



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

“ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD TECNICA DE UN SISTEMA DESTILADOR DE AGUA DE MAR, UTILIZANDO ENERGÍA SOLAR, QUE PUEDA SATISFACER LA NECESIDAD DE AGUA PARA RIEGO AGRICOLA Y CONSUMO ANIMAL EN LA COMUNIDAD RURAL DE EL PEÑON, COMUNA DE COQUIMBO”

Tesis para optar al Grado de Magíster en Gestión Ambiental

JOSE LUIS PARDO

Profesor Guía: Dr. Rodrigo Poblete Chávez

Profesor corrector: Msc. José Bakit San Martín

Profesor corrector: Dr. Eduardo Notte Cuello

COQUIMBO, DICIEMBRE DEL 2016



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

Los miembros de esta comisión designada para revisar la tesis de Magíster de JOSE LUIS PARDO, la han encontrado satisfactoria y recomienda que sea aceptada como requisito parcial para obtener el grado de Magíster en Gestión Ambiental

Fecha:

Aprobado por Comisión de Calificación:

Dr. Juan Macchiavello Armengol

Decano

Dr. Rodrigo Poblete Chávez

Profesor Guía

Dr. Eduardo Notte Cuello

Profesor Corrector

M Sc. Jose Bakit San Martin

Profesor Corrector

RESUMEN

La escasez de agua para el desarrollo de actividades agrícolas y ganaderas de las comunidades rurales, se enmarca en un complejo aspecto que involucra la supervivencia humana, y atenta directamente a las necesidades básicas de las mismas. Además, la no posesión del recurso hídrico constituye un estimulador de pobreza, injusticia social y desigualdad de oportunidades en la vida de las personas que la componen.

La comunidad rural de El Peñón, que está ubicada en la región de Coquimbo, provincia de Elqui, entre las comunas de Andacollo y Coquimbo, no difiere sustancialmente en la caracterización general de las poblaciones rurales.

Para realizar el estudio abordado en este documento, se debió en primer lugar cuantificar la necesidad de agua para riego y consumo animal por cada unidad familiar tipo, en la comunidad rural de El Peñón, para luego plantear una solución que pueda satisfacer esta necesidad.

El consumo de agua del ganado caprino se estimó entre 84,6 y 150,4 L/día para animales adultos, siendo el promedio de ganado por familia de 18,8 animales (Morales y Parada, 2005).

Para 4 cultivos típicos en una superficie agrícola de 5 m², la demanda de agua, por cada grupo familiar varía entre 19,0 y 45,5 L/día (Fernández et al, 2006).

Se propuso un sistema de destilación solar de agua de mar en base a batea simple, que teóricamente pueda cuantificarse su rendimiento aplicando el modelo de Entrada-Salida, y sea capaz de suministrar agua para riego y consumo animal por cada unidad familiar tipo en la comunidad rural de El Peñón. Para ello se evaluaron los antecedentes históricos de estos sistemas de destilación, además de una revisión científica del funcionamiento del destilador solar de batea simple.

Los resultados obtenidos mostraron que para un mes de mayor rendimiento, época estival, el destilador tuvo una producción teórica de 2,24 L/día por m² de superficie útil de destilador propuesto, y para un mes de menor rendimiento, época invernal, el destilador tuvo una producción de 1,09 L/día por m² de superficie útil de destilador propuesto.

Lo anterior arrojó que para el consumo agrícola y ganadero diario en época invernal se necesitan 133,78 m² de superficie útil de destilación, y para el consumo agrícola y ganadero diario en época estival se necesitan 97,95 m² de superficie útil de destilación.

La Metodología para obtener el rendimiento teórico de un sistema de destilación solar de batea simple, en base a agua de mar, utilizando energía solar, es aplicable para otras comunidades afectadas por esta necesidad.

ABSTRACT

Water shortages to develop farming activities in rural communities, is part of a complex issue involving human survival, and runs directly to the basic needs of them. Furthermore, the non-possession of water resources is a stimulator of poverty, social injustice and inequality of opportunity in the lives of people within it.

The rural community of El Peñón, which is located in the region of Coquimbo, Elqui Province, between the towns of Andacollo and Coquimbo, is not substantially different in the general characterization of rural populations.

For the study discussed in this paper, is due primarily to quantify the need for irrigation and animal consumption for each household type, in the rural community of El Peñón, and then propose a solution that can meet this need.

The water consumption of goats was estimated between 84.6 and 150.4 L/day for adult animals, with an average number of livestock per family being 18.8 animals (Morales y Parada, 2005).

For 4 typical crops in an agricultural area of 5 m², the demand for water for each family group varies between 19.0 and 45.5 L/day (Fernández et al, 2006).

A solar distillation of sea water based on single punt, which theoretically can quantify performance using the Input-Output model, and is capable of supplying water for irrigation and animal consumption for each household type was proposed community The Rock cottage. This historical background of these distillation systems were evaluated, along with a scientific review of the operation of simple solar still batting.

The results showed that for a month of increased performance, summer, distillers had a theoretical yield of 2.24 L/day per m² of floor space proposed distiller, and for a month of lower performance, winter, distillers had an output of 1.09 L/day per m² of floor space proposed distiller.

This boldness than for agricultural use and livestock during winter daily 133.78 m² of floor space needed for distillation and for agricultural use and livestock in summer daily 97.95 m² of floor space needed for distillation.

The methodology to obtain the theoretical yield of a solar distillation simple punt, based on sea water using solar energy, is applicable to other communities affected by this need.



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

DECLARACION DEL AUTOR

La percepción social que tiene la relación entre el ámbito científico y las personas agrupadas en comunidades, es que son dos sectores importantes en el desarrollo grupal de una región, pero distantes a la hora de operativizar trabajos en conjunto para llegar a tal fin.

Este trabajo pretende favorecer el acercamiento entre ambos, logrando un crecimiento sinérgico entre ellos, y así avanzar hacia una calidad de vida mejor, rompiendo cualquier desigualdad existente.

José Luis Pardo



FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

DEDICATORIA

Familia, amigos, y personas especiales en mi vida, no son nada más y nada menos que un solo conjunto: seres queridos que suponen benefactores de importancia inimaginable en mis circunstancias de ser humano.

No podría sentirme más orgulloso con la confianza puesta sobre mi persona, especialmente cuando he contado con su mejor apoyo desde que siquiera tengo memoria.

Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio podría parecer tarea titánica e interminable. Quisiera dedicar mi tesis a ustedes, personas de bien, seres que ofrecen amor, bienestar, que dan sentido a la vida.

Muchas gracias a aquellos seres queridos que siempre guardo en mi alma.

Indice general

1.- INTRODUCCIÓN.....	15
2.- CAPÍTULO 2 – OBJETIVOS	
2.1 Objetivo General.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3.- CAPÍTULO 3 – MATERIALES Y MÉTODOS	
3.1 Materiales	19
3.2 Métodos.....	19
4.- CAPÍTULO 4 – RESULTADOS	
4.1 Introducción a los resultados.....	28
4.2 Población rural	30
4.2.1 Relación entre la agricultura y las comunidades.....	31
4.3 La población rural en Chile.....	32
4.3.1 Perfil del pequeño agricultor en Chile.....	32
4.3.2 Factores para el desarrollo del mundo rural en Chile.....	32
4.4 La población rural en la región de Coquimbo.....	35
4.5 La localidad rural El Peñón.....	36
4.5.1 Ubicación geográfica.....	36
4.5.2 Descripción de la comunidad rural de El Peñón	38
4.5.3 La comunidad agrícola Cuesta el Manzano.....	38
4.5.4 Mecanismos de subsistencia.....	40
4.5.4.1 Agricultura como mecanismo de subsistencia.....	40
4.5.4.2 Ganadería como mecanismo de subsistencia.....	41
4.5.4.3 Otros mecanismos de subsistencia.....	42

4.5.5	Agua como mecanismo de subsistencia.....	43
4.6	Mecanismos para satisfacer la demanda de agua.....	43
4.7	La demanda cuantitativa de agua.....	46
4.8	Mecanismos alternativos para la obtención de agua.....	50
4.9	El mecanismo de desalinización para la obtención de agua.....	52
4.10	Diferentes métodos para la obtención de agua desalinizada.....	54
4.11	Fortalezas y debilidades de cada método.....	58
4.12	Decisión del método de obtención de agua.....	60
4.13	La destilación solar.....	61
4.14	El Destilador solar de cuba simple.....	63
4.15	Funcionamiento del destilador solar de cuba simple.....	63
4.16	Principios sistémicos del destilador solar.....	66
4.17	Antecedentes históricos del destilador solar de cuba simple.....	74
4.18	Revisión bibliográfica del destilador solar de cuba simple.....	78
4.19	El modelo de Entrada-Salida.....	79
4.19.1	La producción nocturna.....	81
4.19.2	Análisis de la fase de pseudo-estado estacionaria del modelo..	81
4.19.3	Duración de las fases de operación.....	86
4.19.4	Las condiciones climáticas.....	87
4.19.5	Descripción de los parámetros del modelo.....	88
4.19.6	Solución del modelo.....	99
4.19.7	Algoritmo de solución.....	101
4.19.8	Simbología utilizada.....	108
5.-	CAPÍTULO 5 – DISCUSIÓN	
5.1	Discusión.....	110
6.-	CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES	
6.1	Conclusiones.....	116

7.-	CAPÍTULO 7 –LITERATURA CITADA	
7.1	Literatura citada	117
8.-	CAPÍTULO 8 – ANEXOS	
8.1	Anexos	126

Índice de tablas

Tabla 1:	Rendimiento diario periodo invernal.	30
Tabla 2:	Rendimiento diario periodo estival.	30
Tabla 3:	Datos geográficos del área de la comunidad rural de El Peñón.....	37
Tabla 4:	Existencia nacional de ganado caprino.	42
Tabla 5:	Consumo de agua diario de ganado bovino, equino, caprino, ovino y porcino.	47
Tabla 6:	Demanda total de agua por cultivo por día en invernadero.....	49
Tabla 7:	Demanda total de agua.....	50
Tabla 8:	Combinaciones recomendadas en función de varios parámetros de entrada.....	53
Tabla 9:	Datos geográficos de la estación meteorológica Lilen, Pan de Azúcar.....	91
Tabla 10:	Cálculo del Angulo incidente promedio modificado.	94
Tabla 11:	Cálculo de rendimiento diario mínimo para mes Junio.....	127
Tabla 12:	Cálculo de rendimiento diario máximo para mes Junio.....	128
Tabla 13:	Cálculo de rendimiento diario promedio para mes Junio.....	129
Tabla 14:	Cálculo de rendimiento diario mínimo para mes Diciembre.....	130
Tabla 15:	Cálculo de rendimiento diario máximo para mes Diciembre.....	131
Tabla 16:	Cálculo de rendimiento diario promedio para mes Diciembre.....	132

Índice de figuras

Figura 1:	Ubicación general de la comunidad de El Peñón.....	15
Figura 2:	Diagrama de flujo ciclo hidrológico.....	23
Figura 3:	Ciclo hidrológico natural.....	24
Figura 4	Ubicación geográfica del área de análisis.	36
Figura 5:	Delimitación geográfica del área de análisis.	37
Figura 6:	Algoritmo para elección de un diseño de sistema de obtención de agua.....	52
Figura 7:	Posibles combinaciones tecnológicas de las principales energías renovables y métodos de desalinización.....	53
Figura 8:	Esquema de sistema simple de proceso de osmosis inversa.....	55
Figura 9:	Esquema de sistema simple de proceso de electrodiálisis.....	55
Figura 10:	Esquema de sistema de destilación multi efecto a través de tubos horizontales.....	56
Figura 11:	Esquema de sistema de destilación súbita.....	57
Figura 12:	Esquema de sistema de destilación solar simple.....	58
Figura 13:	Características básicas de un destilador solar de batea simple....	62
Figura 14:	Balance energético de un destilador solar de batea simple.	64
Figura 15	Pérdidas de calor de un destilador solar de batea simple.	66
Figura 16:	Esquema sistémico del destilador solar.....	67
Figura 17:	Relación profundidad/temperatura en el mar.....	73
Figura 18:	Sistema de destilación solar en la región del desierto de Las Salinas en Chile.	75
Figura 19:	Sistema de destilación solar de Daytona Beach, Florida, Estados Unidos.	75
Figura 20:	Planta de destilación solar en Coober-Pedt, Australia.	76
Figura 21:	Planta de destilación solar en la isla de Symi, Grecia.	77
Figura 22:	Comportamiento térmico de un destilador solar durante un día típico soleado.	80

Figura 23: Curvas de producción de agua acumulada a lo largo del día con varios niveles de radiación.	80
Figura 24: Productividad de un destilador solar durante el día y la noche.....	81
Figura 25: Duración de las fases de destilación.....	86
Figura 26: Ubicación del destilador solar.....	91
Figura 27: Ubicación de la estación meteorológica, Lilen, Pan de azúcar.....	92
Figura 28: Diagrama de flujo representando el algoritmo de solución del modelo.	107

INTRODUCCIÓN

Sin el agua para consumo propio, las personas no pueden sobrevivir ni desarrollar su potencial como seres humanos, señala Watkins (2006), en la presentación del Informe sobre Desarrollo Humano de las Naciones Unidas (PNUD,2006).

Esta frase enmarca un complejo tema de supervivencia humana a nivel global, que atenta directamente a las necesidades básicas de comunidades enteras. Pero además, la no posesión de este recurso constituye un estimulador de pobreza, injusticia social y desigualdad de oportunidades en la vida de las personas. Todo esto se acrecienta cuando el sector comprometido pertenece al mundo rural (PNUD, 2006).

La comunidad rural de El Peñón, está ubicada en la región de Coquimbo, provincia de Elqui, entre las comunas de Andacollo y Coquimbo, y no difiere sustancialmente en la caracterización general de las poblaciones rurales.

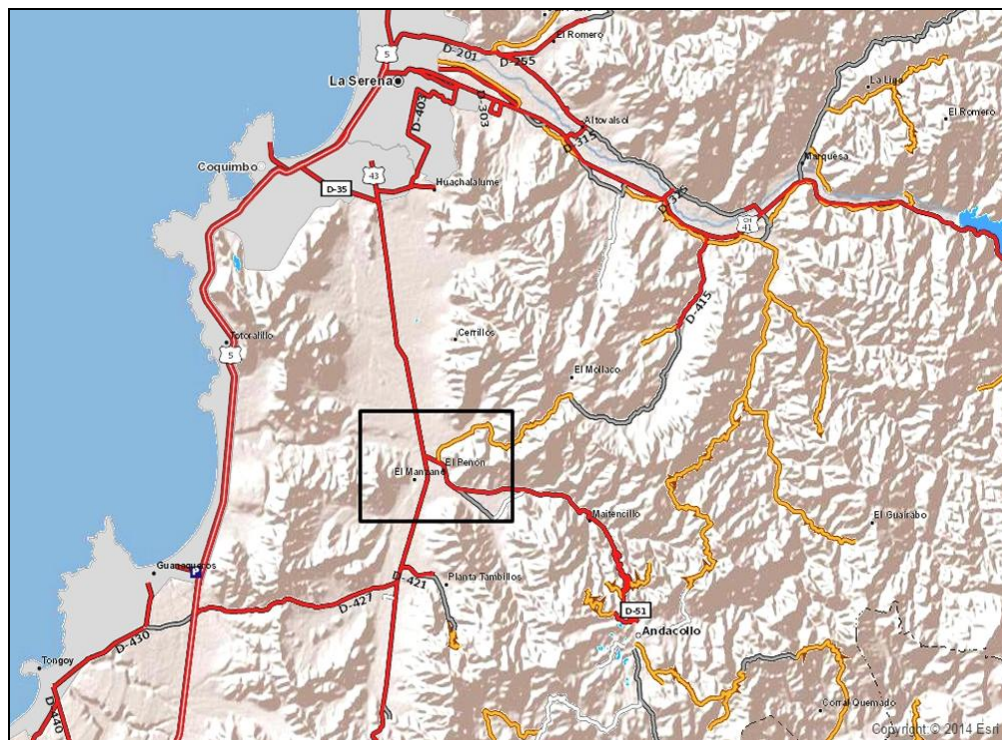


Figura 1: Ubicación general de la comunidad de El Peñón. Fuente: propia.

La población que habita el sector representa el 59,44 % de los habitantes de las comunidades agrícolas de las comunas de Coquimbo y Andacollo (INE, 2005), y la misma está predominantemente dedicada a la explotación agrícola de pequeña escala, y ganadería caprina.

La ganadería caprina se observa en el 90 % de las tierras, y son explotadas en condiciones de baja eficiencia productiva, aprovechando recursos naturales de bajo costo.

Los productores cuyos ingresos son inferiores a la línea de pobreza disponen en promedio de 18,8 animales cada uno (Morales y Parada, 2005).

La superficie agrícola para el área de análisis viene disminuyendo históricamente (INE, 2007), ya que en la actualidad, la agricultura familiar a pequeña escala resulta una actividad poco rentable. El cultivo de cereales de secano generalmente se orienta al autoconsumo y comercialización eventual (Echenique & Romero, 2008).

En este escenario, la respuesta social de las familias rurales ha sido un desplazamiento hacia la minería, que está condicionado, por las fluctuaciones en el precio del cobre en los mercados internacionales (Gómez, 2002).

Las actividades productivas de estas comunidades están restringidas por la provisión de agua, siendo factor preponderante para su desarrollo humano. Ellas deberán hacer frente a un verdadero desafío ante la escasez de este recurso.

El consumo de agua para pequeños cultivos agrícolas está condicionada por la influencia de la estacionalidad, tipo de suelo y aspectos climáticos. Para este estudio se tomará una ponderación de consumo de agua para cuatro cultivos tipo, pepino, zapallo tipo calabaza, tomate y pimiento verde, producidos dentro de invernadero, sistema agrícola, capaz de proporcionar un ambiente de condiciones controladas favorables (Leitão, 2010).

El consumo de agua en un área de cultivo de 5 m², varía para el pepino entre 8,00 y 15,00 L/día, el zapallo calabaza entre 9,00 y 15,00 L/día, el pimiento verde entre 13,00 y 21,50 L/día y el tomate entre 15,00 y 17,50 L/día (Fernández et al, 2006).

Existen cifras orientativas del consumo real del ganado caprino, que se estiman entre 4,50 y 8,00 L/día para animales adultos (FAO, 2013).

Para realizar el análisis, se debió en primer lugar cuantificar la necesidad de agua para riego y consumo animal por cada unidad familiar tipo, en la comunidad rural de El Peñón, para luego realiza el estudio una solución que pueda satisfacer esta necesidad.

Por otro lado, es interesante tener en consideración que el mar es una fuente no inagotable, pero si abundante y aún escasamente impactada ambientalmente. Entonces frente a la pérdida progresiva de este recurso, se debió plantear una solución teniendo en cuenta la posible utilización de agua de mar.

Para no aportar a la carga ambiental producida por la generación de energía eléctrica a través de métodos convencionales (carbón, petróleo, etc.), se planteó producir agua a través de energías renovables no convencionales como la radiación solar.

Un sistema que cumple con lo anteriormente descrito, es el destilador solar de batea simple, que teóricamente pueda cuantificarse su rendimiento aplicando el modelo de Entrada-Salida (Belessiotis et al, 1995), instalado en la comunidad rural de El Peñón, y que sea capaz de suministrar agua para riego y consumo animal por cada unidad familiar perteneciente a la misma.

CAPÍTULO 2 - OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Estudiar técnicamente la prefactibilidad de un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, para satisfacer las necesidades de agua para riego y consumo animal, en la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo.

2.2 Objetivos específicos

Determinar la necesidad de agua para riego y consumo animal, de la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo.

Describir distintas tecnologías existentes para la destilación solar de agua de mar, en base a antecedentes bibliográficos.

Estudiar técnicamente un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, que satisfaga la demanda de agua para riego y consumo animal, ubicado en la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo.

CAPÍTULO 3 – MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

Para el cumplimiento del objetivo general y los objetivos específicos se utilizó un aporte bibliográfico de estudios anteriores, visualizados en forma de publicaciones, notas e informes técnicos empleándose programas computacionales aplicados en el área del cálculo matemático, MATHEMATICA 5.0 y MATHTYPE 6.0 (elaboración de fórmulas del modelo a desarrollar).

Los programas computacionales genéricos para la construcción del escrito, creación de tablas de datos, y diseño de dibujos y mapas, MICROSOFT WORD 2007 (escritura de la tesis), EXCEL 2007 (Cálculo del rendimiento teórico del sistema de destilación solar de agua de mar), MACROMEDIA FIREWORKS 6.0 (planos y dibujos) y MINDMAMAGER PRO 6 (esquemas y diagramas).

3.2 Métodos

Para el cumplimiento del objetivo de determinar la necesidad de agua para riego y consumo animal, de la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo, se procede a describir las características generales de la población rural en Chile, en la región de Coquimbo y en la localidad de estudio.

Posteriormente, se describe la demanda de agua para uso agrícola y ganadero, identificando ubicación geográfica, características sociales y mecanismos de subsistencia, determinando las necesidades cuantitativas de agua para riego y consumo animal, de un grupo familiar representativo de la comunidad rural de El Peñón, comuna de Coquimbo.

La relación entre la agricultura y las comunidades

Se estudian los antecedentes históricos de las comunidades y su íntima relación con la agricultura. Además se estudia la relación entre el agua y la agricultura en el mundo rural

Competencia entre sectores por la escasez de agua

Se estudia la comparación de usos de agua para sectores urbanos y rurales, y la creciente utilización del recurso por parte de los primeros.

La población rural en Chile

En América Latina en general, y en Chile en particular, cada día es menos nítido determinar qué es, y donde comienza y termina el mundo rural. Desde un punto de vista económico, la nueva ruralidad es cada vez menos influenciada por la actividad agropecuaria primaria.

En este contexto, la agricultura es asumida como la principal actividad de las poblaciones rurales, mientras que las urbanas se vinculan principalmente con la producción industrial y los servicios.

El perfil del pequeño agricultor en Chile

Los grupos pertenecientes a la agricultura familiar campesina chilena, no plantean sus expectativas en un presente inmediato, sino con visión de futuro.

Esta expectativa de futuro se plantea con cambios, a través de programas modernizadores del Estado, que han sido reconvenidos en la cultura de las fuerzas mecánicas y las genéticas mejoradas, la pérdida de la actitud tradicional del campesino, transformándose en un productor orientado al mercado, intensivo y tecnificado, y la gestión técnica y el sentido social de la pequeña agricultura.

La localidad rural El Peñón

Se analiza la localidad rural de El Peñón, su descripción, ubicación geográfica, la Comunidad Agrícola Cuesta el Manzano, y los mecanismos de subsistencia que esta localidad posee.

En especial se toma consideración la agricultura y ganadería familiar para cuantificar la demanda de agua necesaria que estas actividades necesitan.

El agua como mecanismo de subsistencia

La disponibilidad de agua es crítica como insumo para los mecanismos de subsistencia del mundo rural. A veces se presupone que la escasez de agua se refiere a no contar con agua suficiente para satisfacer las necesidades domésticas. Si bien algunas ciudades o poblaciones se enfrentan con los problemas del estrés de agua potable o de saneamiento, es la agricultura el sector que deberá hacer frente al verdadero desafío frente a la escasez de este recurso.

Por ello, se estudian los mecanismos para satisfacer la demanda de agua como la lluvia, el agua en esteros y quebradas, las norias y las vertientes y los pozos subterráneos profundos.

La demanda cuantitativa de agua

La demanda de agua para el área de análisis se puede separar en la demanda para consumo humano, y el consumo para actividades productivas.

La demanda de agua para consumo humano se satisface en el área de análisis, de tres formas, el suministro a cargo de empresas privadas (Aguas del valle), por intermedio de cooperativas y comités de agua potable rural, y por intermedio de pozos y norias.

Se analiza su utilización para fines agrícolas y ganaderos buscando un consumo periódico para animales y frutos agrícolas típicos del sector.

Mecanismos alternativos para la obtención de agua

Frente al escenario antes descrito de escasez del agua en la localidad de El Peñón, se hace necesario buscar otros mecanismos de abastecimiento de agua, como el mecanismo de desalinización.

Se identifican diferentes métodos para la obtención de agua desalinizada, como son el método de Ósmosis Inversa (OI), el método de Electrodiálisis (ED), el método de Destilación multietapa (MED), el método de destilación súbita (FLASH) (MSF), y el método de Destilación solar (DS).

Se analiza el Método mas eficiente de obtención de agua, en base a la escala del demandante, el impacto ambiental, la relación costo beneficio, la movilidad física, el auto manejo y el costo por litro producido.

Para el cumplimiento del objetivo de describir distintas tecnologías existentes para la destilación solar de agua de mar, en base a antecedentes bibliográficos, se procede a desarrollar una búsqueda bibliográfica y descripción de las tecnologías de destilación de agua de mar existentes, utilizando la base de datos Science Direct y Google Patents, y así evaluar cual es la tecnología más adecuada para conseguir agua apta para el consumo en agricultura y ganadería.

Luego de identificar diferentes métodos para la obtención de agua desalinizada, se concluye que el de destilación solar es el adecuado.

La destilación solar

La destilación solar es un proceso que permite purificar los componentes de una solución, basándose en las diferencias de volatilidad de la misma, reemplazado la utilización de la energía convencional por la solar.

La aplicación que más ampliamente se le ha asignado al proceso de destilación solar, es la obtención de agua potable a partir de aguas salobres, que en este escrito es el agua salina proveniente del mar. La producción obtenida en la destilación solar depende de la incidencia de radiación solar sobre la superficie terrestre. El agua producida varía de un

mínimo cuando no hay radiación solar incidente, hasta un máximo que se alcanza durante las horas de mayor radiación solar.

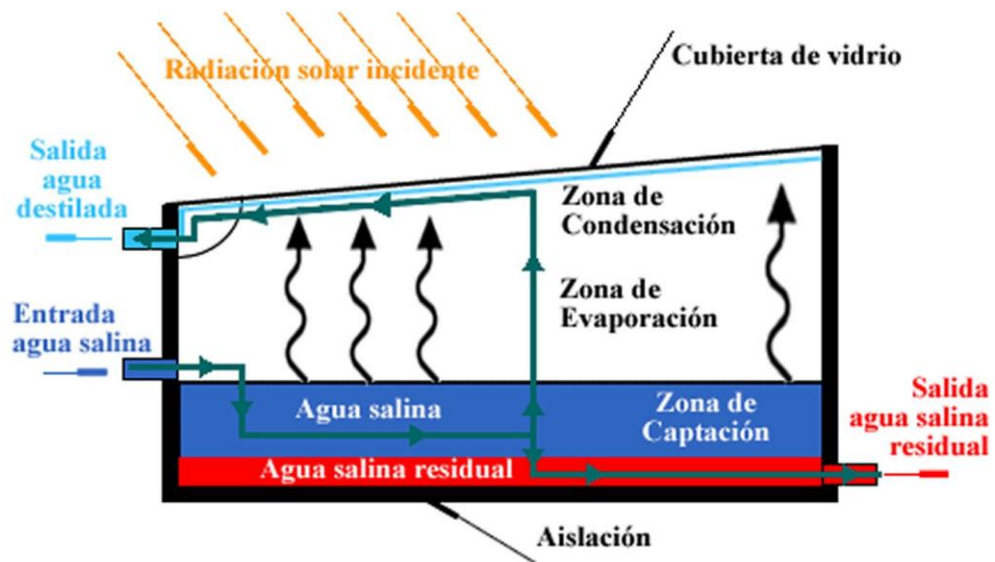


Figura 2: Diagrama de flujo ciclo hidrológico. Fuente: propia.

El destilador solar de cuba simple

En la naturaleza, el agua pura es producida a gran escala por un proceso de destilación solar. La radiación solar que llega a las superficies de ríos, lagos y mares, es absorbida provocando la evaporación del agua de tales superficies. El vapor resultante de la evaporación humidifica el aire próximo a la superficie el cual es movido (elevado) por el comportamiento climático. Cuando la mezcla de aire-vapor es enfriada hasta la temperatura de punto de rocío, ocurre la condensación, y el agua pura es precipitada como lluvia y/o nieve.

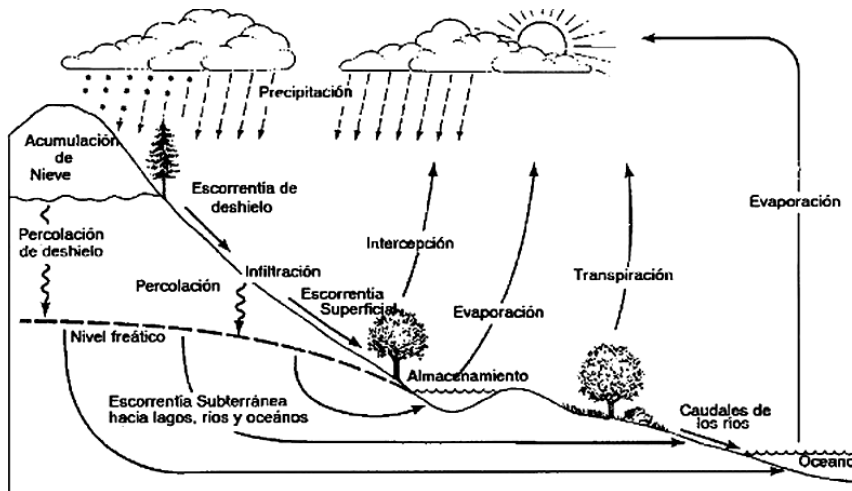


Figura 3: Ciclo hidrológico natural. Fuente: propia.

Este proceso natural es copiado a pequeña escala en el destilador solar de cuba simple, que consiste en una cuba hermética de forma rectangular, poco profunda y con el fondo de color negro a fin de que la radiación solar pueda ser absorbida tanto como sea posible. La cubierta superior es transparente para favorecer el paso de la energía solar, que por lo general es vidrio.

Se analiza el funcionamiento del destilador solar de cuba simple,

Además se desarrollan los principios sistémicos del destilador solar, que incluyen el requerimiento de permisos legales para la extracción de aguas de mar, los aspectos regulatorios de impacto ambiental, la ubicación geográfica de la toma de agua, el proceso de filtrado del agua, el proceso de preparado del agua., el tipo de transporte a utilizar, el estanque de agua de mar, el estanque de agua desalada, las instalaciones de distribución de agua desalada, el espacio físico para la deposición de salmuera, la disposición final o tratamiento para consumir el subproducto, las características del agua del mar, y la calidad el agua producida.

Antecedentes históricos del destilador solar de cuba simple

Se describen los antecedentes históricos en donde fue aplicada la destilación solar. Delyannis et al. (1980) y Belessiotis et al. (1995), propusieron un método teórico simplificado para la evaluación del rendimiento de un destilador solar de cuba simple, prediciendo la producción de agua a mediano y largo plazo.

Para este estudio, a fin de obtener un modelo que interprete el funcionamiento y la producción de agua de un destilador solar de batea simple, aplicado en la comunidad rural situada en El Peñón, se estudia el método Entrada-Salida propuesto por Belessiotis et al. (1995). Se basa en un análisis global referente a la transferencia de energía dentro del destilador, enfocándose principalmente en la producción de agua a mediano y largo plazo del mismo.

Para el cumplimiento del objetivo de estudiar técnicamente un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, que satisfaga la demanda de agua para riego y consumo animal, ubicado en la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo, se procedió a describir el funcionamiento del destilador solar de cuba simple, y el modelo de Entrada-Salida aplicado al destilador solar de cuba simple, que cuantifique su rendimiento en el sector a aplicar.

Se procede a describir una revisión de la literatura científica del funcionamiento del destilador solar de cuba simple y los parámetros que intervienen en el modelo.

Además se procede a plantear un algoritmo de solución al modelo, y calcular el rendimiento teórico del sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar (L/día).

El modelo de Entrada-Salida, aplicado al destilador solar de batea simple.

De una serie de trabajos teóricos y experimentales desarrollados por el Prof. A. Delyannis y el Dr. E. Delyannis, además de su validación en terreno en plantas de destilación solar de agua de mar ya instaladas, se concluye que la producción media diaria de agua destilada se determina de manera satisfactoria por la siguiente ecuación:

$$M_{salida} = F_1 H_d + F_2 (T_{ad} - \bar{T}_{wd}) + F_3$$

El método denominado "Entrada-Salida", basado en la ecuación anterior, relaciona la producción diaria de agua del destilador M_{out} (Salida) expresada en Kg, con la radiación solar incidente H_d (Entrada) expresada en MJ/m², y el estado inicial de operación del destilador expresado por la diferencia entre la temperatura del agua salina al comienzo

del día T_{wd} expresada en Kelvin, y la temperatura del aire en el ambiente T_{ad} expresada en Kelvin. F_1 , F_2 y F_3 son coeficientes característicos de cada destilador solar y que expresan su eficiencia, pérdida e inercia respectivamente.

Aplicando este modelo a las necesidades de agua para riego y ganadería del sector, se analiza la producción nocturna, el análisis de la fase de pseudo-estado estacionaria del modelo, duración de las fases de operación, las condiciones climáticas, y la descripción de los parámetros a utilizar del modelo.

Estos últimos, que intervienen en el modelo, se desarrollan y son los siguientes: el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, el área de la superficie del agua en la cuba, la profundidad del agua salina dentro del destilador, el volumen de agua salina dentro del destilador, la salinidad del agua, la masa de agua salina dentro del destilador, la emisividad de la cubierta, la eficiencia óptica del destilador, la posición geográfica del destilador, la temperatura ambiente, la velocidad del viento, la intensidad de la radiación solar, el coeficiente de transferencia de calor del viento, el ángulo de incidencia de la radiación solar, la temperatura del cielo, la presión parcial de vapor en el agua y en la cubierta de vidrio, el calor latente de vaporización, el calor específico del agua salina, la capacidad calorífica del agua dentro de la cuba del destilador, el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo, el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio, la duración del tiempo de operación a lo largo del día, el coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador.

La solución del modelo

En base a parámetros conocidos del modelo, tomados como constantes, y otros históricos que varían a través del día, se comienza a describir el modelo hasta llegar a la variable de salida del mismo que será la producción diaria teórica del destilador. Además se plantea un algoritmo de solución al modelo.

Finalmente para el cumplimiento del objetivo general, que es estudiar técnicamente la prefactibilidad de un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, para satisfacer las necesidades de agua para riego y consumo animal, en la comunidad

rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo, se procede a presentar las discusiones que conlleva el estudio, incluyendo las propuestas de mejora que muestra el método elegido para incrementar su rendimiento, y las limitaciones económicas que pudieran influenciar al incorporar la logística de aprovisionamiento de agua de mar, y el tratamiento de los residuos generados en el proceso.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente, se relacionará la producción diaria del destilador (L/día), y la necesidad diaria de agua apta para riego y consumo animal (L/día), para cada grupo familiar situado en la comunidad rural de El Peñón.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS

4.1 Introducción a los resultados

De acuerdo a la Metodología planteada, se presentan a continuación los siguientes resultados.

Con respecto a la demanda de agua en el sector estudiado, el consumo real del ganado caprino se ubica entre 4,50 y 8,00 L/día para cada animal adulto, teniendo en cuenta la posibilidad de existir crías, pero las mismas no consumirán más que un ejemplar adulto. Por cada grupo familiar la cantidad de ganado caprino, en promedio es de 18,8 animales (FAO, 2013).

Además, el consumo de agua en un área de cultivo de 5 m², de pepinos, zapallos calabaza, pimientos verde y tomate varía entre 84,6 y 150,4 L/día (Fernández et al, 2006).

En la localidad de El Peñón, existen censadas 239 viviendas familiares (INE,2005), que poseen actividades agrícolas y ganaderas.

La demanda total de la comunidad rural El Peñón, compuesta por 239 viviendas será entre 31.094 Lts/día y 52.437 Lts/día.

Con respecto a la oferta de agua en el sector estudiado, se aplicó un modelo matemático que reproduce el rendimiento diario de un destilador solar de cuba simple.

Los sistemas de desalinización a través de energía renovable se dividen en dos categorías principales: los procesos térmicos y electromecánicos. En cuanto a la fuente de energía, es probable que sea un sistema independiente instalado en un sector donde no existe red de distribución eléctrica, da paso para alimentarlo por energías renovables.

Los sistemas independientes son sistemas híbridos, combinando más de un tipo de fuentes de energía renovable o no, por ejemplo, el viento, la energía solar, o la inclusión de un generador diesel. Con el fin de garantizar un funcionamiento continuo,

independiente de las condiciones meteorológicas, los sistemas independientes suelen incluir un dispositivo de almacenamiento de energía.

En los últimos años, debido al avance tecnológico y la experiencia adquirida, los sistemas de desalinización a base de energías convencionales, lograron un aumento de la eficiencia y la reducción significativa de sus costos (IT Power Ltd, 2001)

Por otra parte, la realidad de los sistemas de desalinización impulsadas por energías renovables es bastante diferente. En la actualidad, estos sistemas evolucionan a través de mejoras tecnológicas, pero siempre ofrecen soluciones a pequeña escala con capacidades de generación reducidas (El-Nashar, 2000).

No todas las combinaciones de sistemas de desalinización impulsadas por energías renovables se consideran adecuadas en aplicaciones prácticas; muchas de estas combinaciones posibles pueden no ser viables bajo ciertas circunstancias. Estas deben ser analizadas en relación a diferentes parámetros locales, como lo son las condiciones geográficas, la topografía del lugar, la capacidad y el tipo de energía disponible de bajo costo, la disponibilidad de infraestructura local (incluyendo la red eléctrica), y el tamaño de la planta.

Debido a ello se tomaron las siguientes consideraciones:

Se tomó el promedio de los meses de Junio (periodo invernal), y Diciembre (periodo estival) entre los años 2004-2009, de la radiación solar incidente, la temperatura del aire y la velocidad del viento de acuerdo a datos obtenidos en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar CEAZA (2009). Esto debido a que ellos son los periodos del año de menor y mayor producción estimada de agua del destilador solar de cuba simple.

Se tomaron los parámetros físicos del destilador como constantes, que fue explicado en la descripción del mismo (apartado 4.1.9.5).

Los resultados teóricos aplicando el modelo matemático que reproduce el rendimiento diario de un destilador solar de cuba simple fueron los siguientes:

Periodo invernal.

Para el periodo invernal, mes de junio, el rendimiento diario calculado fue:

Tabla 1: Rendimiento diario periodo invernal.

Rendimiento por	mínimo	promedio	máximo
m ² (L/día)	1,090	1,260	1,640

Periodo estival

Para el periodo estival, mes de Diciembre, el rendimiento diario calculado fue:

Tabla 2: Rendimiento diario periodo estival.

Rendimiento	mínimo	promedio	máximo
por m ² (L/día)	2,087	2,190	2,243

Los resultados fueron expresados en Lts/m² de superficie de espejo de agua dentro del destilador.

4.2 Población rural

Hay cinco obstáculos que frenan los esfuerzos en pos de un desarrollo humano de la población rural (Norton, 2004a).

El capital humano con bajos niveles de educación y capacitación en aspectos relevantes.

El capital social con bajos niveles de organización comunitaria, organización de productores, etc., que se reflejan en la incapacidad para emprender esfuerzos productivos de manera cooperativa o asociada.

La infraestructura física con inadecuación de caminos, centros de comunicación, suministro de energía y agua para riego.

La infraestructura institucional con carencias o insuficiencias en materias de investigación agrícola, sistemas financieros rurales, y normas e instituciones para definir derechos de propiedad.

El capital físico privado con insuficiencias en tierras e infraestructura de riego en las mismas, así como de las inversiones en ganadería, fruticultura y otros bienes de producción.

Una de las principales actividades de subsistencia del mundo rural es la agrícola. Esta actividad para el sector rural agrupado en comunidades, no es solo factor de rentabilidad económica sino que principalmente es un mecanismo de obtención de recursos alimenticios que soporten su subsistencia.

Como se detalló anteriormente la insuficiencia e infraestructura de riego en las tierras, así como de las inversiones en ganadería, agricultura y otros bienes de producción, es un obstáculo que frena los esfuerzos en pos de un desarrollo humano por parte de estos grupos.

4.2.1 Relación entre la agricultura y las comunidades

En el pasado, muchas estrategias de riego han considerado al agua como un recurso inagotable y el acento se ponía en la construcción y la financiación de nuevos sistemas para ayudar a los agricultores. Ahora, la creciente demanda de agua en todos los sectores ha puesto en claro que es un recurso cada vez más escaso y que las anteriores estrategias de regadío ya no son viables en muchas regiones. En un creciente número de países sus recursos internos renovables de agua no alcanzan al nivel crítico de 1.000 m³ anuales per cápita, debajo del cual se convierten en una seria restricción al desarrollo (FAO, 1993).

4.3 La población rural en Chile

4.3.1 Perfil del pequeño agricultor en Chile

Los grupos pertenecientes a la agricultura familiar campesina chilena, no plantean sus expectativas en un presente inmediato, sino con visión de futuro. Ellos deben iniciar un proceso de reinserción y re aprendizaje a un nuevo mundo globalizado económica y políticamente. Visto desde esta óptica hay tres rasgos a considerar que los distinguen (Canales, 2006).

- I. El cambio de los pequeños productores, a través de programas modernizadores del Estado, que han sido reconvenidos en la cultura de las fuerzas mecánicas y las genéticas mejoradas, bajo una ideología productivista, para ser abastecedores de recursos agrícolas al mundo urbano.
- II. La pérdida de la actitud tradicional del campesino, transformándose en un productor orientado al mercado, intensivo y tecnificado.
- III. Nuevas reglas de la libre competitividad y la globalización, que han venido a replantear la cuestión de la gestión técnica y el sentido social de la pequeña agricultura, poniendo en riesgo su reproducción, con la ausencia, hasta el momento, de modelos exitosos de llevarla a cabo.

Entonces no toda la totalidad del sector agrícola familiar logra reconvertirse, quedando entonces un gran grupo de familias rurales fuera del nuevo sistema.

Al estar la comunidad rural de El Peñón, inserta en esta problemática, la misma también se ve afectada por el anterior diagnóstico general.

4.3.2 Factores para el desarrollo del mundo rural en Chile

Chile está cambiando hacia una nueva ruralidad, la que en sus rasgos más característicos y centrales está influenciada por tres grandes procesos.

El primero de ellos es el proceso estructural, que está condicionado por las orientaciones y los ritmos con que se realizan las transformaciones productivas de las actividades económicas más relevantes del sector. El segundo gran proceso es la manera en que el sector rural se relaciona y articula con lo urbano. El tercer gran proceso lo conforman las maneras en que el sector rural incorpora y procesa la modernidad (Barrera, 2006). Los factores de mayor influencia en el desarrollo del mundo rural de Chile se detallan a continuación.

La comunicación, factor que debe entenderse como la facilidad o no de las comunicaciones para el intercambio de información del mundo rural respecto al mundo urbano de Chile, lo que se pretende resaltar son las comunicaciones físicas con centros urbanos poblacionales o productivos.

El medio ambiente, factor que puede concebirse como el conjunto de elementos, relaciones e interacciones entre cultura, sociedad y naturaleza existentes en un territorio y tiempo determinados. Por ejemplo, la degradación de un ambiente dado puede entenderse como el empeoramiento del estado de algunos de los componentes del entorno cultural, social o natural, en comparación con el estado prevaleciente en un período anterior (Morales y Parada, 2005). A escala regional el uso de tierras rurales por parte del mundo urbano para depositar residuos de sus propias actividades económicas, ha aumentado la fragilidad de los ecosistemas, comprometiendo gravemente recursos, como el agua, utilizados para la actividad agrícola ganadera.

El suelo con dos características de influencia en el problema, que son la caracterización legal que se le aplica para su uso, y la capacidad agrícola del propio suelo desde el punto de vista de su degradación debido al fenómeno de la desertificación.

El territorio a ordenar se encuentra regulado actualmente por un conjunto de cuerpos jurídicos parciales, en función de sus requerimientos específicos. Desde este punto de vista, es posible distinguir tres territorios claramente definidos donde la normativa sectorial define espacios operacionales. El Territorio Urbano, que corresponde a aquella área que por excelencia ha sido parte de los instrumentos de planificación urbana gubernamentales, el territorio rural que considera al resto del territorio no urbano y por lo tanto corresponde a la mayor parte de Chile. Este amplio espacio presenta iniciativas

de planificación y manejo muy parcializadas. Además están los territorios sujetos a normas específicas, que son regulados de acuerdo a normas legales propias, como los territorios bajo el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas (SNASP) y los sectores con sitios arqueológicos o antropológicos o el borde costero (CONAMA, 1998).

Por lo anterior es necesario un cambio, dado que la planificación y el ordenamiento territorial en Chile, están siendo sobrepasados por la dinámica del mercado, en especial en las áreas rurales (González y Márquez, 1995).

En relación a la desertificación y degradación del suelo, en Chile este fenómeno avanza de norte a sur, a razón de medio kilómetro por año. Se trata de un fenómeno absolutamente dinámico, y todos los esfuerzos debieran centrarse en que no continúe avanzando. Al hablar de la desertificación, se reconoce una injerencia del ser humano a diferencia de la desertización, que es otro fenómeno generado por factores naturales (Doussoullin, 2001).

En referencia al componente social, el mundo rural es portador, revitalizador y creador de símbolos, prácticas y tradiciones que hacen el perfil cultural de Chile. Son portadores de partes de aquella memoria denominada historia de Chile. Además es sostenedor material y simbólico de la naturaleza frente a la vida urbana, dándole una referencia y un límite a ésta. Todavía por mucho tiempo, el medioambiente será un componente inseparable de lo rural.

En la actualidad, dado el crecimiento de la cobertura de la política social de tipo asistencial, un porcentaje no menor de la población rural chilena esté dependiendo del estado para cubrir necesidades básicas. Las propuestas de subsidios al empleo que promuevan la inserción de los hogares más desfavorecidos son interesantes, pero requieren cautela a la hora de aplicarse en economías locales poco dinámicas, ya que éstas podrían necesitar medidas complementarias para que éstas se vuelvan efectivas, (Güell, 2003).

En referencia al agua, el informe sobre desarrollo humano realizado por Naciones Unidas, señala, que el agua es poder y cuando esta escasea, las relaciones de poder cobran mayor fuerza para determinar quién tiene acceso al agua y bajo qué condiciones (PNUD, 2006a),

4.4 La Población rural en la región de Coquimbo

Según lo expresado por la propia ruralidad de la región de Coquimbo, ella posee las siguientes restricciones (Gobierno Regional de Coquimbo, 2007):

La tenencia de la tierra: *“La mayor parte de los campesinos poseemos poca tierra y más de un tercio de los productores de la Región tenemos problemas de tenencia, ya sea por irregularidad en los títulos de dominio o porque la tierra que ocupamos, a veces por siempre, legalmente es de terceros que amenazan con expulsarnos”*.

El agua para riego: *“Tenemos serias dificultades para acceder al agua de riego, lo que en esta región semiárida constituye una restricción de primer orden. Al igual que la tierra, el agua que se transa en el mercado la han ido concentrando pocas personas”*.

La falta de oportunidades y emigración: *“Las escasas posibilidades de desarrollo que presentamos los campesinos constituyen las principales causas de migraciones forzadas de jóvenes y en ocasiones de nuestras familias completas. Es la pobreza rural la que se traslada a las ciudades de la Región de Coquimbo y a otras grandes urbes del país”*.

Para disminuir el impacto de estos frenos al desarrollo rural de la región de Coquimbo, existen desafíos que la región se enfrenta, en pos de ir avanzando hacia una región más competitiva, humana, integrada y emprendedora. Uno de estos desafíos que atañe directamente al mundo rural es el desarrollo de un capital regional mediante el manejo eficiente y sustentable de los recursos naturales. Esto implica desarrollar una cultura de manejo integrado del agua, promover y cautelar el manejo eficiente y sustentable de los recursos naturales y energéticos, incorporar la gestión de prevención de riesgos y disminución de vulnerabilidades ante emergencias y fenómenos relacionados con los recursos naturales en la planificación urbana y rural (SECPLAC, 2005).

Como eje referencial para ubicar el área, se toma la carretera D 51 desde el poblado de El Manzano hasta el cruce de la misma con la Ruta D 43 (La Serena - Ovalle).

Los datos geográficos de esta área son:

Tabla 3: Datos geográficos del área de la comunidad rural de El Peñón.

Puntos limites	Este	Sur
Punto 1	284053	6665660
Punto 2	283966	6657697
Punto 3	292024	6657769
Punto 4	292614	6665213

Fuente: propia (UTM GS84).

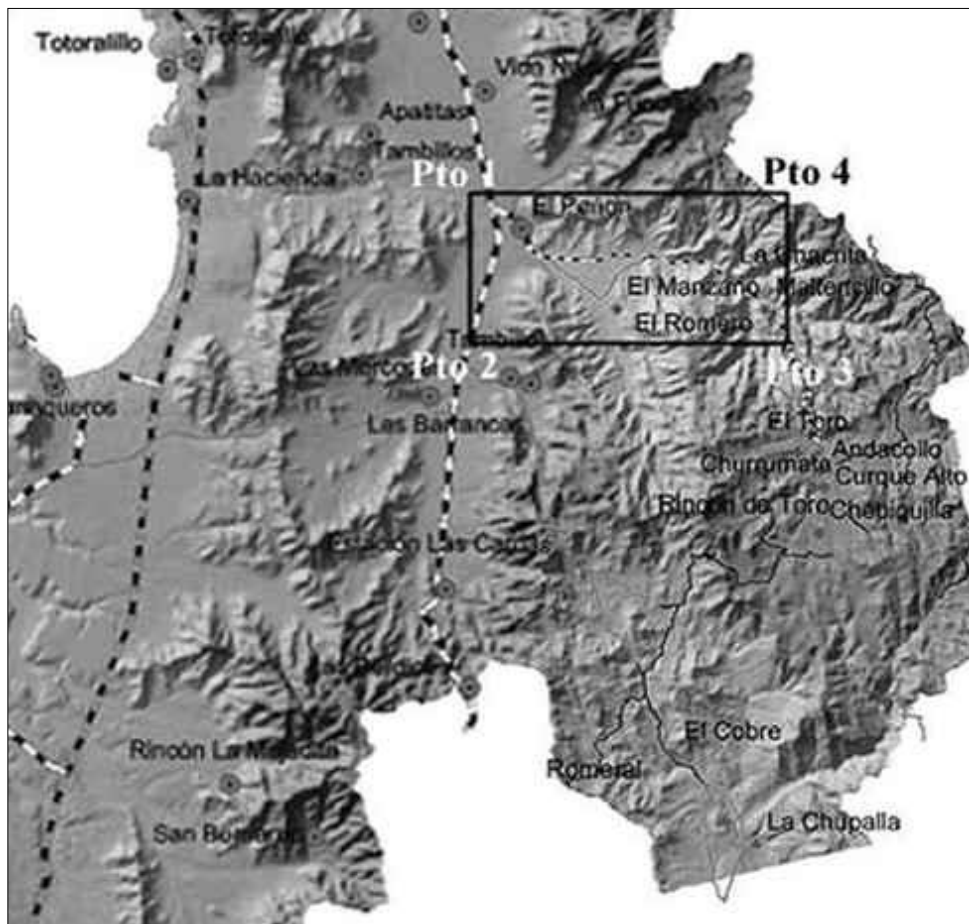


Figura 5: Delimitación geográfica del área de análisis. Fuente: propia.

4.5.2 Descripción de la comunidad rural de El Peñón

En la localidad rural El Peñón, existen dos pueblos denominados el Peñón y El Manzano, varios caseríos como La Percala y La Cortadera, parcelas o hijuelas con diferentes nombres como los llanos de El Peñón, Asentamientos humanos en vías de urbanización como los lotes C y A, y una comunidad agrícola denominada Comunidad Agrícola Cuesta el Manzano. La distribución del territorio es variada y compleja habiendo sitios pertenecientes a privados, sitios arrendadas por privados, hijuelas desprendidas de herencias, sitios pertenecientes al estado, sitios que usufructúan privados pero sin regularización de título de propiedad, y sitios pertenecientes a comunidades..

4.5.3 La Comunidad Agrícola Cuesta el Manzano

La Comunidad Agrícola Cuesta el Manzano, inmersa en el área de análisis, que si bien su territorio es intercomunal (Comuna de Coquimbo y Andacollo), para los efectos censales y de estudio se toma como que se sitúa en la Comuna de Coquimbo.

Ella es factor de análisis debido a que la totalidad de los habitantes que viven dentro de ella tienen un perfil rural.

La Comunidad Agrícola Cuesta el Manzano representa el 59,44 % de los habitantes de las comunidades agrícolas de las comunas de Coquimbo y Andacollo (INE, 2005).

Distintas definiciones se han dado para las comunidades agrícolas. Así se tiene la de tipo legal del D.F.L. 5, que dice: "*Son aquellos terrenos rurales pertenecientes a diversos propietarios en común, en los cuales el número de comuneros sea manifiestamente superior a la capacidad productiva del predio para que los respectivos grupos familiares puedan subvenir a sus necesidades*" (Jorquera, 1966).

Ellos propietarios de una extensión de terrenos rurales, a menudo de baja productividad y al interior de los cuales coexisten diferentes formas de tenencia de la tierra, como "los goces singulares", pequeñas extensiones trabajadas como explotaciones familiares y consideradas como propias y donde habitualmente reside el comunero y su

familia, y ocupan por lo general los terrenos de mejores recursos, "las lluvias", terrenos que la comunidad entrega a los comuneros, temporalmente, para su explotación, utilizados históricamente para siembra al secano , y el "campo común" al cual los comuneros tienen acceso para actividades varias como la agricultura al secano o el pastoreo, y las modalidades que lo regulan van desde la libertad completa, hasta el pago por animal con una cuota máxima de animales por comunero.

Estas tierras, casi en su totalidad de secano, con precipitaciones débiles o irregulares, con una cubierta vegetal muy pobre y con suelos deteriorados, sustentan las actividades agropecuarias de las comunidades. En primer lugar, está la ganadería caprina que ocupa la mayor parte del territorio de la comunidad y que la trasciende territorialmente a través de la trashumancia parcial realizada hacia las veranadas cordilleranas. En segundo lugar los cultivos realizados en las llamadas "lluvias", áreas de mayor retención de humedad, y finalmente algunos cultivos muy especializados que se practican en sectores específicos de algunas comunidades. Los resultados de estas actividades son generalmente deficientes. En la ganadería, a la mala calidad del ganado, se une la atrasada tecnología tanto en el proceso de producción de leche, como en la elaboración del queso, su principal producto, lo que ha afectado negativamente su demanda y por lo tanto su precio. En el manejo de praderas se acostumbra el sobre pastoreo con el consecuente deterioro de la cubierta vegetal y de los suelos.

La respuesta ya tradicional de los comuneros a la situación señalada, ha sido un desplazamiento hacia la minería, sea en el pirquineo en la región, o bien hacia la gran minería del Norte Grande, lo que está condicionado, además, por las fluctuaciones en el precio del cobre en los mercados internacionales (Gómez, 2002).

Un factor de crecimiento económico de esta área de análisis en la utilización de las tierras, es la parcelación. Los propietarios de tierras pueden realizar la subdivisión en parcelas de superficies no menores a 0,5 hectáreas, denominadas parcelas de agrado. El efecto de la subdivisión de tierras de esta forma, hace que se incorporen al sistema social del área de análisis personas sin arraigo a esta, que las utilizan para efectos de descanso o como segundo hogar, traen un pensamiento de realización y desarrollo diferente a los

habitantes históricos del área de análisis. A este fenómeno se lo denomina "hobby farmers", o granjeros de fin de semana.

4.5.4 Mecanismos de subsistencia

Los mecanismos de subsistencia de los habitantes situados en la localidad rural El Peñón son variados y fueron transformándose a través del tiempo.

La producción agrícola es el mecanismo de subsistencia mas notable, ya sea practicando la agricultura autónoma y luego comercializándola a intermediarios que la envían a centros urbanos, como también realizar labores agrícolas para un tercero a cambio de un salario. La producción ganadera aunque en menor medida que la agrícola, es un mecanismo de subsistencia utilizado por los habitantes de la comunidad. El caprino es el principal tipo de ganado a producir y comercializar.

Debido al problema de la poca rentabilidad de las anteriores actividades, la minería es una actividad fuertemente arraigada a los habitantes de la comunidad. Esta actividad no se realiza utilizando el área en donde se habita, y en general esta se transforma en un proceso de emigración hacia otras áreas de la región (con peso en la pequeña minería, cumpliendo labores de pirquinero) o al denominado norte grande (con peso en la mediana y gran minería, cumpliendo labores de operario no calificado). Debido a la proximidad de centros urbanos, hay habitantes del área que viajan diariamente hacia ellos a cumplir labores varias no agrícolas. Los hombres en general viajan diariamente a cumplir labores dentro del sector constructivo y las mujeres en tareas de aseo domiciliario.

4.5.4.1 Agricultura como mecanismo de subsistencia

La superficie destinada al uso agrícola para el área de análisis, viene disminuyendo históricamente (INE, 2008). En el norte chico y en particular en la localidad rural El Peñón el número de explotaciones agrícolas con tierra se redujo en un 10% durante el periodo 1996-2006, en razón a una manifiesta reducción de las unidades del estrato más

pequeño inferior a 2 Hectáreas, cuyo número cayó en un 20%. Estas últimas son las que poseen la mayoría de las comunidades agrícolas. Las tierras de secano aprovechable de esta zona del norte chico, tienen poco valor agropecuario actual, dada su extrema sequía, pero tienen cierto valor potencial como posible frontera para riego, al menos en cierta fracción minoritaria (Echenique y Romero, 2008).

4.5.4.2 Ganadería como mecanismo de subsistencia

El tipo de ganadería que utilizan como recurso productivo los habitantes en la localidad rural El Peñón, es la caprina. Existe también ganado equino y mular, pero ellos son utilizados para el servicio de la producción ganadera caprina.

La dotación caprina en Chile, según el Censo Nacional Agropecuario, alcanza a 705.800 cabezas. El 60% de dichas existencias se encuentra ubicado desde la Región Metropolitana hacia el norte del país, constituyendo la leche y el queso su principal objeto productivo, ocupando la carne un lugar secundario (INE, 2008). Una altísima proporción de las cabras chilenas pertenece a la Agricultura Familiar Campesina (estimativamente sobre el 90%), y es explotada en condiciones de baja eficiencia productiva, con sistemas de explotación tradicionales, de carácter extensivo, aprovechando recursos naturales de bajo costo.

La siguiente tabla muestra que la masa caprina se concentra entre las regiones de Atacama y Metropolitana (71%), donde la Región de Coquimbo sostiene algo más del 57% del total nacional, cuyo ganado se selecciona principalmente para la actividad lechera (producción de quesos). Como subproductos se obtienen cabritos destetados a muy temprana edad, para carne de bajo peso, condición y conformación (Fundación para la Innovación Agraria, 2008).

Tabla 4: Existencia nacional de ganado caprino.

Región	Cabezas		Región	Cabezas	
	(N°)	%		(N°)	%
Arica y Parinacota	6.042	0,9	Biobío	47.319	6,7
Tarapacá	2.327	0,3	La Araucanía	50.810	7,2
Antofagasta	6.181	0,9	Los Ríos	9.328	1,3
Atacama	39.187	5,6	Los Lagos	11.140	1,6
Coquimbo	404.562	57,3	Aysén	12.138	1,7
Valparaíso	45.588	6,5	Magallanes	158	0
O'Higgins	18.573	2,6	Metropolitana	12.325	1,7
Maule	40.122	5,7	TOTAL	705.800	100

Fuente: INE, 2007.

La producción de ganado caprino se trata de una actividad relevante en comunidades productivas localizadas en áreas de desertificación, como lo es la localidad rural El Peñón. El ganado caprino es una suerte de inversión en capital para los mecanismos de subsistencia campesina, debido a que se trata de animales de bajo costo, son muy eficientes en la transformación de pasto en carne y posibilitan generar ingresos monetarios por medio de la venta de carne, cueros y quesos (Morales y Parada, 2005).

Pero además, se trata de animales que comen toda la cubierta vegetal provocando serios problemas de erosión. No obstante, por las características antes indicadas, constituyen muchas veces la única alternativa posible para campesinos con poca tierra y de mala calidad. En la IV Región de Chile, los productores de menores ingresos poseen en promedio de 18,8 animales cada uno (Morales y Parada, 2005).

4.5.4.3 Otros mecanismos de subsistencia

En esta zona es común que los miembros de la agricultura familiar y de las mini explotaciones, trabajen parte del año en la pequeña minería, ya sea como pirquineros (cuenta propia) o como asalariados. Esta es una fuente de ingreso fundamental para complementar la magra producción obtenida de las tierras de las comunidades

tradicionales, las que han incrementado su ingreso gracias a la mayor existencia de caprinos y al excelente precio de los quesos de cabra en el mercado nacional (Echenique y Romero, 2008).

4.5.5 Agua como mecanismo de subsistencia

La disponibilidad de agua es crítica como insumo para los mecanismos de subsistencia del mundo rural.

A veces se presupone que la escasez de agua se refiere a no contar con agua suficiente para satisfacer las necesidades domésticas. Si bien algunas ciudades o poblaciones se enfrentan con los problemas del estrés de agua potable o de saneamiento, es la agricultura el sector que deberá hacer frente al verdadero desafío frente a la escasez de este recurso. En otras palabras, para producir alimentos se requiere una cantidad de agua que es aproximadamente 70 veces mayor que la que la gente usa para fines domésticos.(PNUD, 2006b).

Esto hace que las tierras estén presionadas bajo un stress hídrico, como lo es el caso de la localidad de El Peñón, siendo su fuente de obtención de agua más importante que es el acuífero de Pan de Azúcar. La mayor parte de la producción agrícola mundial se abastece del agua de lluvia, y no de agua de riego. La localidad de El Peñón no difiere de ello.

4.6 Mecanismos para satisfacer la demanda de agua

En la localidad de El Peñón existen varios mecanismos que buscan satisfacer la demanda de agua tanto para consumo humano, como para actividades agrícolas y ganaderas. Los recursos hídricos se pueden clasificar en superficiales, sub-superficiales, subterráneos, y otros.

Dentro de la clasificación de superficial se pueden detallar la lluvia y la acumulación de agua en esteros y quebradas. En lo referente a la obtención de agua de manera sub-superficial se destacan las norias y las vertientes. Los recursos hídricos subterráneos se

obtienen por la extracción en pozos subterráneos profundos. El origen principal de estas fuentes generalmente proviene de las precipitaciones, y eventualmente de la infiltración de las nieves cordilleranas (Alcaino et al. 2000).

La lluvia

Históricamente en el área de análisis se ha utilizado las lluvias para la agricultura. Es así que se cultivó trigo por muchos años con esa Metodología.

En la actualidad este tipo de agricultura abastecida directamente por las lluvias estacionales no se realiza. Esto debido que por efectos climatológicos posee una alta incertidumbre de las épocas de lluvia durante el año, ya que no se puede precisar el día del año en que lloverá, y entre años (periodos de sequia). Sumado a esto tiene particular influencia el cambio climático global, que comprende a la disminución de los glaciares, y la aparición de fenómenos como El Niño y La Niña. Esto conlleva a una variación del ciclo hidrológico, haciendo impredecible los periodos de siembra. El concepto histórico de sembrar y esperar a que llueva, hoy no es una alternativa viable.

El agua en esteros y quebradas

La recolección de agua en esteros y quebradas en el área de análisis, depende directamente de las lluvias que puedan ocasionarse en el sector.

Debido a las condiciones actuales de desertificación del suelo, y el stress que sufre el mismo a causa de la escasez de agua por periodos prolongados, no es común la formación de esteros.

La aparición de escorrentía superficial a través de las quebradas ocurre solo cuando existen precipitaciones importantes en el área, siendo la mayoría de las veces cauces secos dentro de las quebradas. En el caso de formaciones temporales de esteros en época de lluvia, sólo el ganado caprino utiliza del recurso.

Tanto los esteros, como el agua que circula por las quebradas no tienen un uso agrícola dado la intermitencia y rápida extinción del recurso.

Las norias y las vertientes

Este mecanismo de obtención de agua es el más comúnmente utilizado por el segmento de la población localizada en El Peñón.

El aprovechamiento de aguas desde norias y vertientes, fue un recurso históricamente utilizado en el sector. Con la promulgación del código de aguas en la década de los 80, estas deberían haberse oficializado, cosa que no ocurrió ya que para ello se debía tener entre otros requisitos el título de propiedad en donde estaba ubicada la noria o vertiente. Sumado a esto ocurrió la baja de la napa subterránea en el área, secando varias norias, haciéndolas inutilizables o con un alto costo para volverlas a hacer productivas.

De esta manera las norias existentes y aún productivas en el área de análisis, funcionan de manera no declarada, pero sí amparadas en el artículo Art. 56 del Código de aguas donde indica que "*Cualquiera puede cavar en suelo propio pozos para las bebidas y usos domésticos*".

Los pozos subterráneos profundos.

Este mecanismo de extracción de agua es utilizado en el área de estudio por medianos y grandes agricultores, además de su uso para abastecer el agua potable.

Estos tipos de pozos están contemplados y regularizados bajo el código de aguas existente, generándose un mercado de derechos de aprovisionamiento de aguas que debería optimizar tanto la demanda y la oferta de agua, como también su precio.

En la realidad, y por falta de estructura fiscalizadora, ocurre una falla de mercado, ya que antiguos propietarios de derechos, efectivizan la venta de los mismos a compradores que necesitan el agua, pero no cierran el pozo antiguo, lo cual sin una fiscalización en terreno, pudieran estos seguir extrayendo ya sin poseer el derecho correspondiente. Es así que en papeles la demanda del acuífero es de una determinada cantidad de litros por segundo, pero es mucho mayor en la realidad.

Por lo consiguiente la capacidad del acuífero y su recarga se ven reducidas, especialmente en los usuarios de norias que existen en el área de estudio.

Para el grupo especial de demandantes de agua de escasos recursos, y frente a la escasez de la misma, la entrega periódica de agua en camiones aljibes es un mecanismo

alternativo de suministro. Este método operativizado por las municipalidades, tiene por objetivo paliar la falta en sectores rurales que tienen escaso acceso al agua, y posee la dificultad de la incertidumbre de entrega del suministro en tiempo y forma.

Por intermedio de los diferentes mecanismos descritos anteriormente, cuantificar el suministro de agua para riego y consumo animal a la comunidad rural de El Peñón, resulta complejo. Esto debido a que no existen datos fidedignos del aporte real del acuífero subterráneo, abastecedor de agua de la comunidad citada.

Es por esto que para satisfacer los objetivos previstos, se toma que se debe satisfacer con la oferta descrita, la totalidad de la demanda exigida, sin aporte de los actuales mecanismos de suministro de agua.

4.7 La demanda cuantitativa de agua

La demanda de agua para el área de análisis se puede separar en la demanda para consumo humano, y el consumo para actividades productivas.

La demanda de agua para consumo humano se satisface en el área de análisis, de tres formas, el suministro de agua potable a cargo de la empresa Aguas del Valle bajo concesión exclusiva regulada por la Superintendencia de Servicios Sanitarios, la obtención de agua potable por intermedio de cooperativas y comités de agua potable rural, la mayoría de los cuales forman parte del Programa de Agua Potable Rural (APR) del Ministerio de Obras Públicas, que no se encuentran sometidos al marco regulatorio aplicable a las concesionarias urbanas, y el auto suministro de agua por intermedio de pozos y norias, método que en Chile se pretende disminuir a su mínima expresión ya que no existe potabilización de agua, y acarrea un foco de infección a quien la consume.

En el sector de El Peñón, existe un área concesionada, que abastece agua potable, además del servicio de alcantarillado, principalmente al casco histórico del pueblo.

Además se está instalando un sistema de abastecimiento de agua por intermedio de un comité de agua potable rural. Este sistema abastecerá al resto del poblado, no pudiendo cubrir los sectores más alejados.

La demanda para consumo en actividades productivas, puede subdividirse en demanda para consumo del ganado, en especial caprino, y la demanda para cultivos agrícolas de pequeña escala.

Tabla 5: Consumo de agua del ganado bovino, equino, caprino, ovino y porcino.

Especie		Condición de consumo	Consumo
Aves	Gallinas		15 L/día por 100 cabezas
	Pavos		30 L/día por 100 cabezas
Bovinos			450 L/día por 10 cabezas
Cerdos	Primeros 12 meses		10-12 L/día por 100 kg de peso
	Engorde		3-4 L/día por kg
	Marranas en lactancia		15-20 L/día por kg
Ovinos	De pelo (Brasil)	32-35 kg de peso	3,0 L/día (invierno)
			3,8 L/día (verano)
	En pastoreo (chile)	Bajo sombra	8 L/día
		Sin protección	11 L/día
Caprinos			4,5-8,0 L/día
Camélidos	Alpaca		2,9 L/día
Cuyes			30-70 mL/día
			45-98 mL/día

Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2013.

Respecto al consumo para el ganado, en especial el caprino, se puede indicar que en general la determinación de las necesidades de agua de los animales resulta complicada, debido a la interacción de un gran número de factores (tipo de alimentación, temperatura y humedad ambiente, temperatura del agua de bebida, disponibilidad de agua, sales en el agua, estado fisiológico), aún dentro de iguales especies.

Pero existen cifras orientativas, a través de investigaciones, del consumo real de los animales que interesan en este estudio. Se puede estimar el consumo de agua del ganado bovino, equino, caprino, ovino y porcino de acuerdo a la siguiente tabla, en donde el consumo real del ganado caprino, oscila entre 4,50 y 8,00 L/día para animales adultos (FAO, 2013).

En referencia a la demanda de agua para cultivos agrícolas de pequeña escala, debido a la amplia variedad de cultivos y la influencia que tiene la estacionalidad de los mismos, el tipo de suelo y los aspectos climáticos, se tomará para este trabajo una ponderación de consumo de agua para cuatro cultivos tipo que se realizan en el área de análisis, producidos dentro de invernadero. El consumo de agua para pequeños cultivos agrícolas está condicionada por la influencia de la estacionalidad, tipo de suelo y aspectos climáticos. Para este estudio se tomará una ponderación de consumo de agua para cuatro cultivos tipo, pepino, zapallo tipo calabaza, tomate y pimiento verde, producidos dentro de invernadero, que es un sistema agrícola, capaz de proporcionar un ambiente de condiciones controladas favorables (Leitão, 2010).

Un invernadero es un sistema agrícola especializado, con una estructura de cubierta y paredes generalmente de vidrio o plástico, capaces de proporcionar un ambiente de condiciones controladas muy favorables para el desarrollo de muchos cultivos hortofrutícolas. Al cultivar con este sistema las condiciones climáticas externas pueden ser controladas, favoreciendo la mejor gestión del agua.

Su estructura transparente ayuda a dejar pasar toda la radiación solar posible, y su capacidad aislante permite mantener un ambiente herméticamente cerrado, conservando así el calor y transpiración de los cultivos dentro del invernadero; a su vez proporciona un aislamiento de plagas, (Gameiro, 2010).

Se aplica un sistema de riego localizado por goteo o exudación. La técnica de riego por goteo, desarrollada en los últimos 30 años, es un sistema en el que no hay desperdicio del agua, ya que sus pérdidas de agua son mínimas. Su sistema por presión consiste en suministrar agua y fertilizantes a la planta gota a gota originando un bulbo húmedo en la zona cercana a las raíces, proporcionando de un modo preciso y continuo justamente los nutrientes y humedad necesarios, para que su asimilación se desarrolle con en el mínimo consumo de energía (Mármol, 2008).

Para un mismo cultivo en condiciones iguales de desarrollo, el consumo de agua es superior en primavera que en invierno. Esta situación se debe al hecho de que el consumo de agua se ve afectado por las condiciones ambientales de radiación solar y temperatura. En verano, la radiación solar es mayor, y consecuentemente la evapotranspiración también es mayor, por lo que hay una mayor necesidad de reponer el agua perdida en este proceso. Para este escrito se tomarán los siguientes tipos de cultivos representativos del área de análisis: tomate, pepino, zapallo tipo calabaza y pimiento verde.

Tabla 6: Demanda total de agua por cultivo por día en invernadero.

Cultivo	Sup (m ²)	Verano (L/día)	Invierno (L/día)
Pepino	5,0	15,00	8,00
Zapallo Calabaza	5,0	15,00	9,00
Pimiento verde	5,0	21,50	13,50
Tomate	5,0	17,50	15,00

Fuente: Fernández et al, 2006.

El consumo de agua en un área de cultivo de 5 m², varía para el pepino entre 8,00 y 15,00 L/día, el zapallo calabaza entre 9,00 y 15,00 L/día, el pimiento verde entre 13,00 y 21,50 L/día y el tomate entre 15,00 y 17,50 L/día.

El cuadro de demanda de agua es el siguiente:

Tabla 7. Demanda total de agua. Fuente: Propia.

Demanda Agrícola	Sup. Utilizada	Consumo Mínimo	Consumo Máximo	Consumo Agrícola diario	
	m ²	Lts/m ² /Día	Lts/m ² /Día	L/día	L/día
	5	9,1	13,8	45,5	69,0
Demanda Ganadera	Animales Promedio	Consumo Mínimo	Consumo Máximo	Consumo Ganadero diario	
	Cabezas/Familia	Lts/Cabeza/Día	Lts/Cabeza/Día	L/día	L/día
	18,8	4,5	8,0	84,6	150,4
Demanda total de agua por vivienda				L/día	Lts/Día
				130,1	219,4
Cantidad de viviendas en el sector				viviendas	
				239	
Demanda total comunidad El Peñón				L/día	Lts/Día
				31.094	52.437

4.8 Mecanismos alternativos para la obtención de agua

Frente al escenario antes descrito de escasez del agua en la localidad de El Peñón, se hace necesario buscar otros mecanismos de abastecimiento de agua.

Además de los argumentos razonables que se refieren al uso de energías renovables para obtener este abastecimiento alternativo, y debido a los problemas emergentes en materia de falta de recursos energéticos convencionales, hay una serie de razones relacionadas con temas más específicos de origen sectorial.

Una de las razones es que en zonas alejadas de los sectores urbanos, donde existen fuentes de energía renovables disponibles, el suministro de energía convencional no siempre es posible o al menos fácil de implementar.

En estos casos obtener agua a través de energía renovable no convencional representa la mejor opción para sistemas de obtención de agua autónomos, no dependientes del suministro de energía convencional. Casi todos los sistemas alternativos para la

obtención de agua se caracterizan por la autosuficiencia propia del sistema y el apoyo comunitario local. También la operación y mantención de estos sistemas instalados en áreas remotas, son a menudo más simples que los abastecidos por energía convencional.

Otra de las razones es que la implementación de estos sistemas de obtención de agua es motivadora para cumplir con un desarrollo socioeconómico sostenible, mediante el uso de recursos locales. La obtención de agua a través de energías renovables ayuda a evitar la dependencia externa del abastecimiento energético convencional.

Existen puntos críticos que definen la decisión o no, de utilizar un mecanismo alternativo de obtención de agua en forma convencional, o a través de energías renovables no convencionales.

Desde el punto de vista tecnológico, el uso de sistemas de obtención de agua con fuentes alternativas de energía, impone la conjunción de dos tecnologías separadas y distintas: el proceso de obtención de agua en si, y el sistema de abastecimiento de energía para la obtención de la misma. Ambos son considerados maduros y estables en mayor o menor grado, a pesar de que aún existen márgenes de investigación y desarrollo tanto en el aumento de su eficiencia, como en el volumen entregado, y la reducción de sus costos de producción.

Desde el punto de vista del costo, la explotación de las energías renovables y el desarrollo de los procesos de obtención de agua, representa una importante inversión. Hasta el momento, las tecnologías en energía renovables no se consideran totalmente desarrolladas, y los diversos componentes del sistema todavía poseen un alto costo. A pesar de que los precios continuamente disminuyen, todavía estos son prohibitivos para algunos proyectos de abastecimiento.

Desde el punto de vista de su disponibilidad, las energías renovables son ilimitadas, aunque su rendimiento presenta un carácter intermitente, lo que lleva a limitaciones relativas a la capacidad máxima de explotación por unidad de tiempo (L/día). Además, la distribución geográfica del potencial a instalar de un nuevo sistema, no siempre satisface la intensidad de escasez de agua a nivel local.

Desde el punto de vista a la sostenibilidad técnica, en la mayoría de los casos, la madurez de las tecnologías asociadas no coincide con el bajo nivel de infraestructura,

que a menudo caracteriza a lugares con grave estrés hídrico. La experiencia ha demostrado que varios intentos de integrar soluciones avanzadas de obtención de agua en zonas aisladas, fracasaron debido a la falta de un soporte técnico confiable. Se puede describir un algoritmo para la elección de un diseño apropiado (Voivontas et. al, 1999).

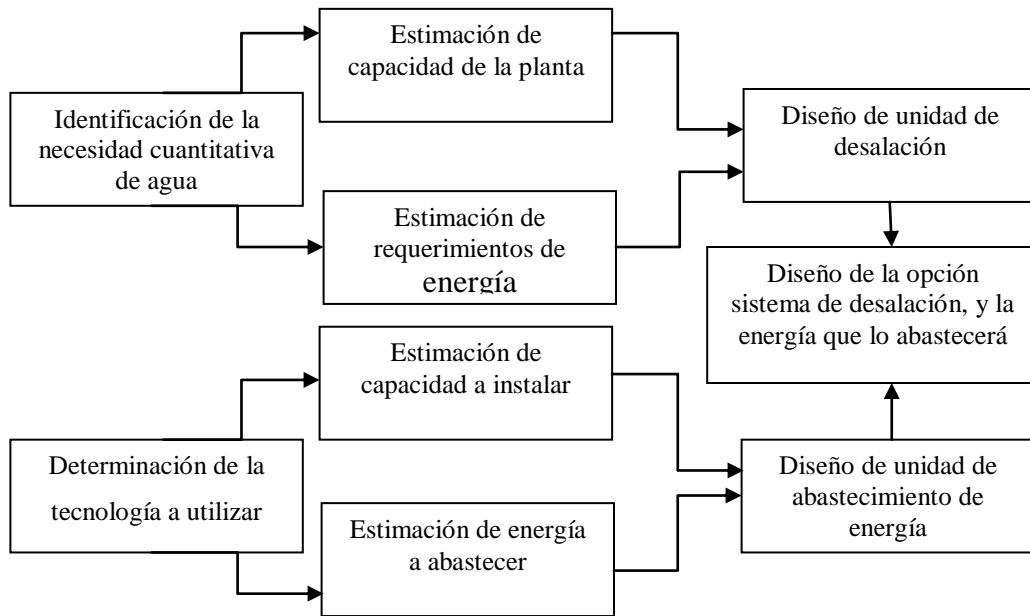


Figura 6: Algoritmo para elección de un diseño de sistema de obtención de agua. Fuente propia.

4.9 El mecanismo de desalinización para la obtención de agua

Las energías renovables, y los mecanismos de desalinización son dos tecnologías diferentes, que se pueden combinar de diversas maneras. La interfaz entre un sistema de energía renovable, y los mecanismos de desalinización deben analizarse en su conjunto, a través de parámetros tecnológicos y económicos. La figura siguiente muestra las combinaciones posibles.

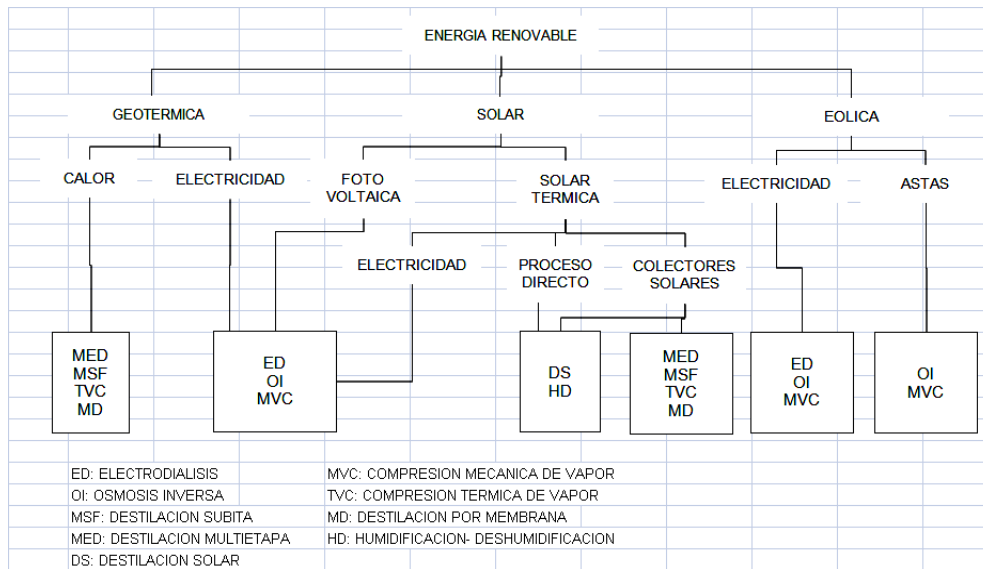


Figura 7. Posibles combinaciones tecnológicas de las principales energías renovables y métodos de desalinización. Fuente: Propio en base a (Mathioulakis, Belessiotis & Delyannis, 2007).

La tabla siguiente presenta un resumen de las combinaciones recomendadas en función de varios parámetros de entrada, pero señala sin embargo que otras combinaciones, adicionales también son posibles (IT Power Ltd, 2001).

Tabla 8: Combinaciones recomendadas en función de varios parámetros de entrada.

Tipo	Agua producida	Energía renovable	Tamaño sistema			Combinación posible
			Pequeño	Mediano	Grande	
Agua salobre	Destilada	Solar	X			DESTILACION SOLAR
	Potable	Solar	X			PV-OI
	Potable	Solar	X			PV-ED
	Potable	Eólica	X	X		EOLICA-OI
	Potable	Eólica	X	X		EOLICA-ED

Fuente: IT Power Ltd, 2001.

Cont tabla 8: Combinaciones recomendadas en función de varios parámetros de entrada.

Agua de mar	Destilada	Solar	X			DESTILACION SOLAR
	Destilada	Solar		X	X	SOLAR TERMICO- MED
	Destilada	Solar			X	SOLAR TERMICO- MED
	Potable	Solar	X			PV-OI
	Potable	Solar	X			PV-ED
	Potable	Eólica	X	X		EOLICO-OI
	Potable	Eólica	X	X		EOLICO-ED
	Potable	Eólica		X	X	EOLICO-MVC
	Potable	Geotérmica		X	X	GEOTERMICA-MED
Potable	Geotérmica			X	GEOTERMICA-MED	

Fuente: IT Power Ltd, 2001.

4.10 Diferentes métodos para la obtención de agua desalinizada

En la actualidad los métodos mayormente utilizados son los siguientes:

El método de Ósmosis Inversa (OI)

La ósmosis es un fenómeno natural que se produce cuando un agua procedente de una solución menos concentrada, pasa a través de una membrana semipermeable hacia otra solución de mayor concentración, hasta alcanzar su equilibrio. La ósmosis inversa consiste, en la inversión del citado proceso mediante la aplicación de una energía externa en forma de presión.

En la práctica, el agua a desalar se bombea a un compartimiento de presión en donde es presurizada contra las membranas. Una parte del agua (producto), atraviesa la membrana mientras que el resto se concentra en sales, pasando a constituir el concentrado, denominado salmuera.

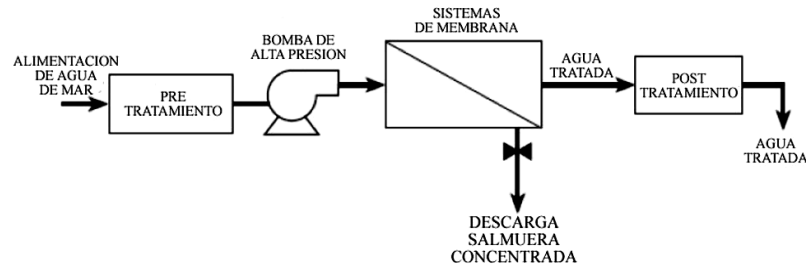


Figura 8: Esquema de sistema simple de proceso de osmosis inversa. Fuente: (Eltawil, Zhengming, y Yuan, 2008).

El método de Electrodiálisis (ED)

Las sales disueltas en una solución salina tienen sus cargas eléctricas neutralizadas. Cuando se introduce una corriente eléctrica en la solución mediante dos electrodos, los iones tienden a migrar hacia el electrodo de carga opuesta. Al interponer dentro de esta solución, y de forma alternativa pares de membranas aniónicas y catiónicas que permiten de forma selectiva únicamente el paso de los aniones-cationes por ellas, se produce la división del flujo de entrada en dos flujos conteniendo dos soluciones, una diluida y la otra concentrada.

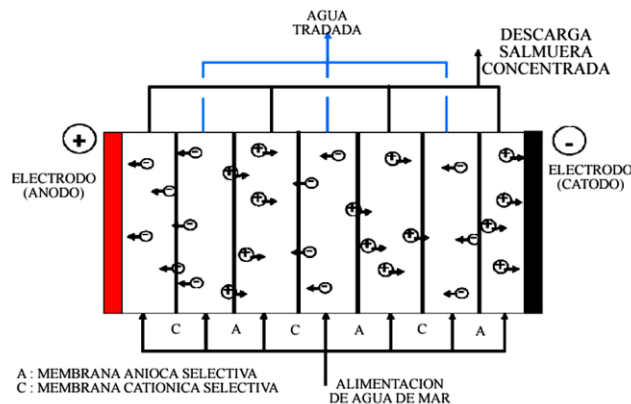


Figura 9: Esquema de sistema simple de proceso de electrodiálisis. Fuente: (Eltawil, Zhengming, y Yuan, 2008).

El método de Destilación multietapa (MED)

Este método se realiza en etapas y utiliza el principio de reducción sucesiva de presión anteriormente citado. El agua de mar se introduce en el primer compartimento, donde se calienta hasta su punto de ebullición mediante vapor procedente del exterior, produciéndose su evaporación parcial; el resto del agua es alimentada al siguiente compartimento, donde existe una presión inferior y donde produciéndose de nuevo su evaporación parcial, al ser aplicada a un haz de intercambio por el que circula el vapor procedente del efecto anterior. Tal cesión de calor hace que el citado vapor se condense, pasando a formar parte del agua producto, y el nuevo vapor producido se traspa al siguiente compartimento, donde prosigue el ciclo de desalinización.

La destilación de múltiple efecto (MED) utiliza el mismo principio que el proceso MSF. La diferencia principal entre el proceso MED y el MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada (la evaporación se produce de forma natural en una cara de los tubos de un intercambiador aprovechando el calor latente desprendido por la condensación del vapor en la otra cara del mismo), con los cuales se logran mejores coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MSF donde se produce la evaporación súbita en forma directa.

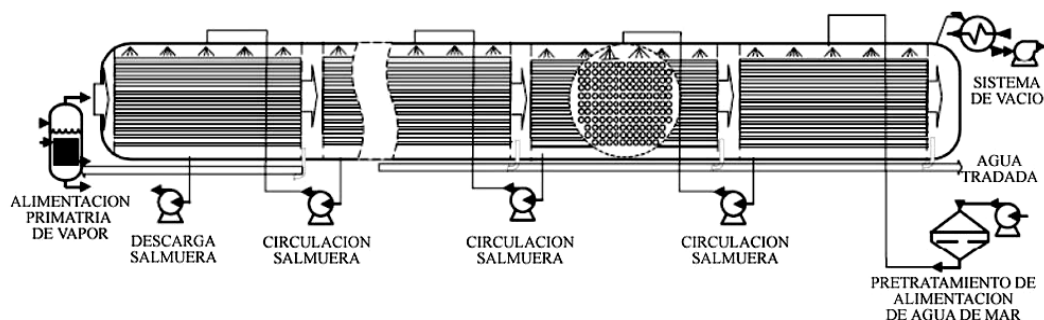


Figura 10: Esquema de sistema de destilación multi efecto a través de tubos horizontales. Fuente: (Eltawil, Zhengming, y Yuan, 2008).

Método de destilación súbita (FLASH) (MSF)

Este método se basa en el principio de que al reducir abruptamente la presión del agua de mar por debajo del valor de su presión de vapor de equilibrio, ocurre una

evaporación súbita o una ebullición explosiva de la misma, y por lo tanto de carácter irreversible. Solo un pequeño porcentaje del agua se evapora, de forma que la producción de la planta se logra mediante la operación de sucesivas etapas que funcionan a presiones que se van reduciendo progresivamente. Esto normalmente se logra introduciendo el agua de mar, previamente calentada a temperatura de ebullición con vapor de una fuente externa, en una cámara flash a través de un orificio de forma tal que se provoca una caída de presión suficiente para que sea menor a la de saturación a esa temperatura, evaporando parte del agua salada. Debido a la naturaleza violenta y turbulenta de la evaporación, el área de la superficie del agua expuesta aumenta beneficiándose así la producción de vapor. El vapor así producido pasa a través de mallas filtrantes donde se despoja de las gotas de salmuera que arrastra.

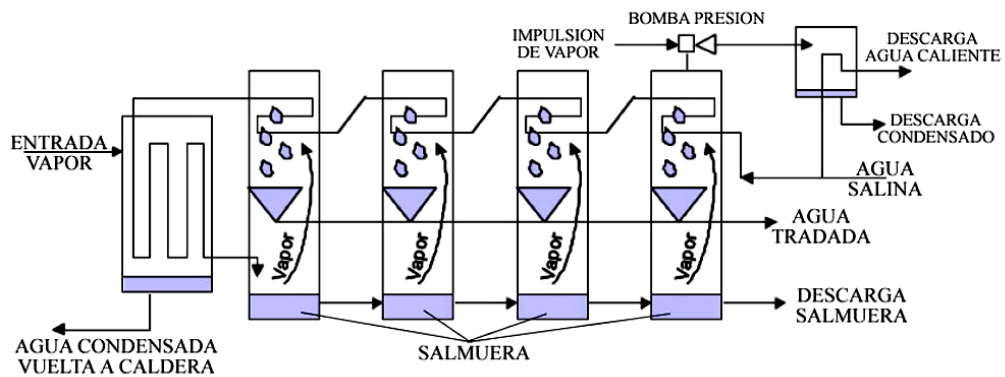


Figura 11: Esquema de sistema de destilación súbita. Fuente: (Eltawil, Zhengming, y Yuan, 2008).

El método de Destilación solar (DS)

La destilación solar es un proceso que permite purificar los componentes de una solución, basándose en las diferencias de volatilidad de la misma, reemplazado la utilización de la energía convencional por la solar. Cuando en las condiciones predominantes el soluto casi no es volátil, la destilación se lleva a cabo evaporando el solvente en determinada región del dispositivo y condensando el vapor en otra región del

mismo. Por tradición se llama destiladores o alambiques a los dispositivos que permiten llevar a cabo la destilación (Urrutia, 2005).

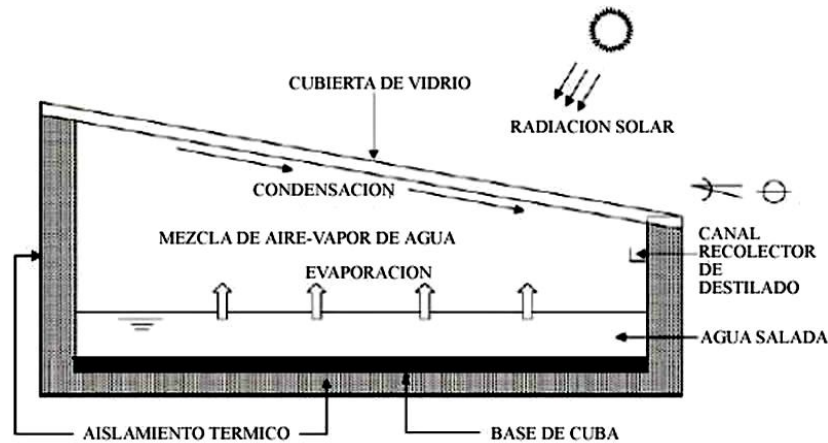


Figura 12: Esquema de sistema de destilación solar simple. Fuente: propia.

4.11 Fortalezas y debilidades de cada método

Método: Electrodialisis (ED)

Fortalezas

- ⇒ Utiliza corriente eléctrica para forzar las sales disueltas por membranas.
- ⇒ Se maneja a base de membranas para separar las sales.
- ⇒ Método también aplicable a agua salobre.

Debilidades

- ⇒ Consume alta cantidad de energía.
- ⇒ Alto costo de inversión.

Método: Ósmosis Inversa (OI)

Fortalezas

- ⇒ Procedimiento simple en términos generales.
- ⇒ Costo de instalación medio.
- ⇒ Alta tasa de producción.
- ⇒ Uso en cualquier tipo de agua sin importar su origen.
- ⇒ Remoción con cierta sencillez de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

Debilidades

- ⇒ Limpieza frecuente de la membrana.
- ⇒ Agua empleada debe ser pre-tratada para remover inicialmente las partículas contaminantes y prolongar la vida de la membrana.
- ⇒ El deshecho de la salmuera debe ser tratado con cuidado para no impactar el medioambiente.
- ⇒ alto riesgo de contaminación bacterial en las mismas membranas, que pueden introducir olores y sabores desagradables en el producto final.
- ⇒ Se requiere de una fuente confiable de energía, pues no puede ser interrumpido el proceso.

Método: Destilación multietapa (MED)

Fortalezas

- ⇒ Aplicable a proyectos de mediana o gran escala.
- ⇒ Maneja cámaras de baja presión para ayudar en la vaporización.
- ⇒ El calor que se usa en una etapa es utilizado para la vaporización de agua de la siguiente.
- ⇒ La ubicación de los destiladores ocupa menos superficie.

Debilidades

- ⇒ Mantenimiento de alto costo de equipos.
- ⇒ Genera residuos con alto contenido mineral.
- ⇒ Consume gran cantidad de energía

Método: Destilación súbita (FLASH) (MSF)

Fortalezas

- ⇒ Aplicable a proyectos de mediana o gran escala.
- ⇒ Utiliza calor.
- ⇒ Maneja cámaras de baja presión para ayudar en la vaporización.
- ⇒ A mayor etapas en el proceso, mayor eficiencia en sus resultados.

Debilidades

- ⇒ El mantenimiento costoso de los equipos.

- ⇒ Genera residuos con alto contenido mineral.
- ⇒ A mayores etapas del proceso, son necesarios más espacios, capital y mantenimiento.

Método: Destilación solar (DS)

Fortalezas

- ⇒ Se vale de energía solar para calentar el agua salada.
- ⇒ Captura el vapor del agua condensado como agua pura.
- ⇒ Tiene gran potencial para proyectos pequeños en lugares con condiciones favorecedoras.
- ⇒ El equipo puede ser reubicado fácilmente.

Debilidades

- ⇒ Aplicable a proyectos de menor escala debido a su simplicidad e independencia.
- ⇒ Factores climáticos pueden influir en el desempeño del proceso.

4.12 Decisión del método de obtención de agua

Para el caso de la comunidad rural de El Peñón, comuna de Coquimbo, se optó por el método de destilación solar del agua de mar por los siguientes motivos:

Escala del demandante.

Debido a que los usuarios del suministro de agua, demandan poca cantidad del mismo.

El impacto ambiental.

La generación del suministro de agua requiere de una energía limpia, en este caso la solar, lo que indirectamente disminuye el calentamiento global, y sus consecuencias como lo es el cambio climático.

Relación costo beneficio.

Al utilizar cualquiera de los otros métodos, el costo unitario de la inversión inicial se acrecentaría, tanto que no sería una alternativa viable económica para el perfil del demandante del agua.

La movilidad física.

El método de destilación solar puede ubicarse en diferentes posiciones dentro del área de consumo del suministro, con un bajo costo de reubicación.

El auto manejo.

Al ser un proceso de fácil manejo, es más factible el automanejo en cuanto a su instalación y mantenimiento por parte del demandante, no dependiendo de servicios de terceros para su realización.

El costo por litro producido.

Si bien el costo por litro es mayor que los otros métodos, este se nivela debido a los motivos antes descritos.

La logística de suministro del agua salina hasta el sector de destilación no es tomada en cuenta para la decisión, ya que en todos los sistemas nombrados tiene la misma influencia.

4.13 La Destilación solar

La destilación solar es un proceso que permite purificar los componentes de una solución, basándose en las diferencias de volatilidad de la misma, reemplazando la utilización de la energía convencional por la solar. Cuando en las condiciones predominantes el soluto casi no es volátil, la destilación se lleva a cabo evaporando el solvente en determinada región del dispositivo y condensando el vapor en otra región del

mismo. Por tradición se llama destiladores o alambiques a los dispositivos que permiten llevar a cabo la destilación.

La aplicación que más ampliamente se le ha asignado al proceso de destilación solar, es la obtención de agua potable a partir de aguas salobres, que en este escrito es el agua salina proveniente del mar.

Tal proceso se ejecuta de una forma completamente diferente de otros métodos de purificación. Otros procesos tienen el propósito de mantener una razón de producción constante las 24 horas del día, y durante las cuatro estaciones del año.

La producción obtenida en la destilación solar depende de la incidencia de radiación solar sobre la superficie terrestre. El agua producida varía de un mínimo cuando no hay radiación solar incidente, hasta un máximo que se alcanza durante las horas de mayor radiación solar.

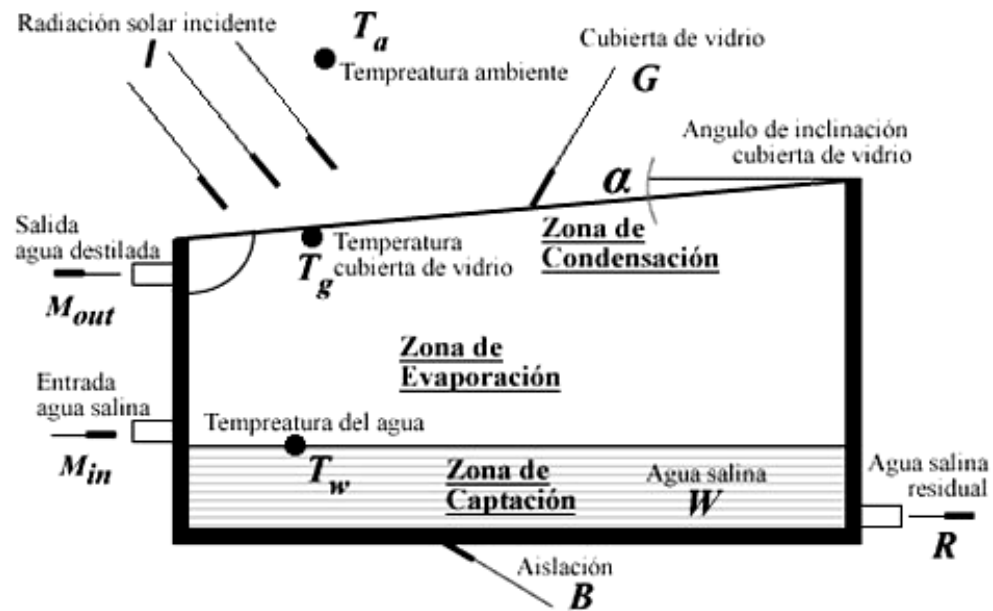


Figura 13: Características básicas de un destilador solar de batea simple. Fuente propia.

Actualmente existen varios tipos de destiladores solares; las diferencias entre ellos radican en los materiales utilizados en su construcción y geometría, pero todos ellos involucran los mismos principios de operación. Se reconocen 3 zonas importantes en ellos.

El colector solar, que es la parte del destilador diseñada para la captación de energía solar, el evaporador que es la región donde se lleva a cabo la evaporación a partir del agua salina, y el condensador en el cual se verifica la condensación de vapor obteniéndose el agua destilada.

Si bien existe una gran variedad de diseños de destiladores solares que han sido probados en todo el mundo, en este escrito se desarrollará el destilador solar de cuba simple.

4.14 El destilador solar de cuba simple

En la naturaleza, el agua pura es producida a gran escala por un proceso de destilación solar. La radiación solar que llega a las superficies de ríos, lagos y mares, es absorbida provocando la evaporación del agua de tales superficies. El vapor resultante de la evaporación humidifica el aire próximo a la superficie el cual es movido (elevado) por el comportamiento climático. Cuando la mezcla de aire-vapor es enfriada hasta la temperatura de punto de rocío, ocurre la condensación, y el agua pura es precipitada como lluvia y/o nieve.

Este proceso natural es copiado a pequeña escala en el destilador solar de cuba simple, que consiste en una cuba hermética de forma rectangular, poco profunda y con el fondo de color negro a fin de que la radiación solar pueda ser absorbida tanto como sea posible, la cubierta superior es transparente para favorecer el paso de la energía solar, que por lo general es vidrio.

4.15 Funcionamiento del destilador solar de cuba simple

La radiación solar (I) incide sobre la cubierta de vidrio del destilador en donde parte de esta es reflejada al exterior del destilador (Q_{gref}), parte es absorbida por la cubierta (Q_{gabs}), y parte es transmitida al interior del destilador (Q_{trans}), siendo esta última la causante del proceso de destilación que ocurre en el interior.

Esta radiación solar transmitida al interior del destilador, debido a las características ópticas del agua sufre nuevamente la descomposición siendo parte de la misma reflejada (Q_{wref}), parte absorbida por el agua salina (Q_{wabs}), y parte transmitida a la cuba contenedora del agua (Q_{wtrans}).

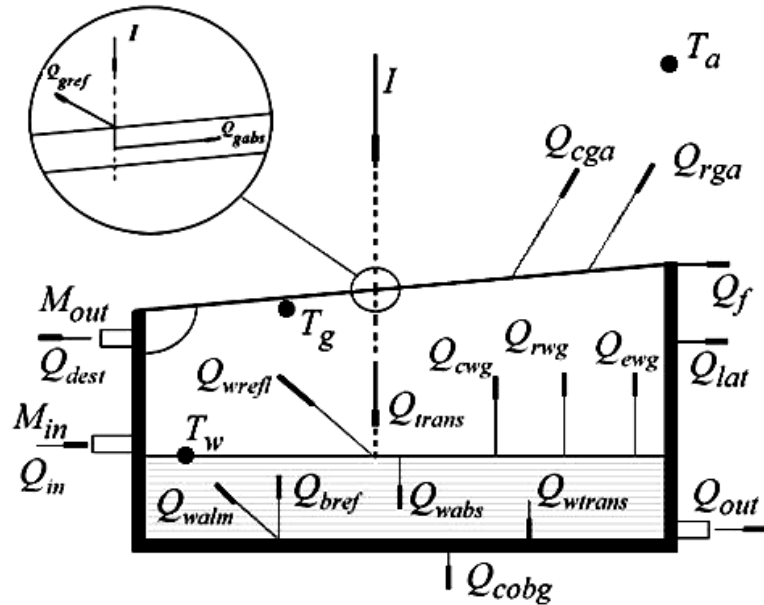


Figura 14: Balance energético de un destilador solar de batea simple. Fuente propia.

Esta última en su mayor parte es absorbida por la cuba de color negro, que en una proporción menor es reflejada al agua salina (Q_{bref}).

Una vez que la radiación llega al fondo de la cuba, la energía solar absorbida por la misma se transforma parte en calor almacenado transmitido por convección al agua (Q_{walm}) y parte se transmite a través de la pared de la cuba del destilador por el mecanismo de conducción (Q_{cobg}).

Este calor absorbido calienta el agua salina depositada en la cuba y al aumentar la temperatura del agua, la misma comienza a transmitir calor y masa al compartimiento que se forma entre ella y la cubierta de vidrio.

Esto ocurre bajo tres fenómenos de transferencia de calor, por convección (Q_{cwg}), radiación (Q_{rwg}) y evaporación (Q_{ewg}).

El primer fenómeno corresponde a la transferencia de calor por la convección interna del aire (Q_{cwg}).

El segundo se refiere al intercambio radiactivo (Q_{rwg}), entre ambas superficies ya que a las temperaturas que están, la radiación que emiten se encuentra en las longitudes de onda mayores de 3.000 μm , donde el vidrio se comporta como un cuerpo opaco, refractando la radiación, produciendo así un efecto invernadero dentro de la cuba.

El tercero es el debido al calor latente de las moléculas de vapor que se condensan en la parte interna de la cubierta (Q_{ewg}), que representa el calor necesario para evaporar el agua salina almacenada. Por esta razón, se le denomina proceso de evaporación y para efectos de determinar la eficiencia del sistema, Q_{ewg} es el calor útil.

Los vapores que se forman durante la evaporación del agua en la cuba y que se dirigen a la superficie interna de la tapa de vidrio se condensan debido al hecho de que la temperatura interior de la cubierta de vidrio es inferior a la temperatura del agua dentro la cuba ($T_w > T_g$), siendo T_g la temperatura del agua en la cubierta de vidrio y T_w la temperatura del agua en la superficie del agua depositada dentro de la cuba destiladora.

El agua destilada fluye por gravedad a lo largo de la superficie interna de la tapa de vidrio y es recogida en el canal que esta comunicado a un envase de contención de agua destilada (M_{out}).

Por otra parte, el calor cedido por convección, evaporación y radiación desde el agua salina a la cubierta de vidrio, se transfiere a la atmósfera debido a los fenómenos de convección del aire sobre la parte externa de la cubierta (Q_{cga}), y a la emisión radiactiva en las longitudes de onda en el infrarrojo hacia la atmósfera (Q_{rga}).

La convección externa (Q_{cga}), es una de las formas principales de enfriamiento de la cubierta de los destiladores. Esta consiste en que el aire exterior al destilador, al estar en contacto con la superficie caliente, asciende en forma natural extrayendo el calor de la cubierta y también de las paredes del equipo. Este efecto se ve aumentado por la acción del viento, que fuerza la extracción del calor.

La cantidad de calor aportado o perdido (Q_{in}), depende de la temperatura de ingreso de agua salina al destilador a efectos de renovación del volumen almacenado en ella.

La cantidad de calor perdido (Q_{out}), dependerá si la extracción de la salmuera dentro la cuba quita calor del sistema de destilación de la cuba.

La cantidad de calor aportado o perdido (Q_f), depende de la calidad de armado del destilador y las fugas a través de las juntas entre las diferentes partes del mismo.

La cantidad de calor perdido (Q_{dest}), depende de la temperatura de egreso del agua destilada hacia el envase contenedor.

La cantidad de calor perdido (Q_{lat}), depende de la capacidad de aislación térmica de la superficie lateral del destilador.

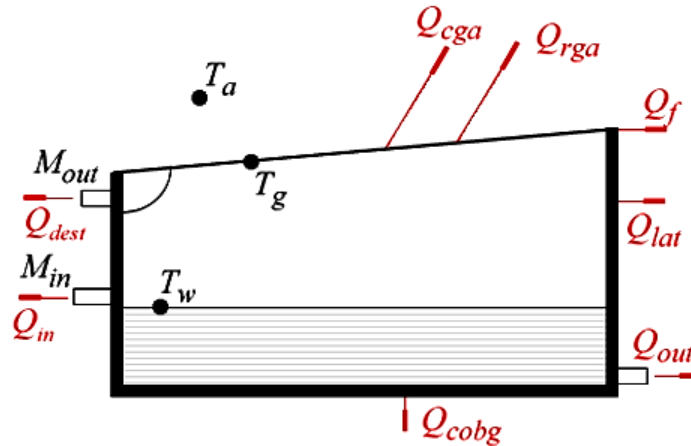


Figura 15: Pérdidas de calor de un destilador solar de batea simple. Fuente propia.

La mayor parte de los trabajos teóricos que intentan reflejar el rendimiento de un destilador solar, se basan en Dunkle (1961) y Cooper (1973), quienes para calcular la eficiencia realizaron un balance de energía en el sistema.

4.16 Principios sistémicos del destilador solar

Analizando el destilador solar como un proceso sistémico se puede definir el mismo como se muestra a continuación:

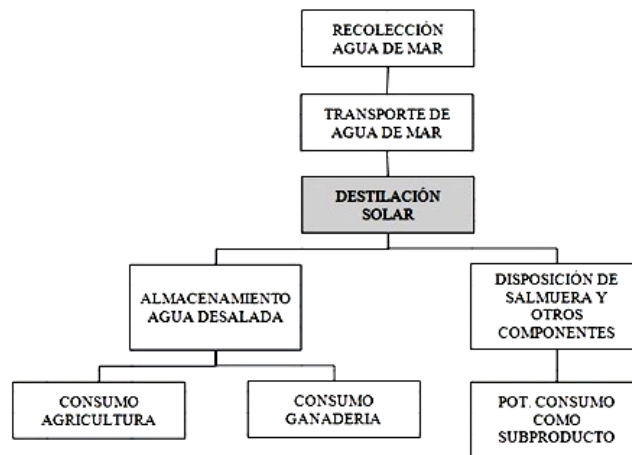


Figura 16: Esquema sistémico del destilador solar. Fuente propia.

El proceso de recolección de agua de mar posee algunas características que señalan a continuación:

Requerimiento de permisos legales para la extracción de aguas de mar

La Constitución Política, en su Art. 19, N°23, establece como bienes del Estado, aquellos que deben pertenecer a la nación y son declarados en ese rango por ley.

Los bienes estatales están excluidos del comercio humano, sólo admiten su uso y goce por medio de autorizaciones, permisos o concesiones temporales administrativas.

El artículo 595 del Código Civil dispone que todas las aguas, entre las que se incluyen las marítimas, sean bienes nacionales de uso público.

Por otro lado, para poder usar el borde costero y el agua marina para la desalación, y construir en el mar la toma, y la descarga de las aguas del proceso de desalación, es necesaria la solicitud de una concesión marítima.

La concesión marítima es un instrumento mediante el cual el ministerio de defensa nacional, por medio de la subsecretaría para las Fuerzas Armadas, ejerce la facultad privativa para conceder el uso particular en cualquier forma, de las playas y terrenos de playa fiscales dentro de una franja de 80 metros de ancho medidos desde la línea de más alta marea del litoral, de las rocas, de los fondos de mar, de las porciones de agua dentro y fuera de las bahías, de las playas de unos y otros, y de los terrenos fiscales riberaños

hasta una distancia de 80 metros medidos desde donde comienza la ribera. Las funciones de la oficina de concesiones marítimas es analizar, estudiar y elaborar los decretos supremos, exentos y resoluciones denegatorias de destinaciones marítimas, concesiones marítimas, bajo la forma de otorgamiento, renovación, modificación, transferencia, arriendo, ampliación, sucesión, término, deja sin efecto, caducidad y derogación; elaborar oficios, memorándum, mensajes y dar respuesta a las consultas formuladas por los usuarios a través de oficios, correos electrónicos y audiencias. En las etapas que conforman el sistema de concesiones marítimas participan distintos actores, según sus facultades y responsabilidades. Estos son los siguientes:

Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.

Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante Nacional.

Servicio de Impuestos Internos.

Comisión Regional de Uso del Borde Costero.

Dirección de Obras Municipales.

Dirección Regional del Servicio Nacional de Pesca.

Secretaría Regional Ministerial de Vivienda y Urbanismo.

Secretaría Regional Ministerial de Obras Públicas.

Ministerio de Relaciones Exteriores, Dirección de Fronteras y Límites del Estado.

Servicio Agrícola y Ganadero

Contraloría General de la República.

Para acceder a una concesión o destinación marítima, se debe presentar una solicitud en la capitanía de puerto correspondiente, dirigida al ministerio de defensa nacional. La autoridad marítima local revisará dicha presentación, la cual en caso de ajustarse a lo establecido en el Reglamento sobre Concesiones Marítimas, procederá a ingresarla al sistema www.concesionesmaritimas.cl, para su análisis y resolución definitiva en la subsecretaría para las fuerzas armadas. La norma general es el D.F.L. N° 340, de 1960, que contiene la ley sobre concesiones marítimas.

Aspectos regulatorios de impacto ambiental

En cumplimiento de lo establecido en el Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA) de Agosto del 2012, el proyecto debe contener un análisis de pertinencia de su ingreso a dicho sistema de evaluación ambiental, como asimismo, una descripción pormenorizada de aquellos efectos, características y circunstancias del artículo 11 de la ley 19.300 de bases generales del medio ambiente que dan origen a la necesidad de efectuar un estudio de impacto ambiental (EIA). La justificación del ingreso al SEIA de este proyecto se debió a la tipología de éste, considerada en la letra o) del listado de proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental que establece el artículo 3 del D.S. N° 95/2001 del Ministerio Secretaria General de la Presidencia, reglamento del sistema de evaluación ambiental. En efecto la letra o.6) del artículo 3 señalan, Proyectos de saneamiento ambiental, tales como sistemas de alcantarillado y agua potable, plantas de tratamiento de agua o de residuos sólidos de origen domiciliario, rellenos sanitarios, emisarios submarinos, sistemas de tratamiento y disposición de residuos industriales líquidos o sólidos, en emisarios submarinos.

La ubicación geográfica de la toma de agua.

La ubicación geográfica de la toma de agua depende de diversos factores que son el límite físico que impone la normativa legal existente, y la calidad del agua salada.

El proceso de filtrado del agua.

El agua salada para su transporte necesariamente se debe tratar, por un mecanismo físico, que reduzca el material particulado presente en ella.

El proceso de preparado del agua.

Además se puede homogenizar el nivel de salinidad del agua en particular, o los parámetros físicos químicos en general.

El proceso de transporte de agua de mar posee algunas características a señalar a continuación:

El tipo de transporte a utilizar

Debido a las características físicas químicas del agua de mar, el transporte por medio de camiones aljibes o ductos de conducción debe realizarse con materiales que soporten el actuar de la salinidad.

El proceso de almacenamiento de agua de mar y almacenamiento de agua desalada posee algunas características a señalar a continuación:

El estanque de agua de mar.

El sistema de almacenamiento de agua de mar antes de ingresar al proceso de desalación debe poseer la capacidad volumétrica suficiente para hacer eficiente la relación costo del transporte versus capacidad instalada de almacenamiento.

El estanque de agua desalada.

El sistema de almacenamiento de agua post desalación debe poseer la capacidad volumétrica suficiente para hacer eficiente la relación demanda de agua versus capacidad instalada. Además debe poseer las condiciones higiénicas necesarias para cumplir con la normativa vigente sobre uso agrícola, además de la relación costo del transporte versus capacidad instalada de almacenamiento.

Las instalaciones de distribución de agua desalada.

Se debe optimizar la eficiencia del transporte del agua hacia la disposición en bebederos de agua para animales y la irrigación sobre la superficie cultivable.

El proceso de almacenamiento salmuera posee algunas características a señalar a continuación:

El espacio físico para la deposición de salmuera.

Debido a que el proceso de retiro de la salmuera depositada dentro de la cuba de destilación, la misma posee una cantidad considerable de agua, se debe disponer de una cancha de secadero.

La disposición final o tratamiento para consumir el subproducto

Luego de reducir el porcentaje de agua de la salmuera por intermedio del secado, la misma puede o bien comercializarse o disponerse finalmente como un residuo del proceso. Uno de los aspectos ambientales más relevantes en el campo de la desalación es el de los vertidos de salmueras o concentrados. En los últimos años, se han incrementado los esfuerzos en hacer que estos vertidos tengan en menor impacto posible e incluso en la posibilidad de su posible aprovechamiento industrial por la vía de la extracción de sales u otros productos químicos. En el caso de las salmueras de agua de mar, el problema está resuelto o al menos controlado mediante las prácticas habituales (estudios medioambientales previos, dilución previa a la descarga, uso de difusores, localización de la descarga, planes de vigilancia, etc.). En todo caso el lugar físico de deposición de este residuo aplicando los métodos de gestión antes descritos, será en el lugar de carga originario.

Las características del agua del mar

Las dos propiedades físicas más importantes del agua de mar suministrada al proceso de desalinización son temperatura y salinidad, que determinan la densidad del agua. En el océano, la densidad suele aumentar con la profundidad, de modo que las capas de agua superiores se apoyan siempre en otras de mayor densidad. No obstante, esta situación de equilibrio puede verse rota por multitud de factores y, en un momento dado encontrarse aguas más densas sobre otras de una densidad ligeramente inferior. Esto provoca una inestabilidad gravitacional que empuja al agua más "pesada" a hundirse mientras la capa subsiguiente, más "ligera", asciende para ocupar su lugar, estableciéndose una circulación vertical.

La temperatura del agua de mar varía entre -2°C (Aguas polares), y 42°C (máximos valores registrados en aguas costeras). El rango de temperaturas en tierra es mucho más amplio y abarca desde los -68°C (Siberia, 1892) hasta los 58°C (Libia, 1922). Esto da cuenta el poder térmico estabilizante del mar.

La temperatura en superficie depende de la cantidad de radiación solar que reciba y de qué fracción de ésta refleje. En cualquier caso, la penetración de la luz solar es escasa y se reduce a los primeros metros (entre 15 metros en algunas aguas costeras y 200 metros en aguas oceánicas abiertas muy claras). Por otro lado, el mar pierde calor por efecto térmico de la conducción, ya que en promedio la superficie oceánica está más caliente que el aire, y por efecto de la evaporación, aunque es éste último el medio de pérdida de calor más efectivo, disipando del orden de 10 veces más que la conducción.

En general, la temperatura del agua disminuye con la profundidad. Se puede establecer tres zonas con características definidas, una Zona que abarca alrededor de los 100 primeros metros, y corresponde a la zona de la columna de agua que se ve afectada por el stress del viento. Se caracteriza por tener valores de temperatura casi inalterables. Inmediatamente por debajo de la capa de mezcla se produce un fuerte descenso de la temperatura hasta rondar los 5°C en torno a los 1000 metros. Y una capa profunda en donde la temperatura se estabiliza y, aunque sigue disminuyendo, lo hace de forma muy suave y apenas perceptible. En cualquier caso, los espesores de estas capas son relativos y pueden variar sensiblemente de una localización a otra.

La salinidad en el mar se entiende por la concentración de sales disueltas en el agua.

Un valor medio para esta propiedad puede ser de 3,5% en peso, o en partes por mil. No obstante, este símbolo generalmente se omite, debido a que la salinidad se define formalmente como un cociente de conductividades y por lo tanto, adimensional. Aunque podemos suponer que la salinidad ronda el valor de 35 (treinta y cinco gramos por kilogramo de agua), lo cierto es que en distintas zonas del planeta este valor varía sensiblemente. Así la salinidad en zonas más cerradas como el Mediterráneo o el mar rojo es muy superior a este valor medio y en otras como el Mar Báltico, con gran aporte fluvial, desciende bastante por debajo del mismo.

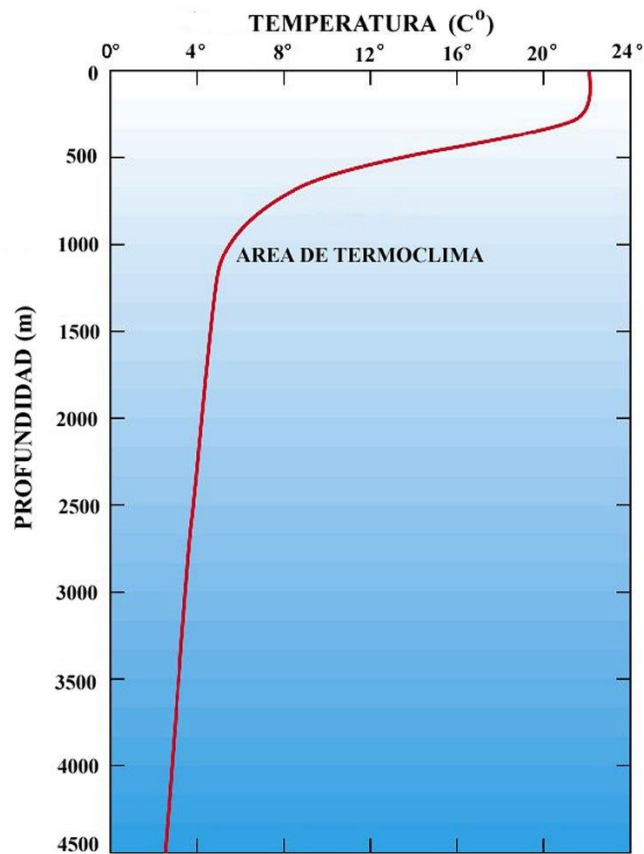


Figura 17: Relación profundidad/temperatura en el mar. Fuente: propia.

La sal más abundante es el cloruro sódico, que supone la mayor parte de la sal disuelta en el mar, pero existe gran cantidad de otros iones que se presentan en concentraciones menores pero muy significativas, por lo que suponen para el sustento de la vida en el mar. En general se acepta que, aunque el valor total de salinidad varíe de una zona a otra, las proporciones relativas entre estos iones permanecen prácticamente constantes (Navarro, 2010).

En la superficie del océano, la distribución de la salinidad alcanza los valores máximos en torno a los 20° de latitud en ambos hemisferios, ya que en estas zonas la evaporación es mayor que la precipitación. Esta zona corresponde con los cinturones desérticos en tierra. Los valores mínimos se alcanzan en bajas latitudes, en las que hay un mayor aporte fluvial y se funden los hielos polares.

Con respecto a la distribución de la salinidad en profundidad, los valores suelen ser bastante altos en los primeros metros en relación con las zonas más profundas. Tras una zona que varía entre los 30 y 100 metros de profundidad y que presenta un valor constante. Luego se produce un fuerte descenso hasta cerca de los 1000 m, en que se estabiliza en torno a 34.5 o 35 gramos por kilogramo de agua (Navarro, 2010).

La calidad el agua producida

Los requisitos que deberá cumplir el agua producida por el destilador solar debe cumplir con las normativas legales existentes, a través de la Nch. 1333/OF78 (1987), en donde se difieren los usos de las aguas producidas y los requisitos que las mismas deberán cumplir. Para el caso de consumo humano la norma referencia a otras, que son la Nch. 409/1/Of2005 (2005), y Nch. 409/2/Of2005 (2005).

Para el caso de consumo animal, la norma indica cumplir con los mismos requisitos que el agua para consumo humano.

En el caso de agua para riego, la misma debe cumplir requisitos químicos, como son el PH, determinados elementos químicos, la razón de absorción de sodio, la conductividad específica y sólidos disueltos totales, herbicidas e insecticidas, y también requisitos bacteriológicos como son la cantidad de coliformes fecales que la misma posee.

4.17 Antecedentes históricos del destilador solar de cuba simple

La primera aplicación de la destilación solar, comenzó en 1872 en la región del desierto de Las Salinas, Chile (Duffie y Beckman, 1991).

Fué construida para abastecer de agua fresca a la los trabajadores y sus familias de una mina de salitre y otra mina de plata cercana. Usaron los efluentes de la mina de salitre, que poseían muy alta salinidad (140 gr/kg), como agua de alimentación para los aparatos de destilación. Fue construida de madera cubierta con vidrio. Constaba de 64 cubas cubriendo una superficie total de 4.450 m² en un área de superficie total de 7.896 m². Su producción era de 22,70 m³ de agua dulce por día (Maluf, 2005).

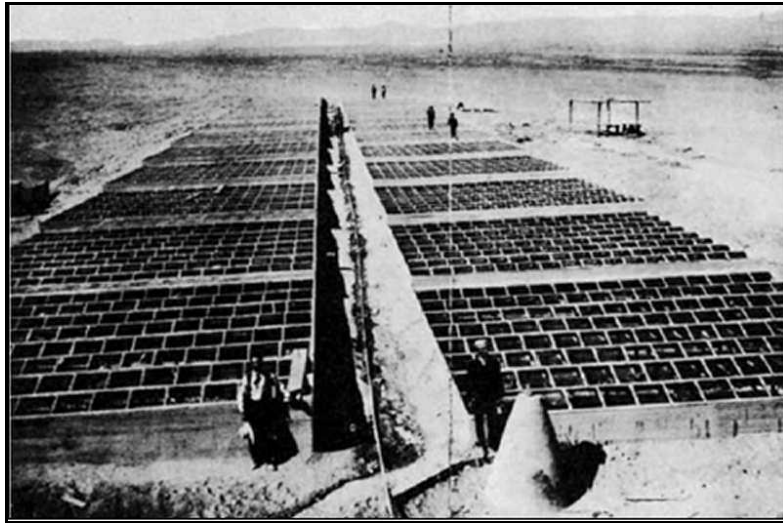


Figura 18: Sistema de destilación solar en la región del desierto de Las Salinas en Chile.

Fuente: Duffie y Beckman, 1991.

La Secretaria del Interior de EE.UU. estableció en 1952 la oficina de agua salina (OSW), dándole la tarea de financiar investigaciones sobre desalación y la construcción de cinco plantas de demostración del proceso. Entre ellas se construyó una planta de destilación solar en Daytona Beach, Florida, Estados Unidos (Talbert et al., 1970).

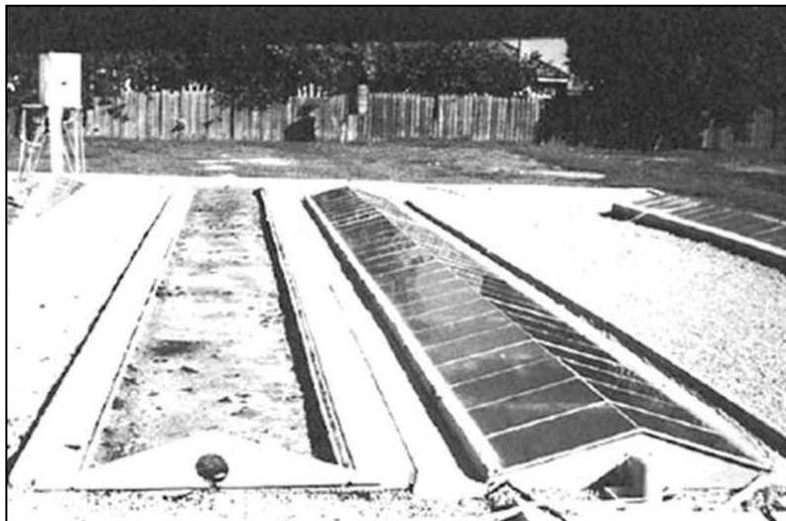


Figura 19: Sistema de destilación solar de Daytona Beach, Florida, Estados Unidos.

Fuente: E. Delyannis.

También se construyeron plantas de destilación solar en el desierto australiano para el suministro de agua, a partir de agua salina para la población y el ganado. La mayor parte de estas plantas de destilación solar fueron instaladas en Coober Pedy (Wilson, 1957, Cooper, 1969).

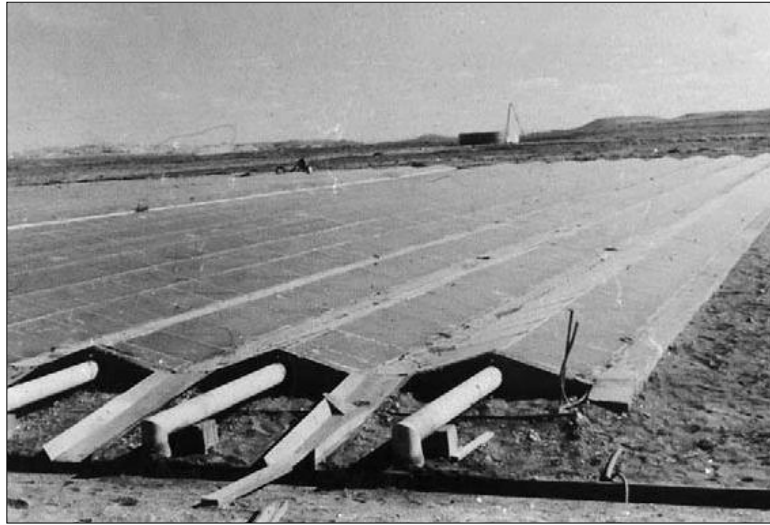


Figura 20: Planta de destilación solar en Coober-Pedt, Australia. Fuente: E. Delyannis.

En los años 70, varias plantas de destilación solar fueron construidas en cuatro islas griegas para proporcionar agua fresca a pequeñas comunidades (Delyannis, 1967, 1968, 1987). Su capacidad varió desde 2.044 hasta 8.640 m³/día..

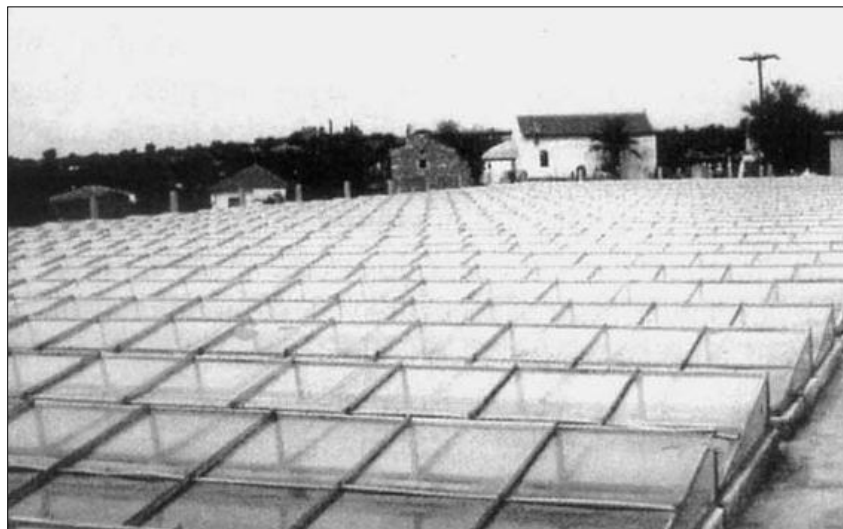


Figura 21: Planta de destilación solar en la isla de Symi, Grecia. Fuente: E. Delyannis.

4.18 Revisión bibliográfica del destilador solar de cuba simple

En lo referente a destiladores solares de cuba simple, muchos trabajos teóricos y experimentales han sido llevados a cabo para mejorar el rendimiento de diferentes parámetros de funcionamiento de los mismos.

Una revisión sobre la utilización de energías renovables en diferentes tipos de sistemas de desalinización fue presentada por Kalogirou (2004,2005).

Diferentes materiales absorbentes fueron utilizados por Akash et al. (1998) y Nijmeh et al. (2005), para estudiar su efecto en un destilador solar con pendiente doble y así mejorar la productividad del agua. Estos autores también estudiaron el efecto de la salinidad del agua en la destilación solar, y concluyeron que la producción de agua destilada disminuye con la disminución de la salinidad.

Akash et al. (2000), estudió el efecto de la utilización de un destilador solar de cuba simple disponiendo la cubierta a diversos ángulos de inclinación entre 15°y 55°, encontrando que el ángulo de inclinación óptimo para la producción de agua era de 35°.

Nafey et al. (2000), investigó los principales parámetros que afectan el rendimiento del destilador solar con cuatro modelos diferentes de diseño siendo estos operados bajo las mismas condiciones climáticas.

Nafey et al. (2001), estudió experimentalmente el uso de caucho de color negro o material de grava oscuro en un destilador solar de cuba simple como dispositivo de almacenamiento para mejorar la productividad.

Khalifa et al. (1999), llevó a cabo un estudio experimental sobre nuevos diseños de destiladores solares de cuba simple, y analizando el efecto de algunas modificaciones sobre su productividad y eficiencia. Estas modificaciones incluyen el precalentamiento de agua de alimentación por medio de un calentador solar y la utilización de condensadores externos e internos para la condensación de vapor, así como para el precalentamiento del agua de alimentación.

Al-Karaghoulí y Alnaser (2004a, b), realizaron un estudio experimental comparativo entre una cuba de un piso y otra de dos pisos teniendo ambas la misma área, concluyendo que la adición de material aislante a los lados de los destiladores solares

provoca un aumento notable en la producción de agua destilada, y el promedio diario de producción una cuba de dos pisos sigue siendo alrededor de un 40% superior a la producción de la de un piso.

El-Sebaili (2004), examinó el efecto de la velocidad viento en la productividad diaria de diferentes diseños de destiladores solares de cuba simple con simple, dobles y triples pisos utilizando simulación computarizada, encontrando que la producción diaria se incrementa con el aumento de la velocidad del viento, hasta una velocidad específica donde más allá del cual el aumento de la producción se vuelve insignificante.

Al-Hinai et al. (2002a), reportó el uso de un modelo matemático para predecir la productividad de un destilador solar de cuba simple en Omán, bajo diferentes condiciones climáticas, diseño y parámetros operacionales.

Modelos térmicos del destilador solar de cuba simple fueron publicados por Tiwari y Noor (1996), Tiwari y Prasad (1996), y al Tiwari et al. (1997) y Tiwari (2002).

Tiwari et al. (2003b), desarrollaron expresiones para las temperaturas del agua y la cubierta de vidrio, el rendimiento por hora y la eficiencia instantánea tanto para sistemas de destilación solar pasivos como activos.

El rendimiento de un destilador solar convencional se puede predecir mediante diversos métodos, tales como el de simulación por ordenador (Cooper, 1969), circuitos térmicos y diagramas de Sankey, Frick (1970), análisis periódicos y transitorios, Cooper (1970); Nayak et al. (1980), Sodha et al. (1980), Tiwari y Bapeswar (1983), El-Sayed (1983), Tiwari y Madhuri (1987), los métodos de iteración, Touré y Meukam (1997), y los métodos numéricos, Lof et al. (1961), Sartori (1987), y Sharma y Mullick (1991).

En la mayoría de los métodos antes mencionados se han utilizado las relaciones de energía y de masa, expuestas por Dunkle (1961).

Delyannis et al. (1980) y Belessiotis et al. (1995), propusieron un método teórico simplificado para la evaluación del desempeño de un destilador solar de cuba simple, prediciendo la producción de agua a mediano y largo plazo.

Para este estudio, a fin de obtener un modelo que interprete el funcionamiento y la producción de agua de un destilador solar de batea simple, se utilizó el método Entrada-

Salida propuesto por Belessiotis et al. (1995). Este se basa en análisis más globales en lo referente a la transferencia de energía dentro del destilador, enfocándose principalmente en la producción de agua a mediano y largo plazo del mismo.

4.19 El modelo de Entrada-Salida.

De una serie de trabajos teóricos y experimentales desarrollados por el Prof. A. Delyannis y el Dr. E. Delyannis, además de su validación en terreno en plantas de destilación solar ya instaladas, se concluye que la producción media diaria de agua destilada se determina de manera satisfactoria por la siguiente ecuación:

$$M_{salida} = F_1 H_d + F_2 (T_{ad} - \bar{T}_{wd}) + F_3 \quad (1)$$

El método denominado "Entrada-Salida", basado en la ecuación anterior, relaciona la producción diaria de agua del destilador M_{out} (Salida) expresada en Kg, con la radiación solar incidente H_d (Entrada) expresada en MJ/m², y el estado inicial de operación del destilador expresado por la diferencia entre la temperatura del agua salina al comienzo del día T_{wd} expresada en Kelvin, y la temperatura del aire en el ambiente T_{ad} expresada en Kelvin. F_1 , F_2 y F_3 son coeficientes característicos de cada destilador solar y que expresan su eficiencia, pérdida e inercia respectivamente.

La figura muestra el resultado del destilador después de las mediciones que se llevaron a cabo en el Laboratorio de Pruebas y Desarrollo de Sistemas de Energía Solar y Otras, NCSR "Demócrito", durante un típico día de sol (Delyannis et al, 1980).

Siendo A la intensidad de la radiación, B la temperatura del agua en la Cuba, C la producción acumulada y D la temperatura ambiente. La forma de la producción acumulada diaria de agua M_{outs} , que se ve en la curva C, es típica en destiladores solares semejantes. Al observar las curvas, se vislumbran tres fases de operación:

Fase I: inicio de la operación del destilador.

Fase II: pseudo-estado estacionario.

Fase III: saturación del destilador.

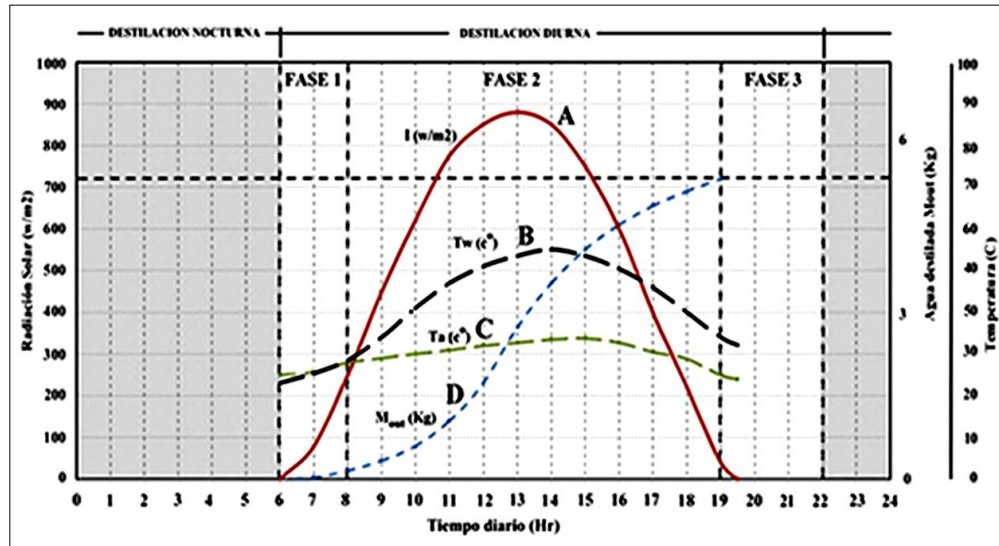


Figura 22: Comportamiento térmico de un destilador solar durante un día soleado.

Fuente: propia adaptado de Delyannis et al, 1980.

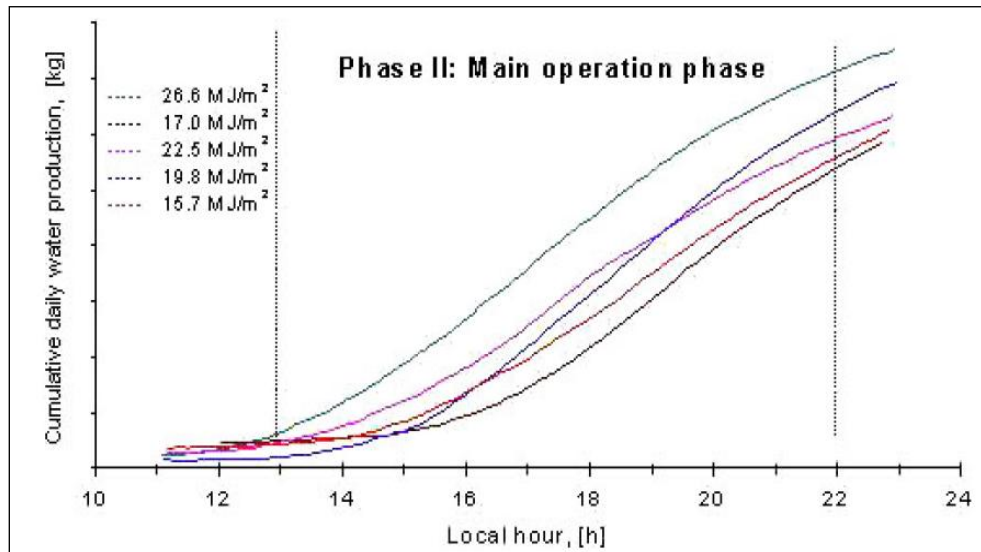


Figura 23: Curvas de producción de agua acumulada a lo largo del día con varios niveles de radiación. Fuente: Voropoulos et al., 2002.

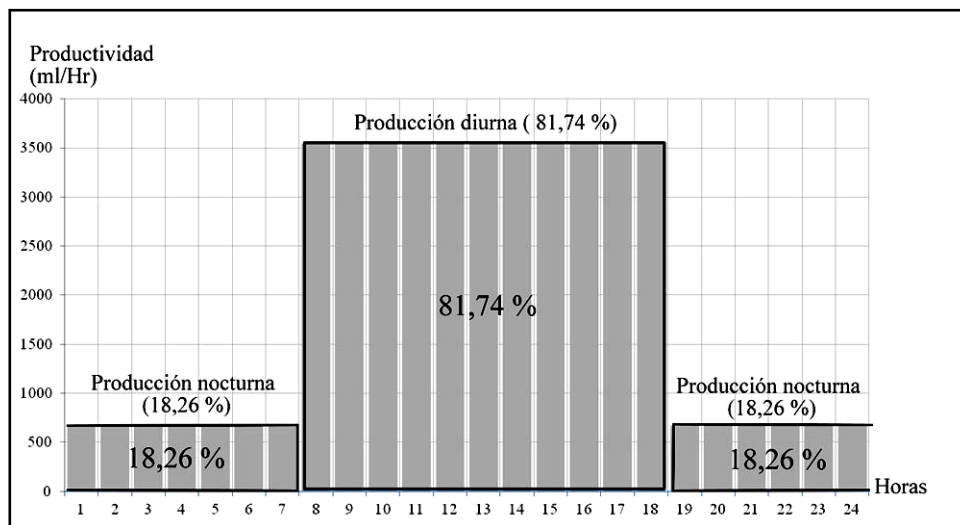
La fase II es la principal y más importante, durante la cual se produce la mayor parte del agua destilada diaria. Durante esta fase, la forma de la curva de producción de agua tiene un comportamiento casi lineal, lo que significa que la producción del destilador se puede correlacionar con las condiciones climáticas existentes diarias mediante el uso de

ecuaciones lineales simples. La linealidad de la curva anteriormente descrita parece dependiente de la radiación solar existente y la temperatura ambiente como se ve en la siguiente figura, (Voropoulos et al., 2002).

4.19.1 La Producción nocturna

Como puede observarse, la diferencia de temperatura entre el agua y el ambiente es significativamente mayor durante el día que en la noche. Esto explica la productividad en la noche que dura al final de la fase 3 del modelo utilizado, hasta el comienzo de la Fase I del día siguiente.

Badran (2007), encontró que la productividad durante la noche contribuyó a alrededor del 16 % del total de lo producido durante el día, como lo muestra la siguiente figura.



Figur

a 24: Productividad de un destilador solar durante el día y la noche. Fuente: Badran, 2007.

4.19.2 Análisis de la fase de pseudo-estado estacionaria del modelo

Para simplificar el análisis teórico del funcionamiento del destilador, las hipótesis que se hacen son las siguientes:

Se considera que no debe haber fugas de vapor en el destilador.

No hay gradiente de temperatura en el espesor a lo largo de la cubierta de vidrio, ni en el agua salina contenida en la cuba.

No existe pérdida de calor a través de las superficies laterales e inferior de la cuba.

La masa de agua contenida en la cuba se mantiene constante.

La condensación producida en la superficie interior de la cubierta de vidrio es una película, no formándose gotas en ella.

La inclinación de la cubierta de vidrio se toma como una constante determinada en trabajos anteriores (Akash et al., 2000).

Las propiedades físicas del vidrio son estándar, con un espesor de 4 mm (Panchal, 2016), y emisividad de la cubierta de vidrio de 0,94 (Sherwin, 1993),

La producción durante la noche será el 16 % de lo producido durante el día (Badran, 2007).

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio es constante.

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo es constante.

El balance de energía para el agua en el destilador solar, se expresa como (Sharma & Mullick, 1991):

$$\frac{C_w}{A_w} \frac{dT_w}{dt} = k(t)\eta_o I(t) - U_t [T_w(t) - T_a(t)] - U_b [T_w(t) - T_a(t)] \quad (2)$$

Se asume que el gradiente de temperatura entre el agua y la cubierta transparente es insignificante, y que la masa de agua en la cuba es constante durante todo el día.

La energía utilizada para realizar el proceso de evaporación es:

$$\frac{\dot{Q}_e}{A_g} = \frac{h_{ewg}}{U_i} U_t [T_w(t) - T_a(t)] \quad (3)$$

El caudal de agua producida en kg/seg es:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_e}{h_{fg}} \quad \text{ó} \quad m(t) = \frac{Q_e(t)}{h_{fg}} \quad (4)$$

Al combinar las ecuaciones. (3) y (4), y después de integrar en un período del día tenemos:

$$M_{salida} = A_g \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} \Delta t (\bar{T}_{wd} - T_{ad}) \quad (5)$$

Integrando la ecuación (2) en el período de pseudo estado estacionario, y combinando su resultado con la ecuación (5), obtenemos una ecuación similar a la ecuación. (1), en la que los coeficientes F_1 , F_2 y F_3 pueden determinarse de la siguiente forma:

$$M_{salida} = F_1 H_d + F_2 (T_{ad} - \bar{T}_{wd}) + F_3 \quad (6)$$

Donde

$$H_d = \int_0^{\Delta t} I(t) dt \quad (7)$$

que es la intensidad de la radiación solar evaluada en un periodo de tiempo t .

En la ecuación (6), F_1 representa un coeficiente característico que depende de los parámetros del destilador y que muestra la eficiencia del mismo en Kg.m²/MJ.

$$F_1 = \bar{k}\eta_o \frac{A_g A_w}{C_w} \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} \Delta t \quad (8)$$

F_2 es también un parámetro del destilador, que representa la perdida en el sistema en Kg/Kelvin.

$$F_2 = (U_t + U_b) \frac{A_g A_w}{C_w} \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} (\Delta t)^2 \quad (9)$$

y el término F_3 representa la inercia del destilador en Kg.

$$F_3 = A_g \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} (\Delta t)_{fase1} (T_{win} - T_{ain}) \quad (10)$$

Para el cálculo de T_{win} , la temperatura del agua dentro de la cuba al iniciar el día, se utiliza la siguiente ecuación (Beleslotis et al., 1995):

$$T_{win} = T_{an} + (T_{wf} - T_{an}) \exp \left[\frac{A_w}{C_w} (U_t + U_b) \Delta t_n \right] \quad (11)$$

La Pérdida global de flujo de calor entre el agua y el ambiente expresada en W/m^2 Kelvin es:

$$U_t = \left[\frac{1}{U_i} + \frac{1}{A_r U_o} \right]^{-1} \quad (12)$$

El coeficiente de transferencia de calor entre el agua y la cubierta de vidrio expresado en W/m^2 Kelvin es:

$$U_i = h_{cwg} + h_{ewg} + h_{rvg} \quad (13)$$

El coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta de vidrio y el ambiente expresado en W/m^2 Kelvin es:

$$U_o = \frac{h_w (T_g - T_a)}{(T_g - T_s)} + h_{rgs} \quad (14)$$

El coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador, U_b está definido por las características físicas del destilador, y varía según la aislación que posea el mismo.

La relación entre el área de la superficie de la cubierta de vidrio en m^2 , y el área de la superficie de agua en la cuba en m^2 esta dada por:

$$A_r = \frac{A_g}{A_w} \quad (15)$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección, evaporación y radiación entre el agua en la cuba y la cubierta de vidrio están dados por las ecuaciones (Dunkle, 1961):

$$h_{cwg} = 0.884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g)T_w}{2016 - P_w} \right]^{1/3} \quad (16)$$

$$h_{ewg} = \frac{9.15 \times 10^{-7} h_{cwg} (P_w - P_g) h_{fg}}{(T_w - T_g)} \quad (17)$$

$$h_{rwg} = 0.9 \sigma (T_w^2 + T_g^2) (T_w + T_g) \quad (18)$$

Los coeficientes de transferencia de calor por convección y radiación entre la cubierta de vidrio y el ambiente están dados por las ecuaciones:

$$h_{rgs} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_s^2) (T_g + T_s) \quad (19)$$

$$h_{cgs} = h_w \frac{(T_g - T_a)}{(T_g - T_s)} \quad (20)$$

Todos estos coeficientes expresados en W/m²*K

Para realizar el cálculo de los anteriores coeficientes de transferencia de calor se pueden utilizar la siguiente relación (Belessiotis et al, 1995):

$$T_s = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (21)$$

Siendo la T_s , la temperatura del cielo que es una temperatura ficticia que relaciona las moléculas y partículas suspendidas en la atmosfera con la radiación solar emitida y absorbida por las mismas. Esta T_s depende de la condición atmosférica y varia entre 230 °K para condiciones de cielo frio y claro, hasta 285 °K para cielos cálidos y con nubes.

La presión parcial del vapor de agua en la cercanía de la cubierta de vidrio P_g expresada en pascales, se puede calcular con la siguiente ecuación (Fernández y Chargoy, 1990):

$$P_g = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_g}\right) \quad (22)$$

La presión parcial del vapor de agua en la superficie de la misma P_w expresada en pascales, se puede calcular con la siguiente ecuación (Fernández y Chargoy, 1990):

$$P_w = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_w}\right) \quad (23)$$

4.19.3 Duración de las fases de operación

Si bien el modelo de Entrada-Salida (Entrada – Salida), se centra en el análisis de la producción de la fase II, denominada fase de pseudo-estado estacionario, es preciso determinar los tiempos de duración tanto de esa fase como de las demás.

El tiempo de operación durante el día del destilador, es de 12 h, comenzando 6 horas antes del mediodía solar, y finalizando 6 horas después del mismo (Belessiotis et al. 1995).

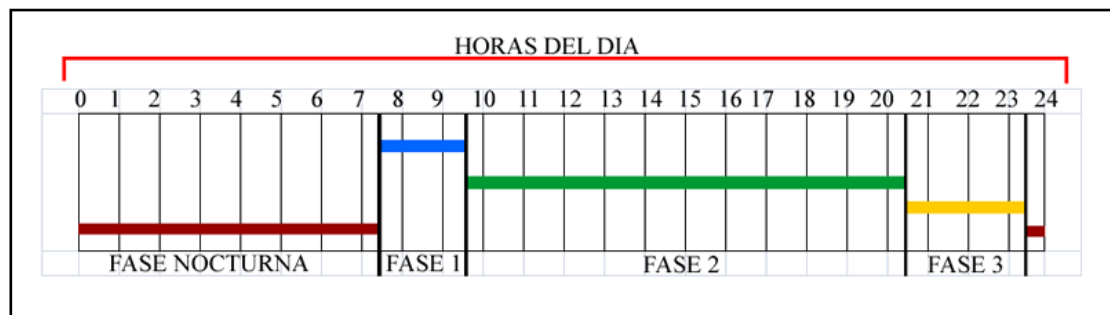


Figura 25: Duración de las fases de destilación. Fuente: Propia.

Con respecto a la Fase I, se indica que el sistema se encuentra en un estado de inercia, es decir, sin ningún cambio notable en el contenido de energía dentro de la cuba (Belessiotis et al. 2010). Pero a medida que pasa el tiempo, el aumento de la temperatura

ambiente comienza en primera instancia a hacer incrementar la temperatura de la cubierta de vidrio para luego hacer aumentar la temperatura del agua dentro de la cuba. La duración de la Fase I, que da inicio al tiempo de operación durante el día del destilador, comienza 6 horas antes del mediodía solar y finaliza cuando la temperatura del agua dentro de la cuba comienza a aumentar y se iguala a la temperatura de la cubierta de vidrio.

La fase II comienza cuando finaliza la Fase I, es decir cuando comienza a aumentar la temperatura del agua salina y se equipara con la temperatura de la cubierta y termina 6 horas después del mediodía solar.

La fase III, denominada fase de saturación del destilador, tendrá un periodo de duración que será cuando finaliza la fase II, y finaliza en el momento del crepúsculo náutico (SHOA, 2011).

La producción nocturna comienza al finalizar la fase III, y termina al inicio de la fase I del día siguiente.

Debido a que en este escrito los parámetros que varían con la hora del día, la intensidad de la radiación solar, la temperatura ambiente y la velocidad del viento se tomaron con intervalos de 1 hora, la duración de las fases del modelo se ajustará a estos intervalos.

4.19.4 Las condiciones climáticas

Debido a que existen diferencias climáticas apreciables entre las épocas del año, el modelo tendrá diferente producción de agua destilada a lo largo del año. Para un correcto análisis del mismo se tomaron dos días típicos del año, uno en época de invierno y otro en época de verano. Se supone que en verano el modelo producirá mayor cantidad de agua destilada, ya que la temperatura ambiente y la radiación solar son mayores que en época de invierno.

4.19.5 Descripción de los parámetros del modelo

Los parámetros que intervienen en el modelo son los siguientes:

El ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio, α

Si bien muchos autores han estudiado el ángulo de inclinación óptimo que maximiza la productividad del destilador, Khalifa y Hamood (2009) concluyen que un ángulo de inclinación de la cubierta en torno a los 30° , da la productividad más alta al destilador.

El área de la superficie del agua en la cuba, A_w (m^2)

Se considera que la superficie del agua salina dentro del destilador será de $1 m^2$.

El área de la superficie de la cubierta de vidrio, A_g (m^2)

Se consideró que la superficie de la cubierta de vidrio será de $1.15 m^2$.

Esta diferencia entre la superficie del agua en la cuba y de la cubierta de vidrio ocurren debido al ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio. Entonces:

$$A_g = \frac{A_w}{\cos 30^\circ} = 1m^2 / 0,866 = 1,15m^2 \quad (24)$$

La relación entre A_w y A_g , A_r .

La relación entre la superficie del agua en la cuba y de la cubierta de vidrio esta dada por Belessiotis et al. (1995), como:

$$A_r = \frac{A_g}{A_w} = 1,15m^2 / 1,00m^2 = 1,15 \quad (25)$$

La profundidad del agua salina dentro del destilador, H_w (m)

Se investigó el efecto de la profundidad del agua salina dentro del destilador, encontrando que la transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de

vidrio, y por lo consiguiente el volumen de agua destilada, depende en gran medida de la profundidad del agua en la cuba (Tripathi & Tiwari, 2005).

A medida que aumenta la profundidad del agua, la productividad del destilador se reduce (Badran, 2007).

En el diseño de un destilador solar se puede minimizar la altura del agua salina para mejorar la productividad del mismo, teniendo en cuenta también que bajas alturas de agua salina implican una mayor mantención del sistema debido a la rápida concentración de residuos salinos en el fondo de la cuba. Se consideró que el modelo planteado posea una altura de agua salina de 0,05 m.

El volumen de agua salina dentro del destilador, V_w (Kg)

Se consideró el volumen de agua salina dentro del destilador como:

$$\begin{aligned} \text{Volumen} &= \text{Superficie del agua salina} \times \text{altura del agua salina} \\ \text{Volumen} &= 1 \text{ m}^2 \times 0,05 \text{ m} = 0,05 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (26)$$

La salinidad del agua, SA_w (psu)

La salinidad es el contenido de sal disuelta en un cuerpo de agua. Dicho de otra manera, es válida la expresión salinidad para referirse al contenido salino en el agua. El porcentaje medio que existe en los océanos es de 35 gramos por cada litro de agua.

En la actualidad se expresa la salinidad en Unidades Prácticas de Salinidad (psu), que es la relación de conductividad de una muestra de agua de mar con una solución estándar de cloruro de potasio KCl. Si bien las relaciones no tienen unidades, este no es el caso ya que 35 psu equivale exactamente a 35 g de sal por litro de solución.

Según la Comisión Permanente del Pacífico Sur. (2010), la salinidad superficial en Chile muestra valores mínimos de 34,0 psu entre Coquimbo y Pichidangui, y entre Antofagasta y Coquimbo se observan valores de 34,5 psu. A efectos de simplificar el modelo matemático del destilador solar, se tomará una salinidad para el agua dentro de la cuba de 30.0 psu o g/lit.

La masa de agua salina dentro del destilador, M_w (Kg)

Si se toma la densidad del agua salina como $1018,2 \text{ Kg/m}^3$, en base a una salinidad de 30 g/lit a una temperatura de $30 \text{ }^\circ\text{C}$, la masa de agua salina depositada en la cuba será (Sharqawy et al., 2010):

$$\begin{aligned} \text{Masa de agua} &= \text{densidad} \times \text{volumen} \\ \text{Masa de agua} &= 1018,2 \text{ Kg/m}^3 \times 0,05 \text{ m}^3 = 50,91 \text{ Kg} \end{aligned} \quad (27)$$

La constante de Stefan Boltzmann, σ ($\text{W/m}^2\text{K}^4$)

Se considera la constante de Stefan Boltzmann como $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

La emisividad de la cubierta, ϵ_g

De acuerdo a Sherwin (1993), la emisividad de la cubierta de vidrio se tomará como 0,94.

La eficiencia óptica del destilador, η_o

La eficiencia óptica de un destilador solar, η_o , se define como la fracción de radiación incidente emitida desde el exterior del destilador, que es absorbida por el agua y el revestimiento de la cuba. Esta eficiencia óptica se compone de dos eficiencias ópticas parciales denominadas η_1 y η_2 , que son la fracción de radiación incidente absorbida por la superficie exterior del agua salina y la fracción de radiación incidente absorbida por la superficie inferior del agua salina. Según Cooper (1973), los valores de estas eficiencias parciales son $\eta_1 = 0,27$ y $\eta_2 = 0,58$. Se tomó a η_o como la suma de η_2 mas η_1 siendo:

$$\eta_o = \eta_2 + \eta_1 = 0,27 + 0,58 = 0,85 \quad (28)$$

La posición geográfica del destilador

La posición geográfica para la instalación del destilador esta ubicada en la localidad de El Peñón, Provincia de Elqui, Región de Coquimbo entre las comunas de Andacollo y Coquimbo.



Figura 26: Ubicación del destilador solar. Fuente Google Earth.

A efectos de simplificar el modelo matemático del destilador solar, y debido a que los datos de radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente están tomados en en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar (Lilén), aproximadamente a 10 km al sur del cruce ruta 43 Ovalle-La Serena, camino a la Cantera, ubicada en la parcela experimental Pan de Azúcar del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Comuna de Coquimbo, Provincia de Elqui, región de Coquimbo, se tomarán las coordenadas geográficas de la misma. Las coordenadas geográficas de la estación meteorológica son:

Tabla 9: Datos geográficos de la estación meteorológica Lilén, Pan de Azúcar.

Este	284791
Sur	6671507

Fuente: propia (UTM GS84).



Figura 27: Ubicación de la estación meteorológica, Lilen, Pan de azúcar. Fuente: Google Earth.

La temperatura ambiente, T_a (Kelvin)

La temperatura ambiente depende de la hora del día (tiempo), y para este escrito es tomada en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar, (Lilén). Se tomaron las mediciones de temperatura ambiente promedio de un día típico de invierno (24 de Junio) y de un día típico de verano (24 de Diciembre) del periodo 2004-2009. Las mediciones están dadas con intervalos de 1 hora a lo largo del día.

La velocidad del viento, V (m/s)

La velocidad del viento depende de la hora del día (tiempo), y para este escrito es tomada en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar, (Lilén).

Se toma las mediciones de velocidad del viento promedio de un día típico de invierno (24 de Junio) y de un día típico de verano (24 de Diciembre) del periodo 2004-2009. Las mediciones están dadas con intervalos de 1 hora a lo largo del día.

La intensidad de la radiación solar, H_d (W/m^2)

La intensidad de la radiación solar depende de la hora del día (tiempo), y para este escrito es tomada en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar, (Lilén).

Se toma las mediciones de radiación solar promedio de un día típico de invierno (24 de Junio) y de un día típico de verano (24 de Diciembre) del periodo 2004-2009. Las mediciones están dadas con intervalos de 1 hora a lo largo del día. Los datos utilizados figuran en anexos.

El coeficiente de transferencia de calor del viento, h_w ($\text{W/m}^2\text{K}$)

Se utilizará para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor del viento h_w , la siguiente correlación (Watmuff et al., 1997):

$$\begin{aligned} h_w &= 2.8 + 3V \text{ (para } V \leq 5 \text{ m l seg)} \\ h_w &= 0.65V^{0.8} \text{ (para } V \geq 5 \text{ m l seg)} \end{aligned} \quad (29)$$

Siendo V la velocidad del viento que incide en la cubierta de vidrio y que depende de la hora del día.

La temperatura ambiente al inicio de la Fase I, T_{ain} (Kelvin)

Se tomará la temperatura ambiente al inicio de la Fase I como el promedio observado de los años 2004-2009, en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar.

El ángulo de incidencia de la radiación solar modificado promedio, \bar{k}

El ángulo de incidencia se define como el ángulo entre el vector posición del sol y el vector perpendicular a la superficie de la cubierta de vidrio.

Idealmente el máximo rendimiento de un destilador solar se toma cuando el nivel de radiación solar es medido perpendicularmente al plano de colector (es decir, en la misma dirección que el colector).

En la realidad, la radiación solar incide sobre el colector con diferentes ángulos de incidencia a lo largo del día haciendo con esto variar el rendimiento del colector. El ángulo de incidencia de la radiación solar modificado proporciona un factor de rendimiento angular. Este factor marca la relación entre el ángulo formado por el vector posición del sol con respecto al horizonte y el vector perpendicular a la superficie de la cubierta de vidrio.

El vector perpendicular a la superficie de la cubierta de vidrio tiene relación directa con el ángulo de inclinación de la cubierta de vidrio. Un valor de 1 en el ángulo de incidencia de la radiación solar modificado se alcanza cuando la superficie de la cubierta del destilador es perpendicular a los rayos del sol, y por lo tanto recibe la máxima radiación.

Tabla 10: Cálculo del ángulo incidente promedio modificado.

Mes	Angulo incidente promedio		Angulo destilador respecto el suelo		Angulo incidente modificado	
	Grad	radian	Grad	radian	Grad	radian
Junio	23	0,4014	60	1,0472	0,4	0,4
Diciembre	43	0,7505	60	1,0472	0,7	0,7

Fuente: propia.

Como el ángulo formado por el vector posición del sol con respecto al horizonte varia durante el día, a fin de simplificar el modelo se toma el valor promedio de este ángulo a lo largo del día, denominado ángulo de incidencia de la radiación solar promedio modificado (NASA, 2014).

Se tomará un ángulo de incidencia de la radiación solar modificado promedio de 0,7 radianes para el mes de Diciembre y 0,4 radianes para el mes de Junio.

La temperatura del cielo, T_s (Kelvin)

La temperatura del cielo depende de la temperatura ambiente, que a su vez depende de la hora del día y se puede expresar como (Belessiotis et al, 1995):

$$T_s = [0.0552T_a]^{1.5} \quad (30)$$

La presión parcial de vapor en el agua, P_w (mm. Hg)

La presión de vapor en el agua depende de la temperatura del agua dentro de la cuba T_w , y se puede expresar como:

$$P_w = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_w}\right) \quad (31)$$

Esta satisface el cálculo de la presión de vapor del agua en la cuba con un error del 2 % entre temperaturas de 283 y 373 Kelvin, en donde T_w esta dada en Kelvin y P_w en pascales, siendo 1 pascal (Pa) = $7,501 \times 10^{-3}$ mm Hg (Fernández y Chargoy, 1990).

La presión parcial de vapor en la cubierta de vidrio, P_g (mm. Hg)

La presión de vapor en la cubierta de vidrio depende de la temperatura del agua en las cercanías de la cubierta T_g . y se puede expresar como:

$$P_g = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_g}\right) \quad (32)$$

Esto satisface el cálculo de la presión de vapor del agua en la cubierta de vidrio con un error del 2 % entre temperaturas de 283 y 373 Kelvin, en donde T_g esta dada en Kelvin y P_g en pascales, siendo 1 pascal (Pa) = $7,501 \times 10^{-3}$ mm Hg (Fernández y Chargoy, 1990).

El calor latente de vaporización, h_{fg} (J/Kg)

El calor latente de vaporización del agua depende de la temperatura del agua salina T_w y la salinidad del agua. A efectos de simplificación del modelo se tomará un valor de calor latente de vaporización estimado de 2.327.500 J/Kg, obtenido en base al promedio de los valores de calor latente de vaporización entre 5 °C y 80 °C, a una salinidad de 30 gr/Kg..

El calor específico del agua salina, c_w (Joule/Kg * Kelvin)

El calor específico se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a una unidad de masa para elevar su temperatura en una unidad de temperatura y se expresa en Joule/Kg * Kelvin. Para el agua salina el calor específico depende de la temperatura del agua y de la salinidad de la misma. A efectos de simplificación del modelo se tomará un valor de calor específico del agua salina estimado de 4.033,2 J/kg*K, obtenido en base al promedio de los valores de calor latente de vaporización entre 5 °C y 80 °C, a una salinidad de 30 gr/Kg.

La capacidad calorífica del agua dentro de la cuba del destilador, C_w (Joule/Kelvin)

La capacidad calorífica, C_w de una sustancia es la cantidad de calor requerido para elevar en un grado Kelvin la temperatura de una cantidad dada de esa misma sustancia. Se expresa en Joule/Kelvin. La fórmula que la expresa es:

$$\begin{aligned} C_w &= c_w * M_w \\ C_w &= 4033,2 \frac{J}{KgK} * 50,91Kg = 205.330,21 \frac{J}{K} \end{aligned} \quad (33)$$

Siendo C_w el calor específico del agua salina, y M_w la masa de agua salina dentro de la cuba. Al aumentar la masa de una sustancia, se aumenta su capacidad calorífica ya que aumenta la inercia térmica, y con ello aumenta la dificultad de la sustancia para variar su temperatura.

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo h_{cgs} (W/m²K)

El coeficiente de transferencia de calor por convección natural en el aire varía entre 1 y 20 W/m²K, y principalmente por efecto de la velocidad, la temperatura del fluido, en este caso aire, y de los potenciales cambios de estado que experimente el fluido durante el proceso de transferencia. El posible efecto en que influencia este coeficiente, es la variación del rendimiento del proceso de condensación del vapor ya destilado sobre la cubierta inferior del vidrio. A efectos de simplificación del modelo se tomará un valor de

coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo igual a $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$.

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio h_{cwg} ($\text{W/m}^2\text{K}$)

A efectos de simplificación del modelo se tomará un valor de coeficiente de transferencia de calor por convección el agua y la cubierta de vidrio igual a $1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La temperatura ambiente al inicio de la Fase I, T_{ain} (Kelvin)

Se tomará la temperatura ambiente al inicio de la Fase I, como un promedio observado entre los años 2004-2009, en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar. El valor variará de acuerdo al periodo invernal o estival.

La duración del tiempo de operación diurno del destilador solar (seg)

El tiempo de operación durante el día del destilador definido para el método utilizado en este escrito, es de 12 hs, comenzando 6 horas antes del mediodía solar, y finalizando 6 horas después del mismo (Belessiotis et al, 1995).

El mediodía solar en el sitio geográfico que se dispondría el destilador solar ocurre el 24 de Junio a las 12:47 hs y el 24 de Diciembre a las 12:44 hs. A efectos de simplificar el modelo matemático del destilador solar, se tomará el día solar a las 13:00 hs tanto en Junio como en Diciembre. Esto significa que el comienzo del periodo de operación diurno del destilador solar será a las 7:00 hs, y la finalización del periodo a las 19:00 hs. El tiempo de duración de la operación diurna del destilador será de 43.200 segundos.

La duración del tiempo de operación nocturno del destilador solar (seg)

El periodo de operación nocturno del destilador comenzara a partir de las 19:00 hs de cada día hasta las 7:00 hs del día siguiente. El tiempo de duración de la operación nocturna del destilador será de 43.200 segundos, obtenido del promedio entre el dia de menor y mayor duración de un año calendario.

El tiempo de duración de la Fase I del destilador solar $(\Delta t)_{fase1}$ (seg)

La Fase I que comienza al amanecer, el sistema se encuentra en un estado de inercia, es decir sin ningún cambio notable en el contenido de energía dentro de la cuba (Belessiotis et al, 2010).

Pero a medida que pasa el tiempo, el aumento de la temperatura ambiente comienza en primera instancia a hacer incrementar la temperatura de la cubierta de vidrio para luego hacer aumentar la temperatura del agua dentro de la cuba. A efectos de simplificar el modelo matemático, se tomará que la Fase I se inicia a las 7:00 hs, mientras que finaliza cuando el agua salina comienza a elevar su temperatura a las 8:00 hs.

El tiempo de duración de la fase II del destilador solar, $(\Delta t)_{fase2}$ (seg)

La duración la fase II es cuando finaliza la Fase I, es decir cuando comienza a aumentar la temperatura del agua salina dentro de la cuba y se equipara con la temperatura de la cubierta, y termina 6 horas después del mediodía solar. Se tomará que el inicio de la fase 2 comenzara a las 8:00 hs y finalizará a las 19:00 hs. El tiempo de duración de la operación de la fase II del destilador será de 36.000 segundos.

El tiempo de duración de la fase III del destilador solar, $(\Delta t)_{fase3}$ (seg)

A efectos de simplificar el modelo matemático del destilador solar, se tomará que el inicio de la fase 3, comenzará al finalizar la fase II, y finalizará en el momento del crepúsculo náutico (SHOA, 2011).

La hora de inicio de la fase 3 será a las 19:00 hs y su finalización será en Junio a las 18:51hs y en Diciembre a las 20:48 hs. Se tomara el final de la fase 3 las 20:00 Hs. Tanto para Junio como para Diciembre. El tiempo de duración de la operación de la fase III del destilador será de 3.600 segundos.

El coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador U_b , (W/m²K)

Se tomará un coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador igual a 1,6 W/m²Kelvin.

La producción nocturna del destilador solar

En este periodo debido a la inercia propia del destilador solar, el mismo sigue entregando agua destilada pero en una proporción mucho menor que en el periodo diurno. A efectos de simplificar el modelo matemático del destilador solar, se tomará que la producción nocturna de agua destilada será de un 16 % de la producción diurna (Badran, 2007).

4.19.6 Solución del modelo

En base a parámetros conocidos del modelo, que se tomaron como constantes, y otros que varían a través del día, y fueron medidos experimentalmente, se comienza a desarrollar el modelo hasta llegar a la variable de salida del mismo que es la producción diaria del destilador.

Parámetros que permanecen constantes

El área de la superficie de agua en la cuba, $A_w = 1 \text{ m}^2$.

La capacidad calorífica del agua dentro de la cuba del destilador, $C_w = 205.330 \text{ Joule/Kelvin}$.

La eficiencia óptica del destilador, $\eta_o = 0,85$.

El coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador, $U_b = 1,6 \text{ W/m}^2\text{Kelvin}$.

El área de la superficie de la cubierta de vidrio, $A_g = 1,15 \text{ m}^2$.

La constante de Stefan Boltzmann, $\sigma = 5,6704 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

El ángulo de incidencia de la radiación solar promedio, $\bar{k} = 0,4 \text{ (Junio)}-0,7 \text{ (Diciembre)}$.

La emisividad de la cubierta, $\epsilon_g = 0,94$.

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio, $h_{cwg} = 1,00 \text{ W/m}^2\text{K}$.

El coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo, $h_{cgs} = 1.00 \text{ W/m}^2\text{K}$.

La duración del día, $\Delta t = 43.200 \text{ seg}$.

La duración de la Fase I, $(\Delta t)_{fase1} = 3.600 \text{ seg}$.

La duración de la noche, $\Delta t_n = 43.200 \text{ seg}$.

Parámetros que varían en el transcurso del día y son conocidos

La intensidad de la radiación solar, $H_d \text{ (W/m}^2\text{)}$.

La temperatura ambiente, $T_a \text{ (Kelvin)}$.

La velocidad del viento, $V \text{ (m/s)}$.

La temperatura ambiente durante el día, $T_{ad} \text{ (Kelvin)}$,

Parámetros que son calculados a partir de constantes son:

El calor latente de vaporización, $h_{fg} = 2.315,5 \text{ KJ/Kg}$.

La relación entre A_w y A_g , $A_r = 1,15$.

La temperatura del cielo, $T_s \text{ (Kelvin)}$.

El coeficiente de transferencia de calor del viento, $h_w \text{ (W/m}^2\text{K)}$.

T_{an} : la temperatura ambiente en la noche para Junio (Kevin),

T_{an} : la temperatura ambiente en la noche para Diciembre (Kevin),

T_{ain} : Temperatura ambiente al inicio de la Fase I (Kelvin)

Parámetros que son incógnitas del modelo

La temperatura de la cubierta de vidrio, $T_g \text{ (Kelvin)}$.

La temperatura del agua en la cuba del destilador $T_w \text{ (Kelvin)}$.

La presión parcial de vapor en la cubierta de vidrio, $P_g \text{ (mm. Hg)}$.

La presión parcial de vapor en el agua, $P_w \text{ (mm. Hg)}$.

El coeficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua y la cubierta de vidrio, h_{ewg} (W/m²Kelvin).

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta de vidrio, h_{rwg} (W/m²Kelvin).

El coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y el cielo, h_{rgs} (W/m²Kelvin).

El coeficiente de transferencia de calor entre el agua y la cubierta de vidrio, U_i (W/m²Kelvin).

La pérdida global de flujo de calor entre el agua y el ambiente, U_t (W/m²Kelvin).

El coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta de vidrio y el ambiente, U_o (W/m²K).

\bar{T}_{wd} : La temperatura promedio diaria del agua en la cuba (Kelvin),

T_{win} : Temperatura del agua al inicio de la Fase I (Kelvin)

La temperatura del agua en el final del día anterior, T_{wf} (Kevin).

La producción diaria de agua destilada, M_{out} (Kg).

4.19.7 Algoritmo de solución

Los pasos a seguir para obtener la producción diaria teórica en base al modelo propuesto son los siguientes:

Paso 1

Se introducen primeramente los parámetros constantes, que son los listados anteriormente.

Paso 2

En base a los parámetros que varían en el transcurso del día y son conocidos, y los parámetros constantes se calculan los parámetros que son calculados a partir de los mismos.

Paso 3

Se calcula la temperatura de la cubierta de vidrio T_g , para todas las horas del día, en base a la ecuación (20) del modelo.

$$T_g = \frac{(h_{cgs} \times T_s) - (h_w \times T_a)}{h_{cgs} - h_w} \quad (34)$$

Paso 4

Se calcula la presión parcial del vapor de agua en la cercanía de la cubierta de vidrio P_g , en base a la ecuación (22) del modelo.

$$P_g = \exp\left(-25,317 - \frac{5144}{T_g}\right) \quad (22)$$

Paso 5

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y el cielo h_{rgs} , a partir de la ecuación (19) del modelo.

$$h_{rgs} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 + T_s^2) (T_g + T_s) \quad (19)$$

Paso 6

Se calcula La temperatura del agua en la cuba del destilador T_w , a partir de la ecuación (16) del modelo.

$$h_{cwg} = 0.884 \left[(T_w - T_g) + \frac{(P_w - P_g) T_w}{2016 - P_w} \right]^{1/3} \quad (16)$$

Para encontrar el valor de T_w , se insertan las ecuaciones (22) y (23) dentro de la ecuación (16), que da como resultado lo siguiente:

$$f_{(T_w)} = B - D \exp(25,317 - 5144/T_w) + CT_w = 0 \quad (35)$$

Siendo:

$$A = (h_{cwg}/0,884)^3 \quad (36)$$

$$B = 2016(A + T_g) \quad (37)$$

$$C = P_g - 2016 \quad (38)$$

$$D = T_g + A \quad (39)$$

Para hallar el valor de T_w , se recurre al método de Newton (conocido también como el método de Newton-Raphson o el método de Newton-Fourier), que es un algoritmo eficiente para encontrar aproximaciones de los ceros o raíces de una función real. El mismo indica que aproximando el resultado de la raíz lo más cercanamente posible al valor buscado, y tomando a la misma como valor inicial del método, e interactuando sucesivamente comparado la raíz inicial con la siguiente, se puede obtener la raíz buscada. Para el cálculo de T_w en este estudio, se toma la temperatura ambiente T_w como raíz inicial. El método de Newton se realiza en base a la siguiente ecuación:

$$\chi_{n,m} = \chi_n - \frac{f(\chi_n)}{f'(\chi_m)} \quad (40)$$

Con la condición que el error obtenido en la interacción sea:

$$|E_{i+1}| = 100 \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{x_{i+1}} \right) \leq E_i \quad (41)$$

Siendo E_i , el error propuesto al método en la primera interacción. Para el Cálculo realizado en este escrito se toma un error de 0.5 %. En el caso de que:

$$E_{i+1} \geq E_i \quad (41)$$

se continúa interactuando, hasta lograr la condición pedida.

A partir de la ecuacion (16) La derivada primera de la función, que determina el valor de T_w es:

$$f'_{(T_w)} = C - \frac{5144D \exp(25.317 - \frac{5144}{T_w})}{T_w^2} \quad (42)$$

Paso 7

Se calcula la presión parcial del vapor de agua en la superficie de la misma P_w , a partir de la ecuación (23) del modelo.

$$P_w = \exp\left(25,317 - \frac{5144}{T_w}\right) \quad (23)$$

Paso 8

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta de vidrio h_{rwg} , a partir de la ecuación (18) del modelo.

$$h_{rwg} = 0.9\sigma(T_w^2 + T_g^2)(T_w + T_g) \quad (18)$$

Paso 9

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua y la cubierta de vidrio h_{ewg} , a partir de la ecuación (17) del modelo.

$$h_{ewg} = \frac{9.15 \times 10^{-7} h_{cwg} (P_w - P_g) h_{fg}}{(T_w - T_g)} \quad (17)$$

Paso 10

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor entre el agua y la cubierta de vidrio U_i , a partir de la ecuación (13) del modelo.

$$U_i = h_{cwg} + h_{ewg} + h_{rwg} \quad (13)$$

Paso 11

Se calcula el coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta de vidrio y el ambiente U_o , a partir de la ecuación (14) del modelo.

$$U_o = \frac{h_w(T_g - T_a)}{(T_g - T_s)} + h_{rgs} \quad (14)$$

Paso 12

Se calcula La pérdida global de flujo de calor entre el agua y el ambiente U_t , a partir de la ecuación (12) del modelo.

$$U_t = \left[\frac{1}{U_i} + \frac{1}{A_r U_o} \right]^{-1} \quad (12)$$

Paso 13

Se calcula la inercia del destilador F_3 , a partir de la ecuación (10) del modelo.

$$F_3 = A_g \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} (\Delta t)_{fase1} (T_{win} - T_{ain}) \quad (10)$$

La temperatura del agua dentro de la cuba al inicio del día T_{win} , esta expresada en el modelo por la ecuación (11):

$$T_{win} = T_{an} + (T_{wf} - T_{an}) \exp \left[\frac{A_w}{C_w} (U_t + U_b) \Delta t_n \right] \quad (11)$$

Paso 14

Se calcula la perdida en el sistema de destilación F_2 , a partir de la ecuación (9) del modelo.

$$F_2 = (U_t + U_b) \frac{A_g A_w}{C_w} \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} (\Delta t)^2 \quad (9)$$

Paso 15

Se calcula la eficiencia del destilador F_1 , a partir de la ecuación (8) del modelo.

$$F_1 = \bar{k} \eta_o \frac{A_g A_w}{C_w} \frac{h_{ewg}}{h_{fg}} \frac{U_t}{U_i} \Delta t \quad (8)$$

Paso 16

Se calcula la producción diaria del destilador M_{out} , a partir de la ecuación (6) del modelo.

$$M_{out} = F_1 H_d + F_2 (T_{ad} - \bar{T}_{wd}) + F_3 \quad (6)$$

siendo H_d , la radiación solar diaria, expresada por la ecuación (7) del modelo.

$$H_d = \int_0^{\Delta t} I(t) dt \quad (7)$$

El periodo de tiempo a considerar para la resolución de la integral anterior es el tiempo entre mediciones de radiación solar, que en el escrito es de 3.600 segundos. De esta manera será:

$$H_d = 3600I \quad (43)$$

En la siguiente figura se presenta un diagrama de flujo que representa el procedimiento antes descrito.

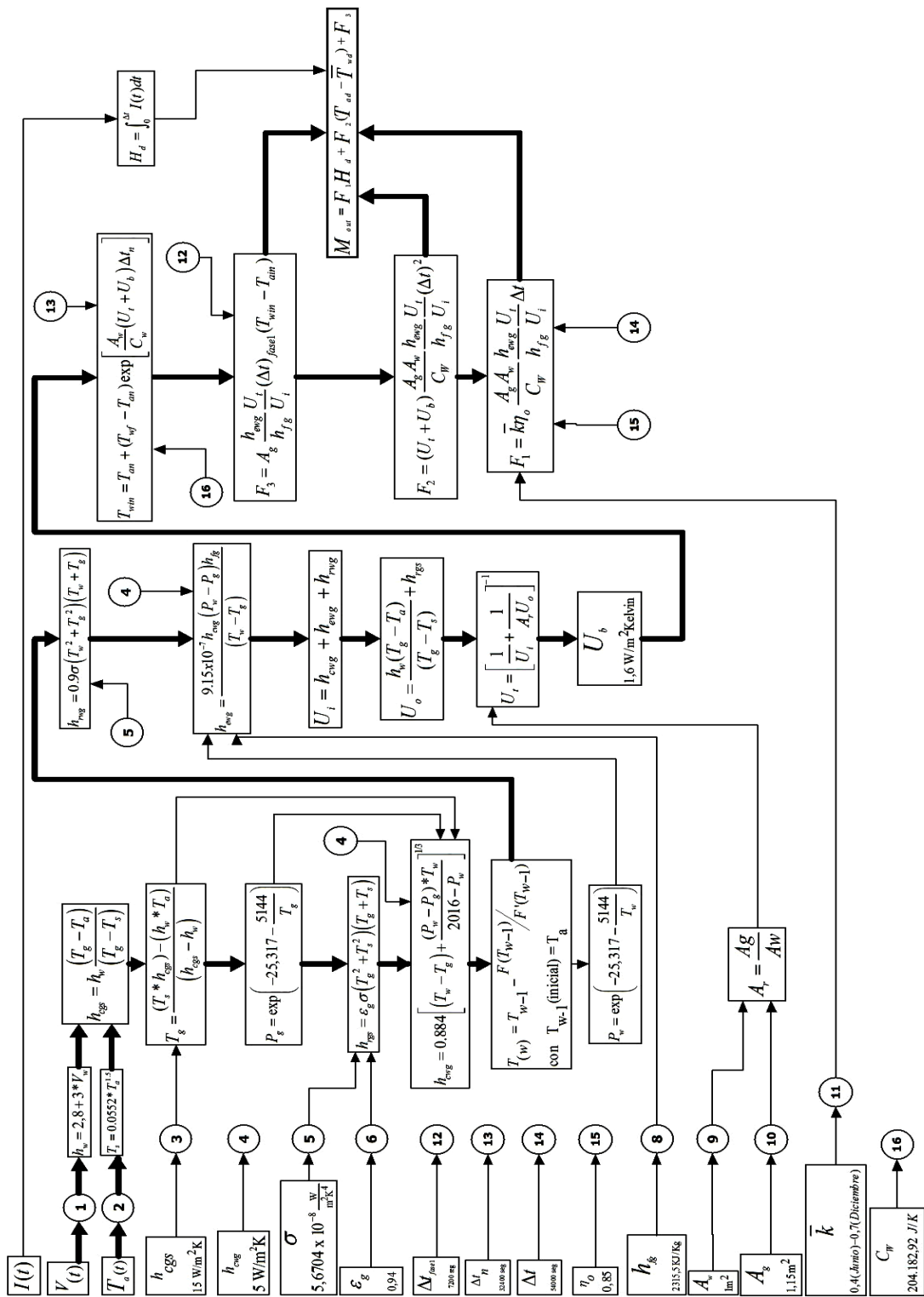


Figura 28: Diagrama de flujo representando el algoritmo de solución del modelo.

Fuente: propia.

4.19.8 Simbología utilizada

La simbología utilizada es la siguiente:

A_w : Área de la superficie de agua en la cuba (m^2).

C_w : Capacidad calorífica del agua dentro de la cuba del destilador (Joule/Kelvin).

H_o : Eficiencia óptica del destilador.

U_b : Coeficiente de transferencia de calor a través de la base y los lados del destilador (W/m^2 Kelvin).

V : Velocidad del viento (m/s).

T_w : Temperatura del agua en la cuba del destilador (Kelvin).

h_{ewg} : Coeficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua y la cubierta de vidrio (W/m^2 Kelvin).

U_i : Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y la cubierta de vidrio (W/m^2 Kelvin).

A_g : Área de la superficie de la cubierta de vidrio (m^2).

\dot{Q}_e : Velocidad de transferencia de calor por evaporación (W).

T_a : Temperatura ambiente (Kelvin).

U_t : Pérdida global de flujo de calor entre el agua y el medio ambiente (W/m^2 Kelvin).

k : Angulo de incidencia de la radiación solar.

I : Intensidad de la radiación solar (W/m^2).

h_{fg} : Calor latente de vaporización (J/Kg).

T_{ad} : Temperatura ambiente durante el día (Kelvin).

\bar{T}_{wd} : Temperatura promedio diaria del agua en la cuba (Kelvin).

Δt : Duración del día (seg).

\bar{k} : Angulo de incidencia de la radiación solar promedio.

T_{win} : Temperatura del agua al inicio de la Fase I (Kelvin).

T_{ain} : Temperatura ambiente al inicio de la Fase I (Kelvin).

$(\Delta t)_{fase I}$: Duración de la Fase I (seg).

T_{an} : Temperatura ambiente en la noche (Kevin).

T_{wf} : Temperatura del agua en el final del día anterior (Kevin).

Δt_n : Duración de la noche (seg).

h_{cwg} : Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de vidrio (W/m^2K).

h_{ewg} : Coeficiente de transferencia de calor por evaporación entre el agua y la cubierta de vidrio (W/m^2K).

h_{rwg} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta de vidrio (W/m^2K).

T_s : Temperatura del cielo (Kelvin).

T_g : Temperatura de la cubierta de vidrio (Kelvin).

A_r : Relación entre A_w y A_g .

U_o : Coeficiente de transferencia de calor entre la cubierta de vidrio y el ambiente (W/m^2K).

σ : Constante de Stefan Boltzmann (W/m^2K^4).

P_w : Presión parcial de vapor en el agua (mm. Hg).

P_g : Presión parcial de vapor en la cubierta de vidrio (mm. Hg).

h_{cgs} : Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de vidrio y el cielo (W/m^2K).

h_w : Coeficiente de transferencia de calor del viento (W/m^2K).

h_{rgs} : Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta de vidrio y el cielo (W/m^2K).

\mathcal{E}_g : Emisividad de la cubierta.

M_{out} : Producción diaria de agua destilada (Kg).

CAPÍTULO 5 - DISCUSIÓN

5.1 Discusión

La comunidad rural de El Peñón, ubicada en la región de Coquimbo, provincia de Elqui, entre las comunas de Andacollo y Coquimbo, posee necesidades básicas insatisfechas, como son las deficiencias en el marco normativo en su ordenamiento ambiental, las comunicaciones entre éste, y otros sectores rurales y urbanos tanto en lo físico como en lo inmaterial, la influencia del cambio climático y otros eventos antrópicos sobre el medio ambiente local, la desertificación y degradación del suelo por acción natural y artificial producidas por la misma comunidad, los acelerados cambios del tejido social en la comunidad producido por componentes sociales externos, y la influencia de la disminución en cantidad y calidad del agua.

En lo referente al agua, esta demanda no solo se puede cubrir parcialmente con los mecanismos históricos de abastecimiento, como son las precipitaciones naturales, norias, vertientes, o pozos subterráneos profundos, sino que es necesario investigar otras alternativas de abastecimiento. La desalinización de agua de mar a través de energías renovables, es una de las soluciones viables para satisfacer la demanda exigida.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo determinar la demanda de agua para riego y consumo animal, y luego analizar varios mecanismos que buscan satisfacer la demanda de agua para estas actividades.

La demanda de agua en el sector estudiado para abastecer al ganado caprino de cada grupo familiar, es entre 84,6 y 150,4 L/día.

Además, la demanda de agua para abastecer a la agricultura, en un área de cultivo de 5 m², por cada grupo familiar es entre 19,0 y 45,5 L/día.

En la localidad de El Peñón, existen censadas 239 viviendas familiares (INE,2005), que poseen actividades agrícolas y ganaderas.

Entonces, la demanda total de agua en la comunidad rural El Peñón, compuesta por 239 viviendas será entre 31.094 Lts/día y 52.437 Lts/día.

Existen varios mecanismos que buscan satisfacer esta demanda de agua para actividades agrícolas y ganaderas. Los recursos hídricos existentes se pudieron clasificar en superficiales, sub-superficiales, subterráneos, y otros.

Dentro de la clasificación de superficial se pueden detallar las precipitaciones naturales de agua, y su acumulación en esteros y quebradas. En lo referente a la obtención de agua de manera sub-superficial se destacan las norias y las vertientes, perforaciones artificiales y naturales de profundidad limitada. Los recursos hídricos subterráneos se obtienen por la extracción en pozos subterráneos profundos. El origen principal de estas fuentes generalmente proviene de las precipitaciones, y eventualmente de la infiltración de las nieves cordilleranas (Alcaino et al. 2000).

En todos los casos analizados y debido a la escasez hídrica existente en la localidad, se hizo necesario buscar otros mecanismos de abastecimiento de agua.

Además de los argumentos razonables que se refieren al uso de energías renovables para obtener este abastecimiento alternativo, y debido a los problemas emergentes en materia de falta de recursos energéticos convencionales en lo general, hay una serie de razones relacionadas con temas más específicos de origen sectorial.

Una de las razones es que en zonas alejadas de los sectores urbanos, donde existen fuentes de energía renovables disponibles, el suministro de energía convencional no siempre es posible o al menos fácil de implementar.

En estos casos obtener agua a través de energía renovable no convencional representa la mejor opción para sistemas autónomos de obtención de agua, no dependientes del suministro de energía convencional. En su mayoría, los sistemas alternativos para la obtención de agua se caracterizan por la autosuficiencia propia del sistema y el apoyo comunitario local. También la operación y mantención de estos sistemas instalados en áreas remotas, son a menudo más simples que los abastecidos por energía convencional.

Otra de las razones es la motivación para cumplir con un desarrollo socioeconómico sostenible, mediante el uso de recursos locales. La obtención de agua a través de

energías renovables ayuda a evitar la dependencia externa del abastecimiento energético convencional.

Existen puntos críticos que definen la decisión o no, de utilizar un mecanismo alternativo de obtención de agua en forma convencional, o a través de energías renovables no convencionales.

Desde el punto de vista tecnológico, el uso de sistemas de obtención de agua con fuentes alternativas de energía, impone la conjunción de dos tecnologías separadas y distintas: el proceso de obtención de agua en si, y el sistema de abastecimiento de energía para la obtención de la misma. Ambos son considerados desarrollados y estables, a pesar de que aún existen márgenes de investigación tanto en el aumento de su eficiencia, como en el volumen entregado, y la reducción de sus costos de producción.

Desde el punto de vista del costo, la explotación de las energías renovables y el desarrollo de los procesos de obtención de agua, representa una inversión importante. Hasta el momento, las tecnologías en energía renovables no se consideran totalmente desarrolladas, y los diversos componentes del sistema todavía poseen un alto costo. A pesar de que los precios continuamente disminuyen, todavía estos son prohibitivos para algunos proyectos de abastecimiento.

Desde el punto de vista de su disponibilidad, las energías renovables son ilimitadas, aunque su rendimiento presenta un carácter intermitente, lo que lleva a limitaciones relativas a la capacidad máxima de explotación por unidad de tiempo (L/día). Además, la distribución geográfica del potencial a instalar de un nuevo sistema, no siempre satisface la demanda de agua a nivel local.

Desde el punto de vista a la sostenibilidad técnica, el desarrollo de las tecnologías asociadas no coincide con el bajo nivel de infraestructura, que a menudo caracteriza a lugares con grave estrés hídrico. La experiencia ha demostrado que varios intentos de integrar soluciones avanzadas de obtención de agua en zonas aisladas, fracasaron debido a la falta de un soporte técnico confiable (Voivontas et. al, 1999).

Al evaluar las distintas tecnologías existentes, se concluyó que el método de destilación del agua de mar a través de energía solar aparejaría una mejor relación entre el costo económico y su beneficio social.

Esta decisión se tomó en base al análisis de 6 factores que son la escala del demandante, el impacto ambiental, en lo económico la relación inversión-beneficio, la movilidad física, el auto manejo y el costo por litro producido de agua desalada (Lechuga et al, 2007).

Con respecto a la escala del demandante, los usuarios del suministro de agua, demandan una cantidad limitada del mismo.

Con respecto al impacto ambiental, la generación del suministro de agua requiere de una energía limpia, en este caso la solar, lo que indirectamente disminuye el calentamiento global, y sus consecuencias como lo es el cambio climático.

Con respecto a la relación inversión-beneficio, al utilizar cualquiera de los otros métodos, el costo de la inversión inicial sería alto, y sería una alternativa viable económica para el perfil del demandante del agua, que son pequeños agricultores.

Con respecto a la movilidad física, el método de destilación solar puede ubicarse en diferentes posiciones dentro del área de consumo del suministro, con un bajo costo de reubicación.

Con respecto al automanejo, al ser un proceso de fácil utilización, es más factible en cuanto a su instalación y mantenimiento por parte del demandante, no dependiendo de servicios de terceros para su realización.

Con respecto al costo por litro producido de agua desalada, si bien el mismo es mayor que en los otros métodos analizados, éste se nivela debido a los motivos antes descritos.

Cabe acotar que no todas las combinaciones de sistemas de desalinización impulsadas por energías renovables se consideran adecuadas en aplicaciones prácticas; muchas de estas combinaciones posibles pueden no ser viables bajo ciertas circunstancias.

Estas deben ser analizadas en relación a diferentes parámetros locales, como lo son las condiciones geográficas, la topografía del lugar, la capacidad y el tipo de energía

disponible, la disponibilidad de infraestructura local (incluyendo la red eléctrica), y el tamaño de la planta.

Para Estudiar técnicamente la factibilidad de un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, que este ubicado en la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo, se aplicó un modelo matemático que interpretara el funcionamiento y la producción de agua de un destilador solar de batea simple, utilizando el método Entrada-Salida propuesto por Belessiotis et al. (1995). En él se propone un método teórico simplificado para la evaluación del desempeño de un destilador solar de cuba simple, prediciendo la producción de agua a mediano y largo plazo. Para ello se tomaron las siguientes consideraciones:

Se tomó el promedio de los meses de Junio (periodo invernal), y Diciembre (periodo estival) entre los años 2004-2009, de la radiación solar incidente, la temperatura del aire y la velocidad del viento de acuerdo a datos obtenidos en la Estación Meteorológica situada en Pan de Azúcar CEAZA (2009). Esto debido a que ellos son los periodos del año de menor y mayor producción estimada de agua del destilador solar de cuba simple.

Se tomaron los parámetros físicos del destilador como constantes, que fue explicado en la descripción del mismo (apartado 5.1.7.6).

Luego se desarrollaron los parámetros intervinientes en el modelo y un algoritmo de solución al mismo.

Al aplicar este modelo a las características establecidas en la comunidad rural de El Peñón, se obtuvieron los resultados teóricos de rendimiento diario del mismo, relacionándolos con la demanda de agua requerida.

Los resultados fueron expresados en Lts/m^2 de superficie de espejo de agua dentro del destilador y fueron los siguientes:

Para el periodo invernal, mes de Junio, el rendimiento diario calculado por m^2 fue entre 1,090 $\text{Lts}/\text{día}$ y 1,640 $\text{Lts}/\text{día}$.

Para el periodo estival, mes de Diciembre, el rendimiento diario calculado por m^2 fue entre 2,087 $\text{Lts}/\text{día}$ y 2,243 $\text{Lts}/\text{día}$.

Lo anterior arroja que para la demanda de agua para consumo agrícola y ganadero diario en época invernal, en el escenario mas desfavorable, se necesitan 133,78 m² de superficie útil de destilación, y para el consumo agrícola y ganadero diario en época estival se necesitan 97,95 m² de superficie útil de destilación. Estos datos son aplicables por cada grupo familiar.

Analizando el destilador solar como un proceso sistémico se pudo comprobar tambien que algunas características y temas se deben profundizar.

Para la captación de agua de mar, se necesitara de permisos legales para la extracción de la misma. También se hará necesario definir la ubicación geográfica de la captación de agua de mar. Para transportar el agua de mar se debe analizar el tipo y tamaño de transporte a utilizar para mejorar la eficiencia del proceso. Realizada la destilación, el agua útil se debe distribuir de manera eficiente a los lugares de consumo. Se debe estudiar la disposición final o tratamiento para reutilizar el subproducto del proceso, que en este caso es la salmuera.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSIONES

6.1 Conclusiones

Para satisfacer los objetivos previstos, se estudió técnicamente la prefactibilidad de un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar, para satisfacer la demanda de agua para riego y consumo animal, en la comunidad rural situada en El Peñón, comuna de Coquimbo.

Para ello se tuvo que determinar la necesidad de agua para riego y consumo animal, en esta comunidad, evaluar bibliográficamente distintas tecnologías existentes para la destilación solar de agua de mar, y estudiar técnicamente un sistema de destilación de agua de mar, utilizando energía solar que satisfaga la demanda.

Para la comunidad agrícola de El Peñón, e interpretando los resultados obtenidos en este trabajo sobre la demanda y oferta de agua del sector, se puede indicar que:

La demanda de agua en el sector estudiado para abastecer al ganado caprino de cada grupo familiar, es entre 84,6 y 150,4 L/día.

Además, la demanda de agua para abastecer a la agricultura, en un área de cultivo de 5 m², por cada grupo familiar es entre 19,0 y 45,5 L/día.

En la localidad de El Peñón, existen censadas 239 viviendas familiares (INE,2005), que poseen actividades agrícolas y ganaderas.

Entonces, la demanda total de agua en la comunidad rural El Peñón, compuesta por 239 viviendas es entre 31.094 Lts/día y 52.437 Lts/día.

Con respecto a la oferta de agua, para un mes de mayor rendimiento, época estival, el destilador tuvo una producción teórica de 2,24 L/día por m² de superficie útil de destilador propuesto. Para un mes de menor rendimiento, época invernal, el destilador tuvo una producción de 1,09 L/día por m² de superficie útil de destilador propuesto.

Lo anterior arroja que para el consumo agrícola y ganadero diario en época invernal se necesitan 133,78 m² de superficie útil de destilación, y para el consumo agrícola y ganadero diario en época estival se necesitan 97,95 m² de superficie útil de destilación.

CAPÍTULO 7 – LITERATURA CITADA

7.1 Literatura citada

1. Akash, B. A., Mohsen, M. S., & Nayfeh, W. (2000). Experimental study of the basin type solar still under local climate conditions. *Energy Conversion & Management* , 883-890
2. Akash, B., Mohsen, M., Osta, O. & Elayan, Y. (1998). Experimental evaluation of a single-basin solar still using different absorbing materials. *Renew Energy*. 14. 1–4. 307–310.
3. Alcaíno, E., Martínez, L., Rojas, L. & Pereira, P. (2000). Estrategias del uso del agua de riego en comunidades agrícolas de la región de Coquimbo. Instituto de investigaciones agropecuarias. Centro Regional de Investigaciones Intihuasi, La Serena. *Boletín INIA*. 46. 4.
4. Al-Hinai, H., Al-Nassri, M. & Jubran, B. (2002a). Effect of climatic, design and operational parameters on the yield of a simple solar still. *Energy Convers Manage*. 43. 13. 1639–1650.
5. Al-Karaghoul, A. & Alnaser, W. (2004a). Experimental comparative study of the performances of single and double basin solar-stills. *Appl Energy*. 77. 3. 317–325.
6. Al-Karaghoul, A. & Alnaser, W. (2004b). Performances of single and double basin solar-stills. *Appl Energy*. 78. 3. 347– 354.
7. Badran, O. (2007). Experimental study of the enhancement parameters on a single slope solar still productivity. *Desalination*. 209. 136–143.
8. Barrera, A. (2006). Modernidad y subjetividad en la nueva ruralidad. Chile rural, un desafío para el desarrollo humano. PNUD-2006. 36.
9. Belessiotis, V., Mathioulakis, E. & Papanicolaou, E. (2010). Theoretical formulation and experimental validation of the Input-Output modeling approach for large solar thermal systems. *Solar Energy*. 84. 2. 245-255.

10. Belessiotis, V., Voropoulus, K. & Delyannis, K. (1995). Experimental and theoretical method of the determination of the daily output of the solar still: Input – Output Method. *Desalination*. 100. 1-3. 99-104.
11. Canales, M. (2006), la nueva ruralidad en Chile: apuntes sobre Subjetividad y territorios vividos. *Chile rural, un desafío para el desarrollo humano*, PNUD-2006. 36.
12. CEAZA (2009). www.ceazamet.cl/index.php?pag=mod_estacion&e_cod=3. Recuperado el 1 de Agosto de 2014.
13. Comisión Permanente del Pacífico Sur. (2010). XII Crucero regional conjunto de investigación oceanográfica en el Pacífico Sur.
14. CONAMA (1998). Una política ambiental para el desarrollo sustentable: Ordenamiento territorial o regulación del comportamiento espacial. Comisión Nacional de Medio Ambiente. Departamento de Recursos Naturales. Documento de discusión, no oficial.
15. Cooper, P. (1969). Solar distillation, Solar energy progress in Australia and New Zealand. In: *Publication of the Australian and New Zealand Section of Solar Energy*. 8. 45.
16. Cooper, P. (1973). The maximum efficiency of single - effect solar stills. *Solar Energy*. 15. 205-217.
17. Cooper, P. (1973). Digital Simulation of experimental solar still data. *Solar Energy*. 14, 451-456
18. Delyannis, A. (1967). Solar stills provide an islands inhabitants with water. *Sun at Work*. 10. 6–8.
19. Delyannis, A. (1968). The Patmos solar distillation plant. *Solar Energy*. 11. 113–115.
20. Delyannis, E. (1987). Status of solar assisted desalination. A review. *Desalination*. 67. 3–19.
21. Delyannis, E., Belessiotis, V. & Delyannis, A. (1980). Proc., 7th International Symposium on Fresh Water from the Sea, Amsterdam. 383.

22. Duffie, J. & Beckman, W. (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes* W.A. 2a. Edition. Ed. Wiley Interscience. E.U.
23. Dunkle, R. (1961). *Solar Water Distillation, The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still*, International Heat Transfer. A.S.M.E. Proceedings of International Heat Transfer. University of Colorado. 5. 895-902.
24. Echenique, J. & Romero, L. (2008). *Evolución de la agricultura familiar en Chile en el período 1997-2007*. Corporación Agraria para el Desarrollo. Organización de las naciones unidas para la agricultura y la alimentación. Representación de la FAO en Chile. 108.
25. El-Nashar, A. (2000). Predicting part load performance of small MED evaporators — a simple simulation program and its experimental verification. *Desalination* (130), 217-234.
26. El-Sayed, M. (1983). Comparison of transient performance predictions of a solar operated diffusion type still with a roof type still. *Solar Energy. Eng Trans ASME* 1983. 105. 23.
27. El-Sebaei, A. (2004). Effect of wind speed on active and passive solar stills. *Energy Convers Manage.* 45, 7–8. 1187– 1204.
28. Eltawil, M., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2008). Renewable energy powered desalination systems: technologies and economics-state of the art. Twelfth International Water Technology Conference 1099.
29. FAO (1993). *Política de desarrollo agrícola Conceptos y principios*. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. Roma. 238.
30. FAO (2013). *Captación y almacenamiento de agua de lluvia, opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FIDA). Santiago, Chile: FAO.
31. Fernández, J. & Chargoy, N. (1990). Multistage, Indirectly Heated Solar Still. *Solar Energy.* 44. 2-215.

32. Fernández, M., Orgaz, F., Fereres, E., López, J., Céspedes, A., Pérez, J., y otros. (2006). Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudoeste español. CAJAMAR.
33. FIDA (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola). (2003). Republic of the Sudan, Gash sustainable livelihoods regeneration project. Documento de proyecto. Roma. FIDA.
34. Frick, B. (1970). Some new considerations about solar stills. In: Proceedings of International Solar Energy Congress. Melbourne. 395.
35. Fundacion de innovación agraria. (2008). Resultados y Lecciones en producción de carne caprina en Lonquimay.
36. Gameiro, B. (2010). Análisis del rendimiento de un destilador solar en un invernadero. Dissertação de mestrado Universidade de Aveiro, Portugal.
37. Gobierno Regional de Coquimbo (2007). Plan Integral de Desarrollo Rural 2007 y Bases para una política integral de desarrollo rural 2007 – 2010. Gobierno regional, IV Región.
38. Gómez E, (2002). Organización Campesina en Chile: Reflexiones Sobre su Debilidad Actual. Rev. austral cienc. soc., 2002, no.6, p.3-18.
39. González, C. & Márquez, M. (1995). El Desarrollo las Ciudades. Algunos elementos para la discusión. Documento interno. Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Santiago de Chile.
40. Güell, P. (2005). Desarrollo humano: una perspectiva para mirar lo rural. Coordinador del Informe de Desarrollo Humano. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Primer Informe chileno de Desarrollo Humano Rural.
41. INE (2005). Población y asentamientos humanos en el ámbito de las comunidades agrícolas. Región de Coquimbo. Período de la información: 2005. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.
42. INE (2007). VII Censo nacional agropecuario y forestal. Enfoque estadístico. Instituto Nacional de Estadística. Santiago: INE.
43. INE (2008). Censo agropecuario 1997–2007. Instituto Nacional de Estadísticas de Chile.

44. IT Power Ltd. (2001). Matching renewable Energy with Desalination Plants. MEDRC R&D Report.
45. Johnson III, S., Svendsen, M. & González, F. (2002). Options for institutional reform in the irrigation sector. Seminario Internacional sobre Gestión Participativa del Riego, Pekín.
46. Johnson, D. G. (1997). Agriculture and the wealth of nations. American Economics Association, 87 (2), 2-11.
47. Jorquera, G. (1996). Consideraciones Generales sobre el Desarrollo de Comunidades Agrícolas de Atacama y Coquimbo. INDAP.
48. Kalogirou, S. (2004). Solar thermal collectors and application. Prog Energy Combust Sci. 30. 3. 231–295.
49. Kalogirou, S. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. Prog Energy Combust Sci. 31. 3. 242–281.
50. Khalifa, A. & Hamood, A. (2009). Performance correlations for basin type solar stills. Desalination. 249. 24–28.
51. Khalifa, A., Al-Jubouri A. & Abed, M. (1999). An experimental study on modified simple solar stills. Energy Convers Manage. 40. 17. 1835–1847.
52. Lechuga, A., Rodríguez, M. & Lloveras, J. (2007). Análisis de los procesos para desalinización de agua de mar aplicando la inteligencia competitiva y tecnológica. Ingeniería Revista Académica. 11. 003. 5-14.
53. Leitão, B. (2010). Análisis del rendimiento de un destilador solar en un invernadero. Disertación en maestría en ingeniería del ambiente no publicada, Universidad Politécnica de Valencia, Ingeniería del ambiente, Valencia.
54. Lof, G., Eibling, J. & Bloemer, J. (1961). Energy balances in solar distillation. J. Am. Inst. Chem. Eng. 7. 4. 641.
55. Maluf, A. (2005). Destiladores solares no Brasil. Monografía (Especialista em Fontes Alternativas de Energía). Programa de Pós Graduação em Fontes Alternativas de Energía. Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais.

56. Mármol, J. (2008). Agua, suelo e irrigación de cultivos hortícolas en invernadero. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Centro de Publicaciones, España.
57. Mathioulakis, E., Belessiotis, V., & Delyannis, D. (2007). Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination* (203), 346-365.
58. Morales, C. & Parada, S. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales. Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
59. Morales, C. (2005). Pobreza, desertificación y degradación de tierras. En Comisión Económica para América Latina y el Caribe, *Pobreza, desertificación y degradación de los recursos naturales* (1 ed., págs. 25-58). Santiago, Chile: CEPAL.
60. Naciones Unidas (2004). Monitoreo sobre la Población Mundial 2003: Población, educación y desarrollo. Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. División de Población. Nueva York, Naciones Unidas.
61. Nafey, A., Abdelkader, M., Abdelmotalip, A. & Mabrouk, A. (2001). Solar still Productivity enhancement. *Energy Convers Manage.* 42. 11. 1401–1408.
62. Nafey, A., Abdelkader, M., Abdelmotalip, A. & Mabrouk, A. (2000). Parameters affecting solar still productivity. *Energy Convers Manage.* 41. 16. 1797–1809.
63. NASA. (2014). Surface meteorology and Solar Energy. Recuperado el 1 de Agosto de 2014, de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.
64. Navarro Esquer F.(1999). Propuesta de diseño de sistemas para desalación de agua de mar. Universidad de Sonora .División de Ingeniería, México. Capítulo 4.
65. Nayak, J., Tiwari, G. & Sodha, S. (1980). Periodic theory of solar still. *Int. J. Energy Res.* 4. 41.
66. Nijmeh, S., Odeh, S. & Akash, B. (2005). Experimental and theoretical study of a single-basin solar still in Jordan. *Int comm. In Heat Mass Transfer.* 32. 565–572.
67. Norton, R. (2004a). *Agricultural development policy, concepts and experiences.* Ed. Wiley and Sons ltd. 470.

68. Panchal, H. (2016) Performance Investigation on Variations of Glass Cover Thickness on Solar Still: Experimental and Theoretical Analysis, *Technol Econ Smart Grids Sustain Energy* (2016) 1: 7. doi:10.1007/s40866-016-0007-0.
69. PNUD. (2006a). Informe sobre desarrollo humano 2006. Desigualdad y desarrollo humano. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo humano. 2.
70. PNUD. (2006b). Informe sobre desarrollo humano 2006. Programa de las Naciones Unidas para el desarrollo humano. 137.
71. Sartori, E. (1987). On the nocturnal production of a conventional solar still using solar pre-heated water. In: *Advances in Solar Energy Technology*, vol. 2. Pergamon Press. 1427.
72. SECPLAC (2005). Plan Regional de Gobierno 2006-2010. Región de Coquimbo. Servicio de Planificación. IV Región. Servicio de Planificación. IV Región.
73. Sharma, V.B., Mullick, S.C., 1991. Estimation of heat transfer coefficients, the upward heat flow and evaporation in a solar still. *J. Solar Energy Eng., Trans. ASME* 113, 36.
74. Sharqawy, M., John, H., Lienhard, V. & Syed, M. (2010). *Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing Correlations and Data, Desalination and Water Treatment*.
75. Sherwin, K. (1993). *Introduction to Thermodynamics*. Ed. Chapman and Hall.
76. SHOA (2011). Horario del crepúsculo náutico en la IV Región. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
77. Sodha, M., Kumar, A., Tiwari, G. & Pandey, G. (1980). Effect of dye on thermal performance of solar still. *J. Appl. Energy*. 7. 147.
78. Talbert, S., Eibling, J. & Loef, G. (1970). *Manual on solar desalination of saline water*. Battelle Memorial Institute. Columbus Laboratories. 270.
79. Tiwari G. & Noor, M. (1996). Characterization of solar still. *Int J Solar Energy*. 18. 147.
80. Tiwari, G. & Bapeswar Rao, V. (1983). Transient performance of single basin solar still with water flowing over the glass cover. *Desalination*. 48. 1. 101.

81. Tiwari, G. & Madhuri, (1987). Effect of water depth on daily yield of still. *Desalination* 61, 67.
82. Tiwari, G. & Prasad B. (1996). Thermal modeling of concentrator assisted solar distillation with water flow over the glass cover. *Int J Solar Energy*. 18. 3. 173.
83. Tiwari, G. (2002). *Solar Energy: Fundamentals, design, modelling and applications*. Narosa, Publishing House, New Delhi.
84. Tiwari, G., Kupfermann, A. & Agrawal, S. (1997). A new design of double condensing chamber solar stills *Desalination*. 114. 153.
85. Tiwari, G., Shukla, S. & Singh, I. (2003b). Computer modeling of Passive/active solar still by using inner glass temperature. *Desalination*. 154. 2. 171–185.
86. Toure, S. & Meukam, P. (1997). A numerical model and experimental investigation for a solar still in climatic conditions in Abidjan. *J. Renewable Energy*. 11. 3. 319.
87. Tripathi, R. & Tiwari, G. (2005). Effect of water depth on internal heat and mass transfer for active solar distillation. *Desalination*. 173. 187–200.
88. UNESCO (2006). *El agua, una responsabilidad compartida*. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación), FIDA (Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola). 7. 21.
89. Urrutia, F. (2005). Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras. *Ingeniería y territorio. Desalación. Revista de ingenieros de caminos canales y puertos*. 72. 68.
90. Voivontas D, Yannopoulos K, Rados K, Zervos A, Assimacopoulos D. (1999). Market potential of renewable energy powered desalination systems in Greece. *Desalination* 1999;121:159–72.
91. Voropoulos, K., Mathioulakis, E. & Belessiotis, V. (2002). Analytical simulation of energy behavior of solar stills and experimental validation. *Desalination*. 153. 87–94.
92. Watkins, K. (9 de Noviembre de 2006). Presentación del Informe sobre Desarrollo Humano 2006. (P.p. (PNUD), Ed.) Recuperado el 1/8/2013, de <http://hdr.undp.org/es/informes/mundial/idh2006/presentacion/title,212,es.html>

93. Wattmuf, J., Charters, W. & Proctor, D. (1997). Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Complex*. 2. 56.
94. Wilson, B. (1957). Solar distillation research and its application in Australia. In: *Proceedings of Symposium on Saline water Conversion*, Washington, DC. 568. 123–130.

CAPÍTULO 8 - ANEXOS

8.1 Anexos

Fase	Mo	Ma	Ta	V	Ts	Ae	Ar	Af	Ag	Ah	Qf	Qa	Mg	cv	h	Deho 1	Deho 2	Deho 3	Tala	o	hays	hays	ba	Tg	Pg	Tv	ERBOC	Pr	hays	hays	U1	U2	U3	F1	F2	F3	1er 1	1er 2	1er 3	Mo			
kg/ha	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg
0	0.00	287.05	2.04	208.46	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	13.65	283.55	11.42	289.83	0.00	14.53	4.61	4.43	7.28	5.61	3.42	1.60	0.036	0.019	0.01	0.00	0.14	0.03	0.18		
1	0.00	286.68	1.84	207.94	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	12.70	282.28	11.21	289.57	0.00	14.50	4.59	4.43	7.23	5.59	3.40	1.60	0.036	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
2	0.00	286.41	1.71	207.56	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	12.21	281.09	11.05	289.38	0.00	14.13	4.58	4.41	7.19	5.58	3.39	1.60	0.036	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
3	0.00	286.47	2.34	207.64	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	14.60	287.86	12.86	289.15	0.00	13.93	4.57	4.41	7.16	5.57	3.39	1.60	0.029	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
4	0.00	286.51	2.54	207.70	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	15.53	287.82	12.83	289.11	0.00	13.90	4.57	4.41	7.16	5.57	3.38	1.60	0.029	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
5	0.00	286.50	2.30	207.69	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	14.43	287.90	12.90	289.20	0.00	13.97	4.58	4.41	7.17	5.58	3.39	1.60	0.029	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
6	0.01	286.46	2.33	207.63	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	14.57	287.85	12.85	289.14	0.00	13.92	4.57	4.41	7.16	5.57	3.38	1.60	0.029	0.019	0.01	0.00	0.15	0.03	0.18		
7	0.21	286.97	2.50	208.35	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	15.22	288.28	13.20	289.57	0.00	14.50	4.60	4.44	7.24	5.60	3.41	1.60	0.036	0.019	0.01	0.01	0.14	0.03	0.18		
8	0.74	287.98	2.82	209.76	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	16.43	289.16	13.94	290.44	0.00	15.08	4.66	4.49	7.38	5.66	3.46	1.60	0.031	0.020	0.01	0.02	0.13	0.03	0.19		
9	1.25	289.36	3.56	217.70	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	19.22	290.33	14.97	291.60	0.00	16.18	4.74	4.57	7.58	5.74	3.53	1.60	0.033	0.022	0.04	0.04	0.11	0.04	0.19		
10	1.85	290.92	4.28	217.91	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	21.95	291.73	16.31	292.99	0.00	17.59	4.83	4.65	7.77	5.83	3.61	1.60	0.035	0.023	0.04	0.07	0.08	0.04	0.19		
11	2.31	292.44	4.77	216.06	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	23.81	293.16	17.77	294.41	0.00	19.14	4.92	4.74	7.94	5.92	3.70	1.60	0.038	0.025	0.04	0.09	0.05	0.04	0.18		
12	2.82	293.48	5.56	217.53	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	26.84	294.10	18.79	295.31	0.00	20.22	4.96	4.86	8.26	5.98	3.75	1.60	0.039	0.027	0.05	0.11	0.03	0.05	0.18		
13	2.99	294.21	6.13	218.57	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	29.00	294.77	19.56	296.00	0.00	21.03	5.03	4.84	8.55	6.03	3.80	1.60	0.041	0.028	0.05	0.12	0.01	0.05	0.18		
14	3.23	294.95	6.48	219.61	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	30.31	295.47	20.38	296.69	0.00	21.90	5.07	4.89	8.64	6.07	3.84	1.60	0.042	0.029	0.05	0.14	-0.01	0.05	0.17		
15	3.34	295.64	6.94	220.56	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	32.07	296.10	21.15	297.31	0.00	22.70	5.11	4.91	8.66	6.11	3.88	1.60	0.043	0.030	0.05	0.14	-0.03	0.05	0.16		
16	2.98	295.46	7.15	220.26	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	32.87	295.88	20.88	297.10	0.00	22.42	5.10	4.91	8.76	6.01	3.87	1.60	0.043	0.030	0.05	0.13	-0.03	0.05	0.15		
17	2.87	294.92	7.56	219.58	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	34.44	295.38	20.28	296.61	0.00	21.79	5.07	4.89	8.63	6.07	3.84	1.60	0.043	0.029	0.05	0.11	-0.01	0.05	0.15		
18	1.97	294.13	6.74	218.45	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	31.31	294.65	19.42	295.88	0.00	20.88	5.02	4.84	8.52	6.02	3.79	1.60	0.046	0.028	0.05	0.08	0.01	0.05	0.14		
19	1.08	293.15	6.31	217.07	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	29.67	293.72	18.37	294.96	0.00	19.77	4.96	4.78	8.43	5.96	3.73	1.60	0.039	0.026	0.04	0.04	0.04	0.04	0.12		
20	0.42	291.26	5.34	214.18	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	25.98	291.93	16.51	293.19	0.00	17.80	4.85	4.67	7.87	5.85	3.62	1.60	0.034	0.024	0.04	0.01	0.08	0.04	0.13		
21	0.02	289.37	3.70	211.77	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	19.75	290.31	14.96	291.59	0.00	16.16	4.74	4.57	7.61	5.74	3.53	1.60	0.031	0.022	0.04	0.00	0.11	0.04	0.15		
22	0.00	288.28	2.71	210.18	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	15.99	289.48	14.22	290.76	0.00	15.38	4.68	4.51	7.62	5.68	3.48	1.60	0.031	0.021	0.03	0.00	0.13	0.03	0.16		
23	0.00	287.58	2.64	209.21	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	15.72	288.83	13.66	290.12	0.00	14.78	4.64	4.47	7.66	5.64	3.44	1.60	0.031	0.020	0.03	0.00	0.14	0.03	0.17		
24	0.00	287.05	2.04	208.46	1.00	1.15	1.15	0.94	0.85	2.3E+00	2.1E+00	0.4	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	43.200	1.9E+09	286.97	5.67E+08	1.00	1.00	13.65	288.55	13.42	289.83	0.00	14.53	4.61	4.45	7.28	5.61	3.42	1.60	0.036	0.019	0.03	0.00	0.14	0.03	0.18		

Rendimiento diario 1.89 Lts
Rendimiento diario 0.30 Lts
Rendimiento total 2.19 Lts