

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

TESIS DE TÍTULO Y MAGÍSTER

**HERRAMIENTA COMPUTACIONAL
PARA EL DISEÑO A MÍNIMO COSTO DE
UN SISTEMA DE DESALACIÓN DE
AGUA DE MAR PARA LOCALIDADES
COSTERAS USANDO ENERGIA SOLAR**

Autor:

Luciano Orlando
Bobadilla Riquelme

Profesores guía:

Dafne Crutchik Pedemonte
Luis Gutiérrez Lagos

*Tesis para optar al título de Ingeniería Civil en Energía y Medioambiente y al grado de
Magíster en Ciencias de la Ingeniería en Energía y Medioambiente*

de la

Facultad de Ingeniería y Ciencias

21 de Septiembre de 2022

UAI

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y
CIENCIAS

UNIVERSIDAD ADOLFO IBÁÑEZ

Resumen

Facultad de Ingeniería y Ciencias

Ingeniería Civil en Energía y Medioambiente y
al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería en Energía y Medioambiente

HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL DISEÑO A MÍNIMO COSTO DE UN SISTEMA DE DESALACIÓN DE AGUA DE MAR PARA LOCALIDADES COSTERAS USANDO ENERGIA SOLAR

por Luciano Orlando Bobadilla Riquelme

La escasez hídrica, la sequía y el cambio climático han generado la necesidad de desarrollar e implementar nuevas tecnologías que nos permitan abastecer a la población con agua potable, de una manera sustentable con el medioambiente.

Con este enfoque, se buscó proponer una herramienta computacional para el diseño a mínimo costo de un sistema de potabilización de agua de mar para localidades costeras usando energía solar.

Para lograr este objetivo, se realizó una investigación sobre las distintas tecnologías de tratamiento de agua de mar y sistemas de bombeo alimentados por energía solar. En base a esta información se diseñó y modelo matemáticamente un sistema de potabilización de agua de mar con uso de membranas de osmosis inversa, impulsado por un sistema solar fotovoltaico.

Para evaluar el proyecto previamente descrito, se desarrolló un código en Python, utilizando el solver de optimización Gurobi, que permite simular el comportamiento del sistema obteniendo el precio mínimo del agua a tratar para que el proyecto sea viable.

Los resultados obtenidos en los casos de estudio muestran que se pudo desarrollar una herramienta que permite evaluar de manera satisfactoria la factibilidad técnica y económica de proyectos de potabilización de agua de mar, entregando que estos proyectos son más convenientes en zonas rurales costeras con alta radiación solar, llegando a ser competitivos con los camiones aljibe.

Finalmente, se propone incorporar e implementar el uso de baterías como método de almacenamiento y la combinación de más fuentes de energía como el uso de un sistema híbrido eólico-solar para reducir los costos, haciendo más asequible y sustentable el proyecto estudiado.

Palabras clave: Desalación de agua de mar, modelamiento matemático, sistema de membranas, sistema fotovoltaico, sistema de bombeo.

ÍNDICE GENERAL

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	1
2. INTRODUCCIÓN.....	5
2.1. IMPORTANCIA DEL AGUA	5
2.2. IMPACTO DE LA ESCASEZ HÍDRICA.....	6
2.3. ¿CÓMO SE ENFRENTA ESTA PROBLEMÁTICA?	7
2.4. SITUACIÓN ACTUAL DE ZONAS RURALES EN CHILE.....	8
3. ESTADO DEL ARTE	11
3.1. MÉTODOS DE DESALACIÓN	11
3.1.1. Filtración por membranas.....	11
3.1.1.1. Ósmosis inversa (OI).....	11
3.1.1.2. Nanofiltración.....	12
3.1.1.3. Electrodialisis	12
3.1.2. Destilación	13
3.1.2.1. Evaporación instantánea multietapa (MSF)	13
3.1.2.2. Destilación multiefecto (MED)	14
3.2. MÉTODOS DE BOMBEO.....	15
3.2.1. Electrobombas.....	16
3.2.1.1. Centrífugas.....	16
3.2.1.2. Periféricas.....	16
3.2.2. Motobombas.....	16
3.3. MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE ENERGÍA SOLAR.....	17
3.3.1. Paneles fotovoltaicos (PV).....	17
3.3.2. Energía solar térmica	19
3.4. SISTEMA PROPUESTO	19
3.4.1. Selección del método de tratamiento del agua.....	20
3.4.2. Selección del método de bombeo.....	20
3.4.3. Selección del método de abastecimiento energético.....	21
3.4.4. Resumen del sistema propuesto	22
3.5. PROYECTOS EN DESARROLLO	23
3.5.1. En el mundo.....	23
3.5.2. En Chile	23
3.6. PATENTES Y REGISTROS DE PROPIEDAD INTELECTUAL	24
3.7. REGLAMENTOS Y NORMAS.....	25
3.7.1. Normativa del bombeo solar	25
3.7.2. Normativa de calidad del agua.....	27
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	29
4.1. HIPÓTESIS.....	29
4.2. OBJETIVO GENERAL.....	29
4.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
4.3.1. Estudio de sistemas de desalación	29
4.3.2. Plantear el sistema de desalación.....	29
4.3.3. Recopilación de información.....	30
4.3.4. Desarrollo del código	30
4.3.5. Análisis comparativos.....	30
5. METODOLOGÍA	31
5.1. INVESTIGACIÓN INICIAL.....	31

5.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA MATEMÁTICO DE OPTIMIZACIÓN	32
5.2.1. Valores de entrada y parámetros generales.....	32
5.2.2. Sistema de bombeo	33
5.2.2.1. Parámetros	33
5.2.2.2. Variables y ecuaciones	33
5.2.3. Sistema de tratamiento del agua de mar	35
5.2.3.1. Parámetros	35
5.2.3.2. Variables y ecuaciones	36
5.2.4. Sistema fotovoltaico	37
5.2.4.1. Parámetros	37
5.2.4.2. Variables y ecuaciones	38
5.3. COSTOS DEL SISTEMA.....	39
5.3.1. Sistema de bombeo	39
5.3.1.1. Parámetros	39
5.3.1.2. Variables y ecuaciones	40
5.3.2. Sistema de tratamiento del agua de mar	40
5.3.2.1. Parámetros	40
5.3.2.2. Variables y ecuaciones	41
5.3.3. Sistema fotovoltaico	42
5.3.3.1. Parámetros	42
5.3.3.2. Variables y ecuaciones	42
5.4. DISEÑO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL SISTEMA.....	43
5.5. OPTIMIZACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA DEL SISTEMA.....	43
5.6. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y COSTO-EFECTIVIDAD DEL PROYECTO.....	44
6. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE CASOS DE ESTUDIO	45
6.1. SENSIBILIDAD SOBRE UNA VARIABLE DE ENTRADA	46
6.1.1. Población abastecida.....	46
6.1.2. Distancia horizontal y vertical (altura)	46
6.2. EQUIPOS DE SEGUNDA VIDA.....	47
6.2.1. Paneles fotovoltaicos.....	48
6.2.2. Membranas de osmosis inversa	48
6.3. SENSIBILIDAD SOBRE DOS VARIABLES DE ENTRADA.....	49
6.3.1. Población abastecida y distancia horizontal	49
6.3.2. Población abastecida y altura.....	50
6.3.3. Distancia horizontal y altura	52
6.4. CASOS DE ESTUDIO	53
7. CONCLUSIONES.....	57
8. BIBLIOGRAFÍA	59
9. APÉNDICES:.....	65
9.1. CÓDIGO PYTHON: SIMULACIÓN CHUNGUNGO.....	65
9.2. CÓDIGO PYTHON: SIMULACIÓN LA HIGUERA	75
9.3. CÓDIGO DE PYTHON: SENSIBILIDAD SOBRE UNA VARIABLE DE ENTRADA.....	86
9.4. CÓDIGO DE PYTHON: EQUIPOS DE SEGUNDA VIDA.....	96
9.5. CÓDIGO DE PYTHON: SENSIBILIDAD SOBRE DOS VARIABLES DE ENTRADA.....	118
10. ANEXOS.....	130
10.1. NORMA NCH409.....	130
10.2. EJEMPLOS DE COSTOS DE TUBERÍAS	132
10.3. EJEMPLOS DE COSTOS DE ESTACIÓN DE BOMBEO	132
10.4. EJEMPLOS DE COSTOS DE SISTEMA DE IMPULSIÓN	132
10.5. EJEMPLOS DE COSTOS DE MANTENCIÓN SISTEMA DE IMPULSIÓN	133

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 3.1. <i>COMPARACIÓN DE LAS DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE DESALACIÓN</i> ⁴⁸	20
TABLA 3.2. <i>LÍMITES DE LA NORMA NCH409.</i>	28
TABLA 5.1. <i>PARÁMETROS DIMENSIONAMIENTO SISTEMA DE BOMBEO.</i>	33
TABLA 5.2. <i>ECUACIONES SISTEMA DE BOMBEO.</i>	34
TABLA 5.2. CONTINUACIÓN. <i>ECUACIONES SISTEMA DE BOMBEO.</i>	35
TABLA 5.3. <i>PARÁMETROS DIMENSIONAMIENTO SISTEMA DE TRATAMIENTO</i>	36
TABLA 5.4. <i>ECUACIONES SISTEMA DE TRATAMIENTO.</i>	36
TABLA 5.4. CONTINUACIÓN. <i>ECUACIONES SISTEMA DE TRATAMIENTO.</i>	37
TABLA 5.5. <i>PARÁMETROS DIMENSIONAMIENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO</i>	37
TABLA 5.6. <i>ECUACIONES SISTEMA FOTOVOLTAICO.</i>	38
TABLA 5.7. <i>PARÁMETROS COSTOS SISTEMA DE BOMBEO.</i>	39
TABLA 5.8. <i>COSTOS SISTEMA DE BOMBEO.</i>	40
TABLA 5.9. <i>PARÁMETROS COSTOS SISTEMA DE TRATAMIENTO.</i>	41
TABLA 5.10. <i>COSTOS SISTEMA DE TRATAMIENTO.</i>	41
TABLA 5.11. <i>PARÁMETROS COSTOS SISTEMA FOTOVOLTAICO.</i>	42
TABLA 5.12. <i>COSTOS SISTEMA FOTOVOLTAICO.</i>	43
TABLA 6.1. <i>DATOS DE ENTRADA CASOS DE ESTUDIO.</i>	45
TABLA 6.2. <i>COMPARACIÓN COSTOS ORIGINALES VS ECONÓMICOS CHUNGUNGO FV.</i> .48	
TABLA 6.3. <i>COMPARACIÓN COSTOS ORIGINALES VS ECONÓMICOS CHUNGUNGO OI.</i> .49	
TABLA 6.4. <i>COMPARACIÓN PRECIOS DEL AGUA CAMIÓN ALJIBE VS PROYECTO.</i>	53
TABLA 6.5. <i>DETALLE DE COSTOS Y VOLUMEN DE AGUA TRATADA.</i>	55
TABLA 6.6. <i>DESGLOSE PORCENTUAL DE COSTOS DE INVERSIÓN EN EQUIPOS.</i>	55
TABLA 6.7. <i>DETALLE DE COSTOS DE INVERSIÓN EN EQUIPOS.</i>	55

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 3.1. MODELO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PRESIÓN OSMÓTICA ⁴⁵	12
FIGURA 3.2. REPRESENTACIÓN DE UN PROCESO DE ELECTRODIÁLISIS ⁴⁶	13
FIGURA 3.3. PLANTA DE DESALINIZACIÓN DE MSF IMPULSADA POR ENERGÍA SOLAR ⁴⁷	14
FIGURA 3.4. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN EQUIPO MED ⁴⁸	15
FIGURA 3.5. ESTRUCTURA TÍPICA DE UNA CÉLULA FOTOVOLTAICA ⁵⁰	18
FIGURA 3.6. DISTINTAS TECNOLOGÍAS DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS ⁵¹	18
FIGURA 3.7. DIAGRAMA DEL SISTEMA PROPUESTO	22
FIGURA 6.1. VARIACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA POBLACIÓN ABASTECIDA.	46
FIGURA 6.2. VARIACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA HORIZONTAL Y VERTICAL.	47
FIGURA 6.3. VARIACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA EN FUNCIÓN DE POBLACIÓN Y DISTANCIA HORIZONTAL	50
FIGURA 6.4. VARIACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA POBLACIÓN Y ALTURA.	51
FIGURA 6.5. VARIACIÓN DEL PRECIO DEL AGUA EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA HORIZONTAL Y ALTURA.	52