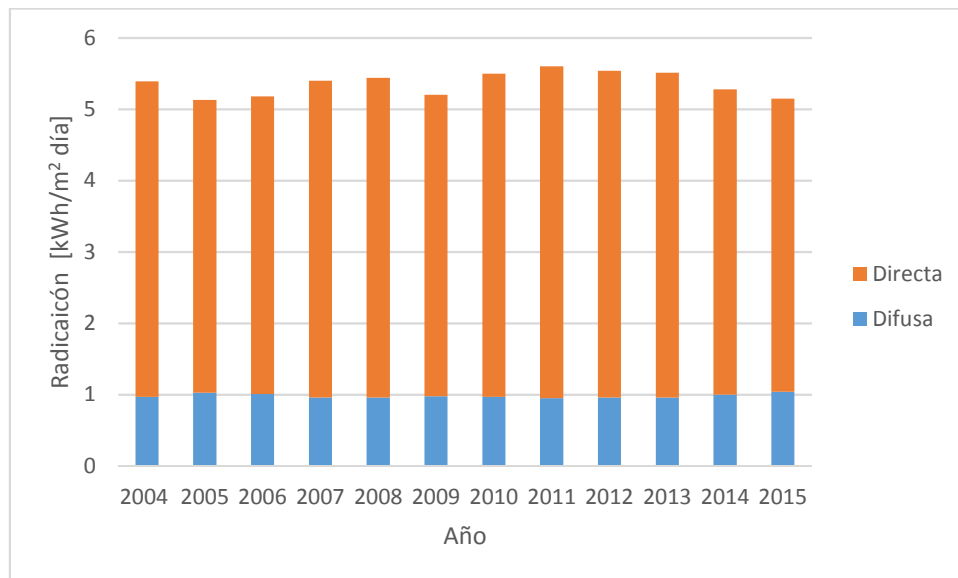


Gráfico 4.5: Variación de la radiación a través de los años [9].

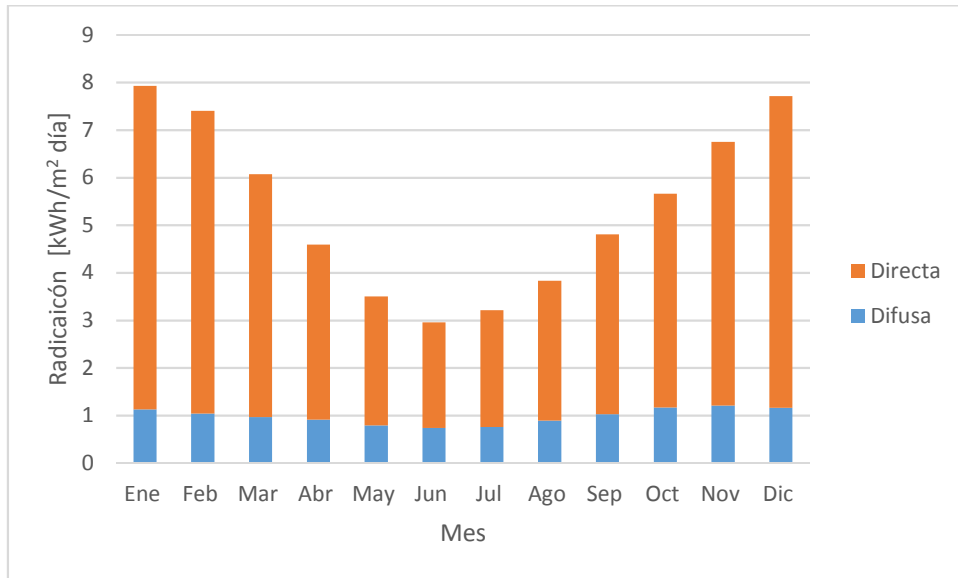


Gráfico 4.6: Variación de la radiación a través del año [9].

4.1.4.4 Chañaral

La locación propuesta para la localidad de Chañaral se muestra en la Figura 4.4. Para esa locación se evaluó el recurso solar respecto a su variación interanual como también a lo largo del año como es presentado en el Gráfico 4.7 y Gráfico 4.8 respectivamente.

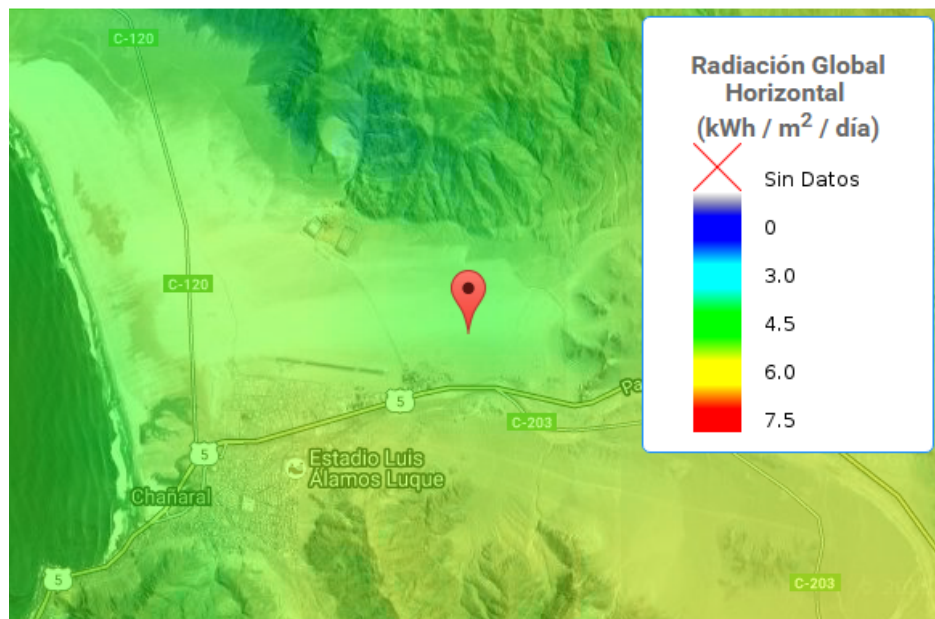


Figura 4.4: Radiación global horizontal en Chañaral [9].

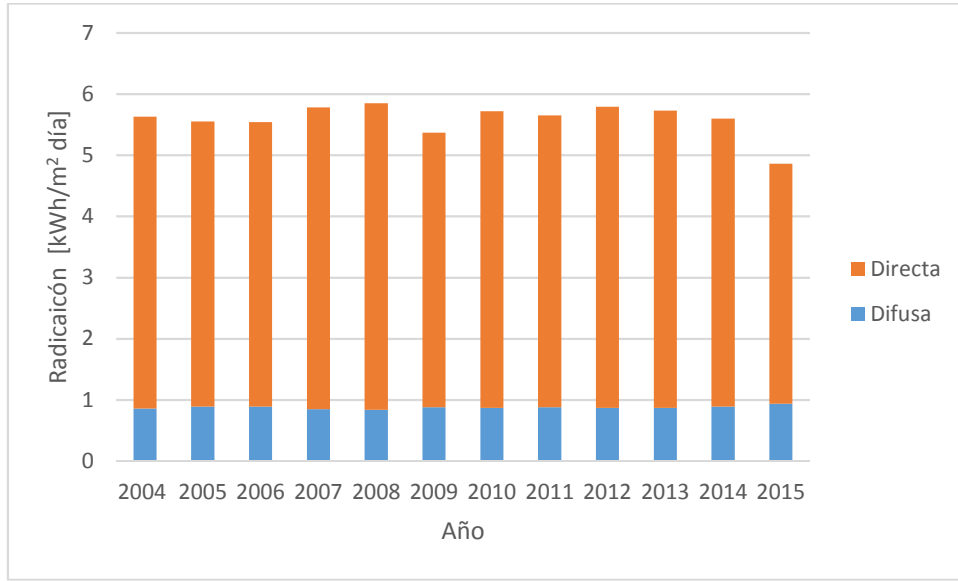


Gráfico 4.7: Variación de la radiación a través de los años [9].

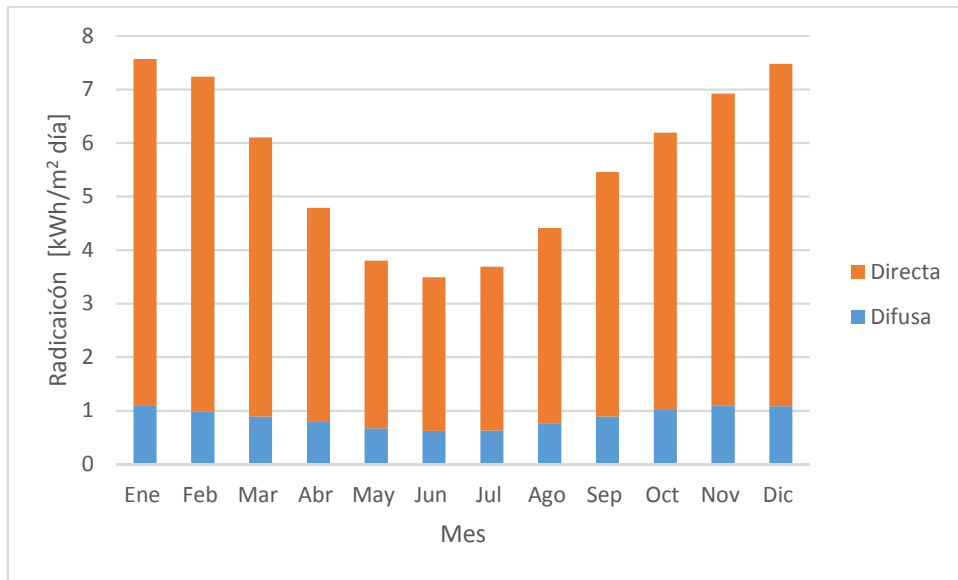


Gráfico 4.8: Variación de la radiación a través del año [9].

4.1.4.5 Caldera

La locación propuesta para la localidad de Caldera se muestra en la Figura 4.5. Para esa locación se evaluó el recurso solar respecto a su variación interanual como también a lo largo del año como es presentado en el Gráfico 4.9 y Gráfico 4.10 respectivamente.

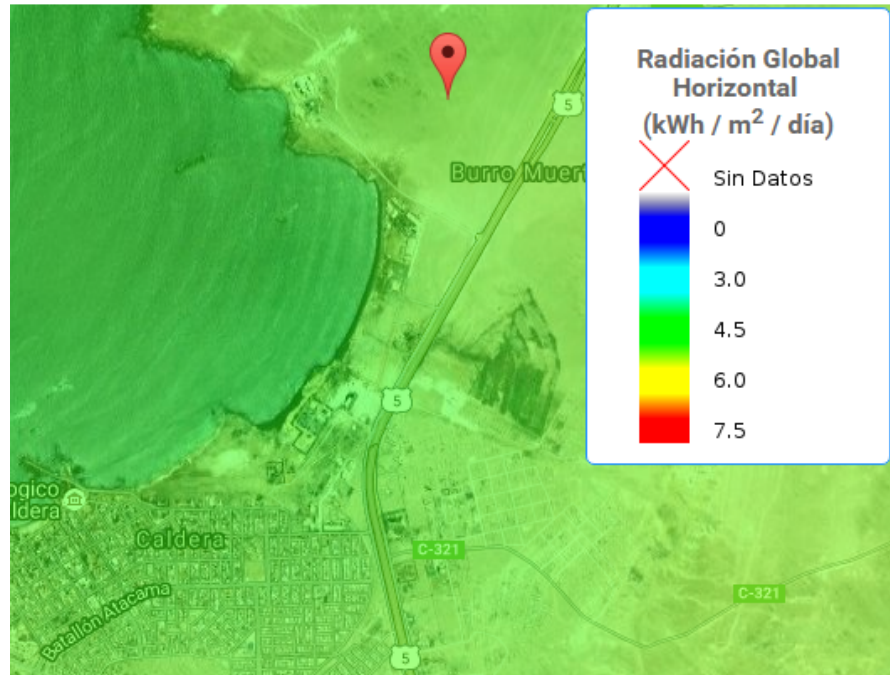


Figura 4.5: Radiación global horizontal en Caldera [9].

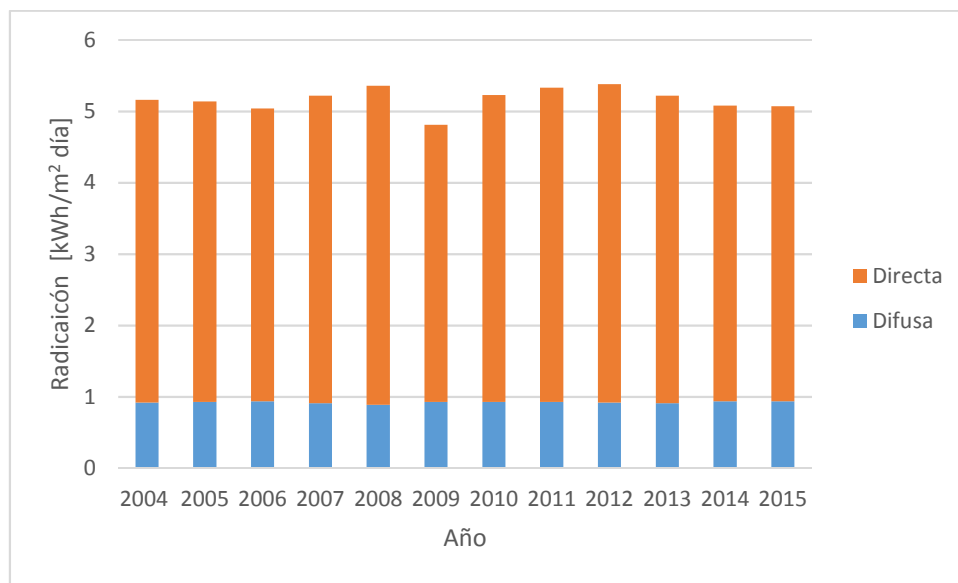


Gráfico 4.9: Variación de la radiación a través de los años [9]

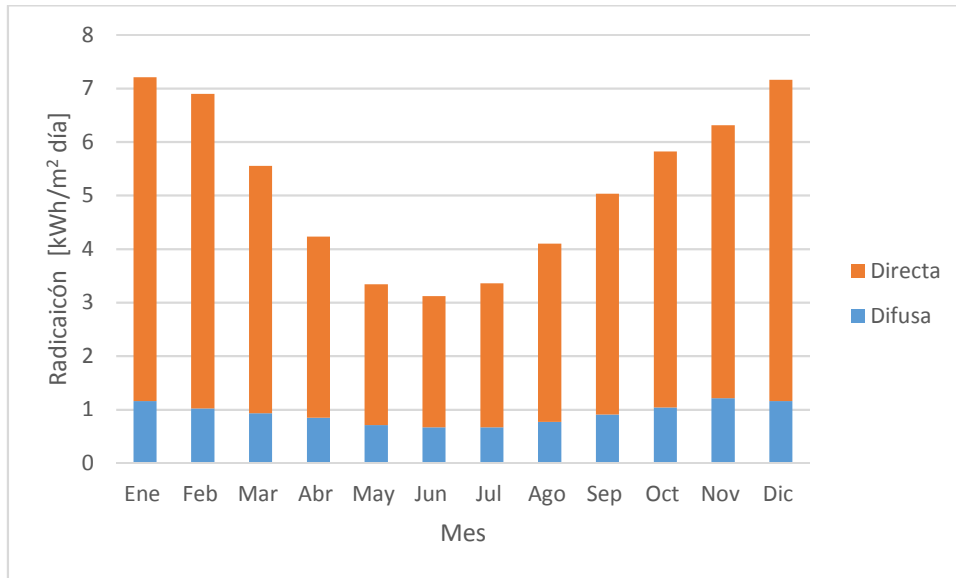


Gráfico 4.10: Variación de la radiación a través del año [9].

4.1.4.6 Energía solar media mensual

A modo de resumen se muestra en el Gráfico 4.11 la energía asociada a la radiación solar global correspondiente a cada mes del año para cada una de las localidades estudiadas (ver sección 4.1). La energía mensual asociada a la radiación solar global en cada localidad, indicada en el eje de las ordenadas del gráfico antes mencionado se determina al multiplicar la radiación solar global por metro cuadrado por día ($\text{kWh}/\text{m}^2/\text{día}$) por la cantidad de tiempo que hay en un mes. Para los cálculos de determinar la energía solar disponible se realizan los siguientes supuestos:

- Se asume un rendimiento o eficiencia del panel fotovoltaico igual a 1 en la ecuación, por realizarse solo un análisis preliminar.
- El área del panel fotovoltaico es igual a $1 \text{ [m}^2\text{]}$.
- No se consideran pérdidas asociadas al rendimiento del panel fotovoltaico debidas a variaciones de temperatura en las celdas fotovoltaicas del panel.

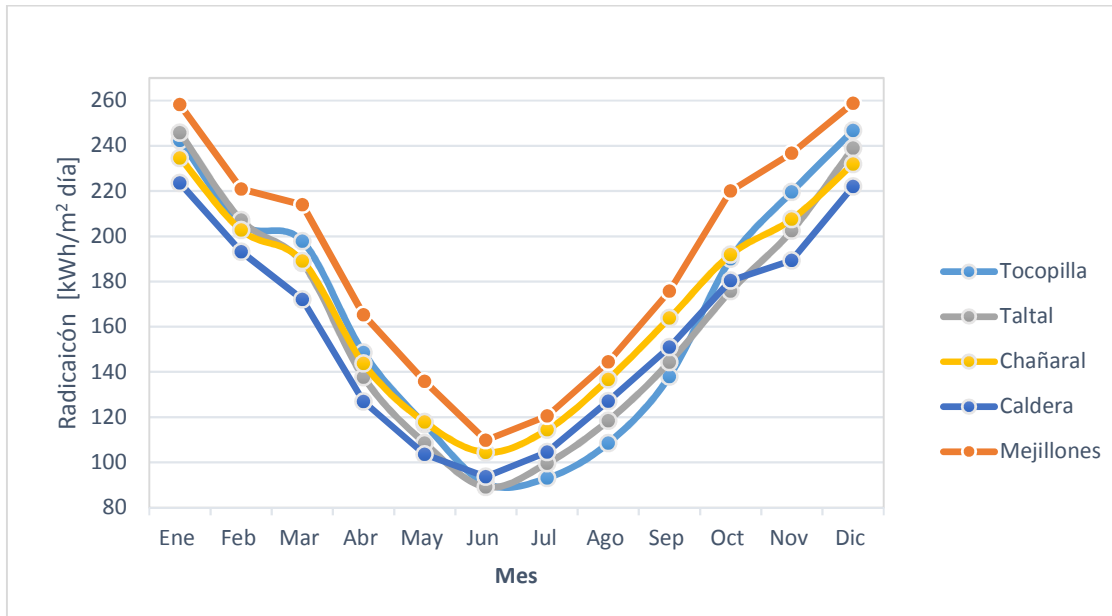


Gráfico 4.11: Radiación solar global anual para cada localidad [9].

4.1.5 Recurso eólico

4.1.5.1 Tocopilla

Para la locación de Tocopilla se evaluó el recurso eólico respecto a su variación interanual como se presenta en el Gráfico 4.12.

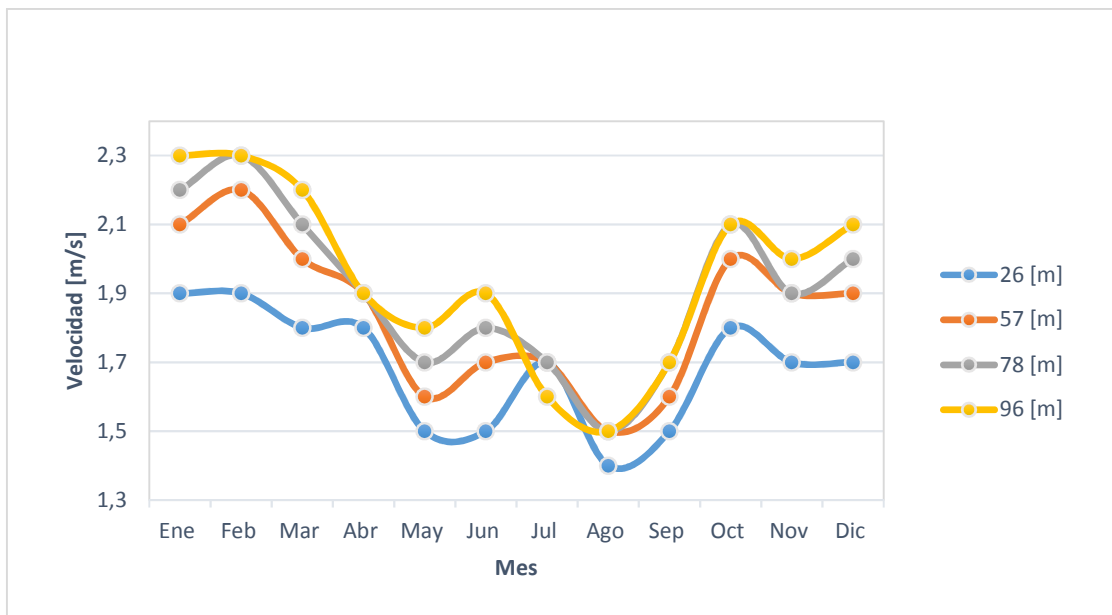


Gráfico 4.12: Velocidad media mensual para el ciclo anual en Tocopilla [8].

4.1.5.2 Mejillones

Para la locación de Mejillones se evaluó el recurso eólico respecto a su variación interanual como se presenta en el Gráfico 4.13.

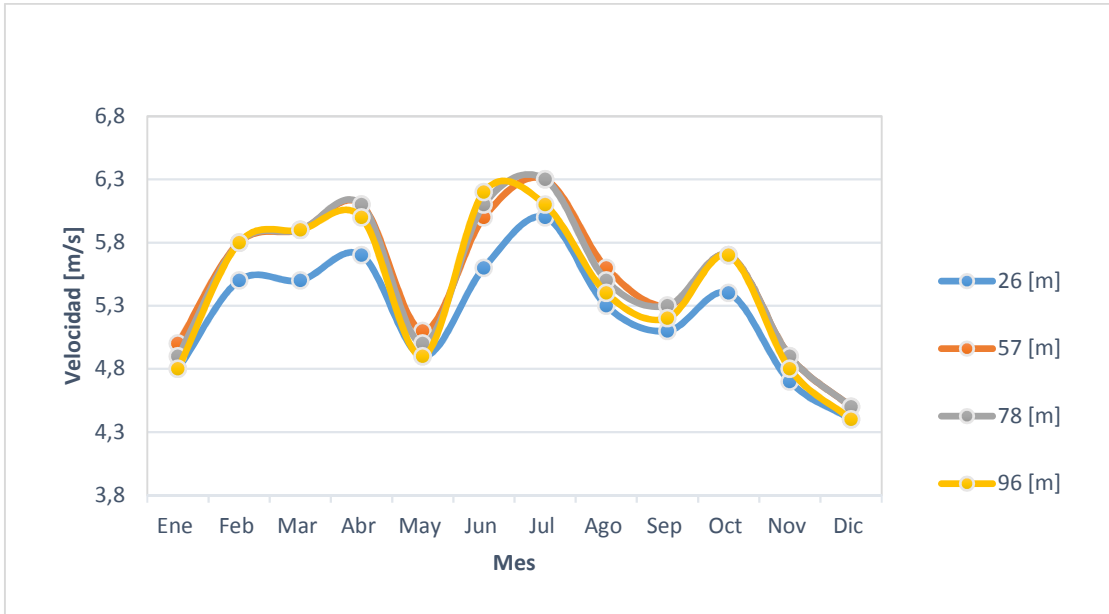


Gráfico 4.13: Velocidad media mensual para el ciclo anual en Mejillones [8].

4.1.5.3 Taltal

Para la locación de Taltal se evaluó el recurso eólico respecto a su variación interanual como se presenta en el Gráfico 4.14.

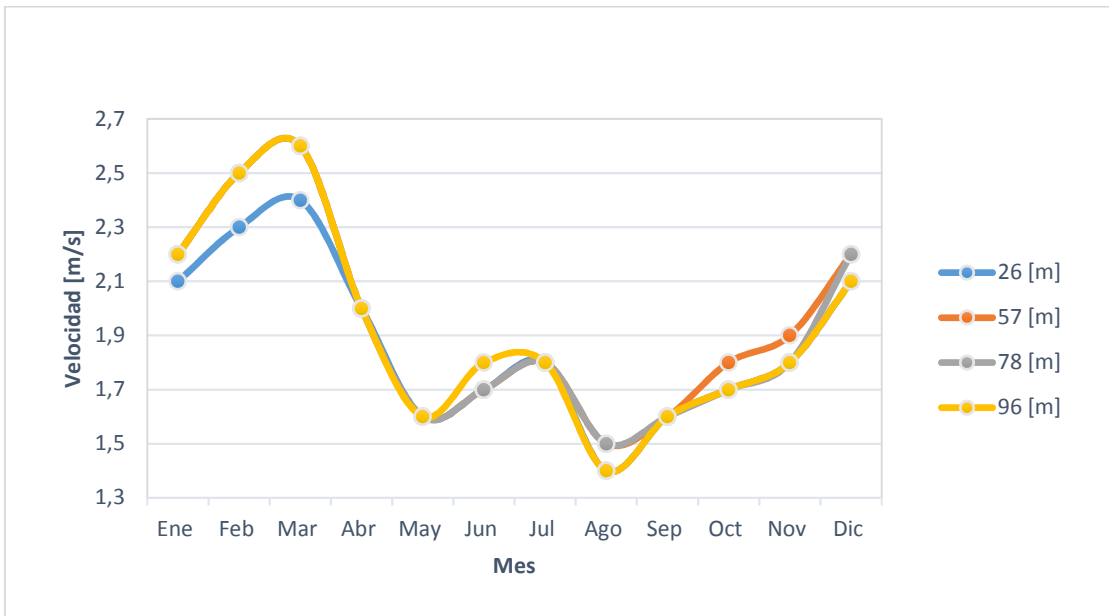


Gráfico 4.14: Velocidad media mensual para el ciclo anual en Taltal [8].

4.1.5.4 Chañaral

Para la locación de Chañaral se evaluó el recurso eólico respecto a su variación interanual como se presenta en el Gráfico 4.15.

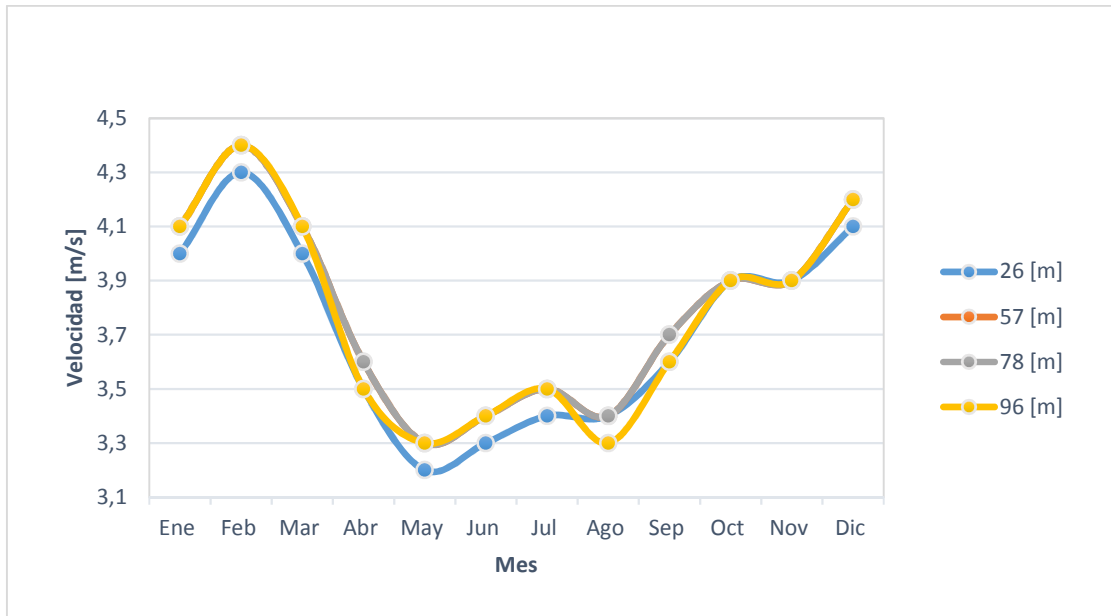


Gráfico 4.15: Velocidad media mensual para el ciclo anual en Chañaral [8].

4.1.5.5 Caldera

Para la locación de Tocopilla se evaluó el recurso eólico respecto a su variación interanual como se presenta en el Gráfico 4.16.

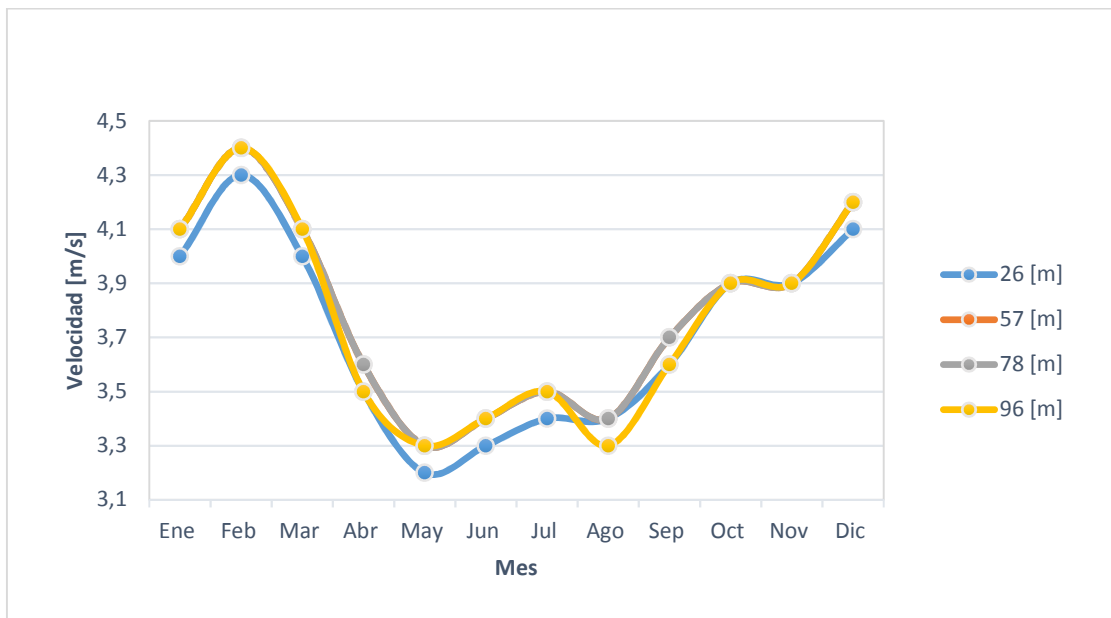


Gráfico 4.16 Velocidad media mensual para el ciclo anual en Caldera [8].

4.1.5.6 Energía eólica media mensual disponible

A modo de resumen se muestra en el Gráfico 4.17, Gráfico 4.18, Gráfico 4.19 y Gráfico 4.20 la energía asociada al potencial eólico correspondiente a cada mes del año para diferentes alturas. La energía mensual asociada al potencial eólico en cada localidad, indicada en el eje de las ordenadas de los gráficos antes mencionados se determina de multiplicar el potencial eólico por la cantidad de tiempo que hay en un mes. Para los cálculos del potencial eólico (en unidades de potencia) se tienen los siguientes supuestos:

- Se asume un rendimiento o eficiencia del modelo de hélice igual a 1 en la ecuación (3.7) por realizarse solo un análisis preliminar.
- El área transversal barrida por las hélices indicada en la ecuación (3.7) es igual a 1 [m²].
- La densidad depende de cada localidad y se obtiene del informe entregado de la simulación del Mapa Eólico del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile para consultas web.

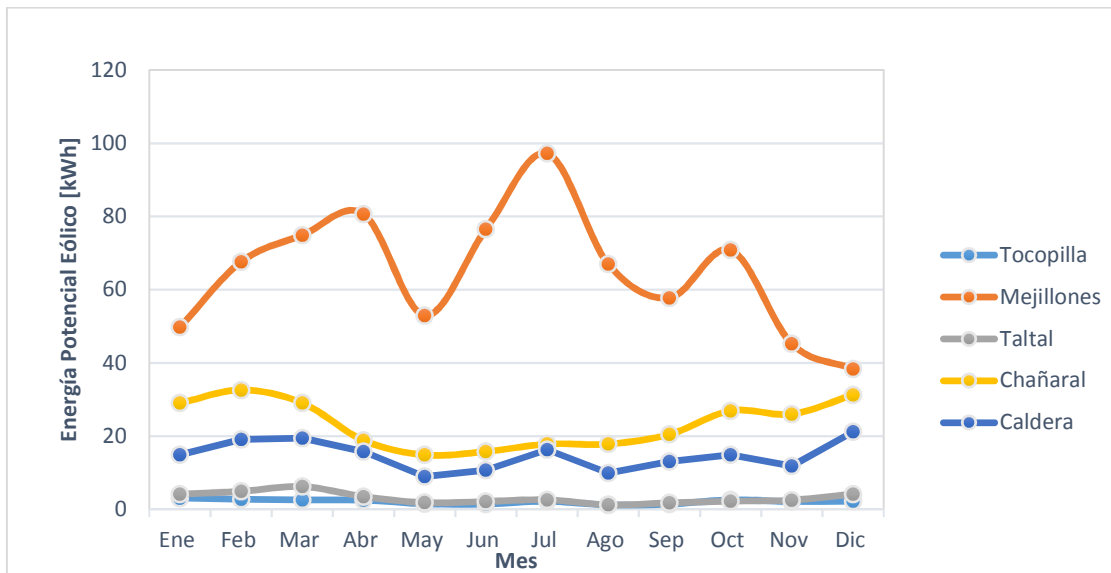


Gráfico 4.17: Energía eólica media mensual disponible para todas las localidades a 26 [m] [8].

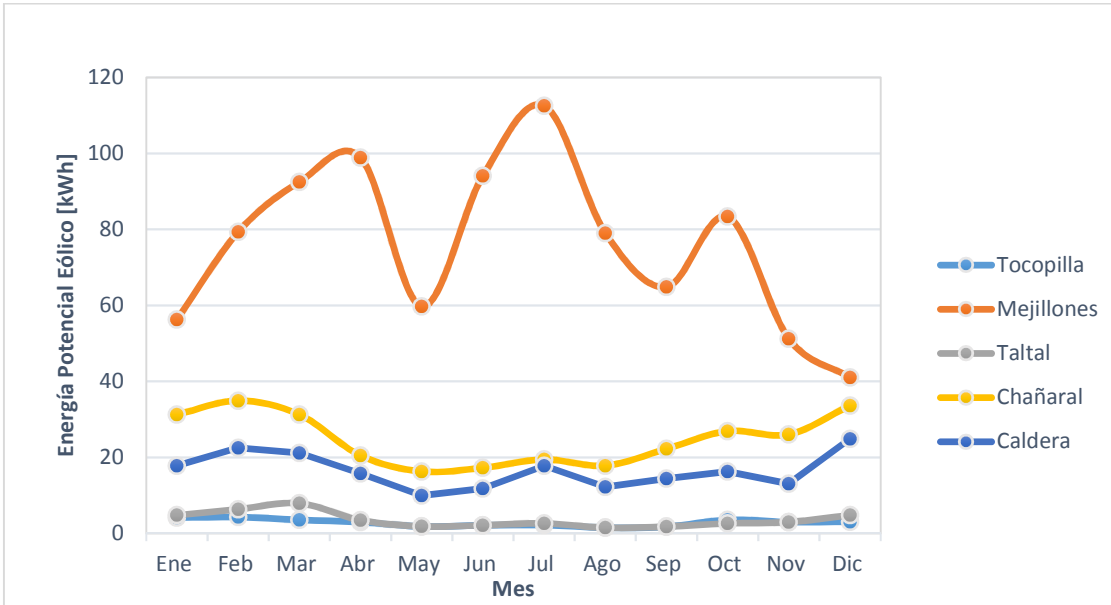


Gráfico 4.18: Energía eólica media mensual disponible para todas las localidades a 57 [m] [8].

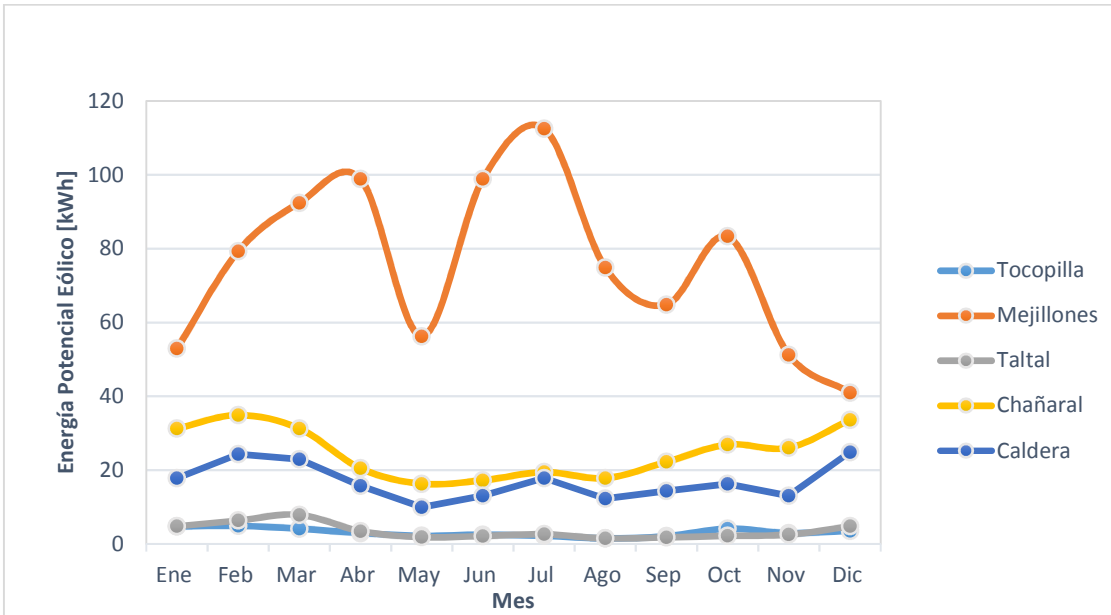


Gráfico 4.19: Energía eólica media mensual disponible para todas las localidades a 78 [m] [8].

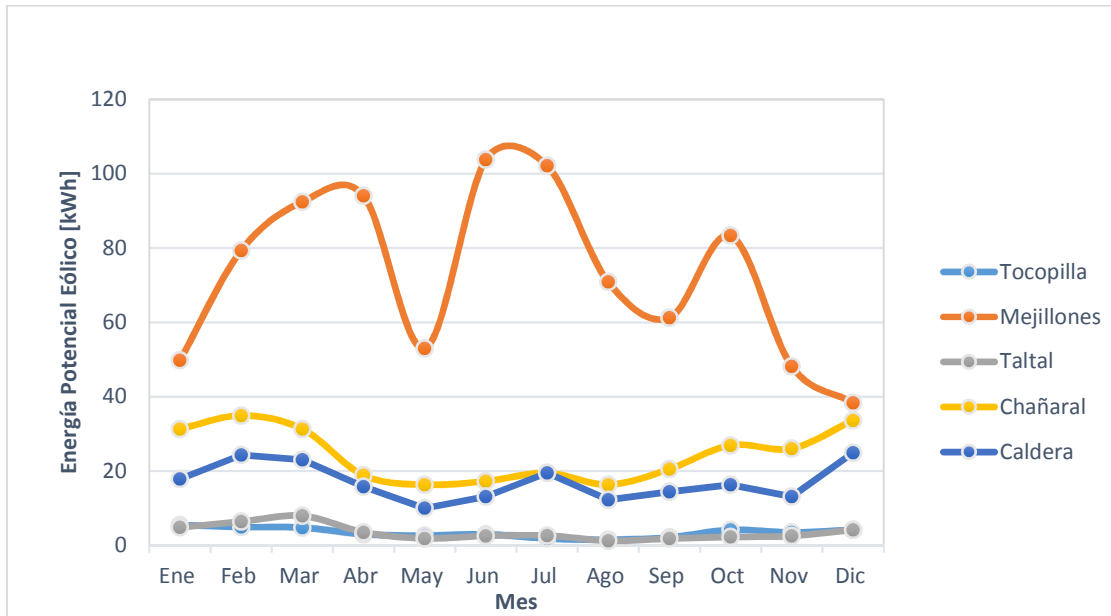


Gráfico 4.20: Energía eólica media mensual disponible para todas las localidades a 96 [m] [8].

4.1.6 Abastecimiento de agua a zonas de estudio

A partir de la sección 4.1.3 *Estimación de la población al año 2036* se estima la demanda de agua para las cinco ciudades estudiadas. Esta demanda se estima en base a la cantidad media óptima de agua recomendada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 100 lt/h/día¹⁵ para consumo doméstico humano (beber, cocinar, higiene personal y limpieza del hogar) [20].

Tabla 4.3: Estimación de demanda de agua al año 2036 (EP)

Lugar	Región	Categoría	Extrapolación 2012 al 2036	Demanda Diaria [m ³ /día]	Demanda mensual [m ³ /mes]
Tocopilla	II	Ciudad	36.718	3.672	11.3825
Mejillones	II	Ciudad	14.271	1.427	44.240
Taltal	II	Ciudad	19.745	1.975	61.211
Chañaral	III	Ciudad	20.701	2.070	64.173
Caldera	III	Ciudad	23.634	2.363	73.264

Fuente: Elaboración propia

¹⁵ 100 lt/h/día: litro por cada habitante al día.

4.2 Esquema general de planta de osmosis inversa

En la Figura 4.6 se muestra un esquema general de la planta de desalinización en estudio. En ella se aprecia que el proceso de desalinización de osmosis inversa es alimentado eléctricamente por tres fuentes:

- Energía solar, a través, de un arreglo fotovoltaico
- Turbina eólica o aerogenerador
- Red eléctrica

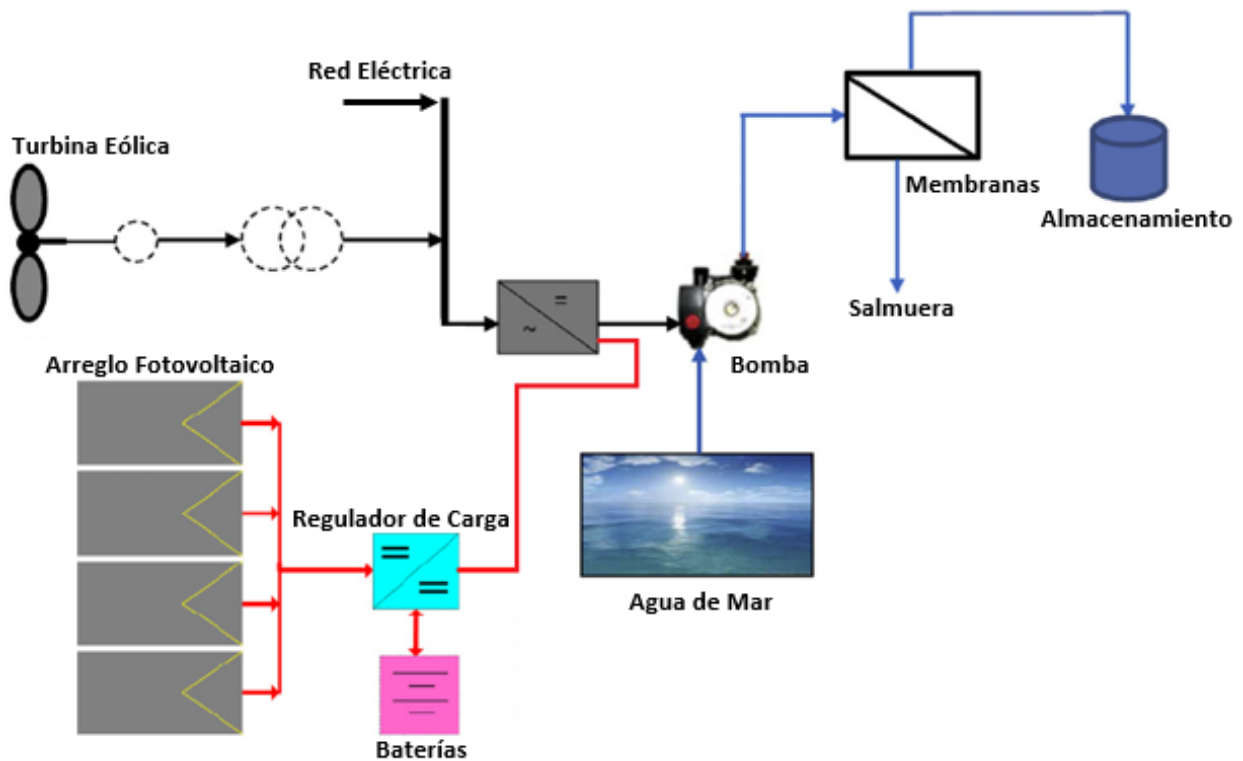


Figura 4.6: Esquema general de planta de osmosis inversa con apoyo de energía eólica y solar fotovoltaica (EP).

Por medio de la Figura 4.7 se puede apreciar en detalle los componentes y el diagrama de procesos dentro de la planta de desalinización por osmosis inversa. Contará con un estanque de alimentación y de acumulación que permitirán una autonomía de un día.

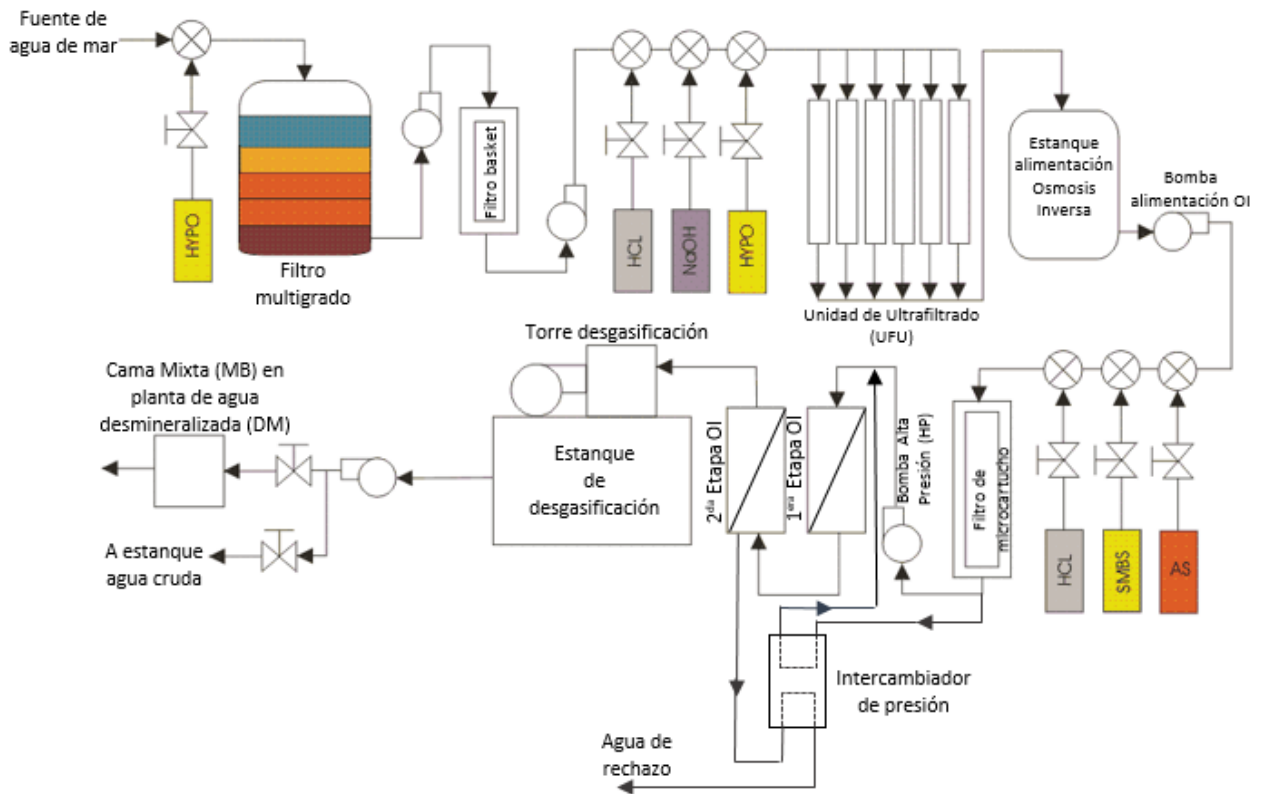


Figura 4.7: Esquema en detalle de la planta de osmosis inversa (EP).

4.3 Creación del modelo

El modelo se separa en dos partes, estrategia de producción/abastecimiento de energía que consiste en tres fuentes: eólica, solar fotovoltaica y la red (en casos en los cuales las energías renovables no sean suficientes para sostener el proceso) y proceso de desalinización de osmosis inversa.

4.3.1 Supuestos del modelo

De forma de simplificar cálculos se toman las siguientes consideraciones y supuestos:

- Los datos obtenidos de radiación solar, viento y potencia generada por distintos aerogeneradores desde el explorador solar [9] y explorador eólico [8] pertenecientes al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile son tratados como si todos los días de un mes son iguales y tienen una resolución de una hora.
- El modelo de producción de energía fotovoltaica y eólica para el proceso de desalinización de osmosis inversa considera el rendimiento de inversores de 96%, factor de planta de 20,3% para el sistema fotovoltaico, factor de pérdidas de 14% y una eficiencia del panel fotovoltaico de 17%.
- La planta de osmosis inversa se considera con un funcionamiento las 24 horas del día durante todo el año, produciendo agua a tasa constante y trabajando con una potencia eléctrica constante, con un sistema de estanques de reserva de agua potable como un sistema de respaldo en casos de detenciones de emergencia de la planta.
- Se utilizan los rendimientos de fabricantes de las bombas y membranas de osmosis inversa para dimensionar la planta según los caudales necesarios para satisfacer la demanda.
- No se considera almacenamiento de la energía producida por los sistemas de energías renovables eólica y solar fotovoltaica.
- Se considera que la planta de desalinización de OI es alimentada por un sistema híbrido fotovoltaico-eólico conectado a la vez a la red eléctrica del sistema interconectado del norte grande (SING).

4.3.2 Balances de energía y masa

Para desarrollar el modelo, la planta se ha dividido en dos sistemas:

- Energético
- Osmosis inversa

Por otro lado, el sistema Energético se ha dividido en tres subsistemas más:

- Solar fotovoltaico
- Eólico
- Red eléctrica.

En cambio, el sistema de osmosis inversa se subdivide en:

- Pretratamiento
- Desalinización
- Post-tratamiento

4.3.2.1 Sistema Energético

Para dimensionar este sistema se debe tener en cuenta el consumo energético esperado por la planta de OI. Considerando la recomendación que los sistemas de OI intermitentes presentan diversos problemas en las membranas de OI [21], se asume la simplificación de trabajar bajo potencia eléctrica constante las 24 horas del día y los 365 días del año. Además, considerando que la planta a diseñar está conectada a la red eléctrica actual (On Grid) se puede establecer la siguiente relación mediante la ecuación (4.2):

$$P_{OI} = P_{pv} + P_{eo} + P_{grid} \quad (4.2)$$

Donde:

P_{OI} : potencia constante necesaria para realizar el proceso de OI [kW]

P_{pv} : potencia generada por el subsistema fotovoltaico [kW]

P_{eo} : potencia generada por el subsistema eólico [kW]

P_{grid} : potencia proporcionada por la red eléctrica [kW]

Cabe destacar que la red eléctrica proporciona la potencia diferencial que los subsistemas energéticos por su característica variabilidad en el tiempo no puedan suplir.

4.3.2.2 Sistema osmosis inversa

En este caso se considera principalmente la demanda energética de la planta de osmosis inversa debido al funcionamiento de las bombas hidráulicas necesarias para llevar a cabo el proceso de desalinización. Las potencias de cada bomba se pueden estimar por medio de la ecuación (4.3) [22]:

$$P_{bomba} = \frac{10,2 \cdot 10000 \cdot \Delta P_{bomba} \cdot Q_{bomba}}{1000 \cdot \eta} \quad (4.3)$$

Donde:

P_{bomba} : potencia de la bomba hidráulica [kW]

ΔP_{bomba} : presión elevada por la bomba [bar]

Q_{bomba} : caudal de agua a través de la bomba hidráulica [m³/s]

η : rendimiento de la bomba hidráulica

Para determinar el consumo energético de la planta de OI se consideran todos los consumos eléctricos.

Se asume trabajar bajo potencia eléctrica constante P_{OI} , la cual está determinada por el consumo total eléctrico, que por simplificación es la potencia consumida por las bombas hidráulicas como muestra la ecuación (4.4):

$$P_{OI} = \sum_i^n P_{bomba_i} \quad (4.4)$$

Donde:

P_{OI} : potencia constante necesaria para realizar el proceso de OI [kW]

P_{bomba_i} : potencia eléctrica consumida por la bomba hidráulica i [kW]

n : número total de bombas en el sistema de OI

Para el sistema de OI se considera los balances de masa, que son principalmente flujos de agua de alimentación y salida de los distintos equipos. Debido a que algunos equipos retiran volúmenes de agua del sistema (agua de rechazo) se considera la tasa o eficiencia de permeado para cumplir la demanda estimada para Mejillones (ver Tabla 4.3).

Para el caso de las membranas de osmosis inversa se define en la ecuación (4.5) [22] correspondiente a (4.5) la tasa de rechazo o permeado que se ilustra en la Figura 4.8.

$$R_{permeado} = \frac{\dot{m}_{a_perm}}{\dot{m}_{aa_mem}} \times 100 \quad (4.5)$$

Donde:

$R_{permeado}$: Porcentaje de agua permeada por las membranas de OI

\dot{m}_{a_perm} : Flujo de agua producto, permeado o desalinizado por las membranas de OI [m^3/h]

\dot{m}_{aa_mem} : Flujo de agua de alimentación que entra a las membranas de OI [m^3/h]

Un índice muy importante en las plantas de osmosis inversa es el consumo específico de agua producto que permite dimensionar la eficiencia energética del proceso de desalinización.

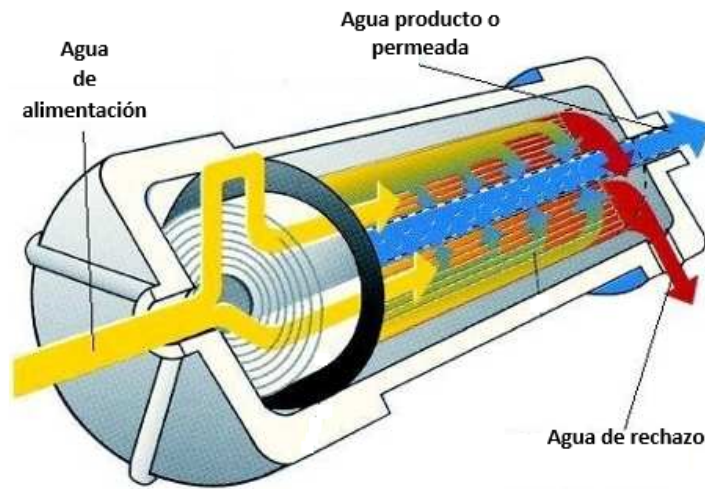


Figura 4.8: Flujos a través de una membrana de OI (EP).

Además, por el principio de conservación de la masa se puede establecer que los flujos que interactúan en el proceso se representan por la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

$$\dot{m}_{aa} = \dot{m}_{ar} + \dot{m}_{a_perm} \quad (4.6)$$

Donde:

\dot{m}_{aa} : flujo de agua que alimenta el sistema de OI [m^3/h]

\dot{m}_{ar} : flujo de agua rechazada que sale del sistema de OI [m^3/h]

\dot{m}_{a_perm} : flujo de agua producto, permeado o desalinizado por las membranas de OI [m^3/h]

Por otro lado, se determina el consumo específico de agua producto como la energía necesaria para producir 1[m^3] de agua desalinizada como se muestra en la ecuación (4.8).

$$CE = \frac{P_{OI}}{\dot{m}_{a_perm}} \quad (4.7)$$

Donde:

CE : consumo específico de energía por metro cúbico de agua producto [kWh/m^3]

P_{OI} : potencia constante necesaria para realizar el proceso de OI [kW]

\dot{m}_{a_perm} : flujo de agua producto, permeado o desalinizado por las membranas de OI [m^3/h]

4.3.3 Parámetros de entrada

El modelo desarrollado en el software Excel validado en la sección 5.2 correspondiente a la evaluación del recurso solar y su generación eléctrica, es el utilizado para la evaluación de los distintos escenarios. La evaluación solar es necesaria, ya que, las demás partes del modelo como es el recurso eólico (potencia producida horaria para todos los meses del año) y la energía eléctrica de la red se obtienen de fuentes validadas como lo es el explorador eólico [8] y las tarifas de suministro eléctrico de la empresa ELECDA¹⁶ distribuidora de la comuna de Mejillones.

La definición de los parámetros correspondiente a la evaluación de la energía producida del recurso solar para todos los escenarios es la mostrada en la Figura 4.4, los cuales son utilizados para todos los escenarios de evaluación como se muestra en la ecuación (4.8).

$$P_{pv} = \frac{R_{GIP} \cdot \eta_{inversor} \cdot \eta_{panel} \cdot (1 - F_{pérdidas}) \cdot A_{TOTAL_paneles}}{1000} \quad (4.8)$$

Donde:

P_{pv} : Potencia generada por el subsistema fotovoltaico [kW]

R_{GIP} : Radiación global incidente en el panel [W/m^2]

$\eta_{inversor}$: Rendimiento del inversor eléctrico

η_{panel} : Rendimiento nominal del panel fotovoltaico

$F_{pérdidas}$: Factor de pérdidas debido a diversos factores

$A_{TOTAL_paneles}$: Área total de los paneles fotovoltaicos dispuestos en el arreglo [m^2]

Tabla 4.4: Parámetros utilizados para la evaluación energética solar fotovoltaico (EP)

Parámetros	Valor	Fuente
Rendimiento de inversor	96%	[9]
Eficiencia del panel solar	17%	[9]
Otras pérdidas	14%	[9]

En el caso de la parte del modelo referido a la generación eólica, se utiliza la ecuación (4.8), donde los parámetros utilizados se explicitan en la Tabla 4.5.

$$P_{eo} = N_{aero} \cdot P_{aero} \cdot \eta_{EP} \quad (4.9)$$

¹⁶ Fuente: <http://www.elecda.cl/wp-content/uploads/descargables/tarifas-hogar/elecda/tarifas-de-suministros/Tarifas-de-Suninistro-Elecda-2016-02-01.pdf>

Donde:

P_{eo} : Potencia generada por el subsistema eólico [kW]

N_{aero} : Número de aerogeneradores en el arreglo eólico

P_{aero} : Potencia generada por el aerogenerador [kW]

η_{EP} : Rendimiento de los equipos de potencia

Tabla 4.5: Parámetros utilizados para la evaluación energética eólica (EP)

Parámetros	Valor	Fuente
Rendimiento de inversor	96%	[9]

Para el sistema de OI se considera principalmente la variable asociada a la salinidad del agua que es la que principalmente se evalúa para determinar la calidad del agua, esta variable son los Sólidos Totales Disueltos (TDS). A pesar de que el agua con menos de 1000 TDS es catalogada como potable¹⁷, es recomendado obtener valores menores a 500 PPM. Para obtener una calidad de agua adecuada para el consumo se debe diseñar la planta de osmosis inversa que permita cumplir con los parámetros de funcionamiento que se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Parámetros generales de funcionamiento de la planta de OI (EP)

Parámetros	Valor	Unidad	Fuente
TDS entrada	35000	PPM	17
TDS agua potable	< 1000	PPM	17
Presión osmótica (35000 TDS)	25	bar	17

4.4 Dimensión y selección de equipos

4.4.1 Sistema energético

El dimensionamiento de este sistema se basa en el criterio de minimizar el porte energético proveniente de la red eléctrica, por lo cual se analizan distintos escenarios en los cuales el modelo de aerogenerador y la cantidad de paneles fotovoltaicos son variables dependientes del consumo específico de la planta de OI.

El criterio de selección de los equipos y máquinas para este sistema se realiza de modo que la suma entre la potencia generada fotovoltaica y eólica (P_{pv} y P_{eo} respectivamente) no deben superar la potencia instantánea que requiere la planta de OI en ningún momento debido a que no se utilizarán equipos de almacenamiento de energía como baterías y tampoco se desea inyectar energía a la red a pesar de estar conectado a ésta (sistema on grid).

La potencia requerida por la desalinización P_{OI} será constante en todo momento debido a su producción constante, por lo tanto, la diferencia de potencia la aporta el distribuidor eléctrico. En la Tabla 4.7 se

¹⁷ Fuente: <http://www.lenntech.es/desalacion/desalacion.htm>

muestran los aportes de potencias de las distintas fuentes energéticas a utilizar para un caso particular correspondiente a lo largo de un día del mes de enero con la utilización de un aerogenerador modelo Aeronautica 29-225. La estrategia consiste en que la suma de la potencia proporcionada por la fuente fotovoltaica (P_{pv}), eólica (P_{eo}) y la red eléctrica (P_{grid}) sea igual a la potencia demandada por la OI (P_{OI}). De manera cualitativa se aprecia de manera gráfica en la Figura 4.9 los aportes a lo largo del día para el mismo escenario mostrado en la Tabla 4.7.

Tabla 4.7: Aportes de potencia horario de las distintas fuentes de energía para un día de enero para consumo específico de 2,77 [kWh/m³] de planta de OI (EP)

Hora	P_{OI} [kW]	P_{pv} [kW]	P_{eo} [kW]	P_{grid} [kW]
0:00	164,5	0,0	32,4	132,1
1:00	164,5	0,0	22,5	142,0
2:00	164,5	0,0	18,9	145,6
3:00	164,5	0,0	10,8	153,7
4:00	164,5	0,0	8,1	156,4
5:00	164,5	0,0	8,1	156,4
6:00	164,5	2,0	8,1	154,4
7:00	164,5	14,2	8,1	142,2
8:00	164,5	37,8	2,7	124,0
9:00	164,5	64,2	0,9	99,4
10:00	164,5	86,4	0,0	78,1
11:00	164,5	101,4	9,0	54,1
12:00	164,5	108,2	19,8	36,5
13:00	164,5	106,5	34,2	23,8
14:00	164,5	97,1	36,0	31,4
15:00	164,5	80,9	34,2	49,4
16:00	164,5	58,5	45,9	60,1
17:00	164,5	32,7	47,7	84,1
18:00	164,5	10,4	49,5	104,6
19:00	164,5	0,9	53,1	110,5
20:00	164,5	0,0	43,2	121,3
21:00	164,5	0,0	44,1	120,4
22:00	164,5	0,0	42,3	122,2
23:00	164,5	0,0	41,4	123,1

Fuente: Elaboración propia

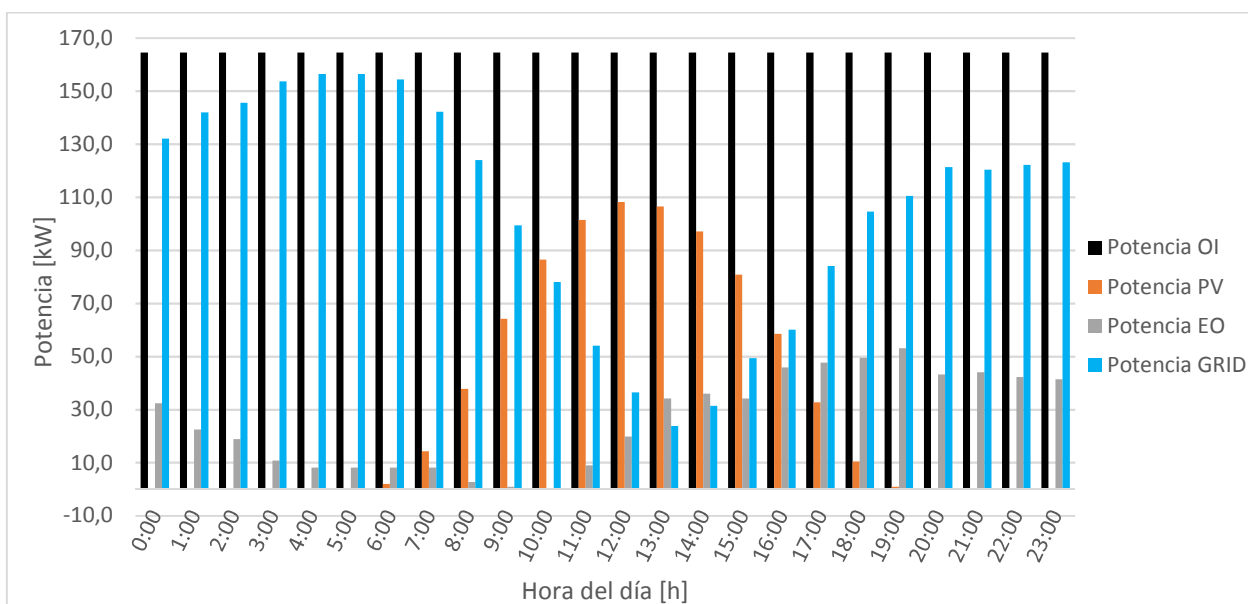


Figura 4.9: Aportes de potencia de las distintas fuentes de energía para un día de enero para consumo específico de 2,77 [kWh/m³] de planta de OI (EP)

La selección de equipos del sistema energético se basa principalmente en los módulos fotovoltaicos y aerogeneradores que permitan satisfacer las demandas energéticas de la planta de OI. Como primera aproximación se establece la selección de los paneles solares debido a que los aerogeneradores se especificarán en la sección 5 Resultados debido a que su selección son función de la factibilidad económica del proyecto.

4.4.1.1 Paneles fotovoltaicos

Para el sistema energético se realizó un catastro de los proveedores de mayor confiabilidad y alta eficiencia en el mercado. Para ello se seleccionaron los paneles fotovoltaicos SolarWorld los cuales se especifican en la Tabla 4.8 los parámetros de operación bajo condiciones estándar correspondiente a una radiación global de 1.000 [W/m²], una temperatura de 25°C e inclinación de 37°.

Tabla 4.8: Especificaciones técnicas del panel fotovoltaico SolarWorld SW 285 (EP)

Fabricante	SolarWorld	
Modelo	SW 285	
Especificaciones Técnicas (STC)		Unidad
Máxima potencia W_p	285	[W]
Voltaje de Circuito Abierto V_{oc}	39,7	[V]
Voltaje de punto de máxima potencia V_{mpp}	31,3	[V]
Corriente de Cortocircuito I_{sc}	9,87	[A]
Corriente de punto de máxima potencia I_{mpp}	9,20	[A]
Eficiencia del módulo η_m	17%	
Costo	\$ 399	US\$/unidad

Fuente: WHOLESALE SOLAR¹⁸

¹⁸ Fuente: WHOLESALE SOLAR, <https://www.wholesalesolar.com/1922385/solarworld/solar-panels/solarworld-sw285-plus-silver-mono-solar-panel>

4.4.2 Sistema Osmosis Inversa

La planta de OI requiere cumplir con una serie de procesos que se describen en la sección 3.2 y están ampliamente establecidos en la industria que son:

- Pretratamiento
- Desalinización por OI
- Post-tratamiento

A continuación, se indican el listado de todos los equipos y máquinas utilizados en la planta propuesta de OI agrupados según su respectivo subsistema:

➤ **PRETRATAMIENTO**

- Bomba Filtro Multimedia
- Filtro Multimedia
- Bomba Filtro Basket
- Filtro Basket
- Bomba Unidad Ultrafiltración
- Unidad de Ultrafiltración
- Tanque Alimentación OI
- Bomba Alimentación OI
- Filtro Micro Cartucho

➤ **DESALINIZACIÓN OI**

- Bomba Booster
- Sistema Membranas OI
- Intercambiador de Presión (ALIMENTACIÓN)
- Intercambiador de Presión (RECHAZO)

➤ **POST-TRATAMIENTO**

- Bomba Circulación post OI (permeado)
- Tanques Almacenamiento Permeado
- Bomba a Post Tratamiento
- Sistema Post Tratamiento

Los filtros y unidades de ultrafiltración como su nombre lo indica permiten eliminar residuos que perjudiquen y dañen el proceso mismo realizado en las membranas de osmosis inversa. Cada filtro cumple una función particular de eliminación de residuos que radica en la naturaleza de estos como también en su tamaño de partícula. Es por ello que estos filtros se organizan de manera escalonada aumentando su grado de filtración a medida que se avanza en el proceso como muestra la Figura 4.7.

En el caso de la dosificación de los distintos químicos tienen los siguientes propósitos como:

- HYPO (hipoclorito de sodio): dosificado antes del filtro multimedia, permite matar algas y bacterias con potencial de dañar este filtro.
- HCl (ácido clorhídrico): inyectado antes de la unidad de ultrafiltración permite remover el hierro disolviéndolo.

- NaOH (hidróxido de sodio): dosificado antes de la unidad de ultrafiltración (UFU) para la remoción de sales ácidas.
- HYPO (hipoclorito de sodio): administrado antes de la unidad de ultrafiltración (UFU) para la matar algas y bacterias dentro de la UFU.
- NaOCl (hipoclorito de sodio) y H₂SO₄ (ácido sulfúrico): utilizados para la limpieza de las membranas del sistema de ultrafiltración.
- CO₂ (dióxido de carbono): utilizado para la remineralización en el post-tratamiento lo que permite alcanzar el equilibrio calcocarbónico. Esto es, donde el pH, el calcio disuelto y alcalinidad no varían en forma apreciable en contacto con la atmósfera [23].

La planta de OI diseñada es función de la demanda de agua requerida por la población de la comuna de Mejillones indicada en el ANEXO C. Bajo esta restricción se seleccionan equipos y maquinas listados en la sección 4.4.2 que cumplan los parámetros de operación de flujos de agua condicionados por la tasa de permeado que permite determinar el flujo de agua permeado (indicado en la ecuación (4.5)) al final del proceso de OI como agua producto dispuesta a ser potabilizada en el proceso de post-tratamiento y que debe suplir la demanda de agua.

Para la selección de equipos se determinan los flujos de operación a lo largo del proceso mostrados en la Tabla 4.9

Tabla 4.9: Parámetros de operación de los equipos del sistema de OI (EP)

N° Ítem	Ítem	Caudal [m3/h]		Caudal [m3/día]	
		Entrada	Salida	Entrada	Salida
1	Bomba Filtro Multimedia	200,0	200,0	4800,0	4800,0
2	Filtro Multimedia	200,0	200,0	4800,0	4800,0
3	Bomba Filtro Basket	200,0	200,0	4800,0	4800,0
4	Filtro Basket	200,0	200,0	4800,0	4800,0
5	Bomba Unidad Ultrafiltración	202,5	202,5	4859,0	4859,0
6	Unidad de Ultrafiltración	202,5	200,0	4859,0	4800,0
7	Tanque Alimentación OI	200,0	200,0	4800,0	4800,0
8	Bomba Alimentación OI	200,0	200,0	4800,0	4800,0
9	Filtro Micro Cartucho	200,0	200,0	4800,0	4800,0
10	Bomba OI HP	61,0	61,0	1464,0	1464,0
11	Bomba Booster	139,1	139,1	3338,4	3338,4
12	Sistema Membranas OI	200,0	60,0	4800,0	1440,0
13	Intercambiador de Presión (ALIMENTACIÓN)	139,1	139,1	3338,4	3338,4
14	Intercambiador de Presión (RECHAZO)	140,0	140,0	3360,0	3360,0
15	Bomba Circulación post OI (PERMEADO)	60,0	60,0	1440,0	1440,0
16	Tanques Almacenamiento Permeado	60,0	60,0	1440,0	1440,0
17	Bomba a Post Tratamiento	60,0	60,0	1440,0	1440,0
18	Sistema Post Tratamiento	60,0	60,0	1440,0	1440,0

Fuente: Elaboración propia

4.4.2.1 Bomba Filtro Multimedia

Bomba encargada de alimentar la planta de OI con agua de mar proveniente de la toma intake desde la costa para estos propósitos.

Tabla 4.10: Parámetros de operación de la bomba del filtro multimedia (EP)

Bomba Filtro Multimedia		Unidad
Flujo entrada	200,0	[m ³ /h]
Presión bomba ΔP	3,6	[bar]
Costo	\$ 13.736	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.2 Filtro Multimedia

Filtro que se muestra en la Figura 4.10 que permite clarificar agua a través de sus medios filtrantes (arena, carbón activo, antracita, etc) removiendo sedimentos, turbidez, hierro, partículas indeseadas; además, reducir olores, color y gustos indeseados; todos los cuales se encuentran comúnmente en la superficie del agua. Sus parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.11.



Figura 4.10: Filtro Multimedia AquaPure (EP)

Tabla 4.11: Parámetros de operación del filtro multimedia (EP)

Proveedor	AquePure		
Modelo	MLF78-A	Unidades	
N° de unidades	2		
	Mínimo	Máximo	
Flujo Entrada	75,4	150,8	[m ³ /h]
Presión de alimentación	2	6,8	[bar]
Tamaño de partículas eliminados	25	50	[μm]
Precio	\$ 32.401		US\$/unidad

Fuente: PureAqua

4.4.2.3 Bomba Filtro Basket

Bomba encargada de alimentar el filtro basket con la presión requerida por el filtro antes mencionado, además de incorporar la caída de presión que sufre al interior del filtro de malla indicada en el ANEXO D. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12: Parámetros de operación de la bomba del filtro basket (EP)

Bomba Filtro Basket		Unidad
Flujo entrada	200,0	[m ³ /h]
Presión bomba ΔP	0,4	[bar]
Costo	\$ 9.228	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.4 Filtro basket

Filtro de malla de acero inoxidable con auto lavado que permite su limpieza incluso en funcionamiento. En la Tabla 4.13 se especifican los parámetros de funcionamiento y en la Figura 4.11 se observa éste tipo de filtro de malla.



Figura 4.11: Filtro de malla STF 2004 (EP)

Tabla 4.13: Parámetros de operación del filtro basket (EP)

Fabricante	STF Filtros		
Modelo	FMA-2004		Unidades
N° de unidades	2		
	Mínimo	Máximo	
Flujo Entrada	90	110	[m ³ /h]
Presión de alimentación	2	10	[bar]
Tamaño de partículas eliminados	34	50	[μm]
Precio	\$ 13.341		US\$/unidad

Fuente: STF FILTROS

4.4.2.5 Bomba Unidad Ultrafiltración

Bomba encargada de alimentar la UFU con la presión adecuada considerando las pérdidas de carga provocadas a través del de la Unidad de Ultra Filtración informada por el proveedor. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14: Parámetros de operación de la bomba de la Unidad de Ultra Filtración (EP)

Bomba UFU		Unidad
Flujo entrada	202,5	[m ³ /h]
Presión bomba ΔP	0,5	[bar]
Costo	\$ 9.228	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.6 Unidad de Ultrafiltración

Unidad que permite eliminar sólidos suspendidos de tamaños menores a los 250[μm] que consiste en una serie de membranas diseñadas para ese grado de filtración. Este sistema incorpora un sistema de dosificación de químicos para su sistema de limpieza de membranas consistente NaOCl (hipoclorito de sodio) y H₂SO₄ (ácido sulfúrico).



Figura 4.12: Unidad de Ultra Filtración industrial de PureAqua¹⁹

Tabla 4.15: Parámetros de operación de la UFU (EP)

Proveedor	AquePure		
Modelo	UF-24		Unidades
Nº de unidades	1		
	Máximo	Mínimo	
Flujo Entrada	200	200	[m ³ /h]
Presión de alimentación	3,4	3,4	[bar]
Tamaño de partículas eliminados	0,03	250	[μm]
Precio	\$ 422.596		US\$/unidad

Fuente: PureAqua

¹⁹ Fuente: <http://www.pureaqua.com/industrial-ultrafiltration-uf-systems/>

4.4.2.7 Tanque Alimentación OI

Se seleccionan las dimensiones del tanque de alimentación que proporciona una reserva de agua al proceso mismo de la desalinización por osmosis inversa de acuerdo a la norma API 650, con el criterio de poder entregar un suministro ininterrumpido durante 24 horas. Considerando que el caudal de entrada desde el mar corresponde a 4.800 [m³/día], se debe considerar un tanque de capacidad aproximada al flujo diario de entrada. Dicho lo anterior, las dimensiones y características del tanque de almacenamiento seleccionado se muestran en la Tabla 4.16. Los detalles de selección se muestran en el ANEXO D.

Tabla 4.16: Parámetros de operación del tanque de almacenamiento de OI (EP)

Tanque Almacenamiento OI		Unidad
Diámetro	22,4	[m]
Altura	12,2	[m]
Capacidad	4769	[m ³ /h]
Costo	\$ 1.012.143	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.8 Bomba Alimentación OI

Equipo que bombea agua desde el tanque de alimentación de OI hacia los filtros de micro cartuchos, última etapa de filtración del proceso. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.17.

Tabla 4.17: Parámetros de operación de la bomba de alimentación OI (EP)

Bomba Alimentación OI		Unidad
Flujo entrada	200,0	[m ³ /h]
Presión bomba ΔP	2,4	[bar]
Costo	\$ 12.243	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.9 Filtro Micro Cartucho

Tipo de filtración que consiste en hacer circular un fluido por el interior de un recipiente (ver Figura 4.13) a presión a través de los cartuchos de polipropileno desde afuera hacia adentro dejando en la parte externa los contaminantes que se desean eliminar. El sistema de filtración de micro cartucho incluye un sistema de dosificación de químicos que se detalla en el ANEXO D. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.18.



Figura 4.13: Sistema de filtración de micro cartuchos. A la izquierda se observa el recipiente de acero inoxidable visto superiormente con los cartuchos instalados en su interior. A la derecha se tiene una visión frontal del recipiente (EP).

Tabla 4.18: Parámetros de operación del sistema de filtración de micro cartuchos (EP)

Proveedor	AquePure		
	Modelo	Cantidad	Unidades
Recipiente	252EFCF4-8FC150	1	
Cartuchos	PA-405	63	
	Máximo	Mínimo	
Flujo Entrada	200	200	[m ³ /h]
Presión de alimentación	3,45	3,45	[bar]
Tamaño de partículas eliminados	> 5	5	[μm]
Precio	\$ 24.232		US\$/unidad

Fuente: PureAqua

4.4.2.10 Bomba OI HP

Es el equipo crítico en el proceso de OI debido a que es el que debe entregar la energía suficiente al agua para alcanzar las altas presiones necesarias para vencer presiones superiores a la presión osmótica del agua de mar con el fin de permear agua. Debido a la alta presión que levantan estas bombas, tienen un alto consumo de energía eléctrica, por lo cual, seleccionar una que presente alto rendimiento para los parámetros de operación determinante para evaluar un proyecto de manera técnico-económico. En la Figura 4.14 se observa la bomba seleccionada debido al alto rendimiento al flujo especificado en la Tabla 4.19. Los parámetros de operación se muestran en la Tabla 4.19.



Figura 4.14: Bomba de Alta Presión (HP) para

Tabla 4.19: Parámetros de operación de la bomba de alta presión (EP)

Proveedor	Energy Recovery	
Modelo	2x3x5-C / 21	
N° de unidades	1	
Etapas	21	
		Unidad
Flujo de operación	61,0	[m ³ /h]
Presión bomba ΔP	38,0	[bar]
Eficiencia @61[m ³ /h]	74,11	
Costo	\$ 75.498	US\$/unidad

Fuente: Energy Recovery

4.4.2.11 Bomba Booster

Bomba encargada de levantar la diferencia de presión entre los puntos C y D de la Figura 4.15. A pesar que el intercambiador de presión permite transferir cerca de un 95% la energía del agua de rechazo, flujo desde G a H de la misma figura; se debe levantar hasta la misma presión que en el punto C.

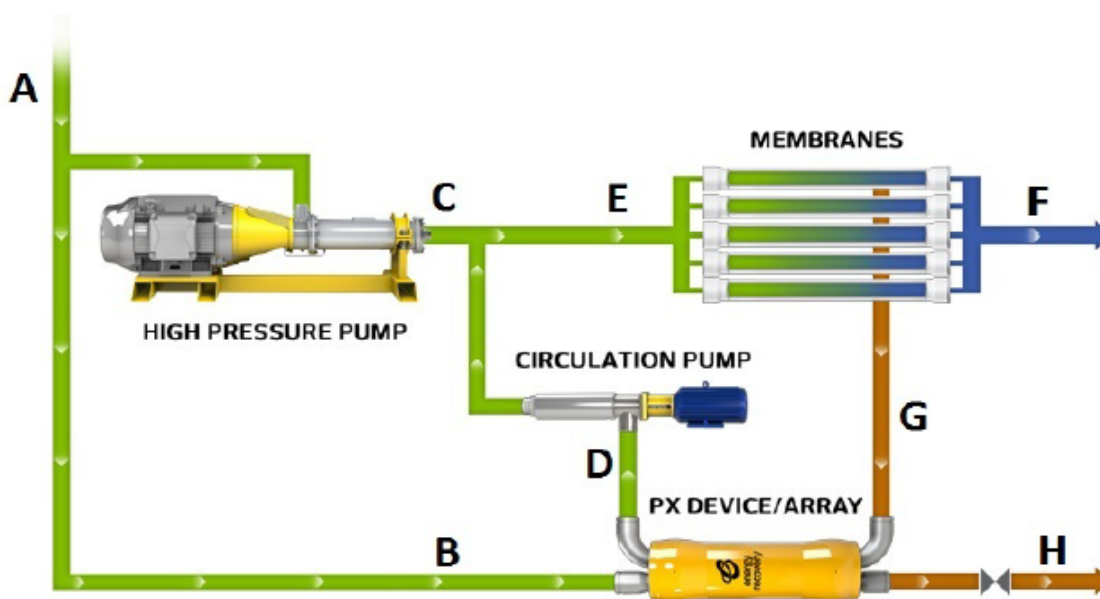


Figura 4.15: Diagrama de proceso de OI con intercambiador de presión (PX DEVICE). La bomba booster (CIRCULATION PUMP) permite levantar la diferencia de presión entre el punto C y D.²⁰

Se debe destacar que el intercambiador de presión es un equipo que permite hacer más eficientes los procesos de OI debido a que la diferencia de presión entre A-C es mucho mayor que de D-C, a pesar que los flujos sean menores a través de A-C que de D-C. El resumen de las potencias requeridas por la bomba HP y booster calculadas en base a la ecuación (4.3) se muestran en la Tabla 4.20, además, la disminución de potencia requerida (ver fila Diferencia (2)-(1) de la Tabla 4.20) por el proceso si se agrega el

²⁰ Fuente: <http://www.energyrecovery.com/resource/aquabold-selector/>

intercambiador de presión como un elemento de eficiencia energética del sistema disminuyendo en un 60% la potencia requerida y como consecuencia el consumo de energía.

Tabla 4.20: Diferencia entre potencia demandadas entre configuración con y sin intercambiador (EP)

	Presión bomba ΔP [bar]	Caudal [m ³ /h]	Eficiencia	Potencia [kW]
Bomba HP	37,8	61,0	0,74	88,2
Bomba Booster	4,33	139,1	0,70	25,1
Potencia con PX DEVICE (1)				113,3
Potencia sin PX DEVICE (2)				290,6
Diferencia (2)-(1)				176,9

Fuente: Elaboración propia

Los parámetros de operación de la bomba booster se muestran en la Tabla 4.18.

Tabla 4.21: Parámetros de operación de la bomba booster (CIRCULATION PUMP) (EP)

Proveedor	Energy Recovery	
Modelo	VP-4671	
N° de unidades	1	
		Unidad
Flujo de operación	139,1	
Presión bomba ΔP	4,3	[m ³ /h]
Eficiencia @61[m³/h]	0,7	[bar]
Costo	\$ 55.930	US\$/unidad

Fuente: Energy Recovery

4.4.2.12 Sistema Membranas OI

Sistema de recipientes (ver tubos blancos de Figura 4.16) que almacena membranas conectadas en configuraciones en serie y paralelo que permite desalinizar agua que es ingresada el recipiente a altas presiones. El flujo entra en contacto por la parte externa de las membranas y permea hacia el interior por donde circula el agua producto como se aprecia en la Figura 4.8.



Figura 4.16: Sistema industrial de recipientes con las membranas respectivas para realizar OI²¹

Los parámetros de operación del sistema membranas OI se muestran en la Tabla 4.22.

Tabla 4.22: Parámetros de operación del sistema de membranas de OI (EP)

Proveedor	PureAqua	
		Unidades
Agua Producida	60	[m ³ /h]
Máximo TDS de alimentación	42.000	TDS
TDS de operación	35.000	TDS
Número de recipientes de presión	18	unidades
Número de Membranas de OI	108	unidades
Diámetro de Membranas	8'	[inch]
Modelo de Membrana	SW30HRLE-370/34i	
Porcentaje de permeado	30% [25]	
COSTO TOTAL	\$ 568.148	US\$/unidad

Fuente: PureAqua

4.4.2.13 Intercambiador de Presión

Equipo que permite recuperar en gran parte (cerca del 96,8% [5]) la energía en forma de presión que los procesos antes desechaban al mar en el agua salobre rechazada producto de la desalinización. En la Figura 4.15 se aprecia como el flujo de agua de rechazo en G, entrega energía al flujo B que entra al intercambiador de presión. En la Figura 4.17 se muestra el interior de un intercambiador de presión seleccionado del fabricante Energy Recovery.

²¹Fuente: <http://www.pureaqua.com/industrial-seawater-reverse-osmosis-desalination-systems/>

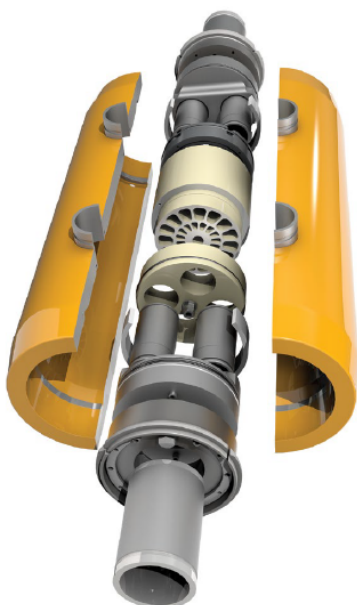


Figura 4.17: Vista interior en explosión del intercambiador de presión de los modelos Q SERIES [5]

Los parámetros de operación del sistema membranas OI se muestran en la Tabla 4.23.

Tabla 4.23: Parámetros de operación de intercambiador de presión seleccionado PX-220 (EP)

Fabricante	Energy Recovery	
Modelo	PX-220	
Número de Unidades PX	3	
		Unidades
Flujo por Unidad de PX	46,7	[m ³ /h]
Eficiencia @ 60 [m ³ /h]	95,1%	
Costo	\$ 41.794	US\$/unidad

Fuente: Energy Recovery

4.4.2.14 Bomba Circulación post OI (permeado)

Bomba encargada de transportar el agua permeada de las membranas de osmosis inversa hacia el tanque de almacenamiento de permeado. El paso del agua a través de las membranas produce una reducción del fluido de interés el cual es un 30% (60 [m³/h]) del flujo original (200 [m³/h]) aproximadamente.

Los parámetros de operación del sistema de la bomba de circulación post OI se muestran en la Tabla 4.24.

Tabla 4.24: Parámetros de operación de la bomba circulación post OI (EP)

Bomba Circulación post OI	Unidades	
Flujo de operación	60,0	[m ³ /h]
Presión bomba	0,5	[bar]
Costo	\$ 8.633	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.15 Tanques Almacenamiento Permeado

Al igual que el tanque alimentación OI (ver sección 4.4.2.7) el criterio de selección se basa en tener una reserva de agua para por lo menos dos días, correspondiente a 02 tanques de 1590 [m³] cada uno de capacidad. Las dimensiones del tanque se eligen según la norma API que se especifican en el ANEXO D. En la Tabla 4.25 se especifican las dimensiones correspondientes y costos para uno de los dos tanques de almacenamiento que se requieren.

Tabla 4.25: Parámetros de operación del tanque de almacenamiento de permeado (EP)

Tanque Almacenamiento Permeado		Unidades
N° de tanque	2	
Diámetro	13	[m]
Altura	12,2	[m]
Capacidad	1590	[m ³]
Costo	\$ 384.012	[m ³ /h]

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.16 Bomba a Post Tratamiento

Bomba encargada de transportar el agua permeada en los tanques de almacenamiento hacia el post tratamiento con adición de químicos que permiten remineralizar el agua. La Tabla 4.26 se especifican los parámetros de operación principales de la bomba.

Tabla 4.26: Parámetros de operación de la bomba a post tratamiento (EP)

Bomba a Post Tratamiento		Unidad
Flujo de operación	60,0	[m ³ /h]
Presión bomba	0,1	[bar]
Costo	\$ 8.633	US\$/unidad

Fuente: Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers [24]

4.4.2.17 Sistema Post Tratamiento

Éste sistema consiste en todos los equipos que se encargan de adecuar el agua a los parámetros químicos para ser considerada agua potable de acuerdo a su contenido mineral, además de estabilizar su pH y el calcio disuelto para así alcanzar el equilibrio calcocarbónico con la atmosfera y alcalinidad no varían en forma apreciable en contacto con la atmósfera [23]. Los sistemas de dosificación se describen en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27: Descripción de elementos constituyentes del sistema de post tratamiento (EP)

Cantidad	Modelo	Descripción	Precio Total
1	CDS24-2-pH	Sistema posterior de dosificación para regular pH	\$ 1.555
1	CDS12-2	Sistema posterior de cloración del agua	\$ 527
1	CS8-6	Sistema de limpieza para membranas de 8"	\$ 23.205
Total (US\$)			\$ 25.288

Fuente: PureAqua

4.4.3 Parámetros de operación de la planta de OI

Bajo la restricción de la demanda de agua que debe ser producida que se muestra en el ANEXO D para todos los años de estudio, se proyecta la planta de OI de acuerdo a las condiciones de operación de los distintos equipos (ver Tabla 4.28) que conforman el sistema.

Tabla 4.28: Parámetros de operación de los distintos equipos del sistema de OI (EP)

N°	Ítem	Cantidad	Caudal [m ³ /h]		Presión [bar]		Tamaño Partículas [μm]		Pérdida presión [bar]
			Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	
1	Bomba Filtro Multimedia	1	200,0	200,0	1,0	4,6	---	---	---
2	Filtro Multimedia	2	200,0	200,0	4,6	3,6	>50	50	1,03
3	Bomba Filtro Basket	1	200,0	200,0	3,6	4,0	---	---	---
4	Filtro Basket	2	200,0	200,0	4,0	3,0	50	34	1,03
5	Bomba Unidad	1	202,5	202,5	3,0	3,4	---	---	---
6	Unidad de Ultrafiltración	1	202,5	200,0	3,4	2,4	34	0,03	1,03
7	Tanque Alimentación OI	1	200,0	200,0	2,4	1,0	0,03	0,03	1,40
8	Bomba Alimentación OI	1	200,0	200,0	1,0	3,4	---	---	---
9	Sistema Filtro Micro Cartucho	1	200,0	200,0	3,4	2,4	>5	5	1,03
10	Bomba OI HP	1	61,0	61,0	2,4	40,2	---	---	---
11	Bomba Booster	1	139,1	139,1	35,9	40,2	---	---	---
12	Sistema Membranas OI	1	200,0	60,0	40,2	0,5	<=5	---	---
13	Intercambiador de Presión	3	139,1	139,1	2,4	35,9	---	---	---
14	Intercambiador de Presión (RECHAZO)		140,0	140,0	36,8	1,4	---	---	---
15	Bomba Circulación post OI	1	60,0	60,0	0,5	1,0	---	---	---
16	Tanques Almacenamiento	2	60,0	60,0	1,0	1,0	---	---	---
17	Bomba a Post Tratamiento	1	60,0	60,0	1,0	2,1	---	---	---
18	Sistema Post Tratamiento	1	60,0	60,0	---	---	---	---	---

Fuente: Elaboración propia

4.5 Evaluación económica

Para realizar la evaluación económica se realizan los siguientes supuestos para todos los casos a estudiar:

- Horizonte de evaluación a 20 años.
- Los equipos tendrán una depreciación constante a 20 años.
- Tasa de retorno de un 10%.
- Se considera solo el impuesto al valor agregado (IVA) de un 19%²².
- El costo eléctrico será constante en el periodo de evaluación.
- El precio de venta del agua será constante en el periodo de evaluación.
- Dentro del periodo de evaluación no se realizarán más inversiones que las realizadas al inicio.

4.5.1 Ingresos operacionales

Los precios de venta de agua potable en la comuna de Mejillones informado por Aguas Antofagasta son los que se muestran en la Tabla 4.29. Para estimar los ingresos operacionales se debe simplemente multiplicar el agua producida o demanda de agua (ver Anexo C) por el valor de venta del agua.

Tabla 4.29: Tarifas del agua potable en la comuna de Mejillones para consumos leídos después del 6 de enero del 2016 por la empresa distribuidora AGUAS ANTOFAGASTA (EP)

Ítem	Mejillones
Costo Fijo [\$]	954,00
Costo variable [\$/m3]	1875,71
Costo del agua en hora NO PUNTA	1489,10
Costo del agua en hora PUNTA	1489,10
Uso de alcantarillado	386,61
Costo por m3 [\$]	2829,71
Costo por m3 [US\$]	4,22

Fuente: Aguas Antofagasta²³

4.5.2 Costos Variables

4.5.2.1 Costo tratamiento químicos

Los costos variables corresponden a los insumos demandados que dependen proporcionalmente del nivel de producción de agua. Un costo a considerar son los distintos químicos que se deben adicionar al proceso de osmosis inversa con el fin de optimizar la desalinización además de reducir los factores de riesgos que disminuyen la disponibilidad de equipos y en especial de las membranas de osmosis inversa. Estos químicos son adicionados tanto en su pretratamiento como post tratamiento. La estimación de costos anuales por concepto de tratamientos químicos [25] se muestra en la ecuación (4.10).

²² Fuente: <https://www.chileatiende.gob.cl/fichas/ver/29234>

²³ Fuente: <http://www.aguasantofagasta.cl/empresa/informacion-comercial/tarifas/tarifas-actuales.html>

$$C_{RO,químicos} = 8760 \cdot K \cdot Q_P \quad (4.10)$$

Donde:

$C_{RO,químicos}$: costo total anual de tratamientos químicos [US\$]

K : costo de químicos [US\$/m³]

Q_P : producción de agua horaria [m³]

Utilizando un valor de $K = 0,033 \left[\frac{US\$}{m^3} \right]$ [25] se estiman los costos anuales asociados a los tratamientos químicos en el período de evaluación que se muestran en el ANEXO E.

4.5.2.2 Precio del suministro eléctrico

Las tarifas de suministro eléctrico son establecidas de acuerdo a cálculos fijados cada cuatro años. Las fórmulas vigentes fueron fijadas por el Decreto N° 276 de 2004, del Ministerio de Economía²⁴. Dicho decreto contiene las distintas opciones tarifarias a las que puede acceder libremente un usuario final, dependiendo de su tipo de consumo, el cual puede elegir la opción tarifaria de su conveniencia, por un plazo mínimo de un año, al cabo del cual puede modificarla o mantenerla.

La inclusión en una u otra categoría depende de si el usuario está conectado con su empalme a líneas de voltaje superiores o inferiores a 400 volts. Así, las opciones tarifarias para los clientes en baja tensión son⁸:

- BT1: Medición de energía cuya potencia conectada sea inferior a 10 kW o la demanda sea limitada a 10 kW (residencial)
- BT2: Medición de energía y contratación de potencia (comercial y alumbrado público)
- BT3: Medición de energía y medición de demanda máxima
- BT4: Medición de energía y alguna de las siguientes modalidades
- BT4.1: Contratación de demanda máxima de potencia en horas de punta y de la demanda máxima de potencia
- BT4.2: Medición de demanda máxima de potencia en horas de punta y contratación de la demanda máxima de potencia
- BT4.3: Medición de demanda máxima de potencia en horas de punta y de la demanda máxima de potencia suministrada

Para la planta en estudio se elige la tarifa BT2 de *medición de energía y contratación de potencia* de baja tensión debido a que los equipos presentes, todos tienen tensiones menores a los 400[V] y el criterio de diseño de la planta de producir agua a tasa constante permite contratar una potencia que será la impuesta

²⁴Fuente: SEC, http://www.sec.cl/portal/page?_pageid=33,3417541,33_3421567&_dad=portal&_schema=PORTAL

por el consumo de energía, específicamente el consumo específico (CE) de la planta de OI, de los cuales se realizará un análisis de sensibilidad sobre la factibilidad económica de la planta de OI proyectada a estudiar. Dicho lo anterior, en la Tabla 4.30 se desglosa los distintos cargos aplicados a un consumo eléctrico de tarifa BT.

Tabla 4.30: Tarifa eléctrica BT2 de potencia controlada del distribuidor ELECDA

BT2 - Tarifa de Potencia Controlada	Baja tensión (<400kW)	
	[\$] pesos	US\$
Cargo Fijo [\$/cliente]	1130,64	1,688
Cargo Único por Uso del Sistema Troncal [\$/kWh]	2,218	0,003
Cargo Energía [\$/kWh]	68,709	0,103
Cargo Potencia Parcialmente Presente en Punta [\$/kW]	10.044,30	14,991
Cargo Potencia Presente en Punta [\$/kW]	14.596,90	21,786

Fuente: ELECDA²⁵

En el Anexo E se ejemplifica como se aplica la tarifa BT2 a un consumo horario anual utilizado para estimar los costos variables asociados al consumo eléctrico en la planta de OI en estudio.

4.5.3 Costos fijos

4.5.3.1 Costos de personal

El personal laboral típico en una planta de OI son técnicos mecánicos, eléctricos, jefe de la planta, limpiadores de paneles fotovoltaicos, etc. En la Tabla 4.31 se muestra una estimación del personal estimado con sus sueldos, a pesar que en las evaluaciones puedan variar los tamaños de las plantas, se toma la simplificación que los encargados por área no se ven afectados por escalar la planta.

Tabla 4.31: Estimación de costos de personal en pesos chilenos y dólares mensual y anualmente (EP)

Personal	Cantidad	Costo unitario [\$/]	Costo total [\$/]
Superintendente de Planta	1	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Jefe de Planta	1	\$ 3.500.000	\$ 3.500.000
Jefe de Mantenimiento	2	\$ 3.500.000	\$ 7.000.000
Técnico profesional	4	\$ 2.000.000	\$ 8.000.000
Operario de pantalla	2	\$ 500.000	\$ 1.000.000
Limpiador de paneles	5	\$ 400.000	\$ 2.000.000
Aseo	3	\$ 350.000	\$ 1.050.000
Casino	3	\$ 400.000	\$ 1.200.000
Total mensual [\$/]	21		\$ 28.750.000
Total mensual [US\$]			\$ 42.910
Total anual [US\$]			\$ 514.925

Fuente: EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS PARA DESALINIZAR AGUA, POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA EN EL NORTE DE CHILE. [15]

²⁵ Fuente: ELECDA, <http://www.elecda.cl/wp-content/uploads/descargables/tarifas-hogar/elecda/tarifas-de-suministros/Tarifas-de-Suministro-Elecda-2016-02-01.pdf>

4.5.3.2 Reemplazo membranas OI

El fabricante de las membranas de OI garantiza que la vida útil de éstas es mayor a tres años²⁶ y otra fuente indica que bajo un buen mantenimiento y dependiendo de la calidad del agua se puede extender la vida útil de las membranas por más de 5 años, es por ello que se decide planificar el recambio de todas las membranas (108) cada cuatro años.

Por lo tanto, los costos asociados por mantención de membranas son:

- Costo por membrana: US\$ 660
- Número de membranas: 108
- Costo total por reemplazo de 108 membranas: US\$ 71.280.

4.5.3.3 Mantenimiento de aerogeneradores

La estimación de costos asociados a la mantención de los aerogeneradores se basa en la recomendación de un costo fijo por energía producida por estos. Se estima un costo asociado a la energía producida en dólares de:

- $0,01 \left[\frac{US\$}{kWh} \right]$ de energía producida.

Por lo tanto, el costo asociado por mantenimiento de los aerogeneradores es función de la selección del aerogenerador y su capacidad de producir energía.

4.5.4 Costos de inversión

Los costos asociados a la inversión de la planta de OI se muestran en la Tabla 4.32, los precios incluyen I.V.A.

²⁶ Fuente: DowFilmtec, <http://es.pureaqua.com/content/pdf/filmtec-sw30hrle-370-34i-elementos-de-membranas.pdf>

Tabla 4.32: Costo desglosado de la planta de OI en US\$ (EP)

SUBSISTEMA DE PRETRATAMIENTO	
Bomba Filtro Multimedia	\$ 13.736
Filtro Multimedia	\$ 64.803
Bomba Filtro Basket	\$ 9.228
Filtro Basket	\$ 26.682
Bomba Unidad de Ultrafiltración	\$ 9.228
Sistema de Ultrafiltración	\$ 422.596
Tanque Alimentación OI	\$ 1.012.143
Bomba de Alimentación OI	\$ 12.243
Sistema de dosificación MC	\$ 5.355
Sistema Filtro MC	\$ 24.232
SUBTOTAL	\$ 1.600.247
SUBSISTEMA DE DESALINIZACIÓN	
Bombas de Alta Presión (HP)	\$ 75.498
Bomba Booster	\$ 55.930
Sistema Osmosis Inversa (membranas)	\$ 568.148
Intercambiadores de Presión (03) (PX)	\$ 125.383
Tanque Permeado OI	\$ 768.024
Bomba Circulación post OI (permeado)	\$ 8.633
SUBTOTAL	\$ 1.601.615
SUBSISTEMA DE POSTRATAMIENTO	
Sistemas de dosificación de químicos (Ca(OH) ₂ +CO ₂)	\$ 2.083
Sistema de limpieza para membranas de 8"	\$ 23.205
Bomba a Post Tratamiento	\$ 8.633
Tanque Post Tratamiento OI	\$ 214.987
SUBTOTAL	\$ 248.908
Ingeniería civil y Piping	\$ 434.115
Terreno	\$ 6.747
Cerco perimetral	\$ 1.247
TOTAL OI	\$ 3.892.879

Fuente: Elaboración propia

Los costos asociados a la planta de generación fotovoltaica se obtienen a partir de los Costos Totales de Inversión (TCL) que se muestran en la Tabla 4.33 todos los costos asociados a un sistema fotovoltaico en los porcentajes de inversión, por lo tanto, para obtener el TCL se utiliza el costo total de paneles fotovoltaicos seleccionados en la sección 4.4.1 para suplir la energía requerida y se estima el resto de los ítems de la Tabla 4.33.

Tabla 4.33: Estimación de costos a partir de los Costos Totales de Inversión [26]

SUBSISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	% TCI
Módulos Fotovoltaicos	50
Producción de silicio	8
Producción de Celda de Silicio	14
Producción de Celda Solar	11
Producción del Módulo Fotovoltaico	17
Inversor DC/AC	16
Montaje y Componentes	6
Cajas y otros Equipamientos Eléctricos	2
Preparación del Sitio e Instalación	25
Diseño del sistema, Gastos Generales y Otros	1

Fuente: On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions [26]

Lo mismo ocurre para el subsistema eólico en el cual los %TCL se muestran en la Tabla 4.34 ingresando como parámetro el costo del aerogenerador, obteniendo finalmente los demás costos de inversión.

Tabla 4.34: Estimación de costos a partir de los Costos Totales de Inversión [26]

SUBSISTEMA EÓLICO	%TCL
Turbina Eólica	64
Torre	25
Aspas	22
Caja de Cambio	13
Otros	40
Conexión a Red	11
Costo de Construcción	16
Otros	9
SUBTOTAL US\$	100

Fuente: On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions [26]

5 Resultados

5.1 Zona de aplicación

De las cinco localidades estudiadas para la posible aplicación de una planta desalinizadora de osmosis inversa con el apoyo de energías renovables eólica y solar-fotovoltaica, se aprecia del Gráfico 4.11 que las localidades Tocopilla, Taltal, Chañaral y Caldera presentan radiaciones similares, aunque menores que Mejillones siendo esta última la de mayor radiación global mensual a lo largo del año. Por otro lado, analizando el potencial eólico para cada localidad a diferentes alturas, haciendo un análisis mes a mes a lo largo de un año, se aprecia del Gráfico 4.17, Gráfico 4.18, Gráfico 4.19 y Gráfico 4.20; la localidad de mayor disponibilidad energética eólica al existir un mayor potencial eólico corresponde a la localidad de Mejillones. Además, a partir de la Tabla 4.2 se observa que la localidad de menor población proyectada al año 2036 es Mejillones. Por lo tanto, relacionando la energía disponible con la demanda de agua de la localidad, se puede crear un índice permita entregar la razón entre energía disponible (eólica y solar) y demanda de agua a desalinizar, que puede ser en $[\text{kWh}/\text{m}^3]$.

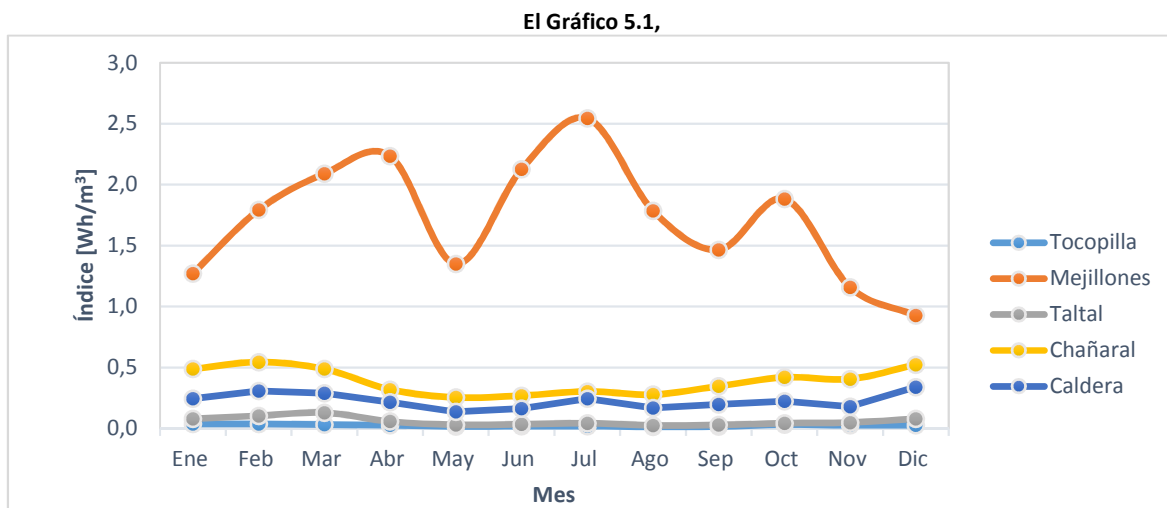


Gráfico 5.2, Gráfico 5.3 y Gráfico 5.4 se puede apreciar el comportamiento del índice de disponibilidad energética eólica disponible por volumen de agua a desalinizar a lo largo de los distintos meses del año para cada ciudad estudiada, como también a diferentes alturas en las cuales se considera la energía eólica del análisis de los vientos en las localidades. Este índice indica que mientras mayor sea su valor, habrá mayor energía disponible para el proceso de desalinización por osmosis inversa por volumen de agua a desalinizar. Se debe considerar que este índice tiene un carácter de validez mensual aproximado, ya que, tanto la radiación solar como la velocidad del viento presentan un comportamiento estacional que varía a lo largo del año.

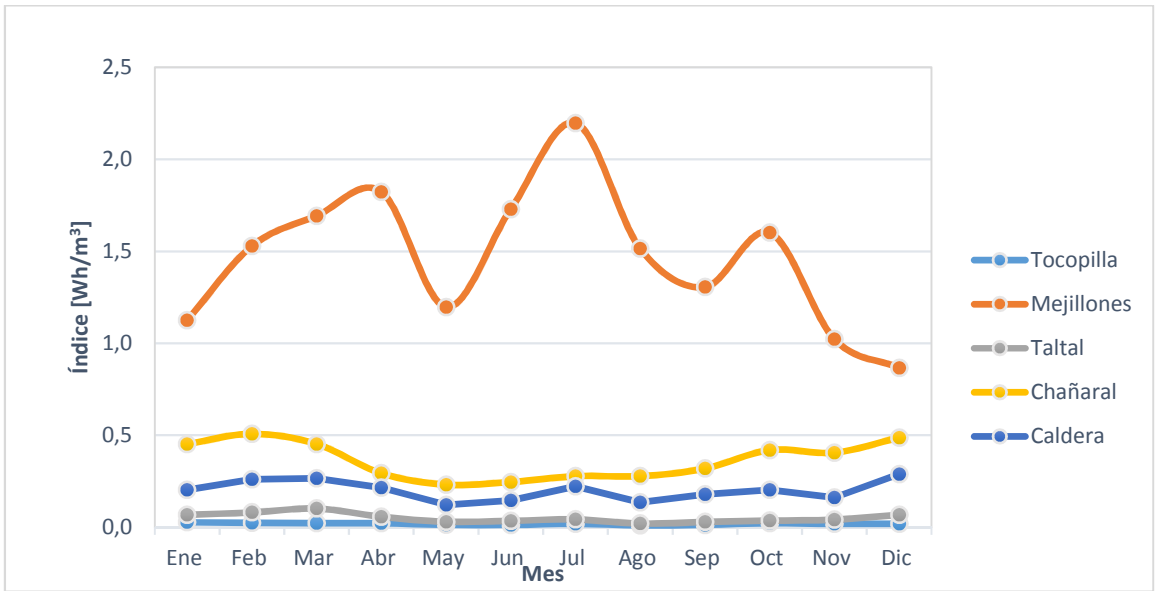


Gráfico 5.1: Comportamiento del índice a lo largo del año considerando vientos a 26[m] de altura (EP).

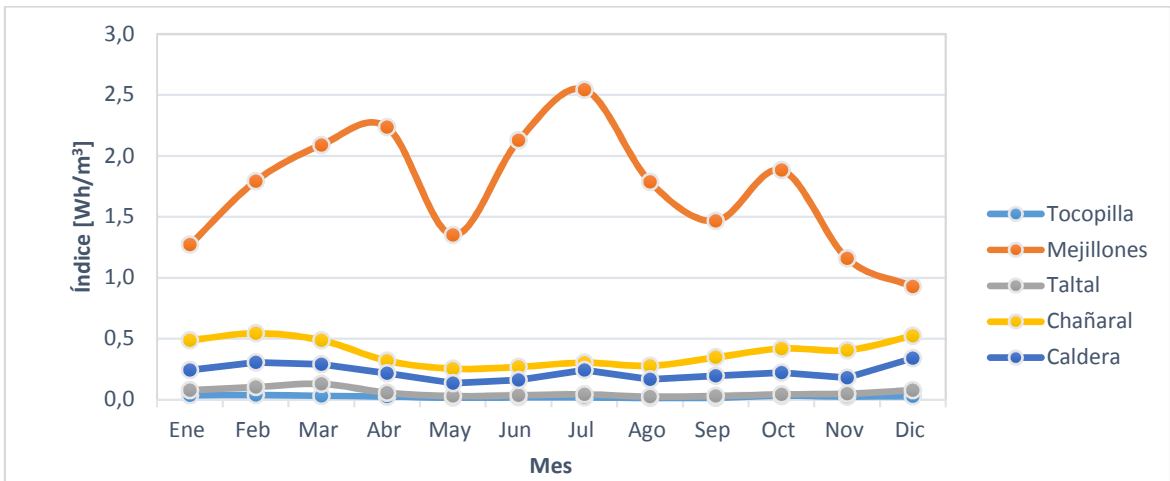


Gráfico 5.2: Comportamiento del índice a lo largo del año considerando vientos a 57[m] de altura (EP).

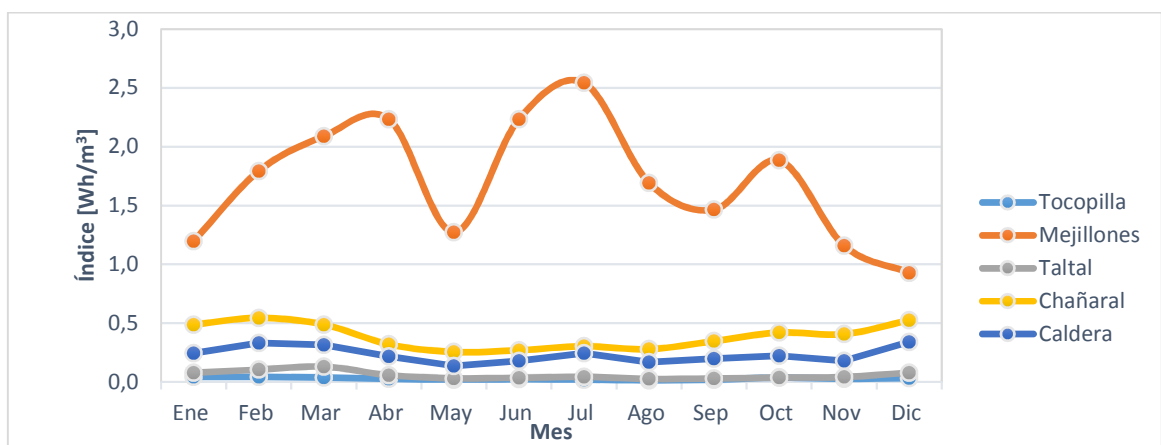


Gráfico 5.3: Comportamiento del índice a lo largo del año considerando vientos a 76[m]de altura (EP).

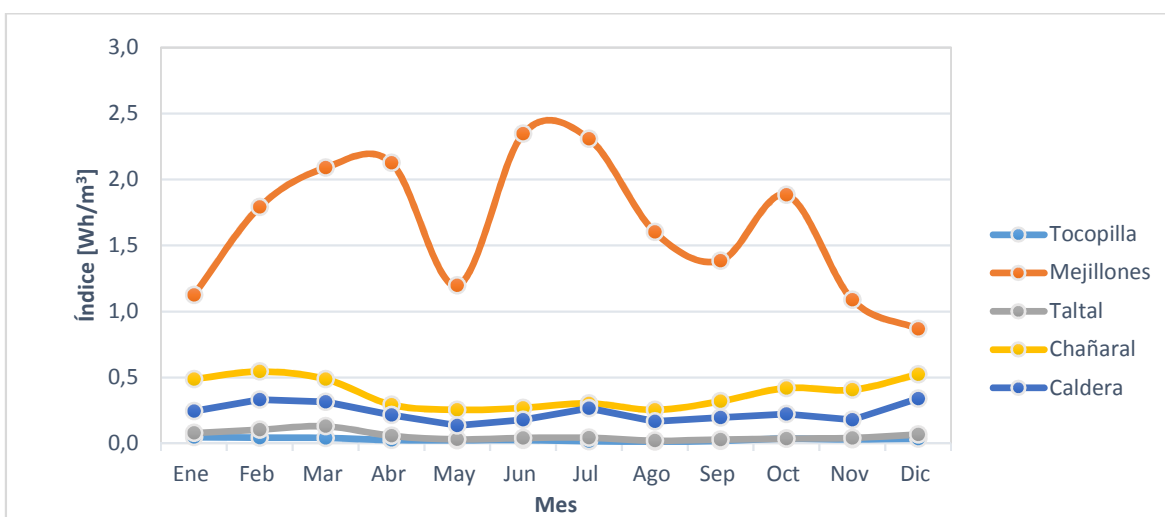


Gráfico 5.4: Comportamiento del índice a lo largo del año considerando vientos a 96[m]de altura (EP).

Un análisis similar se realiza para la energía solar disponible en las distintas localidades de estudio como se muestra en el Gráfico 5.5.

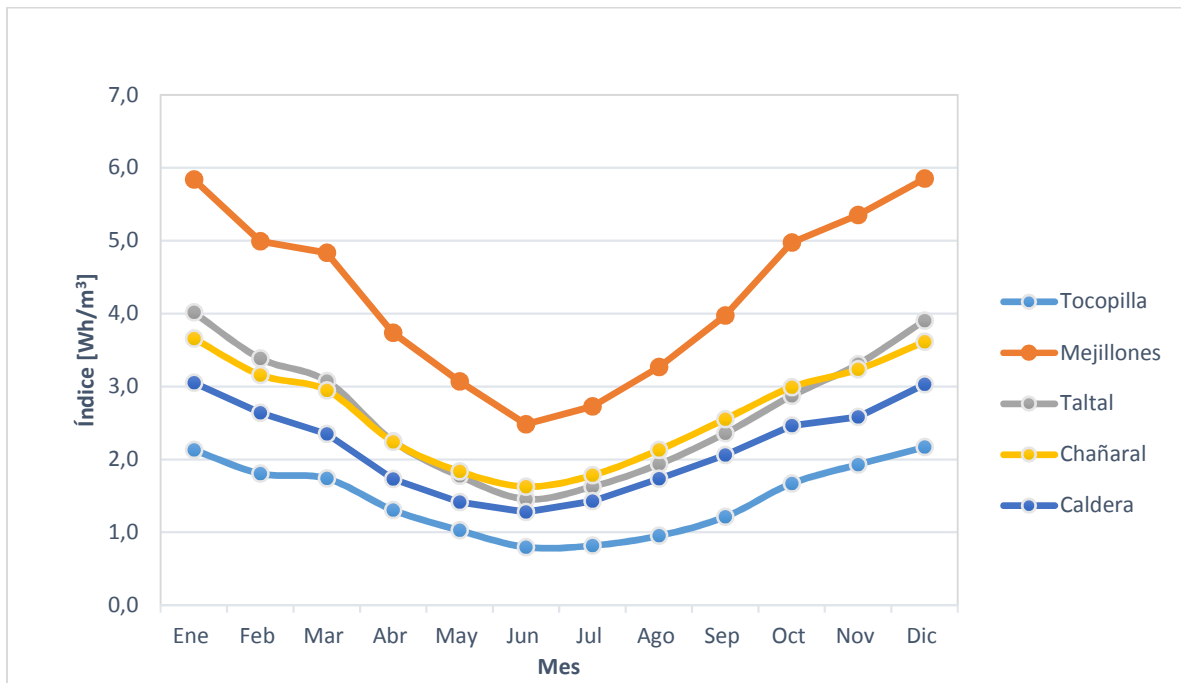


Gráfico 5.5: Comportamiento del índice de disponibilidad energética solar a lo largo del año (EP).

La localidad de Mejillones presenta ventajas sobre las otras localidades y es candidata a ser la ciudad en la cual se proyectará la planta de osmosis inversa debido a los siguientes factores:

- Su potencial eólico es superior a todas las otras localidades incluso si se analiza a distintas alturas.
- La curva de radiación promedio mensual del Gráfico 4.11 muestra que la localidad de Mejillones es la curva dominante y es mayor a las otras localidades a lo largo de todo el año, más aún, es dominante analizando el Gráfico 5.5 el cual incorpora el volumen de agua a desalinizar respectivo a cada ciudad. Además, cabe destacar que la radiación interanual es prácticamente constante para todas las localidades (ver Gráfico 4.1, Gráfico 4.3, Gráfico 4.5, Gráfico 4.7 y Gráfico 4.9).
- La población en Mejillones es la menor, por lo tanto, bajo el supuesto de abastecer la demanda mínima que sugiere la OMS de 100 [lt/h/día] [20], la demanda de agua en esa localidad será la menor, lo que permite a priori determinar que en términos energéticos es la ciudad más factible para proyectar la planta de osmosis inversa.

5.2 Creación, ajuste y validación del modelo

5.2.1 Validación del modelo

El modelo elaborado en EXCEL y mencionado en la sección 4.3.3 es validado con respecto a simulaciones entregadas por el explorador solar del departamento de geofísica de la Universidad de Chile [9]. El modelo estima la generación de energía por medio de paneles fotovoltaicos a partir de la radiación incidente global en un panel inclinado.

Se obtiene la radiación incidente global en una zona de Mejillones (ver Tabla 5.1) y es procesada en el modelo en EXCEL para posteriormente estimar la generación eléctrica (ver Tabla 5.2) y ser comparada con la simulación generada por el explorador solar.

Tabla 5.1: Radiación solar global sobre plano inclinado [W/m²] [9]

Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	19	7	2	0	0	0	0	0	4	21	37	35
7:00	134	112	92	64	44	22	19	33	66	107	139	162
8:00	355	337	304	240	190	125	121	132	192	287	347	379
9:00	604	594	568	476	378	263	267	312	452	575	641	637
10:00	813	809	790	693	587	454	460	532	710	831	862	834
11:00	954	961	950	862	770	624	654	718	883	983	991	961
12:00	1018	1039	1029	957	877	771	789	875	966	1034	1030	1009
13:00	1002	1031	1020	950	870	804	822	903	957	998	991	977
14:00	913	946	929	854	774	718	754	817	860	884	870	870
15:00	761	791	761	682	606	570	596	653	686	696	690	708
16:00	550	575	540	457	383	363	390	439	460	460	462	494
17:00	307	325	283	198	121	109	143	191	209	209	222	259
18:00	98	99	57	9	0	0	1	6	16	28	43	69
19:00	8	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.2: Energía generada por paneles fotovoltaicos [kW] (EP)

Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
0:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
7:00	2	2	1	1	1	0	0	0	1	2	2	2
8:00	5	5	4	3	3	2	2	2	3	4	5	5
9:00	9	9	8	7	5	4	4	4	6	8	9	9
10:00	12	12	11	10	8	7	7	8	10	12	12	12
11:00	14	14	14	12	11	9	9	10	13	14	14	14
12:00	15	15	15	14	13	11	11	13	14	15	15	14
13:00	14	15	15	14	12	12	12	13	14	14	14	14
14:00	13	14	13	12	11	10	11	12	12	13	12	12
15:00	11	11	11	10	9	8	9	9	10	10	10	10
16:00	8	8	8	7	5	5	6	6	7	7	7	7
17:00	4	5	4	3	2	2	2	3	3	3	3	4
18:00	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
19:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23:00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

El resumen de la generación mensual se muestra en la Tabla 5.3, tanto para la simulación de explorador solar como para el modelo en EXCEL.

Tabla 5.3: Comparación entre simulación y modelo de generación de energía fotovoltaica (EP)

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
Explorador [kWh]	3.154	2.902	3.079	2.649	2.411	2.030	2.198	2.439	2.702	3.052	3.033	3.144
Modelo [kWh]	3.350	3.064	3.256	2.771	2.490	2.075	2.230	2.494	2.778	3.163	3.151	3.289

Finalmente se obtiene la generación anual en la Tabla 5.4 resumen para ambos modelos se aprecia solo un 4% de diferencia entre ambos casos, por lo tanto, se procede a utilizar el modelo Excel para evaluar los distintos escenarios.

Tabla 5.4: Resumen comparativo anual de generación eléctrica (EP)

	Generación Anual [kWh]	%
Explorador Solar	32773	100%
Modelo Excel	34114	104%
	Diferencia	4%

No se realizan ajustes debido a que la pequeña diferencia es debida a que se utiliza en el modelo Excel una alta eficiencia nominal del panel fotovoltaico de 17%.

5.3 Casos de estudio

Para analizar la factibilidad económica se realizarán varios casos de estudios a través de un flujo de caja el cual depende de directamente del aerogenerador y la cantidad de paneles solares que se utilizarán en los distintos escenarios. Como se menciona en la sección 4.4.1 el criterio para dimensionar el sistema energético consiste considerar el/los aerogeneradores como elementos bases y la cantidad de paneles fotovoltaicos serán tales que la potencia máxima entre ambas debe ser menor o igual a la potencia requerida por la planta de OI.

Como primer paso se debe estimar el consumo energético de la planta de OI para lo cual se estiman los consumos energéticos de las bombas hidráulicas a lo largo del proceso de desalinización considerando 3 escenarios relativos al rendimiento de las bombas a excepción de la bomba de alta presión y la bomba booster que el fabricante entrego las curvas características de sus rendimientos que se pueden ver en el ANEXO F.

Tabla 5.5: Consumos eléctricos de las bombas del sistema de OI con rendimiento 0,8 (EP)

				con PX	sin PX
	Presión ΔP [bar]	Caudal [m³/s]	η_b	Potencia [kW]	
Bomba Filtro Multimedia	3,59	0,06	0,8	25,41	25,41
Bomba Filtro Basket	0,43	0,06	0,8	3,07	3,07
Bomba Unidad Ultrafiltración	0,48	0,06	0,8	3,45	3,45
Bomba Alimentación OI	2,43	0,06	0,8	17,24	17,24
Bomba OI HP	37,82	0,02	0,7411	88,19	266,74
Bomba Booster	4,33	0,04	0,7	25,13	---
Bomba Circulación post OI	0,50	0,02	0,8	1,06	1,06
Bomba a Post Tratamiento	1,14	0,02	0,8	2,42	2,42
			Total	165,99	319,40
			CE	2,77	5,32

Tabla 5.6: Consumos eléctricos de las bombas del sistema de OI con rendimiento 0,7 (EP)

				con PX	sin PX
	Presión ΔP [bar]	Caudal [m ³ /s]	η_b	Potencia [kW]	
Bomba Filtro Multimedia	3,59	0,06	0,70	29,04	29,04
Bomba Filtro Basket	0,43	0,06	0,70	3,51	3,51
Bomba Unidad Ultrafiltración	0,48	0,06	0,70	3,95	3,95
Bomba Alimentación OI	2,43	0,06	0,70	19,70	19,70
Bomba OI HP	37,82	0,02	0,74	88,19	266,74
Bomba Booster	4,33	0,04	0,70	25,13	
Bomba Circulación post OI	0,50	0,02	0,70	1,21	1,21
Bomba a Post Tratamiento	1,14	0,02	0,70	2,77	2,77
			Total	173,51	326,92
			CE	2,89	5,45

Tabla 5.7: Consumos eléctricos de las bombas del sistema de OI con rendimiento 0,6 (EP)

				con PX	sin PX
	Presión ΔP [bar]	Caudal [m ³ /s]	η_b	Potencia [kW]	
Bomba Filtro Multimedia	3,59	0,056	0,6	33,88	33,88
Bomba Filtro Basket	0,43	0,056	0,6	4,10	4,10
Bomba Unidad Ultrafiltración	0,48	0,056	0,6	4,60	4,60
Bomba Alimentación OI	2,43	0,056	0,6	22,99	22,99
Bomba OI HP	37,82	0,017	0,7411	88,19	266,74
Bomba Booster	4,33	0,039	0,70	25,13	---
Bomba Circulación post OI	0,50	0,017	0,6	1,42	1,42
Bomba a Post Tratamiento	1,14	0,017	0,6	3,23	3,23
			Total	183,54	336,95
			CE	3,06	5,62

A partir de las Tabla 5.5, Tabla 5.6 y Tabla 5.7 se generan tres escenarios para el caso de utilizar intercambiadores de presión (PX) y tres escenarios más cuando no se utilizan intercambiadores de presión. Para el caso de no utilizar PX en rendimiento informado por el fabricante para la bomba de alta presión es de 0,8034.

5.4 Evaluación económica

Con los supuestos mencionados en la sección 4.5 se procede a realizar los flujos de caja para las distintas configuraciones de aerogeneradores y cantidad de paneles para los casos con intercambiador de presión. En la Tabla 5.8 se muestran todas las configuraciones (17) para la planta de OI con intercambiador de presión.

Tabla 5.8: Distintas configuraciones del sistema energético según su consumo específico (EP)

Configuración	Aerogenerador	N° aerogeneradores	N° paneles	Consumo Específico [kWh/m³]	Energía aportada por red eléctrica [kWh/año]
1	Enercon E-33 - 330 kW	1	238	2,77	747.613
2	Aeronautica 29-225	1	452	2,77	872.495
3	PowerWorks WEG MS-2	2	399	2,77	927.270
4	Windflow 500	1	448	2,77	941.263
5	PowerWorks WEG MS-2	1	558	2,77	983.365
6	Enercon E-33 - 330 kW	1	272	2,89	793.725
7	Aeronautica 29-225	1	485	2,89	919.752
8	PowerWorks WEG MS-2	2	433	2,89	973.382
9	Windflow 500	1	483	2,89	987.375
10	PowerWorks WEG MS-2	1	590	2,89	1.031.187
11	Aeronautica 29-225	2	232	3,06	832.702
12	Enercon E-33 - 330 kW	1	318	3,06	855.208
13	Aeronautica 29-225	1	526	3,06	983.515
14	PowerWorks WEG MS-2	3	293	3,06	993.409
15	PowerWorks WEG MS-2	2	479	3,06	1.034.865
16	Windflow 500	1	528	3,06	1.048.858
17	PowerWorks WEG MS-2	1	631	3,06	1.094.950

Establecidas las configuraciones candidatas a ser seleccionadas, son evaluadas económicamente a través de un flujo de caja con un precio de venta del agua igual al que se comercializa por Aguas Antofagasta. Los resultados de esas evaluaciones económicas se muestran en la Tabla 5.9 en orden descendente según su VAN.

Tabla 5.9: Evaluaciones económicas para los distintos escenarios (EP)

Configuración	Aerogenerador	N° aerogeneradores	N° paneles	CE [kWh/m³]	VAN [MUS\$]	TIR
2	Aeronautica 29-225	1	452	2,77	2.447	0,153
5	PowerWorks WEG MS-2	1	558	2,77	2.380	0,152
7	Aeronautica 29-225	1	485	2,89	2.366	0,151
10	PowerWorks WEG MS-2	1	590	2,89	2.308	0,150
1	Enercon E-33 - 330 kW	1	238	2,77	2.300	0,148
13	Aeronautica 29-225	1	526	3,06	2.263	0,149
6	Enercon E-33 - 330 kW	1	272	2,89	2.223	0,146
17	PowerWorks WEG MS-2	1	631	3,06	2.203	0,148
12	Enercon E-33 - 330 kW	1	318	3,06	2.113	0,144
11	Aeronautica 29-225	2	232	3,06	1.740	0,134
3	PowerWorks WEG MS-2	2	399	2,77	1.708	0,134
4	Windflow 500	1	448	2,77	1.648	0,132
8	PowerWorks WEG MS-2	2	433	2,89	1.634	0,132
9	Windflow 500	1	483	2,89	1.577	0,131
15	PowerWorks WEG MS-2	2	479	3,06	1.521	0,130
16	Windflow 500	1	528	3,06	1.471	0,129
14	PowerWorks WEG MS-2	3	293	3,06	876	0,116

Para cada consumo específico se realiza un análisis de sensibilidad del VAN y TIR al variar el precio del agua como se muestra en la Tabla 5.10.

Tabla 5.10: Sensibilidad del VAN respecto al precio de venta del agua (EP)

CE [kWh/m³]	2,77			2,89			3,06		
	2			7			13		
Configuración	Precio venta [US\$/m³]	VAN [MUS\$]	TIR [%]	Precio venta [US\$/m³]	VAN [MUS\$]	TIR [%]	Precio venta [US\$/m³]	VAN [MUS\$]	TIR [%]
	2,5	-2639	3%	2,5	-2.720	3%	2,5	-2.822	3%
	3	-1161	7%	3	-1.241	7%	3	-1.344	7%
	3,39	0	10%	3,42	0	10%	3,45	0	10%
	4	1796	14%	4	1.716	14%	4	1.613	14%
	4,22	2.447	15%	4,22	2.366	15%	4,22	2.263	15%
	5	4753	20%	5	4.673	20%	5	4.570	20%
	6	7710	26%	6	7.629	25%	6	7.526	25%

Para un precio de venta del agua de 3,39 [US\$/m³] para la configuración 2, 3,42 [US\$/m³] para la configuración 7 y 3,45 [US\$/m³] para la configuración 13; los proyectos deben postergarse o reevaluarse debido a que los VAN respectivos son iguales a cero y las tasas de retornos son iguales a la tasa de descuento del 10%. Con precios de venta del agua superiores a los antes señalados el proyecto comienza a ser rentable debido a que los VAN comienzan a ser positivos y estrictamente crecientes al igual que la TIR que comienza a ser mayor al 10%. Además, cabe destacar que con los precios actuales de venta del agua por AGUAS ANTOFAGASTA el proyecto es rentable debido a que se obtiene un VAN de MUS\$ 2.447, MUS\$ 2.366 y MUS\$ 2.263 para las configuraciones 2, 7 y 13 respectivamente. Es este caso la configuración 2 con un CE de 2,77 [kWh/m³] es la más rentable.

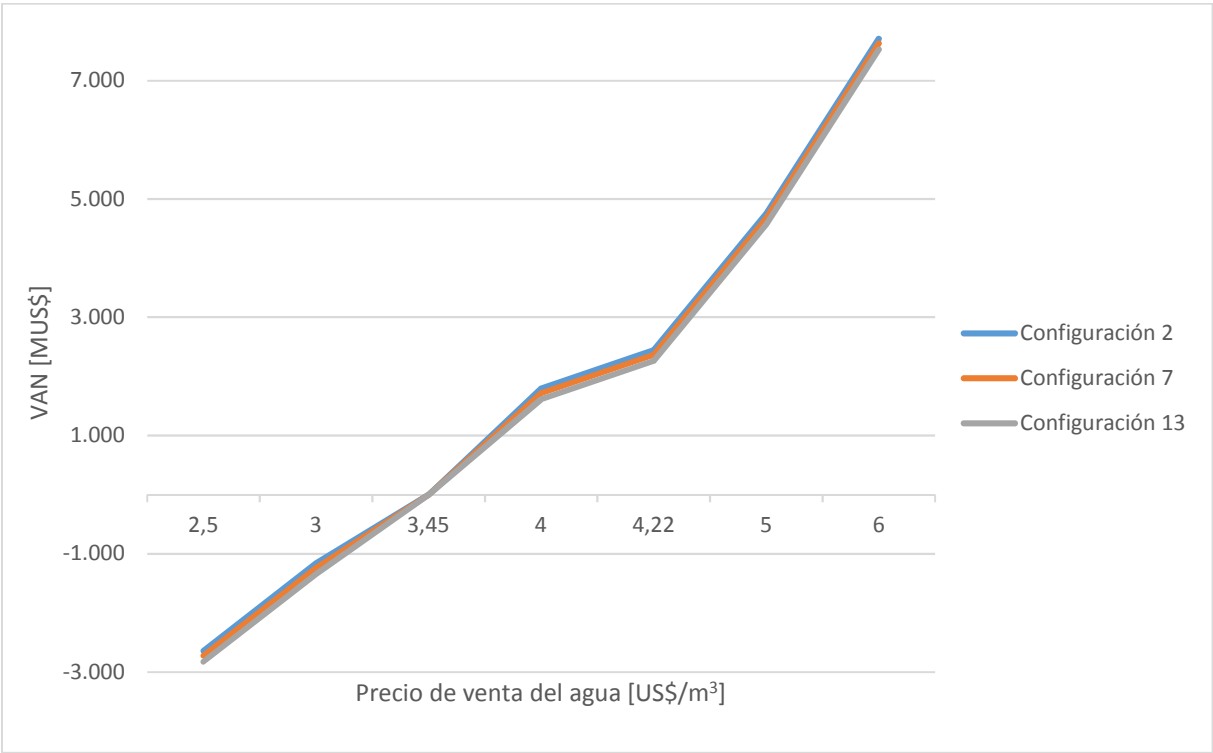


Gráfico 5.6: Variación del VAN (miles de dólares) en función del precio de venta del agua (EP)

6 Discusión

Los costos totales de inversión (TCI) de la sección 4.5.4 asociado a los subsistemas energéticos eólico y solar son obtenidos a través de una fuente bibliográfica, la cual es desarrollada para la isla de Skyros en Greece, por lo cual ese escenario no tiene por qué ser representativo para la realidad de Chile. Lo anterior es mencionado debido a que pueden existir diferencias entre la inversión mostrada en esta memoria y otra evaluación hipotética de un estudio en mayor detalle, considerando todos los costos asociados a internación, envíos, etc.

En cuanto al mantenimiento, solo se considera el reemplazo de todas las membranas de osmosis inversa cada cuatro años y un costo por mantenimiento de los aerogeneradores, sin considerar mantención asociada al subsistema fotovoltaico. Para obtener resultados más precisos es recomendable incorporar los costos asociados a mantenimiento del subsistema fotovoltaico en un futuro estudio y evaluar el impacto de éste a la evaluación económica del proyecto.

Otros posibles temas futuros de estudio pueden ser analizar la factibilidad técnico-económica de desalinización de agua de mar con energías renovables incorporando almacenamiento de energía por medio de baterías, incluyendo elementos de eficiencia energética como intercambiadores de presión, turbinas Pelton o cámaras isobáricas.

7 Conclusiones

Se obtienen los datos de energía solar fotovoltaica y eólica para 5 localidades del norte de Chile que son: Tocopilla, Mejillones, Taltal, Chañaral y Caldera. Los datos se obtienen mediante información proporcionada por el explorador eólico y solar pertenecientes al Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, para luego realizar evaluaciones respecto a su potencial energético. Se destaca la localidad de Mejillones por tener la mayor radiación global incidente en un panel inclinado con un promedio anual de 6,2 [kWh/m²/día] y a la vez tener la velocidad promedio anual más alta de 5,5 [m/s].

Por medio de información proveniente de informes del Censo y recomendaciones de la OMS se logra determinar los consumos de agua potable para las poblaciones estudiadas, realizando una proyección de los consumos esperados para el horizonte de estudio de 20 años los cuales son incorporados en el análisis económico. Al horizonte de 20 años la localidad de mayor demanda de agua potable es Tocopilla con 3.672 [m³/día], mientras que la comuna Mejillones es la que presenta la menor demanda con 1.427 [m³/día].

Se identifican las poblaciones con las mayores disponibilidades energéticas eólicas y solar fotovoltaica, las cuales son seleccionadas de acuerdo a un índice de disponibilidad energética elaborado en base a los recursos energéticos renovables y que es igual al cociente entre la energía disponible por cada fuente y la demanda de agua correspondiente a cada localidad. Mientras mayor sea el índice, mayor será la disponibilidad de energías renovables para ser utilizadas en el proceso de desalinización, por lo tanto, menor será el aporte de energía proveniente de la red eléctrica. De acuerdo a éste índice la localidad de mayor disponibilidad energética corresponde a la comuna de Mejillones con un índice promedio anual eólico y solar de 1,72 [Wh/m³] y 4,26 [Wh/m³] respectivamente, mientras que la localidad de menor disponibilidad energética de acuerdo a el índice promedio anual eólico y solar es la comuna de Tocopilla con 0,02 [Wh/m³] y 1,46 [Wh/m³].

Se selecciona Mejillones como la comuna en la cual se proyectará la planta desalinizadora de osmosis inversa, debido a que presenta los mayores índices de disponibilidad energética por volumen de agua potable demandada.

Se realiza un análisis técnico de los sistemas energéticos y de osmosis inversa logrando especificar todos los equipos necesarios para realizar el proyecto de la planta de desalinización con apoyo de energías renovables eólica y solar fotovoltaica. Además, se realizan evaluaciones económicas con distintas configuraciones que dependen del consumo específico (CE) de energía del proceso de OI. Las configuraciones se rigen por el criterio establecido de integrar tres fuentes de energía: en primer lugar elegir un aerogenerador que no supere la potencia requerida de la planta de OI, cuantificar la cantidad de paneles fotovoltaicos que permitan aumentar el aporte solar sin sobrepasar la demanda de energía de la planta de OI y el déficit lo aporta la red eléctrica. Se trata de que el proceso de desalinización reciba el menor aporte de energía eléctrica proveniente de la red. Bajo estos criterios se evalúan económicamente distintas configuraciones propuestas y para distintos CE. Para valores de CE de 2,77 [kWh/m³], 2,89 [kWh/m³] y 3,06 [kWh/m³] se obtienen los mayores VAN de US\$ 2.446.639, US\$ 2.366.207 y US\$ 2.263.281 respectivamente, los cuales indican que el proyecto es viable económicamente. Para los tres CE se obtiene la selección del mismo aerogenerador modelo Aeronautica 29-225, con una cantidad de paneles fotovoltaicos de 452, 485 y 526 para los CE de 2,77 [kWh/m³], 2,89 [kWh/m³] y 3,06 [kWh/m³] respectivamente.

8 Bibliografía

- [1] Christian Santana O., «Energías Renovables en Chile - El potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé,» p. 6, 2014.
- [2] J. L. Cottier Primo, «Descripción de los procedimientos de instalación, operación y mantenimiento de la planta desalinizadora pilotodel proyecto IMPULSA IV; Viabilidad de incorporación de energía solar fotovoltaica en el sistema.,» Ciudad Universitaria, México, 2011.
- [3] Centro de Estudios de Puertos y Costas, «UMBRALES DE TOLERANCIA AL INCREMENTO DE SALINIDAD DE DIVERSAS ESPECIES MARINAS,» pp. 49,96, 2012.
- [4] M. Jean Guirguis, «Energy Recovery Devices in Seawater Reverse Osmosis Desalination Plants with Emphasis on Efficiency and Economical Analysis of Isobaric versus Centrifugal Devices,» p. 5, 2011.
- [5] Energy Recovery, «DESALINATION, PRODUCTS CATALOG,» p. 6.
- [6] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN (CHILE), «AGUA POTABLE - PARTE 1: REQUISITOS. NCH409/1: Of 1984.,» Santiago, Chile, 1984.
- [7] R. A. Bastianon, «CÁLCULO Y DISEÑO DE LA HÉLICE ÓPTIMA PATA TURBINAS EÓLICAS,» pp. 32-33, 2008.
- [8] Departamento de Geofísica - Universidad de Chile, «EXPLORADOR DE ENERGÍA EÓLICA,» [En línea]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>. [Último acceso: 18 octubre 2016].
- [9] Departamento de Geofísica - Universidad de Chile, «EXPLORADOR DE ENERGÍA SOLAR,» [En línea]. Available: <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar3/>. [Último acceso: 2016 octubre 2016].
- [10] L. F. Hernández Fernández, «Estudio de una instalación mixta, fotovoltaica y eólica, aplicada a una casa rural,» pp. 1, 54, 2012.
- [11] I. B. Sardinero, «Instalación solar fotovoltaica conectada a red sobre la azotea de una nave industrial,» pp. 20-26, 2009.
- [12] Francisco Blasco, «CALCULO INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA DE LA RED (OFF-GRID) PART 2 (CAMPO FOTOVOLTAICO: ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN): Solar Action,» 4 diciembre 2012.
- [13] P. A. Bassi Zepeda, «PROYECTO DE CENTRAL FOTOVOLTAICA-EÓLICA PARA UN MÁXIMO APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA RENOVABLE,» pp. 11-21, 2013.
- [14] A. A. Martínez Abarzúa, «ASPECTOS DE DISEÑO DE GENERADORES SINCRÓNICOS DE FLUJO AXIAL PARA LA APLICACIÓN EN AEROGENERADORES,» p. 25, 2012.
- [15] S. A. Lobos Opitz, «EVALUACIÓN DE FACTIBILIDAD DE TECNOLOGÍAS PARA DESALINIZAR AGUA, POR MEDIO DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA, EN EL NORTE DE CHILE.,» pp. 31, 98-99, 2015.

- [16] A. Torres-Degró, «Tasas de crecimiento población (r): Una mirada desde el modelo matemático lineal, geométrico y exponencial,» *CIDE digital*, pp. 142-160, 2011.
- [17] INE, «Censo 2012 Resultados XVIII Censo de Población,» Santiago de Chile, 2012.
- [18] INE, «Chile: Ciudades, Pueblos, Aldeas y Caseríos,» Santiago, 2005.
- [19] Ministerio de Energía - Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, «Explorador Solar para Autoconsumo - Manual de Usuario,» p. 1, 2016.
- [20] OMS, «Domestic Water Quantity, Service Level and Health,» p. iii, 2003.
- [21] W. Lai, Q. Ma, H. Lub, S. Weng, J. Fan y H. Fang, «Effects of wind intermittence and fluctuation on reverse osmosis desalination process and solution strategies,» *Desalination*, vol. 395, pp. 17-27, 2016.
- [22] F. Zaviska y L. Zou, «Using modelling approach to validate a bench scale forward osmosis pre-treatment process for desalination,» *Desalination*, vol. 350, pp. 1-13, 2014.
- [23] M. H. -. Suárez, «Guía para la remineralización de las aguas desaladas,» p. 23, 2009.
- [24] M. S. Peters, k. D. Timmerhaus y R. E. West, «Equipment Cost: Plant Design and Economics for Chemical Engineers,» Mc Gram Hill, [En línea]. Available: <http://www.mhhe.com/engcs/chemical/peters/data/>.
- [25] Ö. B. G. Murat Gökçek, «Technical and economic evaluation of freshwater production from a wind-powered small-scale seawater reverse osmosis system (WP-SWRO),» *Desalination*, vol. 381, pp. 47-57, 2016.
- [26] F. Petrakopoulou, «On the economics of stand-alone renewable hybrid power plants in remote regions,» *Energy Conversion and Management*, vol. 118, pp. 63-74, 2016.

Anexos

Anexo A: Tablas de recurso solar

Tabla A.1: Radiación solar interanual en Tocopilla (EP).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Directa (kWh/m²/día)	4,65	4,29	4,44	4,15	4,47	4,41	4,76	4,74	4,56	4,5	4,47	3,98
Difusa (kWh/m²/día)	0,98	1,08	1,07	1,05	1,03	1,05	0,97	0,98	1,01	1	1,03	1,03
Global (kWh/m²/día)	5,63	5,37	5,51	5,2	5,5	5,46	5,73	5,71	5,56	5,5	5,5	5,01

Tabla A.2: Radiación solar anual en Tocopilla (EP).

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m²/día)	4,46	6,69	6,28	5,43	4,04	2,94	2,15	2,09	2,48	3,48	4,95	6,13	6,84
Difusa (kWh/m²/día)	1,02	1,13	1,07	0,96	0,91	0,82	0,87	0,9	1,02	1,12	1,18	1,19	1,12
Global (kWh/m²/día)	5,48	7,82	7,34	6,38	4,95	3,77	3,02	3	3,5	4,6	6,13	7,32	7,96

Tabla A.3: Radiación solar interanual en Mejillones (EP).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Directa (kWh/m²/día)	5,44	5,27	5,25	5,34	5,36	5,31	5,41	5,39	5,35	5,35	5,28	5,25
Difusa (kWh/m²/día)	0,84	0,87	0,9	0,86	0,85	0,86	0,86	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86
Global (kWh/m²/día)	6,28	6,14	6,14	6,2	6,2	6,17	6,28	6,25	6,21	6,2	6,14	6,11

Tabla A.4: Radiación solar anual en Mejillones (EP).

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m²/día)	5,34	7,3	6,92	6,01	4,71	3,69	3	3,22	3,89	4,98	6,14	6,9	7,33
Difusa (kWh/m²/día)	0,86	1,03	0,97	0,88	0,8	0,68	0,67	0,67	0,78	0,88	0,96	1	1,02
Global (kWh/m²/día)	6,2	8,33	7,89	6,9	5,51	4,38	3,66	3,89	4,66	5,86	7,1	7,89	8,35

Tabla A.5: Radiación solar interanual en Taltal (EP).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Directa (kWh/m²/día)	4,42	4,1	4,17	4,44	4,48	4,22	4,53	4,65	4,58	4,55	4,28	4,11
Difusa (kWh/m²/día)	0,97	1,03	1,01	0,96	0,96	0,98	0,97	0,95	0,96	0,96	1	1,04
Global (kWh/m²/día)	5,39	5,12	5,18	5,4	5,44	5,2	5,5	5,6	5,54	5,51	5,28	5,15

Tabla A.6: Radiación solar anual en Taltal (EP).

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m²/día)	4,38	6,8	6,36	5,1	3,68	2,71	2,22	2,45	2,94	3,78	4,49	5,54	6,55
Difusa (kWh/m²/día)	0,98	1,13	1,04	0,97	0,91	0,79	0,74	0,76	0,89	1,03	1,17	1,21	1,16
Global (kWh/m²/día)	5,37	7,93	7,4	6,07	4,59	3,5	2,97	3,21	3,82	4,81	5,67	6,75	7,71

Tabla A.7: Radiación solar interanual en Chañaral (EP).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Directa (kWh/m²/día)	4,77	4,66	4,65	4,93	5,01	4,49	4,85	4,77	4,92	4,86	4,71	3,92
Difusa (kWh/m²/día)	0,86	0,89	0,89	0,85	0,84	0,88	0,87	0,88	0,87	0,87	0,89	0,94
Global (kWh/m²/día)	5,63	5,55	5,54	5,77	5,86	5,37	5,72	5,65	5,78	5,73	5,59	4,86

Tabla A.8: Radiación solar anual en Chañaral (EP).

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m²/día)	4,72	6,48	6,26	5,21	4	3,13	2,87	3,06	3,66	4,57	5,16	5,82	6,4
Difusa (kWh/m²/día)	0,88	1,09	0,98	0,89	0,79	0,67	0,62	0,63	0,75	0,89	1,03	1,1	1,08
Global (kWh/m²/día)	5,59	7,57	7,24	6,1	4,79	3,8	3,48	3,69	4,41	5,46	6,19	6,92	7,48

Tabla A.9: Radiación solar interanual en Caldera (EP).

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Directa (kWh/m²/día)	4,24	4,21	4,1	4,31	4,47	3,88	4,3	4,4	4,46	4,31	4,14	4,13
Difusa (kWh/m²/día)	0,92	0,93	0,94	0,91	0,89	0,93	0,93	0,93	0,92	0,91	0,94	0,94
Global (kWh/m²/día)	5,16	5,15	5,05	5,22	5,36	4,81	5,23	5,33	5,38	5,22	5,08	5,07

Tabla A.10: Radiación solar anual en Caldera (EP).

	Promedio Anual	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Directa (kWh/m²/día)	4,25	6,05	5,88	4,62	3,38	2,63	2,45	2,69	3,33	4,12	4,78	5,1	6
Difusa (kWh/m²/día)	0,93	1,16	1,02	0,93	0,85	0,71	0,67	0,67	0,77	0,91	1,04	1,21	1,16
Global (kWh/m²/día)	5,18	7,21	6,9	5,55	4,23	3,34	3,12	3,37	4,1	5,03	5,82	6,31	7,16

Anexo B: Índice de disponibilidad energética para desalinizar agua.

Tabla B.1: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 26[m]de altura en Tocopilla (EP).

Tocopilla 26 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,242	0,206	0,198	0,149	0,117	0,91	0,93	0,109	0,138	0,190	0,220	0,247
Eólica [MWh]	11,0	9,9	9,4	9,1	5,4	5,2	7,9	4,4	5,2	9,3	7,6	7,9
TOTAL [MWh]	11,3	10,2	9,6	9,2	5,5	5,3	7,9	4,5	5,4	9,6	7,9	8,1
Índice [kWh/m ³]	0,10	0,09	0,08	0,08	0,05	0,05	0,07	0,04	0,05	0,08	0,07	0,07

Tabla B.2: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 57[m]de altura en Tocopilla (EP).

Tocopilla 57 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,242	0,206	0,198	0,149	0,117	0,91	0,93	0,109	0,138	0,190	0,220	0,247
Eólica [MWh]	14,9	15,5	12,9	10,7	6,6	7,6	7,9	5,4	6,4	12,9	10,7	11,0
TOTAL [MWh]	15,1	15,7	13,0	10,8	6,7	7,7	7,9	5,5	6,5	13,0	10,9	11,3
Índice [kWh/m ³]	0,13	0,14	0,12	0,10	0,06	0,07	0,07	0,05	0,06	0,12	0,10	0,10

Tabla B.3: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 76[m]de altura en Tocopilla (EP).

Tocopilla 76 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,242	0,206	0,198	0,149	0,117	0,91	0,93	0,109	0,138	0,190	0,220	0,247
Eólica [MWh]	17,1	17,7	14,9	10,7	7,9	9,1	7,9	5,4	7,6	14,9	10,7	12,9
TOTAL [MWh]	17,3	17,9	15,0	10,8	8,0	9,1	7,9	5,5	7,8	15,1	10,9	13,1
Índice [kWh/m ³]	0,15	0,16	0,13	0,10	0,07	0,08	0,07	0,05	0,07	0,13	0,10	0,12

Tabla B.4: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 96[m]de altura en Tocopilla (EP).

Tocopilla 96 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,242	0,206	0,198	0,149	0,117	0,91	0,93	0,109	0,138	0,190	0,220	0,247
Eólica [MWh]	19,6	17,7	17,1	10,7	9,4	10,7	6,6	5,4	7,6	14,8	12,4	14,9
TOTAL [MWh]	19,8	17,9	17,3	10,8	9,5	10,8	6,7	5,5	7,8	15,1	12,6	15,1
Índice [kWh/m ³]	0,17	0,16	0,15	0,10	0,08	0,09	0,06	0,05	0,07	0,13	0,11	0,13

Tabla B.5: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 26[m]de altura en Mejillones (EP).

Mejillones 26 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,258	0,221	0,215	0,166	0,136	0,111	0,122	0,144	0,177	0,221	0,238	0,260
Eólica [MWh]	103,7	151,9	190,6	133,5	103,7	184,4	147,6	120,0	116,1	138,0	93,0	103,7
TOTAL [MWh]	103,9	152,1	190,8	133,7	103,8	184,6	147,7	120,1	116,3	138,2	93,2	103,9
Índice [kWh/m ³]	2,35	3,44	4,31	3,02	2,35	4,17	3,34	2,72	2,63	3,13	2,11	2,35

Tabla B.6: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 57[m]de altura en Mejillones (EP).

Mejillones 57 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,258	0,221	0,215	0,166	0,136	0,111	0,122	0,144	0,177	0,221	0,238	0,260
Eólica [MWh]	111,7	161,9	241,2	173,4	111,7	220,5	202,6	120,1	133,5	157,7	100,4	103,7
TOTAL [MWh]	111,9	162,1	241,5	173,6	111,8	220,6	202,7	120,2	133,8	157,9	100,6	103,9
Índice [kWh/m ³]	2,53	3,66	5,46	3,92	2,53	4,99	4,58	2,72	3,02	3,57	2,27	2,35

Tabla B.7: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 76[m]de altura en Tocopilla (EP)

Mejillones 76 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,258	0,221	0,215	0,166	0,136	0,111	0,122	0,144	0,177	0,221	0,238	0,260
Eólica [MWh]	103,7	161,9	241,2	196,0	103,7	220,5	214,9	111,7	124,7	147,7	93,0	103,7
TOTAL [MWh]	103,9	162,1	241,5	196,2	103,8	220,6	215,1	111,8	124,9	147,9	93,3	103,9
Índice [kWh/m³]	2,35	3,66	5,45	4,43	2,34	4,98	4,86	2,52	2,82	3,34	2,10	2,35

Tabla B.8: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 96[m]de altura en Mejillones (EP).

Mejillones 96 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,258	0,221	0,215	0,166	0,136	0,111	0,122	0,144	0,177	0,221	0,238	0,260
Eólica [MWh]	103,7	161,9	241,2	196,0	96,1	220,5	214,9	103,7	116,2	147,7	93,0	103,7
TOTAL [MWh]	103,9	162,1	241,5	196,2	96,3	220,6	215,1	103,9	116,4	147,9	93,3	103,9
Índice [kWh/m³]	2,35	3,66	5,45	4,43	2,17	4,98	4,86	2,34	2,63	3,34	2,10	2,35

Tabla B.9: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 26[m]de altura en Taltal (EP).

Taltal 26 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,246	0,207	0,188	0,138	0,109	0,89	0,100	0,118	0,144	0,176	0,203	0,239
Eólica [MWh]	15,0	17,8	22,4	12,5	6,6	7,7	9,5	4,4	6,4	7,9	9,1	15,0
TOTAL [MWh]	15,2	18,0	22,6	12,7	6,7	7,8	9,6	4,6	6,6	8,1	9,3	15,2
Índice [kWh/m³]	0,24	0,29	0,36	0,20	0,11	0,12	0,15	0,07	0,10	0,13	0,15	0,24

Tabla B.10: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 57[m]de altura en Taltal (EP)

Taltal 57 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,246	0,207	0,188	0,138	0,109	0,89	0,100	0,118	0,144	0,176	0,203	0,239
Eólica [MWh]	17,3	22,9	28,5	12,5	6,6	7,7	9,5	5,5	6,4	9,5	10,8	17,3
TOTAL [MWh]	17,5	23,1	28,7	12,7	6,7	7,8	9,5	5,6	6,6	9,6	10,9	17,5
Índice [kWh/m³]	0,28	0,37	0,46	0,20	0,11	0,12	0,15	0,09	0,10	0,15	0,17	0,28

Tabla B.11: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 76[m]de altura en Taltal (EP)

Taltal 76 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,246	0,207	0,188	0,138	0,109	0,89	0,100	0,118	0,144	0,176	0,203	0,239
Eólica [MWh]	17,3	22,9	28,5	12,5	6,6	7,7	9,5	5,5	6,4	7,9	9,1	17,3
TOTAL [MWh]	17,5	23,1	28,7	12,7	6,7	7,8	9,6	5,6	6,6	8,1	9,3	17,5
Índice [kWh/m³]	0,28	0,37	0,46	0,20	0,11	0,12	0,15	0,09	0,10	0,13	0,15	0,28

Tabla B.12: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 96[m]de altura en Taltal (EP)

Taltal 96 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,246	0,207	0,188	0,138	0,109	0,89	0,100	0,118	0,144	0,176	0,203	0,239
Eólica [MWh]	17,3	22,9	28,5	12,5	6,6	9,1	9,5	4,4	6,4	7,9	9,1	15,0
TOTAL [MWh]	17,5	23,1	28,7	12,7	6,7	9,2	9,6	4,6	6,6	8,1	9,3	15,2
Índice [kWh/m³]	0,28	0,37	0,46	0,20	0,11	0,15	0,15	0,07	0,10	0,13	0,15	0,24

Tabla B.13. Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 26[m]de altura en Chañaral (EP).

Chañaral 26 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,235	0,203	0,189	0,144	0,118	0,104	0,114	0,137	0,164	0,192	0,208	0,232
Eólica [MWh]	104,6	117,3	104,6	67,8	53,5	56,8	64,2	64,2	73,8	96,9	93,8	112,6
TOTAL [MWh]	104,8	117,5	104,8	67,9	53,7	56,9	64,3	64,4	73,9	97,1	93,9	112,8
Índice [kWh/m ³]	1,63	1,83	1,63	1,05	0,83	0,88	1,00	1,00	1,15	1,51	1,46	1,75

Tabla B.14: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 57[m]de altura en Chañaral (EP).

Chañaral 57 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,235	0,203	0,189	0,144	0,118	0,104	0,114	0,137	0,164	0,192	0,208	0,232
Eólica [MWh]	112,6	125,7	112,6	73,8	58,7	62,1	70,1	64,2	80,1	96,9	93,8	121,0
TOTAL [MWh]	112,9	125,9	112,8	73,9	58,8	62,2	70,2	64,4	80,3	97,1	93,9	121,3
Índice [kWh/m ³]	1,75	1,96	1,75	1,15	0,91	0,97	1,09	1,00	1,25	1,51	1,46	1,89

Tabla B.15: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 76[m]de altura en Chañaral (EP).

Chañaral 76 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,235	0,203	0,189	0,144	0,118	0,104	0,114	0,137	0,164	0,192	0,208	0,232
Eólica [MWh]	112,6	125,7	112,6	73,8	58,7	62,1	70,1	64,2	80,1	96,9	93,8	121,0
TOTAL [MWh]	112,8	125,9	112,8	73,9	58,8	62,2	70,2	64,4	80,3	97,1	93,9	121,3
Índice [kWh/m ³]	1,75	1,96	1,75	1,15	0,91	0,97	1,09	1,00	1,25	1,51	1,46	1,89

Tabla B.16: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 96[m]de altura en Chañaral (EP).

Chañaral 96 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,235	0,203	0,189	0,144	0,118	0,104	0,114	0,137	0,164	0,192	0,208	0,232
Eólica [MWh]	112,6	125,7	112,6	67,8	58,7	62,1	70,1	58,7	73,8	96,9	93,8	121,0
TOTAL [MWh]	112,8	125,9	112,8	67,9	58,8	62,2	70,2	58,9	73,9	97,1	93,9	121,3
Índice [kWh/m ³]	1,75	1,96	1,75	1,05	0,91	0,97	1,09	0,91	1,15	1,51	1,46	1,89

Tabla B.17: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 26[m]de altura en Caldera (EP).

Caldera 26 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,224	0,193	0,172	0,127	0,104	0,94	0,104	0,127	0,151	0,180	0,189	0,222
Eólica [MWh]	53,5	68,9	70,1	56,8	32,2	38,6	58,7	35,9	47,1	53,5	42,7	76,2
TOTAL [MWh]	53,8	69,0	70,2	56,9	32,3	38,7	58,8	35,9	47,3	53,7	42,9	76,4
Índice [kWh/m ³]	0,73	0,94	0,95	0,77	0,44	0,52	0,80	0,49	0,64	0,73	0,58	1,04

Tabla B.18: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 57[m]de altura en Caldera (EP).

Caldera 57 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,224	0,193	0,172	0,127	0,104	0,94	0,104	0,127	0,151	0,180	0,189	0,222
Eólica [MWh]	64,2	80,9	76,2	56,8	35,9	42,7	64,2	44,1	51,8	58,7	47,1	89,7
TOTAL [MWh]	64,4	81,2	76,4	56,9	35,9	42,8	64,3	44,2	51,9	58,9	47,3	89,9
Índice [kWh/m ³]	0,88	1,10	1,04	0,77	0,49	0,58	0,87	0,60	0,70	0,80	0,64	1,22

Tabla B.19: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 76[m]de altura en Caldera (EP).

Caldera 76 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,224	0,193	0,172	0,127	0,104	0,94	0,104	0,127	0,151	0,180	0,189	0,222
Eólica [MWh]	64,2	87,5	82,8	56,8	35,9	47,1	64,2	44,1	51,8	58,7	47,1	89,7
TOTAL [MWh]	64,4	87,7	82,9	56,9	35,9	47,2	64,3	44,2	51,9	58,9	47,3	89,9
Índice [kWh/m ³]	0,88	1,19	1,13	0,77	0,49	0,64	0,87	0,60	0,70	0,80	0,64	1,22

Tabla B.20: Índice de energía disponible por volumen de agua a desalinizar a 96[m]de altura en Caldera (EP).

Caldera 96 [m]												
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Solar [MWh]	0,224	0,193	0,172	0,127	0,104	0,94	0,104	0,127	0,151	0,180	0,189	0,222
Eólica [MWh]	64,2	87,5	82,8	56,8	35,9	47,1	70,1	44,1	51,8	58,7	47,1	89,7
TOTAL [MWh]	64,4	87,7	82,9	56,9	35,9	47,2	70,2	44,2	51,9	58,9	47,3	89,9
Índice [kWh/m ³]	0,88	1,19	1,13	0,77	0,49	0,64	0,95	0,60	0,70	0,80	0,64	1,22

Anexo C: Estimación de Población

Por medio de una de la tasa de crecimiento que se muestra en la Tabla 4.2, se determina la población para todos los años de análisis para el proyecto de desalinización de osmosis inversa. Además, de muestra la demanda de agua diaria para el año correspondiente

Tabla C.1: Estimación de habitantes y demanda de agua a través de los años de estudio del año 2016 al 2026

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
Habitantes	10.391	10.557	10.726	10.897	11.072	11.249	11.429	11.611	11.797	11.986	12.177
Demanda de agua diaria [m ³]	1.039	1.056	1.073	1.090	1.107	1.125	1.143	1.161	1.180	1.199	1.218

Tabla C.2: Estimación de habitantes y demanda de agua a través de los años de estudio del año 2027 al 2036

Año	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Habitantes	12.372	12.570	12.771	12.975	13.183	13.393	13.608	13.825	14.046	14.271
Demanda de agua diaria [m ³]	1.237	1.257	1.277	1.298	1.318	1.339	1.361	1.383	1.405	1.427

Anexo D: Parámetros de operación

Filtro basket

Se aprecia la curva de pérdidas de carga para el filtro de malla de acero inoxidable (filtro basket) modelo FMA-2004. Se aprecia que para un caudal de 200 [m³/h] se producirá una pérdida de carga aproximada de 0,9[kg/cm²], lo que es equivalente:

$$\text{Pérdida de carga} = 0,8829[\text{bar}] \approx 1[\text{bar}]$$



Figura D.0.1: Diagrama de pérdida de carga para filtros basket con malla de INOX. 34 micras

Tanque Alimentación OI

Según la norma API se sugieren diámetros y alturas para tanques de almacenamiento de fluidos atmosféricos como muestra la Tabla D.1.

Tabla D.1: Dimensiones sugeridos por la Norma API 650

Capacidad [m ³]	Diámetro [m]	Altura [m]
79,5	4,6	5,5
159,0	6,1	5,5
318,0	7,5	7,3
476,9	9,1	7,3
794,9	9,7	11,0
1589,8	13,0	12,2
2384,7	17,7	9,8
3179,6	18,3	12,2
4769,4	22,4	12,2
8743,9	30,5	12,2
12718,4	36,6	12,2
15898,0	40,8	12,2
23847,0	45,7	14,6
31796,0	54,9	14,6
79490,0	85,3	14,6

Anexo E: Evaluación Económica

Costos Variables

Costo tratamientos químicos

Se estiman los costos asociados a todos los tratamientos químicos realizados a lo largo del proceso de OI, tanto, en el pretratamiento como post tratamiento según la ecuación (4.10)

Tabla E.1: Costos de tratamientos químicos en el horizonte de evaluación de 20 años

Año	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
Demanda de Agua [m³/h]	43,3	44,0	44,7	45,4	46,1	46,9	47,6	48,4	49,2	49,9
Costo anual de Químicos [US\$]	12.516	12.716	12.919	13.126	13.336	13.549	13.766	13.986	14.210	14.437

Año	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
Demanda de Agua [m³/h]	50,7	51,6	52,4	53,2	54,1	54,9	55,8	56,7	57,6	58,5	59,5
Costo anual de Químicos [US\$]	14.668	14.902	15.140	15.383	15.629	15.879	16.132	16.390	16.653	16.919	17.189

Precio del suministro eléctrico

La Tabla E.2 se muestra el consumo eléctrico en [kW] a lo largo del año para una potencia contratada de 164,5 [kW].

Tabla E.2: Consumo eléctrico horario a lo largo del año

Potencia aportada por Red (diferencia) [kW]												
Hora	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
0:00	106	102	110	83	94	66	43	44	70	76	102	133
1:00	123	105	120	101	111	78	55	57	86	106	121	143
2:00	130	118	123	107	111	93	68	79	108	121	138	150
3:00	140	126	131	113	121	101	73	96	117	131	143	153
4:00	146	130	133	112	126	106	74	107	123	132	147	157
5:00	147	128	133	108	129	109	80	110	130	131	155	156
6:00	145	128	132	103	123	108	83	112	127	128	151	154
7:00	138	116	122	94	122	104	82	113	123	119	145	144
8:00	135	116	121	86	110	103	84	111	113	116	138	136
9:00	128	119	114	96	114	106	94	120	121	117	124	126
10:00	115	110	106	95	122	110	105	128	112	107	106	112
11:00	88	84	81	87	111	105	98	118	90	85	82	90
12:00	70	50	45	64	97	93	76	94	67	64	58	68
13:00	48	27	12	39	84	78	50	70	50	41	48	57
14:00	50	18	0	35	72	51	45	63	47	45	54	61
15:00	61	27	1	44	70	47	46	61	49	45	66	65
16:00	55	35	11	50	84	51	44	73	66	51	81	63
17:00	64	27	24	53	96	54	39	81	83	60	91	68
18:00	74	31	41	39	92	44	29	79	85	49	88	65
19:00	74	38	47	18	92	57	12	69	82	35	81	69
20:00	89	65	43	13	102	58	20	49	72	34	75	81
21:00	88	84	54	30	94	55	22	24	57	23	74	86
22:00	89	93	75	52	95	57	35	27	50	39	57	93
23:00	93	97	103	84	84	63	36	40	65	48	77	114

Se entenderá que la potencia contratada o la demanda máxima leída está siendo usada manifiestamente durante las horas de punta, cuando se cumple la ecuación (E.1):

$$\frac{\text{Demanda media en hora punta}}{\text{Potencia Contratada BT2}} \geq 0,5 \quad (\text{E.1})$$

Se entenderá que la potencia contratada o demanda máxima leída está siendo usada parcialmente durante las horas de punta, cuando se cumple la ecuación (E.2):

$$\frac{\text{Demanda media en hora punta}}{\text{Potencia Contratada BT2}} < 0,5 \quad (\text{E.2})$$

Por lo tanto, considerando las ecuaciones (E.1) y (E.2) se clasifica el periodo mensual como presente en PUNTA o PARCIALMENTE como indica la Tabla E.3 a partir del consumo en hora punta destacado en amarillo en la Tabla E.2. La demanda media en hora punta es el promedio del consumo en hora punta (5 horas).

Tabla E.3: Resumen de consumo y costos asociados a consumo eléctrico de tarifa BT2

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN
kWh punta	414	310	260	152	476	270
Demanda media en horas punta [kWh]	83	62	52	30	95	54
	0,50	0,38	0,32	0,19	0,58	0,33
Presente PUNTA/PARCIAL	PUNTA	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL	PUNTA	PARCIAL
Costos por electricidad mensual [US\$]	11.445	8.310	8.647	7.887	11.644	8.492
Costos Electricidad Anual [US\$]	110.992					

	JUL	AGOS	SEPT	OCT	NOV	DIC
kWh punta	117	248	346	179	375	395
Demanda media en horas punta [kWh]	23	50	69	36	75	79
	0,14	0,30	0,42	0,22	0,46	0,48
Presente PUNTA/PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL	PARCIAL
Costos por electricidad mensual [US\$]	7.024	8.788	9.116	8.718	10.097	10.822
Costos Electricidad Anual [US\$]						

El costo anual por concepto de tratamientos químicos es US\$ 110.992.

Tabla E.4: Tarifa eléctrica del distribuidor Elecda para Mejillones²⁷

BT2 - Tarifa de Potencia Controlada	Baja tensión (<400kW)	
	[\$] pesos	US\$
Cargo Fijo [\$/cliente]	1.130,64	1,688
Cargo Único por Uso del Sistema Troncal [\$/kWh]	2,218	0,003
Cargo Energía [\$/kWh]	68,709	0,103
Cargo Potencia Parcialmente Presente en Punta [\$/kW]	10.044,30	14,991
Cargo Potencia Presente en Punta [\$/kW]	14.596,90	21,786

Luego calculando el costo por electricidad para el mes de enero se observa que está clasificado como presente en PUNTA, por lo tanto, el costo para ese mes es:

$$\text{Costo mensual enero} = (\text{Consumo mensual}[kWh] \cdot (0,003 + 0,103) \cdot 31[\text{días}]) + (\text{Potencia}_{\text{contratada}}[kW] \cdot 21,786) + 1,688$$

Reemplazando los valores:

$$\begin{aligned} \text{Costo mensual enero} \\ &= (2395[kWh] \cdot (0,003 + 0,103) \cdot 31[\text{días}]) + (164,5[kW] \cdot 21,786) \\ &+ 1,688 \end{aligned}$$

Finalmente, el costo del consumo eléctrico para el mes de enero es de US\$11.455,5

Costo de Terreno

Se empleó la superficie requerida por los paneles fotovoltaicos, dado que es la superficie de mayor relevancia de la planta de osmosis inversa abastecida con energías eólica, solar y apoyo de la red eléctrica.

Tabla E.5: Costo del terreno en Mejillones ²⁸

Lugar	\$/m ²	US\$/m ²
Mejillones	10.612	15,8

²⁷ Fuente: ELECDA, <http://www.elecda.cl/wp-content/uploads/descargables/tarifas-hogar/elecda/tarifas-de-suministros/Tarifas-de-Suninistro-Elecda-2016-02-01.pdf>

²⁸ Fuente: SII, http://www.sii.cl/portales/reavaluo_no_edificados/2015/planos/index.html

Flujo de Caja

Correspondiente a un precio de venta de 4,22 [US\$/m³] y un consumo específico de 2,77[kWh/m³]

	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026
ITEM	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10
INGRESOS OPERACIONALES		1626	1652	1679	1705	1733	1760	1788	1817	1846	1876
Ventas Locales		1626	1652	1679	1705	1733	1760	1788	1817	1846	1876
COSTOS VARIABLES		147	147	147	148	148	148	148	148	149	149
Costo de Producción		147	147	147	148	148	148	148	148	149	149
Energía eléctrica bombas		134	134	134	134	134	134	134	134	134	134
Costo Tratamiento Químicos		13	13	13	13	14	14	14	14	14	15
MARGEN CONTRIBUCIÓN		1479	1505	1531	1558	1585	1612	1640	1669	1697	1727
MARGEN CONTRIBUCIÓN %		91%	91%	91%	91%	91%	92%	92%	92%	92%	92%
COSTOS FIJOS		518	518	518	589	518	518	518	589	518	518
Costos Personal		515	515	515	515	515	515	515	515	515	515
Reemplazo Membranas		0	0	0	71	0	0	0	71	0	0
Mantenimiento Aerogenerador		3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
EBITDA		961	987	1013	968	1067	1094	1122	1079	1179	1209
EBITDA %		59%	60%	60%	57%	62%	62%	63%	59%	64%	64%
Depreciación y Amortizaciones		250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO		711	737	763	718	816	844	872	829	929	958
Impuesto		135	140	145	136	155	160	166	158	177	182
UTILIDAD DESPUÉS IMPUESTO		576	597	618	582	661	684	706	671	753	776
UTILIDAD DESPUÉS IMPUESTO %		35%	36%	37%	34%	38%	39%	39%	37%	41%	41%
Depreciación y Amortizaciones		250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
INVERSIONES	5734	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Terrenos	26										
Inversión en Infraestructura / Obras	703										
Inversión en Equipamiento / Maquinaria	5005										
FLUJO DE CAJA NETO	-5734	826	847	868	832	912	934	956	922	1003	1027
FLUJO DE CAJA NETO ACUMULADO	-5734	-4908	-\$ 4.061	-\$ 3.193	-\$ 2.361	-\$ 1.449	-\$ 516	\$ 441	\$ 1.363	\$ 2.366	\$ 3.392
	-5734	751	700	652	568	566	527	491	430	425	396
Tasa de Descuento	0,10										
VAN	\$ 2.447										
Valor Euro (pesos)	702										
Valor dólar (pesos)	670										
Libra esterlina [US\$]	1,2										
Precio venta del agua [US\$]	4,22										
Consumo Específico	2,77										

Continúa en la otra hoja

	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
ITEM	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15	Año 16	Año 17	Año 18	Año 19	Año 20
INGRESOS OPERACIONALES	1906	1936	1967	1999	2031	2063	2096	2130	2164	2198
Ventas Locales	1906	1936	1967	1999	2031	2063	2096	2130	2164	2198
COSTOS VARIABLES	149	149	150	150	150	150	151	151	151	151
Costo de Producción	149	149	150	150	150	150	151	151	151	151
Energía eléctrica bombas	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134
Costo Tratamiento Químicos	15	15	15	16	16	16	16	17	17	17
MARGEN CONTRIBUCIÓN	1756	1787	1817	1849	1880	1913	1945	1979	2012	2047
MARGEN CONTRIBUCIÓN %	92%	92%	92%	92%	93%	93%	93%	93%	93%	93%
COSTOS FIJOS	518	589	518	518	518	589	518	518	518	589
Costos Personal	515	515	515	515	515	515	515	515	515	515
Reemplazo Membranas	0	71	0	0	0	71	0	0	0	71
Mantenimiento Aerogenerador	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
EBITDA	1238	1197	1299	1331	1362	1323	1427	1460	1494	1457
EBITDA %	65%	62%	66%	67%	67%	64%	68%	69%	69%	66%
Depreciación y Amortizaciones	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
UTILIDAD ANTES DE IMPUESTO	988	947	1049	1080	1112	1073	1177	1210	1244	1207
Impuesto	188	180	199	205	211	204	224	230	236	229
UTILIDAD DESPUÉS IMPUESTO	800	767	850	875	901	869	953	980	1008	978
UTILIDAD DESPUÉS IMPUESTO %	42%	40%	43%	44%	44%	42%	45%	46%	47%	44%
Depreciación y Amortizaciones	250	250	250	250	250	250	250	250	250	250
INVERSIONES	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inversión en Terrenos										
Inversión en Infraestructura / Obras										
Inversión en Equipamiento / Maquinaria										
FLUJO DE CAJA NETO	1051	1017	1100	1125	1151	1119	1204	1231	1258	1228
FLUJO DE CAJA NETO ACUMULADO	\$ 4.443	\$ 5.460	\$ 6.560	\$ 7.686	\$ 8.837	\$ 9.956	\$ 11.160	\$ 12.390	\$ 13.648	\$ 14.876
	368	324	319	296	276	244	238	221	206	183

Precios de aerogeneradores

Tabla E.6: Precio de distintos modelos de aerogeneradores

Modelo	Precio por turbina [US\$]	Fuente
Enercon E-33 - 330 kW	867.405	²⁹
Aeronautica 29-225	580.000	³⁰
PowerWorks WEG MS-2	518.750	³⁰
Windflow 500	1.037.500	³⁰
PowerWorks WEG MS-2	518.750	³⁰

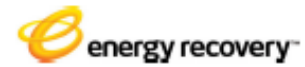
²⁹ <http://westpenninesprotectiontrust.co.uk/wp-content/uploads/2012/06/PDF-101106-Enercon-E33-Flyer-energy-production-return-claimed.pdf>

³⁰ RENEWABLE ENERGY TECHNOLOGIES: COST ANALYSIS SERIES

Anexo F: Cotización

Bomba HP

Energy Recovery Inc



Quotation

09 Mar 2017

Sebastian Villegas

Quotation number:

JM-170309-057

Attn: Sebastian Villegas

Revision:

00

Project: 1440 m3day - Solar power

Your reference:

We thank you for your above referenced inquiry, and are pleased to submit our quotation for your consideration.

Please see the next page for a summary of our offer. Full details can be found in subsequent pages.

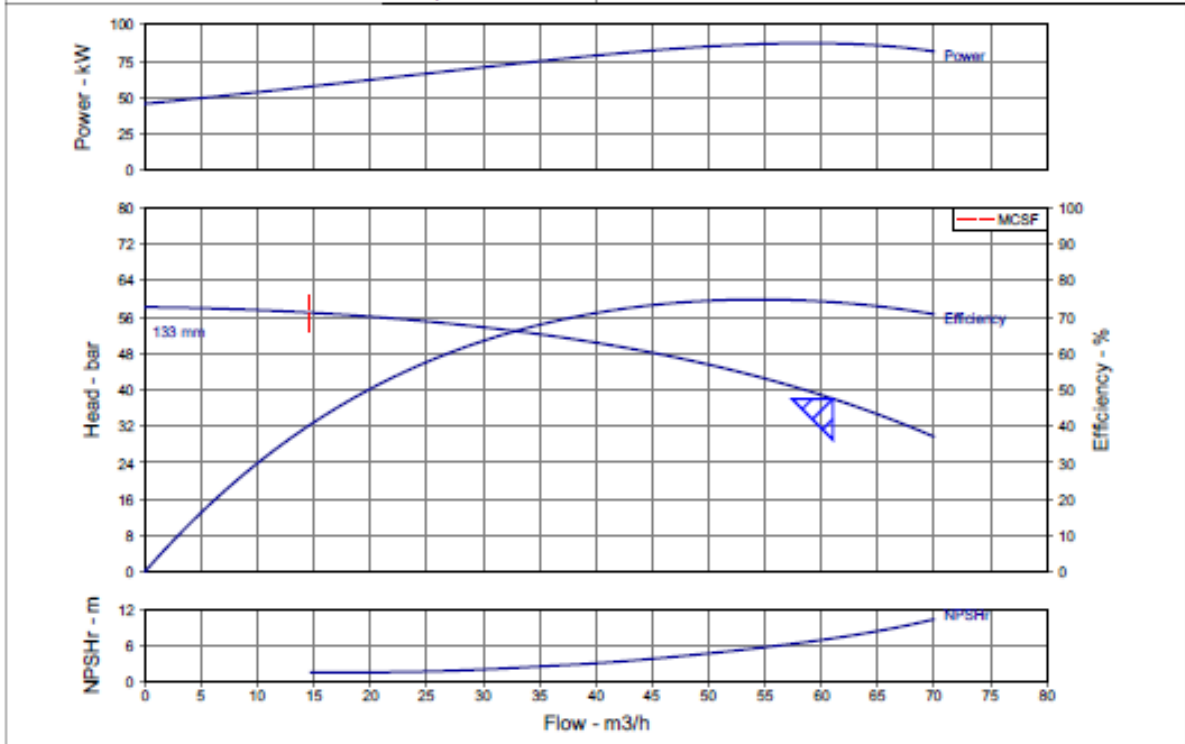
We hope you find our quotation in line with your requirements. However, if you have any questions, please do not hesitate to contact us.

Sincerely,

Juan Pinto
Energy Recovery Inc
Email: jmpinto@energyrecovery.com

Pump Performance Datasheet

Customer : Sebastian Villegas Customer reference : Item number : 001 Service : Quantity : 1	Quote number : JM-170309-057 Size : 2x3x5-C Stages : 21 Based on curve number : 2x3x5-C Date last saved : 09 Mar 2017 8:45 AM
Operating Conditions	
Flow, rated : 61.00 m ³ /h Differential head / pressure, rated (requested) : 38.00 bar Differential head / pressure, rated (actual) : 38.06 bar Suction pressure, rated / max : 0.00 / 0.00 bar.g NPSH available, rated : Ample Frequency : 60 Hz	Liquid Liquid type : Sea Water Additional liquid description : Solids diameter, max : 0.00 mm Solids concentration, by volume : 0.00 % Temperature, max : 20.00 deg C Fluid density, rated / max : 1.026 / 1.026 kg/dm ³ Viscosity, rated : 1.05 cSt Vapor pressure, rated : 0.07 bar.a
Performance	
Speed, rated : 3383 rpm Impeller diameter, rated : 133 mm Impeller diameter, maximum : 133 mm Impeller diameter, minimum : 133 mm Efficiency : 74.11 % NPSH required / margin required : 7.24 / 0.00 m nq (imp. eye flow) / S (imp. eye flow) : 44 / 113 Metric units MCSF : 14.66 m ³ /h Head, maximum, rated diameter : 58.18 bar Head rise to shutoff : 52.85 % Flow, best eff. point : 64.43 m ³ /h Flow ratio, rated / BEP : 112.07 % Diameter ratio (rated / max) : 100.00 % Head ratio (rated dia / max dia) : 100.00 % Cq/Ch/Ce/Cn [ANSI/HI 9.6.7-2010] : 1.00 / 1.00 / 1.00 / 1.00 Selection status : Acceptable	Material Material selected : Standard Pressure Data Maximum working pressure : 58.18 bar.g Maximum allowable working pressure : N/A Maximum allowable suction pressure : N/A Hydrostatic test pressure : N/A Driver & Power Data (@Max density) Driver sizing specification : API 610 / ISO 13709 Margin over specification : 0.00 % Service factor : 1.00 Power, hydraulic : 64.49 kW Power, rated : 67.03 kW Power, maximum, rated diameter : 67.20 kW



Intercambiador de Presión y Bomba Booster



COMMERCIAL PROPOSAL

Proposal ref. number JM-170309-057-00

Price Listings	# Units / Trials	# RO Parts	Discounted Unit Price	Total Qty of Units	Total Discounted Price
Product					
PX Assembly Model					
PX-220 Pressure Exchanger energy recovery devices, installation manual and dimensioned drawings.	3	1	\$ 34,965.00	3	\$ 104,895.00
Booster Pump Model					
VP-4671 PX Booster Pump 40 HP motor	1	1	\$ 47,000.00	1	\$ 47,000.00
Spare Parts, Tools & Kits					
20014-01 65-Series Spare Parts Kit	1	1	\$ 111.38	1	\$ 111.38
20000-01 65-Series Tool Kit	1	1	\$ 357.39	1	\$ 357.39
					Discount Price
Total Price in US DOLLAR, EX-FACTORY					\$ 152,363.77
Shipping Cost					\$ -
Insurance					\$ -
Total Price INCOTERM + DESTINATION					\$ 152,363.77

Delivery Time: (Lead Time starts counting upon the receipt of Signed Sales Order Confirmation.)

Pressure Exchanger: 10 weeks
 Booster Pump: 20 weeks

Terms of payment

International Orders: Credit approval needed on credit terms other than L/C At Sight and Prepaid. Price does not include customs legalization, shipping (Unless agreed above), taxes, or duties. ERI standard packing is included. Orders processed but not taken possession of by Buyer by delivery date may be subject to warehousing fee or returned to inventory.

Notes

Please indicate quotation number on your P.O when you place the order.

Filtro Multimedia



2230 S. Huron Dr., Santa Ana, CA 92704 USA
 Tel: (714) 432-9996 | Fax: (714) 432-9898
 sales@pureaqua.com | www.pureaqua.com

QUOTATION 85039-0

December 15, 2016
 Prepared by: May Higazy

Company: Sebastian Villagran	Country: Chile
Name: Sebastian Villagran	Phone: 56993824807
Email: sebastian.villagran2@gmail.com	Fax:

Qty	Part No.	Description	Unit Price (\$)	Ext Price (\$)
1	MLF78-A	78" Steel Tank Multimedia Filter complete with media, Valve, 4" Pipe size, 220V/1pH/50Hz	\$27,193.00	\$27,193.00
1	TT	Wire Transfer Fee	\$35.00	\$35.00

Terms and Conditions	
Payment:	Wire Transfer
Lead Time:	10-12 weeks
Validity:	30 days
FRT Terms:	Exworks Santa Ana, CA – USA

Sub Total:	\$27,228.00
Discount 0%:	\$0.00
Tax 0%:	\$0.00
Freight:	\$0.00
Total (USD):	\$27,228.00

Please note that above quote does not include shipping charges.
 No Credit Card payments, Just Check or Wire Transfer .

Filtro Microcartucho



2230 S. Huron Dr., Santa Ana, CA 92704 USA
 Tel: (714) 432-9996 | Fax: (714) 432-9898
 sales@pureaqua.com | www.pureaqua.com

QUOTATION 86566-1

February 5, 2017
 Prepared by: May Higazy

Company: Sebastian Villagran	Country: Chile
Name: Sebastian Villagran	Phone: 56993824807
Email: sebastian.villagran2@gmail.com	Fax:

Qty	Part No.	Description	Unit Price (\$)	Ext Price (\$)
3	CDS120-2	Chemical Dosing System, 120 GPD, Adjustable metering pump, Polyethylene solution tank, Manual, 220V/1pH/50Hz	\$1,500.00	\$4,500.00
1	252EFCF4-8FC150	FRP Filter Vessel for 63 x 40" cartridges and can be fitted with 8" I/O Flanges	\$19,950.00	\$19,950.00
63	PA-405	2.5"x40" 5 micron cartridges	\$6.00	\$378.00
1	TT	Wire Transfer Fee	\$35.00	\$35.00

Terms and Conditions	
Payment:	50% down/50% at shipping
Lead Time:	4-6 weeks
Validity:	30 days
FRT Terms:	Exworks Santa Ana, CA – USA

Sub Total:	\$24,863.00
Discount 0%:	\$0.00
Tax 0%:	\$0.00
Freight:	\$0.00
Total (USD):	\$24,863.00

No Credit Card Payments, Only Check or Wire Transfer.

Sistema de Ultra Filtración



2230 S. Huron Dr., Santa Ana, CA 92704 USA

Tel: (714) 432-9996 | Fax: (714) 432-9898

sales@pureaqua.com | www.pureaqua.com

QUOTATION 86248-0

January 15, 2017

Prepared by: May Higazy

Company: Sebastian Villagran	Country: Chile
Name: Sebastian Villagran	Phone: 56993824807
Email: sebastian.villagran2@gmail.com	Fax:

Qty	Part No.	Description	Unit Price (\$)	Ext Price (\$)
4800 m3/day SW ultra filtration system				
1	CDS120-2	Prechlorination Dosing System, 120 GPD, Adjustable Metering Pump, Polyethylene Solution Tank, Manual, 220V/1ph/50Hz	\$1,041.00	\$1,041.00
1	ZC-2	UF Feed Pump , 380V/3Ph/50Hz, Ampco Duplex SS, 1 duty with 50 HP motor	\$25,500.00	\$25,500.00
1	UF-24	Ultra Filtration (UF) System designed to produce 4800 m3/day, 24 UF modules (Filmtec 2880, HydranauticsMAX 80 or equal), automatic filter screen, includes GF Signet instrumentation (PT and FT), PVC sched. 80 piping, electrically actuated butterfly valves (PVC), all on carbon steel powder coated skid, Siemens S7 -1200 PLC w/6" HMI, etc.	\$292,700.00	\$292,700.00
1	CEB #1	Chemical Enhanced Backwash - Acid (Fe)	\$5,800.00	\$5,800.00
1	CEB#2	Chemical Enhanced Backwash - Alkali (TOC)	\$4,250.00	\$4,250.00
1	CEB#3	Chemical Enhanced Backwash - Oxidant (TOC)	\$4,250.00	\$4,250.00
1	UF-CS8	UF cleaning Skid, complete with pump, cartridge filter housing, PP tank, 380V/3ph/50Hz	\$19,500.00	\$19,500.00

Note: Air blower needed for air scouring to be supplied by others.

Note: Will confirm design upon receiving your water analysis

Terms and Conditions	
Payment:	50% down/50% at shipping
Lead Time:	16-18 weeks
Validity:	30 days
FRT Terms:	Exworks Santa Ana, CA – USA

Sub Total:	\$353,041.00
Discount 0%:	\$0.00
Tax 0%:	\$0.00
Freight:	\$0.00
Total (USD):	\$353,041.00

No Credit Card Payments, Only Check or Wire Transfers.