ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y SIMULACIÓN DE UN DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO MODULAR DE AGUA DE MAR PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS ALTERNATIVAS Y EFICIENCIA ENERGÉTICA, CON UNA CAPACIDAD DIARIA PROMEDIO DE 4 LITROS.

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

ESTEBAN FRANCISCO URRESTA SUÁREZ
eus82@hotmail.com

DIRECTOR: FÍS. MARCO YÁNEZ, MSc.
marco.yanez@epn.edu.ec

Quito, Agosto 2013

DECLARACIÓN

Yo, Esteban Francisco Urresta Suárez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado por ningún grado o calificación personal; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, de acuerdo a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la Normativa Institucional Vigente.

_____

Esteban Francisco Urresta Suárez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Esteban Francisco Urresta Suárez, bajo mi supervisión

_____

Fís. Marco Yánez, MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por su constante motivación, en especial a mi madre, pilar fundamental en el camino de mi vida, por su ejemplo altruista y amor incondicional.

A mis maestros, quienes han compartido su sabiduría a lo largo de mi proceso de formación, al Físico Marco Yánez, cuyo apoyo y guía han permitido culminar con éxito este proyecto.

Al Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética, por facilitar el uso de sus instalaciones y proporcionar toda la información meteorológica necesaria para la simulación del prototipo construido.

A la empresa AGROTRADING, por la apertura y cooperación en el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

DECLARACIÓN ii
CERTIFICACIÓN iii
AGRADECIMIENTOS iv
NOMENCLATURA xx
RESUMEN xxix
PRESENTACIÓN xxxi
OBJETIVOS xxxiii

CAPÍTULO 1 1
EL AGUA 1
1.1. INTRODUCCIÓN 1
1.2. RECURSOS DE AGUA, CALIDAD Y USO 2
1.2.1. RECURSOS HÍDRICOS 2
1.2.2. USO DEL AGUA 3
1.2.3. CALIDAD DEL AGUA 6
1.3. EL AGUA EN EL ECUADOR 7
1.3.1. CLIMA DEL ECUADOR 7
1.3.2. RECURSOS HÍDRICOS DEL ECUADOR 9
1.3.3. CALIDAD DEL AGUA EN EL ECUADOR 12
1.3.4. AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO 12
1.4. PURIFICACIÓN DEL AGUA 13
1.5. DESALINIZACIÓN DEL AGUA 15
1.5.1. CLASIFICACIÓN DEL AGUA POR SU SALINIDAD 15
1.5.2. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR 15
1.5.3. TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA 16
1.5.3.1. Procesos Térmicos para la desalinización del agua 17
1.5.3.2. Procesos de Membrana para la desalinización del agua 21

CAPÍTULO 2 24
ENERGÍA SOLAR TÉRMICA 24
2.1. INTRODUCCIÓN 24
2.2. LA CONSTANTE SOLAR 24
2.3. DEFINICIONES IMPORTANTES 24
2.4. ÁNGULOS DE LA RADIACIÓN DIRECTA 27
2.5. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA RADIACIÓN 30
2.6. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE 32
2.7. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO 33
2.8. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA CIELO DESPEJADO 34
2.9. COMPONENTES DIRECTO Y DIFUSO DE LA RADIACIÓN HORARIA 37
2.10. RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA 38
2.10.1. RADIACIÓN DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA 38
2.10.2. RADIACIÓN TOTAL SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA 39
2.11. RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR 40
2.11.1. RADIACIÓN SOLAR EN LA REGIÓN COSTA Y LA CIUDAD DE QUITO 40
2.11.2. RADIACIÓN SOLAR EN LAS ISLAS GALÁPAGOS 44
2.12. COLECTORES SOLARES 46
2.12.1. ABSORTIVIDAD, REFLECTIVIDAD Y TRANSMISIVIDAD DE LOS MATERIALES 46
2.12.2. COLECTORES SOLARES NO CONCENTRADORES 48
2.12.2.1. Colectores solares planos 48
2.12.2.2. Colectores solares de tubos al vacío 50
2.12.2.2.1. Colectores solares de tubos al vacío con circulación natural (termosifón) 51
2.12.2.2.2. Colectores solares con tubos de calor (heat pipe) 52
2.12.3. COLECTORES CONCENTRADORES 53
2.12.3.1. Concentrador parabólico compuesto (CPC) 55
2.12.3.2. Colector cilindro parabólico 56
2.12.3.3. Reflector lineal Fresnel 57

2.12.3.4. Reflector de plato parabólico 57
2.12.3.5. Receptor central 58
2.12.4. ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ENTREGADA POR UN COLECTOR SOLAR PLANO 59
2.12.5. CALENTAMIENTO SOLAR DEL AGUA 63
2.12.5.1. Sistemas de circulación natural (termosifón) 64
2.12.5.2. Sistemas de circulación forzada 67
2.12.5.3. Posición del colector en un calentador solar de agua 68

CAPÍTULO 3 70
DESALINIZACIÓN SOLAR TÉRMICA 70
3.1. INTRODUCCIÓN 70
3.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS 71
3.3. FACTORES QUE FAVORECEN EL USO DE LOS DESTILADORES SOLARES 73
3.4. CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA POR LOS DESTILADORES SOLARES 73
3.5. TRATAMIENTO DEL AGUA Y DEPÓSITOS EN EL INTERIOR DEL DESTILADOR SOLAR 74
3.6. CLASIFICACIÓN DE LOS DESTILADORES SOLARES 75
3.6.1. DESTILADORES SOLARES PASIVOS 75
3.6.2. DESTILADORES SOLARES ACTIVOS 80
3.7. TRANSFERNCIA DE CALOR Y MASA EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE 86
3.7.1. FLUJOS DE CALOR Y BALANCES DE ENERGÍA EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE 86
3.7.2. ESTIMACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE 89
3.7.2.1. Flujo de calor por convección natural entre el agua y la cubierta transparente, $q_{c,w\text{-}g}$ 89
3.7.2.2. Flujo de calor por evaporación entre el agua y la cubierta transparente, q_e 92

3.7.2.3. Estimación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{c,w\text{-}g}$ 95
3.7.2.4. Flujo de calor por convección natural entre el fondo del estanque y el agua salina, $q_{c,b\text{-}w}$ 99
3.7.2.5. Flujo de calor por radiación entre la superficie del agua y la cubierta transparente, $q_{r,w\text{-}g}$ 101
3.7.2.6. Calor perdido hacia los alrededores por la base y paredes del destilador solar, q_p 101
3.7.2.7. Flujo de calor por convección entre la cubierta transparente y el medio ambiente, $q_{c,g\text{-}a}$ 102
3.7.2.8. Flujo de calor por radiación entre la cubierta transparente y el cielo, $q_{r,g\text{-}c}$ 103

CAPÍTULO 4 104
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR 104
4.1. ALTERNATIVAS DE DISEÑO 104
4.1.1. MÉTODO DE SELECCIÓN 108
4.2. FUNCIONAMIENTO DEL DESTILADOR SOLAR DE MÚLTIPLES ETAPAS CON COLECTOR SOLAR PLANO. 110
4.3. ELECCIÓN DEL NÚMERO DE ETAPAS EN LA TORRE DE DESTILACIÓN 111
4.4. ÁREA DEL COLECTOR SOLAR PLANO 112
4.5. RELACIÓN ENTRE EL ÁREA DEL COLECTOR SOLAR Y EL ÁREA DE LAS ETAPAS DE LA TORRE DE DESTILACIÓN, A_c/A_{wn} 115
4.6. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CONDENSACIÓN EN CADA DEPÓSITO 116
4.6.1. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO 117
4.7. ALIMENTACIÓN DE AGUA AL DESALINIZADOR SOLAR 118
4.8. FILTRACIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN 118
4.9. MODELO MATEMÁTICO 119
4.9.1. COLECTOR SOLAR PLANO 119
4.9.1.1. Posición del colector 119

4.9.1.2. Radiación solar incidente sobre el colector 120
4.9.1.3. Energía entregada por el colector solar, Q_u 122
4.9.2. TORRE DE DESTILACIÓN 123
4.9.2.1. Balances de energía en la Torre de destilación 124
4.9.2.2. Flujos de calor en la Torre de destilación 128
4.10. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO 141
4.11. CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO 142
4.11.1. MATERIALES Y EQUIPOS 142
4.11.2. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN 143
4.11.3. OPERACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR 153
4.11.4. COSTOS DE FABRICACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO 153

CAPÍTULO 5 156
PRUEBAS Y SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR 156
5.1. INTRODUCCIÓN 156
5.2. PRUEBAS REALIZADAS 156
5.2.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA Y DEL DESTILADO PRODUCIDO 156
5.2.2. MEDICIÓN DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA DEL AGUA A SU PASO POR EL COLECTOR SOLAR 160
5.2.3. PRUEBAS AL DESALINIZADOR SOLAR OPERANDO CON AGUA SALINA 161
5.2.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS 163
5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS 164
5.3.1. TEMPERATURA DEL AGUA EN LA TORRE DE DESTILACIÓN Y MASA DE AGUA DESTILADA PRODUCIDA 164
5.3.1.1. Obtención experimental de las constantes C, n, C_1 y n_1 de los coeficientes de transferencia de calor por convección h_c y h_{c1} 164
5.3.1.2. Coeficiente de Rendimiento (COP) 168
5.3.2. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA A SU PASO POR EL COLECTOR SOLAR 169
5.3.2.1. Energía útil entregada por el colector solar 169

5.3.2.2. Relación de Ganancia de Salida (GOR) 175
5.3.3. DESALINIZADOR SOLAR OPERANDO CON AGUA SALINA 176
5.3.3.1. Coeficiente de Rendimiento (COP) y Relación de Ganancia de Salida (GOR) 176
5.3.3.2. Análisis químico y microbiológico del agua producida por el Desalinizador solar 176
5.4. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR 177
5.4.1. COMPONENTES DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN 180
5.4.1.1. Bloque de simulación del Depósito principal 181
5.4.1.2. Bloque de simulación del Primer Depósito 184
5.4.1.3. Bloque de simulación del Segundo Depósito 185
5.4.2. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN 189
5.4.3. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR EMPLEANDO LAS CONSTANTES PROPUESTAS POR DUNKLE ($C = 0.075$ y $n = 1/3$) 197
5.5. ANÁLISIS DE MEJORAS AL DESALINIZADOR MEDIANTE SIMULACIÓN 198
5.5.1. SIMULACIÓN CON COLECTOR SOLAR PLANO 198
5.5.1.1. Dimensiones y forma de los depósitos en la Torre de destilación 198
5.5.1.2. Número de etapas en la Torre de destilación 199
5.5.1.3. Energía entregada por el colector solar y temperatura inicial del agua en los depósitos 200
5.5.1.4. Selección de las constantes C y n 202
5.5.1.5. Resultados de la Simulación 203
5.5.2. SIMULACIÓN CON COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO. 205
5.5.2.1. Área del colector solar y dimensiones de los depósitos en la Torre de destilación. 206
5.5.2.2. Energía útil entregada por el colector solar. 208
5.5.2.3. Resultados de la Simulación. 209

CAPÍTULO 6 213
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 213
6.1. CONCLUSIONES 213
6.2. RECOMENDACIONES 215

BIBLIOGRAFÍA 216

ANEXOS 220
ANEXO I: CARACTERÍSTICAS DE LOS FILTROS DE BOLSA Y DE CARTUCHO 221
ANEXO II: NORMA INEN 1108 PARA EL AGUA POTABLE (REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS) 223
ANEXO III: DATOS DE RADIACIÓN SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO DEL DÍA 22 DE DICIEMBRE DE 2011 225
ANEXO IV: DATOS MEDIDOS DE TEMPERATURA DEL AGUA EN LA TORRE DE DESTILACIÓN Y DE MASA DEL DESTILADO PRODUCIDO 236
ANEXO V: VALORES CALCULADOS PARA LA OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONSTANTES C, n, C_1 y n_1 239
ANEXO VI: BLOQUES DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR 242
ANEXO VII: PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO 254

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cobertura de agua potable en el Ecuador 13
Tabla 1.2 Saneamiento en el Ecuador 13
Tabla 1.3 Clasificación del agua por su salinidad 15
Tabla 1.4 Composición típica del agua de mar con una salinidad de 36000 ppm .. 16
Tabla 2.1 Radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal, $\bar{H}_o$ (MJ/m^2) 33
Tabla 2.2 Factores de corrección para el tipo de clima 35
Tabla 2.3 Radiación media diaria anual en las provincias de la Costa ecuatoriana 41
Tabla 2.4 Radiación media diaria mensual de la Provincia de Manabí 41
Tabla 2.5 Radiación media diaria mensual de la Provincia de Santa Elena 42
Tabla 2.6 Radiación media diaria mensual de la ciudad de Quito 42
Tabla 2.7 Valores de $\bar{n}/\bar{N}$ para la ciudad de Quito 43
Tabla 2.8 Para Quito: Comparación entre la radiación media diaria mensual calculada con la Ecuación 2.15 y la obtenida del atlas solar publicado por el CONELEC 43
Tabla 2.9 Radiación media diaria mensual en la isla Santa Cruz (Galápagos) 1978-1979 45
Tabla 2.10 Radiación media diaria mensual en la isla San Cristóbal (Galápagos) 1964-1970 45
Tabla 2.11 Colectores solares: Factor de concentración y temperatura de operación 54
Tabla 3.1 Propiedades físicas del aire húmedo en función de la temperatura 90
Tabla 4.1 Parámetros de selección y su peso de valoración 109
Tabla 4.2 Evaluación de las alternativas de diseño 109
Tabla 4.3 Costos de los materiales utilizados en la construcción del Desalinizador solar 153
Tabla 4.4 Costos de la mano de obra en la construcción del Desalinizador solar 155
Tabla 5.1 Temperatura del agua en cada depósito y masa del agua destilada producida (22 de Diciembre de 2011) 159
Tabla 5.2 Temperatura del agua al ingreso y salida del colector solar 160

Tabla 5.3 Masa de agua destilada producida en cada depósito (Desalinizador solar en funcionamiento con agua salada) 161
Tabla 5.4 Especificaciones técnicas del termómetro digital FLUKE 52 II 163
Tabla 5.5 Variables calculadas para obtener las constantes C y n por regresión lineal simple en el Depósito principal..... 165
Tabla 5.6 Variables calculadas para obtener las constantes C_1 y n_1 por regresión lineal simple en el Primer depósito 165
Tabla 5.7 Depósito principal: Comparación entre la masa calculada de agua destilada y la obtenida experimentalmente (22/12/2011) 167
Tabla 5.8 Primer depósito: Comparación entre la masa calculada de agua destilada y la obtenida experimentalmente 168
Tabla 5.9 Coeficiente de Rendimiento (COP) para los días en que se efectuaron pruebas de 24 horas al desalinizador..... 169
Tabla 5.10 Radiación solar promedio sobre una superficie horizontal (22/12/2011).. 170
Tabla 5.11 Comparación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal y la que incide sobre el colector (22/12/2011) 171
Tabla 5.12 Velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura del agua al ingreso del colector solar..... 172
Tabla 5.13 Velocidad del viento sobre la cubierta del colector solar 172
Tabla 5.14 Constantes geométricas y termofísicas usadas en el cálculo de la energía útil entregada por el colector 173
Tabla 5.15 Radiación solar, flujo másico de agua que circula por el colector y energía útil entregada por este a la Torre de destilación..... 174
Tabla 5.16 Radiación solar, producción de agua destilada y Relación de Ganancia de Salida para los días en que se realizaron pruebas de 24 horas al desalinizador..... 175
Tabla 5.17 Análisis microbiológico y de conductividad eléctrica del agua producida por el desalinizador solar 177
Tabla 5.18 Constantes geométricas y termofísicas usadas en la simulación del desalinizador solar..... 178

Tabla 5.19 Velocidades promedio del viento a 2.4 metros de altura sobre el suelo y velocidades calculadas para la altura a la que se ubica la cubierta del Segundo depósito 188
Tabla 5.20 Valores de la temperatura ambiente promedio en el día 22 de Diciembre 188
Tabla 5.21 Destilado acumulado en cada depósito: Comparación entre los valores de la simulación y los experimentales (22/12/2011) 194
Tabla 5.22 Producción de agua en cada depósito del desalinizador: Comparación entre los resultados de la simulación usando las constantes propuestas por Dunkle y las evaluadas experimentalmente 197
Tabla 5.23 Nuevas constantes empleadas en la simulación del Desalinizador solar de múltiples etapas con colector plano 199
Tabla 5.24 Nuevas constantes empleadas en la simulación del Desalinizador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío 206
Tabla 5.25 Radiación solar y Energía entregada por los dos colectores con tubos de calor (22/12/2011) 208
Tabla 5.26 Temperaturas iniciales y finales en la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector de tubos de calor 209
Tabla 5.27 Producción diaria, COP y GOR de la simulación del desalinizador solar con 3, 5 y 7 etapas 211

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Recursos hídricos renovables del mundo (m^3/habitante/año), 1995 3
Figura 1.2 Uso anual de agua por habitante en el mundo, 2000 4
Figura 1.3 Recursos Hídricos del mundo y su uso por sectores, 2000 5
Figura 1.4 Estrés Hídrico en las cuencas de los ríos más importantes, 2002 6
Figura 1.5 Pluviometría anual en el Ecuador 9
Figura 1.6 Recursos de agua superficial del Ecuador 11
Figura 1.7 Esquema del proceso de desalinización MSF 18
Figura 1.8 Esquema del proceso de desalinización por Destilación Multiefecto 19
Figura 1.9 Esquema del proceso de desalinización por Compresión de Vapor 20
Figura 1.10 Esquema de un destilador solar de estanque 20
Figura 1.11 Ósmosis y Ósmosis Inversa 22
Figura 1.12 Proceso de desalinización por Ósmosis Inversa 22
Figura 1.13 Proceso de desalinización por Electrodiálisis 23
Figura 2.1 Radiación Solar Directa y Difusa 25
Figura 2.2 Declinación del Sol 28
Figura 2.3 Ángulo de Incidencia de la radiación directa 28
Figura 2.4 Ángulo cenital, Pendiente de la superficie, Ángulo acimut de la superficie, Ángulo de altitud solar y Ángulo acimut solar 28
Figura 2.5 Sección de la Tierra mostrando los ángulos β, ϕ, θ y $(\phi - \beta)$ para superficies que miran al sur 30
Figura 2.6 Mapa mundial con la irradiancia solar media anual 1990-2004, (W/m^2) 31
Figura 2.7 Mapa de Insolación global del Ecuador para el mes de enero 44
Figura 2.8 Representación esquemática de la absortividad α, reflectividad ρ y Transmisividad τ 47
Figura 2.9 Reflexión en una superficie ideal especular, ideal difusa y real 48
Figura 2.10 Colector solar plano típico y sus partes principales 49
Figura 2.11 Tipos comunes de placas absorbentes 50
Figura 2.12 Tubos al vacío Dewar para aplicaciones solares 51
Figura 2.13 Esquema de un colector solar de tubos al vacío con circulación natural 52
Figura 2.14 Esquema de un colector solar con tubos de calor 53

Figura 2.15 Colector solar plano con espejos 55
Figura 2.16 Corte esquemático de un concentrador parabólico compuesto 56
Figura 2.17 Colectores solares concentradores formadores de imagen 58
Figura 2.18 Configuración entre la placa y los tubos en un colector solar plano 62
Figura 2.19 Esquema de un calentador solar de agua que opera por termosifón 64
Figura 2.20 Calentador solar de circulación forzada con circuito abierto 67
Figura 2.21 Calentador solar de circulación forzada con circuito cerrado 68
Figura 2.22 a) Límites prácticos de orientación del colector y b) Inclinación del colector 69
Figura 3.1 Esquema de un destilador solar de estanque con cubierta de doble pendiente 71
Figura 3.2 Esquemas de varios destiladores solares convencionales 76
Figura 3.3 Destilador solar de estanque con reflectores 76
Figura 3.4 Destilador solar de estanque con condensador pasivo 77
Figura 3.5 Destilador solar de múltiples mechas 78
Figura 3.6 Destilador solar de plástico extruido con mecha negra 79
Figura 3.7 Destilador solar con bateas inclinadas 79
Figura 3.8 Destilador solar activo acoplado a un colector plano 81
Figura 3.9 Destilador solar activo de múltiples etapas con recuperación de calor . 83
Figura 3.10 Destilador solar vertical acoplado a un colector plano 84
Figura 3.11 Destilador solar con colector de plato parabólico 85
Figura 3.12 Destilador solar de estanque acoplado a un colector parabólico. (1) Colector cilindro-parabólico, (2) Tubería de aceite, (3) Válvulas, (4) Destilador solar de estanque, (5) Intercambiador de calor, (6) Bomba . 85
Figura 3.13 Flujos de calor en un destilador solar de estanque 87
Figura 3.14 Circuito térmico de un destilador solar de estanque..... 87
Figura 3.15 Gráficas de un ajuste muy bueno y otro deficiente..... 99
Figura 4.1 Destilador solar de estanque (DSE) 105
Figura 4.2 Destilador solar de múltiples mechas (DSM) 106
Figura 4.3 Destilador solar de múltiples etapas con colector plano (DSMP) 107
Figura 4.4 Destilador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío (DSMT) 108

Figura 4.5 Producción acumulada de agua en un destilador solar activo de 5 etapas 112
Figura 4.6 Influencia entre la producción diaria de agua y $(A_c/A_{b,1})$ en un desalinizador solar activo de 3 etapas 115
Figura 4.7 Dispositivo de prueba utilizado en la determinación del ángulo óptimo de inclinación de las superficies de condensación del desalinizador solar 117
Figura 4.8 Esquema del desalinizador solar térmico con todas sus partes principales 119
Figura 4.9 Flujos de calor en la Torre de destilación 124
Figura 4.10 Circuito de resistencias térmicas de la Torre de destilación 127
Figura 4.11 Soldadura de los depósitos del desalinizador con el proceso TIG 145
Figura 4.12 Canal de recolección de agua destilada 145
Figura 4.13 Taladrado del orifico para el tubo de evacuación de agua en el Primer depósito 146
Figura 4.14 Empaque de caucho para la unión entre el Depósito principal y el Primer depósito 147
Figura 4.15 Corte transversal del Depósito principal 148
Figura 4.16 Panel de aislante térmico para el Depósito principal 148
Figura 4.17 Estructura metálica de soporte del Tanque de alimentación 149
Figura 4.18 Estructura metálica de soporte de la Torre de destilación 150
Figura 4.19 Estructura metálica de soporte del Colector solar 150
Figura 4.20 Sistema de distribución de agua del Desalinizador solar 151
Figura 4.21 Llenado y regulación del nivel de agua con la válvula de flotador (Depósito principal) 152
Figura 4.22 Desalinizador solar en funcionamiento 152
Figura 5.1 Medición de temperatura del agua y de la masa del destilado producido por el Desalinizador 157
Figura 5.2 Medición de la temperatura del agua al ingreso y salida del colector solar 160
Figura 5.3 Recolección del agua de mar en una playa de la provincia de Esmeraldas 162
Figura 5.4 Termómetro digital FLUKE 52 II 163

Figura 5.5 Balanza digital CAMRY EK 5055 164
Figura 5.6 Depósito principal: $\ln(m_e/R)$ vs $\ln(\mathrm{Ra})$ 166
Figura 5.7 Primer Depósito: $\ln(m_{e1}/R_1)$ vs $\ln(\mathrm{Ra}_1)$ 166
Figura 5.8 Ventana principal del programa de simulación del Desalinizador solar..... 180
Figura 5.9 Bloques Step de la energía entregada por el colector solar..... 181
Figura 5.10 Energía promedio entregada por el colector solar en función del tiempo 182
Figura 5.11 Bloques del programa de simulación de los flujos de calor y masa en el Depósito principal 183
Figura 5.12 Sub-bloques del flujo de calor por convección entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_c..... 183
Figura 5.13 Sub-bloques del flujo de calor por evaporación entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_e..... 184
Figura 5.14 Sub-bloques para el cálculo de la masa de agua destilada producida, $\dot{m}_e$ 184
Figura 5.15 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Primer depósito..... 185
Figura 5.16 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Segundo Depósito 186
Figura 5.17 Radiación absorbida por la cubierta del Segundo depósito en función del tiempo (22/12/2011)..... 187
Figura 5.18 Perfiles de temperatura en el agua de la Torre de destilación durante un día de simulación (22/12/2011) 189
Figura 5.19 Producción de agua destilada en cada depósito del desalinizador durante un día de simulación (22/12/2011) 190
Figura 5.20 Producción acumulada de agua destilada en el transcurso de un día de simulación (22/12/2011) 191
Figura 5.21 Comparación entre la temperatura del agua medida en cada depósito y las temperaturas suministradas por la simulación (22/12/2011)..... 192

Figura 5.22 Comparación entre el destilado acumulado medido en cada depósito y los destilados acumulados obtenidos con la simulación (22/12/2011). 193
Figura 5.23 Estimación de la producción diaria del desalinizador solar en todos los meses del año (Ciudad de Quito) 196
Figura 5.24 Estimación de la producción diaria del desalinizador solar en todos los meses del año (Isla San Cristóbal) 196
Figura 5.25 Sección transversal de los depósitos con forma de V invertida 198
Figura 5.26 Desalinizador solar de 5 etapas con colector plano 200
Figura 5.27 Bloques de simulación de la energía entregada por el colector solar, Q_u 201
Figura 5.28 Ventana principal del programa de simulación del desalinizador de 5 etapas..... 202
Figura 5.29 Perfiles de temperatura de la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector plano (22/12/2011) 203
Figura 5.30 Producción acumulada de agua en el desalinizador de 5 etapas con colector plano, simulación de un día de operación (22/12/2011). 204
Figura 5.31 Desalinizador solar de 5 etapas con colector de tubos de calor 208
Figura 5.32 Perfiles de temperatura en la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector de tubos de calor (22/12/2011)..... 209

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN	UNIDADES
ΔT	Diferencia de temperatura entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	°C
A_b	Área del fondo del estanque (destilador solar de batea o estanque)	m^2
A_{b1}	Área del fondo del Primer depósito	m^2
A_{b2}	Área del fondo del Segundo depósito	m^2
A_c	Área del colector solar	m^2
A_e	Área del aislante lateral del colector solar	m^2
A_f	Área de la base del Depósito principal y de la base de un destilador solar de estanque	m^2
A_g	Área de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	m^2
A_s	Área de las paredes: Depósito principal y destilador solar de estanque	m^2
A_{s1}	Área de las paredes del Primer depósito	m^2
A_{s2}	Área de las paredes del Segundo depósito	m^2
A_t	Área de la cubierta del Segundo depósito	m^2
A_w	Área de la superficie libre del agua en el Depósito principal y en un destilador solar de estanque	m^2
A_{w1}	Área de la superficie libre del agua en el Primer depósito	m^2
A_{w2}	Área de la superficie libre del agua en el Segundo depósito	m^2
b	Ancho de la unión entre la placa de absorción y los tubos del colector solar	m
C	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección: entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, y entre el agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	-
C_1	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	-
C_2	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	-
C_b	Conductancia térmica de la unión entre la placa de absorción y los tubos del colector solar	W/m·°C

C_i	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del enésimo depósito y el fondo del siguiente	-
COP	Coeficiente de Rendimiento	-
C_p	Calor específico del aire húmedo	J/kg·°C
C_{pa}	Calor específico del aire seco	J/kg·°C
C_{pb}	Calor específico del material con el que se construyeron los depósitos del desalinizador solar (acero inoxidable AISI 430), calor específico de la estructura del estanque de agua salina (destilador solar de batea)	J/kg·°C
C_{pg}	Calor específico de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	J/kg·°C
C_{pw}	Calor específico del agua	J/kg·°C
D	Diámetro exterior de los tubos del colector solar	m
D_i	Diámetro interior de los tubos del colector solar	m
F'	Factor de eficiencia del colector solar	-
F_R	Factor de remoción de calor del colector solar	-
g	Aceleración de la gravedad	m/s^2
G_{bn}	Radiación directa sobre un plano normal a su dirección	W/m^2
G_c	Radiación total incidente sobre el colector solar	W/m^2
G_{cb}	Radiación directa sobre una superficie horizontal en un día despejado	W/m^2
G_{cd}	Radiación difusa en un día despejado	W/m^2
G_o	Radiación solar sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre	W/m^2
G_{on}	Radiación extraterrestre medida en un plano normal a su dirección	W/m^2
GOR	Relación de Ganancia de Salida	-
Gr	Número de Grashof	-
G_{sc}	Constante solar	W/m^2
G_t	Radiación solar incidente sobre la cubierta del Segundo depósito	W/m^2
$\overline{H}$	Radiación media diaria mensual sobre una superficie horizontal	J/m^2
H	Radiación total diaria sobre una superficie horizontal	J/m^2
h_{bw1}	Coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre el fondo y el agua del Primer depósito	$W/m^2 \cdot °C$
h_{bw2}	Coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre el fondo y el agua del Segundo depósito	$W/m^2 \cdot °C$

h_c	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	W/m^2 · °C
$h_{c,b\text{-}w}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fondo del estanque y el agua (destilador solar de batea)	W/m^2 · °C
$h_{c,g\text{-}a}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta de un destilador solar de estanque y el aire circundante	W/m^2 · °C
$h_{c,w\text{-}g}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta de un destilador solar de estanque	W/m^2 · °C
h_{c1}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	W/m^2 · °C
h_{c2}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	W/m^2 · °C
h_{ct}	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta del Segundo depósito y el aire circundante	W/m^2·°C
$\overline{H}_d$	Radiación difusa media diaria mensual sobre una superficie horizontal	J/m^2
H_d	Radiación difusa diaria sobre una superficie horizontal	J/m^2
h_{fg}	Entalpía de vaporización del agua en el Depósito principal y en un destilador solar de estanque	J/kg
h_{fg1}	Entalpía de vaporización del agua en el Primer depósito	J/kg
h_{fg2}	Entalpía de vaporización del agua en el Segundo depósito	J/kg
h_{fi}	Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y los tubos del colector solar	W/m^2 ·°C
H_o	Radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal	J/m^2
$\overline{H}_o$	Radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal	J/m^2
h_{vc}	Coeficiente de transferencia de calor debido al viento (colector solar)	W/m^2 ·°C
I	Radiación total horaria sobre una superficie horizontal	J/m^2
I_o	Radiación extraterrestre horaria sobre una superficie horizontal	J/m^2
k	Conductividad térmica del aire húmedo en el Depósito principal y de la placa de absorción del colector solar	W/m·°C
k_{AF}	Conductividad térmica del aislante en la base de la Torre de destilación (Espuma de poliuretano)	W/m·°C

k_{AT}	Conductividad térmica del aislante en las paredes de la Torre de destilación (Poliestireno expandido)	W/m·°C
k_b	Conductividad térmica de la unión entre la placa de absorción y los tubos del colector solar	W/m·°C
k_e	Conductividad térmica del aislante lateral del colector solar (lana de vidrio)	W/m·°C
k_f	Conductividad térmica de la base de un destilador solar de estanque y del aislante colocado detrás de la placa de absorción del colector solar	W/m·°C
k_s	Conductividad térmica de las paredes de un destilador solar de estanque	W/m·°C
$\overline{K_T}$	Índice de claridad medio mensual	-
K_T	Índice de claridad diario	-
k_T	Índice de claridad horario	-
k_w	Conductividad térmica del agua en un destilador solar de estanque	W/m·°C
k_{w1}	Conductividad térmica del agua en el Primer depósito	W/m·°C
k_{w2}	Conductividad térmica del agua en el Segundo depósito	W/m·°C
L	Distancia entre la superficie del agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	m
L_{AT}	Espesor del aislante térmico de la Torre de destilación del desalinizador solar	m
L_e	Espesor del aislante lateral del colector solar	m
L_f	Espesor de la base de un destilador solar de estanque y del aislante térmico colocado detrás de la placa de absorción del colector solar	m
L_s	Espesor de las paredes de un destilador solar de estanque	m
$\dot{m}$	Flujo másico de agua que circula por el colector solar	kg/s
M_a	Peso molecular del aire	-
$\dot{m}_a$	Masa de aire transferida desde el agua hasta la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	kg/s
m_b	Masa de la estructura del estanque de agua salina (destilador solar de batea)	kg
m_{b1}	Masa del fondo del Primer Depósito	kg
m_{b2}	Masa del fondo del Segundo depósito	kg
$\dot{m}_e$	Flujo másico de agua destilada producida por un destilador solar de estanque y flujo másico de agua producida en el Depósito principal	kg/s
$\dot{m}_{e1}$	Flujo másico de agua destilada producida en el Primer depósito	kg/s
$\dot{m}_{e2}$	Flujo másico de agua destilada producida en el Segundo depósito	kg/s

m_g	Masa de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	kg
m_t	Masa de la cubierta o tapa del Segundo depósito	kg
m_w	Masa de agua en el Depósito principal y masa de agua en un destilador solar de estanque	kg
M_w	Peso molecular del agua	kg
$\dot{m}_w$	Masa de agua transferida desde la superficie del agua hasta la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	kg/s
m_{w1}	Masa de agua en el Primer depósito	kg
m_{w2}	Masa de agua en el Segundo Depósito	kg
n	Día del año; constante del coeficiente de transferencia de calor por convección: entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, y entre el agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	-
N	Número de horas con luz en un día, número de cubiertas de un colector solar plano	-
$\bar{n}$	Número de horas con sol brillante en el mes	-
$\overline{N}$	Número total de horas con luz de día en el mes	-
n_1	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	-
n_2	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	-
n_i	Constante del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del enésimo depósito y el fondo del siguiente	-
Nu	Número de Nusselt	-
P_{b1}	Presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del Primer depósito	N/m^2
P_g	Presión de vapor del agua a la temperatura de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	N/m^2
Pr	Número de Prandtl	-
P_T	Presión total o atmosférica	N/m^2
P_w	Presión de vapor del agua a la temperatura del agua salina en un destilador solar de estanque, presión de vapor del agua a la temperatura del agua en el Depósito principal	N/m^2
q_{bw1}	Flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Primer depósito	W
q_{bw2}	Flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Segundo depósito	W
q_c	Flujo de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	W

$q_{c,b\text{-}w}$	Flujo de calor por convección natural entre el fondo de un destilador solar de estanque y el agua salina.	W
$q_{c,g\text{-}a}$	Flujo de calor por convección entre la cubierta de un destilador solar de estanque y el medio ambiente	W
$q_{c,w\text{-}g}$	Flujo de calor por convección natural entre el agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	W
q_{c1}	Flujo de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	W
q_{c2}	Flujo de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	W
q_{ct}	Flujo de calor por convección entre la cubierta del Segundo depósito y el medio ambiente	W
q_e	Flujo de calor por evaporación: entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, y entre el agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	W
q_{e1}	Flujo de calor por evaporación entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	W
q_{e2}	Flujo de calor por evaporación entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	W
q_f	Calor perdido por la base del Depósito principal, calor perdido por la base de un destilador solar de estanque	W
q_p	Calor perdido desde el agua del Depósito principal hacia el medio ambiente, calor perdido hacia los alrededores por la parte inferior y lateral de un destilador solar de estanque	W
q_{p1}	Calor perdido desde el agua del Primer depósito hacia el medio ambiente	W
q_{p2}	Calor perdido desde el agua del Segundo depósito hacia el medio ambiente	W
q_r	Flujo de calor por radiación entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	W
$q_{r,g\text{-}a}$	Flujo de calor por radiación entre la cubierta de un destilador solar de estanque y el cielo	W
$q_{r,w\text{-}g}$	Flujo de calor por radiación entre la superficie del agua y la cubierta transparente en un destilador solar de estanque	W
q_{r1}	Flujo de calor por radiación entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	W
q_{r2}	Flujo de calor por radiación entre el agua del Segundo depósito y su tapa o cubierta	W
q_{rt}	Flujo de calor por radiación entre la cubierta del Segundo depósito y el cielo	W

q_s	Calor perdido por las paredes del Depósito principal, calor perdido por las paredes de un destilador solar de estanque	W
Q_u	Energía útil entregada por el colector solar	W
R	Constante universal de los gases	kJ/kmol·K
Ra	Número de Rayleigh del aire en el Depósito principal y del agua en un destilador solar de estanque	-
Ra_1	Número de Rayleigh del aire en el Primer depósito	-
Ra_2	Número de Rayleigh del aire en el Segundo depósito	-
r_G	Relación entre la radiación total horaria y la radiación total diaria	-
S	Radiación total absorbida por el colector solar	W
T	Temperatura del aire húmedo en el Depósito principal	°C
T_a	Temperatura ambiente	°C
T_b	Temperatura de la estructura del estanque de agua salina (destilador solar de batea)	°C
T_{b1}	Temperatura del fondo del Primer depósito	°C
T_{b2}	Temperatura del fondo del Segundo depósito	°C
T_{cielo}	Temperatura del cielo	°C
T_e	Temperatura del agua a la entrada del colector solar	°C
T_g	Temperatura de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	°C
T_{pm}	Temperatura media de la placa de absorción del colector solar	K
T_s	Temperatura del agua a la salida del colector solar	°C
T_t	Temperatura de la cubierta del Segundo depósito	°C
T_w	Temperatura del agua en el Depósito principal y temperatura del agua en un destilador solar de estanque	°C
T_{w1}	Temperatura del agua en el Primer depósito	°C
T_{w2}	Temperatura del agua en el Segundo depósito	°C
U_e	Coeficiente reducido de pérdidas laterales del colector solar	W/m^2·°C
U_f	Coeficiente de pérdidas por el fondo del colector solar	W/m^2·°C
U_L	Coeficiente total de pérdidas del colector solar	W/m^2·°C
U_{sup}	Coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector solar	W/m^2·°C
v_r	Velocidad del viento a una altura de referencia z_r	m/s
v_t	Velocidad del viento sobre la cubierta del Segundo depósito	m/s

v_z	Velocidad del viento sobre la cubierta de un destilador solar de estanque	m/s
W	Distancia entre los tubos del colector solar	m
x	Distancia entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	m
x_1	Distancia entre la superficie del agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	m
x_2	Distancia entre la superficie del agua del Segundo depósito y su cubierta	m
z_c	Altura sobre el suelo a la que se encuentra la cubierta del colector solar	m
z_r	Altura sobre el suelo a la que se ubica el anemómetro (medidor de la velocidad del viento)	m
z_t	Altura sobre el suelo a la que se encuentra la cubierta del Segundo depósito	m
α_b	Absortividad del fondo del estanque (destilador solar de batea)	-
α_g	Absortividad de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	-
α_p	Absortividad de la placa de absorción del colector solar	-
α_s	Ángulo de altitud solar	Grados
α_t	Absortividad exterior de la cubierta del Segundo depósito	-
α_w	Absortividad del agua	-
β	Coeficiente de expansión térmica volumétrica del aire húmedo en el Depósito principal, ángulo de inclinación del colector solar y de una superficie plana	K^{-1}, Grados
β_w	Coeficiente de expansión térmica volumétrica del agua en un destilador solar de estanque	K^{-1}
β_{w1}	Coeficiente de expansión térmica volumétrica del agua en el Primer depósito	K^{-1}
β_{w2}	Coeficiente de expansión térmica volumétrica del agua en el Segundo depósito	K^{-1}
γ	Espesor de la unión entre la placa de absorción y los tubos del colector solar, ángulo acimut de una superficie plana	m, Grados
γ_s	Ángulo acimut solar	Grados
δ	Espesor de la placa de absorción del colector solar, declinación solar	m, Grados
ε_b	Emisividad del material con el que se construyó los depósitos del desalinizador solar (acero inoxidable AISI 430)	-
ε_g	Emisividad de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque y de la cubierta (vidrio) del colector solar	-

ε_p	Emisividad de la placa de absorción del colector solar	-
ε_t	Emisividad exterior de la cubierta del Segundo depósito (blanco acrílico)	-
ε_w	Emisividad del agua	-
η_c	Eficiencia del colector solar	%
θ	Ángulo de incidencia de la radiación directa	Grados
θ_z	Ángulo cenital	Grados
μ	Viscosidad dinámica del aire húmedo en el Depósito principal	kg/m·s
μ_w	Viscosidad dinámica del agua en un destilador solar de estanque	kg/m·s
μ_{w1}	Viscosidad dinámica del agua en el Primer depósito	kg/m·s
μ_{w2}	Viscosidad dinámica del agua en el Segundo depósito	kg/m·s
ρ	Densidad del aire húmedo en el Depósito principal, reflectividad	kg/m^3, -
ρ_b	Densidad del material con el que se construyó los depósitos del desalinizador solar (acero inoxidable AISI 430)	kg/m^3
ρ_w	Densidad del agua	kg/m^3
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^4$
τ	Transmisividad de la cubierta (vidrio) del colector solar	-
τ_b	Transmitancia atmosférica para la radiación directa	-
τ_d	Relación entre la radiación difusa y la radiación extraterrestre (día despejado)	-
τ_g	Transmisividad de la cubierta transparente de un destilador solar de estanque	-
τ_w	Transmisividad del agua	-
ϕ	Latitud geográfica	Grados
ω	Ángulo horario	Grados
ω_s	Ángulo horario del ocaso	Grados

Notas: Los símbolos que no se encuentren en esta lista serán definidos en los capítulos respectivos. Se emplea la misma simbología para designar las propiedades del aire húmedo en un destilador solar de estanque y en el Depósito principal del desalinizador solar.

RESUMEN

Un acceso adecuado al agua pura es un factor muy importante en el desarrollo social y económico de un país o región. No obstante, en muchas partes del mundo, el agua es escasa o no cumple con los estándares mínimos de calidad que la hacen apta para su consumo. Al observar la situación del Ecuador es fácil advertir la existencia de grandes recursos hídricos en su territorio, pero también es evidente su distribución irregular en el espacio y el tiempo. Por ejemplo, la disponibilidad de agua dulce se reduce considerablemente en la provincia de Santa Elena, el suroeste de la provincia de Manabí y las islas Galápagos.

El objetivo de esta investigación es brindar una alternativa que mejore el abastecimiento de agua dulce en dichos lugares (especialmente en comunidades pequeñas o aisladas) a través del diseño, construcción y simulación de un desalinizador solar térmico modular con una capacidad diaria promedio de 4 litros. Al tomar en cuenta la realidad socioeconómica y tecnológica del país, aspectos como el costo, la facilidad de mantenimiento, la simplicidad del aparato, la vida útil y la eficiencia cobran mayor importancia en la etapa de diseño.

Con estas consideraciones se escogió como la alternativa más viable a un destilador solar activo de múltiples etapas. El prototipo consta de tres depósitos (etapas) de agua colocados uno encima de otro, el líquido en el depósito inferior recibe energía de un colector solar plano, generándose vapor que se condensa en el fondo del siguiente depósito y transfiere su calor de condensación; fenómeno que permite evaporar más agua sin requerimientos adicionales de energía. Este proceso se repite en el segundo y tercer compartimiento, incrementándose considerablemente la cantidad de líquido generado. Las pruebas realizadas al desalinizador muestran que su producción promedio es de aproximadamente 4 litros diarios, cumpliéndose así el objetivo del proyecto.

A partir del modelo matemático del desalinizador se creó el programa de simulación en Matlab-Simulink; este hace posible predecir el funcionamiento del equipo, obteniéndose información sobre el comportamiento de las temperaturas, destilado producido y flujos de calor en la unidad. La simulación correspondió a un día de operación del destilador, alcanzándose resultados muy satisfactorios, con un error del 7.7 % entre los datos teóricos y experimentales.

Mediante la simulación también se analizaron mejoras al desalinizador, determinándose que el número óptimo de etapas en la Torre de destilación es de 5 y que la producción diaria de agua puede aumentarse en un 38 %. Asimismo, se encontró que con el uso de paneles de tubos al vacío, la masa de agua generada por cada metro cuadrado del colector podría elevarse un 107 %.

PRESENTACIÓN

Las investigaciones realizadas en el país sobre desalinización solar térmica han sido escasas, restringiéndose casi exclusivamente al estudio de destiladores convencionales de estanque, que se caracterizan por ser económicos, pero también por su baja producción de agua. En este sentido, el actual proyecto busca el diseño y construcción de un desalinizador solar con una producción superior a la de un destilador convencional, manteniendo una conveniente relación beneficio-costo.

El documento se compone de cinco capítulos que se describen a continuación:
El Capítulo 1 inicia con la discusión sobre los recursos, usos y calidad del agua; estos temas se abordan con una perspectiva mundial, pero dando un mayor énfasis e importancia a la situación del Ecuador. Después se indican muy brevemente los principios para purificar el agua, conjuntamente con una exposición más detallada de los procesos de desalinización.

En el Capítulo 2 se explican los conceptos que permiten estimar la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal; asimismo, se analiza el potencial solar de la región Costa del Ecuador y las islas Galápagos. Por último, se describe de forma general el funcionamiento y características de los colectores solares más representativos, donde también se incluyen las ecuaciones necesarias para calcular la energía útil suministrada por un colector solar plano.

En el Capítulo 3 se discuten los principios básicos de la desalinización solar térmica y se indican las ecuaciones que rigen los fenómenos de transferencia de calor y masa en un destilador solar de estanque. Estas formulaciones tienen la ventaja de ser aplicables en la mayoría de sistemas térmicos de desalinización solar. Adicionalmente, se expone un procedimiento experimental para estimar el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta del destilador.

El diseño y construcción del desalinizador solar se presenta en el Capítulo 4. Una vez seleccionada la alternativa más conveniente, se procede a generar el modelo matemático que se utilizará en la simulación del prototipo. Posteriormente, se describe el proceso de construcción del aparato y se analizan sus costos.

Las pruebas al desalinizador solar se especifican en el último capítulo, durante el desarrollo de las mismas, además de verificarse el correcto funcionamiento del dispositivo, se toman mediciones de masa y temperatura con las que se obtienen los coeficientes de transferencia de calor por convección entre las superficies de evaporación y condensación dentro de la unidad. A continuación se presenta la simulación computacional del desalinizador solar y se comparan sus resultados con los experimentales. Finalmente, la simulación es utilizada para analizar modificaciones al destilador que permitan mejorar su desempeño.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, construir y simular un desalinizador solar térmico modular de agua de mar para el laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética, con una capacidad diaria promedio de 4 litros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar en que lugares del Ecuador es conveniente la implementación de la desalinización solar térmica.
- Determinar el recurso solar de los sitios donde podría desarrollarse la desalinización solar, así como de Quito, ciudad donde se instalará y probará el prototipo.
- Diseñar y construir un aparato modular que suministre agua potable a bajo costo, y que este dirigido principalmente a satisfacer las necesidades de agua en sectores de bajos recursos económicos.
- Realizar pruebas de funcionamiento y operación del desalinizador solar.
- Simular el prototipo construido con las variables meteorológicas del lugar donde este se instalará (Ciudad de Quito, azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional).
- Comparar y validar la simulación computacional con los resultados experimentales de las pruebas al desalinizador.
- De comprobar su validez y exactitud, emplear la simulación computacional para el análisis de modificaciones al desalinizador que mejoren su desempeño.

CAPÍTULO 1

EL AGUA

1.1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento primordial para la vida, sin ella es difícil concebir nuestra existencia. Para fortuna del hombre, la Tierra posee cantidades enormes de este líquido: un volumen aproximado de 1400 millones de kilómetros cúbicos cubre el 71 % de la superficie terrestre. Sin embargo, en algunos lugares es difícil conseguir una cantidad apta para su consumo.

Del agua dulce dependen la mayoría de seres vivos, incluido el ser humano. Sin embargo, el 97 % del agua en el planeta es salada y se encuentra en mares y océanos. Del 3 % restante (agua dulce), el 87 % corresponde a casquetes polares y glaciares, líquido profundo inaccesible o vapor atmosférico. Así, únicamente el 0.4 % del agua en la Tierra es asequible para su utilización.

Este reducido porcentaje es proporcionado de forma continua por la lluvia y la evaporación de los océanos, siendo el agua dulce un recurso renovable. No obstante, la cantidad de líquido que se puede extraer está limitado por su tasa de reposición en la naturaleza, es decir, no se puede utilizar más que lo circulante en el ecosistema.

Las lluvias en el planeta poseen una distribución muy irregular, en zonas con cuantiosas precipitaciones existe gran cantidad de vegetación; por el contrario, en lugares con lluvias escasas predominan los desiertos. Las personas deben recurrir a los mismos abastecimientos de agua para beber, regar los sembríos y surtir a las industrias, de esta manera se crea una división entre el fluido disponible para el hombre y el entorno natural. En regiones donde las precipitaciones son reducidas y la población humana crece rápidamente, la demanda por el líquido vital ejerce una presión significativa sobre la naturaleza. Igualmente, entre las personas se incrementan las discusiones y conflictos por la distribución de los recursos hídricos entre las zonas agrícolas, industriales y urbanas **[3]**.

Si el líquido disponible cae por debajo de los 1000 metros cúbicos por año (3400 litros por persona al día[1]) se estima que existirían serias limitaciones para la salud, producción de alimentos, desarrollo económico y protección del medio ambiente. En el año 1995, la escasez de agua era un peligro para al menos 80 países; conforme las poblaciones humanas crezcan, esta lista irá en aumento, los conflictos serán más comunes y la pobreza en las zonas afectadas se ampliará.

Para disfrutar de un futuro sustentable se debe administrar con mayor sabiduría los recursos hídricos, respetando y valorando a la naturaleza; sólo así se podrá garantizar un porvenir adecuado para el hombre y los demás seres vivos **[3]**.

1.2. RECURSOS DE AGUA, CALIDAD Y USO

1.2.1. RECURSOS HÍDRICOS

Los recursos hídricos agrupan casi la totalidad del agua en la Tierra: ríos, mares, océanos, lagos, humedad del suelo, líquido subterráneo, hielo glacial y vapor atmosférico. Estos pueden contener agua dulce o salina; no obstante, el aprovechamiento del agua salada es difícil, ya que habitualmente se deben extraer primero las sales, proceso costoso y que demanda gran cantidad de energía. Los recursos de agua dulce se dividen en reservas fijas no renovables y recursos renovables. Pese a esta división, se considera que toda el agua es renovable, la diferencia radica en que algunas fuentes no se renuevan en el transcurso de una generación humana. De esta forma, una fuente de agua dulce puede proveer indefinidamente las necesidades del hombre, si la rapidez de uso no supera la renovación **[18]**.

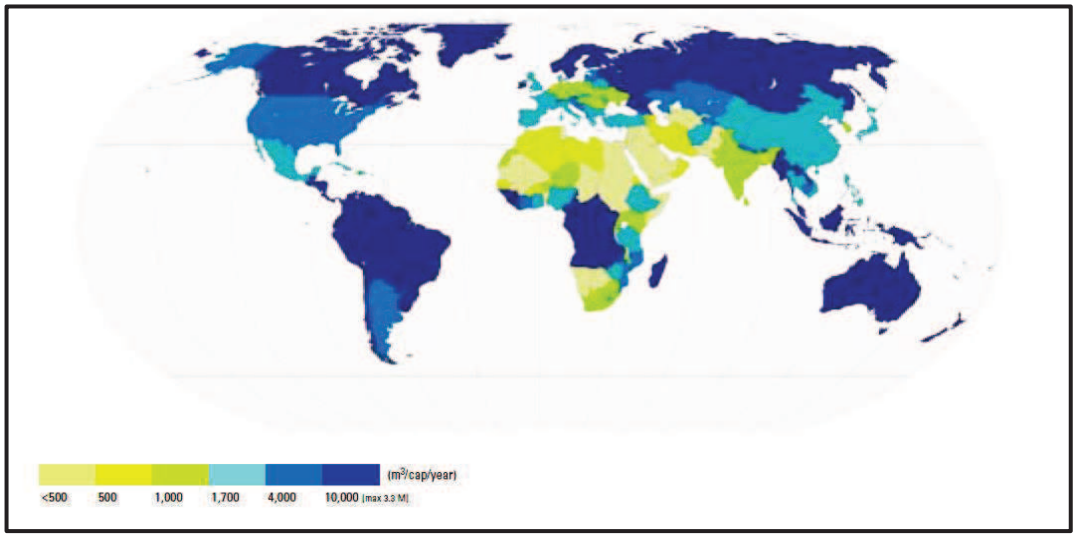
La escasez o por lo menos la disminución apreciable de líquido en muchos lugares, así como el detrimento de los ecosistemas en donde se obtiene son indicios de un problema que en la actualidad, debido al aumento de la población y del consumo per cápita de agua, se muestra más claro. Por ello, conocer en que se utiliza el agua es de gran ayuda al momento de encontrar las causas y posibles soluciones de estas dificultades **[7]**.

Se estimaba que en el año 2000, la escasez de agua afectaba a más de 2000 millones de personas en 40 países: 1100 millones no disponían de suficiente agua potable y 2400 millones no poseían servicios de saneamiento **[49]**.

[1] Los 3400 litros por persona al día indican el agua disponible, no la utilizada.

En la **Figura 1.1** se aprecia que los recursos hídricos son menos abundantes en el norte y sur de África, Medio Oriente, India y algunos países de Europa. En esta misma figura se observa que en el Ecuador existen grandes recursos de agua (≥10000 m^3/habitante/año), pero no se indica su distribución geográfica y temporal, que como se discutirá más adelante, es muy irregular.

Figura 1.1 Recursos hídricos renovables del mundo (m^3/habitante/año), 1995



Fuente: World Water Assessment Programme; "Water for People, Water for Life"; 2003 **[49]**

1.2.2. USO DEL AGUA

El agua se destina a tres áreas principales:

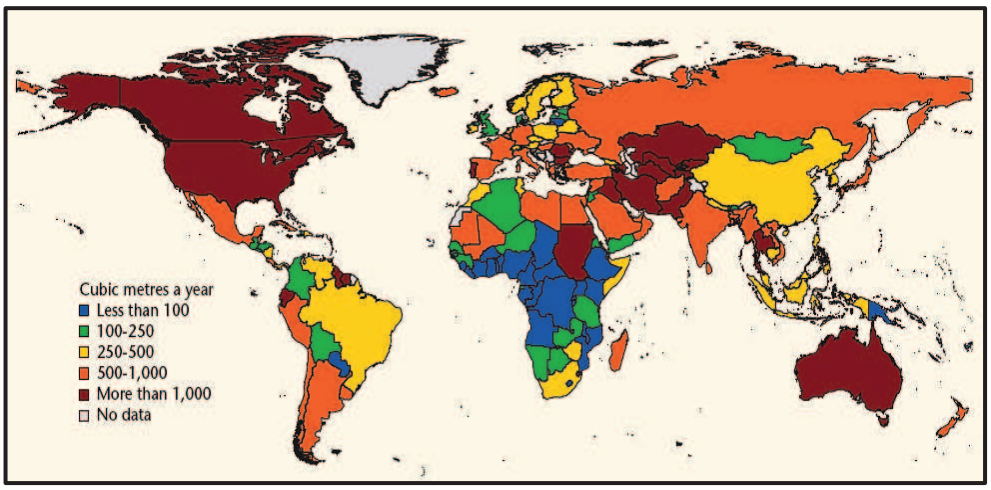
- Agricultura
- Industria
- Sector Doméstico

Las extracciones de agua para **irrigación** corresponden aproximadamente al 70 % de todas las que realiza el hombre, el 20 % se destina para fines **industriales** y el 10 % restante para usos **domésticos** (urbanos). Los 10 países que más agua utilizan (en volumen) son: India, China, los Estados Unidos, Pakistán, Japón, Tailandia, Indonesia, Bangladesh, México y la Federación Rusa. El uso anual puede oscilar entre 646 kilómetros cúbicos (India) a menos de 30 millones de metros cúbicos en algunos países tropicales de África **[50]**.

El volumen de agua extraída anualmente por habitante es un buen indicio del impacto de la población en los recursos hídricos. Puede variar de 20 metros cúbicos anuales por habitante en Uganda, a más de 5000 metros cúbicos en Turkmenistán, con una media mundial de 600 metros cúbicos. La extracción de agua es mayor en lugares áridos y semiáridos, donde se requiere mucha agua para la agricultura, y es menor en países tropicales **[50]**.

En la **Figura 1.2** se indica la extracción anual de agua por persona en el año 2000; resalta a la vista que el Ecuador se encuentra en el grupo de países que más agua consumen por persona, con una cifra mayor a 1000 metros cúbicos por año. Este dato es tal vez una alerta sobre el desperdicio de agua en el país.

Figura 1.2 Uso anual de agua por habitante en el mundo, 2000



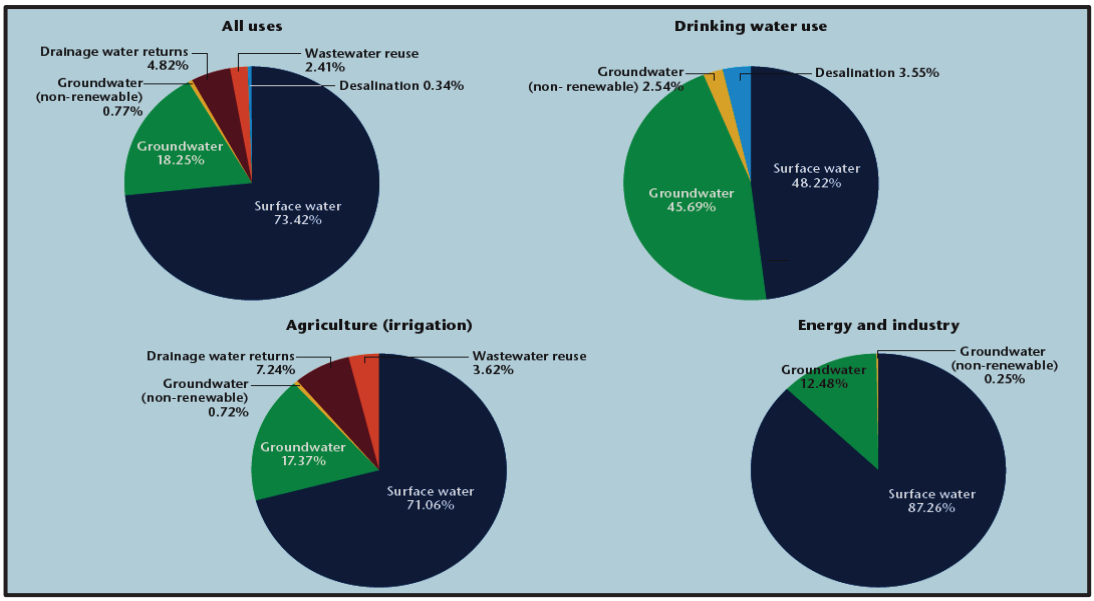
Fuente: World Water Assessment Programme; "Water in a Changing World"; 2009 **[50]**

Desde el punto de vista de la utilización del agua, el mundo puede dividirse en dos grupos. En el primero formado por países de África, la mayor parte de Asia, Oceanía, América latina y el Caribe, la agricultura es el principal destino del agua. En el otro conformado por regiones como Europa y Norteamérica, el uso de los recursos hídricos se relaciona más con la industria y la energía. En ambos grupos, el agua para uso doméstico (baño, bebida e higiene) se aprovecha en menor porcentaje **[50]**.

Aproximadamente el 99 % de los 4000 kilómetros cúbicos de agua utilizados cada año se extrae de fuentes renovables superficiales o subterráneas. Menos del 1%, correspondiente a unos 30 kilómetros cúbicos por año se derivan de acuíferos no renovables. Alrededor del 20 % de toda el agua utilizada en el mundo viene de fuentes subterráneas, cifra que está subiendo rápidamente, especialmente en lugares áridos. En zonas donde existe escasez de agua dulce se recurre hacia aguas salobres y residuales para suplir la demanda, a pesar de que estas fuentes corresponden a menos del 5 % del líquido utilizado (ver la **Figura 1.3**), podrían tener una potencialidad sustancialmente mayor **[50]**.

La **Figura 1.3** muestra el uso del agua en los sectores agrícolas, industriales, energéticos y domésticos (agua potable). La palabra wastewater significa agua de desecho y las palabras drainage water, agua de drenaje. De acuerdo a esta figura, la desalinización únicamente provee el 3.55 % de toda el agua potable consumida (drinking water). Posiblemente esto se deba al alto costo de los procesos de desalinización, que únicamente se implementan cuando no existen otras fuentes de agua disponibles.

Figura 1.3 Recursos Hídricos del mundo y su uso por sectores, 2000

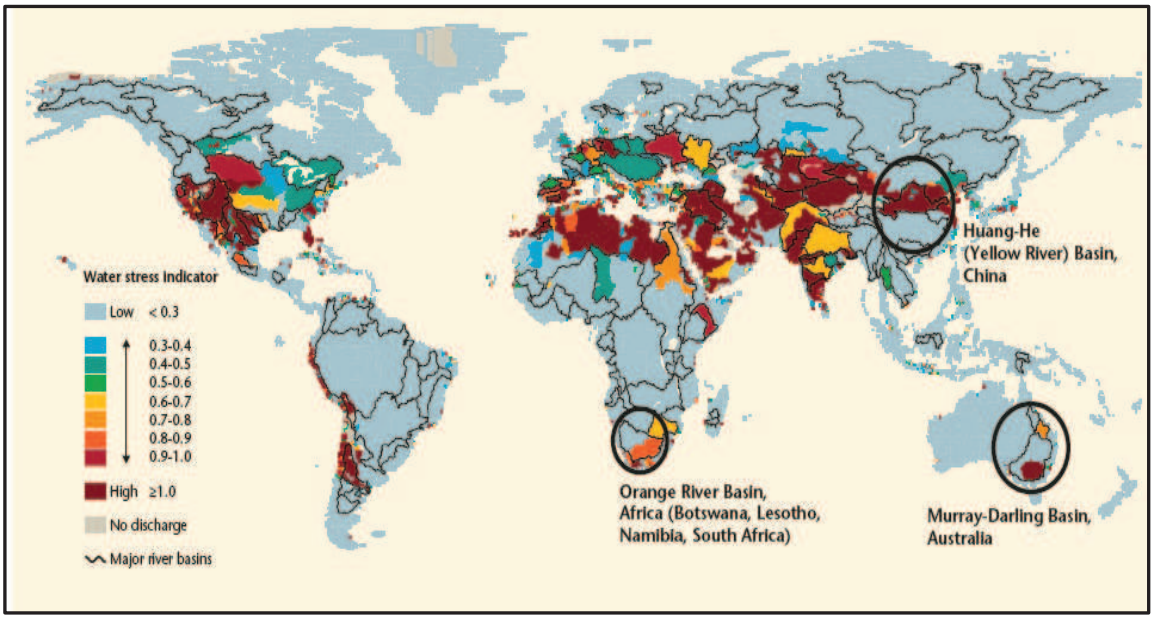


Fuente: World Water Assessment Programme; "Water in a Changing World"; 2009 **[50]**

El consumo de agua se ha incrementado de forma considerable en las últimas décadas. En muchos lugares, la escasez de agua y deterioro de sus fuentes representan un serio problema. La **Figura 1.4** indica el estrés hídrico en las cuencas de los ríos más importantes del mundo. Este es causado cuando se presenta un desbalance entre el consumo de agua y

los recursos hídricos. El indicador de estrés hídrico mide la relación entre las extracciones de agua y los recursos hídricos renovables **[50]**. En la figura se observa que el estrés es bajo en América del Sur, salvo en la costa del Pacífico, desde Chile hasta Ecuador.

Figura 1.4 Estrés Hídrico en las cuencas de los ríos más importantes, 2002



Fuente: World Water Assessment Programme; "Water in a Changing World"; 2009 **[50]**

1.2.3. CALIDAD DEL AGUA

El incremento de la contaminación del agua ha ido de la mano con el desarrollo de los asentamientos humanos. Al principio se tenía problemas con los desechos orgánicos y la salinización de los sistemas de riego. Hoy en día pueden sumarse a nuestras preocupaciones: los sólidos suspendidos, metales pesados, nitratos, microcontaminantes orgánicos, desperdicios radioactivos, acidificación de lagos y cursos de agua, eutrofización[2] de lagos y aguas costeras, etc.

Las fuentes más importantes de contaminación son: aguas negras domésticas, efluentes industriales y escorrentía del suelo agrícola; sin embargo, el lixiviado de basureros y desechos mineros, así como el depósito de contaminantes del aire sobre amplias superficies de agua son fuentes de contaminación que van en aumento **[18]**.

[2] Incremento de sustancias nutritivas en el agua dulce de lagos y embalses que provoca un exceso de fitoplancton

La mayoría de grandes ciudades en los países recién industrializados y en vías de desarrollo poseen ríos con altos niveles de contaminación, los mismos son un peligro para ecosistemas y zonas de riego río abajo. El principal problema de los países en vías de desarrollo consiste en que demasiadas personas no tienen acceso a suministros de agua potable y saneamiento adecuados. En un informe realizado en 1999 por la Organización Mundial de la Salud se estimaba que 3.4 millones de personas murieron en 1998 por causas relacionadas con la mala calidad del agua, de este número más de la mitad fueron niños.

A pesar de estas desagradables cifras, se puede destacar que desde 1980, el acceso a suministros de agua potable se ha incrementado como nunca antes. A escala mundial la creación de nuevos servicios de agua avanza incluso más rápido que el crecimiento de población. Desgraciadamente, las inversiones en saneamiento (alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas negras) no han ido de la mano con este avance, y se han retrasado respecto al aumento de la población **[7]**.

1.3. EL AGUA EN EL ECUADOR

1.3.1. CLIMA DEL ECUADOR

El clima es muy variado, teniendo una fuerte dependencia de las regiones naturales presentes en el país.

En la Costa existe entre diciembre y abril un único periodo lluvioso, y una estación seca muy marcada todo el resto del año. La temperatura media anual se encuentra entre los 24 y 25 ºC, con extremos que escasamente superan los 38 ºC o descienden a menos de 13 ºC. Las lluvias aumentan de Oeste a Este, teniéndose ciertas irregularidades por el relieve local. En la punta de la provincia de Santa Elena (Salinas) y el cabo de San Lorenzo (suroeste de Manta) se dan los valores mínimos de precipitación, inferiores a 200 milímetros anuales. A una altura comprendida entre los 1000 y 1200 metros, las lluvias alcanzan sus máximos valores, superiores a 3000 milímetros anuales (noroeste de Esmeraldas) **[36]**.

La Sierra por influencia de masas de aire oceánico y amazónico tiene dos estaciones lluviosas, una de febrero a mayo y otra de octubre a noviembre. Existen dos estaciones secas, la primera muy marcada se extiende desde junio a septiembre, la segunda menos notoria (veranillo del Niño) se presenta habitualmente en diciembre. La temperatura media anual fluctúa entre los 10 y 18 ºC. Conforme se incrementa la altitud, la temperatura

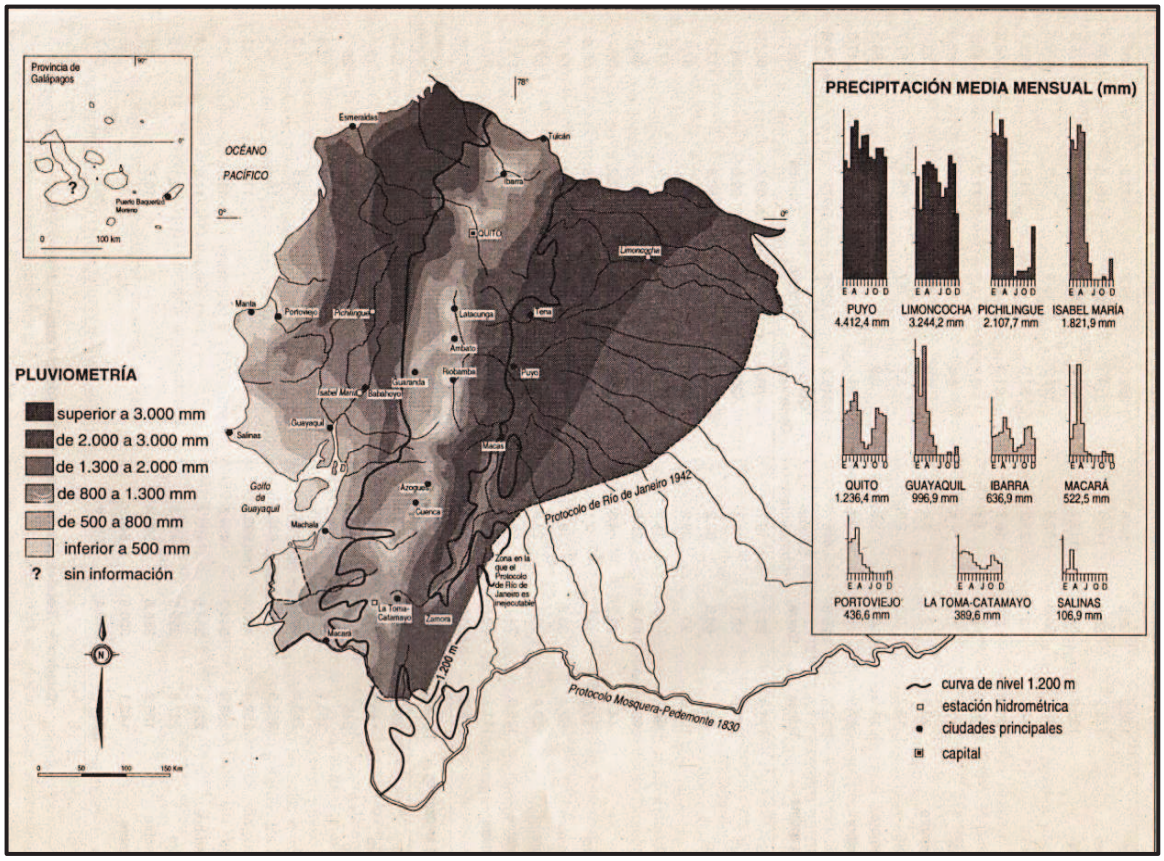
desciende entre 5 y 6 ºC cada mil metros; arriba de los 4500 metros de altura las cumbres permanecen nevadas. Debido a que las nubes descargan parte de su humedad en las vertientes exteriores de la cordillera, las precipitaciones no son muy grandes, oscilando entre los 800 y 1500 milímetros anuales. No obstante, estos valores pueden ser muy inferiores en las cuencas interandinas cálidas, como el valle del Chota, donde las precipitaciones anuales bordean los 300 milímetros. Arriba de los 3500 metros de altura la neblina es usual, presentándose lluvias prolongadas de baja intensidad **[36] [6]**.

El Oriente se caracteriza por una elevada temperatura media, próxima a los 25 ºC, y por precipitaciones que generalmente superan los 3000 milímetros anuales; incluso en ciertos lugares pueden sobrepasar los 6000 milímetros (volcán Reventador). La distribución de las lluvias es regular durante todo el año, sin embargo, existe un máximo de precipitaciones entre julio y agosto, y una pequeña reducción entre diciembre y febrero. El cielo esta usualmente nublado, la vegetación es selvática y la humedad supera el 90 % **[36]**.

En la región Insular se exhibe una diferencia entre el clima de las zonas litorales bajas y el de las zonas altas. En las primeras de clima muy seco se presentan dos estaciones de tres meses cada una, en las que se tiene un aumento relativo de las precipitaciones; la inicial centrada en febrero y la segunda entre junio y septiembre. En los suelos altos las lluvias son más abundantes, usualmente con un periodo más húmedo entre noviembre y febrero. La temperatura media anual se ubica entre los 24 y 26 ºC, con extremos que rara vez superan los 36 ºC o descienden a menos de 14 ºC **[36] [6]**.

De acuerdo a la **Figura 1.5**, los valores más bajos de precipitación en la Costa, todos menores a 500 milímetros al año se presentan en: el suroeste de Manabí, la provincia de Santa Elena y la isla Puná. Las escasas lluvias de estos lugares favorecen la implementación de la desalinización solar.

Figura 1.5 Pluviometría anual en el Ecuador



Fuente: Pourrut; "El Agua en el Ecuador"; 1995 **[36]**

1.3.2. RECURSOS HÍDRICOS DEL ECUADOR

El Ecuador tiene una precipitación promedio de 1200 milímetros al año, a pesar de esta elevada pluviosidad, su distribución es muy irregular, algunos lugares reciben sólo 250 milímetros al año y otros más de 6000 milímetros. El Ecuador cuenta en épocas de invierno con 430000 millones de metros cúbicos de agua al año, cifra que se reduce en épocas de verano a 146000 millones de metros cúbicos anuales. Esta disponibilidad de agua es tanto de cauces superficiales como subterráneos, siendo la distribución de los recursos hídricos muy irregulares en el tiempo y el espacio.

La mayoría de la población se asienta en las zonas montañosas y la cuenca del Guayas. En contraste, el 80 % de las fuentes de agua se sitúan en la escasamente poblada región Amazónica. En 1997 las extracciones de agua fueron: 13929 millones de metros cúbicos al año para el sector agrícola (82 % del volumen total), 2100 millones de metros cúbicos al año destinados al sector doméstico (12.3 % del total) y 956 millones de metros cúbicos al año dirigidos al área industrial (5.6 % del total) **[46] [6]**.

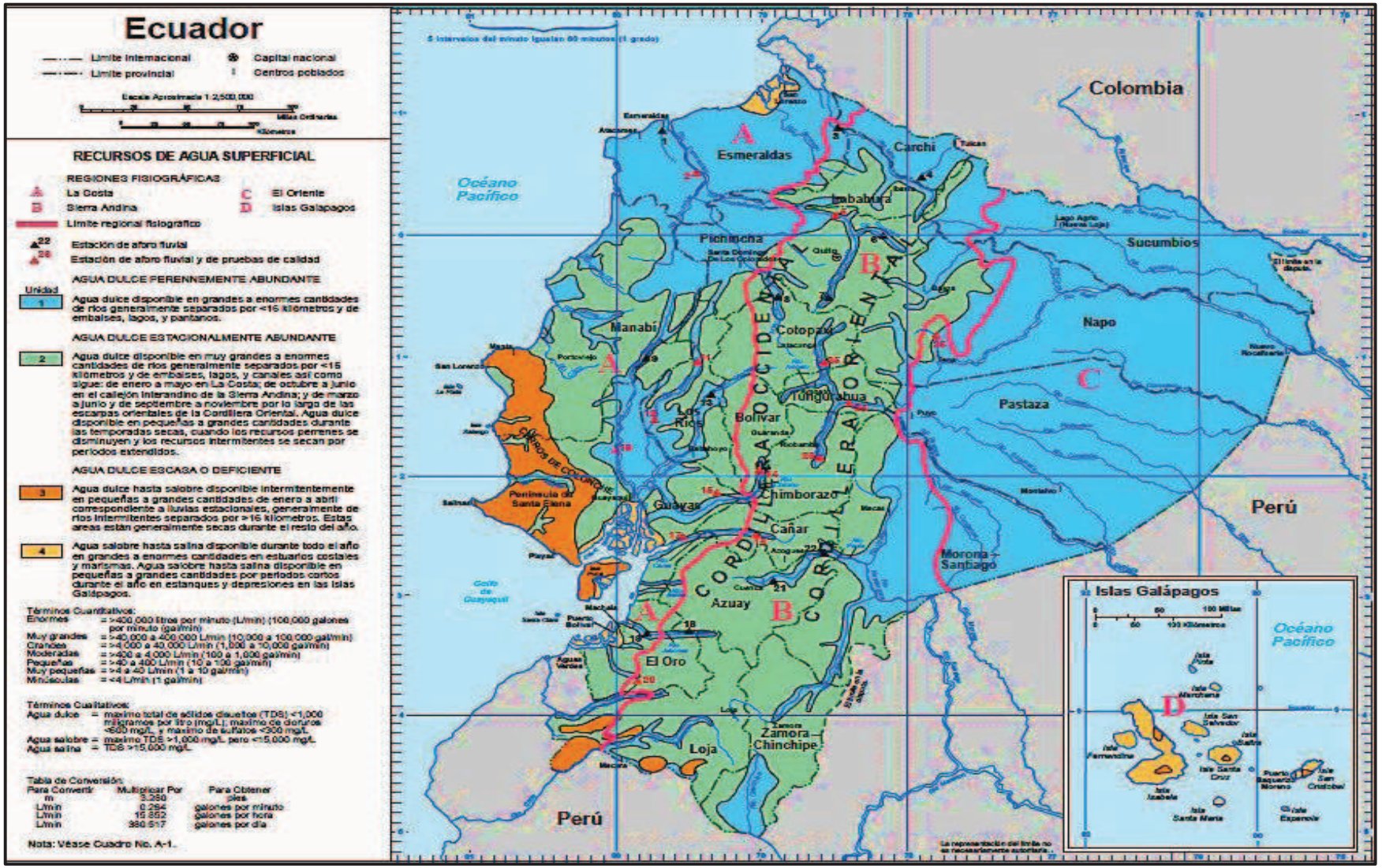
La mayor parte del agua destinada al uso doméstico proviene de fuentes superficiales. Las grandes áreas urbanas tienen en general buenos sistemas de abastecimiento. La realidad es otra en las zonas rurales, especialmente en la costa y los lugares golpeados por la sequía (provincias de El Oro, Manabí y Loja).

Como ya se mencionó, para la irrigación se destina el 97 % del agua utilizada. La demanda de agua para la agricultura crece cada año, fundamentalmente en la Sierra y en las secas planicies costeras. El agua superficial es la fuente principal para la irrigación, actividad que generalmente se realiza con canales abiertos, desperdiciándose hasta un 90 % del líquido. Estas prácticas agrícolas han llevado a la erosión de valiosas tierras de cultivo, disminución de la vegetación y contaminación de acuíferos.

El agua subterránea se emplea principalmente en el sector doméstico, siendo el área rural donde posee mayor importancia, ya que puede superar al agua superficial en porcentaje de uso. El agua subterránea está disponible en la mayor parte del Ecuador, pero su distribución y aprovechamiento son disparejos. Los pozos poco profundos posiblemente están contaminados química o biológicamente, particularmente en las cercanías a poblaciones y zonas agrícolas **[46] [6]**.

En la **Figura 1.6** se presenta un mapa de los recursos hídricos superficiales del Ecuador. En el mismo se explican la cantidad, distribución en el tiempo y tipo de agua disponible (dulce, salina y salobre) a lo largo del país. Es fácil notar que los sitios con agua dulce escasa o deficiente se sitúan primordialmente en la provincia de Santa Elena, el suroeste de la provincia de Manabí y las islas Galápagos. Estos lugares son buenos candidatos para implementar la desalinización solar; Galápagos en particular presenta condiciones muy favorables para el desarrollo de esta tecnología, ya que tiene altos niveles de radiación solar y se encuentra aislada geográficamente.

Figura 1.6 Recursos de agua superficial del Ecuador



Fuente: United States Southern Command; "Evaluación de los Recursos de Agua del Ecuador"; 1998 **[46]**

1.3.3. CALIDAD DEL AGUA EN EL ECUADOR

Un estudio en el año 2000 estableció que el 30 % de las cuencas hidrográficas del Ecuador estaban contaminadas con biocidas, esto representa el 37 % de la superficie total del país. Las principales fuentes de contaminación son las industrias minera y petrolera. Un monitoreo ambiental elaborado en 1996 reveló la presencia de grandes cantidades de sustancias tóxicas en los ríos que drenan los sectores mineros de las provincias de Azuay y el Oro. Asimismo, la explotación petrolera tiene un impacto negativo sobre la cuenca de los ríos Napo, Pastaza y Zamora. En la Costa y Sierra, el agua de riego está contaminada con plaguicidas; lamentablemente no se tienen estudios que permitan relacionar este problema con la calidad de los productos agrícolas. La contaminación del agua superficial por medio de fuentes domésticas es común en todo el país, especialmente en zonas altamente pobladas.

Se puede considerar que la contaminación del agua es mayor en: el golfo de Guayaquil incluidos los ríos Daule y Babahoyo; la cuenca del río Portoviejo y la parte baja de los ríos Chone, Esmeraldas, Santiago y Cayapas; cuenca de los ríos Pindo, Chico y Puyango; en la Amazonía, la cuenca de los ríos Napo, Pastaza y Zamora; en la Sierra, zonas cercanas a las ciudades de Quito, Ambato, Cuenca, Loja e Ibarra **[6]**.

Los peligros más comunes y extendidos para la salud, relacionados con la calidad del agua de consumo son las enfermedades infecciosas provocadas por agentes patógenos como bacterias, virus, protozoos y helmintos **[35]**. Las enfermedades infecciosas intestinales son una de las principales causas de morbilidad en el Ecuador, con 55498 casos en el año 2007 **[19]**.

En el **Anexo II** se encuentra un fragmento de la norma INEN 1108 para el agua potable en el Ecuador (Requisitos microbiológicos).

1.3.4. AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO

Hasta el año 2006 se estimaba que la cobertura para los servicios de agua potable y entubada llegaba al 67 % de los hogares ecuatorianos, de este porcentaje, el 82 % corresponde al sector urbano y el 39 % al sector rural. Los sistemas de abastecimiento de agua son más de 2530, de estos, más de 2000 pertenecen a comunidades con una población inferior a mil habitantes **[6]**.

El servicio de agua potable es regular o malo en el 54 % de los casos, siendo el racionamiento de agua una realidad en el 49 % de los cantones. Además, el agua no se aprovecha de forma correcta, pues las pérdidas de agua son muy grandes en las líneas de distribución **[6]**.

En la **Tabla 1.1** se presenta la cobertura de agua potable en el Ecuador desde 1980 hasta el año 2001.

Tabla 1.1 Cobertura de agua potable en el Ecuador

Agua potable									
AÑO	Total Nacional			Areas Urbanas			Areas Rurales		
	Población en miles		Cobertura	Población en miles		Cobertura	Población en miles		Cobertura
	Total	Servida	(%)	Total	Servida	(%)	Total	Servida	(%)
1980	8,123.0	3,881.0	47.8%	3,825.0	3,021.0	79.0%	4,298.0	860.0	20.0%
1990	10,264.2	6,251.0	60.9%	5,683.0	4,450.0	78.3%	4,581.0	1,800.0	39.3%
2001	12,479.9	7,913.0	63.4%	7,633.0	6,115.0	80.1%	4,846.0	1,797.0	37.1%

Fuente: Centro del Agua para América Latina y el Caribe; "Recursos Hídricos-Ecuador 2010"; 2010 **[6]**

Respecto al saneamiento (alcantarillado sanitario y tratamiento de aguas negras), si miramos la **Tabla 1.2**, el servicio de alcantarillado mediante red colectora o fosas séptica benefició hasta el año 2001 al 50.7 % de la población; esto evidencia que la inversión en saneamiento no va de la mano con la cobertura de agua potable.

Tabla 1.2 Saneamiento en el Ecuador

Saneamiento									
AÑO	Total Nacional			Areas Urbanas			Areas Rurales		
	Población en miles		Cobertura	Población en miles		Cobertura	Población en miles		Cobertura
	Total	Servida	(%)	Total	Servida	(%)	Total	Servida	(%)
1980	8,123.0	3,531.0	43.5%	3,825.0	2,800.0	73.2%	4,298.0	731.0	17.0%
1990	10,264.2	5,398.0	52.6%	5,683.0	3,967.0	69.8%	4,581.0	1,429.0	31.2%
2001	12,479.9	6,330.0	50.7%	7,633.0	4,702.0	61.6%	4,846.0	1,627.0	33.6%

Fuente: Centro del Agua para América Latina y el Caribe; "Recursos Hídricos-Ecuador 2010"; 2010 **[6]**

1.4. PURIFICACIÓN DEL AGUA

El agua contaminada es aquella que posee uno o más elementos que la pueden hacer indeseable para su consumo. Su purificación consiste en la eliminación de todos o algunos de esos elementos, el proceso de purificación puede efectuarse con un soló método o la conjunción de varios. A continuación se exponen los métodos más utilizados **[3]**:

1. **Sedimentación**. Al permitir el reposo del agua por un tiempo apropiado se asientan los materiales sólidos, disponiéndose de agua clara en la parte superior. Si se añade al agua sulfato de aluminio, la carga positiva de los iones de aluminio atraerá a la arcilla y otras partículas de carga negativa. Formándose aglomeraciones conocidas como flóculos, que aceleran el proceso de sedimentación
2. **Filtración**. Consiste en el movimiento de agua a través de un cuerpo o material poroso. Cualquier sólido de tamaño inferior a los poros, será removido del agua al quedar atrapado en el lecho poroso.
3. **Adsorción**. Algunos materiales denominados adsorbentes tienen la capacidad de atrapar y retener sustancias en su superficie a través de fuerzas interfaciales. Si por estos materiales se hace circular agua, algunos contaminantes serán retenidos. El carbón activado se usa para eliminar contaminantes orgánicos del agua y el aire.
4. **Oxidación biológica**. Residuos orgánicos (detritos) son consumidos y degradados por organismos denominados saprofitos. Los residuos se descomponen mediante la respiración celular y después son removidos. Al depositar agua en sistemas donde proliferan estos organismos es posible eliminar la materia orgánica del agua contaminada.
5. **Destilación**. En la destilación se evapora agua, para después condensarla y recolectar el destilado. Durante este proceso, el vapor deja detrás impurezas suspendidas y disueltas, condensándose como agua pura.
6. **Desinfección**. Sustancia químicas como el cloro se añaden al agua para exterminar los agentes patógenos

A excepción de la desinfección, la naturaleza a través del ciclo del agua realiza todos estos procesos de purificación. Al asentarse el agua en estanques, lagos y océanos se produce la sedimentación. El agua se filtra cuando escurre por el suelo y rocas porosas. El humus y el suelo son buenos adsorbentes químicos. La oxidación biológica en ríos y arroyos retira los detritos. Asimismo, el sol evapora el agua de mares y océanos, regresando más tarde a la superficie terrestre en forma de lluvia **[3]**.

1.5. DESALINIZACIÓN DEL AGUA

1.5.1. CLASIFICACIÓN DEL AGUA POR SU SALINIDAD

Al agua se la puede clasificar por la cantidad total de sólidos disueltos (TSD) que posee, medidos en gramos por litro. El TDS se evalúa también en partes por millón (ppm), donde 10 ppm es igual a 0.01 gramos por litro **[45]**. Según el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), el agua por su salinidad se puede dividir en:

- Agua dulce – Menos de 1000 ppm (0.1 % de sales disueltas)
- Agua ligeramente salina – De 1000 a 3000 ppm (0.1 a 0.3 % de sales disueltas)
- Agua moderadamente salina – De 3000 a 10000 ppm (0.3 a 1 % de sales disueltas)
- Agua altamente salina – De 10000 a 35000 ppm (1 a 3.5 % de sales disueltas)

Quizás una clasificación más útil se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1.3 Clasificación del agua por su salinidad

Tipo de agua	Total de sólidos disueltos (TDS)
Agua dulce	< 1000 ppm (0.1 %)
Agua salobre	1000 – 30000 ppm (0.1– 3 %)
Agua de mar	> 30000 ppm (> 3 %)

Fuente: Tiwari G. y Tiwari A.; "Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems"; 2008 **[45]**

1.5.2. COMPOSICIÓN DEL AGUA DE MAR

Los principales iones presentes en el agua de mar son Na^{+}, Ca^{++}, K^{+}, Mg^{++}, $(SO_4)^{2-}$ y Cl^{-}; sin duda todos los demás iones encontrados en la naturaleza están presentes en el agua, pero a una concentración mucho menor. La composición química del agua en mar abierto es constante, sin embargo, la cantidad total de solidos disueltos cambia de acuerdo a las condiciones locales. Este fenómeno se debe a que el tiempo necesario para alcanzar la mezcla completa de océanos y mares es mucho menor al tiempo requerido para remplazar el agua existente a través del ciclo natural **[12]**.

La **Tabla 1.4** muestra la composición típica del agua de mar, la cual en promedio tiene una salinidad de 36000 ppm (3.6 %). En adición a los iones presentes en el agua de mar, esta posee una gran variedad de materia suspendida; que incluye arena, arcilla, microorganismos y materia coloidal **[12]**.

Tabla 1.4 Composición típica del agua de mar con una salinidad de 36000 ppm

Compuesto	Composición	Porcentaje	ppm
Cloro	Cl^-	55.03	19810.8
Sodio	Na^+	30.61	11019.6
Sulfato	$(SO_4)^{2-}$	7.68	2764.8
Magnesio	Mg^{++}	3.69	1328.4
Calcio	Ca^{++}	1.16	417.6
Potasio	K^+	1.16	417.6
Ácido carbónico	$(CO_3)^{2-}$	0.41	147.6
Bromo	Br^-	0.19	68.4
Ácido bórico	$H_3BO_3^-$	0.07	25.2
Estroncio	Sr^{++}	0.04	14.4
Total		**100**	**36000**

Fuente: elaborado a partir de El-Dessouky y Ettouney; "Fundamentals of Salt Water Desalination"; 2002 **[12]**

1.5.3. TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA DESALINIZACIÓN DEL AGUA

La desalinización del agua salina subterránea, agua salobre y agua de mar es una de las opciones que tiene el hombre para aumentar sus recursos hídricos. La destilación de agua salada para obtener agua dulce ha sido conocida y estudiada durante muchos siglos por civilizaciones del Mediterráneo y Cercano Oriente. No obstante, el progreso en el desarrollo moderno de la desalinización empezó en los años 60; construyéndose en la década de los 70, las primeras plantas en países del Golfo Pérsico **[14]**.

Dos tecnologías para la desalinización son las más utilizadas en el mundo, una emplea procesos térmicos y la otra hace uso de membranas. Los procesos térmicos, a excepción de la congelación, emulan la generación de lluvias en el ciclo del agua; cuando el agua salina es calentada se produce vapor, luego este se condensa y recoge, obteniéndose agua dulce por destilación. Los procesos térmicos incluyen la Evaporación súbita multietapa

(MSF, por sus siglas en inglés), la Destilación multiefecto (MED, por sus siglas en inglés), la Destilación por compresión de vapor (CV) y la Destilación solar. En los procesos térmicos, el vapor condensado suministra el calor latente necesario para evaporar el agua. En el caso de la destilación solar, la reutilización del calor latente de vaporización puede o no emplearse.

Las tecnologías térmicas demandan una gran cantidad de energía, por ello normalmente se utilizan para desalinizar agua de mar en conjunción con plantas de energía. Adicionalmente, los procesos térmicos pueden suministrar agua de alta pureza, sin requerir de un sofisticado tratamiento previo; siendo insensibles a la contaminación del agua por aceites y materia orgánica. Las tecnologías de membrana incluyen la ósmosis inversa (OI) y la electrodiálisis (ED). La OI se destina para la desalinización de agua salobre y de mar, y la ED se aprovecha generalmente para el tratamiento de agua salobre **[14]**. A continuación se explican las características generales de los procesos térmicos y de membranas.

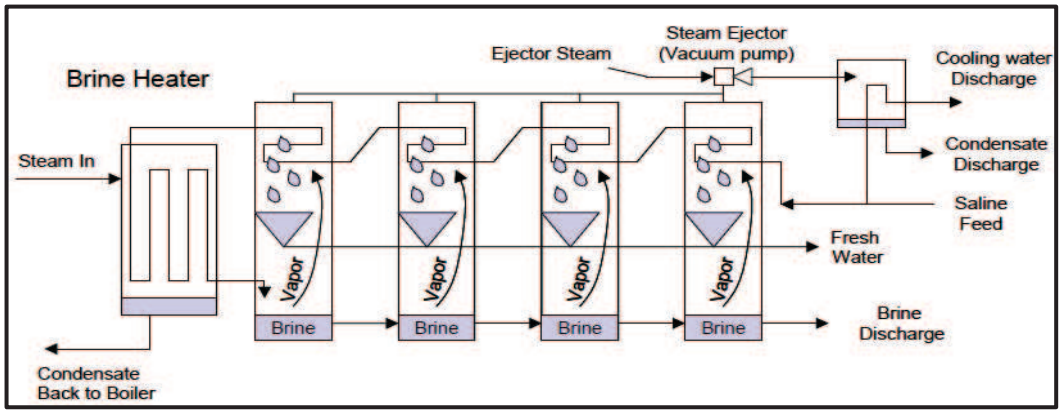
1.5.3.1. Procesos Térmicos para la desalinización del agua

a) Evaporación Súbita Multietapa (MSF)

En la MSF, agua salina caliente se evapora bruscamente, condensándose después libre de impurezas; esto ocurre de forma secuencial a lo largo de muchos compartimentos (ver la **Figura 1.7**). Para aumentar la producción de agua y posibilitar la evaporación súbita, cada compartimiento opera sucesivamente a una presión menor. Como resultado, la presión y temperatura en cada depósito son inferiores a las del compartimiento precedente. Esta condición permite que el fenómeno de evaporación se prolongue en las demás etapas sin suministro adicional de calor. En cada paso del proceso, el calor de condensación se recupera para precalentar el agua salina de alimentación.

Una característica importante de la MSF es la formación de vapor dentro de la masa del líquido, mejora notable en relación a los primeros métodos, que consistían en calentar el agua salada por medio de tubos sumergidos. Las incrustaciones de sales se formaban rápidamente en la superficie exterior de estos tubos, sitio donde se originaba el vapor; dificultándose la transferencia de calor y haciendo necesaria una frecuente labor de limpieza **[12] [22]**.

Figura 1.7 Esquema del proceso de desalinización MSF



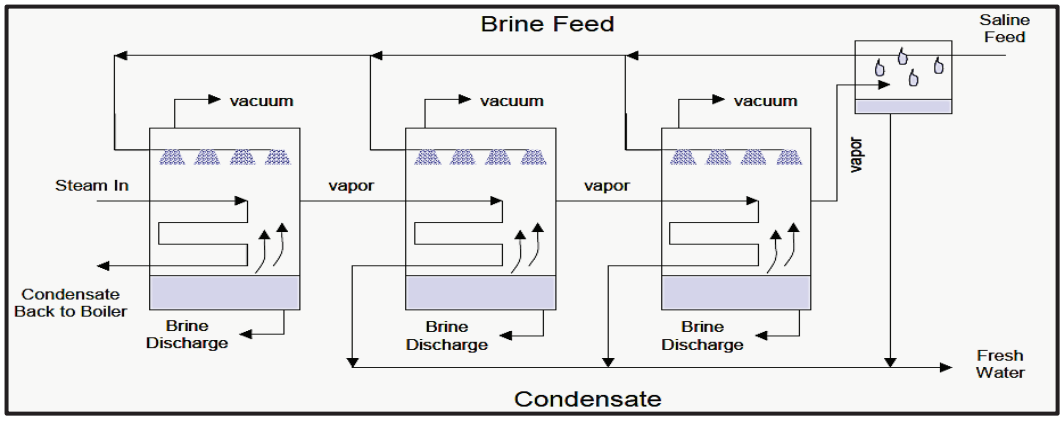
Fuente: Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies; 2003 **[22]**

b) Destilación Multiefecto (MED)

En la Destilación multiefecto, el agua salina circula por una serie de etapas o depósitos. Se suministra calor al agua del primer depósito, generándose vapor que se condensa en el siguiente compartimiento, cediendo su calor para evaporar más agua. La reutilización del calor latente de condensación consigue reducir la cantidad de salmuera eliminada al final de proceso, así como la energía rechazada al medio ambiente, principal problema de los sistemas de un solo efecto. Al igual que en la tecnología MSF, cada etapa trabaja sucesivamente a una presión menor, esto mejora el rendimiento y permite configurar la planta para elevadas temperaturas (> 90 ºC) o bajas temperaturas (< 90 ºC) de operación. La máxima temperatura de ebullición en las plantas de baja temperatura, puede descender hasta los 55 ºC, condición que disminuye la corrosión y formación de incrustaciones; facilitando además, el aprovechamiento del calor desechado a temperaturas reducidas.

El sistema MED fue desarrollado de manera temprana, instalándose las primeras plantas en los años 50. Sin embargo, por problemas relacionados con el depósito de incrustaciones en los tubos de transferencia de calor, el proceso perdió popularidad y fue remplazado por la tecnología MSF. El mejor rendimiento térmico de la Destilación multiefecto en relación al método MSF, conjuntamente con los avances en materia de control y eliminación de incrustaciones, han renovado en la actualidad el interés por el procedimiento MED **[22]**.

Figura 1.8 Esquema del proceso de desalinización por Destilación Multiefecto



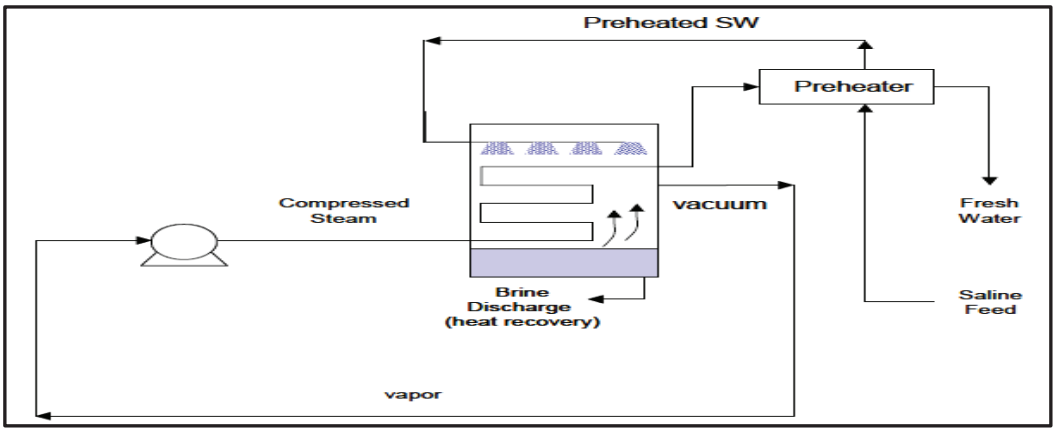
Fuente: Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies; 2003 **[22]**

c) Destilación por compresión de vapor (CV)

En este proceso, la compresión de vapor suministra el calor necesario para evaporar el agua salina. Debido a que la compresión de vapor involucra un incremento de presión y temperatura, es posible condensar el vapor de alta presión y ceder su calor latente para evaporar más agua. El procedimiento es como sigue: se rocía agua salina dentro del evaporador, el vapor generado se succiona y comprime, para luego condensarse en un conjunto de tubos dispuestos en el evaporador, transfiriendo su calor de condensación al agua salina.

La compresión del vapor se puede realizar por medio de un compresor mecánico (Compresión mecánica de vapor, MVC, por sus siglas en inglés), o con un eyector de vapor (Compresión térmica de vapor, TVC, por sus siglas en inglés). Los procesos de compresión de vapor son útiles, especialmente en instalaciones pequeñas y de mediana capacidad. Los sistemas MVC tienen generalmente una sola etapa o efecto, mientras que los sistemas TVC se construyen con muchas etapas. Esta diferencia se debe a que la tecnología MVC posee el mismo consumo específico de energía (energía/unidad de agua producida), sin importar el número de efectos; en contraste, la eficiencia térmica de los sistemas TVC aumenta cuando se adicionan etapas **[12] [22]**.

Figura 1.9 Esquema del proceso de desalinización por Compresión de Vapor

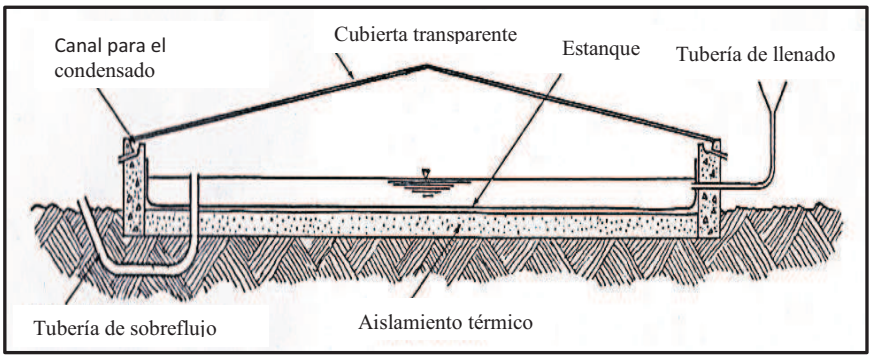


Fuente: Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies; 2003 **[22]**

d) Destilación Solar

En este proceso la energía del sol es aprovechada para evaporar agua salina y condensarla como agua pura. Una aplicación común de esta tecnología es el destilador solar de estanque, aparato muy simple y confiable, cuyo esquema se indica en la **Figura 1.10**. Este posee un estanque de agua salina de poca profundidad, sobre el que se dispone una cubierta transparente de vidrio o plástico. La cubierta está inclinada y bajo su extremo inferior se extiende un canal de recolección. El proceso emula el ciclo del agua, la cubierta permite el paso de la radiación solar, que después es absorbida por el agua y el fondo del estanque, provocando el calentamiento y evaporación del agua. El vapor asciende y se condensa en la superficie interior de la cubierta, desde allí se desliza hasta caer en el canal, que lo lleva fuera del destilador **[39]**.

Figura 1.10 Esquema de un destilador solar de estanque



Fuente: Sayigh; "Solar Energy Engineering"; 1977 **[39]**

1.5.3.2. Procesos de Membrana para la desalinización del agua

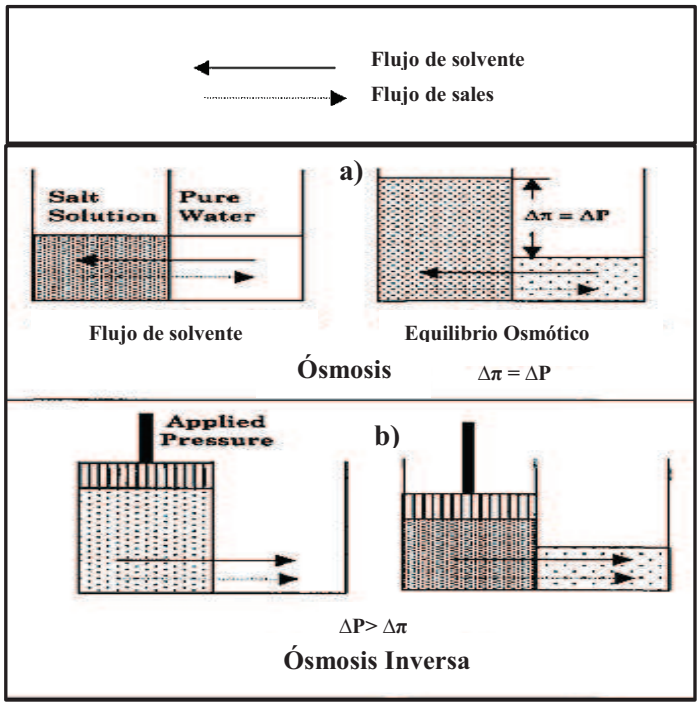
a) Ósmosis Inversa (OI)

El paso de un disolvente a través de una membrana semipermeable, desde una disolución de baja concentración hacia una de alta concentración se denomina ósmosis. Este fenómeno se puede evitar aplicando una cierta presión a la disolución (**Figura 1.11**). La presión externa, P, que es exactamente la necesaria para impedir la ósmosis se conoce como presión osmótica de la disolución, π. Si P es menor que π, se produce la ósmosis de forma normal (**Figura 1.11a**). Si la presión externa es lo suficientemente alta, el proceso puede invertirse (**Figura 1.11b**). Cuando $P > \pi$, las moléculas de agua atraviesan la membrana desde la disolución hacia el agua pura, proceso llamado ósmosis inversa **[47]**.

En la tecnología de Ósmosis inversa se ejerce presión sobre el agua salina, forzando su paso a través de una membrana semipermeable que retiene las sales disueltas. La energía consumida en la OI se destina principalmente a la presurización del agua. Debido a que la presión osmótica y por ende la presión necesaria para efectuar el proceso, dependen de la concentración de sales, la OI es el método a elegirse para el tratamiento de agua salobre, donde sólo bajas o intermedias presiones son requeridas. La presión de operación en los sistemas de desalinización de agua salobre fluctúa entre los 15 a 25 bares, y entre los 54 a 80 bares para los sistemas que trabajan con agua de mar (la presión osmótica del agua de mar es de aproximadamente 25 bares.).

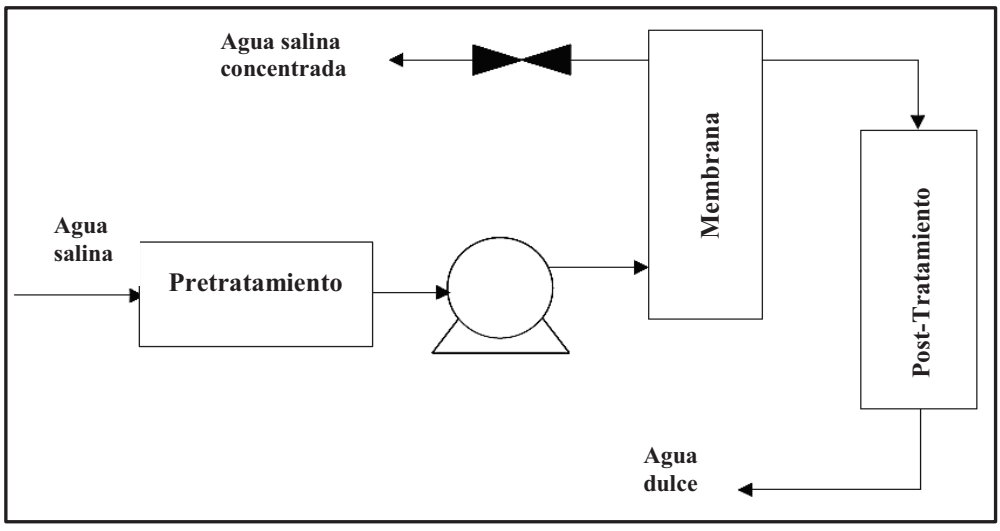
Las membranas deben mantenerse limpias para su correcto funcionamiento, por tal motivo, el pretratamiento del agua salina, que incluye la filtración y adición de químicos es un factor importante que puede influenciar de forma significativa en los costos del proceso. Los tratamientos que posteriormente se dan al agua desalinizada, pueden comprender la remoción de gases disueltos (CO_2) y la estabilización del pH con sales de sodio o calcio **[22]**.

Figura 1.11 Ósmosis y Ósmosis Inversa



Fuente: El-Dessouky y Ettouney; "Fundamentals of Salt Water Desalination"; 2002 **[12]**

Figura 1.12 Proceso de desalinización por Ósmosis Inversa

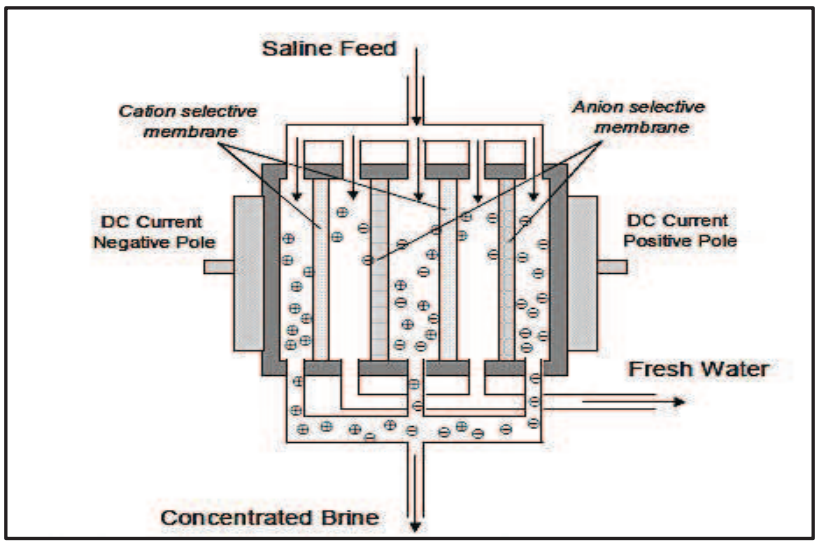


Fuente: Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies; 2003 **[22]**

b) Electrodiálisis (ED)

En la Electrodiálisis, el agua salina es colocada en una serie de canales, separados entre sí por membranas ion-selectivas. A un lado de cada canal se sitúa una membrana que deja pasar los iones negativos (anión-selectiva) y en el lado opuesto una membrana que permite el paso de iones positivos (catión-selectiva). Al aplicar un campo eléctrico al arreglo de canales, los iones disueltos abandonan el agua atravesando las membranas. La ED presenta un inconveniente, pues únicamente permite separar del agua sustancias con carga eléctrica, esta limitación no está presente en la OI y la destilación. Al igual que en la OI, la energía necesaria para el proceso aumenta con la concentración de sales, en consecuencia, la Electrodiálisis se restringe comúnmente al tratamiento de aguas salobres **[22]**.

Figura 1.13 Proceso de desalinización por Electrodiálisis



Fuente: Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies; 2003 **[22]**

CAPÍTULO 2

ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

2.1. INTRODUCCIÓN

En el transcurso de un año, la Tierra recibe del Sol una enorme cantidad de energía, equivalente a 5.445×10^{24} J. El consumo energético mundial en 1970 fue de 2×10^{20} J, cifra menor al 0.004 % de la energía proveniente del Sol. Sin embargo, esta última se encuentra fina e irregularmente distribuida sobre la superficie terrestre. Situación, que sumada a los altos costos de los sistemas solares de conversión de energía, retrasaron su aprovechamiento, dando paso al uso indiscriminado de combustibles fósiles. En las últimas décadas, gracias a una mayor conciencia ecológica y al aumento en el precio de los combustibles, se ha renovado el interés por la energía solar y sus aplicaciones **[39]**.

2.2. LA CONSTANTE SOLAR

La cantidad de radiación solar recibida por unidad de tiempo y área, a la distancia media entre el Sol y la Tierra, sobre una superficie perpendicular a los rayos solares es llamada constante solar; su valor en el espacio exterior es de 1353 (W/m^2) **[1]**. Una gran parte de esta radiación es reflejada, dispersada o absorbida por la atmósfera. Por tal motivo, la cantidad de radiación solar que llega a la superficie terrestre varía entre 0 y 1046 (W/m^2) **[13]**.

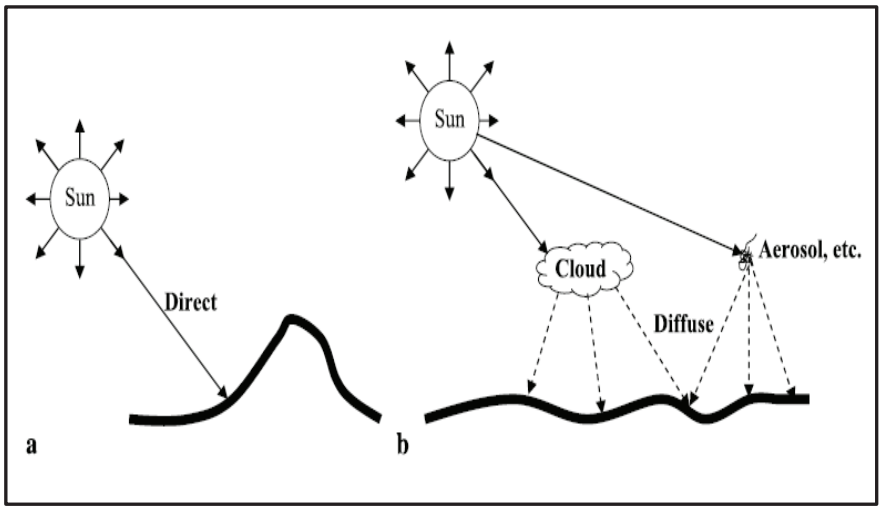
2.3. DEFINICIONES IMPORTANTES

A continuación se describen algunas definiciones importantes en el estudio de la radiación solar:

Radiación Directa. La radiación solar que llega al suelo sin sufrir ningún tipo de dispersión en la atmósfera se denomina radiación directa (**Figura 2.1a**), esta puede ser concentrada por un sistema óptico en una imagen del disco solar. En un día despejado, casi toda la radiación proveniente del Sol es directa.

Radiación Difusa. El componente de la radiación solar que ha sido dispersado por la atmósfera, es decir, que no posee una dirección definida, se denomina radiación difusa (**Figura 2.1b**). Un colector focal no puede concentrar la radiación difusa, pero un colector solar plano capta tanto la radiación directa como la difusa **[1]**

Figura 2.1 Radiación Solar Directa y Difusa



Fuente: Zekai; "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques"; 2008 **[51]**

Radiación Solar Total. Es la suma de la radiación solar directa y difusa. La radiación total sobre una superficie horizontal se conoce usualmente como radiación global.

Irradiancia Solar, (W/m^2). Es la potencia por unidad de área con la que incide la radiación solar sobre una superficie, su símbolo es *G*.

Irradiación, (J/m^2). Es la energía incidente por unidad de área, se la encuentra al integrar la irradiancia en un periodo de tiempo determinado, comúnmente una hora o un día. **Insolación** es un término utilizado para indicar la irradiación de energía solar sobre superficies de cualquier orientación, su símbolo es *H* para un periodo de un día e *I* para un tiempo de una hora u otro periodo específico

Hora solar. Es la hora basada en el movimiento del Sol a lo largo del cielo, el mediodía solar se presenta cuando el Sol cruza el meridiano del observador. La hora solar, que no coincide con la hora estándar del reloj, se utiliza en todas las relaciones angulares entre el Sol y la Tierra. La hora convencional se puede transformar en hora solar con la ayuda de dos correcciones. La primera, una corrección constante para la diferencia de longitud entre el meridiano del observador y el meridiano en el que está basada la hora local estándar. La segunda se efectúa con la ecuación de la hora, esta toma en cuenta las irregularidades en la rotación de la Tierra, las cuales afectan el momento en que el Sol cruza el meridiano del observador **[10]**. La diferencia en minutos entre la hora solar y la hora convencional se expresa como:

$$\text{Hora solar} - \text{Hora estándar} = 4\,(L_{st} - L_{loc}) + E \tag{2.1}$$

Donde L_{st} es el meridiano estándar para la zona horaria local y L_{loc} la longitud del sitio en análisis, esta última se mide en grados oeste ($0^o < L < 360^o$). El parámetro E es la ecuación de la hora en minutos y está dada por **[10]**:

$$E = 229.2\,(0.000075 + 0.001868\cos B - 0.032077\,\text{sen}\,B - 0.014615\cos 2B - 0.04089\,\text{sen}\,2B) \tag{2.2}$$

$$B = (n\ - 1)\,\frac{360}{365} \tag{2.3}$$

Donde n es el día de año, $1 \leq n \leq 365$.

Para entender mejor el concepto de hora solar se realizará un ejemplo.

Ejemplo 2.1

¿Cuál es la hora solar en la ciudad de Quito, correspondiente a las 11:30 AM del 5 de febrero?

Solución:

La longitud geográfica de la ciudad de Quito es 78.58º y el meridiano estándar es 75º, usando la **Ecuación 2.1** se tiene

$$\text{Hora solar} = 4\,(75 - 78.58) + E + \text{Hora estándar}$$

$$\text{Hora solar} = -14.32 + E + \text{Hora estándar}$$

El 5 de febrero, $n = 36$ y $B = 34.52$, aplicando la **Ecuación 2.2** se tiene que $E = -13.74$ minutos. De este modo, la corrección para la hora estándar es de – 28 minutos. Por lo tanto, las 11:30 AM hora estándar es equivalente a las 11:02 AM hora solar.

2.4. ÁNGULOS DE LA RADIACIÓN DIRECTA

Las relaciones geométricas entre un plano de cualquier orientación relativa a la Tierra y la radiación directa proveniente del Sol (en cualquier momento dado), ya sea que este plano se encuentre fijo o en movimiento, pueden ser descritas por un conjunto de ángulos, estos son:

ϕ **Latitud**, es la posición angular Norte o Sur de un punto en la Tierra respecto al ecuador, es positiva al Norte y negativa al Sur; $-90^{o} \leq \phi \leq 90^{o}$.

δ **Declinación solar**, es el ángulo formado por la línea Tierra-Sol y el plano ecuatorial, siendo positiva al Norte y negativa al Sur; $-23.5^{o} \leq \delta \leq 23.5^{o}$.

γ **Ángulo acimut de la superficie**, si se realiza la proyección normal de una superficie sobre un plano horizontal, la desviación de esta proyección respecto al meridiano local se denomina ángulo acimut de la superficie, tiene un valor de cero al Sur, es negativo al Este y positivo al Oeste; $-180^{o} \leq \gamma \leq 180^{o}$.

β **Inclinación de la superficie**, es el ángulo formado entre el plano de la superficie en análisis y la horizontal; $0^{o} \leq \beta \leq 180^{o}$, si $\beta \geq 90^{o}$ el plano está mirando hacia abajo.

θ **Ángulo de incidencia**, es el ángulo entre la radiación directa que incide sobre una superficie y la normal a esa superficie.

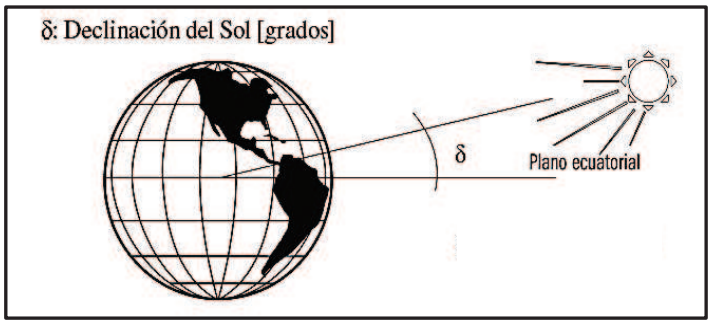
ω **Ángulo horario**, es el desplazamiento angular del Sol en dirección Este u Oeste respecto al meridiano local, se debe al movimiento de rotación de la Tierra y avanza con una velocidad de 15° por hora; es negativo en la mañana y positivo en la tarde.

α_s **Ángulo de altitud solar**, es el ángulo entre la horizontal y una línea hacia el Sol, siendo también el complemento del ángulo cenital.

θ_z **Ángulo cenital**, es el ángulo entre la vertical y una línea hacia el Sol, es decir, el ángulo de incidencia de la radiación directa sobre una superficie horizontal.

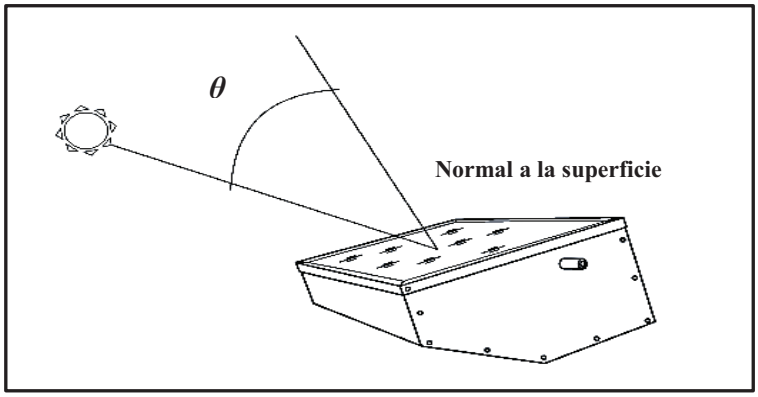
γ_s **Ángulo acimut solar**, es el ángulo que forma respecto al Sur la proyección de la radiación directa sobre un plano horizontal; los desplazamientos al Este del Sur son negativos y hacia el Oeste del Sur son positivos **[10]**.

Figura 2.2 Declinación del Sol



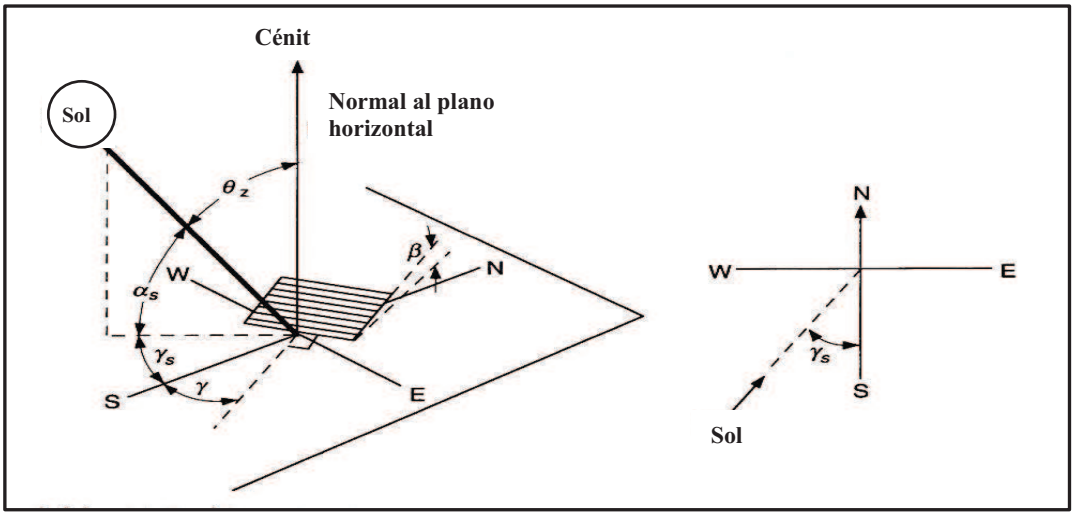
Fuente: Bérriz y Álvarez; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; 2008 **[4]**

Figura 2.3 Ángulo de Incidencia de la radiación directa



Fuente: Bérriz y Álvarez; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; 2008 **[4]**

Figura 2.4 Ángulo cenital, Pendiente de la superficie, Ángulo acimut de la superficie, Ángulo de altitud solar y Ángulo acimut solar



Fuente: Duffie y Beckman; "Solar Engineering of Thermal Processes"; 2006 **[10]**

La declinación δ se puede calcular con la siguiente formulación

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \tag{2.4}$$

Donde n es el día del año y se emplea generalmente como un número entero comprendido entre 1 y 365.

Las ecuaciones que relacionan el ángulo de incidencia de la radiación directa, θ, con los demás ángulos descritos son:

$$\cos\theta = \text{sen}\,\delta \,\text{sen}\,\phi \cos\beta - \text{sen}\,\delta \cos\phi \,\text{sen}\,\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \,\text{sen}\,\phi \,\text{sen}\,\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \,\text{sen}\,\beta \,\text{sen}\,\gamma \,\text{sen}\,\omega \tag{2.5}$$

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \text{sen}\,\theta_z \,\text{sen}\,\beta \cos(\gamma_s - \gamma) \tag{2.6}$$

Si el Sol está detrás de la superficie, el ángulo θ será mayor a 90°. Existen muchas circunstancias en las que la **Ecuación 2.5** puede ser simplificada. Para superficies fijas orientadas hacia el sur o el norte, esto es, con un ángulo acimut de la superficie de 0º o 180º, el último término se elimina, reduciéndose la **Ecuación 2.5** a

$$\cos\theta = \text{sen}\,\delta \,\text{sen}\,\phi \cos\beta - \text{sen}\,\delta \cos\phi \,\text{sen}\,\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \,\text{sen}\,\phi \,\text{sen}\,\beta \cos\gamma \cos\omega \tag{2.7}$$

Para superficies horizontales, el ángulo de incidencia es el ángulo cenital, θ_z. En esta condición $\beta = 0$º, y la **Ecuación 2.5** se convierte en

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\omega + \text{sen}\,\phi \,\text{sen}\,\delta \tag{2.8}$$

Al tomar en cuenta que una superficie con una inclinación β dirigida hacia el norte o hacia el sur posee la misma relación angular respecto a la radiación directa, que una superficie horizontal hipotética en una latitud $(\phi - \beta)$ **[10]**, pueden obtenerse algunas ecuaciones útiles.

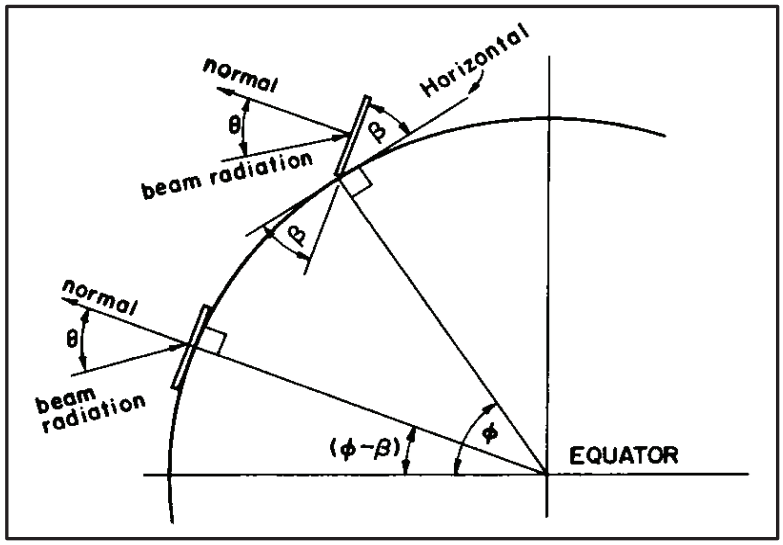
Al modificar la **Ecuación 2.8**, resulta la siguiente ecuación para el hemisferio norte **[10]**

$$\cos\theta = \cos(\phi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \text{sen}\,(\phi - \beta) \,\text{sen}\,\delta \tag{2.9a}$$

Para el hemisferio sur, en la ecuación anterior se remplaza (ϕ – β) por (ϕ + β), obteniéndose **[10]**

$$\cos\theta = \cos(\phi + \beta)\cos\delta\cos\omega + \text{sen}(\phi + \beta)\,\text{sen}\,\delta \qquad (2.9b)$$

Figura 2.5 Sección de la Tierra mostrando los ángulos β, ϕ, θ y ($\phi - \beta$) para superficies que miran al sur



Fuente: Duffie y Beckman; "Solar Engineering of Thermal Processes"; 2006 **[10]**

Si se resuelve la **Ecuación 2.8** para encontrar el **ángulo horario del ocaso,** ω_s (θ_z = 90º), se obtiene

$$\cos\omega_s = -\frac{\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta}{\cos\phi\cos\delta} = -\tan\phi\tan\delta \qquad (2.10)$$

El ángulo horario del amanecer es el negativo del ángulo horario del ocaso. En consecuencia, el número de horas con luz en un día cualquiera es **[10]**

$$N = \frac{2}{15}\cos^{-1}(-\tan\phi\tan\delta) \qquad (2.11)$$

2.5. DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA RADIACIÓN

La radiación solar varía con la localización geográfica, la altitud y el clima. En medio de dos franjas que rodean al globo entre 15º y 35º de latitud norte y sur, la radiación solar es comúnmente más intensa. Dentro de estas franjas, las regiones más favorecidas poseen una radiación mínima media mensual de 5815 (Wh/m^2/día); con una variación mensual total, menor a 2908 (Wh/m^2/día). En estos lugares, por ubicarse en las zonas ecuatoriales de los

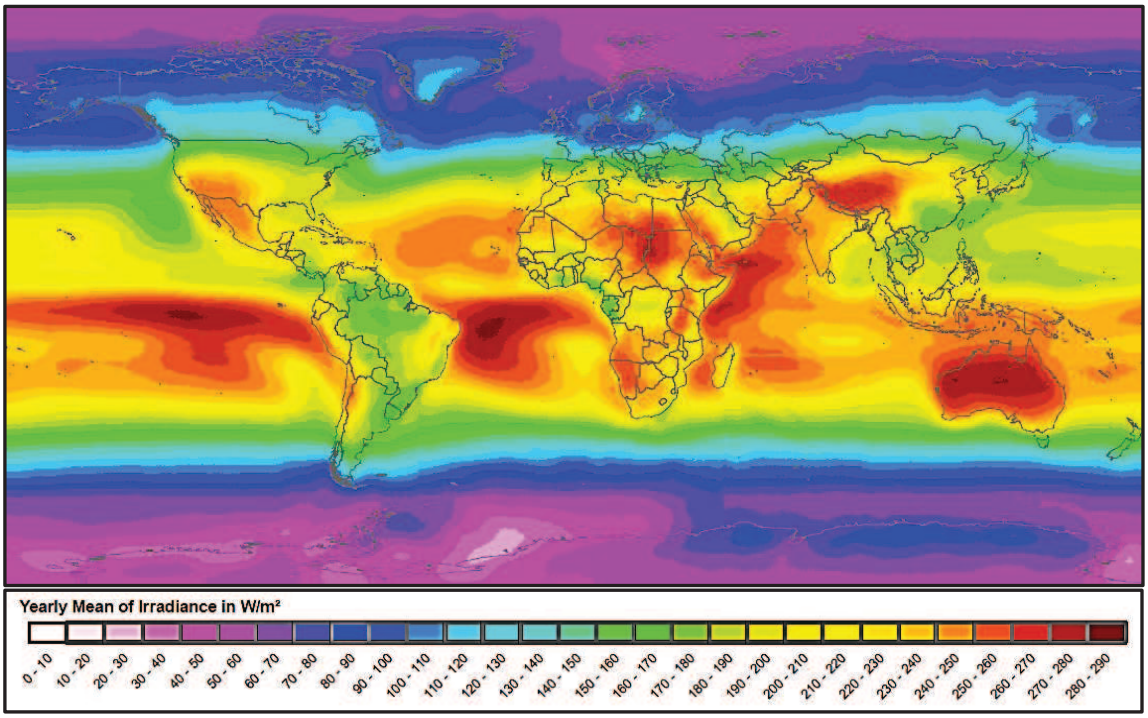
desiertos, las lluvias son escasas, siendo menores a 250 mm anuales. En algunos países, el 90 % de la radiación es directa, con más de 3000 horas de sol al año **[13]**.

En el cinturón ecuatorial, entre los 15º N y 15º S, se ubica la siguiente zona más favorable. Con una elevada nubosidad, el porcentaje de radiación difusa es grande; sin embargo, se dan pocos días seguidos de radiación baja. Existen alrededor de 2300 horas de sol al año, oscilando la radiación entre los 3489 y 5815 (Wh/m^2/día), con pocas variaciones estacionales.

Entre los 35º y 45º de latitud, en el borde de los desiertos, la radiación varía entre los 4652 y 5815 (Wh/m^2/día) en el curso del año. A pesar de estos altos niveles de radiación, las variaciones estacionales son grandes, reduciéndose bastante la radiación en el invierno. Situación que se puede remediar, inclinando los colectores solares para captar mayor cantidad de energía **[13]**.

En la **Figura 2.6** se observa un mapa mundial de la irradiancia solar media anual; para obtener la radiación media diaria anual en (Wh/m^2) se debe multiplicar por 24 a los valores ubicados en la parte inferior de la figura. De acuerdo al mapa, la radiación media diaria anual en el Ecuador es de aproximadamente 4800 (Wh/m^2).

Figura 2.6 Mapa mundial con la irradiancia solar media anual 1990-2004, (W/m^2)



Fuente: http://www.soda-is.com/img/map_ed_13_world.pdf **[15]**

2.6. RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

El 3 de enero, cuando el Sol está más cerca de la Tierra, la radiación solar fuera de la atmósfera tiene un valor aproximado de 1400 (W/m^2); y el 4 de julio, cuando el Sol se localiza en su punto más alejado, un valor cercano a los 1330 (W/m^2). En el transcurso del año, la radiación extraterrestre medida en un plano normal a su dirección, varía dentro de estos dos límites. Su valor, con un error del 3.3 % se puede calcular con la ecuación

$$G_{on} = G_{sc}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right] \tag{2.12}$$

Donde G_{on} es la radiación extraterrestre en el enésimo día del año, medida en un plano normal a su dirección, y G_{sc} es la constante solar.

La radiación solar sobre una superficie horizontal fuera de la atmósfera terrestre, G_o, está dada por:

$$G_o = G_{on}\cos\theta_z$$

$$G_o = G_{sc}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right][\cos\phi\cos\delta\cos\omega + \operatorname{sen}\phi\operatorname{sen}\delta] \tag{2.13}$$

Si deseamos conocer la radiación extraterrestre diaria sobre una superficie horizontal, H_o, se debe integrar la **Ecuación 2.13** desde el amanecer hasta el ocaso. El resultado de esta operación es **[24]**

$$H_o = \frac{24\times3600\,G_{sc}}{\pi}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\,n}{365}\right)\right] \times\left[\cos\phi\cos\delta\,sen\,\omega_s + \left(\frac{\pi\,\omega_s}{180}\right)sen\,\phi\,sen\,\delta\right] \tag{2.14}$$

Donde ω_s es el ángulo horario del ocaso en grados, obtenido de la **Ecuación 2.10**; las unidades de H_o están dadas en (J/m^2).

Como se verá más adelante, la radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal, $\overline{H}_o$, se utiliza para determinar a su equivalente terrestre, $\overline{H}$. Su valor para cada mes en función de la latitud se expone en a **Tabla 2.1**

Tabla 2.1 Radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal, $\bar{H}_o$ (MJ/m^2)

Latitude	Jan 17	Feb 16	Mar 16	Apr 15	May 15	June 11	July 17	Aug 16	Sept 15	Oct 15	Nov 14	Dec 10
60°S	41.1	31.9	21.2	10.9	4.4	2.1	3.1	7.8	16.7	28.1	38.4	43.6
55°S	41.7	33.7	23.8	13.8	7.1	4.5	5.6	10.7	19.5	30.2	39.4	43.9
50°S	42.4	35.3	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.6	22.2	32.1	40.3	44.2
45°S	42.9	36.8	28.6	19.6	12.9	10.0	11.2	16.5	24.7	33.8	41.1	44.4
40°S	43.1	37.9	30.7	22.3	15.8	12.9	14.1	19.3	27.1	35.3	41.6	44.4
35°S	43.2	38.8	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.0	29.2	36.5	41.9	44.2
30°S	43.0	39.5	34.1	27.2	21.4	18.7	19.8	24.5	31.1	37.5	41.9	43.7
25°S	42.5	39.9	35.4	29.4	24.1	21.5	22.5	26.9	32.8	38.1	41.6	43.0
20°S	41.5	39.9	36.5	31.3	26.6	24.2	25.1	29.1	34.2	38.5	41.1	42.0
15°S	40.8	39.7	37.2	33.1	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.3	40.8
10°S	39.5	39.3	37.7	34.6	31.1	29.2	29.9	32.8	36.3	38.5	39.3	39.3
5°S	38.0	38.5	38.0	35.8	33.0	31.4	32.0	34.4	36.9	38.1	37.9	37.6
0	36.2	37.4	37.9	36.8	34.8	33.5	33.9	35.7	37.2	37.3	36.4	35.6
5°N	34.2	36.1	37.5	37.5	36.3	35.3	35.6	36.7	37.3	36.3	34.5	33.5
10°N	32.0	34.6	36.9	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.1	32.5	31.1
15°N	29.5	32.7	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.5	33.5	30.2	28.5
20°N	26.9	30.7	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.7	31.8	27.7	25.7
25°N	24.1	28.4	33.3	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.7	29.8	25.1	22.9
30°N	21.3	26.0	31.6	36.8	40.0	41.1	40.4	37.9	33.4	27.5	22.3	19.9
35°N	18.3	23.3	29.6	35.8	39.9	41.5	40.6	37.3	31.8	25.1	19.4	16.8
40°N	15.2	20.5	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.5	30.0	22.5	16.4	13.7
45°N	12.1	17.6	25.0	33.1	39.2	41.7	40.4	35.4	27.9	19.8	13.4	10.7
50°N	9.1	14.6	22.5	31.4	38.4	41.5	40.0	34.1	25.7	16.9	10.4	7.7
55°N	6.1	11.6	19.7	29.5	37.6	41.3	39.4	32.7	23.2	13.9	7.4	4.8
60°N	3.4	8.5	16.8	27.4	36.6	41.0	38.8	31.0	20.6	10.9	4.5	2.3

Fuente: Kalogirou; "Solar Energy Engineering"; 2009 **[24]**

2.7. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PROMEDIO

Una ecuación muy simple que vincula las horas de sol con la radiación solar es la relación Angström-Prescott, esta se puede expresar como una regresión lineal de la forma

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b\,\frac{\bar{n}}{\bar{N}} \tag{2.15}$$

Donde $\bar{H}$ es la radiación media diaria mensual sobre una superficie horizontal (J/m^2), $\bar{H}_o$ la radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal (J/m^2), $\bar{n}$ el número de horas con sol brillante en el mes, $\bar{N}$ el número total de horas con luz de día en el mes; para terminar, a y b son constantes empíricas que deben ser obtenidas a partir de datos de una localidad o región determinada. La cualidad empírica de las constantes a y b conduce a que la relación Angström-Prescott tenga muchas limitaciones que restringen su utilidad **[51]**. El valor de $\bar{H}_o$ para todos los meses del año y las diferentes latitudes del planeta se puede obtener de la **Tabla 2.1**

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) publicó en 1987 un atlas de climatología solar para Latinoamérica, en este documento se asignan a las constantes *a* y *b* las cantidades de 0.29 y 0.42, respectivamente; también se indican los valores mensuales de $\frac{\overline{n}}{\overline{N}}$ para muchas ciudades de los países de América Latina, incluido el Ecuador **[34]**.

2.8. ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR PARA CIELO DESPEJADO

La atmósfera dispersa y absorbe la radiación solar, fenómenos que no son constantes, pues varían con el tiempo y la masa de aire que deba atravesar la radiación. Circunstancias que hacen necesario definir un cielo claro estándar, para el que se pueda calcular la radiación horaria y diaria sobre una superficie horizontal. Hottel en 1976 **[10]** presentó un modelo para estimar la radiación solar directa bajo estas condiciones

$$G_{bn} = G_{on} \cdot \tau_b \tag{2.16}$$

$$\tau_b = a_0 + a_1 \exp\left(\frac{-k}{\cos\theta_z}\right) \tag{2.17}$$

Donde τ_b es la transmitancia atmosférica para la radiación directa y G_{bn} la radiación directa sobre un plano normal a su dirección (W/m^2). Las constantes a_0, a_1 y k para una atmósfera con visibilidad de 23 km se encuentran a partir de a_0^*, a_1^* y k^*, cuyas ecuaciones para una altura menor a 2.5 km están dadas por:

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821\,(6 - A_t)^2 \tag{2.18}$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595\,(6.5 - A_t)^2 \tag{2.19}$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858\,(2.5 - A_t)^2 \tag{2.20}$$

Donde A_t es la altura del punto de observación en kilómetros. En la **Tabla 2.2** se presentan factores de corrección para a_0^*, a_1^* y k^*, los mismos permiten modificaciones de acuerdo al tipo de clima. Siendo: $r_0 = a_0/a_0^*$, $r_1 = a_1/a_1^*$ y $r_k = k/k^*$

Tabla 2.2 Factores de corrección para el tipo de clima

Tipo de clima	r_0	r_1	r_k
Tropical	0.95	0.98	1.02
Latitud media verano	0.97	0.99	1.02
Verano Subártico	0.99	0.99	1.01
Latitud media invierno	1.03	1.01	1.00

Fuente: elaborado a partir de Duffie y Beckman; "Solar Engineering of Thermal Processes"; 2006 **[10]**

La radiación directa sobre una superficie horizontal en un día claro se define por

$$G_{cb} = G_{on} \,.\, \tau_b \,.\cos\theta_z \tag{2.21}$$

Donde G_{cb} se da en (W/m^2) y G_{on} se obtiene de la **Ecuación 2.12**. Si deseamos predecir la radiación total incidente sobre una superficie horizontal, primero debemos conocer su componente difuso. Liu y Jordan en 1960 **[10]** propusieron la siguiente ecuación para estimar la fracción difusa de la radiación en un día despejado

$$\tau_d = \frac{G_{cd}}{G_o} = 0.271 - 0.294\,\tau_b \tag{2.22}$$

Donde τ_d es la relación entre la radiación difusa y la radiación extraterrestre, ambas incidentes sobre una superficie horizontal en un día con cielo claro.

Un ejemplo interesante consistiría en comparar el valor estimado de la radiación sobre una superficie horizontal en un día despejado, con los datos suministrados por el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de (LEAEE). Sin embargo, existe un inconveniente al utilizar las ecuaciones propuestas por Hottel, ya que estas se emplean para altitudes de hasta 2.5 km sobre el nivel del mar, pero la ciudad de Quito, donde se ubica el laboratorio, está a 2.8 km de altura. De todas maneras se realizará un ejemplo para comparar ambos valores.

Ejemplo 2.2

Estimar la radiación solar con cielo claro sobre una superficie horizontal en la ciudad de Quito, para el día 22 de diciembre a las 11:00 AM. Luego compararla con el dato proporcionado por el LEAEE, correspondiente al año 2011, a la misma hora y día. Se escogió esta hora y fecha, porque toda la mañana el cielo permaneció despejado con altos niveles de radiación solar.

Solución

El 22 de diciembre a las 11:00 AM, $n = 356$, la declinación δ es de −23.44º, la hora solar es 10:47 AM y el ángulo horario ω es −18.25º. Con la **Ecuación 2.8** calculamos el coseno del ángulo cenital:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \delta$$

$$\cos \theta_z = \cos (-23.44) \cos (-18.25)$$

$$\cos \theta_z = 0.871$$

A continuación se deben encontrar las constantes a_0, a_1 y k para una elevación de 2.8 km, debido a que la máxima altura permitida en las ecuaciones es de 2.5 km, se usará esta altitud en los cálculos.

$$a_0^* = 0.4237 - 0.00821\,(6 - 2.5)^2 = 0.323$$

$$a_1^* = 0.5055 + 0.00595\,(6.5 - 2.5)^2 = 0.6$$

$$k^* = 0.2711 + 0.01858\,(2.5 - 2.5)^2 = 0.2711$$

Aplicando los factores de corrección para clima tropical, resulta

$$\tau_b = 0.323 \times 0.95 + 0.6 \times 0.98 \exp\left(-0.2711 \cdot \frac{1.02}{0.871}\right)$$

$$\tau_b = 0.735$$

La radiación extraterrestre, G_{on}, calculada con la **Ecuación 2.12** es igual a 1411.57 (W/m^2). Al evaluar G_{on} se asignó un valor de 1367 (W/m^2) para la constante solar, G_{sc}. Se tiene entonces que la radiación directa es

$$G_{cb} = 1411.57 \times 0.735 \times 0.871 = 903.66 \text{ (W/m}^2\text{)}$$

Para calcular la radiación difusa se debe conocer la radiación solar extraterrestre sobre una superficie horizontal, G_o. Empleando la **Ecuación 2.13** se encontró que su valor es de 1229.47 (W/m^2). Por último, se procede a calcular la radiación difusa para cielo claro, G_{cd}.

$$G_{cd} = G_o(0.271 - 0.294\,\tau_b)$$

$$G_{cd} = 1229.47\,(0.271 - 0.294 \times 0.735)$$

$$G_{cd} = 67.51\ (\mathrm{W/m^2})$$

Para determinar la radiación total con cielo claro, G_c, es necesario sumar el componente directo y difuso de la radiación, operación cuyo resultado es

$$G_c = 903.66 + 67.51 = \ 971.17\ (\mathrm{W/m^2})$$

A las 11:00 AM el valor registrado por el laboratorio fue de 1034. 94 (W/m^2), entre ambas cifras existe un error del 6 %; esta es una buena aproximación, más aun tomando en cuenta que la altura del lugar de medición sobrepasa con 0.3 km al máximo permitido en el modelo de Hottel.

2.9. COMPONENTES DIRECTO Y DIFUSO DE LA RADIACIÓN HORARIA

Muneer et al (1996) **[44]** presentaron la siguiente ecuación que permite estimar el componente difuso de la radiación horaria en cualquier lugar del planeta

$$\frac{I_d}{I} = 1.006 - 0.317\,k_T + 3.1241\,{k_T}^2 - 12.7616\,{k_T}^3 + 9.7166\,{k_T}^4 \qquad (2.23)$$

El índice de claridad horario k_T se define por

$$k_T = \frac{I}{I_o} \qquad (2.24)$$

Donde I es la radiación horaria sobre una superficie horizontal (J/m^2), I_d la radiación difusa horaria sobre una superficie horizontal e I_o la radiación extraterrestre horaria sobre una superficie horizontal.

Para calcular I_o se debe integrar la **Ecuación 2.13** para un periodo de una hora, el resultado de esta operación es **[10]**:

$$I_o = \frac{12\times3600\ G_{sc}}{\pi}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\ n}{365}\right)\right] \times\left[\cos\phi\cos\delta\ (sen\ \omega_2 - sen\ \omega_1) + \left(\frac{\pi\ (\omega_2-\omega_1)}{180}\right)\ sen\ \phi\ sen\ \delta\ \right] \tag{2.25}$$

Donde G_{sc} es la constante solar (1367 W/m^2), ω_2 y ω_1 los ángulos horarios en grados, cuya resta define el periodo de una hora, n el día de año ($1 \leq n \leq 365$), δ la declinación solar ($-23.5^o \leq \delta \leq 23.5^o$) y ϕ la latitud del lugar ($90^o \leq \phi \leq 90^o$).

2.10. RADIACIÓN SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

Los colectores solares usualmente se instalan con una inclinación respecto a la horizontal, esto permite recibir una mayor cantidad de energía, así como reducir la reflexión y las pérdidas por el ángulo de incidencia de la radiación. Los datos sobre radiación solar están disponibles generalmente para superficies horizontales, se debe entonces modificar esta información para conocer la radiación sobre superficies inclinadas **[24]**.

2.10.1. RADIACIÓN DIRECTA SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

Una superficie inclinada recibe radiación directa (G_{bT}), radiación difusa (G_{dT}) y radiación reflejada por el terreno (G_{gT}); se tiene entonces que

$$G_T = G_{bT} + G_{dT} + G_{gT} \tag{2.26}$$

En donde G_T es la radiación total sobre una superficie inclinada (W/m^2). A partir de las **Figuras 2.3** y **2.4** se puede encontrar que:

$$G_{bT} = G_{bn}\cos\theta \tag{2.27}$$

$$G_b = G_{bn}\cos\theta_z \tag{2.28}$$

Donde G_{bT} es la radiación directa sobre una superficie inclinada, G_{bn} la radiación directa sobre un plano normal a la radiación y G_b la radiación directa sobre una superficie horizontal. El factor R_b es la relación entre G_{bT} y G_b, siendo igual a **[24]**:

$$R_b = \frac{G_{bT}}{G_b} = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \tag{2.29}$$

Así, la radiación directa sobre una superficie inclinada es

$$G_{bT} = G_b \,.R_b \tag{2.30}$$

Para superficies fijas inclinadas hacia el Sur (ángulo acimut de la superficie, γ = 0º) con un ángulo de inclinación β, se tiene que R_b es

$$R_b = \frac{\text{sen}\,(\phi - \beta)\,\text{sen}\,\delta + \cos(\phi - \beta)\cos\delta\cos\omega}{\text{sen}\,\phi\,\text{sen}\,\delta + \cos\phi\cos\delta\cos\omega} \tag{2.31}$$

Para superficies fijas inclinadas hacia el Norte, $\gamma = 180^o$, el término $(\phi - \beta)$ en la **Ecuación 2.31** se cambia por $(\phi + \beta)$ **[24]**.

2.10.2. RADIACIÓN TOTAL SOBRE UNA SUPERFICIE INCLINADA

La radiación solar incidente (G_T) sobre una superficie con una inclinación β respecto a la horizontal es la suma de sus componentes directo (G_{bT}), difuso (G_{dT}) y reflejado por el suelo (G_{rT}).

$$G_T = \; G_{bT} + G_{dT} + G_{rT} \tag{2.32}$$

La radiación directa (G_{bT}) se define por la **Ecuación 2.30**

Existe una variación entre la radiación difusa sobre una superficie inclinada y la que incide sobre una superficie horizontal, esta diferencia radica en que la superficie inclinada no mira hacia toda la bóveda del cielo, fuente de la radiación difusa. Si consideramos a esta última como isotrópica, el cociente entre la radiación difusa sobre una superficie inclinada y la radiación difusa sobre una superficie horizontal, conocido como factor R_d, tiene el mismo valor que el factor de forma entre la superficie y el cielo. En este caso, dicho factor es la porción captada de la radiación que ha sido emitida por la superficie. En consecuencia, se tiene que R_d es igual a:

$$R_d = \frac{1 + \cos\beta}{2} \tag{2.33}$$

La radiación difusa sobre una superficie inclinada está dada por **[9]**:

$$G_{dT} = G_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \tag{2.34}$$

Donde G_d es la radiación difusa sobre una superficie horizontal (W/m^2).

Cuando se coloca un colector solar en el suelo, este recibe radiación directa y difusa reflejada por el terreno circundante. El factor de forma entre el colector y el suelo es igual a $(1-\cos\beta)/2$, se tiene entonces que la radiación reflejada por el suelo hacia el colector es

$$G_{rT} = \rho . G \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \tag{2.35}$$

Donde G es la radiación total sobre una superficie horizontal (W/m^2) y ρ la reflectancia difusa del suelo que rodea al colector, para hierba y concreto tiene un valor aproximado de 0.2. Para concluir, la radiación total sobre una superficie inclinada es la suma de sus componentes directo, difuso y reflejado **[9]**.

$$G_T = G_b\, R_b + G_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \ \rho . G \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \tag{2.36}$$

2.11. RADIACIÓN SOLAR EN EL ECUADOR

Debido a que el proceso de desalinización solar se llevará a cabo primordialmente en la Costa del Ecuador y las islas Galápagos, se analizarán los niveles de radiación solar en estas regiones. Como se vio en el **Capítulo 1**, los lugares con escasos recursos superficiales de agua dulce son: el suroeste de la provincia de Manabí, la provincia de Santa Elena y las islas Galápagos. Motivo por el cual, se estudiará con mayor detalle la radiación solar en estas tres provincias; determinándose además, los niveles de radiación en la ciudad de Quito, lugar donde se efectuarán las pruebas al desalinizador.

2.11.1. RADIACIÓN SOLAR EN LA REGIÓN COSTA Y LA CIUDAD DE QUITO

Hace algunos años, la Corporación para la Investigación Energética (CIE) y el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC) elaboraron un atlas solar del Ecuador. En el mismo se presentan los valores de radiación global, directa y difusa para todos los meses del año y provincias del país, exceptuando Galápagos. Por ser este Atlas la fuente de información más reciente y exacta, se lo empleará para evaluar los niveles de radiación solar en la región Costa y la ciudad de Quito.

Tabla 2.3 Radiación media diaria anual en las provincias de la Costa ecuatoriana

PROVINCIA	RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m^2/día)		
	Máxima	Mínima	Promedio
Esmeraldas	4500	3900	4200
Manabí	5250	3900	4575
Guayas	4800	4350	4575
Los ríos	4650	4500	4575
El Oro	5100	4200	4650
Santa Elena	4650	4350	4500

Fuente: elaborado a partir de CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

En la **Tabla 2.3** se aprecia que la radiación media diaria anual es similar en casi todas provincias de la Costa, situándose en una cifra cercana a los 4500 (Wh/m^2/día); la excepción se da en la provincia de Esmeraldas, donde la radiación decrece hasta los 4200 (Wh/m^2/día).

Tabla 2.4. Radiación media diaria mensual de la Provincia de Manabí

MES	RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m^2/día)		
	Máxima	Mínima	Promedio
Enero	5200	3300	4250
Febrero	5550	3750	4650
Marzo	5700	4350	5025
Abril	5250	4050	4650
Mayo	4650	3750	4200
Junio	4650	3600	4125
Julio	4650	3750	4200
Agosto	5100	4200	4650
Septiembre	5400	4200	4800
Octubre	5400	4200	4800
Noviembre	5400	4200	4800
Diciembre	5250	3900	4575

Fuente: elaborado a partir de CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

Tabla 2.5 Radiación media diaria mensual de la Provincia de Santa Elena

MES	RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m2/día)		
	Máxima	Mínima	Promedio
Enero	4500	4200	4350
Febrero	4650	4350	4500
Marzo	4950	5100	5025
Abril	4950	4650	4800
Mayo	4950	4650	4800
Junio	4200	4050	4125
Julio	4350	3750	4050
Agosto	4650	3750	4200
Septiembre	5250	4200	4725
Octubre	4800	4050	4425
Noviembre	5100	4350	4725
Diciembre	4950	4350	4650

Fuente: elaborado a partir de CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

De acuerdo a las **Tablas 2.4** y **2.5**, los niveles de radiación en las provincias de Manabí y Santa Elena son relativamente altos, manteniéndose en el transcurso del año sin variaciones excesivas. La radiación promedio en Manabí fluctúa entre 4125 y 5025 (Wh/m^2/día), correspondientes a los meses de junio y marzo, respectivamente. En Santa Elena, la radiación máxima promedio de 5025 (Wh/m^2/día) se presenta en marzo, y la mínima de 4050 (Wh/m^2/día) en julio. En conclusión, se puede afirmar que el potencial solar de estas dos provincias es adecuado para la implementación y desarrollo de la desalinización solar térmica.

Tabla 2.6 Radiación media diaria mensual de la ciudad de Quito

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m^2/día)	4950	4950	4950	4800	4800	4800	5100	5400	5400	5100	5250	5100

Fuente: elaborado a partir de CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

La **Tabla 2.6** se elaboró con ayuda del atlas solar publicado por el CONELEC, y muestra la radiación media diaria mensual, $\overline{H}$, de la ciudad de Quito. Es oportuno comparar los valores de esta tabla con los obtenidos por la **Ecuación 2.15**, que como se recuerda es de la forma

$$\frac{\overline{H}}{\overline{H}_o} = a + b\,\frac{\bar{n}}{\overline{N}}$$

Donde $\overline{H}_o$ es la radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal, $\bar{n}$ el número de horas con sol brillante en el mes y $\overline{N}$ el número total de horas con luz de día en el mes. En el atlas solar publicado por la OLADE en 1987 **[34]** se confirió a las constantes *a* y *b* los valores de 0.29 y 0.42, respectivamente. En este atlas también se indican los valores mensuales de $\bar{n}/\overline{N}$ para la ciudad de Quito.

Tabla 2.7 Valores de $\bar{n}/\overline{N}$ para la ciudad de Quito

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
$\frac{\bar{n}}{\overline{N}}$	0.54	0.43	0.4	0.41	0.49	0.52	0.64	0.59	0.48	0.53	0.52	0.55

Fuente: elaborado a partir de OLADE; "Atlas de Climatología Solar"; 1987 **[34]**

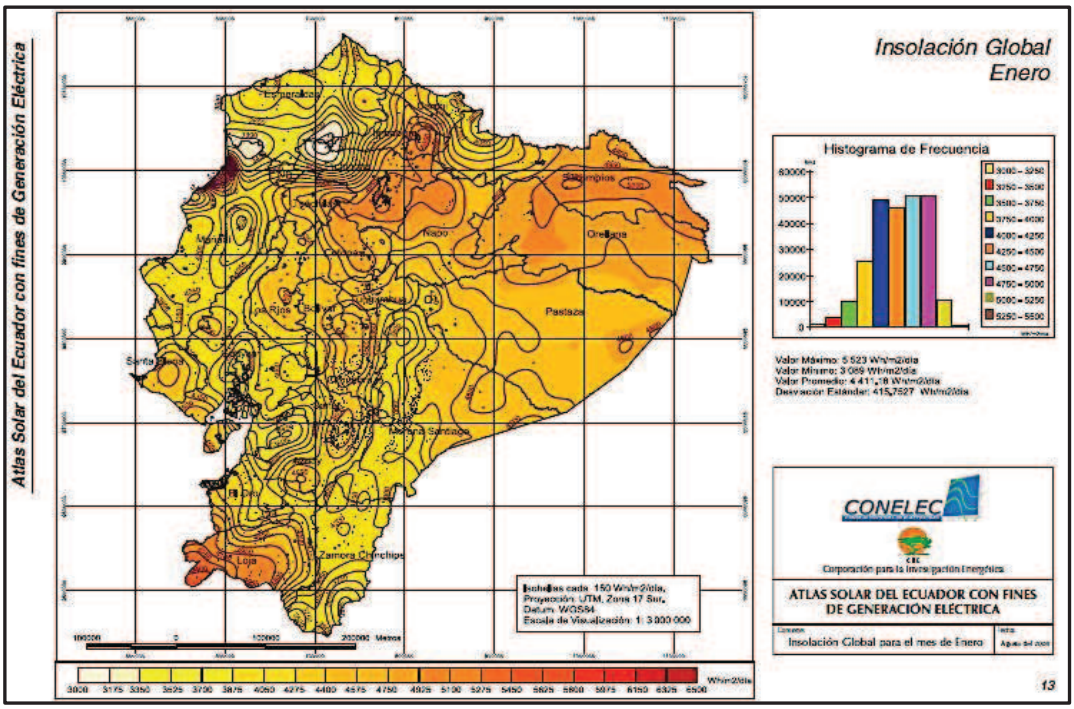
Tabla 2.8 Para Quito: Comparación entre la radiación media diaria mensual calculada con la Ecuación 2.15 y la obtenida del atlas solar publicado por el CONELEC

MES	Radiación Global (Wh/m^2/día)		Error (%)
	Atlas Solar	Ecuación 2.15	
Enero	4950	5197	5.0
Febrero	4950	4889	-1.2
Marzo	4950	4822	-2.6
Abril	4800	4725	-1.6
Mayo	4800	4793	-0.1
Junio	4800	4731	-1.4
Julio	5100	5262	3.2
Agosto	5400	5333	-1.2
Septiembre	5400	5080	-5.9
Octubre	5100	5311	4.1
Noviembre	5250	5140	-2.1
Diciembre	5100	5152	1.0

Fuente: elaborado a partir de OLADE; "Atlas de Climatología Solar"; 1987 **[39]** y CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

Conforme a la **Tabla 2.8**, los valores de radiación media diaria mensual calculados con la **Ecuación 2.15** tienen una buena aproximación con los datos suministrados por el atlas solar del Ecuador. Sin embargo, es necesario indicar que la información en la que se basa este atlas no proviene de mediciones directas, sino de un modelo que estima la radiación solar sobre una superficie horizontal en cualquier lugar de la Tierra. Según el CONELEC, el error generado por este modelo es bajo, afirmando que está situación ha sido verificada con mediciones realizadas por estaciones meteorológicas.

Figura 2.7 Mapa de Insolación global del Ecuador para el mes de enero



Fuente: CONELEC; "Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica"; 2008 **[8]**

2.11.2. RADIACIÓN SOLAR EN LAS ISLAS GALÁPAGOS

El atlas solar presentado por el CONELEC y el CIE no incluye información sobre las islas Galápagos; por tal motivo, se recurrirá al atlas solar publicado por la OLADE para conocer los niveles de radiación en el archipiélago. En ese documento se exponen los valores de radiación recogidos por la Estación Charles Darwin en la isla Santa Cruz y por otra estación en la isla San Cristóbal.

Tabla 2.9 Radiación media diaria mensual en la isla Santa Cruz (Galápagos) 1978-1979

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m^2/día)	4699	5210	5699	4978	4385	4047	3582	3850	4350	4408	4489	5443

Fuente: elaborado a partir de OLADE; "Atlas de Climatología Solar"; 1987 **[34]**

Tabla 2.10 Radiación media diaria mensual en la isla San Cristóbal (Galápagos) 1964-1970

MES	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m^2/día)	4955	5257	5525	5443	5234	5129	4978	5106	5443	4966	5164	4978

Fuente: elaborado a partir de OLADE; "Atlas de Climatología Solar"; 1987 **[34]**

Como se puede ver en las **Tablas 2.9** y **2.10**, la intensidad de la radiación solar es alta en las dos islas más pobladas de Galápagos; esto es especialmente cierto en la isla San Cristóbal, donde la radiación media diaria mensual no decrece de 4955 (Wh/m^2/día). La excepción se da durante julio y agosto en la isla Santa Cruz, meses en que la radiación disminuye a 3582 y 3850 (Wh/m^2/día), respectivamente. La radiación relativamente baja durante este periodo podría acarrear algunos inconvenientes para el aprovechamiento de la desalinización solar, porque justamente se presenta durante una de las dos estaciones secas en la zona baja de las islas, que se extiende desde junio a septiembre. No obstante, se debe considerar que los datos proporcionados por la Estación Charles Darwin de la isla Santa Cruz corresponden a un periodo muy corto de observación (1978 – 1979), viéndose limitada la confiabilidad de esta información.

La escasez de agua dulce, el aislamiento geográfico y los elevados niveles de radiación solar hacen de Galápagos un lugar muy propicio para la implementación de la desalinización solar térmica.

2.12. COLECTORES SOLARES

Los colectores solares son intercambiadores de calor que absorben la energía radiante del Sol y la transforman en calor, que a su vez se transfiere a un fluido de trabajo. A través del fluido calor portado, la energía captada por el colector solar puede ser entregada directamente a un sistema de agua caliente o de aire acondicionado, o ser dirigida a un tanque de almacenamiento de energía térmica.

Existen básicamente dos tipos de colectores solares: los no concentradores y los concentradores. Los primeros poseen la misma área para interceptar y absorber la radiación solar, en contraste, los colectores concentradores tienen comúnmente una superficie cóncava que intercepta la radiación y la focaliza en un área más pequeña. Los colectores solares también pueden distinguirse unos de otros por el fluido de transferencia de calor utilizado (agua, líquido anticongelante, aire o aceite) o por el hecho de que posean o no una cubierta transparente **[24]**.

2.12.1. ABSORTIVIDAD, REFLECTIVIDAD Y TRANSMISIVIDAD DE LOS MATERIALES

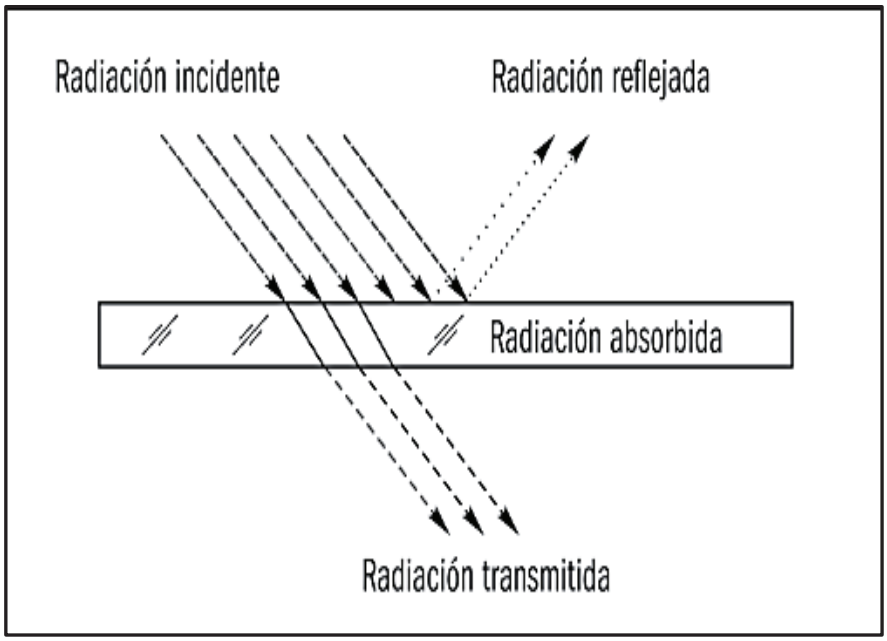
Para comprender mejor el funcionamiento de los colectores solares, es necesario conocer de forma general las propiedades radiativas de los materiales. Cuando la radiación incide sobre un cuerpo transparente, una parte es reflejada, otra es absorbida y el resto lo atraviesa. La fracción reflejada se denomina reflectividad (ρ); la porción absorbida, absortividad (α) y la fracción transmitida, transmisividad (τ). En el caso de un cuerpo opaco, toda la radiación es absorbida y refleja, por ende $\tau = 0$. La suma de estos tres parámetros debe ser igual a la unidad, se tiene entonces que

$$\alpha + \tau + \rho = 1 \tag{2.37}$$

Si el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia, se habla de reflexión especular. Por el contrario, la radiación reflejada se denomina difusa, cuando se dirige uniformemente en todas direcciones. Ningún cuerpo real refleja la radiación de forma completamente especular o difusa, no obstante, las superficies altamente pulidas se aproximan a condiciones de reflexión especular, y en superficies rugosas la reflexión es casi totalmente difusa **[9]**.

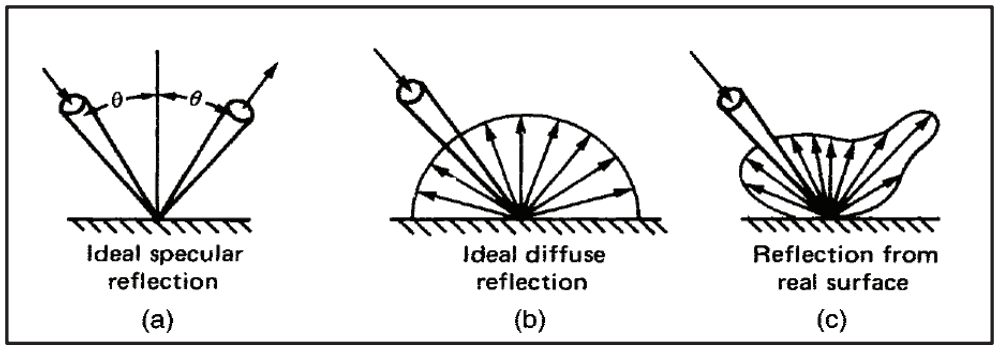
Además de las propiedades radiativas mencionadas, existe otra muy importante llamada emisividad (ε), esta indica la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la que emite un cuerpo negro ideal, su valor oscila entre 0 y 1. Todas las propiedades radiativas de una superficie dependen de la longitud de onda y la dirección de la radiación, circunstancia que es aprovechada para el diseño de dispositivos solares. Por ejemplo, superficies selectivas que absorben casi toda la radiación solar incidente, pero que tienen emisividades bajas, se emplean en la construcción de colectores solares. Asimismo, cubiertas transparentes que permiten el paso de la radiación de acuerdo a su longitud de onda, se integran a colectores solares y otros sistemas de calentamiento **[9]**.

Figura 2.8 Representación esquemática de la absortividad α, reflectividad ρ y transmisividad τ



Fuente: Bérriz y Álvarez; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; 2008 **[4]**

Figura 2.9 Reflexión en una superficie ideal especular, ideal difusa y real



Fuente: Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

2.12.2. COLECTORES SOLARES NO CONCENTRADORES

En estos colectores, la radiación solar llega directamente a la superficie de absorción, sin que exista un elemento que la refleje y dirija hacia un área más pequeña. Por esta razón, los colectores no concentradores tienen la capacidad de captar tanto la radiación directa como la difusa. Dos dispositivos que entran dentro de esta categoría serán descritos: los colectores solares planos y los de tubos al vacío.

2.12.2.1. Colectores solares planos

Un colector plano consta fundamentalmente de una cubierta transparente y una placa de alta absortividad a la que van adosados tubos por donde circula un fluido de trabajo. Cuando la radiación solar incide sobre la cubierta, una pequeña parte es absorbida y reflejada, el resto ingresa al colector, donde es en su mayor parte absorbida por la placa. La energía captada es transferida en forma de calor al fluido de trabajo, que la lleva fuera del colector para su almacenamiento o uso inmediato. Para evitar pérdidas de calor se coloca un aislante térmico detrás y a los lados de la placa, estos dos componentes se encuentran encapsulados por un contenedor que está hecho de metal u otro material apropiado.

La función principal de la cubierta transparente es reducir las pérdidas de energía por convección y radiación. El primer objetivo se consigue al mantener atrapado el aire presente entre la placa absorbente y la cubierta; mientras que el segundo se lleva a cabo gracias al efecto invernadero: la cubierta permite el paso de la radiación de onda corta proveniente del Sol, pero es casi opaca a la radiación de onda larga emitida por la placa absorbente.

Las partes de un colector solar plano son **[24]**:

1) Cubierta transparente (Glazing). Puede constar de una o más láminas de vidrio, u otro material que deje pasar la radiación solar.

2) Tubos, conductores o pasajes (risers). Su función es conducir el fluido de transferencia de calor desde la entrada hasta la salida del colector.

3) Placa de absorción (absorber plate). Puede ser plana, corrugada o acanalada; a esta van unidos los tubos, conductos o pasajes (ver la **Figura 2.11**). La placa generalmente se pinta de negro o se cubre con una delgada capa de un material altamente absorbente y de baja emisividad (superficie selectiva).

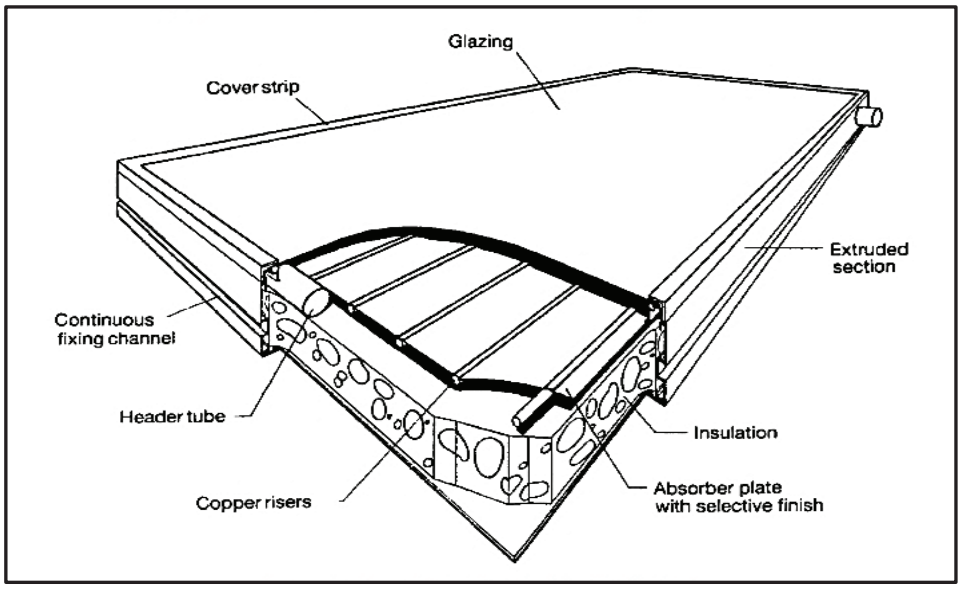
4) Cabezales (Headers). Son tubos horizontales ubicados en los extremos del colector, su función es admitir y descargar el fluido de trabajo.

5) Aislamiento (Insulation). El aislamiento térmico se emplea para reducir las pérdidas de calor por la parte trasera y lateral del colector.

6) Contenedor. Proporciona una estructura de soporte a los componentes antes mencionados y los protege de agentes externos, como el polvo y el viento.

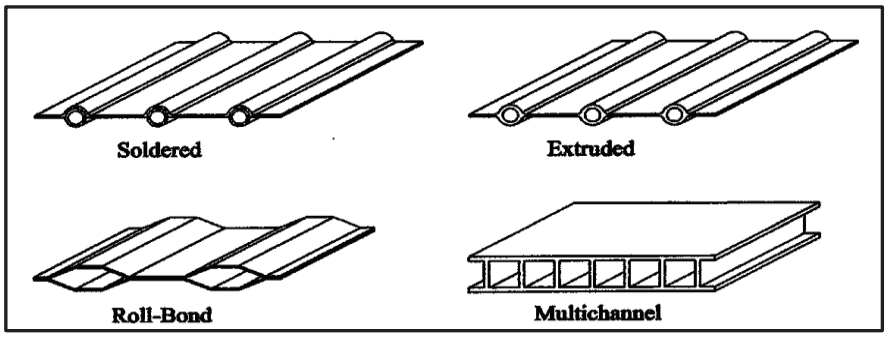
En la **Figura 2.10** se muestra un colector solar plano típico que funciona con un líquido como fluido de transferencia de calor.

Figura 2.10 Colector solar plano típico y sus partes principales



Fuente: Kalogirou; "Solar thermal collectors and applications"; 2004 **[25]**

Figura 2.11 Tipos comunes de placas absorbentes



Fuente: Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

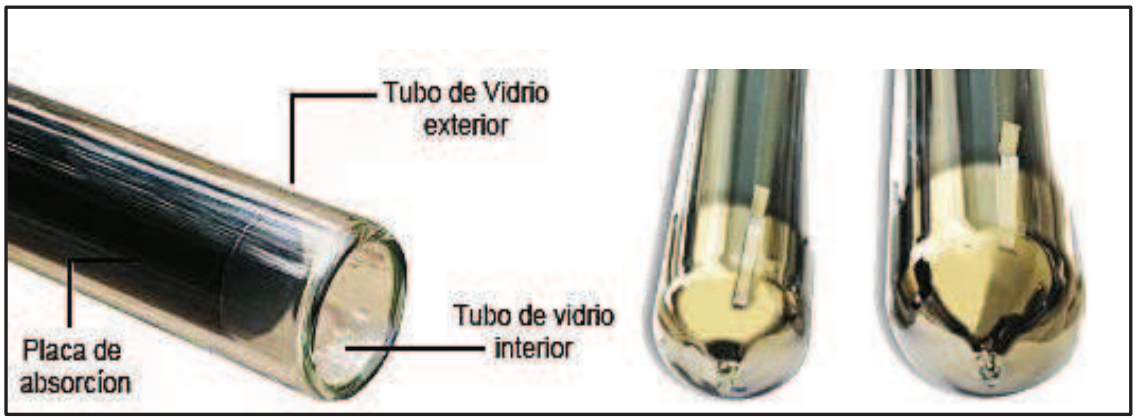
En la **Figura 2.11** se indican varios tipos comunes de placas absorbentes, normalmente los tubos se fijan a la placa mediante soldadura o por medios mecánicos (remaches, tiras de metal, etc.) En otros diseños, los dos elementos se construyen formando un único componente, sin necesidad de un proceso de unión posterior; los colectores solares planos con placa multicanal son ejemplos claros de esta tecnología. En la **Tabla 2.11** se presentan las temperaturas usuales de operación de los colectores solares planos (convencionales y de alta eficiencia).

2.12.2.2. Colectores solares de tubos al vacío

Los colectores solares planos fueron desarrollados para ser utilizados en lugares soleados con climas cálidos, circunstancia que conduce a una disminución considerable de su desempeño durante días fríos, ventosos o nublados. Además, la humedad y condensación dentro del colector pueden deteriorar sus componentes prematuramente, con la inevitable reducción de sus prestaciones **[25]**. Por el contrario, la eficiencia de los colectores solares de tubos al vacío se ve mucho menos influenciada por factores como la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

Un diseño muy utilizado en colectores solares es una variación del tubo al vacío Dewar. El mismo está constituido por dos tubos concéntricos de vidrio, separados entre sí por un espacio en el que se ha formado un vacío, adicionalmente, la superficie externa del tubo interior posee un recubrimiento selectivo (alta absortividad y baja emisividad). El vacío entre los tubos suprime las pérdidas de calor por convección y conducción, mientras que la superficie selectiva reduce en gran medida las pérdidas por radiación.

Figura 2.12 Tubos al vacío Dewar para aplicaciones solares



Fuente: http://www.aquaysol.com/inicio.html

Al igual que los colectores planos, los colectores de tubos al vacío captan la radiación solar directa y difusa, pero en comparación a los primeros, lo hacen de forma más eficiente cuando los ángulos de incidencia son pequeños, en consecuencia tienen una ventaja al considerar el desempeño de todo el día. Además, gracias a la superficie selectiva y al fenómeno de supresión de la convección, los colectores de tubos al vacío alcanzan mayores temperaturas de operación que los colectores planos, caracterizándose por hacerlo con un buen rendimiento **[25]**.

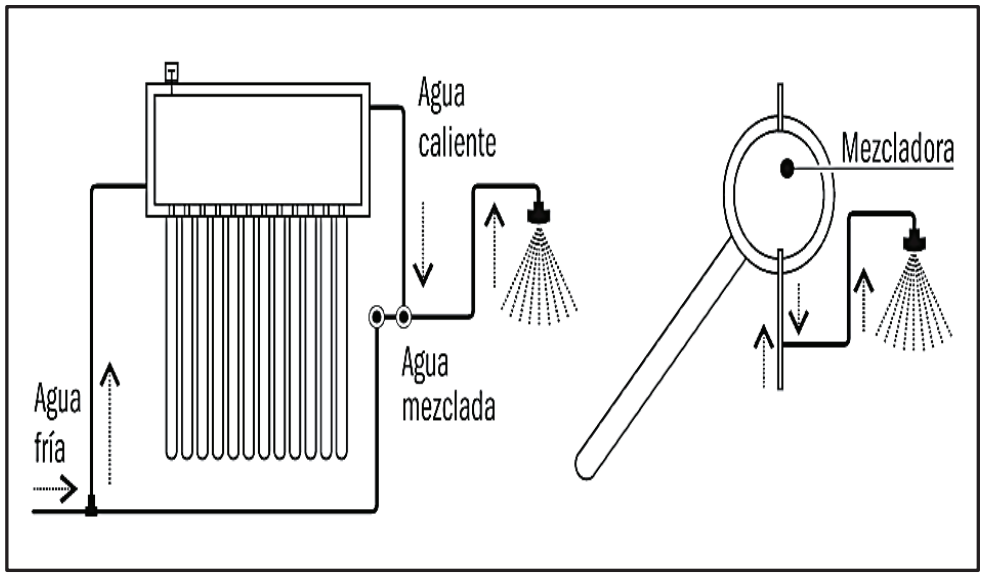
Dos tipos de colectores solares de tubos al vacío serán descritos: los que funcionan por circulación natural (termosifón) y los que utilizan tubos de calor (heat pipes).

2.12.2.2.1. *Colectores solares de tubos al vacío de circulación natural (termosifón)*

En esta clase de colectores solares se usan comúnmente los tubos Dewar antes descritos. Estos se conectan a la parte lateral inferior de un tanque de almacenamiento, permitiendo que el tubo interior se llene por completo de agua. La radiación solar absorbida por la superficie selectiva del tubo se transfiere en forma de calor al agua, provocando el aumento de su temperatura. Debido a un gradiente de densidad, el agua caliente del tubo asciende hasta el tanque, donde cede su calor; al mismo tiempo, el agua fría del tanque desciende hasta el tubo, completándose un circuito. De esta manera se va acumulando paulatinamente el calor en el depósito de almacenamiento.

Una desventaja de este sistema de calentamiento de agua radica en que la presión del tanque se transfiere al tubo, y como este último no soporta altas presiones, el funcionamiento del colector solar debe efectuarse a presión atmosférica **[4]**.

Figura 2.13 Esquema de un colector solar de tubos al vacío con circulación natural



Fuente: Bérriz y Álvarez; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; 2008 **[4]**

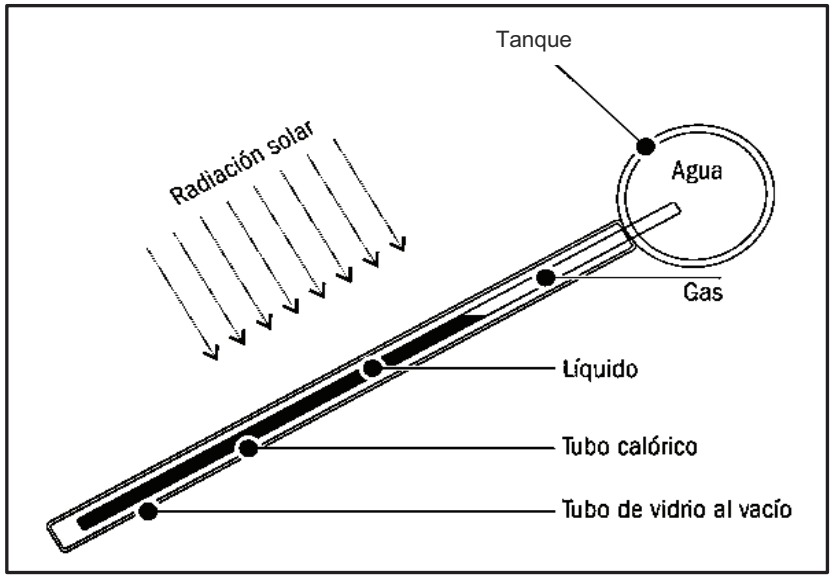
2.12.2.2.2. *Colectores solares con tubos de calor (heat pipe)*

En estos colectores, cada tubo al vacío tiene dentro un tubo de calor (heat pipe) que transmite el calor ganado al agua de un tanque de almacenamiento. Usualmente los tubos calóricos son metálicos, sellados herméticamente y de forma fina y alargada; en su interior contienen un fluido en equilibrio de fase a una determinada presión y temperatura. Cuando aumenta la temperatura, lo hace igualmente la fase gaseosa (vapor); pero si disminuye, predomina la fase líquida. La presión dentro de un tubo calórico se regula para que el proceso de evaporación comience aproximadamente a los 25 ºC, consiguiéndose que el colector funcione adecuadamente cuando la radiación solar es baja.

El extremo superior del tubo calórico termina en un bulbo que se introduce en la parte inferior de un tanque de agua. Cuando la radiación solar incide sobre el colector, aumenta la temperatura dentro de cada tubo calórico, generándose vapor que asciende hasta llegar al bulbo en contacto con el agua, donde se condensa confiriendo su calor latente. Desde allí el condensado desciende por gravedad a la parte baja del tubo de calor, completando un ciclo, que se repite continuamente, mientras exista radiación solar disponible **[4]**.

Los tubos de vidrio al vacío se fabrican generalmente de borosilicato, material de buenas propiedades ópticas y resistencia mecánica. Los colectores con tubos de calor deben tener una inclinación de al menos 20° con respecto a la horizontal, condición necesaria para que el condensado baje por gravedad sin dificultad **[4]**.

Figura 2.14 Esquema de un colector solar con tubos de calor



Fuente: Bérriz y Álvarez; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; 2008 **[4]**

2.12.3. COLECTORES CONCENTRADORES

Si se reduce el área por donde tienen lugar las pérdidas de calor, pueden alcanzarse temperaturas de operación muy superiores a las de los colectores solares planos. Una manera de lograr este objetivo consiste en interponer un dispositivo óptico entre el Sol y la superficie de absorción. De modo que una cantidad muy grande de radiación solar sea concentrada en un área relativamente pequeña **[24]**. Un parámetro muy importante en el análisis de los colectores concentradores es el factor de concentración, el cual es igual a la división entre el área de apertura de la superficie de reflexión y el área de la superficie receptora. En la **Tabla 2.11** se exponen el factor de concentración y la temperatura de operación de los colectores solares de concentración más representativos.

Las principales ventajas de los colectores de concentración en relación a los colectores planos son **[24]**:

1) Mayores temperaturas de operación con la misma área de captación de energía, consecuentemente, la eficiencia termodinámica es también más elevada.
2) Con un área de recepción pequeña, las pérdidas de calor se reducen y con ello aumenta la eficiencia térmica.
3) Las superficies reflectoras son más económicas y fáciles de construir que los colectores solares planos.
4) Debido al tamaño relativamente pequeño de las superficies receptoras, es posible usar recubrimientos selectivos y disminuir la pérdidas de calor por convección, de forma similar a como se lo hace en los tubos al vacío para aplicaciones solares.

Las desventajas son **[24]**:

1) Los colectores de concentración captan poca radiación solar difusa, cuya cantidad disminuye a medida que aumenta el factor de concentración.
2) Los colectores requieren de un sistema que siga al Sol y los posicione en su dirección.
3) Las superficies reflectoras pueden perder con el tiempo sus propiedades ópticas, siendo necesaria una limpieza y mantenimiento frecuentes

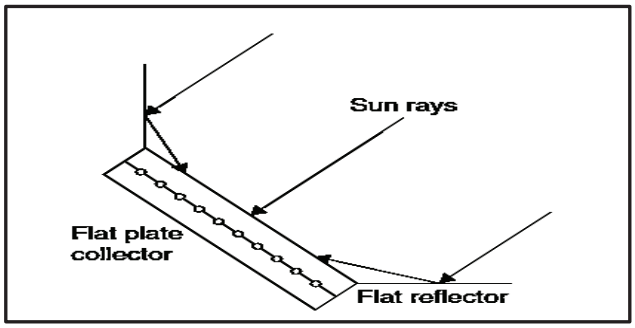
Tabla 2.11 Colectores solares: Factor de concentración y temperatura de operación

TIPO DE COLECTOR SOLAR	FACTOR DE CONCENTRACIÓN	TEMPERATURA DE OPERACIÓN (°C)
Colector plano	1	≤ 70
Colector plano de alta eficiencia	1	60−120
Colector de tubos al vacío	1	50−200
Concentrador parabólico compuesto	1−5	60−240
Colector cilindro parabólico	10−50	150−350
Reflector lineal Fresnel	10−40	60−250
Reflector de plato parabólico	200−500	250−700
Receptor central	500−>3000	500−>1000

Fuente: Elaborado a partir de Kalogirou; "Solar Energy Engineering"; 2009 [**24]** y Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

Un aparato muy simple para concentrar la radiación solar se construye con espejos convencionales acoplados a un colector plano. Con este sistema puede incrementarse de manera significativa la cantidad de radiación directa que incide sobre el colector.

Figura 2.15 Colector solar plano con espejos



Fuente: Kalogirou; "Solar Energy Engineering"; 2009 [**24]**

Dependiendo de si la imagen del Sol se focaliza o no en el receptor, los colectores solares de concentración pueden clasificarse en colectores no formadores de imagen y en formadores de imagen. Al primer grupo pertenece el concentrador parabólico compuesto y al segundo, todos los demás colectores de concentración **[24]**:

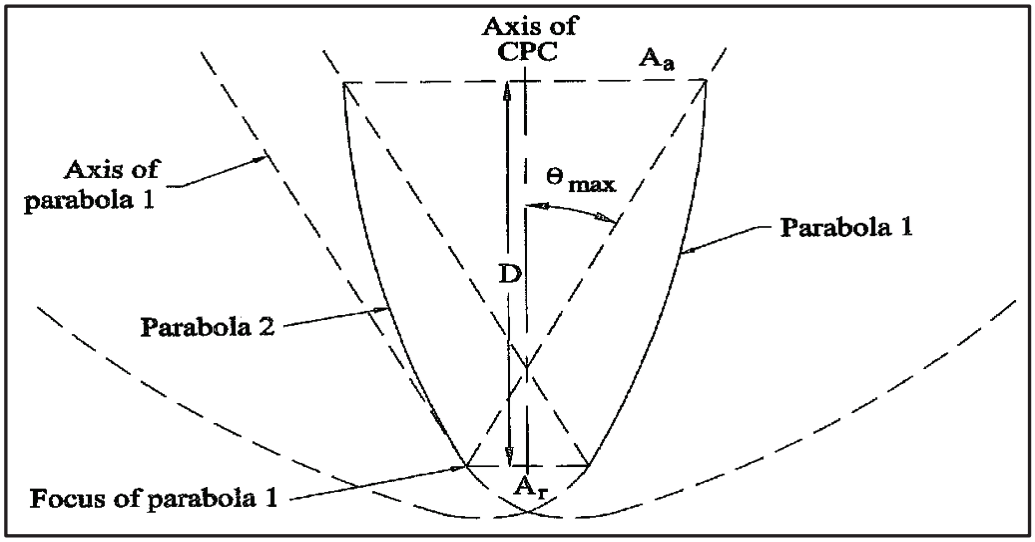
- **a)** Colector cilindro parabólico
- **b)** Reflector lineal Fresnel
- **c)** Reflector de plato parabólico
- **d)** Receptor central

2.12.3.1. Concentrador parabólico compuesto (CPC)

Los concentradores parabólicos compuestos son colectores no formadores de imagen, es decir, que no pueden focalizar la imagen del Sol en un receptor. Se caracterizan porque prácticamente no necesitan de sistemas que los posicionen en dirección del Sol. Además, tienen la particularidad de concentrar toda la radiación que ingresa por su apertura con un ángulo de incidencia dentro de un rango definido. Los límites de este rango, que pueden ser amplios, constituyen el ángulo de aceptación del CPC. Una ventaja de estos colectores en relación a otros sistemas de concentración, radica en su capacidad de aprovechar la radiación difusa que se encuentra dentro del ángulo de aceptación **[10]**.

Un CPC está formado por dos segmentos de parábola, el foco de cada segmento se localiza en el extremo opuesto de la superficie del receptor. Las parábolas se extienden hasta que su superficie se hace paralela al eje del colector. El ángulo entre este eje y la línea que une el foco de una de las parábolas con el borde opuesto de la apertura, constituye la mitad del ángulo de aceptación, θ_{max}. Si el reflector es perfecto, toda la radiación solar que llega al colector entre $\pm\,\theta_{max}$ será concentrada en el receptor **[10] [9]**.

Figura 2.16 Corte esquemático de un concentrador parabólico compuesto



Fuente: Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

La fracción de radiación difusa captada por un CPC se define por **[9]**

$$F_d = \frac{1}{C_r} \tag{2.38}$$

Donde C_r es el factor de concentración del colector y F_d la porción de radiación difusa captada.

2.12.3.2. Colector cilindro parabólico

El colector cilindro parabólico es el sistema básico de concentración con foco lineal, su uso es apropiado en aplicaciones que necesiten factores de concentración de valor medio. La superficie óptica produce una línea focal que tiene una característica muy útil; se mantiene a una distancia constante del vértice de la parábola, para todos los ángulos de incidencia de la radiación en sentido longitudinal **[39]**.

Esta propiedad le permite a un colector orientado en la dirección Este - Oeste mantener concentrada la imagen del Sol en el receptor a lo largo del día; siendo necesario un ligero ajuste diario de su posición, en respuesta al movimiento norte - sur del Sol **[39]**. En la **Figura 2.17 (b)** se indica el esquema de un colector cilindro parabólico.

2.12.3.3. Reflector lineal Fresnel

Un reflector linear Fresnel se compone de un conjunto de espejos alargados y alineados entre sí, que concentran la radiación solar en un receptor lineal montado en una torre. Dicho colector puede describirse como un cilindro parabólico, al que se lo ha dividido en muchas partes, pero cada una de ellas con forma plana en lugar de parabólica. Existe facilidad para construir receptores de gran longitud, gracias a que estos permanecen fijos en la torre. La principal ventaja de esta tecnología en comparación con otros sistemas parabólicos reside en el uso de espejos planos de bajo costo; si además se montan los espejos cerca del suelo, los requerimientos estructurales se reducen significativamente **[25]**. La **Figura 2.17 (d)** muestra la representación de un reflector lineal Fresnel.

2.12.3.4. Reflector de plato parabólico

Un reflector de plato parabólico es un dispositivo que concentra la radiación solar en un receptor ubicado en el punto focal del plato. Para posicionar al colector en dirección del Sol se precisa de un sistema de seguimiento con movimiento en dos ejes.

Los reflectores de plato parabólico tienen ventajas muy importantes:

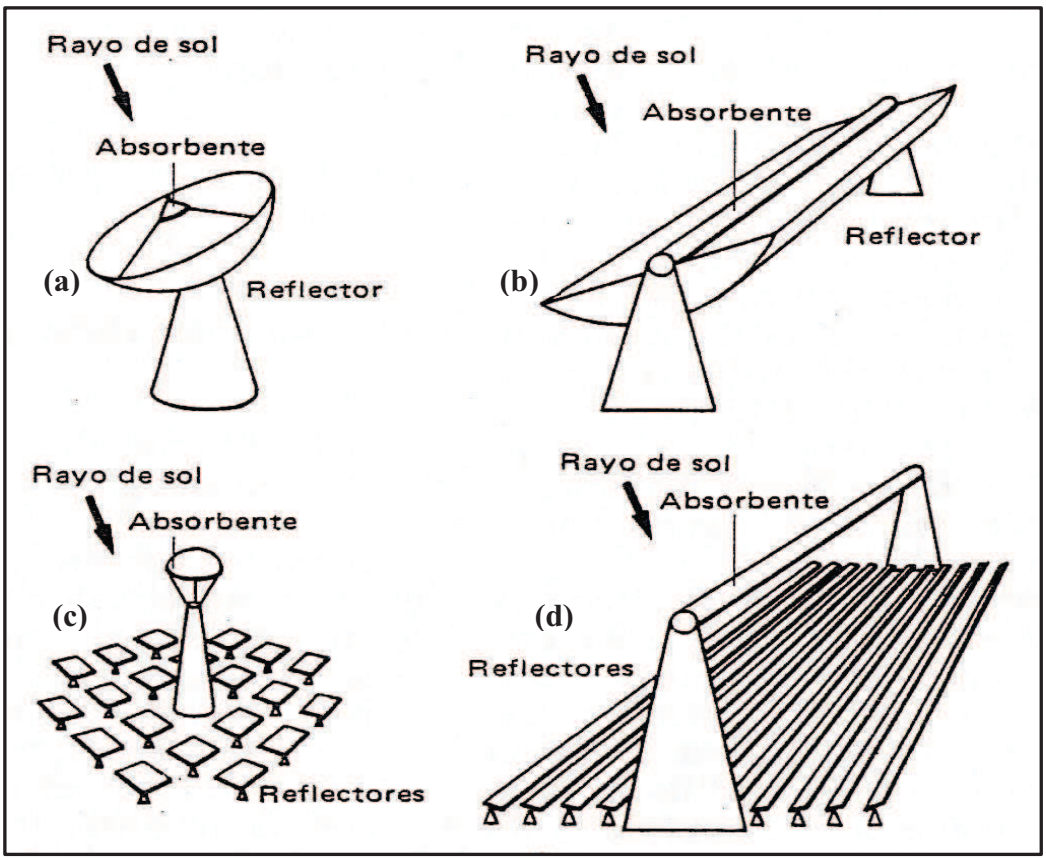
1. Por estar siempre apuntando en dirección del Sol son los colectores más eficientes.
2. Al tener altos factores de concentración (200−500) son muy eficientes al formar parte de sistemas de conversión de potencia.
3. Si se considerara al colector como una unidad modular, puede trabajar de forma independiente o como parte de un sistema más grande de colectores.

Estos colectores se usan principalmente con motores que transforman la radiación solar en energía eléctrica **[25]**. En la **Figura 2.17 (a)** se observa el esquema de un reflector de plato parabólico.

2.12.3.5. Receptor central

Para evitar el costo y pérdidas de calor al transportar el fluido de trabajo a una locación central, en esta tecnología, la propia radiación solar es utilizada como medio de transporte. El sistema está constituido por un receptor en lo alto de una torre y un conjunto muy grande de reflectores distribuidos en un campo, el receptor se ubicada en el centro o en uno de los bordes del campo. Durante el movimiento del Sol, los reflectores deben ser capaces de dirigir y mantener la radiación directa en el punto donde se sitúa el receptor. En una instalación típica, los heliostatos[3] están localizados en el plano horizontal, pero si las condiciones del terreno son buenas, simplemente se disponen siguiendo el contorno del suelo **[39]**. El esquema de un receptor central se ilustra en la **Figura 2.17 (c)**.

Figura 2.17 Colectores solares concentradores formadores de imagen



Fuente: Palz; "Electricidad Solar"; 1978 **[48]**

[3] Los heliostatos son espejos planos o ligeramente convexos, que al seguir la trayectoria del Sol mantienen reflejada la radiación directa en un objeto fijo determinado.

2.12.4. ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA ENTREGADA POR UN COLECTOR SOLAR PLANO

La energía útil entregada por un colector solar plano, Q_u, depende de factores como la radiación solar recibida, el diseño y materiales del colector, el área de la superficie de absorción, la temperatura de trabajo y la temperatura ambiente. El valor de Q_u se puede calcular a partir de la ecuación **[4]**:

$$Q_u = A_c \left[S - U_L\left(T_{pm} - T_a\right)\right] \tag{2.39}$$

Donde A_c es el área del colector solar (m^2), S la radiación total absorbida (W/m^2), U_L el coeficiente total de pérdidas del colector ($W/m^2 \cdot °C$), T_{pm} la temperatura media de la placa de absorción (°C) y T_a la temperatura ambiente (°C).

El uso de la **Ecuación 2.39** no es muy conveniente, ya que la obtención y medición de T_{pm} son tareas difíciles. Por tal motivo, es mejor expresar Q_u en función de la temperatura de entrada del fluido y del factor de remoción de calor. Este último es la relación entre la energía útil entregada por el colector y la energía que se entregaría si todo el colector estuviera a la temperatura de entrada del fluido de trabajo. Con estas indicaciones, Q_u se expresa como **[10]**

$$Q_u = A_c \cdot F_R \left[S - U_L(T_e - T_a)\right] \tag{2.40}$$

Donde F_R es el factor de remoción de calor del colector y T_e la temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector (°C).

El coeficiente total de pérdidas U_L es uno de los factores que más influye en el desempeño de un colector plano. Su cálculo se realiza mediante un proceso iterativo, utilizando las teorías de transferencia de calor. La ecuación del coeficiente U_L es la siguiente **[4]**

$$U_L = U_{sup} + U_f + U_e \tag{2.41}$$

Donde U_{sup} es el coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector, U_f el coeficiente de pérdidas por el fondo del colector y U_e el coeficiente reducido de pérdidas laterales.

El parámetro más importante de la **Ecuación 2.41** es el coeficiente U_{sup}, este se puede calcular de forma directa (evitando el tedioso método iterativo) con la expresión empírica propuesta por Klein (1979) **[4]**:

$$U_{sup} = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \cdot \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{(N+f)} \right]^e} + \frac{1}{h_{vc}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591\, N \cdot h_v)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\, \varepsilon_p}{\varepsilon_g} - N} \tag{2.42}$$

Donde:

N = Número de cubiertas transparentes

$f = (1 + 0.089 \cdot h_v - 0.1166 \cdot h_v \cdot \varepsilon_p)(1 + 0.07866 \cdot N)$

$C = 520(1 - 0.000051 \cdot \beta^2)$ para $0 < \beta < 70°$

$e = 0.430\ (1 - 100/T_{pm})$

β = Ángulo de inclinación del colector (grados)

ε_g = Emisividad del vidrio

ε_p = Emisividad de la placa de absorción

T_a = Temperatura ambiente (K)

T_{pm} = Temperatura media de la placa (K)

h_{vc} = Coeficiente de transferencia de calor debido al viento (W/m^2 ·°C)

σ = Constante de Stefan-Boltzmann

Para estimar el coeficiente de pérdidas por el fondo del colector, U_f, se debe asumir que todo el calor se disipa hacia el medio ambiente por conducción a través del aislante térmico, se tiene entonces que **[4]**

$$U_f = \frac{k_f}{L_f} \tag{2.43}$$

Siendo k_f la conductividad térmica del aislante colocado detrás de la placa de absorción (W/m ·°C) y L_f su espesor (m).

De forma similar se calcula el coeficiente reducido de pérdidas laterales, U_e; considerando que debe estar referido al área del colector, su formulación es la siguiente

$$U_e = \frac{A_e \cdot k_e}{A_c \cdot L_e} \tag{2.44}$$

Donde A_e, k_e y L_e son el área, la conductividad térmica y el espesor del aislante lateral, respectivamente **[4]**.

El factor de remoción de calor F_R se expresa como

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p}{A_c \cdot U_L}\left[1 - \exp\left(-\frac{A_c \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m} \cdot C_{pw}}\right)\right] \tag{2.45}$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo de agua (o líquido) por el colector (kg/s), C_{pw} el calor específico del fluido calor portador (J/kg·°C) y F' el factor de eficiencia del colector. En un punto específico del colector, F' representa la relación entre la energía útil ganada y la energía que se ganaría si la placa de absorción estuviera a la temperatura local del fluido. El factor de eficiencia del colector es básicamente constante para un flujo y diseño específicos **[10]**.

El factor F' se define por **[24]**

$$F' = \frac{1/U_L}{W\left[\frac{1}{U_L[D + (W - D)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \cdot D_i \cdot h_{fi}}\right]} \tag{2.46}$$

Donde h_{fi} es el coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el tubo, C_b la conductancia térmica de la unión entre la placa y el tubo, W la distancia entre tubos, D y D_i el diámetro exterior e interior de los tubos, respectivamente y F la eficiencia estándar para aletas rectas de forma rectangular (la placa a cada lado del tubo es una aleta, ver la **Figura 2.18**).

La eficiencia estándar de la aleta se establece por la siguiente formulación **[24]**

$$F = \frac{\tanh[m\,(W - D)/2]}{m\,(W - D)/2} \tag{2.47}$$

El parámetro m está dado por la relación **[24]**

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k \cdot \delta}} \tag{2.48}$$

Donde k es la conductividad térmica de la placa de absorción y δ el espesor de la placa.

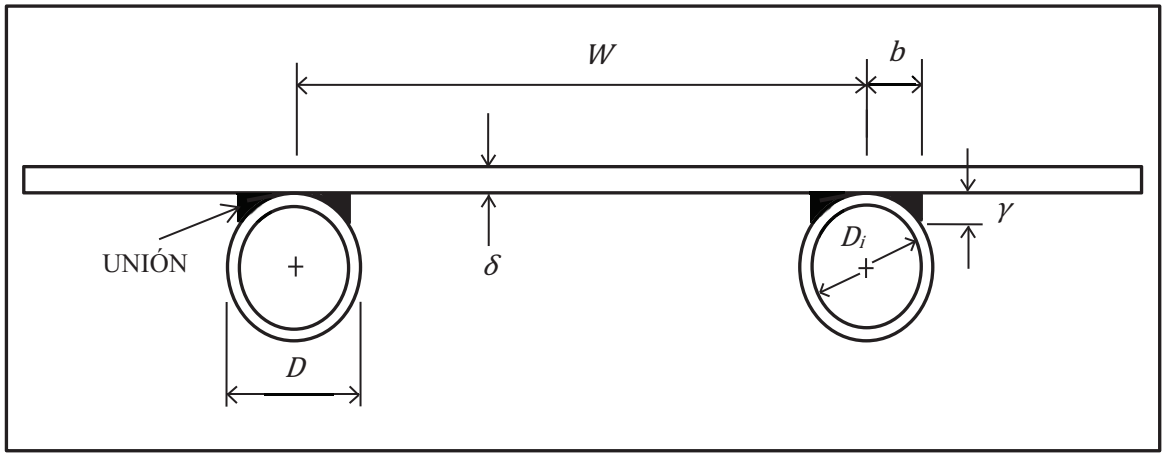
Dependiendo de si el flujo es laminar o muy turbulento, el valor del coeficiente de transferencia de calor entre el fluido y el tubo, h_{fi}, puede fluctuar entre 100 y 1000 (W/m$^2 \cdot$°C) **[10]**.

La conductancia térmica de la unión entre la placa y el tubo, C_b, es igual a **[24]**:

$$C_b = \frac{k_b \cdot b}{\gamma} \tag{2.49}$$

Siendo k_b la conductividad térmica de la unión, b y γ el ancho y espesor de la unión, respectivamente. Para que un colector solar plano tenga un buen rendimiento es necesario que C_b sea mayor a 30 (W/m·°C) **[10]**. Todas las constantes geométricas presentes en las ecuaciones anteriores se ilustran en la **Figura 2.18**.

Figura 2.18 Configuración entre la placa y los tubos en un colector solar plano



Ahora se precisa evaluar la radiación solar absorbida, S, la misma se determina por **[10]**

$$S = G_c \cdot \left(\tau\alpha_p\right)_e \tag{2.50}$$

Donde G_c es la radiación total incidente sobre el colector (W/m^2) y $(\tau\alpha_p)_e$ el valor efectivo del producto transmisividad-absortividad de un colector plano. El parámetro $(\tau\alpha_p)_e$ tiene una gran influencia en la eficiencia de un colector solar; este depende de las características del material de la cubierta (absortividad, reflectividad y transmisividad), del espesor de las planchas transparentes, de su número y de la absortividad de la placa **[4]**.

El valor de $(\tau\alpha)_e$ en colectores con vidrio ordinario se aproxima a

$$(\tau\alpha_p)_e \cong 1.02\tau\alpha_p \tag{2.51}$$

Para colectores con cubiertas que tienen una absorción despreciable de la radiación solar se tiene que

$$(\tau\alpha_p)_e \cong 1.01\tau\alpha_p \tag{2.52}$$

Donde τ es la transmisividad de la cubierta y α la absortividad de la placa de absorción **[10]**.

Sustituyendo (2.50) en la **Ecuación 2.40** se obtiene

$$Q_u = A_c \cdot F_R \left[G_c \cdot (\tau\alpha_p)_e - U_L(T_e - T_a)\right] \tag{2.53}$$

Para evaluar de manera precisa U_L, F_R y F'mediante un proceso iterativo es útil la siguiente ecuación de la temperatura media de la placa de absorción, T_{pm} **[10]**:

$$T_{pm} = T_e + \frac{Q_u/A_c}{F_R \cdot U_L} \cdot (1 - F_R) \tag{2.54}$$

Por último, la eficiencia de un colector solar plano es

$$\eta_c = \frac{Q_u}{G_c \cdot A_c} \tag{2.55}$$

2.12.5. CALENTAMIENTO SOLAR DEL AGUA

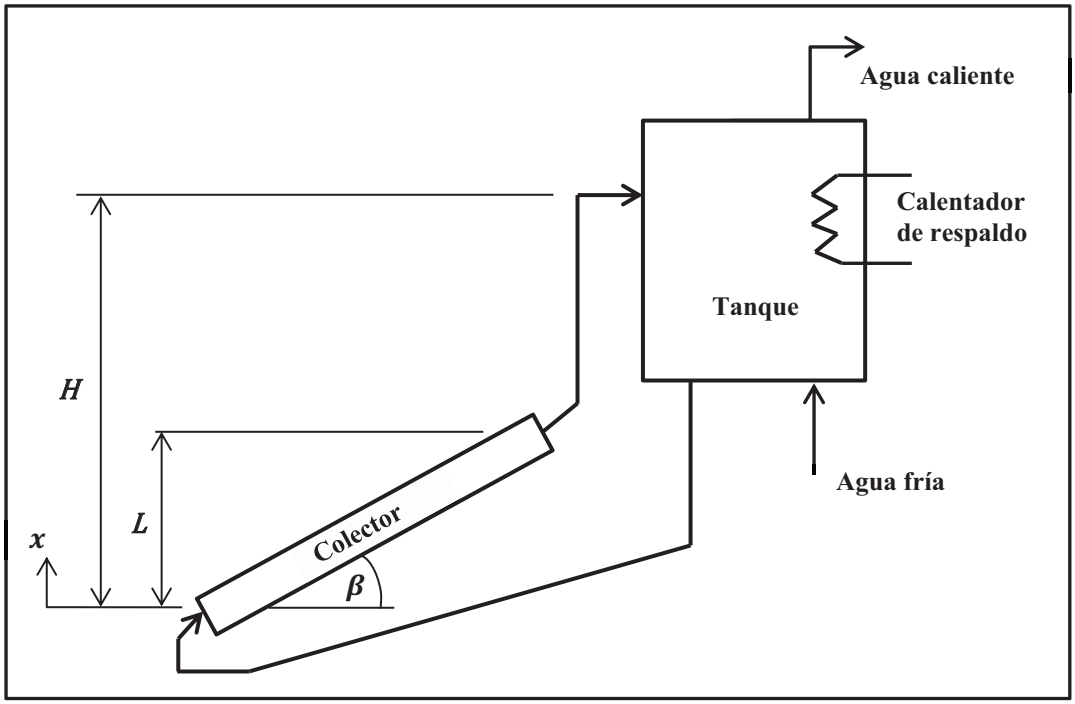
En la actualidad, el calentamiento de agua es la aplicación más generalizada para la energía solar. Pequeños sistemas se destinan para el calentamiento de agua de uso doméstico y otros más grandes son utilizados en aplicaciones industriales. Fundamentalmente existen dos tipos de sistemas para el calentamiento de agua: sistemas pasivos o de circulación

natural (termosifón) y sistemas activos o de circulación forzada. Los calentadores que trabajan con circulación natural son simples y económicos, se usan habitualmente en climas donde la temperatura no desciende del punto de congelación del agua. Los equipos que operan por circulación forzada se implementan en procesos comerciales e industriales de calentamiento de agua, así como en lugares donde se presentan temperaturas bajo cero **[9]**.

2.12.5.1. Sistemas de circulación natural (termosifón)

La tendencia natural que tiene un líquido para elevarse sobre otro más denso, puede aprovecharse para provocar el movimiento de agua a través de un colector solar. Dentro del colector, la circulación del agua ocurre gracias a un gradiente de densidad generado por la absorción de la radiación solar **[9]**. En la **Figura 2.19** se observa el esquema de un calentador solar que opera por termosifón (consta de un colector, un tanque de almacenamiento y tuberías de conexión). Conforme el agua se calienta dentro del colector, asciende hasta la parte superior del tanque de almacenamiento, al mismo tiempo, el agua fría en el fondo del tanque baja hasta el extremo inferior del colector, completándose un circuito. Como se puede apreciar en la figura, el tanque se instala arriba del colector, esta es una condición necesaria para el funcionamiento de un sistema por circulación natural.

Figura 2.19 Esquema de un calentador solar de agua que opera por termosifón



El gradiente de densidad entre el agua del colector y del tanque origina una presión de empuje (ΔP_{empuje}) que permite la circulación del fluido entre estos dos elementos. La suma de todos los cambios de presión en el sistema debe ser igual a cero, en consecuencia, la caída de presión debida al movimiento del agua (ΔP_{flujo}) tendrá que ser igual a la presión de empuje.

Se tiene entonces que **[9]**:

$$\Delta P_{flujo} = \Delta P_{empuje} \tag{2.56}$$

$$\Delta P_{flujo} = \rho_t \cdot g \cdot H - \left[\int_0^L \rho(x) \cdot g \cdot dx + \rho_s \cdot g \cdot (H - L)\right] \tag{2.56.1}$$

Donde H es la distancia entre el extremo inferior del colector y la entrada de agua caliente al tanque (m), L la altura del colector (ver la **Figura 2.19**), g la gravedad, $\rho(x)$ la densidad del agua dentro del colector (kg/m^3), ρ_t la densidad del agua dentro del tanque y ρ_s la densidad del agua a la salida del colector, estas dos últimas se asumen constantes. En realidad, la densidad del agua en el tanque de almacenamiento no es constante, ya que se produce un fenómeno de estratificación, donde el líquido en la parte superior tiene una mayor temperatura que en el fondo.

$$\Delta P_{flujo} = \oint \rho d(h_L) \tag{2.57}$$

La caída de presión originada por la circulación del agua se establece por **[9]**

$$h_L = K \cdot v^2 \tag{2.58}$$

Donde el término v es la velocidad del agua (m/s) y K la suma de todos los factores de pérdidas asociados a esta velocidad. Con el conocimiento de v, resulta fácil determinar el flujo másico de agua que circula por el colector. Se debe recordar que las unidades de ΔP_{flujo} y ΔP_{empuje} se dan en (N/m^2).

Un estudio más profundo de los sistemas de circulación natural ha sido realizado por Morrison y Ranatunga (1980) **[31]**, y por Morrison y Braun (1985) **[32]**. En estas investigaciones, la estimación de la energía entregada por un colector plano toma en cuenta las dimensiones del calentador solar, las temperaturas en sus diferentes partes, los gradientes de densidad que dependen de estas temperaturas, las presiones originadas por estos gradientes y los flujos de agua resultantes.

En un análisis más simple, Löf y Close (1967) y Cooper (1973) **[10]** notaron que bajo un amplio rango de condiciones, el incremento de temperatura en el agua que fluía por muchos colectores de circulación natural era de aproximadamente 10 °C. Al presentarse un aumento constante de temperatura es posible determinar el flujo másico de agua, y por ende también, el calor entregado por el colector.

Con estas consideraciones se llega a las siguientes relaciones **[10]**:

$$Q_u = A_c \cdot F_R \left[S - U_L(T_e - T_a)\right] \tag{2.59}$$

La ecuación anterior corresponde a la energía útil entregada por el colector, otra forma de expresar esta ganancia de energía es

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_e) = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T_f \tag{2.60}$$

Donde $\dot{m}$ es el flujo másico de agua (kg/s), C_{pw} el calor específico del agua (J/kg·°C), T_s la temperatura a la que sale el agua del colector (°C) y ΔT_f el incremento constante en la temperatura del agua.

Al igualar (2.59) y (2.60), y después despejando $\dot{m}$, resulta

$$\dot{m} = \frac{A_c \cdot F_R \left[S - U_L(T_e - T_a)\right]}{C_{pw} \cdot \Delta T_f} \tag{2.61}$$

Esta ecuación se puede resolver asumiendo que F'es independiente del flujo de agua; así, al sustituir F_R por (2.45) y reordenando, se obtiene

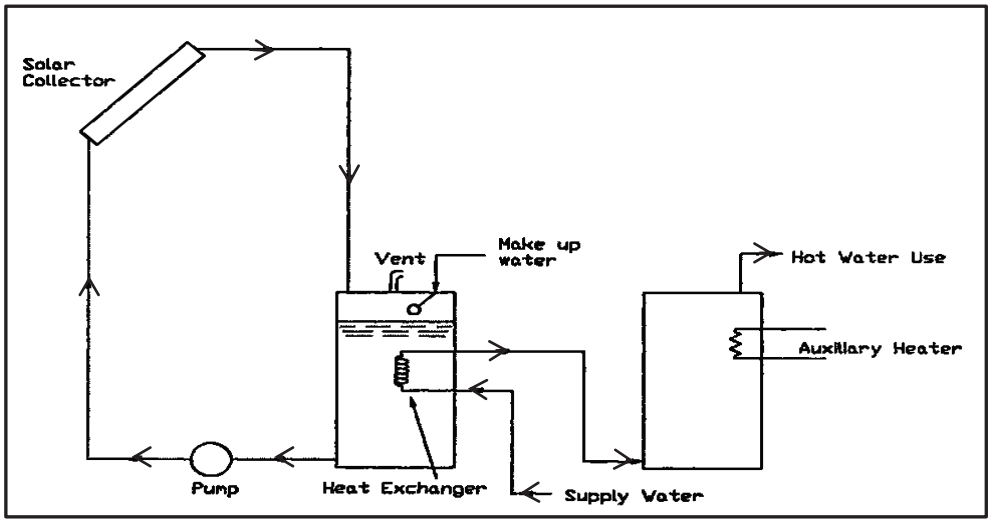
$$\dot{m} = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c}{C_{pw} \cdot \ln\left[1 - \frac{U_L(T_s - T_e)}{S - U_L(T_e - T_a)}\right]} \tag{2.62}$$

2.12.5.2. Sistemas de circulación forzada

Si un sistema de circulación natural no se puede utilizar por razones climáticas, estructurales o arquitectónicas, será necesaria la instalación de un sistema de circulación forzada. Dos configuraciones serán descritas: a) calentadores de agua con circuito abierto (open loop) y b) calentadores de agua con circuito cerrado (close loop).

En los calentadores con circuito abierto, el colector solar funciona a presión atmosférica, razón por la que permanece vacío cuando no suministra energía útil. La gran cantidad de energía que requiere la bomba para impulsar el agua representa una desventaja de este sistema **[9]**. En el calentador solar de circuito abierto de la **Figura 2.20**, el fluido se bombea desde un tanque despresurizado (abierto a la atmósfera) hacia un colector solar; después de calentarse, el agua regresa al tanque, donde un intercambiador de calor transfiere al agua de suministro la energía captada por el colector. El agua caliente de suministro es a su vez almacenada en otro tanque.

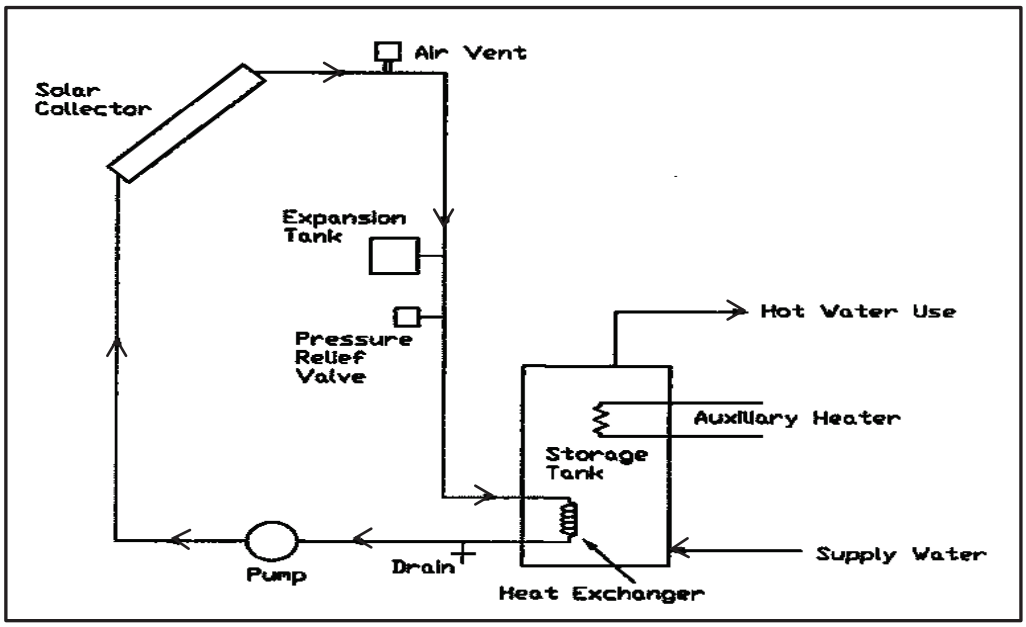
Figura 2.20 Calentador solar de circulación forzada con circuito abierto



Fuente: Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

El elevado consumo de energía por parte de la bomba, puede corregirse con el uso de un calentador solar de circuito cerrado. Puesto que el sistema permanece lleno con agua a presión, la bomba únicamente debe vencer la fricción de las tuberías para impulsar el líquido. Para permitir la expansión térmica del fluido, los calentadores con circuito cerrado se instalan con un pequeño tanque de expansión y una válvula de alivio de presión. Debido a que siempre se tiene agua en el colector de estos equipos, un anticongelante (propilenglicol o etilenglicol) es usado en lugares donde exista el riesgo de heladas **[9]**. En la **Figura 2.21** se aprecia el esquema de un calentador solar con circuito cerrado. La bomba conduce el fluido a presión hacia un colector solar, desde aquí el agua caliente se dirige hasta un intercambiador de calor, donde cede su energía al agua de un tanque de almacenamiento.

Figura 2.21 Calentador solar de circulación forzada con circuito cerrado



Fuente: Goswami et al; "Principles of solar engineering"; 2000 **[9]**

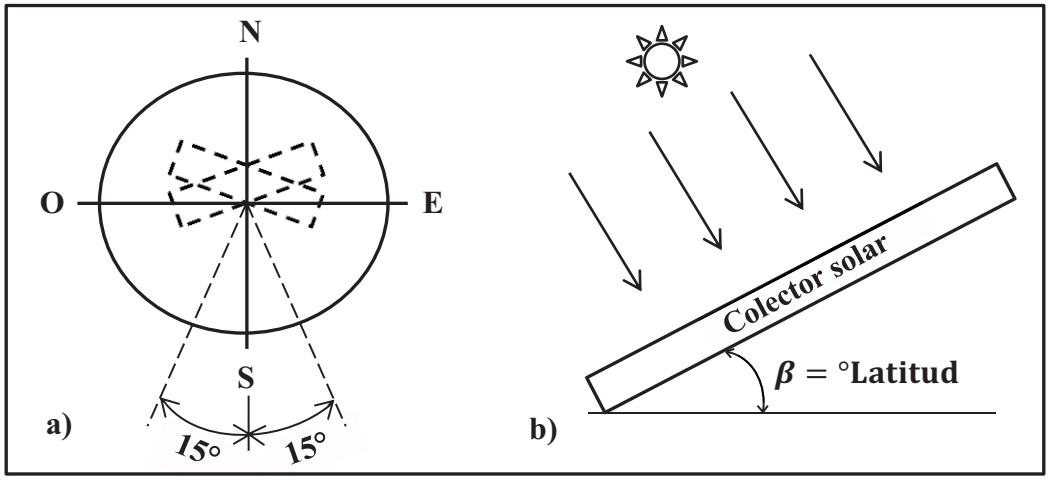
2.12.5.3. Posición del colector en un calentador solar de agua

Con objeto de que los colectores solares absorban la mayor cantidad de radiación posible, estos deben disponerse con una orientación e inclinación específicas. En el hemisferio norte los colectores fijos se instalan mirando hacia el Sur, y en el hemisferio sur, mirando hacia el Norte; recordando que no se habla del Sur o Norte magnético, sino del geográfico. De forma que al instalar un colector con ayuda de una brújula es recomendable modificar su lectura para ubicar el panel solar en la dirección correcta **[30]**.

La orientación sur - norte es la más apropiada, sin embargo, es posible aceptar ciertas variaciones. Si es necesario cambiar la dirección del colector, ya sea por sombras, el clima local u otras situaciones. La variación no deberá exceder los 15° en dirección este u oeste, si se mantiene dentro de estos límites, la reducción de energía captada por el colector será pequeña.

El ángulo que forma el colector con la horizontal se denomina ángulo de inclinación del colector. Este es un parámetro importante en el diseño de sistemas de calentamiento de agua, cuyo valor dependerá de la ubicación geográfica y de las necesidades energéticas. Se considera que el ángulo óptimo de inclinación de un colector fijo (plano o de tubos al vacío) debe ser igual a la latitud geográfica. Por ejemplo, si la latitud de un sitio es de 30° N, la inclinación del colector (β) deberá ser de 30° hacia arriba. El ángulo óptimo de inclinación debe tomarse como una guía de diseño, si por alguna circunstancia no se puede situar el colector con esta inclinación, una variación de $\pm$ 10° del ángulo óptimo, no modifica significativamente la captación de radiación solar **[30]**.

Figura 2.22 a) Límites prácticos de orientación del colector y b) Inclinación del colector



CAPÍTULO 3

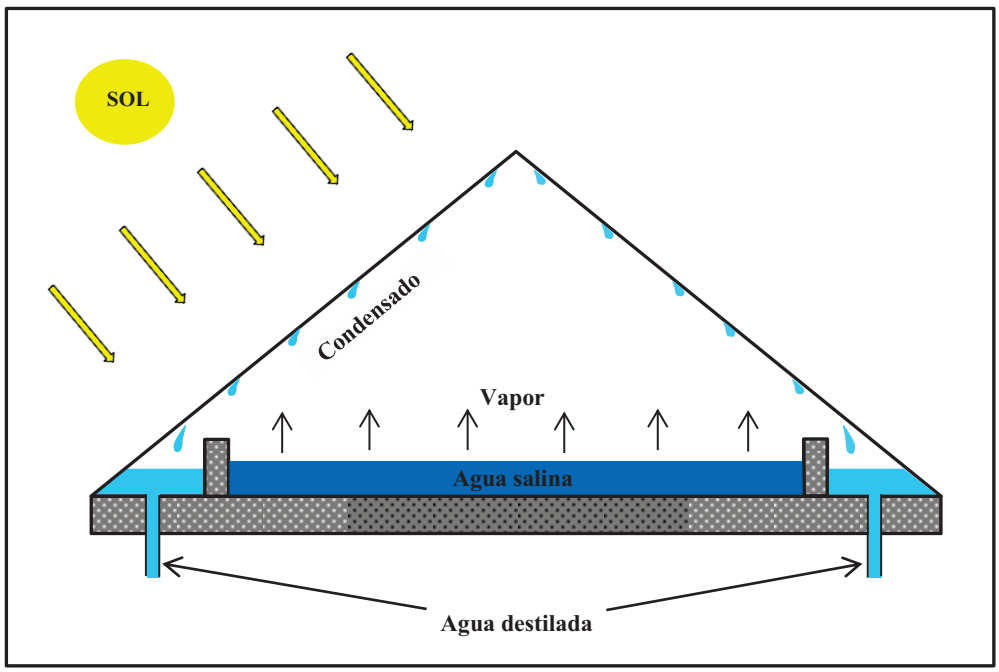
DESALINIZACIÓN SOLAR TÉRMICA

3.1. INTRODUCCIÓN

En el proceso de desalinización, la energía solar se ha utilizado básicamente para destilar agua salina, fenómeno que deja atrás las sales disueltas, obteniéndose agua dulce de alta pureza. De acuerdo a Sayigh A.A.M. **[39]** se han desarrollado dos procedimientos para destilar agua salada con la energía del Sol. El primero consiste en emular a pequeña escala el ciclo hidrológico; en el segundo, la energía solar es captada y transferida a destiladores, que también pueden operar con otras formas de energía. Como se verá más adelante, la clasificación de los destiladores solares depende de estos dos enfoques para desalinizar el agua.

El aparato más simple y económico que imita el ciclo del agua es el destilador solar de estanque, su uso es también el más generalizado. Está conformado por un estanque de agua salina de poca profundidad, sobre el que se dispone una cubierta transparente de vidrio o plástico. La cubierta está inclinada y bajo su extremo inferior se extiende un canal de recolección. La radiación solar atraviesa la cubierta y después es absorbida por el agua y el fondo del estanque, con el subsiguiente calentamiento y evaporación del agua. El vapor asciende y se condensa en la superficie interior de la cubierta, desde allí se desliza hasta caer en el canal, que lo conduce fuera del destilador. La reposición del agua salina puede efectuarse de forma continua o intermitente, procurando vaciar el estanque con regularidad, para reducir la corrosión y el depósito de sales minerales. En la **Figura 3.1** se ilustra el esquema de un destilador solar de estanque típico de doble pendiente.

Figura 3.1 Esquema de un destilador solar de estanque con cubierta de doble pendiente



3.2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Se puede afirmar que el periodo moderno de la destilación solar comenzó con la instalación de un gran destilador de estanque cerca de Las Salinas, norte de Chile. Este destilador con cubierta de vidrio y un área de 4700 m^2 fue diseñado por el ingeniero sueco, Carlos Wilson, y proporcionó agua durante muchos años a una comunidad minera.

En la segunda guerra mundial se desarrollaron destiladores solares inflables hechos de plástico, que eran parte del equipo en los botes salvavidas de la Marina y Fuerza Aérea de los Estados Unidos. Graves sequías afectaron al mundo en la segunda guerra mundial y la década que siguió, situación que originó en Europa y Estados Unidos un aumento en la investigación y desarrollo de tecnologías para la desalinización del agua, entre las que se incluía la destilación solar. Sin embargo, para esta última los recursos financieros fueron relativamente escasos, ya que se dio prioridad a los proyectos de desalinización que utilizaban combustibles fósiles y electricidad, por tener estos la posibilidad de alcanzar antes una fase comercial **[39]**.

Cuando la Universidad de California comenzó su investigación sobre la desalinización en los años 1951 y 1952, esta dio más importancia a los métodos de desalinización que no emplearan combustibles fósiles. Se probaron varias configuraciones de destiladores solares de estanque, tratando de mejorar la eficiencia y reducir los costos de fabricación. Asimismo, se estudió el uso de agua caliente proveniente de motores y procesos industriales para incrementar la producción de los destiladores. No obstante, después de algún tiempo se llegó a la conclusión de que los destiladores solares de estanque, no podían competir económicamente con otras plantas de gran escala. Así, a partir de 1960 las investigaciones sobre destilación solar disminuyeron, concentrándose mayormente en el desarrollo y perfeccionamiento de pequeñas instalaciones, que provean agua potable para viviendas aisladas y pequeñas comunidades.

Otras investigaciones realizadas fuera y dentro de los Estados Unidos llegaron a las mismas conclusiones que la Universidad de California. Los trabajos han sido muy intensos en los Estados Unidos, un importante experimento sobre la destilación solar a gran escala se efectuó en Dayton Beach, Florida. En otros países como Grecia, Argelia y Australia, también se ha investigado la destilación solar, enfocándose los estudios en instalaciones de gran escala con destiladores de estanque. La más grande se construyó en la isla de Patmos, Grecia, con una capacidad de aproximadamente 40 m^3/día. A pesar de estos esfuerzos, se determinó finalmente que otros procedimientos para la desalinización a gran escala eran más económicos. Con estos antecedentes, cerca de 1970 los Estados Unidos y otros países, redujeron considerablemente la construcción de destiladores solares de gran escala. En Australia, sin embargo, continuó el desarrollo de plantas de destilación solar de mediana escala, bajo el auspicio de la Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO) **[39]**.

3.3. FACTORES QUE FAVORECEN EL USO DE LOS DESTILADORES SOLARES

La evaporación del agua en el proceso de destilación consume grandes cantidades de energía, aproximadamente 2390 kJ por cada litro de agua destilada producida. Por esta razón es recomendable que los destiladores solares se sitúen en lugares cálidos con radiación solar abundante, donde las necesidades de agua sean de unos pocos metros cúbicos al día.

Los principales factores que favorecen el uso de los destiladores solares son **[45] [33]**:

1) No se dispone de agua dulce, pero sí de agua salina.
2) Sólo se necesitan pocos metros cúbicos de agua al día.
3) Elevados niveles de radiación solar.
4) Difícil adquisición o alto precio de los combustibles.
5) Precipitaciones menores a 500 milímetros al año.
6) Altos costos del transporte de agua desde otros lugares.
7) Se dispone de terrenos relativamente planos para la instalación de los destiladores solares.
8) Los terrenos donde se ubicaran los destiladores no siempre poseen energía eléctrica o mano de obra altamente calificada.

3.4. CALIDAD DEL AGUA PRODUCIDA POR LOS DESTILADORES SOLARES

El particular sabor insípido del agua destilada comercial se debe a la reducción de su pH durante la ebullición. Por el contrario, el agua producida en un destilador solar proviene de un proceso de evaporación y condensación similar al que origina la lluvia. Condición que permite un amortiguamiento del pH, obteniendo como resultado un agua de mejor calidad.

La destilación solar es una tecnología autónoma que se emplea en el punto de uso, remueve con facilidad sales y microorganismos nocivos como el parásito Cryptosporidium y la bacteria Escherichia coli; tiene también la capacidad de eliminar el arsénico. El destilador solar de estanque se caracteriza por suministrar agua potable de gran pureza a partir de fuentes muy contaminadas, eliminando el 99.9 % de la bacterias presentes en el agua **[45]**.

3.5. TRATAMIENTO DEL AGUA Y DEPÓSITOS EN EL INTERIOR DE UN DESTILADOR SOLAR

El flujo de agua es mínimo dentro del estanque de un destilador solar, por tal motivo se vuelve inevitable la sedimentación de partículas suspendidas en el agua, siendo necesaria su remoción antes de que ingresen al destilador. En instalaciones pequeñas, el tanque de alimentación puede funcionar como un compartimiento de sedimentación, debiendo el agua permanecer en reposo por un tiempo apropiado. En instalaciones más grandes es recomendable la utilización de un filtro de arena.

El agua pierde parte de su sabor durante la destilación, para revertir este fenómeno, comúnmente se mezcla el destilado con agua regular del suministro o se le agrega un poco de sal. También se pueden añadir iones de calcio, al permitir el flujo de agua destilada a través de mármol granulado, mejorando el sabor percibido por el consumidor.

Con la evaporación del agua, aumenta la concentración de sales minerales en el estanque del destilador, situación que promueve la formación de depósitos en el fondo y paredes del mismo. Los depósitos son generalmente de carbonato de calcio, sulfato de calcio y en casos extremos de cloruro sódico. Debido a que la remoción de estos depósitos puede ser difícil y costosa, su formación debe ser controlada. Un método eficaz para cumplir este objetivo consiste en remover la salmuera, antes de que las sales disueltas alcancen el punto de saturación. Usualmente, mientras se evapora el líquido del estanque, se alimenta con agua salina al destilador, hasta que la concentración de la salmuera sea cercana al doble de la existente en el agua de alimentación; en ese momento se evacúa la salmuera y se llena de nuevo el estanque. Con la aplicación de este procedimiento se obtiene un litro de agua destilada por cada dos litros de agua salina, descartándose un litro de salmuera. En algunos destiladores el flujo de alimentación es constante, así se logra mantener la concentración de sales disueltas en niveles adecuados, sin necesidad de tomar otras precauciones **[33]**.

3.6. CLASIFICACIÓN DE LOS DESTILADORES SOLARES

Los destiladores solares se clasifican principalmente en sistemas pasivos y activos. En los destiladores activos, el agua salina recibe una cantidad adicional de energía térmica, esta puede provenir de colectores solares o del calor desechado por motores y procesos industriales **[45]**.

3.6.1. DESTILADORES SOLARES PASIVOS

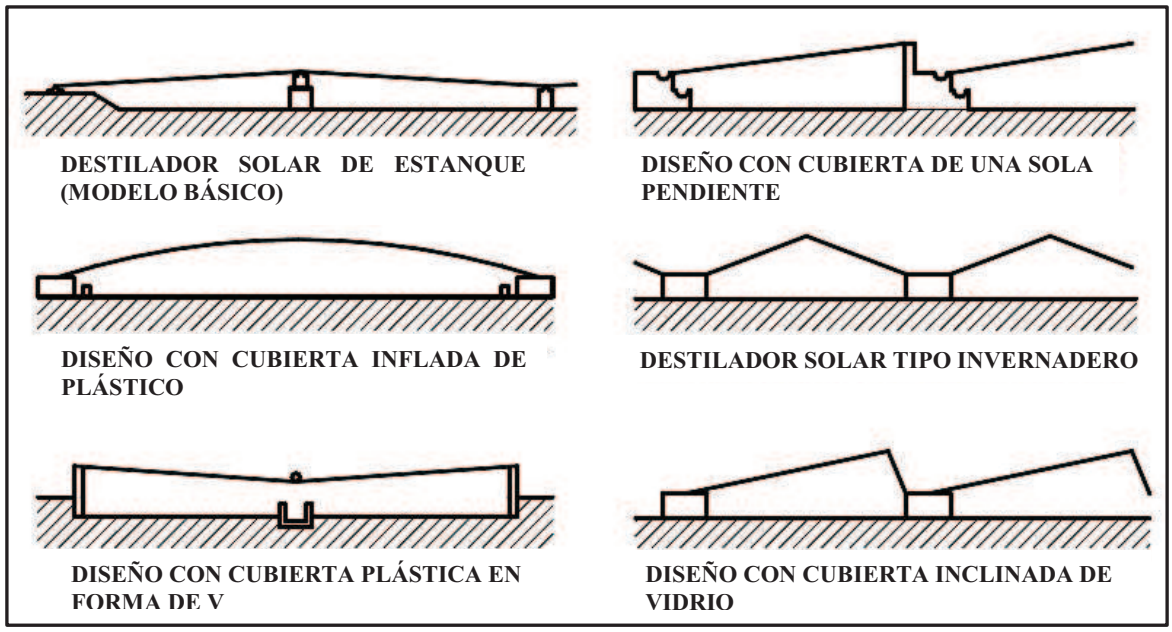
En los destiladores solares pasivos, el Sol calienta directamente el agua salina sin la energía adicional de un colector solar u otro dispositivo. A continuación, se describirán algunos destiladores pasivos que se han considerado representativos.

a) Destiladores solares convencionales

El diseño y los materiales de estos destiladores pueden variar, pero el principio de funcionamiento es básicamente el mismo para todos: imitar el ciclo del agua. Poseen un estanque de agua salina, sobre el que se ubica una cubierta transparente de vidrio o plástico, que encapsula por completo el espacio arriba del estanque. La cubierta puede tener muchas formas, desde un domo hasta una V, pero las más comunes son las coberturas inclinadas de una o dos pendientes. La cubierta permite el paso de la radiación solar de onda corta e impide el paso de la radiación de onda larga emitida por el agua salina, generándose un efecto invernadero que favorece el calentamiento del agua.

El ángulo de inclinación de la cobertura deberá ser el suficiente para evitar que el condensado caiga en el estanque, pero no es recomendable que sea muy grande, porque conforme aumenta este ángulo, también lo hace la distancia entre la superficie del agua y la cubierta, con la subsiguiente disminución en la producción del destilador. Además, se reduciría la cantidad de radiación solar que ingresa al destilador a medio día, justamente cuando el nivel de radiación es mayor. La estructura del estanque puede ser de concreto, acero galvanizado, acero inoxidable, plástico u otro material apropiado; pudiéndose revestir el fondo y las paredes con material aislante. En la **Figura 3.2** se muestran los esquemas de varios tipos comunes de destiladores solares.

Figura 3.2 Esquemas de varios destiladores solares convencionales

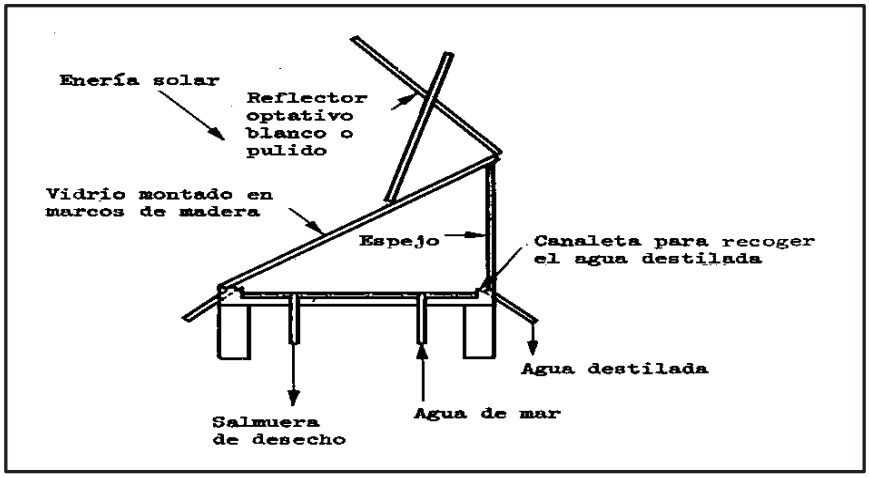


Fuente: Kalogirou; "Seawater desalination using renewable energy sources"; 2005 **[23]**

b) Destilador solar de estanque con reflectores

El uso de reflectores planos se ha limitado mayormente al montaje de espejos en las superficies posteriores de pequeños destiladores solares. Aunque esta práctica puede elevar de forma considerable la producción de agua destilada, los espejos utilizados son costosos y de poca durabilidad **[45]**. En la **Figura 3.3** se indica un destilador solar con un espejo en la pared posterior y un reflector abatible arriba de la cubierta.

Figura 3.3 Destilador solar de estanque con reflectores

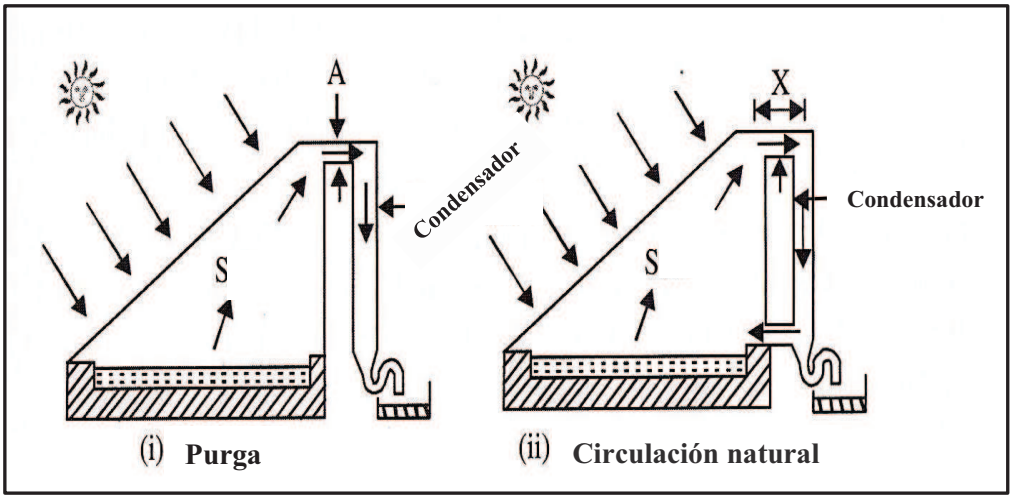


Fuente: Naciones Unidas; "La destilación solar como medio de satisfacer necesidades de agua de poca magnitud"; 1972 **[33]**

c) Destilador solar de estanque con condensador pasivo

En un destilador solar de estanque convencional, la cubierta transparente se calienta al recibir simultáneamente la radiación solar y el calor de condensación del agua. En consecuencia, disminuye la diferencia de temperatura entre el agua salina y la cubierta, viéndose afectada la eficiencia del proceso. Al adosar un condensador al destilador, de manera que permanezca a resguardo del Sol, la mayor parte del vapor se condensará en este nuevo elemento. Con esta modificación se incrementa la diferencia de temperatura entre las superficie de evaporación y condensación, mejorando el rendimiento del destilador. Si se instala un condensador que permita la circulación natural del vapor, podría elevarse aún más la producción de agua destilada **[45]**.

Figura 3.4 Destilador solar de estanque con condensador pasivo



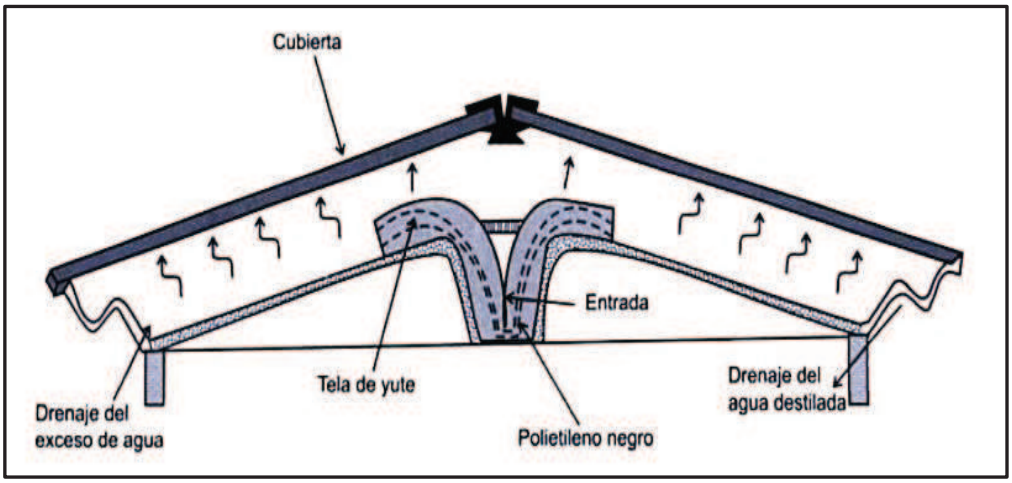
Fuente: Tiwari G. y Tiwari A.; "Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems"; 2008 **[45]**

d) Destilador solar de múltiples mechas

En el destilador solar de múltiples mechas, el estanque ha sido remplazado por un material poroso empapado con agua salina y que reposa sobre una superficie inclinada. Los rayos solares evaporan rápidamente el agua retenida en las mechas porosas, condensándose después en una cubierta transparente. El almacenamiento de energía en los destiladores de mechas es muy bajo, razón por la que alcanzan mayores temperaturas y una producción superior que los desalinizadores tradicionales.

Para mantener un flujo de agua lento y constante, que asegure una rápida evaporación, el extremo superior de las mechas es introducido en un reservorio de agua salina. Desde ahí, el líquido se absorbe por capilaridad, evaporándose una parte y desechándose el exceso.

Figura 3.5 Destilador solar de múltiples mechas



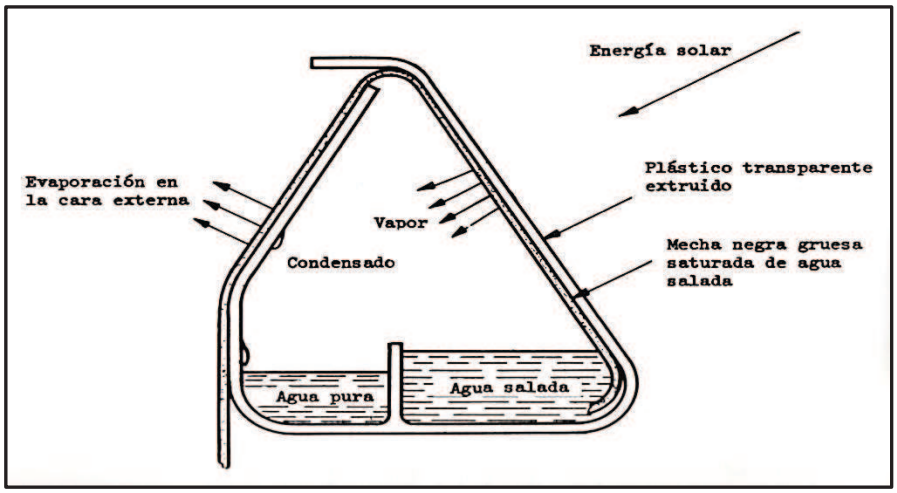
Fuente: Ibáñez et al.; Tecnología solar"; 2004 **[16]**

e) Destilador de plástico extruido con mecha negra

El diseño de este destilador es muy ingenioso, una mecha negra se usa para la evaporación y como medio para facilitar la condensación. Desde un reservorio donde absorbe agua salina por capilaridad, la mecha asciende en contacto con la superficie interna de una cubierta transparente. Cuando llega al extremo superior del destilador, se dobla y sale de la estructura, descendiendo expuesta a la atmósfera sobre la pared posterior del desalinizador.

La radiación solar evapora el agua retenida en la mecha, después, el vapor se condensa en la superficie posterior de la unidad. El calor latente del agua se trasmite por conducción hasta la porción de la mecha expuesta a la atmósfera, provocando el enfriamiento evaporativo de la pared posterior del destilador, acelerándose el proceso de condensación.

Figura 3.6 Destilador solar de plástico extruido con mecha negra

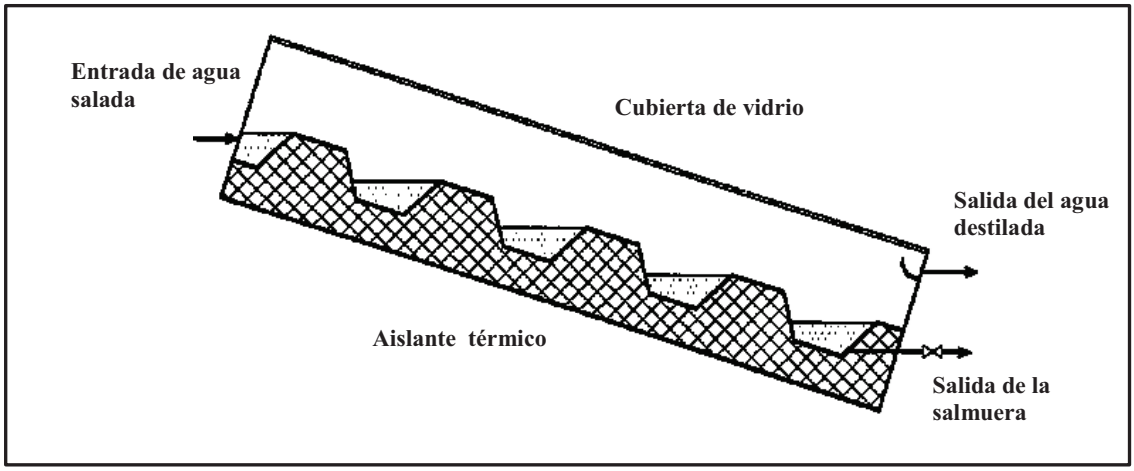


Fuente: Naciones Unidas; "La destilación solar como medio de satisfacer necesidades de agua de poca magnitud"; 1972 **[33]**

f) Destilador solar con bateas inclinadas

La distancia entre las superficies de evaporación y condensación juega un papel muy importante en el desempeño de los destiladores solares, creciendo la producción cuando esta distancia se reduce **[23]**. Este propósito se cumple al posicionar bateas, una debajo y al frente de otra, formando gradas. Sobre las bateas se sitúa una cubierta transparente, donde se condensa el vapor proveniente de todas ellas. El destilado que cae desde la cubierta es recogido por un canal que se extiende en la parte inferior del destilador. El agua salina de alimentación se introduce en la batea superior, descendiendo en cascada a todas las demás.

Figura 3.7 Destilador solar con bateas inclinadas



Fuente: Kalogirou; "Seawater desalination using renewable energy sources"; 2005 **[23]**

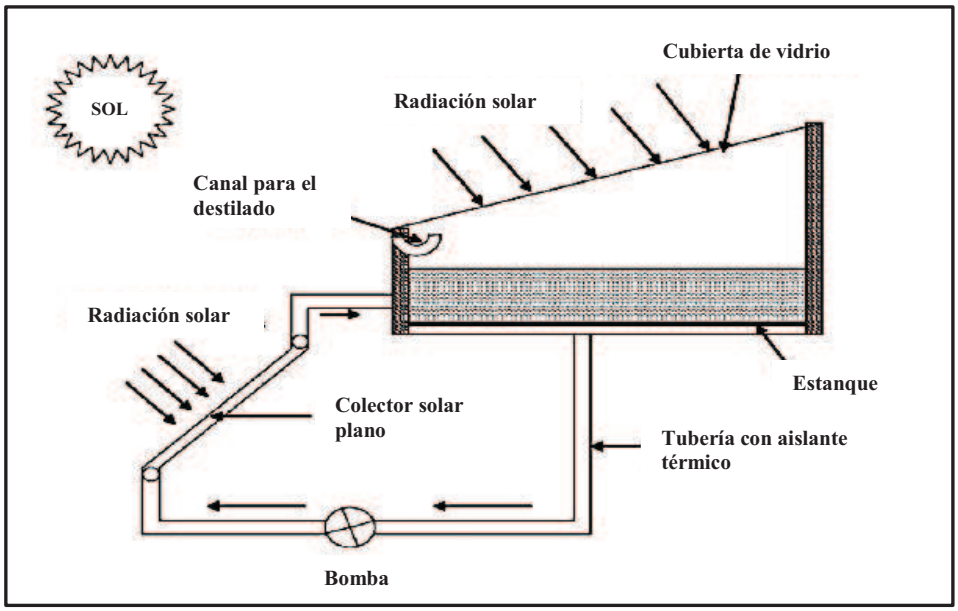
3.6.2. DESTILADORES SOLARES ACTIVOS

La diferencia de temperatura entre las superficies de evaporación y condensación es otro factor que influye significativamente en el rendimiento de los destiladores solares. Acelerándose la tasa de evaporación cuando esta diferencia se incrementa **[38]**. Tal objetivo se puede lograr, ya sea aumentando la temperatura de la superficie de evaporación o reduciendo la temperatura de la superficie de condensación, o con ambas acciones. En los destiladores solares activos se consigue elevar la temperatura del agua salina, recurriendo a una cantidad adicional de energía térmica, procedente de colectores solares o del calor desechado por motores y procesos industriales **[45]**. Para conocer más sobre el desarrollo de los destiladores solares activos, a continuación se describirán algunos diseños característicos.

a) Destilador solar de estanque acoplado a un colector solar plano

Al conectar un colectar solar plano a un destilador solar de estanque, el agua salada puede llegar a temperaturas de entre 70 y 80 ºC, intensificándose los fenómenos de evaporación y condensación **[38]**. En estos destiladores, los colectores solares pueden trabajar por circulación forzada o circulación natural. Los sistemas de circulación forzada utilizan una bomba para hacer fluir el agua entre el estanque del destilador y el colector solar, debiéndose apagar la bomba en la noche o cuando la radiación solar es muy baja. Los sistemas de circulación natural son más económicos, simples y fáciles de operar, pues no requieren de bombas, elementos de control u otros dispositivos. Para evitar la corrosión de los tubos del colector solar, es aconsejable instalar un intercambiador de calor dentro del estanque de agua salina. Por el colector solar e intercambiador de calor puede circular aceite, agua destilada u otro fluido adecuado para este propósito. En la **Figura 3.8** se muestra el esquema de un destilador solar integrado a un colector plano que opera por circulación forzada.

Figura 3.8 Destilador solar activo acoplado a un colector plano



Fuente: Sampathkumar et al. "Active solar distillation-A detailed review"; 2010 **[38]**

b) Destilador solar activo de múltiples etapas

En los destiladores solares de estanque, el calor de condensación es liberado hacia atmósfera desde la cubierta transparente, factor que limita su productividad. Se han desarrollados destiladores solares activos, que en lugar de rechazar el calor de condensación, lo usan para evaporar más agua. En estos dispositivos, un reservorio de agua se conecta a un colector solar plano. Sobre el reservorio se colocan otros depósitos con agua, de tal forma que el vapor se condensa en el fondo del primer depósito, transmitiendo su calor latente al líquido de ese compartimiento. Este proceso de evaporación y condensación se repite en las demás etapas, alcanzándose una producción de agua que puede ser varias veces superior a la de un destilador solar de estanque.

K. Schwarzer et al **[40]** señalan que dos parámetros son importantes al momento de evaluar a los destiladores solares activos de múltiples etapas: el Coeficiente de Rendimiento (COP, por sus siglas en inglés) y la Relación de Ganancia de Salida (GOR, por sus siglas en inglés).

El COP es la relación entre la masa de agua entregada por todas las etapas y la producida en la primera etapa del desalinizador. Este parámetro es un indicativo de la efectividad del proceso de recuperación de calor en la Torre de destilación, y por ende se utiliza para optimizar la producción en cada una de sus etapas. Su ecuación es la siguiente

$$\mathrm{COP} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{ei}}{m_{e1}} \tag{3.1}$$

Siendo $\sum_{i=1}^{n} m_{ei}$ el agua producida por todas las etapas (kg) y m_{e1} el agua generada por la primera (kg).

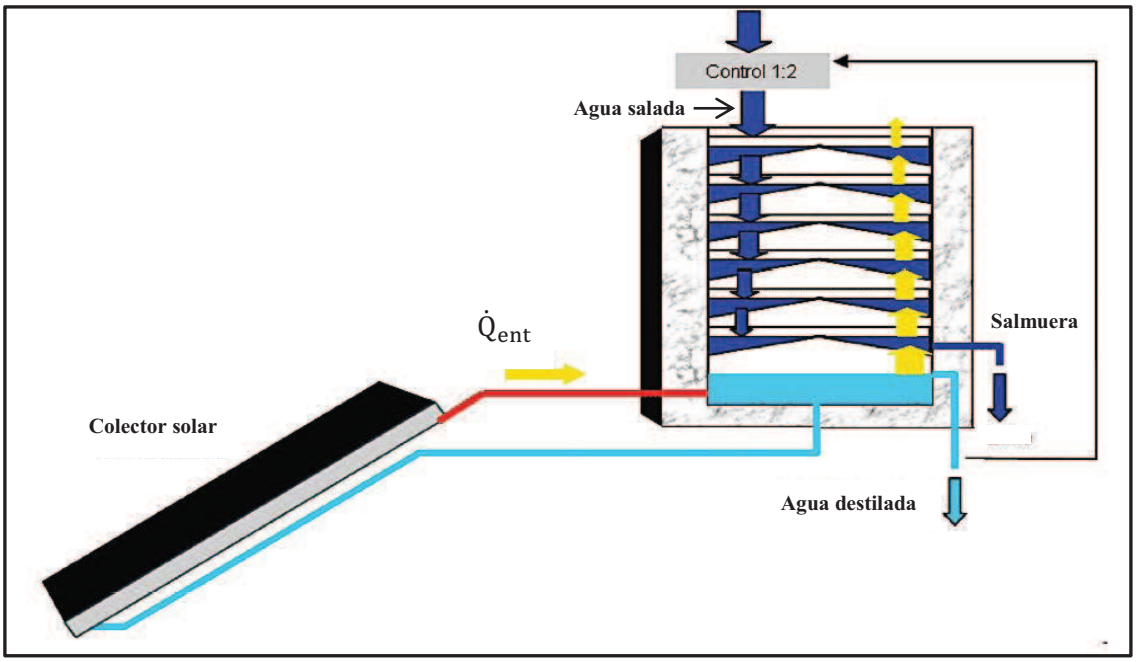
El GOR es la relación entre la energía necesaria para evaporar toda el agua producida y la energía suministrada por el colector solar, resulta útil al analizar el desempeño general del desalinizador solar, siendo equivalente a la eficiencia térmica. Su expresión es

$$\mathrm{GOR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{ei} \cdot \overline{h_{fg}}}{Q_{u,total}} \tag{3.2}$$

Donde $\overline{h_{fg}}$ es la entalpia promedio de vaporización del agua (J/kg) y $Q_{u,total}$ la energía suministrada por el colector solar (J).

K. Schwarzer et al. **[40]** desarrollaron un destilador solar de múltiples etapas que puede trabajar con un colector solar plano, un colector de tubos al vacío o con un colector parabólico. Los resultados de las pruebas indican que el dispositivo produce entre 15 y 18 litros de agua potable por m^2 de área del colector, cantidad 5 a 6 veces superior a la producción de un destilador solar de estanque; el esquema de este aparato se presenta en la **Figura 3.9**. El agua salina se introduce en el último depósito y después desciende al resto de compartimientos en dirección contraria al flujo de calor. Para reducir los problemas de corrosión y no tener la necesidad de emplear un intercambiador de calor, la energía del colector solar se transmite al agua potable generada por el destilador.

Figura 3.9 Destilador solar activo de múltiples etapas con recuperación de calor

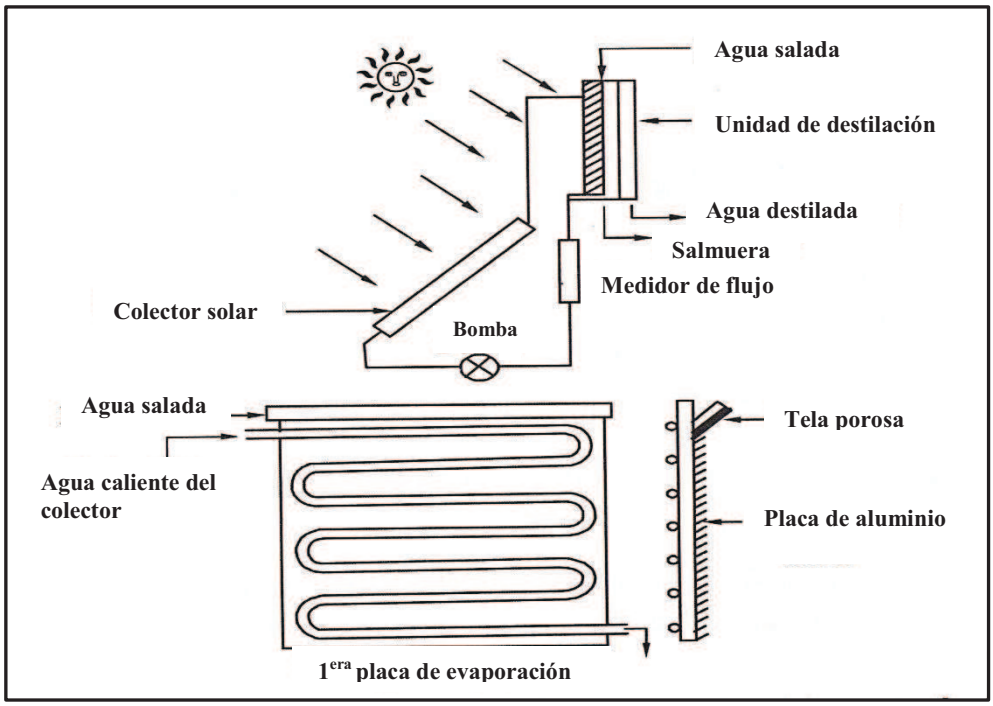


Fuente: Schwarzer et al.; "A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production"; 2010 **[40]**

c) Destilador solar vertical acoplado a un colector plano

En este diseño se ha conectado un colector solar plano a un destilador solar vertical de múltiples etapas. El agua caliente proveniente del colector circula por un serpentín adosado a una placa metálica del destilador, la misma recibe el calor del agua y la radiación solar. La superficie opuesta de la placa está en contacto con una tela de algodón empapada con agua salada, la energía absorbida por la placa se transfiere al líquido de la tela, la cual se evapora y condensa en otra placa situada al frente. El calor latente se transmite al agua salina de otra tela en contacto con la superficie opuesta de la segunda placa, donde se repite el proceso de evaporación y condensación. El caso descrito corresponde a un destilador de dos etapas, pudiéndose construir un destilador vertical con cualquier número de etapas. Sin embargo, Tiwari G.N. y Tiwari A. K. **[45]** afirman que el aprovechamiento del calor de condensación comienza a disminuir conforme crece el número de etapas, debiéndose determinar su cantidad apropiada para una aplicación específica.

Figura 3.10 Destilador solar vertical acoplado a un colector plano



Fuente: Tiwari G. y Tiwari A.; "Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems"; 2008 **[45]**

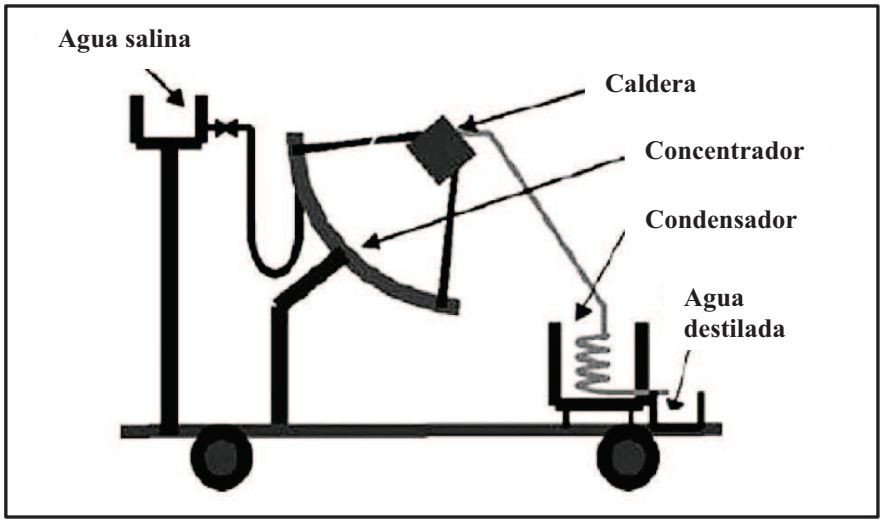
d) Destilación solar con colectores parabólicos

Como ya se explicó en el capítulo anterior, los colectores parabólicos se caracterizan porque concentran en una superficie pequeña, la radiación que incide sobre un área más grande. Circunstancia que les permite alcanzar mejores eficiencias y mayores temperaturas que los colectores planos. No obstante, por su incapacidad de aprovechar la radiación difusa, requieren de sistemas que los posicionen en dirección del Sol y su eficiencia es muy baja en días nublados. Estas dificultades se pueden solucionar parcialmente, utilizando colectores parabólicos compuestos. Los mismos captan una mayor cantidad de radiación difusa y prácticamente no necesitan de sistemas que los orienten en dirección del Sol.

El destilador solar de la **Figura 3.11** emplea un colector de plato parabólico, en cuyo punto focal se ubica un recipiente con agua salina. Los rayos solares se concentran en la parte inferior del recipiente, generándose una gran cantidad de vapor que es dirigido hacia un condensador en forma de espiral. Con objeto de mantener constante el nivel de líquido en el recipiente (caldera), la alimentación de agua salina debe ser continua.

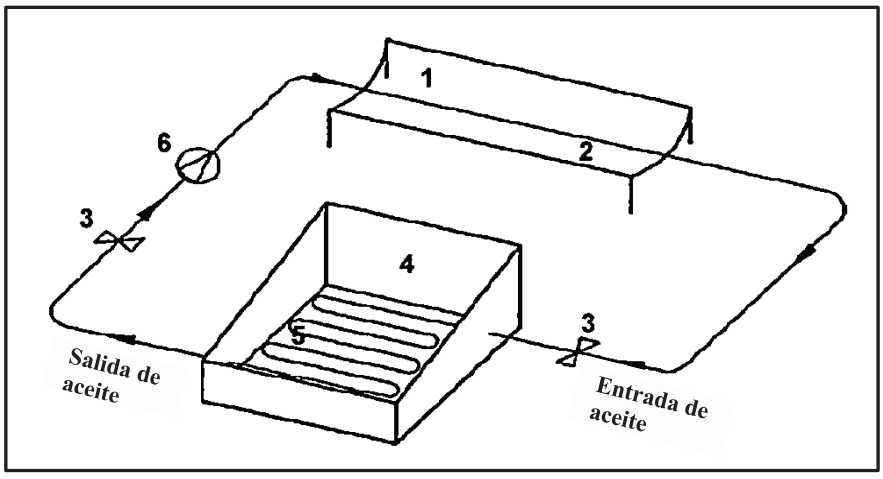
En la **Figura 3.12** se aprecia un destilador solar de estanque acoplado a un colector cilindro parabólico. Una bomba permite la circulación de aceite por un conjunto de tuberías que conectan ambos componentes. El aceite se calienta a su paso por el colector, y fluye después por un serpentín colocado en el estanque del destilador, donde cede su calor al agua salina. Con este aporte adicional de energía se incrementa la producción del desalinizador.

Figura 3.11 Destilador solar con colector de plato parabólico



Fuente: Sampathkumar et al. "Active solar distillation-A detailed review"; 2010 **[38]**

Figura 3.12 Destilador solar de estanque acoplado a un colector parabólico. (1) Colector cilindro-parabólico, (2) Tubería de aceite, (3) Válvulas, (4) Destilador solar de estanque, (5) Intercambiador de calor, (6) Bomba



Fuente: Sampathkumar et al. "Active solar distillation-A detailed review"; 2010 **[38]**

3.7. TRANSFERNCIA DE CALOR Y MASA EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE

Dentro de un destilador solar de estanque, la transferencia de calor entre el agua salina y la cubierta transparente se da por convección, evaporación y radiación. El flujo de calor por evaporación depende en gran medida del flujo de calor por convección, ya que gracias a este último el vapor formado en la superficie del agua asciende hasta la cubierta. El destilador solar intercambia calor con el medio ambiente, principalmente por convección, conducción y radiación. La convección y radiación gobiernan el intercambio de energía entre la cubierta y el aire circundante, mientras que la conducción rige la perdida de calor desde las paredes y el fondo del destilador.

3.7.1. FLUJOS DE CALOR Y BALANCES DE ENERGÍA EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE

Ahora que ya se conoce el funcionamiento de un destilador solar de estanque, el siguiente paso es describir los flujos de energía que tienen lugar durante su funcionamiento. Después de que una parte es absorbida y reflejada por la cubierta transparente, la radiación solar se trasmite al interior del destilador, donde una pequeña fracción es absorbida y reflejada por el agua. Luego de sufrir esta atenuación, casi la totalidad de la radiación es captada por el fondo negro del estanque. Desde aquí un poco de calor se pierde hacia el medio ambiente por conducción, y el resto se transfiere al agua por convección. Como resultado, el agua salina se calienta e intercambia calor por radiación, convección y evaporación con la cubierta. El vapor generado durante este proceso se condensa en la cubierta, cediendo su calor latente. Finalmente, el calor recibido por la cubierta es liberado hacia los alrededores por convección y radiación

En la **Figura 3.13** se indican los flujos de calor en un destilador solar de estanque típico, las resistencias térmicas correspondientes a estos flujos se presentan en el circuito de la **Figura 3.14** En ambas ilustraciones no se incluye el calor por convección entre el fondo del estanque y el agua salina, ya que por simplicidad se los consideró un solo elemento. Sin embargo, más adelante si se tomará en cuenta este flujo de calor para su análisis.

Figura 3.13 Flujos de calor en un destilador solar de estanque

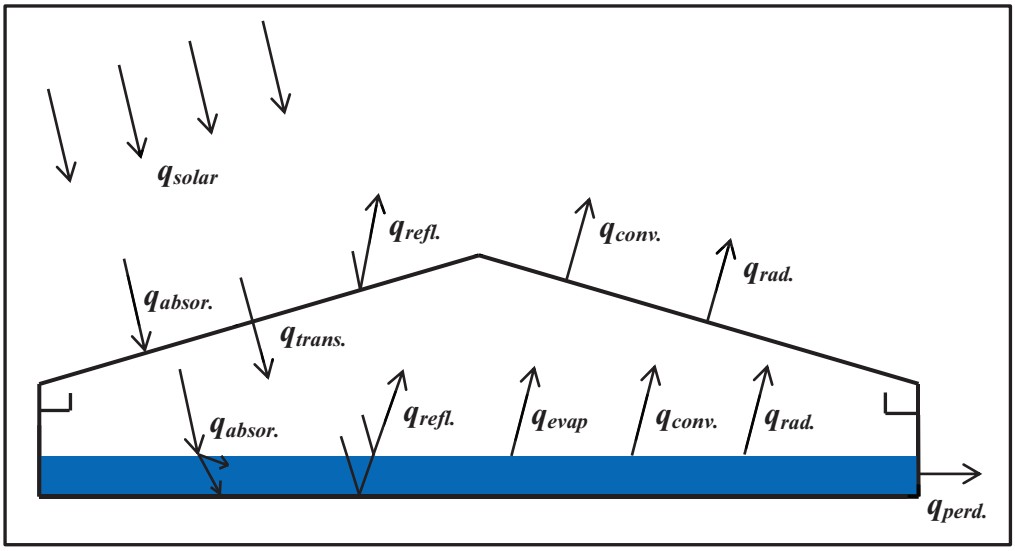
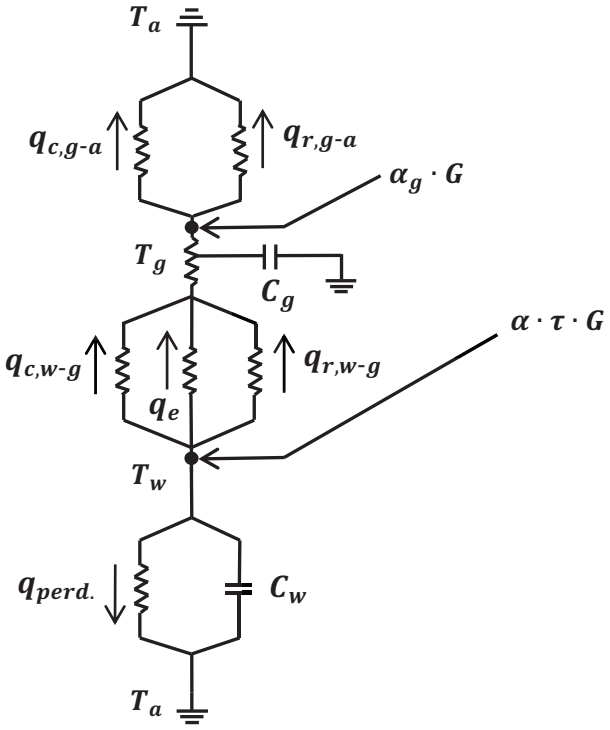


Figura 3.14 Circuito térmico de un destilador solar de estanque



Las ecuaciones de los balances de energía en un destilador solar de estanque son:

1) Balance de energía en la cubierta transparente

$$m_g \cdot C_{pg} \cdot \frac{dT_g}{dt} = q_e + q_{c,w\text{-}g} + q_{r,w\text{-}g} + \alpha_g \cdot G - q_{c,g\text{-}a} - q_{r,g\text{-}a} \tag{3.3}$$

Donde los subíndices e, c, r, w, g y a hacen referencia a la evaporación, convección, radiación, agua, cubierta transparente y aire que rodea al destilador, respectivamente. En relación a la cubierta, se tiene que α_g es su absortividad solar, m_g su masa y C_{pg} su calor específico. Por último, G es la irradiancia solar en (W/m^2)

2) Balance de energía en el agua del estanque

$$m_w \cdot C_{pw} \cdot \frac{dT_w}{dt} = \alpha_w \cdot \tau_g \cdot G + q_{c,b\text{-}w} - q_e - q_{c,w\text{-}g} - q_{r,w\text{-}g} \tag{3.4}$$

Donde $q_{c,b-w}$ es el calor por convección transferido desde el fondo del estanque hacia el agua salina, τ_g la transmisividad solar de la cubierta transparente y α_w la absortividad solar del agua.

3) Balance de energía en la estructura del estanque

$$m_b \cdot C_{pb} \cdot \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b \cdot \tau_w \cdot \tau_g \cdot G - q_{c,b\text{-}w} - q_p \tag{3.5}$$

Donde q_p es el calor perdido hacia los alrededores por la parte inferior y lateral del estanque, el subíndice b representa a la estructura del estanque, τ_w es la transmisividad solar del agua y α_b la absortividad solar del fondo del estanque.

En las ecuaciones anteriores se considera a la estructura del estanque y al agua salina como elementos independientes, de modo que sus absortividades son distintas. Por el contrario, en el circuito térmico de la **Figura 3.14** se toman ambos como un único elemento, siendo α su absortividad combinada.

3.7.2. ESTIMACIÓN DE LOS FLUJOS DE CALOR EN UN DESTILADOR SOLAR DE ESTANQUE

Habiéndose determinado las ecuaciones que definen los balances de energía en un destilador solar de estanque, a continuación se debe proporcionar un medio para estimar los flujos de calor existentes en el mismo.

3.7.2.1. Flujo de calor por convección natural entre el agua y la cubierta transparente, $q_{c,w\text{-}g}$

La transferencia de calor por convección natural entre la superficie libre del agua y la cubierta transparente se calcula con la ecuación general

$$q_{c,w\text{-}g} = A_w \cdot h_{c,w\text{-}g} \cdot (T_w - T_g) \tag{3.6}$$

Donde $h_{c,w\text{-}g}$ es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta (W/m^2 · K), A_w el área de la superficie libre del agua (m^2), T_w la temperatura del agua (ºC) y T_g la temperatura de la cubierta transparente. Para aplicar la ecuación anterior, primero debemos evaluar el coeficiente $h_{c,w\text{-}g}$, operación un tanto complicada, que generalmente se efectúa al correlacionar resultados experimentales usando el método de análisis dimensional. Con este fin se emplean cuatro parámetros adimensionales: el número de Nusselt (Nu), el número de Grashof (Gr), el número de Prandtl (Pr) y el número de Rayleigh (Ra); los cuales están dados por:

$$\text{Nu} = \frac{h_{c,w\text{-}g} \cdot L}{k} \tag{3.7}$$

$$\text{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \tag{3.8}$$

$$\text{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \tag{3.9}$$

$$\text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} \tag{3.10}$$

Donde L es la distancia entre la superficie del agua y la cubierta transparente, ΔT la diferencia de temperatura entre el agua y la cubierta $(T_w - T_g)$ y g la aceleración de la gravedad, 9.798 (m/s^2). Las propiedades físicas del aire húmedo en función de la temperatura se indican en la **Tabla 3.1**; donde T es igual a la temperatura media del aire, $(T_w + T_g)/2$, medida en °C.

Tabla 3.1 Propiedades físicas del aire húmedo en función de la temperatura

Propiedad	Símbolo	Ecuación
Calor específico (J/kg·°C)	C_p	$999.2 + 0.1434\,T + 1.101 \times 10^{-4}\,T^2 - 6.7581 \times 10^{-8}\,T^3$
Densidad (kg/m^3)	ρ	$\dfrac{353.44}{T + 273.15}$
Conductividad térmica (W/m·°C)	k	$0.0244 + 0.7673 \times 10^{-4}\,T$
Viscosidad dinámica (kg/m·s)	μ	$1.718 \times 10^{-5} + 4.62 \times 10^{-8}\,T$
Coeficiente de expansión térmica volumétrica (K^{-1})	β	$\dfrac{1}{T + 273.15}$

Fuente: elaborado a partir de Tiwari G. y Tiwari A.; "Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems"; 2008 **[45]**

Para el flujo de calor por convección natural en espacios cerrados horizontales con aire, Jakob (1949) **[21]** recomienda el uso de la siguiente relación

$$Nu = C\,(Gr \cdot Pr)^n \qquad (3.11)$$

Donde C y n son constantes, cuyos valores dados por McAdams (1954) **[29]** para varios rangos del número de Grashof son:

1) Para $Gr < 10^3$, $C = 1$ y $n = 0$

2) Para $10^4 < Gr < 3.2 \times 10^5$, $C = 0.21$ y $n = 1/4$

3) Para $3.2 \times 10^5 < Gr < 10^7$, $C = 0.075$ y $n = 1/3$

Sustituyendo (3.7) en la **Ecuación 3.11** se tiene

$$\frac{h_{c,w\text{-}g} \cdot L}{k} = C\,(Gr \cdot Pr)^n \tag{3.12}$$

Remplazando (3.8) y (3.9) en la **Ecuación 3.12** se obtiene

$$\frac{h_{c,w\text{-}g} \cdot L}{k} = C\left(\frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3 \cdot \rho^{\,2}}{\mu^2} \cdot \frac{\mu \cdot C_p}{k}\right)^n \tag{3.13}$$

El factor de empuje $\beta \cdot \Delta T$ de la **Ecuación 3.13** es utilizado cuando la composición del aire húmedo es constante. Sin embargo, dentro del desalinizador la humedad del aire varía a lo largo de su ascenso. El vapor formado en el destilador es más ligero que el aire, y al estar ambos asociados, se incrementa la fuerza de empuje y por ende también la tasa de circulación del aire húmedo.

Al considerar este efecto, el factor de empuje modificado se expresa como **[39]**

$$\beta \cdot \Delta T' = (M_l \cdot T_s / M_s \cdot T_l) - 1 \tag{3.14}$$

Donde M es el peso molecular del aire húmedo, el subíndice (l) especifica una distancia lejana a la superficie del agua, mientras que (s) hace referencia a un punto en esta superficie. Al asumir que el vapor de agua y el aire son gases ideales, y que la presión total es la suma de las presiones parciales del aire y el vapor de agua, resulta la siguiente formulación **[39]**

$$\beta \cdot \Delta T' = \left[\frac{T_w - T_g}{T_g + 273} + \frac{P_w - P_g}{[M_a/(M_a - M_w)] \cdot P_T - P_w} \cdot \frac{T_w + 273}{T_g + 273}\right] \tag{3.15}$$

Donde P_w es la presión de vapor del agua a la temperatura del agua salina (N/m^2), P_g la presión de vapor del agua a la temperatura de la cubierta, P_T la presión total o atmosférica, igual a 101325 (N/m^2); M_a el peso molecular del aire, igual a 28.97 y M_w el peso molecular del agua con un valor de 18.02.

La **Ecuación 3.15** es la misma usada por Dunkle **[11]**, quien confiriendo a las constantes *C* y *n* los valores de 0.075 y 1/3, respectivamente; y evaluando las propiedades del aire húmedo de la **Ecuación 3.13** a una temperatura adecuada, obtuvo la relación

$$h_{c,w\text{-}g} = 0.884\left[T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)\,(T_w + 273)}{268.9\times 10^3 - P_w}\right]^{1/3} \tag{3.16}$$

Al examinar la **Ecuación 3.16** es evidente que si el exponente n tiene un valor de 1/3, el parámetro *L* de la **Ecuación 3.13** se cancela, de tal forma que $h_{c,w\text{-}g}$ se hace independiente de la distancia entre la superficie del agua salina y la cubierta transparente.

Sustituyendo la relación anterior en la **Ecuación 3.6**, resulta

$$q_{c,w\text{-}g} = A_w \cdot 0.884\left[T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)\,(T_w + 273)}{268.9\times 10^3 - P_w}\right]^{1/3} \cdot (T_w - T_g) \tag{3.17}$$

Tiwari G.N. y Tiwari A. K. **[45]** proveen las siguientes expresiones para P_w y P_g:

$$P_w = \mathrm{e}^{\left[25.317 - \frac{5144}{T_w + 273}\right]} \tag{3.18}$$

$$P_g = \mathrm{e}^{\left[25.317 - \frac{5144}{T_g + 273}\right]} \tag{3.19}$$

3.7.2.2. Flujo de calor por evaporación entre el agua y la cubierta transparente, q_e

El procedimiento para estimar el flujo de calor por evaporación es el siguiente **[45]**:

Tomando el área como unitaria, se tiene que la masa de aire transferida por convección libre desde la superficie del agua hasta la cubierta transparente es

$$\dot{m}_a = \frac{q_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}\cdot(T_w - T_g)} = \frac{h_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}} \tag{3.20}$$

Si se asume que el aire en las cercanías de la superficie del agua está saturado, la humedad específica o masa de agua por masa de aire seco está dada por

$$\frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{P_w}{P_T - P_w} \tag{3.21}$$

Donde $\dot{m}_w$ es la masa de agua transportada desde la superficie del agua hasta la cubierta, M_w el peso molecular del agua, M_a el peso molecular del aire, P_w la presión de vapor del agua a la temperatura de la superficie del agua y P_T la presión total o atmosférica.

Por lo tanto, la masa de agua transferida desde la superficie del agua hasta la cubierta transparente es

$$\dot{m}_w = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{P_w}{P_T - P_w} \cdot \frac{h_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}} \tag{3.22}$$

Asimismo, el agua transportada desde el cubierta transparente hasta la superficie del agua se define por

$$\dot{m}'_w = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{P_g}{P_T - P_g} \cdot \frac{h_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}} \tag{3.23}$$

La masa neta de agua transferida desde la superficie del agua hasta la cubierta transparente es igual a la resta de las **Ecuaciones 3.22** y **3.23**, operación que resulta en

$$\dot{m}_e = \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{h_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}} \cdot \left(\frac{P_w}{P_T - P_w} - \frac{P_g}{P_T - P_g} \right) \tag{3.24}$$

El flujo de calor por evaporación entre el agua y la cubierta transparente se establece por

$$q_e = \dot{m}_e \cdot h_{fg} \tag{3.25}$$

Donde h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua (kJ/kg), cuya expresión en función de la temperatura es

$$h_{fg} = 2.4935 \times 10^6 \cdot (1 - 9.4779 \times 10^{-4} T + 1.3132 \times 10^{-7} T^2 - 4.7974 \times 10^{-9} T^3) \tag{3.26}$$

Al sustituir (3.24) en (3.25) se produce

$$q_e = h_{fg} \cdot \frac{M_w}{M_a} \cdot \frac{h_{c,w\text{-}g}}{C_{pa}} \cdot \left[\frac{P_T \cdot (P_w - P_g)}{(P_T - P_w) \cdot (P_T - P_g)} \right] \tag{3.27}$$

Sabiendo además, que el calor por evaporación es proporcional a la diferencia de presiones de vapor entre la superficie del agua salina y cubierta transparente, se obtiene

$$q_e = h_e \cdot (P_w - P_g) \tag{3.28}$$

Donde h_e es el coeficiente de transferencia de calor por evaporación basado en una diferencia de presiones. Al igualar las **Ecuaciones 3.27** y **3.28**, y despejando $(h_e / h_{c,w\text{-}g})$ se llega a la formulación

$$\frac{h_e}{h_{c,w\text{-}g}} = \frac{M_w \cdot P_T \cdot h_{fg}}{M_a \cdot C_{pa} \cdot (P_T - P_w) \cdot (P_T - P_g)} \tag{3.29}$$

Al evaluar los parámetros de la ecuación anterior a una temperatura promedio, Dunkle **[11]** obtuvo

$$h_e = 0.016273 \cdot h_{c,w\text{-}g} \tag{3.30}$$

Por lo tanto, el calor por evaporación entre la superficie del agua y la cubierta es

$$q_e = 0.016273 \cdot h_{c,w\text{-}g} \cdot (P_w - P_g) \tag{3.31}$$

Igualando (3.31) con (3.25) y despejando la masa de destilado producido, $\dot{m}_e$, se tiene

$$\dot{m}_e = \frac{0.016273 \cdot h_{c,w\text{-}g} \cdot (P_w - P_g)}{h_{fg}} \tag{3.32}$$

Donde $\dot{m}_e$ se mide en (kg/s) y la entalpía de vaporización del agua, h_{fg}, se calcula con la **Ecuación 3.26** a la temperatura media del aire húmedo, $(T_w + T_g)/2$. En la formulación anterior no se incluye el área de la superficie libre del agua, porque se la consideró unitaria.

3.7.2.3. Estimación experimental del coeficiente de transferencia de calor por convección, $h_{c,w\text{-}g}$

La mayoría de investigadores en el área de la destilación solar han utilizado el modelo propuesto por Dunkle, en este se emplean las constantes C = 0.075 y n = 1/3 para estimar el calor por convección dentro de un destilador solar de estanque. No obstante, este modelo posee algunas limitaciones **[45]**, las mismas que se enumeran a continuación:

1) Sólo es válido para una temperatura media de operación de aproximadamente 50 ºC y una diferencia de temperatura entre la superficie del agua y la cubierta cercana a los 17 ºC.
2) Es independiente de la distancia entre las superficies de evaporación y condensación.
3) Es bueno para estimar el flujo de calor hacia arriba en espacios cerrados horizontales con aire, pero no toma en cuenta la inclinación de la cubierta transparente en un destilador solar **[26]**.

Para contrarrestar estas limitaciones, Kumar y Tiwari (1996) **[26]** han propuesto determinar los valores de las constantes C y n mediante regresión lineal simple a partir de datos experimentales, que deben ser recogidos durante condiciones normales de operación. El procedimiento es como sigue:

Al remplazar $h_{c,w\text{-}g}$ de (3.12) en la **Ecuación 3.32** y multiplicar por 3600 para obtener el destilado producido en 1 hora, resulta

$$\dot{m}'_e = \frac{0.016273 \cdot \left(P_w - P_g\right) \cdot k \cdot 3600 \cdot C \cdot (Ra)^n}{L \cdot h_{fg}} \tag{3.33}$$

Si una parte de la ecuación anterior se sustituye por R

$$R = \frac{0.016273 \cdot \left(P_w - P_g\right) \cdot k \cdot 3600}{L \cdot h_{fg}} \tag{3.34}$$

La **Ecuación 3.33** queda como

$$\dot{m}'_e = R \cdot C \cdot (Ra)^n \tag{3.35}$$

Al pasar *R* al otro lado de la ecuación, se tiene

$$\frac{\dot{m}_e'}{R} = C \cdot (Ra)^n \tag{3.36}$$

La **Ecuación 3.36** puede escribirse de la siguiente manera

$$y = a \cdot (x)^b \tag{3.37}$$

Donde

$\dot{m}_e'/R = y,\ C = a,\ Ra = x,\ n = b$

Aplicando el logaritmo en ambos lados de la **Ecuación 3.37**, se produce

$$\ln(y) = \ln(a) + b \cdot \ln(x) \tag{3.38}$$

Por simplicidad se escribirá de otra forma la **Ecuación 3.38**

$$y' = a' + b' \cdot x' \tag{3.39}$$

Donde

$y' = \ln(y),\ a' = \ln(a),\ b' = b,\ x' = \ln(x)$

Los valores de los coeficientes a' y b' de la **Ecuación 3.39** se calculan por regresión lineal simple, operación que puede ser efectuada directamente en un computador o de forma manual con la ayuda del método de los mínimos cuadrados. Después de obtener a' y b', el cálculo de C y n es muy fácil a partir de las siguientes relaciones:

$$C = e^{(a')} \tag{3.40}$$

$$n = b' \tag{3.41}$$

Los valores de *C* y *n* derivados de este procedimiento toman en consideración la distancia entre la superficie del agua y la cubierta, el rango de las temperaturas de operación y la inclinación de la cubierta.

Conjuntamente con la aplicación del método de los mínimos cuadrados, también es necesario calcular el coeficiente de correlación lineal, pues este permite conocer que tan buena es la correspondencia entre la recta obtenida y los datos experimentales.

a) Regresión lineal simple y método de los mínimos cuadrados [42]:

Si se desea aproximar un conjunto de puntos a una recta de la forma

$$y = a + bx \tag{3.42}$$

Las constantes a y b se determinan al resolver las ecuaciones

$$\sum y = a \cdot N + b \sum x \tag{3.43}$$

$$\sum (xy) = a \sum x + b \sum x^2 \tag{3.44}$$

Las mismas se denominan ecuaciones normales para la recta de mínimos cuadrados, siendo *N* el número de datos u observaciones.

Los valores de las constantes a y b que se obtienen al resolver las **Ecuaciones 3.43** y **3.44** son:

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{N \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \tag{3.45}$$

$$b = \frac{N \cdot \sum (xy) - (\sum x)(\sum y)}{N \cdot \sum x^2 - (\sum x)^2} \tag{3.46}$$

El resultado de *b* en la **Ecuación 3.46** está dado por

$$b = \frac{\sum (x - \bar{x})\,(y - \bar{y})}{\sum (x - \bar{x})^2} \tag{3.47}$$

Donde $\bar{y} = (\sum y)/N$ y $\bar{x} = (\sum x)/N$; si se divide ambos lados de la **Ecuación 3.43** entre *N*, se obtiene

$$\bar{y} = a + b\bar{x} \tag{3.48}$$

Pudiéndose calcular b con (3.46) o (3.47) y después despejar a de la **Ecuación 3.48**

b) Coeficiente de correlación lineal [42]:

El coeficiente de correlación lineal se define por

$$r^2 = 1 - \frac{\sum(y - y_{est})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \tag{3.49}$$

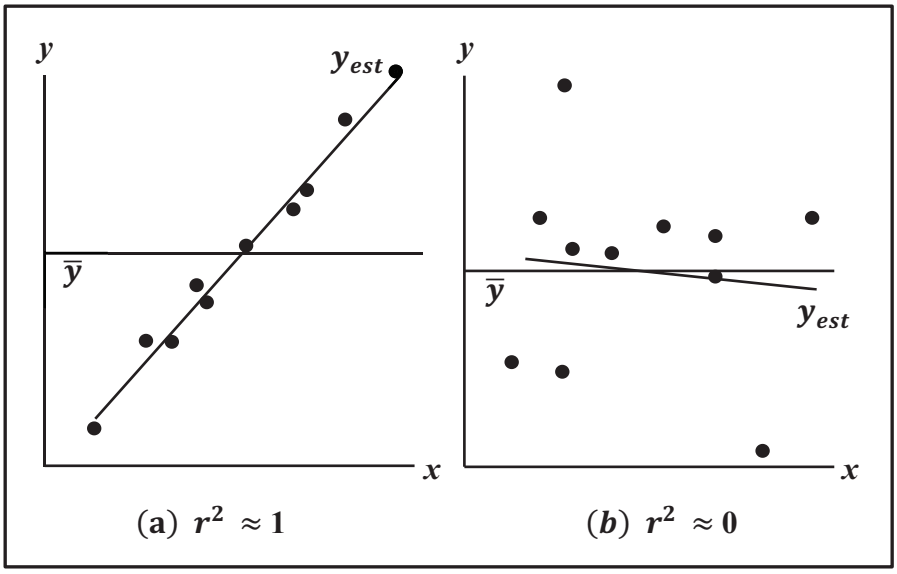
Es fácil notar a partir de la **Ecuación 3.49**, que r^2 es un número positivo entre 0 y 1, donde y_{est} es el valor estimado de y para un valor determinado de x. Para entender mejor el significado del coeficiente de correlación lineal se lo expresará de otra manera

$$r^2 = \frac{\sum(y_{est} - \bar{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} = \frac{\text{variación explicada}}{\text{variación total}} \tag{3.50}$$

El término variación explicada tiene su origen en el hecho de que las desviaciones $y_{est} - \bar{y}$ tienden a seguir un patrón definido, mientras que las desviaciones $y - y_{est}$ tienen un comportamiento aleatorio que no se puede predecir. Conforme a la **Ecuación 3.50**, r^2 es la parte de la variación total que puede ser explicada a través de la recta de regresión de mínimos cuadrados. Dicho de otra manera, r^2 indica que tan bien la recta de regresión de mínimos cuadrados se ajusta a los datos de una muestra.

Se dice que existe una correlación lineal perfecta, $r^2 = 1$, cuando la recta de regresión explica de forma completa la variación total. Por el contrario, si la variación total no es explicada por la recta de regresión, la variación explicada es cero y por ende también lo debe ser el valor de r^2. En la **Figura 3.15** se ilustra el contraste entre una recta con un buen ajuste y otra con uno deficiente

Figura 3.15 Gráficas de un ajuste muy bueno y otro deficiente



3.7.2.4. Flujo de calor por convección natural entre el fondo del estanque y el agua salina, $q_{c,b\text{-}w}$

La transferencia de calor por convección natural entre el fondo del estanque y el agua salina se calcula con la ecuación general

$$q_{c,b\text{-}w} = A_b \cdot h_{c,b\text{-}w} \cdot (T_b - T_w) \tag{3.51}$$

Donde A_b es el área del fondo del estanque (m^2), $h_{c,b\text{-}w}$ el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el fondo del estanque y el agua ($W/m^2 \cdot K$), T_b la temperatura del fondo del estanque (ºC) y T_w la temperatura del agua (ºC). El calor por convección natural entre el fondo del estanque y el agua corresponde al caso de una placa caliente mirando hacia arriba en un medio ambiente más frío.

Las ecuaciones para este caso en cuestión son **[5]**:

$$\text{Nu} = \frac{h_{c,b\text{-}w} \cdot L_c}{k_w} = 0.54 \cdot \text{Ra}^{1/4} \tag{3.52}$$

$$\text{Nu} = \frac{h_{c,b\text{-}w} \cdot L_c}{k_w} = 0.15 \cdot \text{Ra}^{1/3} \tag{3.53}$$

El intervalo de Ra para el uso de la **Ecuación 3.52** es $10^4 \leq \text{Ra} \leq 10^7$

El intervalo de Ra para el uso de la **Ecuación 3.53** es $10^7 \leq \text{Ra} \leq 10^{11}$

En las condiciones de operación de un destilador solar de estanque, el número de Rayleigh pertenece al segundo intervalo. Despejando $h_{c,b\text{-}w}$ de (3.53), resulta

$$h_{c,b\text{-}w} = \frac{0.15 \cdot k_w \cdot \text{Ra}^{1/3}}{L_c} \tag{3.54}$$

Donde k_w es la conductividad térmica del agua y L_c la longitud característica del fondo del estanque, cuya ecuación es igual a

$$L_c = \frac{A_b}{p} \tag{3.55}$$

Siendo p el perímetro del fondo del estanque.

Recordando que Ra es igual al producto de Gr y Pr, la **Ecuación 3.54** se extiende como sigue

$$h_{c,b\text{-}w} = 0.15 \cdot {k_w}^{2/3} \cdot \left[\frac{g \cdot \beta_w \cdot (T_b - T_w) \cdot {\rho_w}^2 \cdot C_{pw}}{\mu_w}\right]^{1/3} \tag{3.56}$$

Donde β_w, ρ_w, C_{pw}, y μ_w son el coeficiente de expansión térmica volumétrica, la densidad, el calor específico y la viscosidad dinámica del agua, respectivamente. En la ecuación anterior, el parámetro L_c se canceló, de modo que no es necesario su cálculo al momento de evaluar $h_{c,b\text{-}w}$.

Las expresiones para K_w y β_w en función de la temperatura son

$$k_w = -7.3 \times 10^{-6} T^2 + 1.8453 \times 10^{-3} T + 0.56939 \tag{3.57}$$

$$\beta_w = 6 \times 10^{-10}\, T^3 - 1.304 \times 10^{-7} T^2 + 1.5171 \times 10^{-5}\, T - 4.9548 \times 10^{-5} \tag{3.58}$$

Las **Ecuaciones 3.57** y **3.58** se elaboraron a partir de una tabla de las propiedades termofísicas del agua saturada presentada por Incropera y DeWitt **[17]**.

La formulación para μ_w en función de la temperatura se define por **[37]**

$$\mu_w = \frac{D \cdot 10^{E/(T+273.15-F)}}{1 \times 10^7} \tag{3.59}$$

Donde

$D = 239.4$; $E = 248.37$; $F = 140$

Las propiedades del agua presentes en la **Ecuación 3.56** deberán ser evaluadas a la temperatura media del agua, $(T_b + T_w)/2$.

3.7.2.5. Flujo de calor por radiación entre la superficie del agua y la cubierta transparente, $q_{r,w\text{-}g}$

La transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta es equivalente al intercambio de radiación entre dos superficies paralelas infinitas, esta suposición se fundamenta en la pequeña inclinación de la cubierta transparente y la gran longitud del destilador. Por consiguiente, de acuerdo a Incropera y DeWitt **[17]**, la transferencia de calor por radiación entre el agua y la cubierta se expresa como

$$q_{r,w\text{-}g} = \frac{A_w \cdot \sigma \cdot \left[(T_w + 273)^4 - \left(T_g + 273\right)^4\right]}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1} \tag{3.60}$$

En donde A_w es el área de la superficie libre del agua, σ la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de 5.670×10^{-8} (W/m^2·K^4), T_g la temperatura de la cubierta (ºC), ε_w la emisividad del agua y ε_g la emisividad de la cubierta.

3.7.2.6. Calor perdido hacia los alrededores por la base y paredes del destilador solar, q_p

La pérdida de calor hacia el medio ambiente se da en secuencia: primero convección, después conducción y finalmente radiación y convección. Al tener presente que con el uso de un aislante térmico, la resistencia térmica para la conducción es considerablemente superior a las resistencias para la convección y radiación. Resulta razonable asumir que la pérdida de calor hacia los alrededores se produce fundamentalmente por conducción a través de la base y paredes del destilador **[45]**, siendo su formulación algebraica la siguiente

$$q_p = q_f + q_s \tag{3.61}$$

Donde q_f representa el calor perdido por la base y q_s el calor perdido por las paredes, sus expresiones son:

$$q_f = \frac{k_f \cdot A_f \cdot (T_w - T_a)}{L_f} \tag{3.62}$$

$$q_s = \frac{k_s \cdot A_s \cdot (T_w - T_a)}{L_s} \tag{3.63}$$

Donde

k_f: Conductividad térmica de la base del destilador (W/m · °C)

A_f: Área de la base del destilador (m^2)

L_f: Espesor de la base del destilador (m)

T_a: Temperatura ambiente (ºC)

k_s: Conductividad térmica de las paredes del destilador

A_s: Área de las paredes del destilador

L_s: Espesor de las paredes del destilador

3.7.2.7. Flujo de calor por convección entre la cubierta transparente y el medio ambiente, $q_{c,g\text{-}a}$

El calor por convección entre la cubierta transparente y el medio ambiente está dado por

$$q_{c,g\text{-}a} = A_g \cdot h_{c,g\text{-}a} \cdot (T_g - T_a) \tag{3.64}$$

Siendo $h_{c,g\text{-}a}$ el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el aire circundante ($W/m^2 \cdot °C$), A_g y T_g son el área (m^2) y temperatura (ºC) de la cubierta, respectivamente.

El coeficiente $h_{c,g\text{-}a}$ se establece por la ecuación **[10]**:

$$h_{c,g\text{-}a} = 2.8 + 3 \cdot v_z \tag{3.65}$$

Donde v_z es la velocidad del viento en (m/s) y el subíndice z indica la altura sobre el suelo (m) a la que se ubica la cubierta. Esta velocidad se puede estimar a partir de la siguiente relación **[28]**

$$v_z = v_r \cdot \left(\frac{z}{z_r}\right)^{\alpha} \tag{3.66}$$

En la cual v_r es la velocidad de referencia del viento a una altura z_r y α un exponente que debe ser determinado.

Una expresión popular para evaluar dicho exponente está dada por **[28]**

$$\alpha = \frac{0.37 - 0.088 \cdot \ln(v_r)}{1 - 0.088 \cdot \ln\left(\frac{z_r}{10}\right)} \tag{3.67}$$

3.7.2.8. Flujo de calor por radiación entre la cubierta transparente y el cielo, $q_{r,g\text{-}a}$

La transferencia de calor por radiación entre la cubierta del destilador y la atmósfera es análoga al intercambio de radiación entre un pequeño cuerpo convexo y un recinto muy grande que le rodea. Para el caso en análisis, la ecuación correspondiente es **[10]**

$$q_{r,g\text{-}a} = A_g \cdot \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot \left[\left(T_g + 273\right)^4 - \left(T_{cielo} + 273\right)^4\right] \tag{3.68}$$

Para utilizar la relación anterior es necesario estimar la temperatura del cielo, con este fin se presentan dos formulaciones empíricas **[20]**:

$$T_{cielo} = 0.0552 \cdot (T_a + 273)^{3/2} - 273 \tag{3.69}$$

$$T_{cielo} = T_a - 6 \tag{3.70}$$

La primera ecuación es más precisa en condiciones de cielo despejado, mientras que la segunda brinda una aproximación correcta únicamente en días nublados **[20]**.

CAPÍTULO 4

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR

4.1. ALTERNATIVAS DE DISEÑO

En el **Capítulo 3** se señaló que es recomendable recurrir a la destilación solar como medio de desalinización, únicamente cuando hagan falta unos pocos metros cúbicos de agua al día. Por tal razón, el diseño del desalinizador se orientará hacia satisfacer las necesidades de agua de uso doméstico (específicamente, agua para beber) de pequeñas comunidades o grupos aislados.

En el capítulo anterior también se indicó que los destiladores solares pueden clasificarse en sistemas pasivos y activos. Los destiladores activos reciben una cantidad adicional de energía térmica, que puede ser suministrada mediante colectores solares, o por motores y procesos industriales a través de calor desechado. Con el conocimiento de las características generales de todos los destiladores solares más representativos, cuatro alternativas se han escogido como las más viables, estas son:

Sistemas pasivos

a) Destilador solar de estanque (DSE)

b) Destilador solar de múltiples mechas (DSMM)

Sistemas activos

c) Destilador solar de múltiples etapas con colector plano (DSAP)

d) Destilador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío (DSAT)

Inicialmente se tenía planeado elegir como una de las alternativas a un destilador solar activo de múltiples etapas con colector parabólico. No obstante, el uso de colectores solares parabólicos no es muy apropiado en el Ecuador, ya que el componente difuso de la radiación solar es muy alto en casi todo el país; y como se sabe, estos dispositivos captan poca radiación difusa.

A continuación se expondrán las ventajas y desventajas de todas las alternativas de diseño

a) Destilador solar de estanque (DSE)

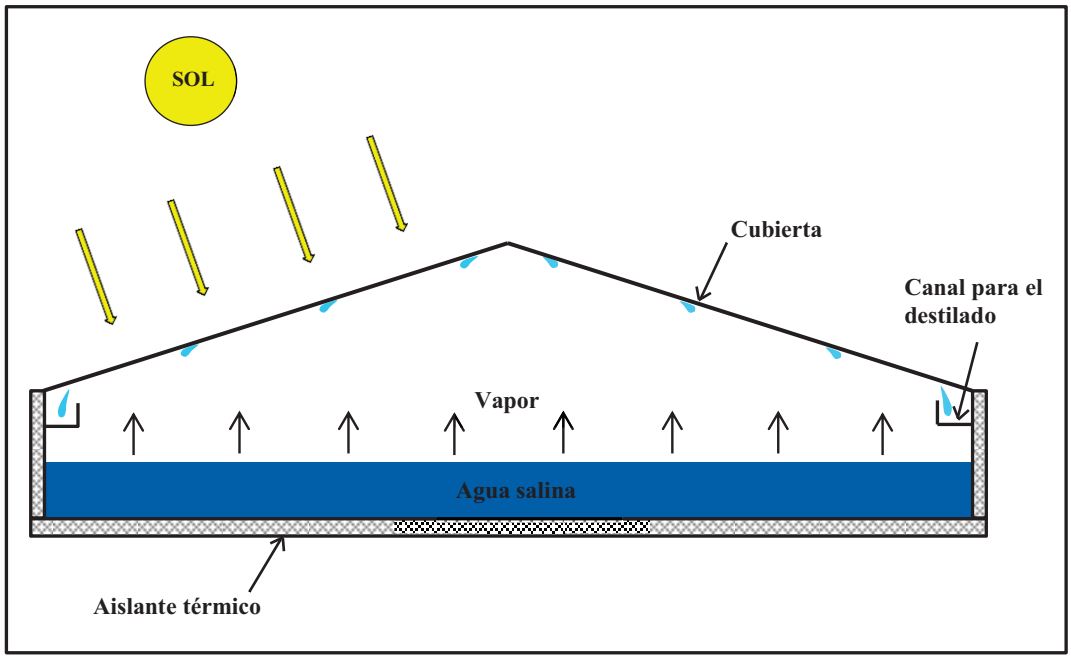
Ventajas

- Bajo costo
- Fácil construcción
- Fácil de operar y mantener
- Diseño muy simple y confiable
- Instalación sencilla

Desventajas

- Baja producción de agua
- La cubierta es frágil (en caso de que se use vidrio común)

Figura 4.1 Destilador solar de estanque (DSE)



b) Destilador solar de múltiples mechas (DSM)

Ventajas

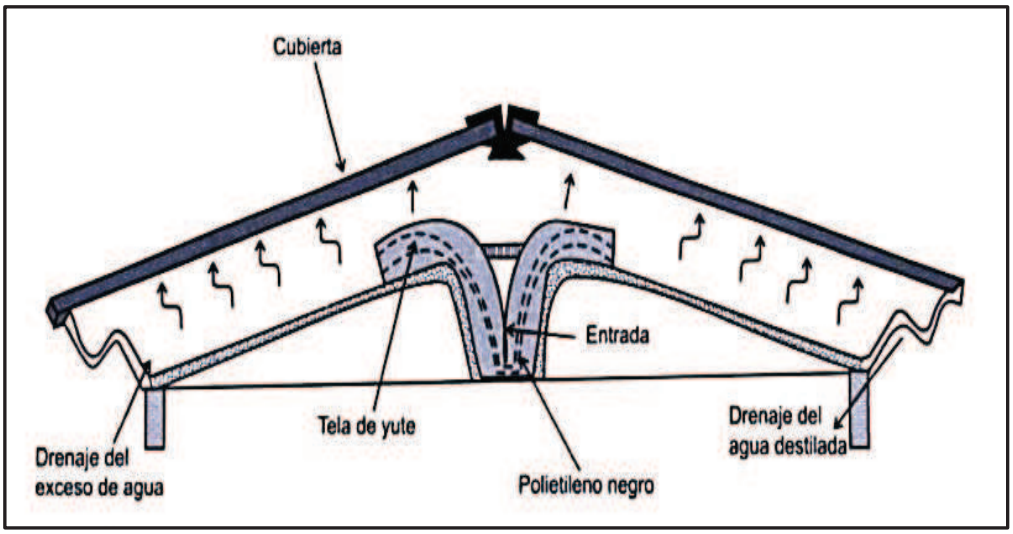
- Mayor producción que un destilador solar de estanque
- Costo relativamente bajo
- Es compacto

- Fácil de transportar e instalar
- Se puede orientar con cualquier inclinación para que la captación de radiación sea máxima

Desventajas

- Alto riesgo de corrosión y formación de depósitos minerales
- El mantenimiento es más frecuente que en el caso de un destilador solar de estanque
- La cubierta es frágil (en caso de que se use vidrio común)

Figura 4.2 Destilador solar de múltiples mechas (DSM)



Fuente: Ibáñez et al.; Tecnología solar"; 2004 **[16]**

c) Destilador solar activo de múltiples etapas con colector plano (DSMP)

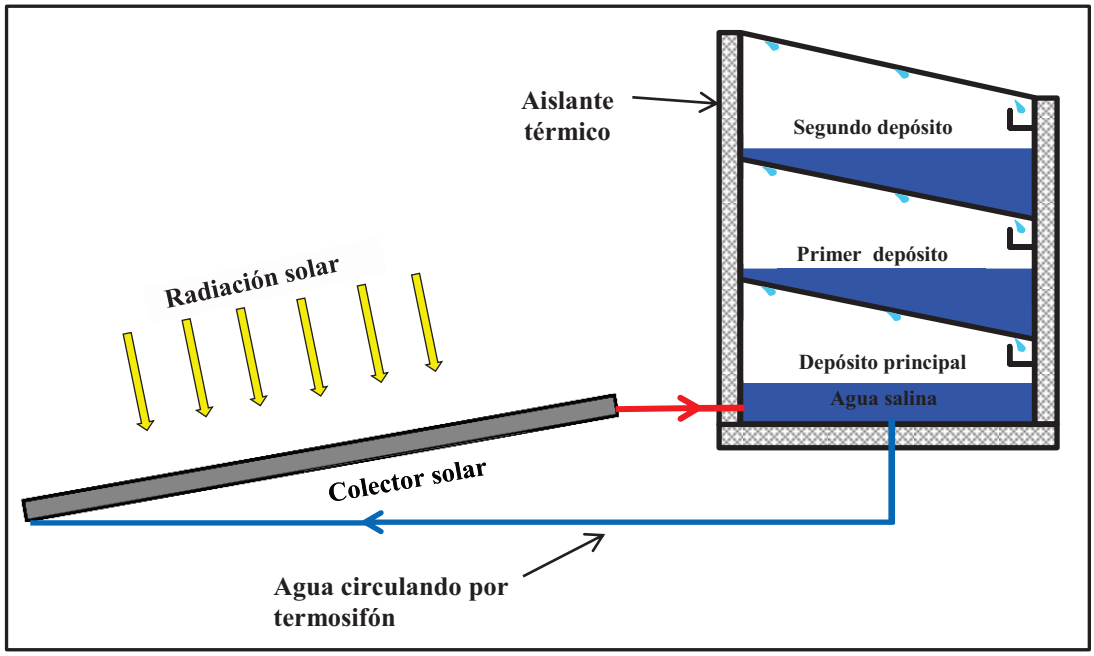
Ventajas

- Alta producción de agua
- Su funcionamiento es flexible, pudiéndose aumentar o disminuir la producción de agua destilada simplemente al variar el número de etapas
- Para un mismo nivel del producción, ocupa menos espacio que un destilador solar de estanque

Desventajas

- Alto costo
- Su operación y mantenimiento son relativamente complicados
- Su instalación es más difícil que la de un destilador de estanque
- Posee un diseño más complejo que el de un destilador de estanque convencional, por ende también su construcción es más difícil

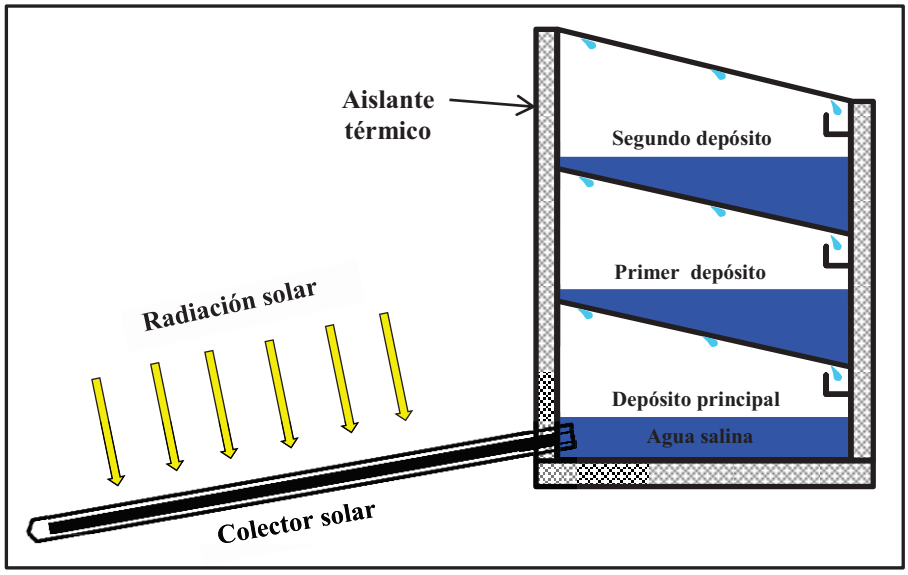
Figura 4.3 Destilador solar de múltiples etapas con colector plano (DSMP)



c) Destilador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío (DSMT)

Las ventajas y desventajas de este destilador solar son en esencia las mismas que presenta el DSAP, las diferencias residen en que el DSAT puede producir una mayor cantidad de agua destilada y que tanto su construcción e instalación son un poco más complicadas.

Figura 4.4 Destilador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío (DSMT)



4.1.1. MÉTODO DE SELECCIÓN

Para seleccionar el desalinizador más conveniente se usará el método de la media ponderada, este consiste en obtener la media de un conjunto de datos dando un peso de valoración a cada observación o parámetro. Su cálculo es el siguiente

$$\bar{x} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} \tag{4.1}$$

Donde

x_i = Valor de la observación o parámetro i

w_i = Peso de la observación o parámetro i

Tomando como guía las ventajas y desventajas de cada desalinizador se determinarán los principales parámetros de selección, otorgándoles un peso de valoración equivalente a un número del 0 al 10. Después, se evaluarán las alternativas respecto a cada uno de los parámetros, asignándoles de igual manera un número del 0 al 10. Por último, se seleccionará la alternativa con la media ponderada más alta.

Tabla 4.1 Parámetros de selección y su peso de valoración

PARÁMETRO DE SELECCIÓN	PESO DE VALORACIÓN
Producción diaria de agua destilada	10
Complejidad del diseño	6
Disponibilidad de materiales en el mercado local	7
Costos de fabricación	9
Facilidad de transporte e instalación	5
Costos de operación y mantenimiento	7
Vida útil	8

Tabla 4.2 Evaluación de las alternativas de diseño

PARÁMETRO DE SELECCIÓN	PESO DE VALORACIÓN	Alternativas			
		DSE	DSMM	DSMP	DSMT
Producción diaria de agua destilada	10	2	3	8	9
Complejidad del desalinizador	6	9	8	7	6
Disponibilidad de materiales en el mercado local	7	9	9	9	8
Costos de fabricación	9	8	7	5	4
Facilidad de transporte e instalación	5	8	8	7	6
Costos de operación y mantenimiento	7	7	6	5	5
Vida útil	8	8	8	8	8
MEDIA PONDERADA		**6.96**	**6.73**	**7**	**6.67**

Como ejemplo se calculará la media pondera correspondiente al destilador solar de estanque

$$\sum w_i = 52$$

$$\sum w_i x_i = 10(2) + 9(6) + 9(7) + 8(9) + 8(5) + 7(7) + 8(8) = 362$$

$$\bar{x} = \frac{\sum w_i x_i}{\sum w_i} = \frac{362}{52} = 6.96$$

De acuerdo a la **Tabla 4.2,** el destilador solar de múltiples etapas con colector solar plano es la mejor alternativa, con una media ponderada igual a 7. Muy de cerca le sigue el destilador solar de estanque, cuya media ponderada es de 6.96.

4.2. FUNCIONAMIENTO DEL DESTILADOR SOLAR DE MÚLTIPLES ETAPAS CON COLECTOR SOLAR PLANO.

Las partes principales del destilador son una Torre de destilación y un colector solar plano que opera por termosifón. La torre está compuesta por un conjunto de depósitos de agua colocados uno encima de otro. El compartimiento inferior, denominado Depósito principal, se conecta por medio de tuberías al colector solar. En el esquema de la **Figura 4.3** se aprecia la disposición general del aparato y sus partes.

Cuando la radiación solar incide sobre el colector, el agua contenida dentro se calienta y fluye por convección natural hasta el Depósito principal, donde se enfría al ceder su energía al agua salina, y finalmente regresar al colector, completando un circuito cerrado. Como resultado, el agua del Depósito principal se calienta e intercambia energía por evaporación, convección y radiación con el Primer depósito, liberando también un poco de calor hacia el medio ambiente. El vapor formado en el Depósito principal se condensa en el fondo del Primer depósito, cediendo su calor latente; desde aquí el condensado se desliza hasta caer en un canal que lo lleva fuera de la unidad. El calor transferido calienta el agua del Primer depósito, proceso de recuperación de calor que se repite en los demás compartimientos.

Para reducir los costos y simplificar un poco la construcción del desalinizador se decidió no usar un intercambiador de calor en el Depósito principal. Esta no es una condición normal de operación, pues la circulación de agua salina por el colector, provocaría rápidamente su deterioro. De modo que al instalar este tipo de destilador donde se requiera

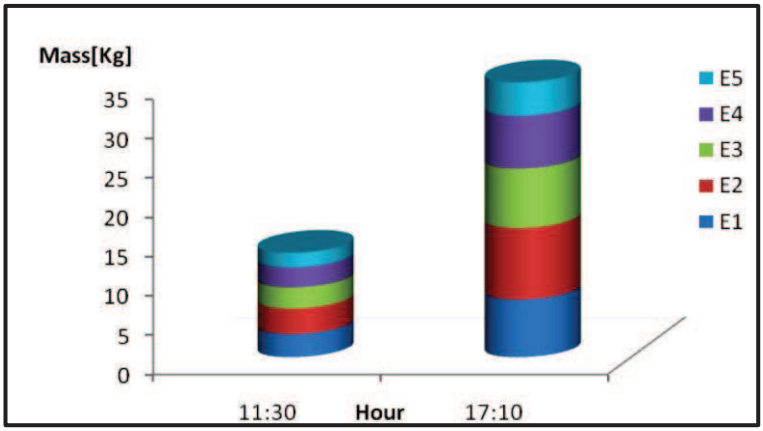
un servicio de desalinización, necesariamente hay que emplear un intercambiador de calor o buscar otra solución para evitar la corrosión del colector. En el presente proyecto, los riesgos de corrosión que se presentan por la circulación de agua salada se reducen al mínimo, ya que las pruebas a las que el desalinizador estará sujeto se realizarán primordialmente con agua potable en lugar de salina.

4.3. ELECCIÓN DEL NÚMERO DE ETAPAS EN LA TORRE DE DESTILACIÓN

Cuando K. Schwarzer et al. **[40]** desarrollaron un destilador solar activo con recuperación de calor se determinó que el número óptimo de etapas en la torre de destilación variaba entre 5 y 7. En la **Figura 4.5** se muestra el destilado acumulado en cada una de las 5 etapas del desalinizador desarrollado por K. Schwarzer et al. **[41]**; la producción fue de 35 litros durante un día de operación, de esta cantidad, el aporte de las cuatro primeras etapas fue de 31 litros, 24 el de las tres primeras y 16 el de las dos etapas iniciales; estas cifras corresponden al 89, 69 y 46 % del total, respectivamente. Aunque con una torre de destilación de 4 o 5 etapas se obtiene la mayor cantidad de agua, el dinero disponible para este proyecto es limitado, motivo por el cual se descarta dicha posibilidad; debiéndose entonces determinar la conveniencia de usar 2 o 3 etapas en el prototipo.

Asumiendo el mismo precio para cada depósito de la torre, una variación de 2 a 3 etapas conlleva un aumento del 50 % en su costo; asimismo, la generación de líquido se incrementa en un porcentaje similar al utilizar 3 etapas en lugar de 2. No obstante, los gastos en el desalinizador incluyen también el colector solar y el sistema de distribución de agua; en consecuencia, el aumento del costo total es en realidad bastante inferior al 50 %. Por lo antes expuesto, es más apropiado construir un destilador de 3 etapas; además, con casi el 70 % del máximo posible, se tendrá una elevada producción de agua.

Figura 4.5 Producción acumulada de agua en un destilador solar activo de 5 etapas



Fuente: Schwarzer et al.; "Field results in Namibia and Brazil from new solar desalination system" **[41]**

4.4. ÁREA DEL COLECTOR SOLAR PLANO

El área de los colectores solares planos es usualmente de 2 m^2, con un precio por unidad que supera los 400 USD, únicamente se podrá adquirir un panel. Por lo tanto, se analizará de forma general, si un colector de 2 m^2 es suficiente para cumplir el objetivo de producir 4 litros promedio de agua al día. Con este propósito es necesario resolver la siguiente ecuación

$$m_{e,total} = 0.8 \cdot \frac{Q_{u,total} \cdot \eta_1 \cdot \text{COP}}{\overline{h_{fg}}} \tag{4.2}$$

Donde $m_{e,total}$ es el destilado producido por el desalinizador durante un día (kg), $Q_{u,total}$ la energía suministrada por el colector durante un día de operación (J), COP el Coeficiente de Rendimiento de la torre de destilación (ver la **Sección 3.6.2**), $\overline{h_{fg}}$ la entalpia promedio de vaporización del agua (2390 kJ) y η_1 la eficiencia de la primera etapa del desalinizador. Schwarzer et al. **[40]** afirman que al remplazar en los depósitos, el agua salada por potable, la producción diaria se reduce en alrededor del 20 %, motivo por el cual, la ecuación anterior se multiplicó por el número 0.8. Conforme a Sayigh A.A.M. **[39]**, el COP se aproxima al producto entre el número de etapas y 0.8; para este caso en análisis, el COP es de 2.4.

Debido a que las pruebas al desalinizador se llevarán a cabo en Quito, el $Q_{u,total}$ se estimará con los valores más bajos de radiación media diaria mensual de esta ciudad, iguales a 4800 Wh/m^2/día (ver la **Tabla 2.6**). Por las elevadas temperaturas requeridas en un destilador de múltiples etapas es preciso usar un colector solar de alta eficiencia. De acuerdo a Kalogirou Soteris A. **[24]**, la curva de rendimiento de un buen colector plano se define por

$$\eta_c = 0.792 - 6.65\left(\frac{T_e - T_a}{G_c}\right) - 0.06\left[\frac{(T_e - T_a)^2}{G_c}\right] \tag{4.3}$$

Donde η_c es la eficiencia del colector, G_c la radiación solar que incide sobre el mismo (W/m^2), T_a la temperatura ambiente y T_e la temperatura del agua cuando ingresa al colector; cabe mencionarse que T_e es también T_w, la temperatura del agua en el depósito de la torre que se conecta al colector. Para facilitar la utilización de la ecuación anterior se obtendrá el promedio de la radiación solar en un lapso de 6 horas, comprendido entre las 9 AM y las 15 PM, periodo en el cual un panel solar comúnmente suministra la mayor parte de su energía útil; el resultado de esta operación es 800 W/m^2.

El agua en el depósito conectado al colector alcanzará temperaturas de entre 70 y 80 °C (ver la **Sección 3.6.2**), mientras que la mínima temperatura al inicio de su calentamiento se cree descenderá a 40 °C, aproximadamente; teniendo en cuenta que una radiación de 4800 Wh/m^2/día no es tan alta, la temperatura máxima a utilizarse en los cálculos será de 70 °C. Para aplicar la **Ecuación 4.3** se requiere también de la temperatura ambiente, T_a, 20 °C es un valor razonable para el periodo de tiempo comprendido entre las 9 y 15 horas.

Con el conocimiento de los dos extremos de temperatura se puede estimar la eficiencia diaria promedio del colector, el procedimiento es el siguiente:

a) Eficiencia con T_e = 70 °C

$$\eta = 0.792 - 6.65\left(\frac{50}{800}\right) - 0.06\left(\frac{50^2}{800}\right) = 0.189$$

b) Eficiencia con T_e = 40 °C

$$\eta = 0.792 - 6.65\left(\frac{20}{800}\right) - 0.06\left(\frac{20^2}{800}\right) = 0.596$$

La eficiencia diaria del colector está dada por el promedio entre 0.596 y 0.189, cuyo resultado es 0.3925, que se tomará como el 40 %.

De la **Ecuación 2.55** se tiene que

$$Q_u = \eta_c \cdot G_c \cdot A_c \tag{4.4}$$

En donde Q_u es la energía entregada por el colector (W) y A_c su área (m^2). Resolviendo la ecuación anterior se obtiene

$$Q_u = 0.4 \cdot 800\ \mathrm{W/m^2} \cdot 2\ m^2 = 640\ \mathrm{W}$$

$Q_{u,total}$ está dado por

$$Q_{u,total} = 640\ \mathrm{W} \cdot 3600\ \mathrm{s} \cdot 6\ \mathrm{h} = 13824\ \ \mathrm{kJ}$$

El parámetro más difícil de evaluar o predecir en la **Ecuación 4.2** es η_1, la eficiencia de la primera etapa del destilador, la misma se expresa como

$$\eta_1 = \frac{m_e \cdot \overline{h_{fg}}}{Q_{u,total}} \tag{4.5}$$

Donde m_e es el destilado producido en la primera etapa del desalinizador durante un día de operación (kg). Por la dificultad de calcular m_e, para η_1 se asumirá una cifra moderada del 50 %.

Finalmente, la producción diaria es

$$m_{e,total} = \frac{0.8 \cdot 13824000 \cdot 0.5 \cdot 2.4}{2390000} = 5.55\ \mathrm{kg}$$

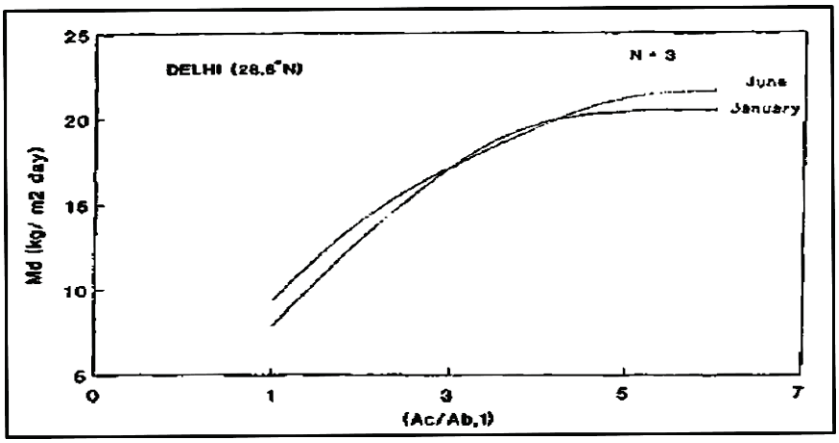
En consecuencia, bajo las condiciones más bajas de radiación media diaria mensual en la ciudad de Quito, un colector solar plano de 2 m^2 proporcionaría la energía necesaria para generar un mínimo de 4 litros de agua destilada al día.

4.5 RELACIÓN ENTRE EL ÁREA DEL COLECTOR SOLAR Y EL ÁREA DE LAS ETAPAS DE LA TORRE DE DESTILACIÓN, A_c/A_{wn}

La relación entre el área del colector y el área de las etapas de la Torre de destilación es un factor importante de diseño, que es útil al optimizar la producción del desalinizador solar. A medida que el área de las etapas disminuye, conservándose constante la del colector, se va incrementando la producción de agua destilada. Sin embargo, llega un punto en el cual la reducción de área provoca una disminución gradual en la generación de agua, es entonces importante determinar el valor más propicio de A_c/A_{wn}.

Adhikari R. C. y Kumar Ashvini **[2]** realizaron la simulación de un destilador solar activo de tres etapas, obteniendo la siguiente gráfica que indica la influencia entre la producción diaria de agua destilada y el cociente entre el área del colector solar (A_c) y el área de la etapa inferior del desalinizador ($A_{b,1}$).

Figura 4.6 Influencia entre la producción diaria de agua y $(A_c/A_{b,1})$ en un desalinizador solar activo de 3 etapas



Fuente: Adhikari R. C. y Kumar Ashvini; "Transient simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still"; 1993 **[2]**

En la **Figura 4.6** se puede advertir que cuando $(A_c/A_{b,1})$ alcanza un valor aproximado de 5, la producción de agua destilada es máxima. Por tal motivo, el desalinizador solar se construirá con un valor de (A_c/A_{wi}) igual a 5. Con una superficie del colector de 2 m^2, el área de la sección longitudinal de los depósitos será de 0.4 m^2, con un largo de 80 cm y ancho de 50.

4.6. ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE LA SUPERFICIE DE CONDENSACIÓN EN CADA DEPÓSITO

Como se puede observar en la **Figura 4.3**, el fondo del primer y segundo depósito, así como la cubierta de la Torre de destilación, poseen una inclinación respecto a la horizontal que permite al agua destilada deslizarse hasta un canal donde es recogida. Dicha inclinación deberá ser lo suficientemente grande para impedir que el destilado caiga al reservorio de agua salina, antes de llegar al canal de recolección. Sin embargo, no es conveniente que la magnitud de este ángulo sea excesivamente grande, situación que supondría una mayor distancia entre las superficies de evaporación y condensación, con la subsiguiente disminución en la producción de agua destilada.

Con estas consideraciones es necesario realizar una prueba experimental que determine el ángulo óptimo de inclinación de la superficie de condensación en los depósitos. La prueba consistirá en reproducir de forma muy simple el fenómeno de evaporación y condensación que ocurre dentro de cada etapa del desalinizador.

Esto se logrará al calentar agua contenida en una bandeja, sobre la que se dispondrá una lámina de acero inoxidable[4] con una inclinación respecto a la superficie del agua. Primero, se colocará la plancha de acero con un ángulo de 6° y se observará si toda el agua condensada se desliza hasta su extremo inferior. Con una inclinación tan pequeña, muy probablemente la mayor parte del condensado caerá de nuevo a la bandeja, antes de llegar al borde inferior de la plancha. Por esta razón, se modificará gradualmente el ángulo de inclinación de la lámina con incrementos de 2°, hasta llegar a una inclinación en la que toda el agua condensada se deslice por la superficie interior de la plancha sin caer prematuramente en la bandeja.

Para evitar que una gran cantidad de vapor escape antes de condensarse, el espacio comprendido entre el agua y la lámina de acero se cubrirá con un plástico transparente, de manera que el proceso de evaporación y condensación pueda visualizarse desde el exterior. Adicionalmente, con el objeto de aumentar la rapidez de condensación, la superficie exterior de la plancha se revestirá con una tela húmeda.

[4]En esta prueba y en la construcción del desalinizador solar se utilizará chapa de acero inoxidable AISI 430 de 0.9 mm de espesor, que por su bajo costo fue la opción más apropiada.

La **Figura 4.7** muestra dos fotografías de este elemental dispositivo de prueba. En la fotografía de la izquierda se observa el exterior del dispositivo, mientras que en la imagen de la derecha se aprecia el fenómeno de evaporación y condensación en su interior.

Figura 4.7 Dispositivo de prueba utilizado en la determinación del ángulo óptimo de inclinación de las superficies de condensación del desalinizador solar

La validez del experimento depende del cumplimiento de la siguiente condición: la dimensión de la plancha de acero en dirección del flujo del condensado deberá ser igual al ancho de los depósitos del destilador, es decir 50 cm.

4.6.1. RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Al posicionar la lámina de acero con un ángulo de 6°, manteniendo el agua a una temperatura que oscilaba entre los 75 y 80 °C, se notó que la mayor parte del condensado caía a la bandeja antes de alcanzar el borde inferior de la plancha. La situación mejoraba a medida que se incrementaba la inclinación, con un ángulo de 12°, una fracción considerable del agua destilada se deslizaba hasta el extremo inferior de la lámina. Cuando se alcanzó un ángulo de 16°, todo el condensado fluía a lo largo de la plancha sin caer prematuramente en la bandeja. Concluyéndose, que un ángulo de 16° es la inclinación óptima que debe tener el fondo de cada depósito y la cubierta de la Torre de destilación.

4.7. ALIMENTACIÓN DE AGUA AL DESALINIZADOR SOLAR

El agua producida por el desalinizador solar debe reponerse en cada uno de los compartimientos de la Torre de destilación, esto puede efectuarse de dos maneras. La primera consiste en reponer el agua temprano en la mañana, una vez al día. En la segunda, la alimentación de agua a cada depósito se realiza de forma continua a medida que el destilado abandona la unidad.

La reposición diaria puede realizarse manualmente o mediante un dispositivo mecánico o electrónico que permita el paso de agua al desalinizador una vez al día. El uso de válvulas de flotador es una alternativa muy simple, económica y confiable para un suministro continuo de agua, que hace innecesario el llenado manual o la compra de dispositivos más costosos y sofisticados. Por consiguiente, un tanque de alimentación que distribuya el líquido de forma continua a cada depósito mediante tres válvulas de flotador, es la opción más simple y confiable para el abastecimiento de agua al destilador solar.

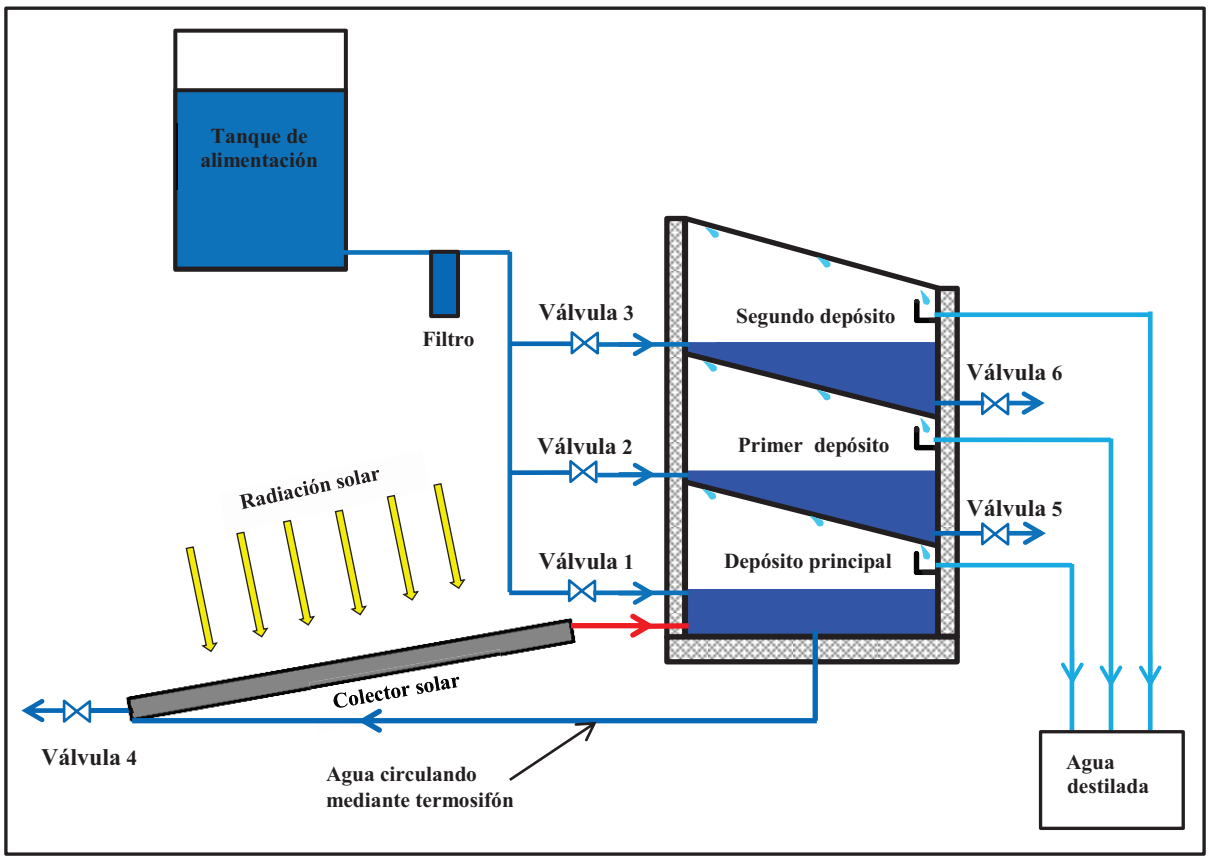
4.8. FILTRACIÓN DEL AGUA DE ALIMENTACIÓN

El agua en el desalinizador solar puede alcanzar temperaturas cercanas a su punto de ebullición, circunstancia que contribuye a la formación de sedimentos y depósitos minerales en el interior del aparato. A pesar de que las pruebas al desalinizador se efectuarán principalmente con agua potable en lugar de salada, el proceso continuo de evaporación hace inevitable la acumulación de sedimentos y en menor grado de depósitos minerales. Por esta razón, con el objeto de reducir y controlar dicho fenómeno, resulta muy importante la instalación de un filtro entre el tanque de alimentación y la Torre de destilación.

Es muy conveniente la utilización de un filtro de cartucho (ver el **Anexo I**) en este proyecto, pues se los emplea en pequeños sistemas de purificación y para la filtración de agua en el sitio de uso. Los filtros de cartucho pueden obstruirse al colar partículas compresibles de gran tamaño; esta desventaja no afectaría el funcionamiento del desalinizador, ya que el agua a emplearse en las pruebas será mayormente agua potable de buena calidad. Además, por la lentitud del proceso de destilación, las partículas sólidas suspendidas en el agua del tanque tendrán tiempo suficiente para asentarse en el fondo del mismo sin pasar a la torre de destilación y al colector solar.

Por ser económico, confiable y de fácil recambio, un filtro de cartucho de uso doméstico se instalará en el desalinizador solar térmico. En la **Figura 4.8** se indica el esquema definitivo del prototipo; en el que constan la torre de destilación, el colector solar, el tanque de alimentación con sus tuberías de distribución y el recipiente de recolección de agua destilada.

Figura 4.8 Esquema del desalinizador solar térmico con todas sus partes principales



4.9. MODELO MATEMÁTICO DEL DESALINIZADOR SOLAR

4.9.1. COLECTOR SOLAR PLANO

4.9.1.1. Posición del colector

En la **Sección 2.12.5.3** se explicó como posicionar un colector solar plano con la orientación e inclinación correctas. En el hemisferio norte los colectores planos deben colocarse mirando hacia el Sur, y en el hemisferio sur mirando hacia el Norte. Debido a que el Ecuador se encuentra atravesado por la línea ecuatorial, los colectores pueden disponerse en cualquiera de estas dos direcciones.

Se considera que el ángulo óptimo de inclinación de un colector fijo (plano o de tubos al vacío) respecto a la horizontal debe ser igual a la latitud geográfica. En el Ecuador la latitud es de 0°, puesto que este ángulo no facilita el funcionamiento del colector por circulación natural, su inclinación será de 10°. La **Figura 2.22** muestra los límites prácticos de orientación de un colector solar y su ángulo de inclinación.

4.9.1.2. Radiación solar incidente sobre el colector

Con los datos de irradiancia solar sobre una superficie horizontal suministrados por el LEAEE[5] se debe estimar la radiación incidente sobre el colector. Sin embargo, gracias a la pequeña inclinación del colector (10°), tal vez no se precise de este cálculo, y tanto la simulación del destilador como su evaluación experimental podrían efectuarse sin modificar los datos proporcionados por el laboratorio.

En el análisis de los sistemas solares de conversión de energía es común utilizar los datos de la radiación solar horaria. En consecuencia, a continuación se presentan las ecuaciones que permiten estimar la radiación horaria sobre el colector; a partir de las **Ecuaciones 2.23** y **2.24** se tiene:

$$\frac{I_d}{I} = 1.006 - 0.317\, k_T + 3.1241\, {k_T}^2 - 12.7616\, {k_T}^3 + 9.7166\, {k_T}^4 \qquad (4.6)$$

$$k_T = \frac{I}{I_o} \qquad (4.7)$$

Donde I es la radiación horaria sobre una superficie horizontal (J/m^2), I_d la radiación difusa horaria sobre una superficie horizontal (J/m^2), k_T el índice horario de claridad e I_o la radiación extraterrestre horaria sobre una superficie horizontal (J/m^2). La radiación I se obtiene al promediar los datos de irradiancia (W/m^2) del periodo en cuestión (1 hora) y multiplicar el resultado por 3600.

De la **Ecuación 2.25** tenemos

$$I_o = \frac{12\times 3600\, G_{sc}}{\pi}\left[1 + 0.033\cos\left(\frac{360\, n}{365}\right)\right] \times \left[\cos\phi\cos\delta\,(sen\,\omega_2 - sen\,\omega_1) + \left(\frac{\pi\,(\omega_2-\omega_1)}{180}\right) sen\,\phi\, sen\,\delta\right] \qquad (4.8)$$

[5] Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional

Donde G_{sc} es la constante solar (1367 W/m^2), ω_2 y ω_1 los ángulos horarios en grados, cuya resta define el periodo de una hora, n el día de año ($1 \leq n \leq 365$), δ la declinación solar ($-23.5^o \leq \delta \leq 23.5^o$) y ϕ la latitud del lugar (0° para Quito).

A partir de la **Ecuación 2.4** se tiene

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \tag{4.9}$$

Despejando I_d de (4.6), resulta

$$I_d = I \cdot (1.006 - 0.317\, k_T + 3.1241\, {k_T}^2 - 12.7616\, {k_T}^3 + 9.7166\, {k_T}^4) \tag{4.10}$$

La radiación directa horaria sobre una superficie horizontal es igual a

$$I_b = I \cdot \left[1 - \left(1.006 - 0.317\, k_T + 3.1241\, {k_T}^2 - 12.7616\, {k_T}^3 + 9.7166\, {k_T}^4\right)\right] \tag{4.11}$$

La **Ecuación 2.36** permite calcular la radiación total sobre una superficie inclinada (W/m^2), pero también es válida para determinar la radiación horaria, adaptando dicha formulación se obtiene

$$I_c = I_b\, R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho . I \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \tag{4.12}$$

Donde I_c es la radiación total horaria sobre el colector, β el ángulo de inclinación del colector respecto a la horizontal (10°) y ρ la reflectancia difusa del suelo que rodea al colector, para hierba y concreto tiene un valor aproximado de 0.2

El factor R_b se establece por la relación (ver la **Sección 2.10.1**)

$$R_b = \frac{\text{sen } (\phi - \beta) \text{ sen } \delta + \cos(\phi - \beta) \cos\delta \cos\omega}{\text{sen } \phi \text{ sen } \delta + \cos\phi \cos\delta \cos\omega} \tag{4.13}$$

Donde ω es el ángulo horario del punto medio de la hora en análisis[6] (ver la **Sección 2.4**). La **Ecuación 4.13** se aplica para superficies inclinadas que miran hacia el Sur, por lo tanto, el colector solar se instalará con esta orientación

4.9.1.3. Energía entregada por el colector solar, Q_u

Para el análisis de $Q_u$se precisa de las siguientes suposiciones:

- Las pérdidas de calor por las tuberías de conexión entre el colector y la torre de destilación son despreciables
- El colector proporciona energía útil, únicamente cuando $G_c \cdot (\tau\alpha_p)_e > U_L(T_e - T_a)$ (ver la **Ecuación 2.53**)

En el **Capítulo 2** se describieron dos métodos para estimar el calor entregado por un colector solar plano que opera por termosifón. Por ser más simple y exacto (si se tienen datos experimentales) se utilizará el método que supone un aumento constante de la temperatura del agua a su paso por el colector

A partir de las **Ecuaciones 2.59**, **2.60** y **2.62** se tiene:

$$Q_u = \dot{m} \cdot C_{pw} \cdot (T_s - T_e) = \dot{m} \cdot C_{pw} \cdot \Delta T_f \tag{4.14}$$

$$\dot{m} = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c}{C_{pw} \cdot \ln\left[1 - \frac{U_L(T_s - T_e)}{S - U_L(T_e - T_a)}\right]} \tag{4.15}$$

Donde Q_u es la energía útil entregada por el colector (W), A_c el área del colector solar (m^2), S la radiación solar absorbida (W/m^2), U_L el coeficiente total de pérdidas del colector ($W/m^2 \cdot °C$), F' el factor de eficiencia del colector, T_a la temperatura ambiente (°C), $\dot{m}$ el flujo másico de agua que circula por el colector (kg/s), C_{pw} el calor específico del agua ($J/kg \cdot °C$), T_e y T_s la temperatura del agua a la entrada y salida del colector, respectivamente (°C) y ΔT_f el incremento constante de la temperatura del agua.

Al remplazar (4.15) en la parte izquierda de (4.14) se llega a la siguiente formulación

[6] Si se desea conocer la radiación horaria sobre el colector desde las 9 AM hasta las 10 AM, ω debe evaluarse a las 9:30 AM hora solar, siendo su valor de -37.5°

$$Q_u = \frac{-U_L \cdot F' \cdot A_c \cdot (T_s - T_e)}{\ln\left[1 - \frac{U_L(T_s - T_e)}{S - U_L(T_e - T_a)}\right]} \tag{4.16}$$

Cuando el desalinizador solar se encuentre en funcionamiento, se procederá a medir el aumento de la temperatura del agua a su paso por el colector $(T_s - T_e)$. Con el conocimiento de esta variación de temperatura, el cálculo de Q_u es una tarea sencilla.

De la **Ecuación 2.41** resulta

$$U_L = U_{sup} + U_f + U_e \tag{4.17}$$

Donde U_{sup} es el coeficiente de pérdidas por la cubierta del colector, U_f el coeficiente de pérdidas por el fondo del colector y U_e el coeficiente reducido de pérdidas laterales

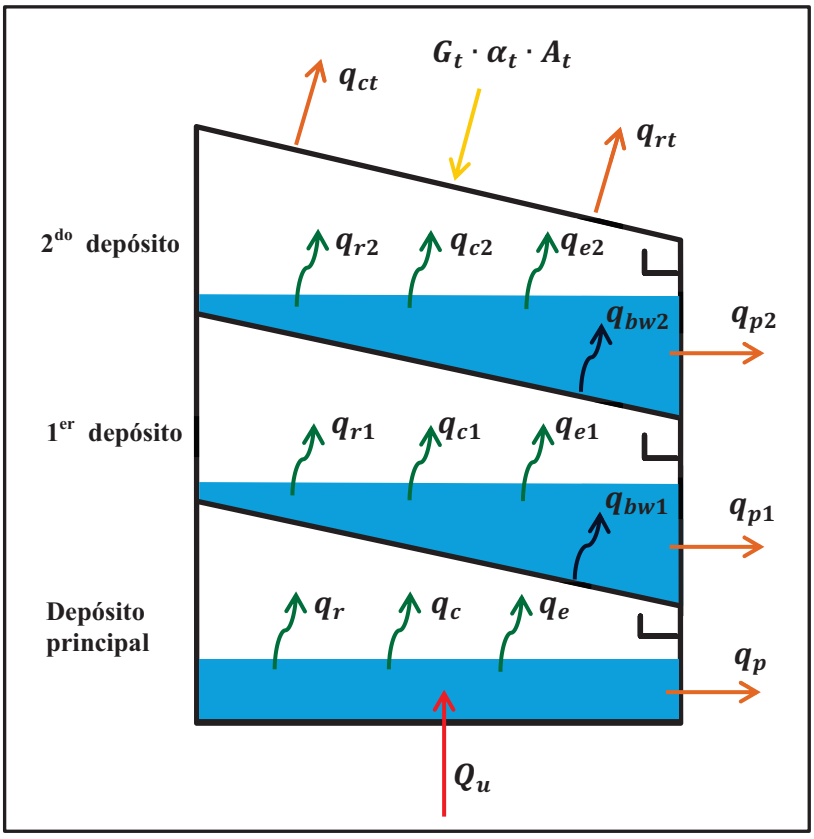
Los coeficientes U_{sup}, U_f y U_e se definen por las **Ecuaciones 2.42**, **2.43** y **2.44**, respectivamente. El factor de eficiencia del colector F' y la radiación solar absorbida S están dados por las **Ecuaciones 2.46** y **2.50**

4.9.2. TORRE DE DESTILACIÓN

Dentro de cada etapa de la Torre de destilación, la transferencia de calor entre el agua y el fondo del depósito situado arriba se da por convección, evaporación y radiación. El flujo de calor por evaporación depende en gran medida del flujo de calor por convección, ya que gracias a este último, el vapor formado en el agua asciende hasta la superficie de condensación. La Torre de destilación intercambia calor con el medio ambiente, principalmente por convección, conducción y radiación. La convección y radiación gobiernan el intercambio de energía entre la cubierta de la última etapa y el aire circundante, mientras que la conducción rige la perdida de calor desde las paredes y la base de la torre. A medida que el agua destilada se va produciendo, agua salina debe ingresar de forma continua para mantener constante el nivel de líquido en cada depósito.

En la **Figura 4.9** se indica un esquema de la Torre de destilación con todos los flujos de calor presentes durante su funcionamiento.

Figura 4.9 Flujos de calor en la Torre de destilación



4.9.2.1. Balances de energía en la Torre de destilación

Los balances de energía se han elaborado bajo las siguientes suposiciones:

- No existe gradiente de temperatura en el agua de cada depósito
- El destilado abandona el sistema a la temperatura del agua en los depósitos

1) Balance de energía en el agua del Depósito principal

$$m_w \cdot C_{pw} \cdot \frac{dT_w}{dt} = Q_u - q_r - q_c - q_e - q_p - \dot{m}_e \cdot C_{pw} \cdot (T_w - T_a) \qquad (4.18)$$

Donde q_r, q_c y q_e son el flujo de calor por radiación, flujo de calor por convección y flujo de calor por evaporación entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito (W), respectivamente; q_p es el calor perdido desde el agua del Depósito principal hacia el medio ambiente (W), Q_u la energía útil entregada por el colector (W), m_w la masa de agua salina en el Depósito principal (kg), C_{pw} el calor específico del agua en todas las etapas (J/kg·°C), T_w la temperatura del agua en el Depósito principal (°C), T_a la temperatura ambiente (°C) y $\dot{m}_e$ el flujo másico de agua destilada producida en el Depósito principal (kg/s).

2) Balance de energía en el Primer depósito

- **Balance de energía en el fondo del Primer depósito**

$$m_{b1} \cdot C_{pb} \cdot \frac{dT_{b1}}{dt} = q_r + q_c + q_e - q_{bw1} \tag{4.19}$$

Donde m_{b1} es la masa del fondo del Primer depósito (kg), C_{pb} el calor específico del material con que se construyen los depósitos (J/kg·°C), T_{b1} la temperatura del fondo del Primer depósito (°C) y q_{bw1} el flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Primer depósito (W).

- **Balance de energía en el agua del Primer depósito**

$$m_{w1} \cdot C_{pw} \cdot \frac{dT_{w1}}{dt} = q_{bw1} - q_{r1} - q_{c1} - q_{e1} - q_{p1} - \dot{m}_{e1} \cdot C_{pw} \cdot (T_{w1} - T_a) \tag{4.20}$$

Donde q_{r1}, q_{c1} y q_{e1} son el flujo de calor por radiación, flujo de calor por convección y flujo de calor por evaporación entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito (W), respectivamente; q_{p1} es el calor perdido desde el agua del Primer depósito hacia el medio ambiente (W), m_{w1} la masa de agua salina en el Primer depósito (kg), C_{pw} el calor específico del agua (J/kg·°C), T_{w1} la temperatura del agua en el Primer depósito (°C), T_a la temperatura ambiente (°C) y $\dot{m}_{e1}$ el flujo másico de agua destilada producida en el Primer depósito (kg/s).

3) Balance de energía en el Segundo depósito

- **Balance de energía en el fondo del Segundo depósito**

$$m_{b2} \cdot C_{pb} \cdot \frac{dT_{b2}}{dt} = q_{r1} + q_{c1} + q_{e1} - q_{bw2} \tag{4.21}$$

Donde m_{b2} es la masa del fondo del Segundo depósito (kg), T_{b2} la temperatura del fondo del Primer depósito (°C) y q_{bw2} el flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Segundo depósito (W).

- **Balance de energía en el agua del Segundo depósito**

$$m_{w2} \cdot C_{pw} \cdot \frac{dT_{w2}}{dt} = q_{bw2} - q_{r2} - q_{c2} - q_{e2} - q_{p2} - \dot{m}_{e2} \cdot C_{pw} \cdot (T_{w2} - T_a) \qquad (4.22)$$

Donde q_{r2}, q_{c2} y q_{e2} son el flujo de calor por radiación, flujo de calor por convección y flujo de calor por evaporación entre el agua del Segundo depósito y la cubierta o tapa de la torre (W), respectivamente; q_{p2} es el calor perdido desde el agua del Segundo depósito hacia el medio ambiente (W), m_{w2} la masa de agua salina en el Segundo depósito (kg), C_{pw} el calor específico del agua (J/kg·°C), T_{w2} la temperatura del agua en el Segundo depósito (°C), T_a la temperatura ambiente (°C) y $\dot{m}_{e2}$ el flujo másico de agua destilada producida en el Segundo depósito (kg/s).

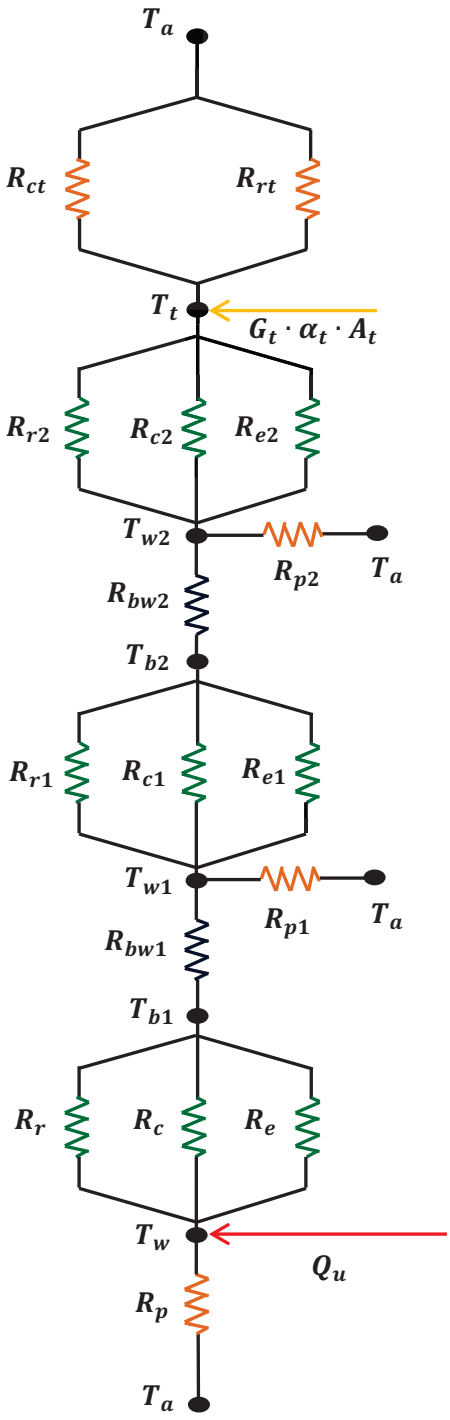
- **Balance de energía en la cubierta o tapa del Segundo depósito**

$$m_t \cdot C_{pb} \cdot \frac{dT_t}{dt} = q_{r2} + q_{c2} + q_{e2} + \alpha_t \cdot G_t \cdot A_t - q_{rt} - q_{ct} \qquad (4.23)$$

Donde m_t, T_t, α_t y A_t son la masa (kg), temperatura (°C), absortividad solar y área de la cubierta (m^2), respectivamente; q_{rt} es el flujo de calor por radiación entre la tapa y el cielo (W), q_{ct} el flujo de calor por convección entre la tapa y el medio ambiente (W) y G_t la radiación solar incidente sobre la cubierta (W/m^2). Por simplicidad, se considerará que G_t es igual a la radiación solar incidente sobre una superficie horizontal.

En la **Figura 4.10** se ilustra el circuito de resistencias térmicas de la Torre de destilación correspondiente a los flujos de calor de la **Figura 4.9**.

Figura 4.10 Circuito de resistencias térmicas de la Torre de destilación



4.9.2.2. Flujos de calor en la Torre de destilación

Habiendo determinado las ecuaciones que definen los balances de energía en la Torre de destilación, ahora se expondrán las relaciones que permiten estimar los flujos de calor existentes en la misma.

1) Flujos de calor en el Depósito principal

- **Flujo de calor por radiación entre el agua salina del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_r**

A partir de la **Ecuación 3.60** se tiene

$$q_r = \frac{A_w \cdot \sigma \cdot [(T_w + 273)^4 - (T_{b1} + 273)^4]}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \tag{4.24}$$

En la cual A_w es el área de la superficie libre del agua en el Depósito principal (m^2), T_{b1} la temperatura del fondo del Primer depósito (°C), ε_w la emisividad del agua, ε_b la emisividad del material con el que se construye cada depósito y σ la constante de Stefan-Boltzmann con un valor de 5.670×10^{-8} ($W/m^2 \cdot K^4$).

- **Flujo de calor por convección entre el agua salina del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_c**

De la **Ecuación 3.6** se tiene

$$q_c = A_w \cdot h_c \cdot (T_w - T_{b1}) \tag{4.25}$$

En donde q_c está dado en (W), h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito ($W/m^2 \cdot °C$).

De acuerdo a la **Ecuación 3.12**, el coeficiente h_c está dado por

$$h_c = \frac{C \cdot (\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr})^n \cdot k}{x} \tag{4.26}$$

Siendo Gr y Pr el número de Grashof y el número de Prandtl del aire húmedo, respectivamente; C y n son dos constantes que deberán ser determinadas, k es la conductividad térmica del aire húmedo dentro del Depósito principal (W/m·°C) y x la distancia entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del primer depósito (m).

El número de Grashof y el número de Prandtl se expresan por:

$$\mathrm{Gr} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot x^3 \cdot \rho^2}{\mu^2} \tag{4.27}$$

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu \cdot C_p}{k} \tag{4.28}$$

Donde:

$g =$ Aceleración de la gravedad, 9.798 (m/s^2)

$\beta =$ Coeficiente de expansión térmica volumétrica del aire húmedo del Depósito principal (K^{-1})

$\Delta T =$ Diferencia de temperatura entre la superficie del agua en el Depósito principal y el fondo del Primer depósito (°C)

$x =$ Distancia entre la superficie del agua en el Depósito principal y el fondo del Primer depósito (m)

$\rho =$ Densidad del aire húmedo en el Depósito principal (kg/m^3)

$\mu =$ Viscosidad dinámica del aire húmedo en el Depósito principal (kg/m·s)

$C_p =$ Calor específico del aire húmedo (J/kg·°C)

$k =$ Conductividad térmica del aire húmedo en el Depósito principal (W/m·°C)

El coeficiente β se establece por la formulación

$$\beta = \frac{1}{T + 273.15} \tag{4.29}$$

En la cual T es la temperatura del aire húmedo en el Depósito principal (°C).

El factor de empuje $\beta \cdot \Delta T$ de la **Ecuación 4.27** tiene que ser modificado para tener en cuenta la variación de la humedad del aire a lo largo de su ascenso. Conforme a la **Ecuación 3.15** se obtiene

$$\beta \cdot \Delta T' = \left[\frac{T_w - T_{b1}}{T_{b1} + 273} + \frac{P_w - P_{b1}}{[M_a/(M_a - M_w)] \cdot P_T - P_w} \cdot \frac{T_w + 273}{T_{b1} + 273}\right] \quad (4.30)$$

Donde:

$\beta \cdot \Delta T'$= Factor de empuje modificado del aire húmedo en el Depósito principal

$T_w =$ Temperatura del agua salina en el Depósito principal (°C)

$T_{b1} =$ Temperatura del fondo del Primer depósito (°C)

$P_w =$ Presión de vapor del agua a la temperatura del agua salina del Depósito principal (N/m^2)

$P_{b1} =$ Presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del Primer depósito (N/m^2)

$P_T =$ Presión total o atmosférica, igual a 71920 (N/m^2) en la ciudad de Quito

$M_a =$ Peso molecular del aire (28.97)

$M_w =$ Peso molecular del agua (18.02)

A partir de la **Ecuación 3.18**, P_w y P_{b1} están dados por

$$P_w = \mathrm{e}^{\left[25.317 - \frac{5144}{T_w + 273}\right]} \quad (4.31)$$

$$P_{b1} = \mathrm{e}^{\left[25.317 - \frac{5144}{T_{b1} + 273}\right]} \quad (4.32)$$

Considerando todas las constantes y remplazando (4.31) y (4.32) en (4.30) se llega a la siguiente relación

$$\beta \cdot \Delta T' = \left[\frac{T_w - T_{b1}}{T_{b1} + 273} + \frac{9.8862 \times 10^{10} \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)}\right]}{190276 - 9.8862 \times 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)}} \cdot \frac{T_w + 273}{T_{b1} + 273}\right] \quad (4.33)$$

La ecuación para la densidad del aire húmedo de la **Tabla 3.1** no toma en consideración la presión atmosférica, debiéndose usar para las condiciones de la ciudad de Quito la siguiente formulación

$$\rho = \frac{P_T \cdot M_a}{R \cdot (T + 273)} \tag{4.34}$$

Donde P_T es la presión total o atmosférica, que en Quito es igual a 71920 (N/m^2); M_a es el peso molecular del aire, R la constante universal de los gases con un valor de 8.31447 [kJ/kmol·K] y T es la temperatura del aire húmedo en el Depósito principal (°C).

Conociendo que todas las propiedades del aire se evalúan a la temperatura media en el Depósito principal $\left(\frac{T_w + T_{b1}}{2}\right)$, a partir de la **Tabla 3.1** y la **Ecuación 4.34** se obtienen:

$$\rho = \frac{501.18}{T_w + T_{b1} + 546} \tag{4.35}$$

$$k = 0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1}) \tag{4.36}$$

$$\mu = 1.718 \times 10^{-5} + 2.31 \times 10^{-8} (T_w + T_{b1}) \tag{4.37}$$

El número de Pr del aire posee una variación muy pequeña entre los 27 y los 127 °C, (0.707 − 0.69). Por lo tanto, es adecuado otorgar a Pr un valor constante; a una temperatura de 50 °C, el número de Pr del aire se aproxima a 0.703.

Remplazando (4.33), (4.35), (4.36) y (4.37) en (4.27), y con un número de Pr igual a 0.703, resultan las ecuaciones:

$$\mathrm{Ra} = \frac{a \cdot x^3 \left[\frac{T_w - T_{b1}}{T_{b1} + 273} + \frac{9.8862 \times 10^{10} \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right]}{190276 - 9.8862 \times 10^{10} \cdot e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)}} \cdot \frac{T_w + 273}{T_{b1} + 273} \right]}{\left\{ \frac{[1.718 \times 10^{-5} + 2.31 \times 10^{-8} (T_w + T_{b1})] \cdot (T_w + T_{b1} + 546)}{501.18} \right\}^2} \tag{4.38}$$

$$\mathrm{Gr} \cdot \mathrm{Pr} = \mathrm{Ra} \tag{4.39}$$

Donde Ra es el número de Rayleigh del aire en el Depósito principal, a una constante con un valor de 6.888, x la distancia entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito (m), T_w la temperatura del agua en el Depósito principal (°C) y T_{b1} la temperatura del fondo del Primer depósito (°C).

Sustituyendo (4.36) y (4.39) en (4.26) se obtiene

$$h_c = \frac{C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1})]}{x} \tag{4.40}$$

Al remplazar (4.40) en (4.25) se tiene que el flujo de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito es

$$q_c = A_w \cdot \frac{C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1})]}{x} \cdot (T_w - T_{b1}) \tag{4.41}$$

Dunkle **[11]** confirió a las constantes C y n los valores de 0.075 y 1/3, respectivamente, de tal forma que la **Ecuación 4.41** se extiende como sigue

$$q_c = A_w \cdot \frac{0.075 \cdot (\mathrm{Ra})^{1/3} \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1})]}{x} \cdot (T_w - T_{b1}) \tag{4.42}$$

Como ya se indicó en el **Capítulo 3**, el modelo propuesto por Dunkle tiene algunos inconvenientes que limitan su utilidad. Por tal motivo, para predecir el desempeño del destilador solar con mayor exactitud, las constantes C y n para el Depósito principal y el Primer depósito serán determinadas experimentalmente empleando el método descrito en la **Sección 3.7.2.3**.

- **Flujo de calor por evaporación entre el agua salina del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_e**

De la **Ecuación 3.31** se tiene

$$q_e = 0.016273 \cdot A_w \cdot h_c \cdot (P_w - P_{b1}) \tag{4.43}$$

En donde q_e está dado en (W), A_w es el área de la superficie libre del agua en el Depósito principal (m^2), h_c el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito ($W/m^2 \cdot °C$), P_w la presión de vapor del agua a la temperatura del agua salina en el Depósito principal (N/m^2) y P_{b1} la presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del Primer depósito (N/m^2).

Al remplazar (4.31) y (4.32) en (4.43), y después simplificando se obtiene la relación

$$q_e = 1.60878 \times 10^9 \cdot A_w \cdot h_c \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right] \tag{4.44}$$

- **Calor perdido desde el agua del Depósito principal hacia el medio ambiente, q_p**

A partir de la **Ecuación 3.61**, q_p se define por

$$q_p = q_f + q_s \tag{4.45}$$

En la cual q_f es el calor perdido por la base del Depósito principal (W) y q_s el calor perdido por las paredes del depósito (W), sus expresiones son:

$$q_f = \frac{k_{AF} \cdot A_f \cdot (T_w - T_a)}{L_{AT}} \tag{4.46}$$

$$q_s = \frac{k_{AT} \cdot A_s \cdot (T_w - T_a)}{L_{AT}} \tag{4.47}$$

Donde:

k_{AF} = Conductividad térmica del aislante en la base de la Torre de destilación ($W/m \cdot °C$)

k_{AT} = Conductividad térmica del aislante de las paredes de la Torre de destilación ($W/m \cdot °C$)

A_f = Área de la base del Depósito principal (m^2)

L_{AT} = Espesor del aislante térmico (m)

A_s = Área de las paredes del Depósito principal (m^2)

T_w = Temperatura del agua salina en el Depósito principal (ºC)

T_a = Temperatura ambiente (°C)

- **Flujo másico de agua destilada producida en el Depósito principal, $\dot{m}_e$**

Conforme a la **Ecuación 3.32**, $\dot{m}_e$ está dado por

$$\dot{m}_e = \frac{0.016273 \cdot A_w \cdot h_c \cdot (P_w - P_{b1})}{h_{fg}} \tag{4.48}$$

Donde $\dot{m}_e$ se mide en (kg/s), A_w es el área de la superficie libre del agua en el Depósito principal (m^2), h_c el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito ($W/m^2 \cdot °C$), P_w la presión de vapor del agua a la temperatura del agua salina en el Depósito principal (N/m^2), P_{b1} la presión de vapor del agua a la temperatura del fondo del Primer depósito (N/m^2) y h_{fg} la entalpía de vaporización del agua en el Depósito principal (J/kg).

De acuerdo a la **Ecuación 3.26**, y conociendo además que la entalpía de vaporización del agua se debe evaluar a la temperatura media del Depósito principal $\left(\frac{T_w + T_{b1}}{2}\right)$, se tiene

$$\begin{aligned} h_{fg} = {} & -1.4952 \times 10^{-3} (T_w + T_{b1})^3 + 0.0818 (T_w + T_{b1})^2 \\ & - 1181.644 (T_w + T_{b1}) + 2.4935 \times 10^6 \end{aligned} \tag{4.49}$$

Sustituyendo (4.31) y (4.32) en (4.48), y simplificando se obtiene

$$\dot{m}_e = \frac{1.60878 \times 10^9 \cdot A_w \cdot h_c \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right]}{h_{fg}} \tag{4.50}$$

2) Flujos de calor en el Primer depósito

- **Flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Primer depósito, q_{bw1}**

El flujo de calor q_{bw1} se calcula con la fórmula general

$$q_{bw1} = A_{b1} \cdot h_{bw1} \cdot (T_{b1} - T_{w1}) \tag{4.51}$$

Siendo A_{b1} el área del fondo del Primer depósito (m^2), h_{bw1} el coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre el fondo y el agua del Primer depósito ($W/m^2 \cdot °C$), T_{b1} la temperatura del fondo del Primer depósito (°C) y T_{w1} la temperatura del agua en el Primer depósito (°C).

En la ecuación anterior, q_{bw1} corresponde al flujo de calor por convección natural entre una placa horizontal caliente sobre la que se dispone un fluido más frío, suposición que se fundamenta en la pequeña inclinación del fondo del Primer depósito.

De la **Ecuación 3.56**, h_{bw1} se establece por

$$h_{bw1} = 0.15 \cdot {k_{w1}}^{2/3} \cdot \left[\frac{g \cdot \beta_{w1} \cdot (T_{b1} - T_{w1}) \cdot {\rho_w}^2 \cdot C_{pw}}{\mu_{w1}}\right]^{1/3} \quad (4.52)$$

Donde:

$g =$ Aceleración de la gravedad, 9.798 (m/s^2)

$k_{w1} =$ Conductividad térmica del agua en el Primer depósito (W/m ·°C)

$\beta_{w1} =$ Coeficiente de expansión térmica volumétrica del agua en el Primer depósito (K^{-1})

$\rho_w =$ Densidad del agua, 984.252 (kg/m^3) a 57 °C

$C_{pw} =$ Calor específico del agua, 4179 (J/kg·°C) a 27 °C

$\mu_{w1} =$ Viscosidad dinámica del agua en el Primer depósito (kg/m·s)

Al remplazar todas las constantes de la **Ecuación 4.52** por sus valores respectivos, se produce

$$h_{bw1} = 511.5625 \cdot {k_{w1}}^{2/3} \cdot \left[\frac{\beta_{w1} \cdot (T_{b1} - T_{w1})}{\mu_{w1}}\right]^{1/3} \quad (4.53)$$

A partir de las **Ecuaciones 3.57**, **3.58** y **3.59**, y tomando en cuenta que las propiedades del agua en el Primer depósito deben evaluarse a la temperatura media $\left(\frac{T_{b1}+T_{w1}}{2}\right)$, se tiene:

$$k_{w1} = -1.825 \times 10^{-6}(T_{w1} + T_{b1})^2 + 9.2265 \times 10^{-4}(T_{w1} + T_{b1}) + 0.56939 \quad (4.54)$$

$$\beta_{w1} = 7.5 \times 10^{-11}\,(T_{w1} + T_{b1})^3 - 3.26 \times 10^{-8}(\mathrm{T_{w1}} + \mathrm{T_{b1}})^2 + 7.5855 \times 10^{-6}(T_{w1} + T_{b1}) - 4.9548 \times 10^{-5} \quad (4.55)$$

$$\mu_{w1} = 2.394 \times 10^{-5} \cdot 10^{[496.74/(T_{w1} + T_{b1} + 266.3)]} \quad (4.56)$$

Sustituyendo (4.53) en (4.51) resulta

$$q_{bw1} = 511.5625 \cdot A_{b1} \cdot {k_{w1}}^{2/3} \cdot \left[\frac{\beta_{w1} \cdot (T_{b1} - T_{w1})}{\mu_{w1}}\right]^{1/3} \cdot (T_{b1} - T_{w1}) \qquad (4.57)$$

- **Flujo de calor por radiación entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito, q_{r1}**

Al igual que en el Depósito principal, q_{r1} es de la forma

$$q_{r1} = \frac{A_{w1} \cdot \sigma \cdot [(T_{w1} + 273)^4 - (T_{b2} + 273)^4]}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \qquad (4.58)$$

Donde A_{w1} es el área de la superficie libre del agua en el Primer depósito (m^2), T_{w1} la temperatura del agua en el Primer depósito (°C) y T_{b2} la temperatura del fondo del Segundo depósito (°C).

- **Flujo de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito, q_{c1}**

El flujo de calor q_{c1} se escribe como

$$q_{c1} = A_{w1} \cdot h_{c1} \cdot (T_{w1} - T_{b2}) \qquad (4.59)$$

En la ecuación anterior, h_{c1} es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito ($W/m^2 \cdot °C$).

Tomando como referencia la **Ecuación 4.41**, q_{c1} es igual a

$$q_{c1} = A_{w1} \cdot \frac{C_1 \cdot (Ra_1)^{n_1} \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_{w1} + T_{b2})]}{x_1} \cdot (T_{w1} - T_{b2}) \qquad (4.60)$$

En donde x_1 es la distancia entre la superficie del agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito (m), C_1 y n_1 son dos constantes que deberán ser determinadas; Ra_1 es el número de Rayleigh para el aire del Primer depósito, y se calcula de la misma manera que en el Depósito principal, pero teniendo en cuenta que las propiedades del aire se evaluarán a la temperatura media $\left(\frac{T_{w1}+T_{b2}}{2}\right)$.

- **Flujo de calor por evaporación entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito, q_{e1}**

Este flujo de calor se expresa como

$$q_{e1} = 1.60878 \times 10^{9} \cdot A_{w1} \cdot h_{c1} \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_{w1}+273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b2}+273}\right)} \right] \tag{4.61}$$

De la **Ecuación 4.60** se tiene que

$$h_{c1} = \frac{C_1 \cdot (Ra_1)^{n_1} \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_{w1} + T_{b2})]}{x_1} \tag{4.62}$$

- **Calor perdido desde el agua del Primer depósito hacia el medio ambiente, q_{p1}**

$$q_{p1} = \frac{k_{AT} \cdot A_{s1} \cdot (T_{w1} - T_a)}{L_{AT}} \tag{4.63}$$

Donde:

$k_{AT} =$ Conductividad térmica del aislante de las paredes de la Torre de destilación (W/m ·°C)

$L_{AT} =$ Espesor del aislante térmico (m)

$A_{s1} =$ Área de las paredes del Primer depósito (m^2)

$T_{w1} =$ Temperatura del agua salina en el Primer depósito (ºC)

$T_a =$ Temperatura ambiente (°C)

- **Flujo másico de agua destilada producida en el Primer depósito, $\dot{m}_{e1}$**

El flujo másico de agua está dado por

$$\dot{m}_{e1} = \frac{1.60878 \times 10^{9} \cdot A_{w1} \cdot h_{c1} \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_{w1}+273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b2}+273}\right)} \right]}{h_{fg1}} \tag{4.64}$$

Donde h_{fg1} es la entalpía de vaporización del agua en el Primer depósito (J/kg), cuya evaluación se realiza de la misma manera que en el Depósito principal, pero considerando que la temperatura media del aire es $\left(\frac{T_{w1}+T_{b2}}{2}\right)$.

3) Flujos de calor en el Segundo depósito

- **Flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Segundo depósito, q_{bw2}**

El flujo de calor q_{bw2} se escribe como

$$q_{bw2} = A_{b2} \cdot h_{bw2} \cdot (T_{b2} - T_{w2}) \tag{4.65}$$

Siendo A_{b2} el área del fondo del Segundo depósito (m^2), h_{bw2} el coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre el fondo y el agua del Segundo depósito ($W/m^2 \cdot °C$), T_{b2} la temperatura del fondo del Segundo depósito (°C) y T_{w2} la temperatura del agua en el Segundo depósito (°C).

Tomando como referencia la **Ecuación 4.57,** q_{bw2} es igual a

$$q_{bw2} = 511.5625 \cdot A_{b2} \cdot {k_{w2}}^{2/3} \cdot \left[\frac{\beta_{w2} \cdot (T_{b2} - T_{w2})}{\mu_{w2}}\right]^{1/3} \cdot (T_{b2} - T_{w2}) \tag{4.66}$$

Donde:

k_{w2} = Conductividad térmica del agua en el Segundo depósito ($W/m \cdot °C$)

β_{w2} = Coeficiente de expansión térmica volumétrica del agua en el Segundo depósito (K^{-1})

μ_{w2} = Viscosidad dinámica del agua en el Segundo depósito (kg/m·s)

- **Flujo de calor por radiación entre el agua del Segundo depósito y la cubierta de la torre, q_{r2}**

$$q_{r2} = \frac{A_{w2} \cdot \sigma \cdot [(T_{w2} + 273)^4 - (T_t + 273)^4]}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \tag{4.67}$$

Donde:

A_{w2} = Área de la superficie libre del agua en el Segundo depósito (m^2)

T_{w2} = Temperatura del agua en el Segundo depósito (°C)

T_t = Temperatura de la cubierta (°C)

- **Flujo de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y la cubierta de la torre, q_{c2}**

$$q_{c2} = A_{w2} \cdot h_{c2} \cdot (T_{w2} - T_t) \tag{4.68}$$

Siendo h_{c2} el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Segundo depósito y la cubierta de la torre (W/m^2 · °C).

Tomando como referencia la **Ecuación 4.41**, q_{c2} es igual a

$$q_{c2} = A_{w2} \cdot \frac{C_2 \cdot (Ra_2)^{n_2} \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_{w2} + T_t)]}{x_2} \cdot (T_{w2} - T_t) \quad (4.69)$$

En donde x_2 es la distancia entre la superficie del agua en el Segundo depósito y la cubierta de la Torre de destilación (m), C_2 y n_2 son dos constantes que deberán ser determinadas; Ra_2 es el número de Rayleigh para el aire del Segundo depósito, y se calcula de la misma manera que en el depósito principal, pero teniendo en cuenta que las propiedades del aire húmedo se evaluarán a la temperatura media $\left(\frac{T_{w2}+T_t}{2}\right)$.

- **Flujo de calor por evaporación entre el agua del Segundo depósito y la cubierta de la torre, q_{e2}**

Este flujo de calor se establece por

$$q_{e2} = 1.60878 \times 10^9 \cdot A_{w2} \cdot h_{c2} \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_{w2}+273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_t+273}\right)} \right] \quad (4.70)$$

De la **Ecuación 4.69** se tiene que

$$h_{c2} = \frac{C_2 \cdot (Ra_2)^{n_2} \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_{w2} + T_t)]}{x_2} \quad (4.71)$$

- **Calor perdido desde el agua del Segundo depósito hacia el medio ambiente, q_{p2}**

$$q_{p2} = \frac{k_{AT} \cdot A_{s2} \cdot (T_{w2} - T_a)}{L_{AT}} \quad (4.72)$$

Donde:

k_{AT} = Conductividad térmica del aislante colocado en la Torre de destilación (W/m ·°C)

L_{AT} = Espesor del aislante térmico (m)

A_{s2} = Área de las paredes del Segundo depósito (m^2)

T_{w2} = Temperatura del agua salina en el Segundo depósito (ºC)

T_a = Temperatura ambiente (°C)

- **Flujo másico de agua destilada producida en el Segundo depósito, $\dot{m}_{e2}$**

$$\dot{m}_{e2} = \frac{1.60878 \times 10^{9} \cdot A_{w2} \cdot h_{c2} \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_{w\,2}+\,273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_t+\,273}\right)} \right]}{h_{fg2}} \tag{4.73}$$

Donde h_{fg2} es la entalpía de vaporización del agua en el Segundo depósito (J/kg), cuya evaluación se realiza de la misma manera que en el Depósito principal, pero considerando que la temperatura media del aire es $\left(\frac{T_{w2}+T_t}{2}\right)$.

- **Flujo de calor por radiación entre la cubierta de la torre y el cielo, q_{rt}**

Conforme a la **Ecuación 3.68**, q_{rt} se define por

$$q_{rt} = A_t \cdot \varepsilon_t \cdot \sigma \cdot \left[(T_t + 273)^4 - (T_{cielo} + 273)^4\right] \tag{4.74}$$

Donde A_t es el área de la cubierta (m^2), ε_t la emisividad de la superficie exterior de la cubierta y T_{cielo} la temperatura del cielo (°C).

Para estimar la temperatura del cielo se utilizarán las **Ecuaciones 3.69** y **3.70**

- **Flujo de calor por convección entre la cubierta del Segundo depósito y el medio ambiente, q_{ct}**

A partir de la **Ecuación 3.64** se tiene que

$$q_{ct} = A_t \cdot h_{ct} \cdot (T_t - T_a) \tag{4.75}$$

En donde h_{ct} es el coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el aire circundante (W/m^2·°C) y T_a la temperatura ambiente (°C).

De las **Ecuaciones 3.65** y **3.66** se obtienen:

$$h_{ct} = 2.8 + 3 \cdot v_t \tag{4.76}$$

$$v_t = v_r \cdot \left(\frac{z_t}{z_r}\right)^{\alpha} \tag{4.77}$$

Donde v_t es la velocidad del viento sobre la cubierta (m/s), z_t la altura sobre el suelo a la que se ubica la cubierta (m), v_r la velocidad de referencia a la altura z_r y α un coeficiente que se calcula con la **Ecuación 3.67**. La velocidad del viento sobre el colector solar se evaluará también con la **Ecuación 4.77**.

4.10. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

La simulación del desalinizador solar se efectuará con el programa Matlab/Simulink. Mediante la simulación se busca la resolución de un sistema de seis ecuaciones diferenciales (**Ecuaciones 4.18 a 4.23**) que permita predecir las temperaturas del agua en la Torre de destilación y la masa de destilado producido por el desalinizador. El programa emplea el método numérico de paso variable Dormand-Prince ode45, basado a su vez en el método Runge-Kutta.

El programa de simulación posee una ventana principal donde se encuentran los bloques correspondientes a todas las etapas de la Torre de destilación, estos a su vez están conectados a pequeños recuadros que indican las temperaturas que se desean conocer. Dentro del bloque de cada etapa se localizan otros bloques que sirven para evaluar todas las variables termodinámicas necesarias para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales.

Debido a que una buena concordancia entre la simulación y el funcionamiento del desalinizador depende de algunos parámetros que se obtendrán mediante pruebas al mismo, en este capítulo no se discutirán los resultados ni los detalles de la simulación. Antes es necesario determinar los valores de las constantes C_i y n_i en cada una de las etapas del desalinizador (**Ecuaciones 4.41, 4.60 y 4.69**) mediante regresión lineal simple a partir de datos experimentales (ver la **Sección 3.7.2.3**), que deberán ser recogidos durante condiciones normales de operación. Asimismo, se debe medir la variación constante de la temperatura del agua a su paso por el colector solar (ver la **Sección 4.9.1.3**).

4.11. CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

La construcción del desalinizador solar se realizará en base a sus planos (ver el **Anexo VII**), los mismos que se han elaborado haciendo uso del dimensionamiento y demás consideraciones expuestas en las secciones de diseño. Primero, se describirán brevemente los materiales y equipos utilizados, y después se discutirá el procedimiento de construcción del destilador.

4.11.1. MATERIALES Y EQUIPOS

El agua salina tiene un efecto muy corrosivo sobre la mayoría de metales, por este motivo es muy importante una correcta selección de los materiales que se utilizarán en el desalinizador solar. En caso de que este funcione permanentemente con agua salina, es recomendable que los depósitos de la Torre de destilación se fabriquen con acero inoxidable AISI 316, que posee buena resistencia a la corrosión en presencia de agua salada y salobre. En este proyecto, el prototipo funcionará prácticamente todo el tiempo con agua potable, de modo que no es necesario el uso de acero AISI 316. En su remplazo se comprarán planchas de acero inoxidable AISI 430, de menor precio y que no presentan problemas de corrosión con el agua potable. Todos los demás materiales para la construcción del desalinizador serán adquiridos teniendo en cuenta la realidad socioeconómica del país, buscando un equilibrio entre precio y calidad.

A continuación se enumeran los materiales y equipos utilizados en la construcción del desalinizador solar:

1) Accesorios de cobre para conectar el colector solar a la Torre de destilación
2) Accesorios de polipropileno para tubería de $1/2"$ (codos, uniones, neplos, etc.)
3) Adhesivo de cianoacrilato (brujita)
4) Amoladora angular
5) Ángulo estructural de acero de 25x2 mm, (12 metros)
6) Cañuelas Ductolon 3/4"x1/2"x2m
7) Cartucho de Sikaflex 252 negro
8) Cartucho de silicón ABRO gris de alta temperatura
9) Cintas de teflón
10) Colector solar plano de 2 m^2
11) Cuatro neplos de acero inoxidable de $1/2" \times 5"$

12) Dobladora de láminas metálicas

13) Dos planchas de acero inoxidable AISI 430 de 2440 × 1220 × 0.9 mm

14) Dos planchas de poliestireno expandido con dimensiones de 200 × 100 × 5 cm

15) Dos rollos de cinta doble faz de poliéster

16) Estilete

17) Filtro de agua

18) Lima plana

19) Manguera de vinyl de 5/16"

20) Mordazas

21) Pernos hexagonales de acero galvanizado G2 de 1/4 " × 3/4" con sus tuercas

22) Reactivos para la elaboración de espuma de poliuretano

23) Regla metálica y graduador

24) Sacabocados

25) Tronzadora

26) Sierra manual

27) Soldadora MIG

28) Soldadora TIG

29) Taladro manual

30) Tanque de polietileno de 120 litros

31) Tira de caucho de sección rectangular, (9 metros)

32) Tubería de acero inoxidable de 1/4 ", (1 metro)

33) Tubería de polipropileno de 1/2 " para agua caliente

34) Tubos cuadrados de acero de 30 × 2 mm, (12 metros)

35) Tubos cuadrados de acero de 40 × 2 mm, (6 metros)

36) Válvulas de flotador

4.11.2. PROCEDIMIENTO DE CONSTRUCCIÓN

La construcción del desalinizador solar se efectuó casi en su totalidad en el taller metalmecánico de la empresa Agro Trading Cía. Ltda., donde existió gran interés y colaboración en el desarrollo del proyecto. Antes de discutir el procedimiento de construcción, primero se debe indicar una modificación en las dimensiones originales del prototipo.

De acuerdo al **Literal 4.5**, la sección longitudinal de los depósitos tendría un área de 0.4 m^2 con un largo de 0.8 metros y un ancho de 0.5. Sin embargo, para aprovechar mejor y desperdiciar una menor cantidad de acero inoxidable, el largo de los depósitos se redujo a 0.742 metros, modificación que tendrá un efecto mínimo en el funcionamiento del destilador.

Después de adquirir todos los materiales necesarios, se procedió a la construcción del desalinizador solar, siguiendo los siguientes pasos:

1) Dibujar en las planchas de acero inoxidable el desarrollo de los tres depósitos y canales de recolección de agua destilada. También es necesario dibujar el desarrollo de los perfiles en L que se soldarán en la parte inferior del Primer y Segundo depósito, dichos perfiles permiten acomodar a los compartimientos uno encima de otro para ensamblar la Torre de destilación.

2) Cortar con una amoladora (usando un disco de corte) el desarrollo de todos los componentes antes descritos, el uso de tijeras hechas para cortar metal no es recomendable, pues ese procedimiento es muy largo y tedioso.

3) Doblar todos los elementos recortados de las planchas de acero inoxidable. El taller de Agro Trading no tiene una máquina dobladora de láminas metálicas, por tal motivo, esta actividad se realizó en otro taller metalmecánico.

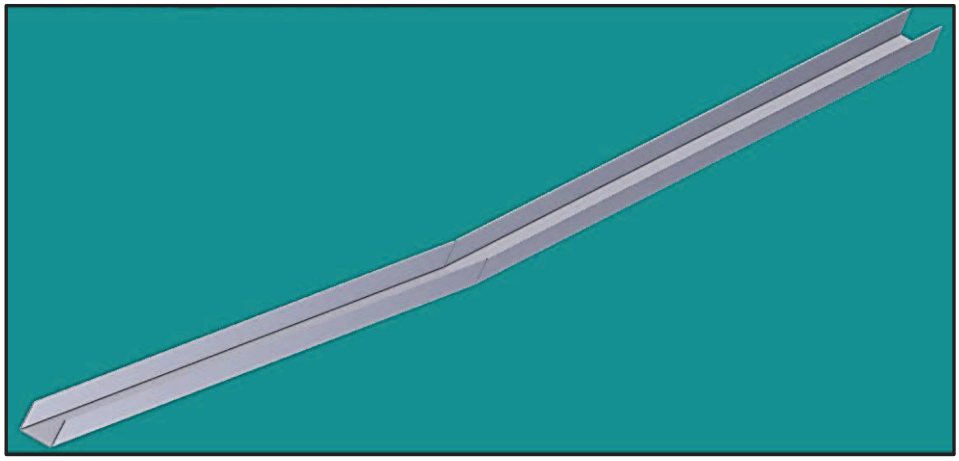
4) Soldar las aristas de los tres depósitos con el proceso TIG[7]; a continuación se llena los depósitos con agua y se verifica la hermeticidad de las uniones soldadas por un tiempo de una hora. En caso de presentarse fugas, se sueldan nuevamente los puntos por donde escapa el líquido. En la **Figura 4.11** se muestra una fotografía de esta operación de soldadura.

5) Doblar el desarrollo de los canales de recolección de agua destilada, obteniendo perfiles rectos en U. Efectuar dos pequeños cortes triangulares en la mitad de los canales y doblarlos en forma de V. En la **Figura 4.12** se indica un canal con su tamaño y aspecto definitivos.

[7] Tungsten Inert Gas

Figura 4.11 Soldadura de los depósitos del desalinizador con el proceso TIG

Figura 4.12 Canal de recolección de agua destilada



6) Soldar con el proceso TIG los perfiles en L a la parte inferior del Primer y Segundo depósito.

7) Taladrar en el Depósito principal los orificios de entrada y salida de agua para las tuberías que lo conectan con el colector solar. Asimismo, taladrar los orificios para las tuberias que permiten la entrada y evacuación del agua en el Primer y Segundo depósito.

8) Usando la sierra manual, cortar a su largo correcto los cuatro neplos de acero inoxidable de 1/2", después soldarlos con el proceso TIG a los orificios perforados en los tres depósitos.

Figura 4.13 Taladrado del orifico para el tubo de evacuación de agua en el Primer depósito

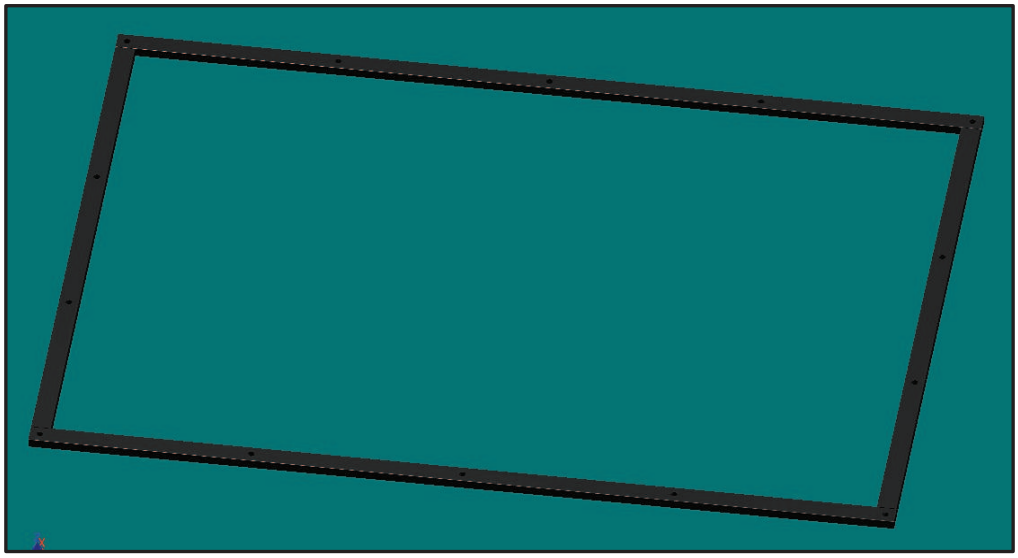
9) Soldar con el proceso TIG las ranuras de la parte media de los canales de recolección (ver la **Figura 4.12**). Taladrar en cada canal el orificio para el tubo de salida de agua. Empleando la sierra manual, cortar la tubería de 1/4" de acero inoxidable en tres segmentos de 75 mm de longitud; finalmente, soldar los tubos en los orificios de los canales.

10) Taladrar en cada depósito el orificio para el tubo de salida de agua destilada. Soldar los canales de recolección a los compartimientos usando el proceso TIG

11) Cortar la tira de caucho en segmentos para elaborar los empaques que se colocarán entre cada depósito y entre la Tapa de la Torre de destilación y el Segundo depósito. Posteriormente, pegar entre sí los segmentos de caucho con adhesivo de cianoacrilato (brujita).

12) Colocar el Primer depósito sobre el Depósito principal, alinearlos correctamente y sujetarlos con mordazas. Perforar con el taladro los orificios donde se alojarán los pernos que mantendrán acoplados ambos compartimientos, de tal manera que se taladre simultáneamente en el reborde del Depósito principal y en los perfiles en L soldados al Primer depósito. Repetir esta misma operación con el Primer y Segundo depósito, y con el Segundo compartimiento y su Tapa.

Figura 4.14 Empaque de caucho para la unión entre el Depósito principal y el Primer depósito



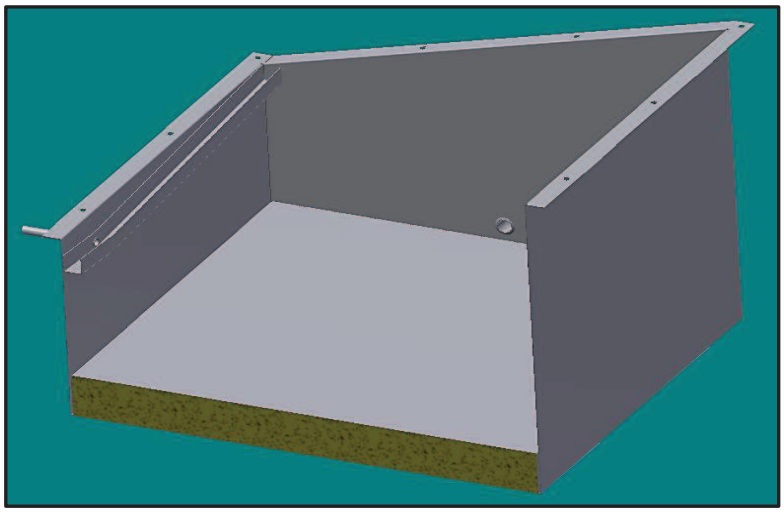
13) Posicionar el Primer Depósito sobre el Depósito principal, separados entre sí por su respectivo empaque; fijarlos con mordazas y marcar en el empaque los puntos por donde pasa cada perno. Repetir esta operación con los otros depósitos y la Tapa o cubierta.

14) Perforar con un sacabocados los orificios marcados en cada empaque.

15) A excepción de su Tapa, toda la Torre de destilación debe cubrirse con aislante térmico. Para impedir que todo el peso de la torre descanse sobre el panel aislante colocado en su base, o evitar la colocación de un soporte de madera que imposibilite el aplastamiento del panel; se decidió ubicarlo dentro del Depósito principal, a modo de un doble fondo.

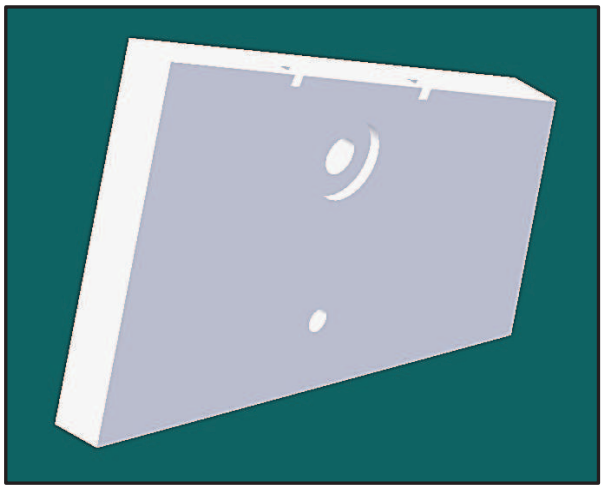
Para lograr este objetivo se crea una bandeja de acero inoxidable con una altura de 50 mm y se la rellena con espuma de poliuretano preparada en el sitio. Después, se introduce la bandeja en el interior del Depósito principal con la cara metálica hacia arriba, rellenando con Sikaflex 252 el espacio comprendido entre las paredes de la bandeja y las caras interiores del Depósito principal. En la **Figura 4.15** se observa un corte del Depósito principal, donde es visible la disposición de esta bandeja y la espuma de poliuretano en su interior.

Figura 4.15 Corte transversal del Depósito principal



16) Dibujar el contorno de los depósitos sobre las planchas de poliestireno expandido y recortar los dibujos con un estilete bien afilado, obteniéndose los paneles aislantes que cubrirán la Torre de destilación. A continuación, se elimina material de los paneles en los puntos donde existe interferencia con otros componentes (cabezas de pernos, tuberías, etc.). Esta actividad se la puede efectuar con un tubo caliente de metal, teniendo cuidado de eliminar solamente el material necesario. En la **Figura 4.16** se muestra un panel de poliestireno expandido que recubrirá el lado derecho del Depósito principal.

Figura 4.16 Panel de aislante térmico para el Depósito principal

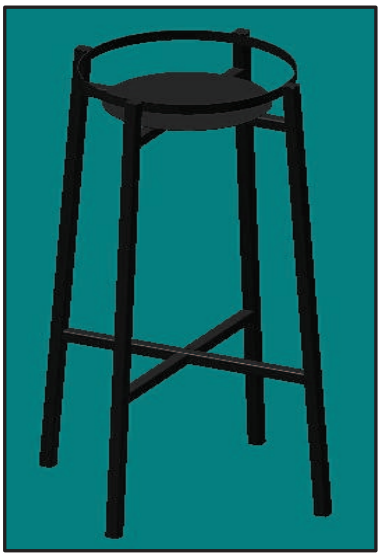


17) Para la construcción de la estructura de soporte del tanque de agua se cortan con la tronzadora los tubos cuadrados de 30×2 mm, eliminando las rebabas con una lima plana o la amoladora (empleando un disco abrasivo), los tubos se sueldan después con el proceso MIG[8].

En la elaboración de la estructura de soporte de la Torre de destilación se emplean tubos cuadrados de acero de 40×2 mm y 30×2 mm. En la construcción de la estructura de soporte del colector solar se utilizan ángulos estructurales de acero de 25×2 mm. Luego de ser soldadas, las estructuras metálicas se pintan de negro para impedir su corrosión.

En las **Figuras 4.17, 4.18 y 4.19** se aprecian el soporte del tanque de agua, de la Torre de destilación y del colector solar, respectivamente.

Figura 4.17 Estructura metálica de soporte del Tanque de alimentación



[8] Metal Inert Gas

Figura 4.18 Estructura metálica de soporte de la Torre de destilación

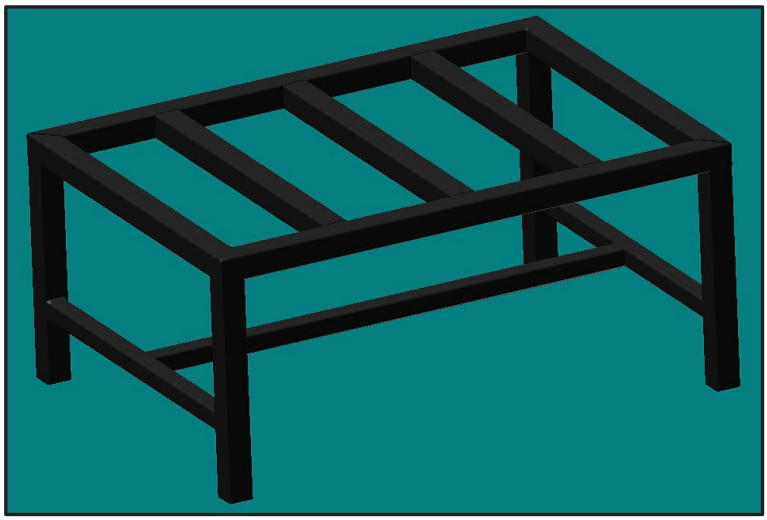
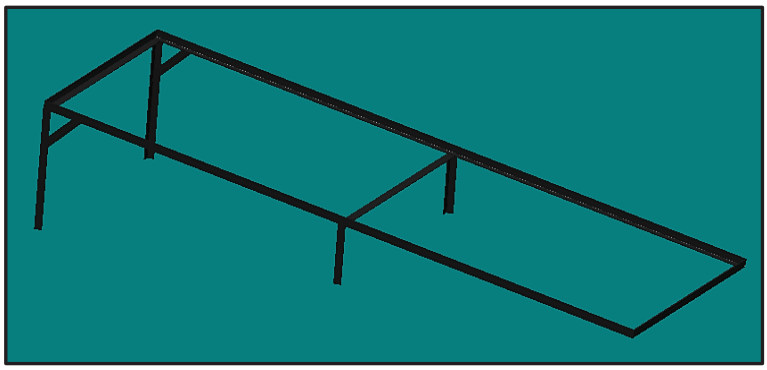


Figura 4.19 Estructura metálica de soporte del Colector solar



18) Con todos los elementos principales terminados, procedemos a ensamblar el desalinizador solar. Primero, se perfora en el tanque de polietileno el orificio para la salida de agua y se lo ubica sobre su estructura de soporte. A continuación, se arma el sistema de distribución de agua (neplos, uniones, filtro, válvulas de bola, etc.) únicamente acoplándolo al tanque. Manteniendo las tres válvulas de bola cerradas, se llena el tanque con agua y se colocan el Depósito principal y el colector solar sobre sus estructuras de soporte. Luego, se cortan dos segmentos de tubería de polipropileno de 1/2" y se roscan sus extremos, con estas tuberías y otros accesorios se conecta el colector solar al Depósito principal.

Conectar el Depósito principal al tanque de agua a través de una válvula de flotador y regular el nivel de líquido en el depósito. Acoplar el Primer Deposito sobre el Depósito principal por medio de pernos, posicionando entre ambos el empaque correspondiente. Conectar el Primer depósito al tanque de agua, regulando el nivel de líquido con la válvula de flotador. Repetir el mismo procedimiento con el Segundo depósito y empernar la Tapa o cubierta a este último.

Cubrir las paredes de la Torre de destilación con los paneles de poliestireno expandido, adhiriéndolos con cinta doble faz; pintar de blanco la superficie exterior de la Tapa o cubierta. Para concluir, se conectan las botellas plásticas a los tubos de salida de agua destilada por medio de mangueras de vinyl, y se recubren con aislante térmico (Cañuela Ductolon 3/4"x1/2"x2m) las tuberías que unen el colector solar con la Torre de destilación

Antes de instalar el desalinizador en la azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica, primero se llevaron a cabo pruebas preliminares de funcionamiento en el taller donde se efectuó su construcción, esto permite realizar un arreglo o modificación rápidamente y sin mayores dificultades. Después de tres días de operación, a pesar de los altos niveles de radiación, la producción diaria de agua destilada era muy baja (menor a 3 litros). Al observar el proceso de evaporación y condensación en el interior de la Torre de destilación se notó que el agua destilada caía de nuevo a los depósitos un poco antes de llegar al canal de recolección. Este problema se solucionó al soldar dos láminas de acero inoxidable a cada canal, aumentando su ancho.

Figura 4.20 Sistema de distribución de agua del Desalinizador solar

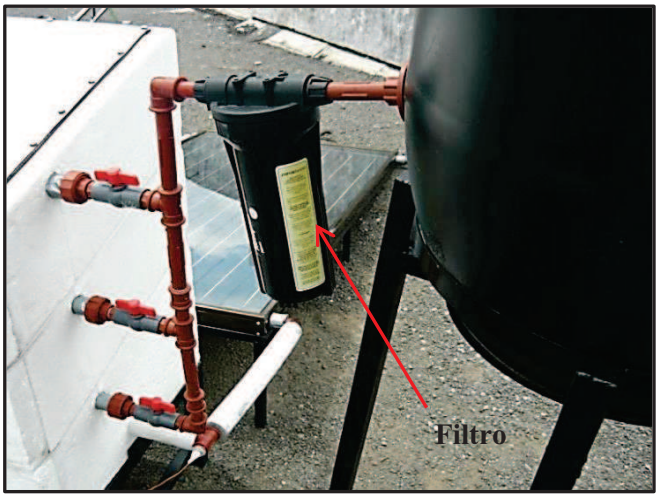


Figura 4.21 Llenado y regulación del nivel de agua con la válvula de flotador (Depósito principal)

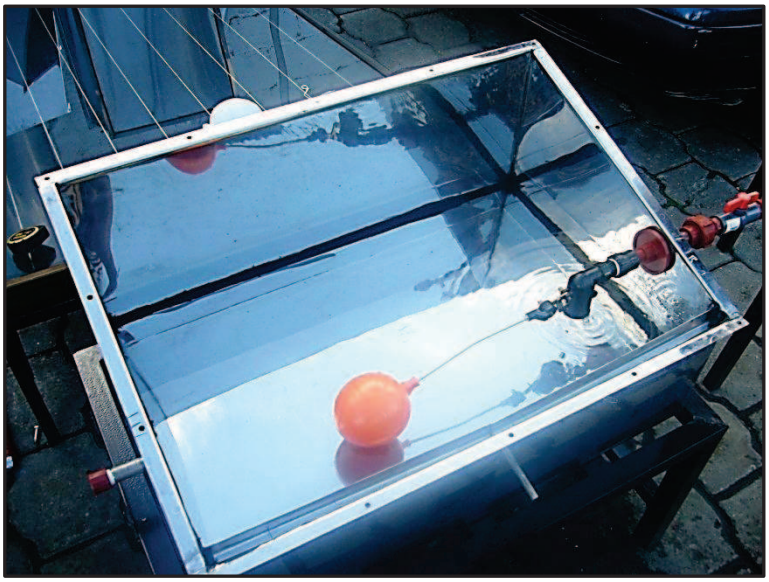


Figura 4.22 Desalinizador solar en funcionamiento

4.11.3. OPERACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR

El procedimiento para poner en funcionamiento al desalinizador solar es el siguiente:

1. Verificar que todas las válvulas se encuentren cerradas (ver la **Figura 4.8**).
2. Llenar el tanque de alimentación.
3. Abrir la válvula 1 y esperar alrededor de 15 minutos hasta que el Depósito principal se llene por completo.
4. Abrir la válvula 2, esperar aproximadamente 10 minutos y abrir la válvula 3.
5. Llenar nuevamente el tanque de alimentación para compensar toda el agua que ingresó a la Torre de destilación.

Una vez al mes es recomendable evacuar el agua de los depósitos, con este propósito se sigue el siguiente procedimiento:

1. Cerrar las válvulas 1, 2 y 3.
2. Abrir la válvulas 4, 5 y 6 hasta que toda el agua abandone los depósitos; si los compartimientos tienen agua salina en su interior es más apropiado recoger el agua y descartarla en otro lugar.

Cerrar de nuevo todas las válvulas, llenar el tanque de alimentación y seguir los pasos antes descritos.

4.11.4. COSTOS DE FABRICACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO

A Continuación se detallan los costos de fabricación del Desalinizador solar

Tabla 4.3 Costos de los materiales utilizados en la construcción del Desalinizador solar

MATERIALES		
CANTIDAD	**DESCRIPCIÓN**	**COSTO (USD)**
4	Abrazaderas de acero galvanizado 1/2"	0.69
3	Adaptador de cobre M SO-HE 3/4"	4.94
4	Adaptador para tanque c/junta PP 1/2"	7.97
1	Adhesivo de cianoacrilato	1.50
2	Ángulo estructural de acero 25x2 mm, 6m	14.04
2	Cañuela Ductolon 3/4"x1/2"x2m	9.04
1	Cartucho de Sikaflex 252 negro	10.29
1	Cartucho de silicón ABRO gris de alta temperatura	7.86

4	Cinta de teflón	3.20
2	Cinta doble faz de poliéster 30m x12mm	18.38
2	Codo IPS reducción 3 /4" a 1/2"	0.90
4	Codo PP HH 90° 1/2"	1.66
1	Colector solar de 2 m^2	425.6
1	Filtro de agua	15.99
2	Lata de pintura en spray color blanco	4.57
2	Manguera de vinyl 5/16", 1m	2.84
4	Neplo de acero inoxidable 1/2" x 5"	13.93
2	Neplo PP 1/2" 10 cm	0.60
3	Neplo PP 1/2" 15 cm	1.08
8	Neplo PP 1/2" 6 cm	1.49
60	Pernos hexagonales de acero galvanizado G2 1/4"x3/4" y sus tuercas	5.38
2	Plancha de acero inoxidable AISI 430	124.48
2	Plancha de poliestireno expandido 200x100x5 cm	22.50
2	Reactivos para la elaboración de espuma de poliuretano 1 kg	15.69
6	Rosca PP C/Tuerca 1/2"	2.04
1	Tanque de polietileno de 120 litros	25.00
1	Tapón de cobre SO-SO 3/4"	0.60
2	Tee PP 1/2"	1.03
1	Tira de caucho de sección rectangular, 9m	18.00
1	Tubería de acero inoxidable 1/4",1m	7.30
3	Tubería de polipropileno 1/2", 1m	6.00
2	Tubo cuadrado de acero 30x2mm, 6m	33.52
1	Tubo cuadrado de acero 40x2mm, 6m	22.40
3	Unión PP RR 1/2"	1.34
5	Unión Universal PP 1/2"	6.72
5	Válvula de bola compacta 1/2"	7.73
1	Válvula de bola compacta 3/4"	2.52
3	Válvula de flotador	31.75
	TOTAL	**880.57**

Tabla 4.4 Costos de la mano de obra en la construcción del Desalinizador solar

MANO DE OBRA	
ACTIVIDAD	**COSTO (USD)**
Doblado y corte de ángulos y canales de acero inoxidable	15.30
Proceso de soldadura de los tres depósitos	70.00
Proceso de soldadura y pintado de las estructuras metálicas de soporte	15.00
TOTAL	**100.30**

El costo total de desalinizador incluida la mano de obra y los materiales es de **980.87 USD**. Esta cifra no incluye el costo por el corte y doblado de los tres depósitos, ni tampoco el costo por el corte de los tubos cuadrados y ángulos estructurales.

CAPÍTULO 5

PRUEBAS Y SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR

5.1. INTRODUCCIÓN

El desalinizador solar se instaló en la azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica, donde el LEAEE[9] tiene equipos de medición de la temperatura ambiente, velocidad del viento y radiación solar. Las pruebas a las que se someterá el destilador solar consisten en medir la producción de agua destilada, la temperatura en cada uno de los depósitos de la Torre de destilación y el incremento constante de la temperatura del agua a su paso por el colector solar. A parte de comprobar el correcto funcionamiento del desalinizador, las pruebas tienen el objetivo de proporcionar datos que permitan mediante una simulación computacional predecir la producción diaria de agua destilada.

5.2. PRUEBAS REALIZADAS

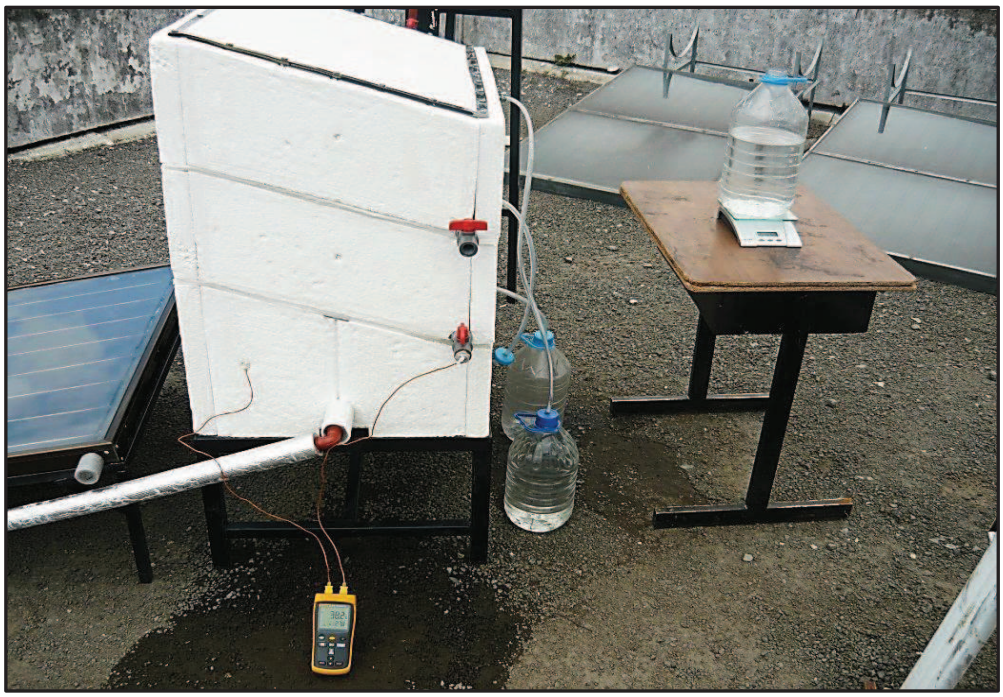
El desalinizador solar se ubicó conforme a las indicaciones de la **Sección 2.12.5.3**, con el colector solar mirando hacia el Sur e inclinado 10° respecto a la horizontal. Para permitir que la temperatura del agua en los depósitos se estabilice, las pruebas se efectuaron dos días después de instalar el prototipo.

5.2.1. MEDICIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA Y DEL DESTILADO PRODUCIDO

La medición de la temperatura del agua en los tres depósitos del desalinizador solar se realizó con un termómetro digital y termocuplas tipo K, mientras que la masa de agua destilada se determinó con una balanza digital. Las mediciones de temperatura se ejecutaron cada 15 minutos durante 5 días no consecutivos, desde las 9 AM hasta las 17 PM. Al mismo tiempo se medía cada hora la masa de agua destilada producida en los compartimientos, cuantificando también la masa acumulada desde las 17 PM hasta las 9 AM del día siguiente; con los datos adquiridos se promedió la temperatura del líquido en periodos de 1 hora. La adquisición de datos se efectuó únicamente hasta las 5 de la tarde, pues a partir de esa hora no se tenía acceso a la azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica.

[9] Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Faculta de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

Figura 5.1 Medición de temperatura del agua y de la masa del destilado producido por el Desalinizador



Los datos de temperatura y masa servirán para determinar las constantes C_i y n_i de los coeficientes de transferencia de calor por convección entre la superficie del agua y la superficie de condensación en los dos primeros compartimientos de la Torre de destilación. Una vez evaluados de forma experimental estas constantes, la producción del desalinizador se podrá predecir de manera más exacta (ver la **Sección 3.7.2.3**).

El procedimiento para determinar las constantes C y n del Depósito principal se describe a continuación:

De acuerdo a la **Ecuación 4.50**, el flujo másico de agua destilada en el Depósito principal es

$$\dot{m}_e = \frac{1.60878 \times 10^9 \cdot A_w \cdot h_c \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right]}{h_{fg}} \tag{5.1}$$

Donde $\dot{m}_e$ se mide en kg/s, A_w es el área de la superficie del agua en el Depósito principal (0.372 m^2), h_c el coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito ($W/m^2 \cdot °C$), T_w la temperatura del agua en el Depósito principal (°C) y T_{b1} la temperatura en el fondo del Primer depósito (°C);

h_{fg} es la entalpía de vaporización del agua en el Depósito principal (J/kg), cuyo cálculo se realiza con la **Ecuación 4.49**.

De la **Ecuación 4.40** se tiene que el coeficiente h_c es igual a

$$h_c = \frac{C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot [0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1})]}{x} \tag{5.2}$$

En donde Ra es el número de Rayleigh del aire húmedo en el Depósito principal y x la distancia entre la superficie del agua en el Depósito principal y el fondo del Primer depósito. Conociendo que la conductividad térmica del aire dentro del Depósito principal está dada por

$$k = 0.0244 + 3.8365 \times 10^{-5} (T_w + T_{b1}) \tag{5.3}$$

El coeficiente h_c se reduce a

$$h_c = \frac{C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot k}{x} \tag{5.4}$$

Sustituyendo (5.4) en (5.1) y multiplicando por 3600 para encontrar la cantidad de agua generada durante 1 hora, se tiene

$$m_e = \frac{5.791608 \times 10^{12} \cdot A_w \cdot C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot k \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right]}{x \cdot h_{fg}} \tag{5.5}$$

La ecuación anterior se puede escribir como

$$m_e = C \cdot (\mathrm{Ra})^n \cdot R \tag{5.6}$$

Siendo *R* igual a

$$R = \frac{5.791608 \times 10^{12} \cdot A_w \cdot k \cdot \left[e^{\left(\frac{-5144}{T_w + 273}\right)} - e^{\left(\frac{-5144}{T_{b1} + 273}\right)} \right]}{x \cdot h_{fg}} \tag{5.7}$$

Al pasar *R* al otro lado de la **Ecuación 5.6** resulta

$$\frac{m_e}{R} = C \cdot (\mathrm{Ra})^n \tag{5.8}$$

A partir de la **Ecuación 5.8** se encuentra las constantes C y n siguiendo el procedimiento de la **Sección 3.7.2.3** (**Ecuaciones 3.37** a **3.41**). Al obtener las constantes con este método se debe suponer que la temperatura del agua (T_{w1}) y del fondo del Primer depósito son iguales. La validez de esta afirmación es razonable, ya que la transferencia de calor es lenta desde el fondo hasta el agua del depósito, presentándose un gradiente muy pequeño de temperatura. Con esta aclaración, hay que remplazar en las ecuaciones anteriores T_{b1} por T_{w1}. Para determinar los valores de C_1 y n_1, correspondientes al Primer depósito, el proceso es el mismo que el adoptado con el Depósito principal.

La evaluación experimental de las constantes C_2 y n_2 del Segundo depósito no se llevó a cabo, ya que la generación de agua destilada en este compartimiento se da mayormente en la noche, periodo en el cual no es posible recolectar información.

En la **Tabla 5.1** se muestran los valores de temperatura promedio y de masa, medidos el día 22 de diciembre de 2011; en el **Anexo IV** se indican los datos de los demás días en que se realizaron las pruebas al desalinizador.

Tabla 5.1 Temperatura del agua en cada depósito y masa del agua destilada producida (22 de diciembre de 2011)

22/12/2011						
Hora (h)	T_w (^{0}C)	T_{w1} (^{0}C)	T_{w2} (^{0}C)	**Agua destilada producida (kg)**		
				Depósito principal	**Primer depósito**	**Segundo depósito**
9:00-10:00	46.2	32.1	26.5	0.116	0.021	0.000
10:00-11:00	59.4	36.6	27.6	0.360	0.051	0.005
11:00-12:00	69.1	45.2	30.5	0.621	0.138	0.000
12:00-13:00	74.0	54.5	35.3	0.727	0.270	0.002
13:00-14:00	70.2	58.2	40.6	0.359	0.300	0.041
14:00-15:00	66.5	57.9	44.4	0.210	0.231	0.080
15:00-16:00	61.3	55.9	45.6	0.086	0.156	0.091
16:00-17:00	58.3	53.8	45.6	0.052	0.112	0.115
17:00-9:00	-	-	-	0.134	0.665	1.024
Subtotales				**2.665**	**1.944**	**1.358**
Total				**5.967**		

5.2.2. MEDICIÓN DEL INCREMENTO DE TEMPERATURA DEL AGUA A SU PASO POR EL COLECTOR SOLAR

En la **Sección 2.12.5.1** se explicó que bajo un amplio rango de condiciones, el incremento de temperatura en el agua que fluye por muchos colectores de circulación natural tiende a ser constante. Al medir esta variación de temperatura es posible estimar el flujo másico de agua, y por ende también, el calor entregado por el colector. La medición de temperatura del líquido a la entrada y salida del colector se efectuó con un termómetro digital y termocuplas tipo K. El método para calcular la energía suministrada por un colector plano que funciona por termosifón se expuso en los **Capítulos 2** y **4**.

Figura 5.2 Medición de la temperatura del agua al ingreso y salida del colector solar

a) Temperatura a la entrada del colector

b) Temperatura a la salida del colector

Tabla 5.2 Temperatura del agua al ingreso y salida del colector solar

24/01/2012			
Hora (h)	**T_e (°C)**	**T_s (°C)**	**$T_s - T_e$ (°C)**
11:15	40.0	74.2	34.2
11:30	50.5	82.5	32.0
11:45	55.3	88.7	33.4
12:00	57.9	90.1	32.2
Promedio			**33**

El colector utilizado en este proyecto posee una cubierta de vidrio bajo en hierro y una placa de absorción con superficie selectiva soldada por ultrasonido a los tubos de cobre, características que le otorgan una alta eficiencia.

5.2.3. PRUEBAS AL DESALINIZADOR SOLAR OPERANDO CON AGUA SALINA

Cuando se efectuaron las pruebas, el desalinizador solar funcionó casi exclusivamente con agua potable. Esto se debió a que su simulación computacional se realizará con las propiedades termofísicas del agua dulce. Adicionalmente, para impedir la corrosión del colector solar, su operación con agua salina debió reducirse al mínimo. Sin embargo, en condiciones normales de servicio, el destilador funcionará con agua salada o salobre. Por este motivo es muy importante conocer el efecto del agua salada en el desempeño del desalinizador, y de esa forma modificar los resultados de los cálculos y la simulación.

Los experimentos que se efectuaron al desalinizador solar operando con agua salina se describen a continuación:

a) Se evacuó el agua de los tres depósitos de la Torre de destilación, después se añadió sal en grano al tanque de alimentación hasta alcanzar una concentración de aproximadamente el 3.6 %[10]. Durante un día de operación se midió la masa de agua destilada producida en cada depósito, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 5.3 Masa de agua destilada producida en cada depósito (Desalinizador solar en funcionamiento con agua salada)

18/01/2012			
Hora (h)	**Agua destilada producida(kg)**		
	Depósito principal	**Primer depósito**	**Segundo depósito**
11:00-12:00	0.405	0.018	0.000
12:00-13:00	0.602	0.085	0.000
13:00-14:00	0.415	0.140	0.000
14:00-15:00	0.322	0.188	0.004
15:00-9:00	0.122	0.596	0.578
9:00-10:00	0.081	0.008	0.000
10:00-11:00	0.208	0.025	0.000
Subtotales	**2.155**	**1.060**	**0.582**
Total	**3.797**		

[10] La salinidad promedio del agua de mar es del 3.6 %

b) El agua generada por el destilador solar se destinará al consumo humano, en consecuencia su calidad debe ser muy buena. La efectividad del proceso de destilación en la eliminación de sales disueltas y microorganismos nocivos del agua salina es un factor fundamental al momento de evaluar esta calidad. Con dicha finalidad se recolectaron 60 litros de agua de mar en una playa de la provincia de Esmeraldas. La cantidad de agua recogida, únicamente alcanzaba para llenar el Depósito Principal de la Torre de destilación, como resultado, los otros depósitos se llenaron con agua potable.

Después de dos horas de funcionamiento se tomaron dos muestras de agua destilada (únicamente del Depósito principal) y una muestra de agua de mar como referencia. Se midió la conductividad eléctrica de una de las muestras de agua destilada y también de aquella con agua de mar. A la muestra restante se le realizó un examen microbiológico para determinar la presencia de bacterias u otros microorganismos perjudiciales. Todos los análisis se efectuaron en el laboratorio Analítico Ambiental Aguas – Efluentes Industriales (LASA).

Figura 5.3 Recolección del agua de mar en una playa de la provincia de Esmeraldas

5.2.4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN UTILIZADOS

En las pruebas al desalinizador solar se utilizaron un termómetro digital FLUKE modelo 52 II, termocuplas tipo K y una balanza digital CAMRY EK 5055.

Figura 5.4 Termómetro digital FLUKE 52 II

Tabla 5.4 Especificaciones técnicas del termómetro digital FLUKE 52 II

PRECISIÓN	Sobre -100 °C: Tipo J, K, E, T y N: ±[0.05% + 0.3°C]* Tipo R y S: ±[0.05% + 0.4°C]* Bajo -100 °C: Tipo J, K, E y N: ±[0.20% + 0.3°C]* Tipo T: ±[0.50% + 0.3°C]
RANGO DE TEMPERATURAS	Tipo J: -210 °C a 1200 °C Tipo K: -200 °C a 1372 °C Tipo T: -250 °C a 400 °C Tipo E: -150 °C a 1000 °C Tipo N: -200 °C a 1300 °C * Tipo R y S: 0 °C a 1767 °C *
ESCALA DE TEMPERATURA	ITS-90
NORMAS APLICADAS	NIST-175
RESOLUCIÓN	0.1 °C, 0.1 K < 1000 1°C, 1 K >=1000
NOTA	* Únicamente los termómetros de modelo 53 II y 54 II son capaces de usar termocuplas tipo N, R y S

Figura 5.5 Balanza digital CAMRY EK 5055

La balanza digital CAMRY EK 5055 tiene una capacidad máxima de 5 kilogramos y una división mínima de 1 gramo.

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.3.1. TEMPERATURA DEL AGUA EN LA TORRE DE DESTILACIÓN Y MASA DE AGUA DESTILADA PRODUCIDA

5.3.1.1. Obtención experimental de las constantes C, n, C_1 y n_1 de los coeficientes de transferencia de calor por convección h_c y h_{c1}

Aplicando el procedimiento de la **Sección 3.7.2.3** (**Ecuaciones 3.37** a **3.41**) y las **Ecuaciones 4.36**, **4.38** y **4.49** se calcularon todas las variables necesarias para obtener por regresión lineal simple a las constantes C y n del Depósito principal. Asimismo, con las ecuaciones respectivas se calcularon las variables correspondientes al Primer Depósito y se aplicó el mismo procedimiento de regresión lineal para obtener las constantes C_1 y n_1. En las **Tablas 5.5 y 5.6** se observan los valores calculados para el Depósito principal y el Primer depósito del día 22 de diciembre de 2011. En el **Anexo V** se encuentran los valores calculados para todos los demás días de pruebas.

Tabla 5.5 Variables calculadas para obtener las constantes C y n por regresión lineal simple en el Depósito principal.

22/12/2011						
Hora (h)	**Ra (x)**	m_e **(kg)**	R	m_e/R **(y)**	**ln z** (y')	**ln y** (x')
9:00-10:00	3481009.00880	0.116	0.00832	13.93687	2.63454	15.06283
10:00-11:00	6378332.35060	0.360	0.02123	16.95983	2.83085	15.66842
11:00-12:00	7784328.33390	0.621	0.03395	18.28920	2.90631	15.86762
12:00-13:00	7122863.15710	0.727	0.03723	19.52583	2.97174	15.77882
13:00-14:00	4173558.01720	0.359	0.02265	15.85075	2.76322	15.24428
14:00-15:00	2802836.11100	0.210	0.01478	14.20597	2.65366	14.84614
15:00-16:00	1614359.94400	0.086	0.00787	10.92585	2.39113	14.29445

Tabla 5.6 Variables calculadas para obtener las constantes C_1 y n_1 por regresión lineal simple en el Primer depósito

22/12/2011						
Hora (h)	Ra_1 (x_1)	m_{e1} **(kg)**	R_1	m_{e1}/R_1 (y_1)	**ln** z_1 (y'_1)	**ln** y_1 (x'_1)
9:00-10:00	1315396.39733	0.021	0.00195	10.78904	2.37853	14.08965
10:00-11:00	2123221.16743	0.051	0.00361	14.11435	2.64719	14.56844
11:00-12:00	3610645.23679	0.138	0.00803	17.18582	2.84408	15.09940
12:00-13:00	5097454.02662	0.270	0.01509	17.88746	2.88410	15.44425
13:00-14:00	4852575.29131	0.300	0.01695	17.69973	2.87355	15.39502
14:00-15:00	3757988.60123	0.231	0.01406	16.43302	2.79929	15.13939
15:00-16:00	2797092.01833	0.156	0.01043	14.95152	2.70481	14.84409

A partir del **Anexo V** y de las **Tablas 5.5** y **5.6** se procedieron a graficar en una hoja de Microsoft Excel los datos de $\mathbf{y}'$vs $\mathbf{x}'$ del Depósito principal, así como también los datos de $\boldsymbol{y'_1}$vs $\mathbf{x'_1}$ del Primer depósito. A continuación, las ecuaciones de las rectas y sus coeficientes de correlación lineal fueron determinados.

Figura 5.6 Depósito principal: $\ln(m_e/R)$ vs $\ln(\mathrm{Ra})$

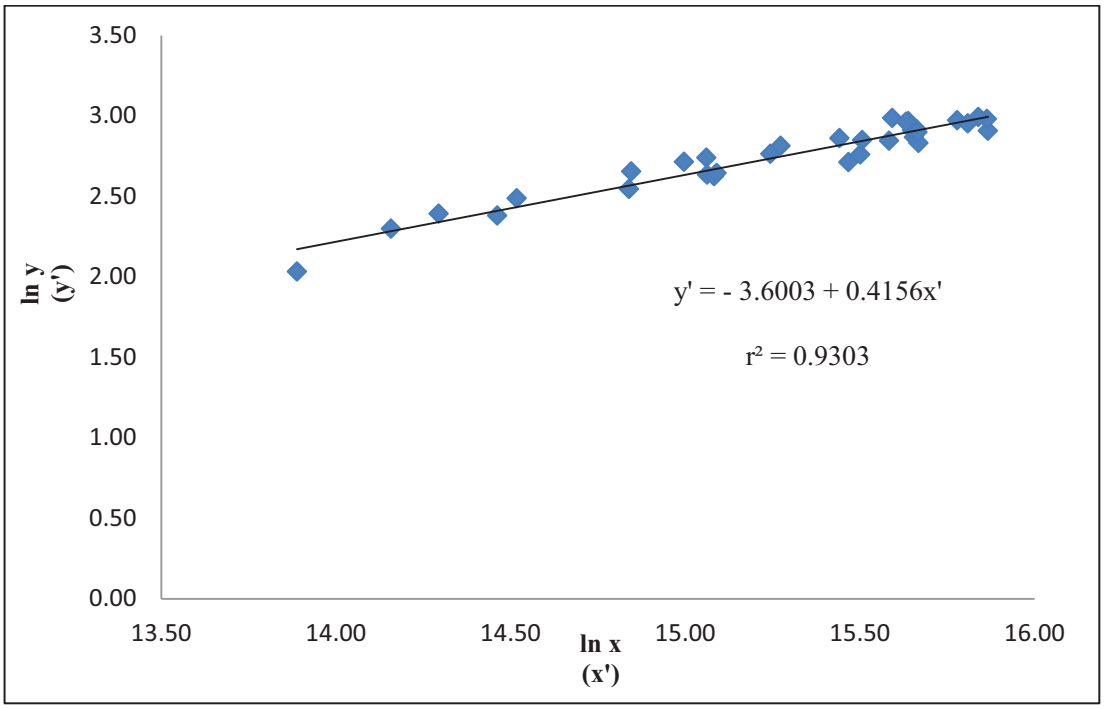
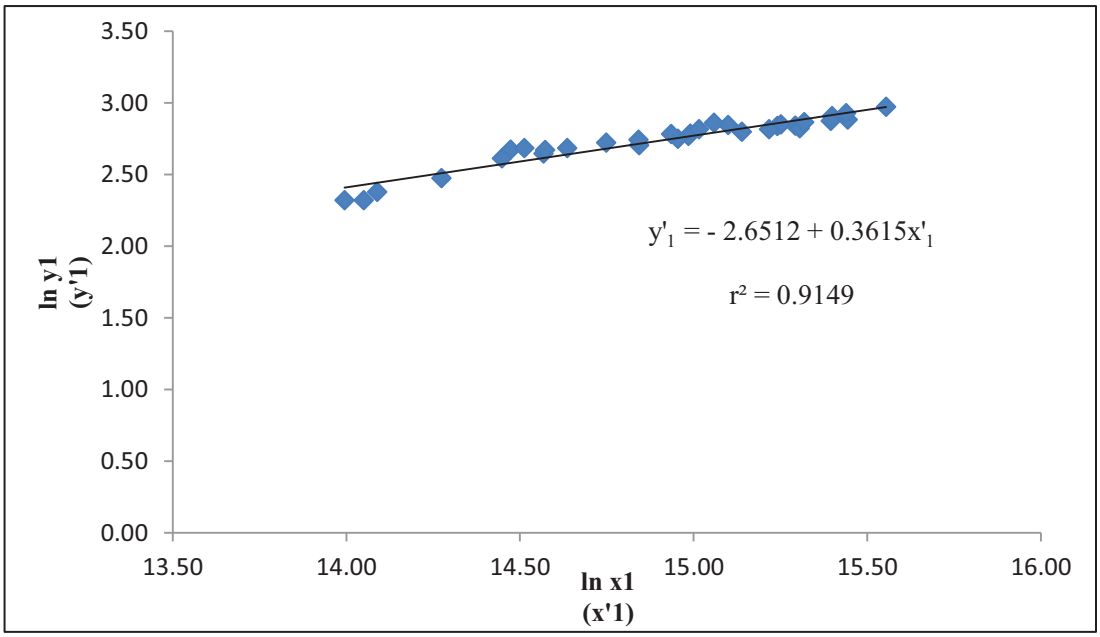


Figura 5.7 Primer Depósito: $\ln(m_{e1}/R_1)$ vs $\ln(\mathrm{Ra_1})$



De acuerdo a la **Figura 5.6**, la ecuación de la recta obtenida por regresión lineal para el Depósito principal es $y' = -3.6003 + 0.4156\,x'$, con un coeficiente de correlación lineal de 0.9303. En el caso del Primer depósito, de la **Figura 5.7** se tiene que la recta de regresión es $y'_1 = -2.6512 + 0.3615 \cdot x'_1$, con un coeficiente igual a 0.9149.

Como se manifestó en la **Sección 3.7.2.3**, a medida que el coeficiente de correlación lineal se aproxima a 1, mejora la concordancia entre los datos experimentales y la ecuación de la recta. En los dos depósitos este coeficiente es cercano a 1, presentándose un buen ajuste entre las rectas de regresión y los datos experimentales.

Conociendo que:

$$y' = a' + b' \cdot x' = -3.6003 + 0.4156\, x'$$

$$y'_1 = a'_1 + b'_1 \cdot x'_1 = -2.6512 + 0.3615\, x'_1$$

Con las **Ecuaciones 3.40** y **3.41**, las constantes C, n, C_1, y n_1 están dadas por:

$$C = e^{(-3.6003)} = 0.02731$$

$$n = 0.4156$$

$$C_1 = e^{(-2.6512)} = 0.07056$$

$$n_1 = 0.3615$$

Los valores de C, n, C_1, y n_1 derivados de este procedimiento toman en consideración la distancia entre la superficie del agua y la superficie de condensación, el rango de las temperaturas de operación y la inclinación del fondo en el Primer y Segundo depósito.

Tabla 5.7 Depósito principal: Comparación entre la masa calculada de agua destilada y la obtenida experimentalmente (22/12/2011)

Hora (h)	**m_e (kg) Experimental**	**$C = 0.0273$ y $n = 0.4156$**		**$C = 0.075$ y n =1/3**	
		m_e (kg) Teórico	**Error (%)**	**m_e (kg) Teórico**	**Error (%)**
9:00-10:00	0.116	0.119	2.59	0.095	-18.10
10:00-11:00	0.360	0.390	8.33	0.295	-18.05
11:00-12:00	0.621	0.678	9.18	0.505	-18.70
12:00-13:00	0.727	0.716	-1.51	0.537	-26.13
13:00-14:00	0.359	0.349	-2.79	0.273	-24.00
14:00-15:00	0.210	0.193	-8.10	0.156	-25.71
15:00-16:00	0.086	0.082	-4.65	0.069	-19.76
Total	**2.479**	**2.527**	**1.94**	**1.93**	**-22.15**

Tabla 5.8 Primer depósito: Comparación entre la masa calculada de agua destilada y la obtenida experimentalmente

22/12/2011			
$C_1 = 0.07056, n_1 = 0.3615$			
Hora (h)	m_e **(kg) Experimental**	m_e **(kg) Teórico**	**Error (%)**
9:00-10:00	0.021	0.022	4.76
10:00-11:00	0.051	0.049	-3.92
11:00-12:00	0.138	0.133	-3.62
12:00-13:00	0.270	0.283	4.81
13:00-14:00	0.300	0.312	4.00
14:00-15:00	0.231	0.236	2.16
15:00-16:00	0.156	0.158	1.28
Total	**1.167**	**1.193**	**2.23**

Al observar las **Tablas 5.7** y **5.8** es evidente que en ambos depósitos existe una buena concordancia entre los datos experimentales y teóricos. Con un error máximo de 9.18 % en el Depósito principal y de 4.81 % en el Primer depósito. Por el contrario, al utilizar las constantes propuestas por Dunkle (C = 0.075 y n = 1/3), el error fue mucho mayor.

5.3.1.2. Coeficiente de Rendimiento (COP)

El Coeficiente de Rendimiento (COP) es la relación entre la masa de agua generada por todas las etapas y el agua producida por la primera etapa del desalinizador. De acuerdo a la **Ecuación 3.1** y la **Tabla 5.1**, el Coeficiente de Rendimiento del destilador solar en el día 22 de diciembre de 2011 está dado por

$$\mathrm{COP} = \frac{2.665\ \mathrm{kg}}{5.967\ \mathrm{kg}} = 2.24$$

En la siguiente tabla se muestran los valores del COP para todos los días en que se realizaron las pruebas al desalinizador.

Tabla 5.9 Coeficiente de Rendimiento (COP) para los días en que se efectuaron pruebas de 24 horas al desalinizador

Fecha	Agua destilada Depósito principal (kg)	Agua destilada Todos los depósitos (kg)	COP
21/12/2011	3.093	6.451	2.09
22/12/2011	2.665	5.967	2.24
03/01/2012	1.557	3.540	2.27
16/01/2012	2.574	5.351	2.08
Promedio			**2.17**

Un COP promedio de 2.17 revela que el proceso de recuperación de calor en la Torre de destilación es muy efectivo. Por ejemplo, si el destilador solar tendría una sola etapa, la producción de agua destilada probablemente se reduciría a la mitad.

5.3.2. VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL AGUA A SU PASO POR EL COLECTOR SOLAR

De la **Tabla 5.2** se tiene que el aumento promedio de la temperatura del agua a su paso por el colector solar es de 33 °C. El uso de este valor es adecuado con niveles altos y medios de radiación solar (600 a 1100 W/m^2); cuando la radiación es baja, el incremento de temperatura es menor y más inestable.

La variación de temperatura es mucho mayor que la prevista, esto indica una restricción considerable en el flujo de agua que circula entre la Torre de destilación y el colector solar; situación que provoca una disminución en la eficiencia del colector. Las posibles soluciones a este problema consistirían en aumentar el diámetro de las tuberías de conexión y elevar la Torre de destilación varios centímetros sobre su nivel actual. La primera modificación reduciría la resistencia que ofrecen las tuberías al flujo de agua, y la segunda aumentaría la presión de empuje que permite la circulación del líquido por termosifón (ver la **Sección 2.12.5.1**).

5.3.2.1. Energía útil entregada por el colector solar

La simulación del desalinizador solar corresponderá al día 22 de diciembre de 2011, se debe entonces calcular la energía suministrada por el colector en dicha fecha. Para este propósito, además de la variación de temperatura del agua a su paso por el colector, es necesario conocer la radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente del lugar

donde se ubicará el destilador (azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica). Toda esta información meteorológica fue suministrada por el LEAEE[11] y se encuentra en el **Anexo III**.

El colector solar se ubicó mirando hacia el Sur e inclinado 10° respecto a la horizontal. A causa de esta inclinación, hay una variación de intensidad entre la radiación solar sobre el colector y la que incide en una superficie horizontal. Con los datos de irradiancia solar suministrados por el LEAEE se estimará la radiación incidente sobre el colector. En el análisis de los sistemas solares de conversión de energía es común utilizar los datos de la radiación solar horaria (J/m^2). Sin embargo, en la simulación del prototipo es más apropiado disponer de información sobre la radiación solar promedio en W/m^2, igualmente para periodos de 1 hora.

En la **Tabla 5.10** se muestran los datos de irradiancia solar promedio sobre una superficie horizontal. Se puede notar que después de las 2 PM, los niveles de radiación solar son muy bajos; si a esta circunstancia se le añade el hecho de que justamente a esa hora es muy alta la temperatura del agua en el Depósito principal, la eficiencia del colector en tales condiciones será igual a cero. En consecuencia, no se evaluará la radiación solar desde las 2 PM; tampoco se tomará en cuenta la radiación solar del día siguiente de 8 AM a 9 AM, puesto que un edificio contiguo bloqueaba por completo los rayos solares hasta cerca de las 8:45 AM.

Tabla 5.10 Radiación solar promedio sobre una superficie horizontal (22/12/2011)

Hora (h)	Radiación solar promedio (W/m2)
9:00-10:00	790.78
10:00-11:00	953.93
11:00-12:00	1028.12
12:00-13:00	865.97
13:00-14:00	536.52
14:00-15:00	247.76
15:00-16:00	209.6
16:00-17:00	224.29
17:00-18:00	62.31
6:00-7:00	15
7:00-8:00	34.1
8:00-9:00	444.94

[11] Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional

Antes de aplicar las ecuaciones para estimar la radiación sobre el colector, primero debemos transformar las horas convencionales en horas solares. Con las **Ecuaciones 2.1, 2.2** y **2.3** convertimos las 9:00 AM hora convencional en hora solar; el resultado es 8:47 AM, es decir una variación de trece minutos. Para las demás horas el desfase en minutos es el mismo.

Las ecuaciones usadas para estimar la radiación solar horaria sobre una superficie inclinada (J/m^2), también son válidas para calcular la radiación solar promedio sobre el colector solar (W/m^2). En la siguiente tabla se exponen los valores calculados de la radiación solar incidente sobre el colector en el día 22 de diciembre de 2011, estos se obtuvieron con las **Ecuaciones 4.6** a **4.13**.

Tabla 5.11 Comparación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal y la que incide sobre el colector (22/12/2011)

Hora convencional (h)	Hora solar (h)	Radiación sobre una superficie horizontal (W/m^2)	Radiación sobre el colector (W/m^2)	Variación (%)
9:00-10:00	**8:47-9:47**	790.78	841.27	6.39
10:00-11:00	**9:47-10:47**	953.93	1004.31	5.28
11:00-12:00	**10:47-11:47**	1028.12	1078.12	4.86
12:00-13:00	**11:47-12:47**	865.97	902.18	4.18
13:00-14:00	**12:47-13:47**	536.52	545.48	1.67

En la tabla anterior se puede advertir que la variación es pequeña entre los datos proporcionados por el LEAEE y la radiación calculada que incide sobre el colector solar. Esto hace innecesaria la modificación de los valores de radiación sobre una superficie horizontal, incurriendo en un error despreciable al usar directamente esta información.

En la **Tabla 5.12** se indica la temperatura ambiente promedio (T_a), la temperatura promedio del agua al ingresar al colector (T_e) y la velocidad promedio del viento (v_r) en el día 22 de diciembre de 2011, desde las 9 AM hasta las 2 PM; periodo en el cual el colector solar proporcionó energía útil. La velocidad del viento se midió a una altura de 4.2 metros sobre el suelo; no obstante, la cubierta del colector se sitúa a tan sólo 0.235 metros de altura, donde la velocidad es menor. Por lo tanto, es necesario modificar los datos de esta tabla.

Tabla 5.12 Velocidad del viento, temperatura ambiente y temperatura del agua al ingreso del colector solar

22/12/2011					
Hora (h)	**Velocidad del viento (m/s)**	**Temperatura ambiente**		**Temperatura del agua a su ingreso al colector**	
		°C	**K**	**°C**	**K**
9:00-10:00	1.76	16.5	289.5	46.2	319.2
10:00-11:00	1.88	18.7	291.7	59.4	332.4
11:00-12:00	1.90	19.87	292.87	69.1	342.1
12:00-13:00	2.50	20.53	293.53	74.0	347.0
13:00-14:00	3.04	19.83	292.83	70.2	343.2

Las velocidades promedio del viento sobre el colector (v_c) se muestran en la siguiente tabla, sus valores se estimaron con las **Ecuaciones 3.66** y **3.67**.

Tabla 5.13 Velocidad del viento sobre la cubierta del colector solar

22/12/2011	
Hora (h)	v_c **(m/s)**
9:00-10:00	0.75
10:00-11:00	0.81
11:00-12:00	0.82
12:00-13:00	1.15
13:00-14:00	1.47

En la **Tabla 5.14** se observan las constantes geométricas y termofísicas empleadas en el cálculo de la energía entregada por el colector solar, Q_u. El coeficiente de transferencia de calor entre el agua y los tubos (h_{fi}) es el parámetro más impredecible de la tabla, motivo por el cual, se requiere determinar su valor más apropiado. En la **Sección 2.12.4** se mencionó que el coeficiente h_{fi} oscila entre 100 y 1000 W/m^2 ·°C, dependiendo de si el flujo que circula por el colector es laminar o muy turbulento. En los colectores que funcionan por circulación natural, el coeficiente h_{fi} tiene un valor intermedio, cercano a 300 W/m^2 ·°C; presentándose cambios pequeños en la magnitud de Q_u cuando h_{fi} fluctúa entre los 200 y 600 W/m^2 ·°C. Consecuentemente, al evaluar Q_u, el coeficiente h_{fi} será igual a 300 W/m^2 ·°C.

Aplicando las **Ecuaciones 4.14** a **4.17** con los datos de las **Tablas 5.11**, **5.12** y **5.13** se estimó la energía útil entregada por el colector. El procedimiento fue iterativo y por facilidad se lo realizó en una hoja de Microsoft Excel. Primero, se anotaron los datos de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar; conjuntamente se colocó un valor estimado de la temperatura media de la placa de absorción (T_{pm}) y se efectuaron los cómputos. Con estos resultados se calculó T_{pm} (ver la **Ecuación 2.54**) y se remplazó su valor inicial por esta nueva temperatura, ejecutando de nuevo los cómputos; este proceso se repite hasta que ambas temperaturas sean iguales.

Debido a la baja radiación solar de la tarde, el colector únicamente proporcionó energía entre las 9 AM y las 14 PM. También es importante señalar, que sólo hasta las 11 AM es válido el incremento de 33 °C en el agua que circula por el colector, desde esa hora en adelante, la variación de temperatura es igual a la resta entre 90°C y la temperatura del fluido a su ingreso al colector.

En la **Tabla 5.15** se aprecian los datos de radiación solar, flujo másico de agua que circula por el colector y energía útil que este suministra a la Torre de destilación; la exactitud de este último parámetro se verificará con los resultados de la simulación.

Tabla 5.14 Constantes geométricas y termofísicas usadas en el cálculo de la energía útil entregada por el colector

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Emisividad de la placa de absorción	ε_p	0.1	-
Emisividad de la cubierta (vidrio)	ε_g	0.95	-
Transmisividad de la cubierta (vidrio)	τ	0.88	-
Absortividad de la placa de absorción	α	0.95	-
Ángulo de inclinación del colector	β	10	Grados
Diámetro exterior de los tubos del colector	D	0.00952	m
Diámetro interior de los tubos del colector	D_i	0.0079	m
Espesor de la placa de absorción	δ	0.00015	m
Distancia entre tubos	W	0.117	m
Coeficiente de transferencia de calor entre el agua y los tubos	h_{fi}	300	$W/m^2 \cdot °C$

Área del colector	A_c	1.76	m^2
Ancho de la unión entre la placa de absorción y el tubo	b	0.0015	m
Espesor de la unión entre la placa de absorción y el tubo	γ	0.001	m
Conductividad térmica del aislante colocado detrás de la placa de absorción	k_f	0.045	W/m·°C
Espesor del aislante térmico colocado detrás de la placa de absorción (lana de vidrio)	L_f	0.03	m
Área del aislante lateral del colector	A_e	0.426	m^2
Conductividad térmica del aislante lateral (lana de vidrio)	k_e	0.045	W/m·°C
Espesor del aislante lateral	L_e	0.025	m
Conductividad térmica de la placa de absorción	k	385	W/m·°C
Conductividad térmica de la unión entre la placa de absorción y el tubo	k_b	200	W/m·°C
Calor específico del fluido calor portador (agua)	C_{pw}	4179	J/kg·°C
Altura sobre el suelo a la que se ubica el anemómetro	z_r	4.2	m
Altura sobre el suelo a la que se encuentra la cubierta del colector	z_c	0.235	m

Tabla 5.15 Radiación solar, flujo másico de agua que circula por el colector y energía útil entregada por este a la Torre de destilación

22/12/2011			
Hora (h)	**Radiación solar (W/m^2)**	**Flujo másico de agua ($\dot{m}_e$) (kg/s)**	**Energía entregada por el colector (Q_u) (W)**
9:00-10:00	790.78	0.00474	653.679
10:00-11:00	953.93	0.00554	764.004
11:00-12:00	1028.12	0.00956	838.976
12:00-13:00	865.97	0.00898	600.438
13:00-14:00	536.52	0.00209	174.682

5.3.2.2. Relación de Ganancia de Salida (GOR)

La Relación de Ganancia de Salida es útil al analizar el desempeño general del desalinizador solar, siendo equivalente a la eficiencia térmica. De la **Ecuación 3.2** se tiene que

$$\mathrm{GOR} = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_{ei} \cdot \overline{h_{fg}}}{Q_{u,total}} \tag{5.9}$$

Donde $\sum_{i=1}^{n} m_{ei}$ es el agua producida por todas las etapas (kg), $\overline{h_{fg}}$ la entalpia promedio de vaporización del agua (2390 kJ/kg) y $Q_{u,total}$ la energía suministrada por el colector solar (J). Antes de utilizar la **Ecuación 5.9** se requiere conocer la radiación diaria sobre una superficie horizontal (Wh/m^2) y la eficiencia diaria del colector solar. Para el día 22 de diciembre de 2011, la radiación solar diaria y el $Q_{u,total}$ calculados fueron de 5436.63 Wh/m^2 y 3031.779 Wh, respectivamente. Con un área de 1.76 m^2, la eficiencia diaria del colector es de 31.68 %; una cifra relativamente baja, que se podría mejorar al aumentar el flujo de agua que circula por el panel solar. El GOR para el día 22 de diciembre está dado por

$$\mathrm{GOR} = \frac{5.967 \cdot 2390000}{3031.779 \cdot 3600} = 1.3$$

En la **Tabla 5.16** se exponen la radiación solar diaria, la producción diaria de agua destilada y el GOR calculado para todos los días en que se realizaron pruebas al prototipo. Al estimar el GOR de cada día se consideró una eficiencia promedio del colector, igual a 31.68 %.

Tabla 5.16 Radiación solar, producción de agua destilada y Relación de Ganancia de Salida para los días en que se realizaron pruebas de 24 horas al desalinizador

Fecha	Radiación solar diaria (Wh/m^2)	Agua destilada (kg)	GOR
21/12/2011	6310.59	6.451	1.22
22/12/2011	5436.63	5.967	1.30
03/01/2012	3587.37	3.540	1.17
16/01/2012	5056.02	5.351	1.26
Promedio			**1.24**

En el presente proyecto se obtuvo un GOR promedio de 1.24, una cifra baja en relación al desalinizador solar creado por K. Schwarzer et al. **[40]**, cuyo GOR oscila entre 2.8 y 3.5 con una torre de destilación de 5 y 7 etapas, respectivamente. La diferencia hubiera sido menor al aumentar el número de etapas del destilador y usar como en la mencionada investigación, un colector de tubos al vacío de mayor eficiencia.

5.3.3. DESALINIZADOR SOLAR OPERANDO CON AGUA SALINA

5.3.3.1. Coeficiente de Rendimiento (COP) y Relación de Ganancia de Salida (GOR)

Los análisis anteriores tienen que ser modificados para tomar en cuenta el funcionamiento del destilador solar con agua salina. A partir de la **Tabla 5.3** y de la **Ecuación 3.1**, el Coeficiente de Rendimiento del día 18 de enero de 2012 es

$$\mathrm{COP}_{\text{agua salada}} = \frac{3.797\ \text{kg}}{2.155\ \text{kg}} = 1.76$$

Al utilizar agua salada, el COP se reduce a 1.76, es decir una disminución de casi el 20 % en relación al COP obtenido con agua potable.

La radiación solar diaria del día 18 de enero de 2012 fue de 4594.72 (Wh/m^2), aplicando la **Ecuación 5.9** con las datos de la **Tabla 5.3** se tiene

$$\mathrm{GOR}_{\text{agua salada}} = \frac{3.797 \cdot 2390 \times 10^3}{4594.72 \cdot 1.76 \cdot 3600 \cdot 0.317} = 0.98$$

Al emplear agua salada, el valor del GOR es de 0.98; al compararlo con 1.24 (GOR con agua potable), existe una reducción del 20 %.

5.3.3.2. Análisis químico y microbiológico del agua producida por el Desalinizador solar

Conforme a la **Tabla 5.17**, el agua destilada generada por el desalinizador solar si cumple con los parámetros microbiológicos de la norma INEN 1108 para el agua potable (ver el **Anexo II**). La conductividad eléctrica del agua producida por el destilador es de 2.2 $\mu S/cm$ y la conductividad del agua de mar que ingresó al desalinizador es de 44600 $\mu S/cm$. Estos resultados revelan que prácticamente todos los sólidos disueltos fueron removidos del agua.

Tabla 5.17 Análisis microbiológico y de conductividad eléctrica del agua producida por el desalinizador solar

Parámetros	Unidades	Resultado del ensayo	Valores de referencia NORMA INEN 1108
Contaje total Aerobios mesófilos	UFC/ml	29×10^2	-
Coliformes totales	NMP/100ml	< 1.1	< 1.1
E. Coli	NMP/100ml	< 1.1	-
Hongos	UFC/ml	< 1	-
Levaduras	UFC/ml	< 1	-

Parámetro	Agua destilada producida	Agua de mar
Conductividad ($\mu S/cm$)	2.20	44600

La elevada presencia de bacterias (Aerobios mesófilos) en el agua destilada se debe probablemente a la falta de limpieza de los recipientes donde esta se recolectaba, situación fácilmente corregible en un lugar donde se preste el servicio de desalinización solar. Es importante señalar que en la **Norma INEN 1108**, el contaje total de aerobios mesófilos no es un parámetro que se tome en cuenta al momento de evaluar la calidad del agua potable; en consecuencia, el alto número de estos microorganismos en el agua generada por el desalinizador, no afecta el cumplimiento de esta norma.

5.4. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR

Como ya se explicó en el capítulo anterior, la simulación del desalinizador solar se realizará con el programa Matlab/Simulink. Dados los datos de velocidad del viento, temperatura ambiente y radiación solar de un día en particular (para este caso en análisis, el día 22 de diciembre de 2011); el objetivo de la simulación es predecir la masa de agua destilada generada por los depósitos de la Torre de destilación. Esto se consigue con la resolución de un sistema de 6 ecuaciones diferenciales (**Ecuaciones 4.18** a **4.23**), donde la variable principal es la temperatura del agua en cada etapa del desalinizador.

Con este fin, el programa utiliza el procedimiento numérico de paso variable Dormand-Prince ode45, basado en el método Runge-Kutta. Mediante la obtención experimental de las constantes C, n, C_1 y n_1 de los coeficientes de transferencia de calor por convección, h_c y h_{c1}, se espera una buena aproximación entre los datos de la simulación y los experimentales.

En la siguiente tabla se aprecian todas las constantes geométricas y termofísicas ocupadas en la simulación del destilador solar.

Tabla 5.18 Constantes geométricas y termofísicas usadas en la simulación del desalinizador solar

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Absortividad exterior de la cubierta del Segundo depósito	α_t	0.9	-
Aceleración de la gravedad	g	9.798	m/s^2
Altura sobre el suelo a la que se encuentra la cubierta de la Torre de destilación	z_t	1.16	m
Altura sobre el suelo a la que se ubica el anemómetro	z_r	4.2	m
Área de la base del Depósito principal	A_f	0.372	m^2
Área de la cubierta del Segundo depósito	A_t	0.386	m^2
Área de la superficie libre del agua en el Depósito principal	A_w	0.372	m^2
Área de la superficie libre del agua en el Primer depósito	A_{w1}	0.372	m^2
Área de la superficie libre del agua en el Segundo depósito	A_{w2}	0.372	m^2
Área de las paredes del Depósito principal	A_s	0.7265	m^2
Área de las paredes del Primer depósito	A_{s1}	0.5663	m^2
Área de las paredes del Segundo depósito	A_{s2}	0.5668	m^2
Área del fondo del Primer depósito	A_{b1}	0.385	m^2
Área del fondo del Segundo depósito	A_{b2}	0.385	m^2
Calor específico del acero inoxidable AISI 430	C_{pb}	460.57	J/kg·°C
Calor específico del agua	C_{pw}	4179	J/kg·°C
Conductividad térmica del aislante en la base de la Torre de destilación (Espuma de poliuretano)	k_{AF}	0.03	W/m·°C

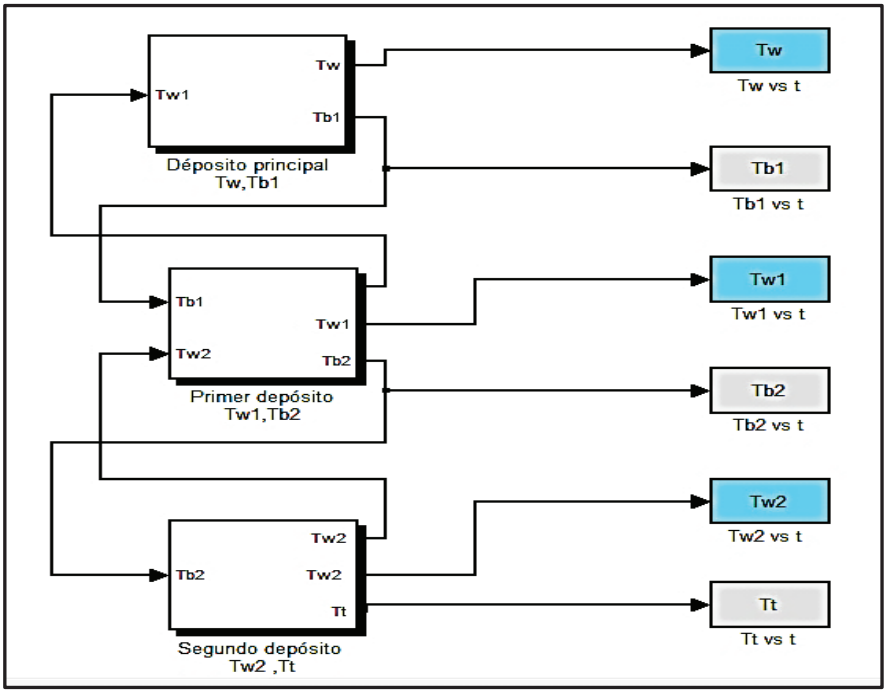
Conductividad térmica del aislante en las paredes de la Torre de destilación (Poliestireno expandido)	k_{AT}	0.045	W/m·°C
Constante de Stefan-Boltzmann	σ	5.670×10^{-8}	$W/m^2 \cdot K^4$
Constante universal de los gases	R	8.31447	kJ/kmol·K
Densidad del acero inoxidable AISI 430	ρ_b	7700	kg/m^3
Densidad del agua	ρ_w	984.252	kg/m^3
Distancia entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	x	0.155	m
Distancia entre la superficie del agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	x_1	0.155	m
Distancia entre la superficie del agua del Segundo depósito y su cubierta	x_2	0.156	m
Emisividad del acero inoxidable brillante	ε_b	0.22	-
Emisividad del agua	ε_w	0.96	-
Emisividad exterior de la cubierta del Segundo depósito (blanco acrílico)	ε_t	0.26	-
Espesor del aislante térmico de la Torre de destilación	L_{AT}	0.05	m
Masa de agua en el Depósito principal	m_w	31.638	kg
Masa de agua en el Primer depósito	m_{w1}	29.184	kg
Masa de agua en el Segundo Depósito	m_{w2}	30.446	kg
Masa de la cubierta o tapa	m_t	2.674	kg
Masa del fondo del Primer Depósito	m_{b1}	2.674	kg
Masa del fondo del Segundo depósito	m_{b2}	2.674	kg
Número de Prandtl del aire	Pr	0.703	-
Peso molecular del agua	M_w	18.02	-
Peso molecular del aire	M_a	28.97	-
Presión total o atmosférica	P_T	71920	N/m^2
Constantes del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito	C	0.0273	-
	n	0.4156	-
Constantes del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito	C_1	0.0705	-
	n_1	0.3615	-

5.4.1. COMPONENTES DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

El programa de simulación posee una ventana principal en la que se encuentran los bloques correspondientes a las tres etapas del desalinizador, los mismos están conectados entre sí y son interdependientes. Los bloques a su vez se conectan a pequeños recuadros que indican las temperaturas que se desean conocer. Dentro de los bloques principales se ubican otros bloques que representan a los flujos de calor y masa en los depósitos de la Torre de destilación. En el interior de estos últimos se localizan sub-bloques que permiten el cálculo de los flujos de calor y masa (**Ecuaciones 4.24** a **4.79**) mediante operadores matemáticos y funciones.

Para ejecutar la simulación se precisa de los valores de radiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento del día 22 de diciembre del 2011, datos que se exponen en las tablas del **Anexo III**.

Figura 5.8 Ventana principal del programa de simulación del Desalinizador solar



5.4.1.1. Bloque de simulación del Depósito principal

El bloque del Depósito principal requiere de la energía proveniente del colector solar, de la temperatura inicial del agua en el depósito (**40.1 °C**) y de la temperatura ambiente promedio (**14.05 °C**). En el Depósito principal y el resto de compartimientos del desalinizador, la temperatura ambiente promedio sirve para estimar la energía perdida hacia los alrededores, tanto por el flujo de calor a través de las paredes del destilador así como por la entrada continua del agua de alimentación. La información de la energía entregada por el colector (Q_u) fue ingresada a la simulación por medio de bloques Step, los cuales proporcionan datos de entrada con valores constantes para intervalos de tiempo determinados (ver la **Figura 5.9**).

En la **Figura 5.10** se ilustra la gráfica de Q_u, esta se caracteriza por su forma escalonada con un máximo a medio día y un mínimo de cero desde las 2 PM.

Figura 5.9 Bloques Step de la energía entregada por el colector solar

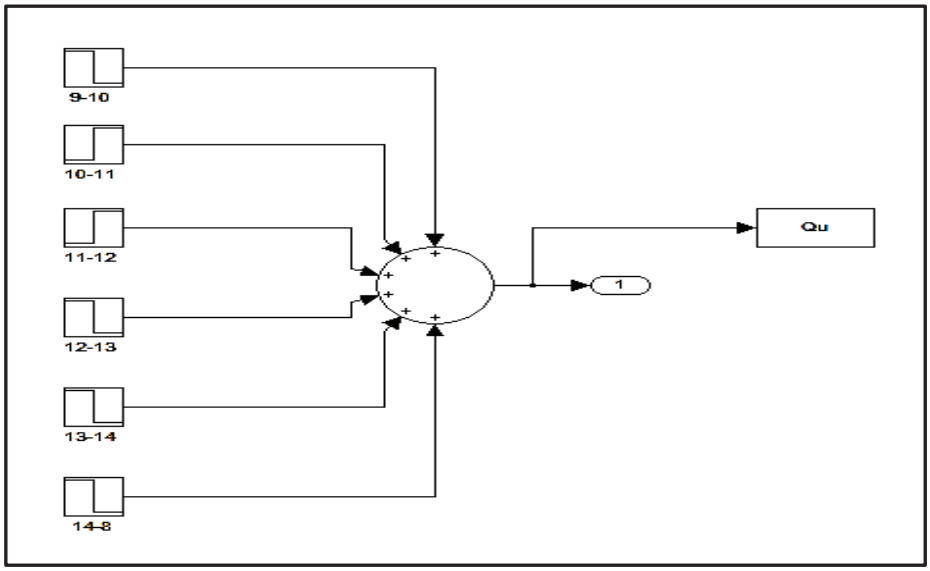
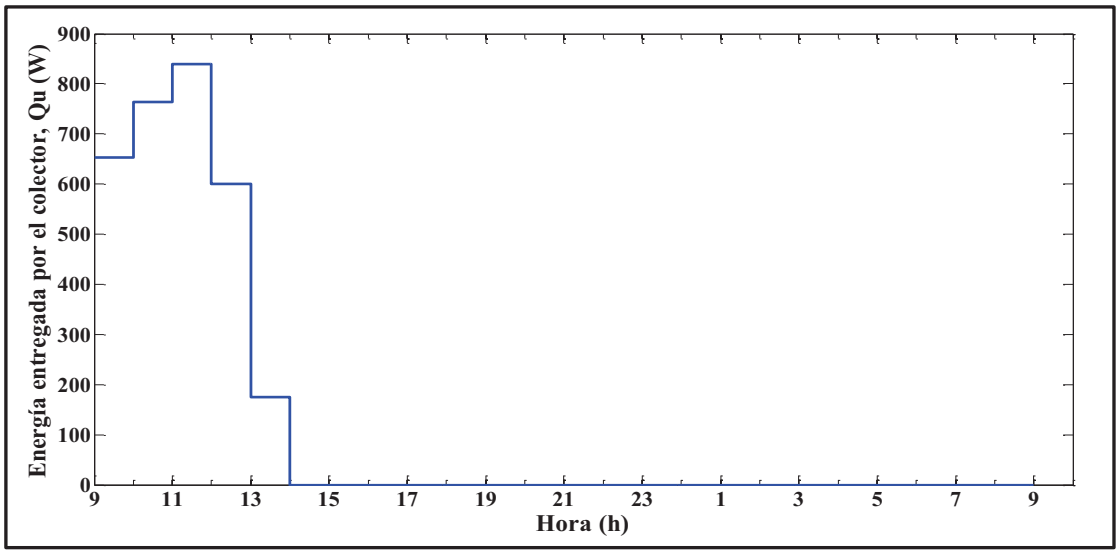


Figura 5.10 Energía promedio entregada por el colector solar en función del tiempo



Los bloques pertenecientes a los flujos de calor y masa del Depósito principal se ilustran en la **Figura 5.11**, cada bloque se relaciona con los demás por medio de operadores matemáticos que permiten representar a los balances de energía en el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito (**Ecuaciones 4.18** y **4.19**). En las **Figuras 5.12 y 5.13** se exponen los bloques con operadores matemáticos y funciones para el cálculo de los flujos de calor por convección y evaporación entre el agua y el fondo del Primer Depósito, q_c y q_e. En la **Figura 5.14** se presentan los bloques que a partir del flujo de calor por evaporación calculan la masa de agua destilada producida, $\dot{m}_e$. Todos los bloques restantes del Depósito Principal y de los otros compartimientos se encuentran en el **Anexo VI**.

Cuando se corre la simulación, el bloque del Depósito principal recibe como datos de entrada a la temperatura del agua en el Primer Depósito (T_{w1}) y al flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del Primer depósito, q_{bw1}. Los datos de salida son la temperatura del agua T_w, la temperatura en el fondo del Primer depósito T_{b1}, los flujos de calor hacia el fondo del Primer depósito (q_r, q_c y q_e), el calor perdido hacia el medio ambiente (q_p) y la masa de agua destilada, $\dot{m}_e$.

Figura 5.11 Bloques del programa de simulación de los flujos de calor y masa en el Depósito principal

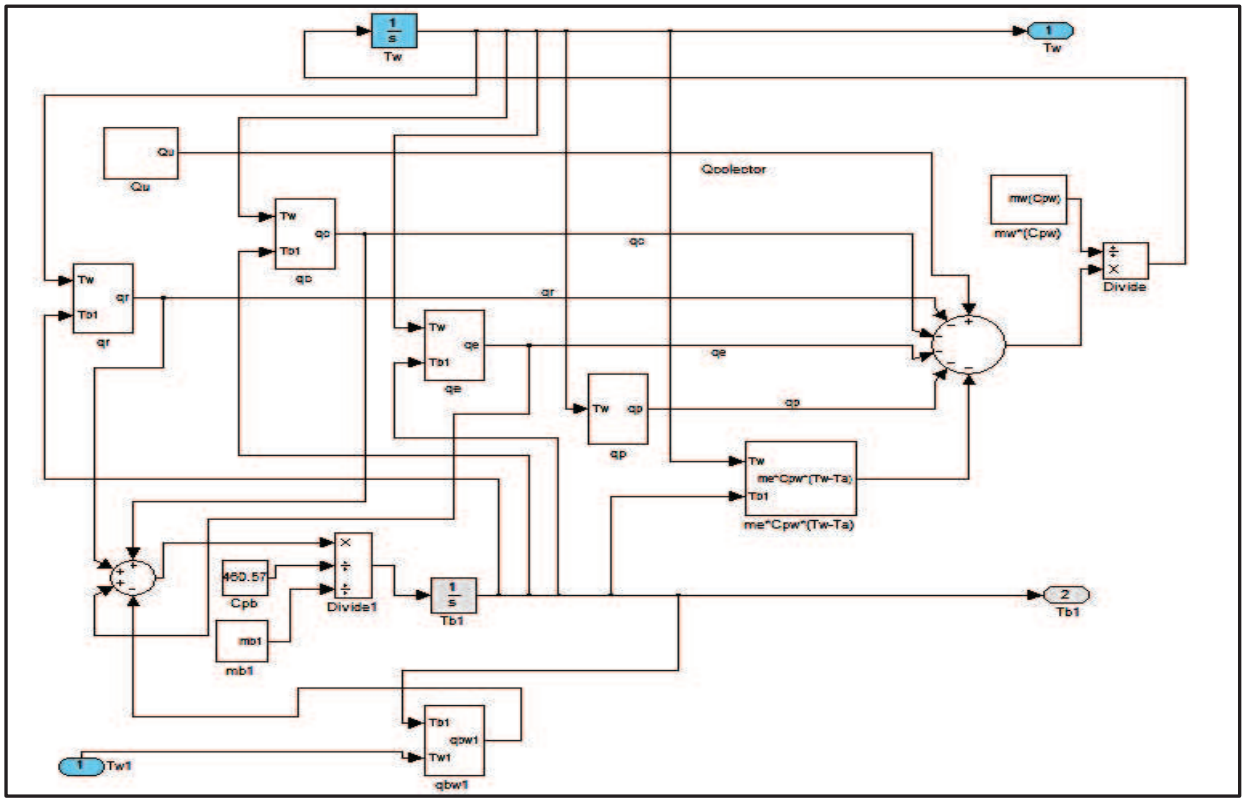


Figura 5.12 Sub-bloques del flujo de calor por convección entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_c

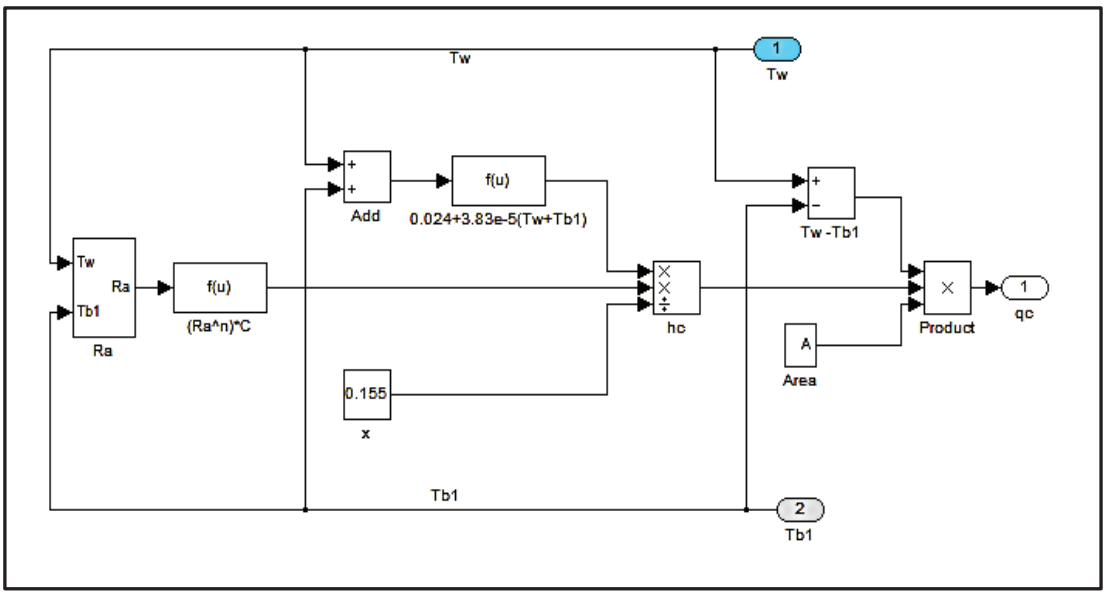


Figura 5.13 Sub-bloques del flujo de calor por evaporación entre la superficie del agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_e

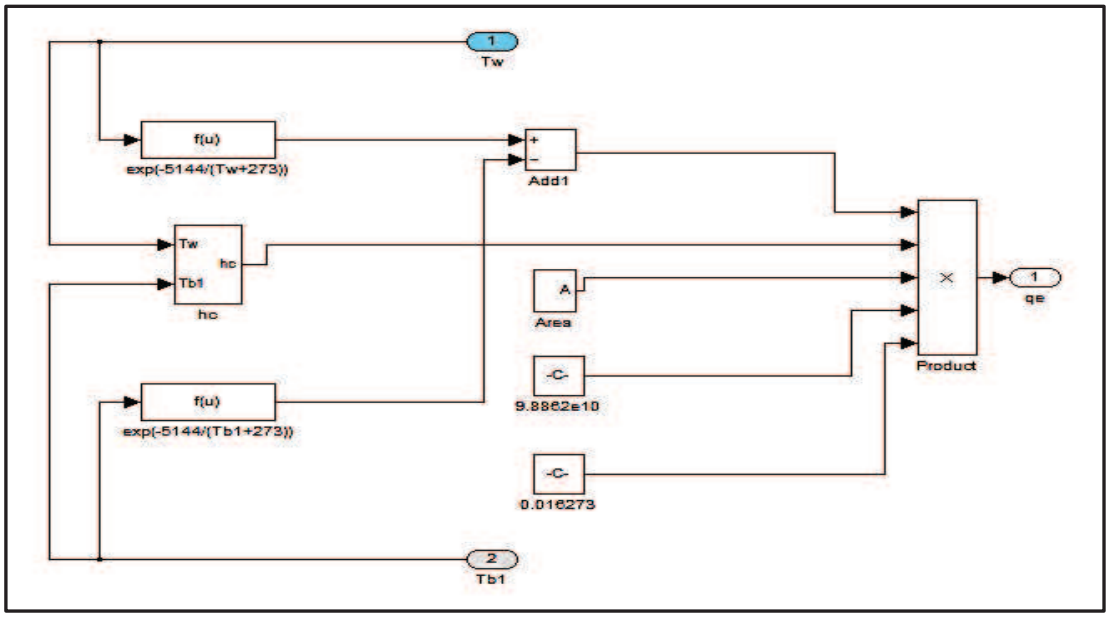
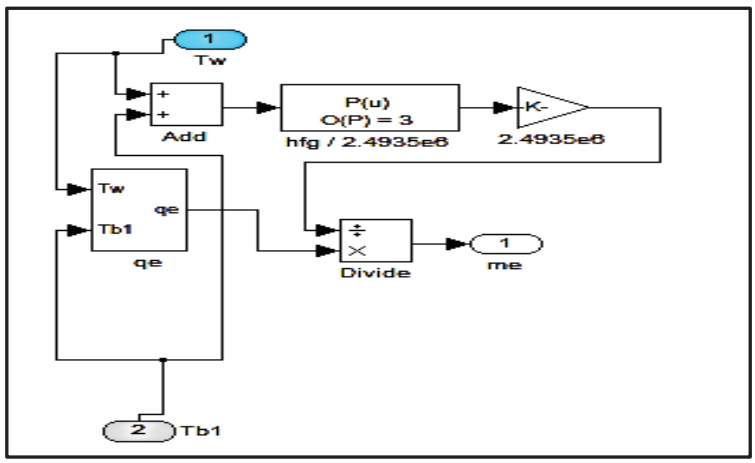


Figura 5.14 Sub-bloques para el cálculo de la masa de agua destilada producida, $\dot{m}_e$

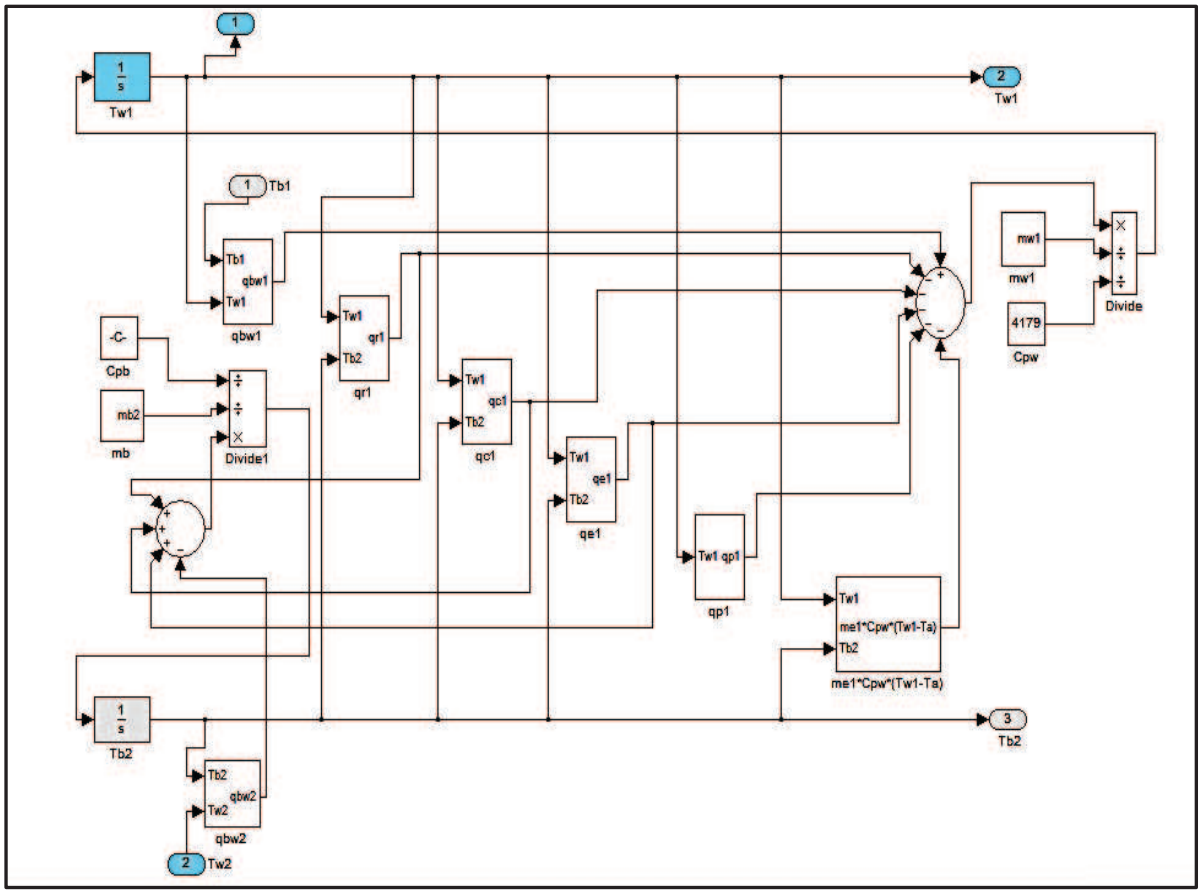


5.4.1.2. Bloque de simulación del Primer Depósito

Al igual que en el bloque anterior es necesario fijar la temperatura inicial del agua (**31.1°C**) y la temperatura ambiente promedio (**14.05 °C**). Los bloques de los flujos de calor y masa en el Primer depósito se muestran en la **Figura 5.15**, estos recrean por medio de operadores matemáticos a los balances de energía en el agua del Primer depósito y el fondo del Segundo depósito (**Ecuaciones 4.20** y **4.21**). Como es de esperar, los bloques para el cálculo de los flujos de calor y masa entre el agua y el fondo del Segundo depósito (q_{r1}, q_{c1} y q_{e1}) tienen la misma estructura que los bloques análogos del Depósito principal.

Al correr la simulación, el bloque del Primer depósito recibe como datos de entrada a la temperatura en el fondo de este compartimiento T_{b1}, a la temperatura del agua en el Segundo depósito (T_{w2}) y al flujo de calor entre el fondo y el agua del Segundo Depósito, q_{bw2}. Los datos de salida en función del tiempo son la temperatura del agua T_{w1}, la temperatura en el fondo del Segundo depósito T_{b2}, los flujos de calor hacia el Segundo depósito (q_{r1}, q_{c1} y q_{e1}), el calor perdido hacia el medio ambiente q_{p1}, el flujo de calor entre el fondo y el agua del Primer depósito (q_{bw1}) y la masa de agua destilada, $\dot{m}_{e1}$.

Figura 5.15 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Primer depósito



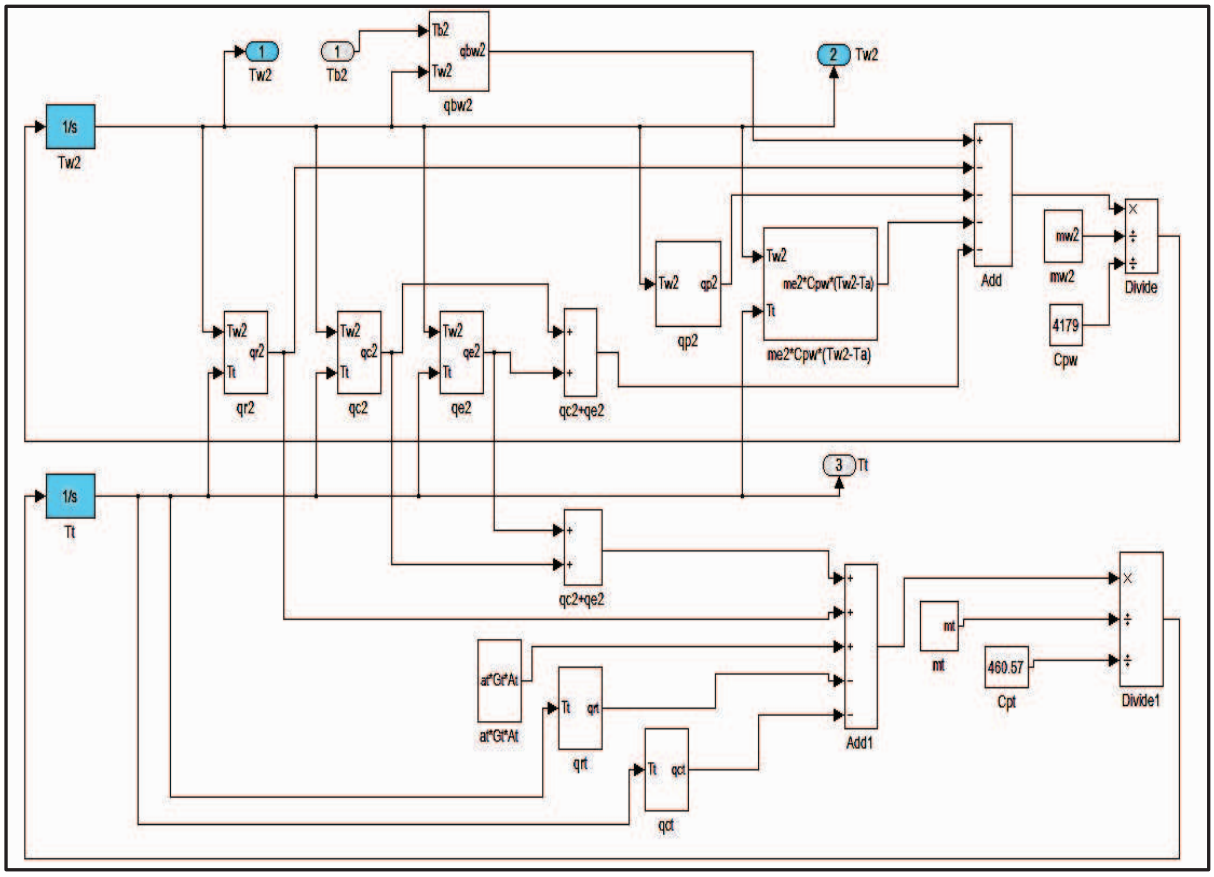
5.4.1.3. Bloque de simulación del Segundo Depósito

La temperatura inicial del agua se debe fijar en **26 °C** y la temperatura ambiente promedio en **14.05 °C**. Los bloques de los flujos de calor y masa en el Segundo depósito se indican en la **Figura 5.16**, estos recrean a los balances de energía en el agua del Segundo depósito y en su tapa o cubierta (**Ecuaciones 4.22** y **4.23**). El bloque del Segundo Depósito recibe como datos de entrada a la temperatura del fondo de este compartimiento (T_{b2}) y a la radiación solar absorbida por la cubierta ($\alpha_t \cdot G_t \cdot A_t$).

Los datos de salida en función del tiempo son la temperatura del agua T_{w2}, la temperatura de la cubierta T_t, el flujo de calor entre el fondo y el agua del Segundo Depósito q_{bw2}, los flujos de calor hacia la cubierta (q_{r2}, q_{c2} y q_{e2}), el calor perdido hacia el medio ambiente q_{p2}, el flujo de calor por convección entre la cubierta y el medio ambiente q_{ct}, el flujo de calor por radiación entre la cubierta y el cielo (q_{rt}) y la masa de agua destilada, $\dot{m}_{e2}$.

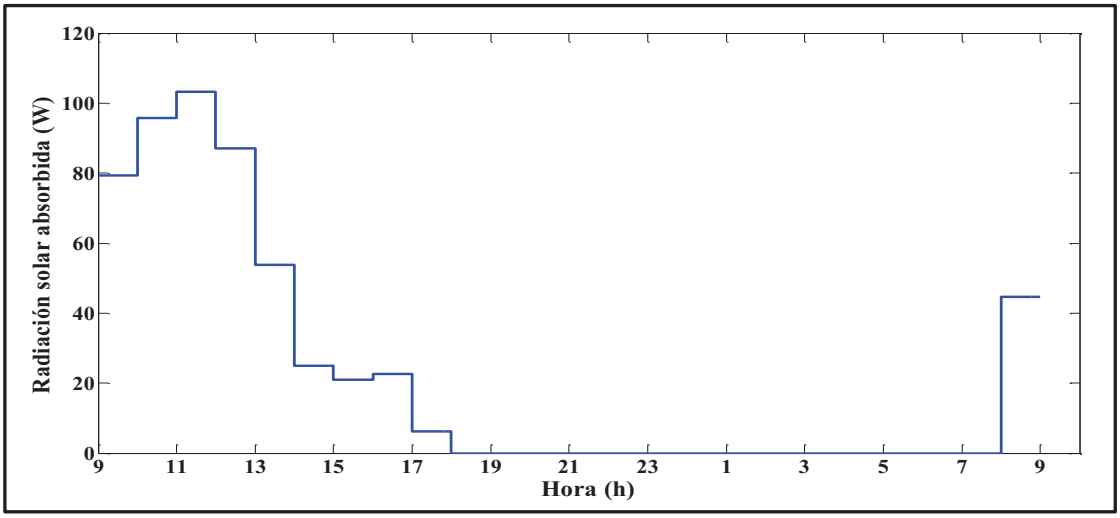
Es importante recordar que en el bloque de simulación este compartimiento, las constantes C_2 y n_2 del coeficiente de transferencia de calor por convección entre el agua y la cubierta (h_{c2}) serán iguales a las contantes C_1 y n_1 obtenidas experimentalmente para el Primer depósito.

Figura 5.16 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Segundo Depósito



La radiación solar absorbida por la cubierta del Segundo depósito ($\alpha_t \cdot G_t \cdot A_t$) se calcula directamente con los datos de radiación solar promedio sobre una superficie horizontal de la **Tabla 5.10**, pero considerando que desde las 6 AM hasta las 8 AM del día 23 de diciembre, la radiación es igual a cero. Los valores de $\alpha_t \cdot G_t \cdot A_t$ para cada intervalo de tiempo se ingresan a la simulación por medio de bloques Step.

Figura 5.17 Radiación absorbida por la cubierta del Segundo depósito en función del tiempo (22/12/2011)



Para calcular el flujo de calor por convección entre la cubierta del Segundo depósito y el medio ambiente (q_{ct}) es necesario conocer la velocidad del viento sobre la cubierta (v_t). En el **Anexo III** se presentan los datos de velocidad del viento del día 22 de diciembre de 2011 medidos a una altura de 2.4 metros sobre el suelo. Se promediaron estos valores para intervalos de tiempo en los cuales las magnitudes de velocidad eran similares; posteriormente, con la **Ecuación 4.77** se calcularon las velocidades del viento sobre la cubierta situada a 1.16 metros de altura. Esta información se introdujo a la simulación con bloques Step y se la multiplicó por los operados matemáticos y funciones que calculan q_{ct}.

Tabla 5.19 Velocidades promedio del viento a 2.4 metros de altura sobre el suelo y velocidades calculadas para la altura a la que se ubica la cubierta del Segundo depósito

22/12/2011		
Hora (h)	v_r **(m/s)**	v_t **(m/s)**
9:00-13:00	2.00	1.38
13:00-14:00	3.04	2.20
14:00-16:00	2.25	1.58
16:00-22:00	3.48	2.55
22:00-24:00	1.50	1.01
24:00-1:00	0.96	0.61
1:00-5:00	0.57	0.34
5:00-8:00	0.97	0.62
8:00-9:00	1.54	1.04

La estimación del flujo de calor por radiación entre la cubierta y el cielo (q_{rt}) requiere del conocimiento de la temperatura ambiente, T_a. Tomando en cuenta los periodos de tiempo en que la magnitud de T_a es similar, se promediaron sus valores a partir de las tablas del **Anexo III**. Existen dos formulaciones para calcular la temperatura del cielo, la **Ecuación 3.69** se utiliza con cielo despejado y la **Ecuación 3.70** en condiciones de cielo nublado. El día 22 de diciembre, el clima se mantuvo soleado desde las 9 AM hasta la 1 PM, permaneciendo parcial o completamente nublado el resto del tiempo. Por lo tanto, la primera ecuación se usará hasta la 1 PM y la segunda desde dicha hora en adelante.

Tabla 5.20 Valores de la temperatura ambiente promedio en el día 22 de diciembre

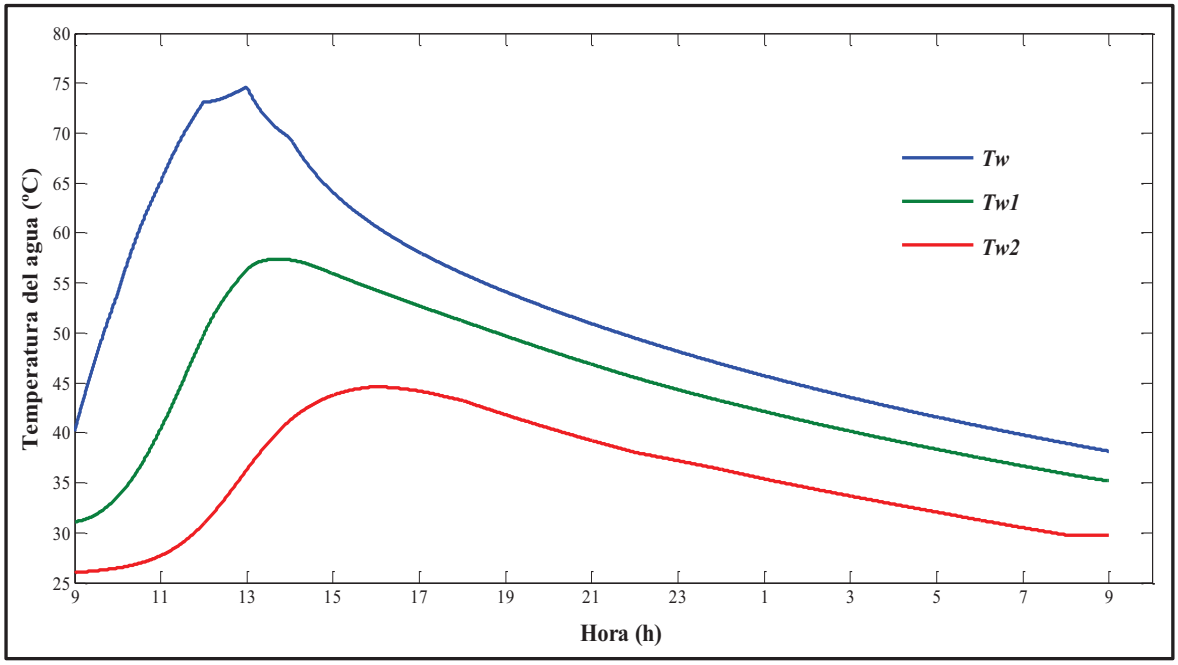
Hora (h)	T_a **(°C)**
9:00-11:00	17.6
11:00-16:00	19.6
16:00-18:00	17.2
18:00-24:00	13.3
24:00-6:00	9.6
6:00-8:00	9.6
8:00-9:00	13.0

5.4.2. RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN

Los parámetros que permiten evaluar y validar los resultados de la simulación son la temperatura del agua en cada etapa del desalinizador, la producción de agua destilada, el Coeficiente de Rendimiento (COP) y la Relación de Ganancia de Salida (GOR). Primero se mostrarán los resultados de la simulación y después se los comparará con los datos experimentales.

Los perfiles de temperatura en el agua de la Torre de destilación, correspondientes a la simulación del día 22 de diciembre de 2011 se muestran en la **Figura 5.18**. La máxima temperatura en el agua del Depósito principal es de aproximadamente 75 °C y se alcanza cerca de la 1 PM, a las 9 AM de la mañana siguiente, la temperatura se reduce a 38.2 °C. En el Primer depósito, la máxima temperatura es de 57.4 °C alrededor de las 2 PM, descendiendo a 35.2 °C a las 9 AM del día siguiente. La temperatura más alta en el Segundo depósito es de 44.6 °C a las 4 PM y disminuye a 29.7 °C a las 9 AM.

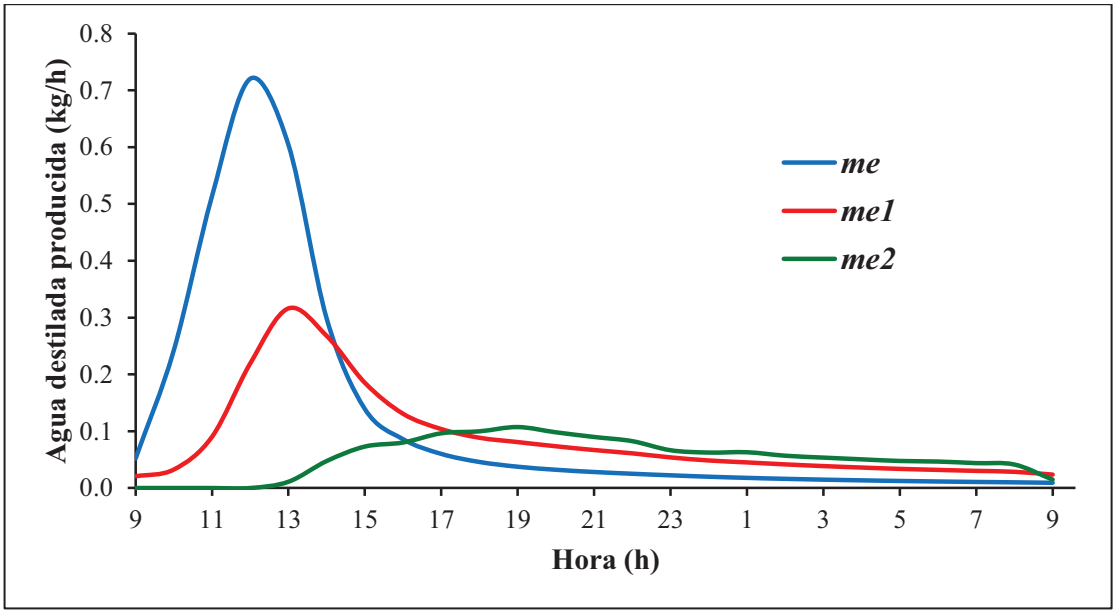
Figura 5.18 Perfiles de temperatura en el agua de la Torre de destilación durante un día de simulación (22/12/2011)



La producción de agua destilada en función del tiempo se indica en la **Figura 5.19**; de acuerdo a la simulación, la máxima producción de agua en el Depósito principal tiene lugar a medio día, con un valor de 0.72 kg/h. En el Primer depósito, la generación de agua alcanza su valor más alto a la 1 PM, con 0.316 kg/h.

La curva de producción en el Segundo depósito es mucho menos pronunciada, los niveles más altos se mantienen estables desde las 17 PM hasta las 22 PM, con un valor cercano a 0.09 kg/h.

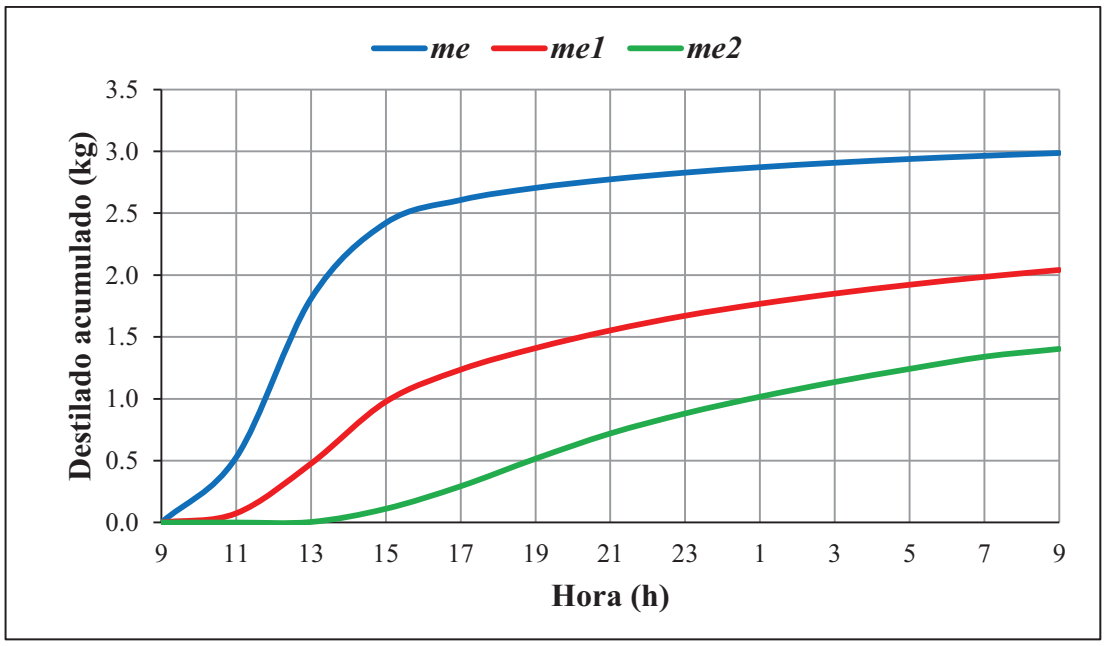
Figura 5.19 Producción de agua destilada en cada depósito del desalinizador durante un día de simulación (22/12/2011)



En la **Figura 5.20** se ilustran los resultados de la simulación referentes al destilado acumulado en el transcurso de un día (22/12/2011). La mayor parte de la producción de agua en el Depósito principal tiene lugar desde las 9 AM hasta las 5 PM. En el caso del Primer depósito, la generación de agua destilada inicia alrededor de las 11 AM y continúa hasta las 3 AM del día siguiente, obteniéndose muy poco líquido a partir de esa hora. En el Segundo depósito, la producción comienza aproximadamente a las 2 PM y termina casi totalmente a las 5 AM de la mañana siguiente.

Los resultados obtenidos con la simulación tienen validez únicamente si guardan una buena concordancia con los datos experimentales. Sin embargo, es preciso tener en cuenta el error al calcular la energía útil entregada por el colector solar. Si este es significativo, los resultados de la simulación diferirán bastante de los experimentales, aunque esta se haya realizado correctamente. Por tal circunstancia, de existir una variación muy grande entre los datos de la simulación y los experimentales, deberán también revisarse las ecuaciones y parámetros para el cálculo de la energía entregada por el colector.

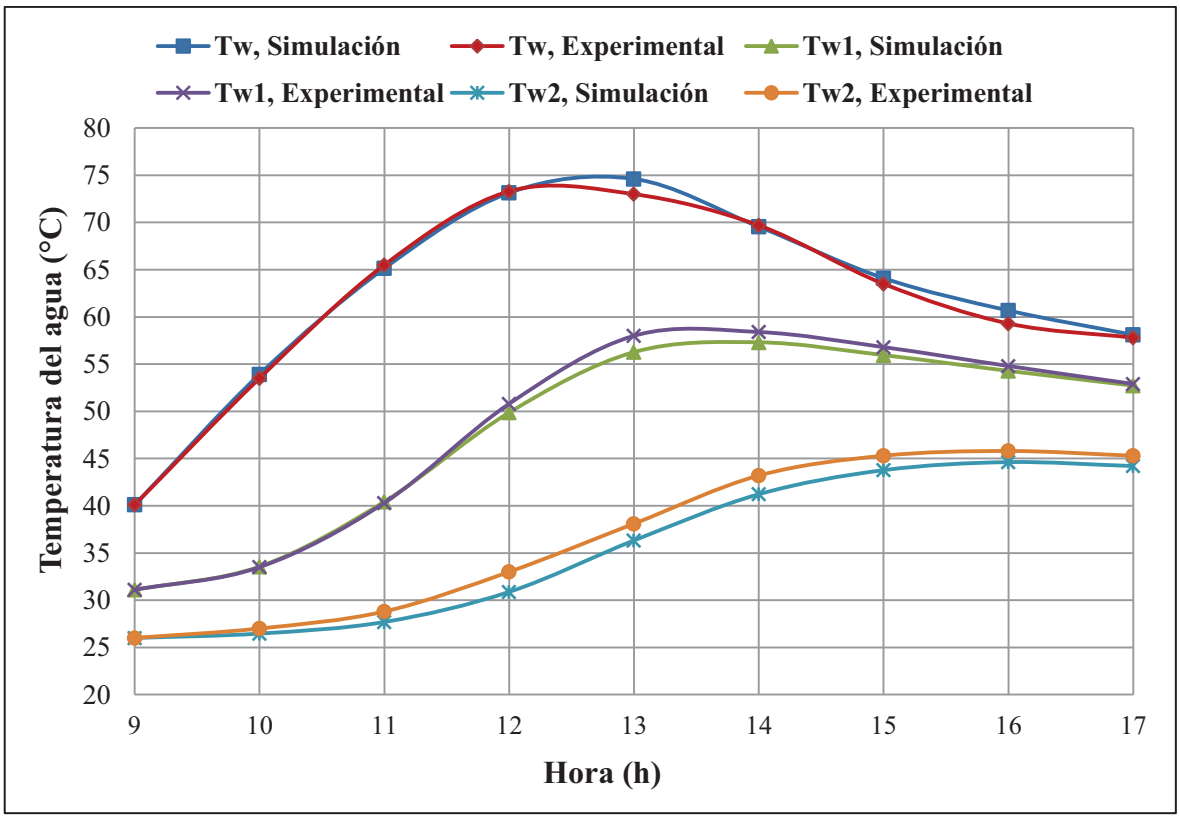
Figura 5.20 Producción acumulada de agua destilada en el transcurso de un día de simulación (22/12/2011)



En la **Figura 5.21** se compara la temperatura del agua medida en cada depósito con las temperaturas suministradas por la simulación. Debido a que las mediciones sólo se podían efectuar hasta las 5 PM, la figura muestra los perfiles de temperatura desde las 9 AM hasta las 5 PM del día 22 de diciembre de 2011. En el Depósito principal, la concordancia es muy buena entre los valores experimentales y las temperaturas de la simulación, con una variación máxima de 1.6 °C. Algo similar ocurre en el Primer depósito, donde la mayor diferencia de temperatura es de 1.7 °C.

En relación a los otros dos compartimientos, la correspondencia entra las temperaturas del Segundo depósito no es tan buena, manteniéndose durante casi todo el tiempo una diferencia próxima a los 1.5 °C. Esta situación posiblemente se debe a que en el bloque de simulación de este compartimiento se usaron las constantes C_1 y n_1 que fueron determinadas experimentalmente para el Primer depósito, donde las temperaturas son mayores; y como se explicó en la **Sección 3.7.2.3**, el valor de estas constantes también está influenciado por la temperatura del agua.

Figura 5.21 Comparación entre la temperatura del agua medida en cada depósito y las temperaturas suministradas por la simulación (22/12/2011)



Para cada etapa del desalinizador, la **Figura 5.22** compara el destilado acumulado real con el calculado por la simulación. En el Depósito principal y el Primer depósito, los valores medidos y los datos estimados tienen una muy buena concordancia. En la **Tabla 5.21** se indica que hasta las 5 PM, los errores entre los datos de la simulación y los experimentales eran del 3 y el -3.4 % para el Depósito principal y el Primer depósito, respectivamente. No obstante, en esta misma tabla se expone que a las 9 AM de la mañana siguiente, los errores aumentaron al 12 y 5 %.

A pesar de que en la predicción de los fenómenos de transferencia de calor y masa, una variación del 12 % entre los valores reales y los estimados se considera una buena aproximación; llama un poco la atención, especialmente en el Depósito principal, que el error aumenta mucho entre las 5 PM y las 9 AM. Esto probablemente sucede porque las constantes C, n, C_1 y n_1 se obtuvieron con información recolectada hasta las 5 PM, donde la concordancia es óptima; pero a partir de esta hora, las temperaturas del agua son más bajas, y la simulación sobrestima los flujos de calor por convección y evaporación.

En el Segundo depósito ocurre lo contrario, entre las 9 AM y las 5 PM, la diferencia es relativamente grande entre los valores medidos y los proporcionados por la simulación, con un error de -12.3 % a las 5 PM. Durante la noche, cuando la temperatura del agua desciende y además se facilita la transferencia de calor desde la cubierta hacia el medio ambiente, la simulación tiende a sobrestimar la generación de agua, compensando el error inicial, que a las 9 AM del día siguiente es de tan sólo el 3.3 % (ver la **Tabla 5.21**). El incremento de la variación entre los datos de la simulación y los experimentales desde las 9 AM hasta las 5 PM, podría explicarse por el uso de las constantes C_1 y n_1 en el bloque de simulación de este depósito, y también por el hecho de que en ese intervalo de tiempo la producción es baja.

Los resultados de la simulación sugieren la obtención de las constantes C, n, C_1 y n_1 en horarios determinados que tomen en consideración los rangos de temperatura de operación del destilador solar. Por ejemplo, para el Primer depósito hubiese sido más conveniente la evaluación de las constantes en dos horarios: desde las 10 AM hasta las 17 PM y desde las 17 PM hasta las 12 AM. No obstante, la baja producción en la noche, supondría dificultades al momento de medir la masa de líquido que se genera cada hora.

Figura 5.22 Comparación entre el destilado acumulado medido en cada depósito y los destilados acumulados obtenidos con la simulación (22/12/2011)

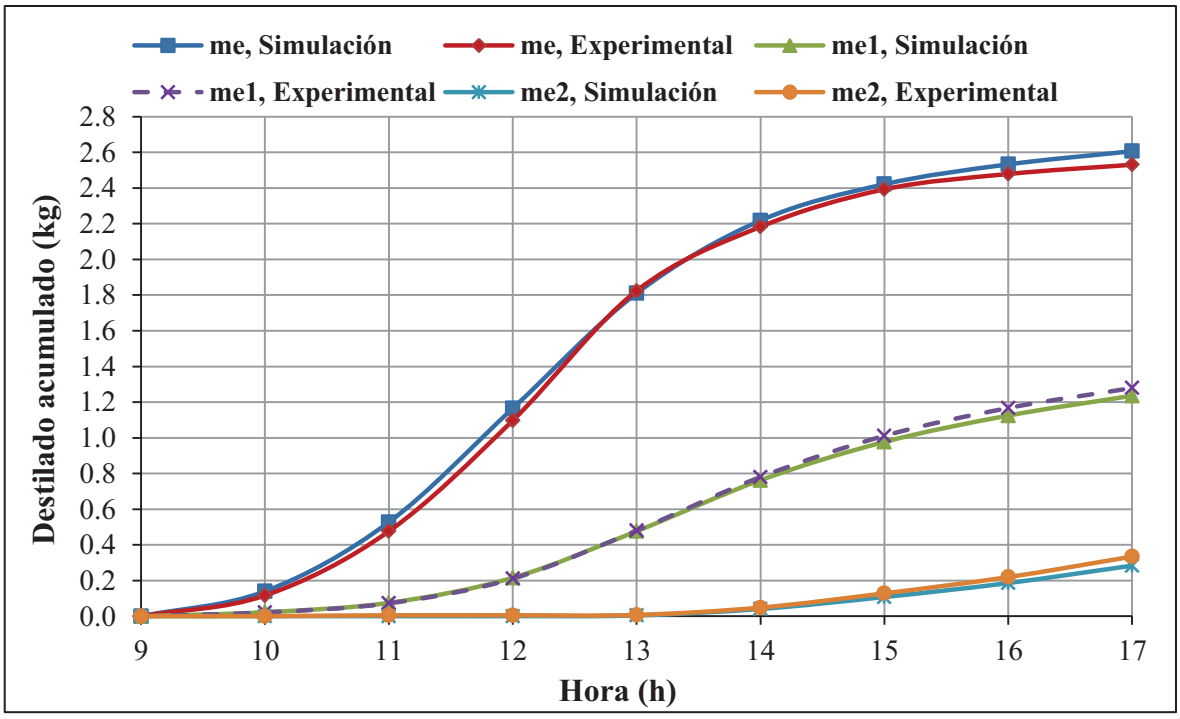


Tabla 5.21 Destilado acumulado en cada depósito: Comparación entre los valores de la simulación y los experimentales (22/12/2011)

Depósito principal			
Hora (h)	**Simulación m_e (kg)**	**Experimental m_e (kg)**	**Error (%)**
17:00	2.607	2.531	3.0
9:00	2.986	2.665	12.0
Primer depósito			
Hora (h)	**Simulación m_{e1} (kg)**	**Experimental m_{e1} (kg)**	**Error (%)**
17:00	1.236	1.279	-3.4
9:00	2.041	1.944	5.0
Segundo depósito			
Hora (h)	**Simulación m_{e2} (kg)**	**Experimental m_{e2} (kg)**	**Error (%)**
17:00	0.293	0.334	-12.3
9:00	1.403	1.358	3.3

La producción total del desalinizador solar en el día 22 de diciembre de 2011 fue de **5.967 kg** de agua. Conforme a la **Tabla 5.21**, el destilado total calculado por la simulación para esta misma fecha fue de **6.43 kg**. Al comparar ambas cifras, existe un error del 7.7 %; esta es una buena aproximación, más aun considerando la incertidumbre al estimar la energía entregada por el colector solar. Con los resultados de la simulación y las **Ecuaciones 3.1** y **5.9** se calculó el Coeficiente de Rendimiento (COP) y la Relación de Ganancia de Salida (GOR):

$$\mathrm{COP}_{\text{simulación}} = \frac{6.43\ \text{kg}}{2.986\ \text{kg}} = 2.15$$

$$\mathrm{GOR}_{\text{simulación}} = \frac{6.43 \cdot 2390 \times 10^3}{3031.779 \cdot 3600} = 1.4$$

El COP y el GOR (experimentales) calculados para el día 22 de diciembre son iguales a 2.24 y 1.3, respectivamente. De las **Tablas 5.9** y **5.16** se tiene que los valores promedio del COP y el GOR son 2.17 y 1.24. La correspondencia entre los resultados de la simulación y los datos experimentales es satisfactoria; sin embargo, sería más aconsejable realizar la simulación de dos días de funcionamiento del prototipo, y así garantizar totalmente su validez.

Si se toma en cuenta el efecto de la salinidad del agua (ver la **Sección 5.3.3.1**), los nuevos valores del COP y el GOR son:

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{simulación}} = 1.72;\ \mathrm{GOR}_{\mathrm{simulación}} = 1.12$$

$$\mathrm{COP}_{\mathrm{experimental}} = 1.74;\ \mathrm{GOR}_{\mathrm{experimental}} = 1$$

En la **Figura 5.23** se ilustra la radiación media diaria mensual en la ciudad de Quito y la producción diaria de agua en todos los meses del año. La gráfica se elaboró con los datos de radiación solar de la **Tabla 2.6** y el valor del GOR, tanto experimental como el obtenido con la simulación. El destilado diario en cada mes oscila entre los 4 y 4.5 kg, producción relativamente baja, tan sólo un poco superior a la de un destilador solar de estanque convencional. A pesar de que el volumen generado no es muy grande, este cumple con el objetivo de construir un desalinizador solar térmico con una capacidad diaria promedio de 4 litros.

No es muy conveniente aplicar los valores experimentales y teóricos del GOR para estimar la producción diaria de agua en la Costa del Ecuador y las islas Galápagos, pues las pruebas al destilador se efectuaron en Quito y la simulación también se realizó teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas de esta ciudad, donde la presión atmosférica y la temperatura ambiente son menores. La primera característica tiene el efecto de aumentar un poco la producción de agua, mientras que la segunda, reduce la eficiencia del colector solar y, por ende también, el rendimiento del desalinizador.

Con estas aclaraciones, y únicamente como una referencia, la **Figura 5.24** indica la radiación solar y la producción que tendría el destilador en la isla San Cristóbal[12] de Galápagos. En este lugar, la generación diaria de agua en cada mes se aproxima también a los 4.5 litros.

[12] De entre las dos islas más pobladas de Galápagos, San Cristóbal presenta los niveles de radiación más favorables para el desarrollo de la desalinización solar térmica.

Figura 5.23 Estimación de la producción diaria del desalinizador solar en todos los meses del año (Ciudad de Quito)

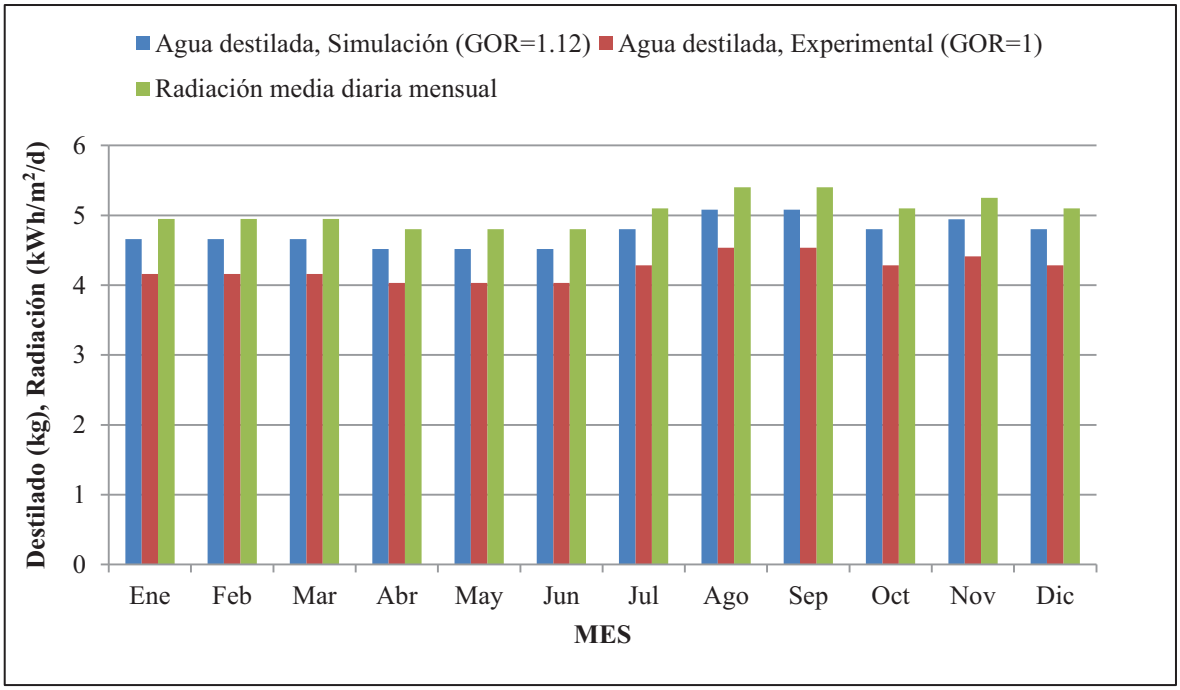
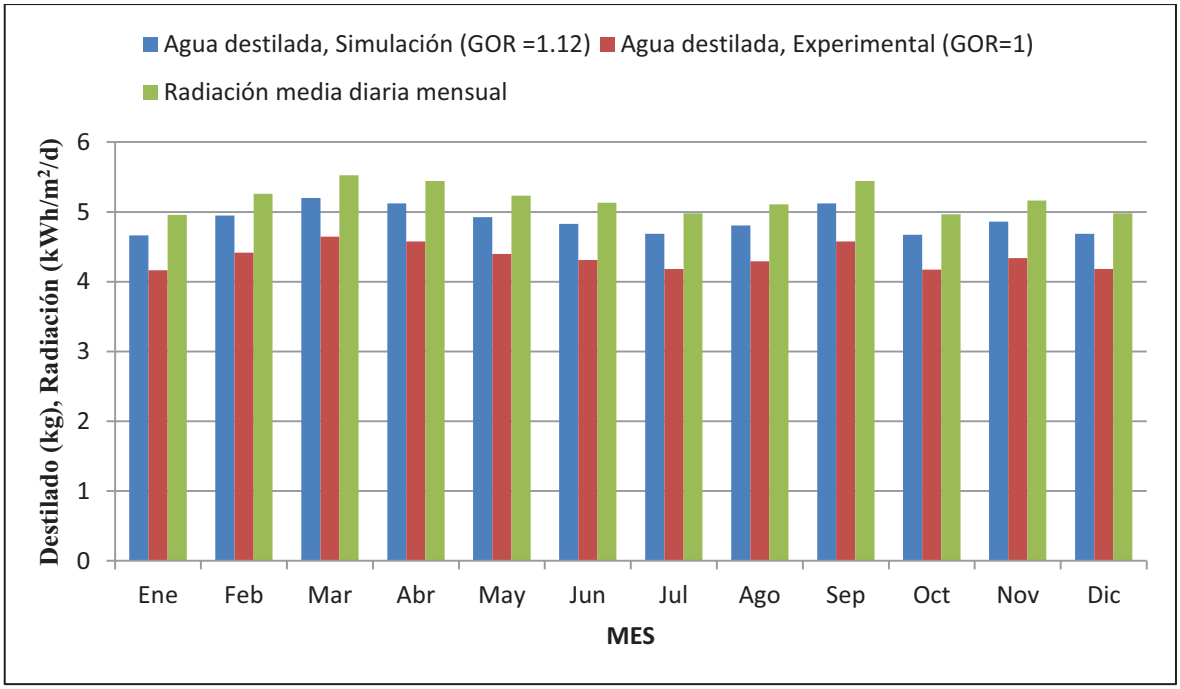


Figura 5.24 Estimación de la producción diaria del desalinizador solar en todos los meses del año (Isla San Cristóbal)



5.4.3. SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR EMPLEANDO LAS CONSTANTES PROPUESTAS POR DUNKLE ($C = 0.075$ y $n = 1/3$)

En comparación al uso de las contantes propuestas por Dunkle, la evaluación experimental de C, n, C_1 y n_1 mejora considerablemente la exactitud al momento de predecir la producción del desalinizador. No obstante, esta afirmación se comprobó únicamente al calcular la masa de agua destilada, con el conocimiento de la temperatura promedio del agua y de la superficie de condensación en los dos primeros depósitos del prototipo (ver la **Sección 5.3.1.1**), mas no en la simulación del mismo. Por tal motivo, la simulación computacional se ejecutará con los valores de $C =$ 0.075 y $n =$ 1/3 en los tres compartimientos del destilador; y los resultados se compararán con los obtenidos al usar las constantes evaluadas experimentalmente.

Tabla 5.22 Producción de agua en cada depósito del desalinizador: Comparación entre los resultados de la simulación usando las constantes propuestas por Dunkle y las evaluadas experimentalmente

Depósitos del desalinizador	m_e (kg) Experimental	$C = 0.075$ y $n = 1/3$		Const. evaluadas experimentalmente	
		m_e (kg) Simulación	Error (%)	m_e (kg) Simulación	Error (%)
Principal	2.665	2.806	5.3	2.986	12.0
Primero	1.944	1.754	-9.8	2.041	5.0
Segundo	1.358	1.095	-19.4	1.403	3.3
Total	**5.967**	**5.655**	**-5.2**	**6.430**	**7.76**

La **Tabla 5.22** muestra que la simulación corrige significativamente el error cuando se utilizan las constantes propuestos por Dunkle. La única excepción se presenta en el Segundo depósito, donde la variación entre los datos de la simulación y los experimentales es del -19.4 %. Estos resultados sugieren, por los menos para las características del prototipo construido[13], que no es indispensable la obtención experimental de estas constantes al predecir el desempeño del desalinizador mediante una simulación.

[13] Superficies de condensación de una sola pendiente y distancia relativamente grande entre estas y las superficies de evaporación.

5.5. ANÁLISIS DE MEJORAS AL DESALINIZADOR MEDIANTE SIMULACIÓN

Habiéndose comprobado la validez de la simulación, variantes de la misma se utilizarán para analizar el efecto de modificaciones en el desalinizador que permitan mejorar su desempeño; estas son:

- Aumento del número de etapas en la Torre de destilación
- Reducción de la cantidad de agua en el Depósito principal
- Disminución de la distancia entre las superficies de evaporación y condensación
- Remplazo del colector solar plano por uno de tubos al vacío

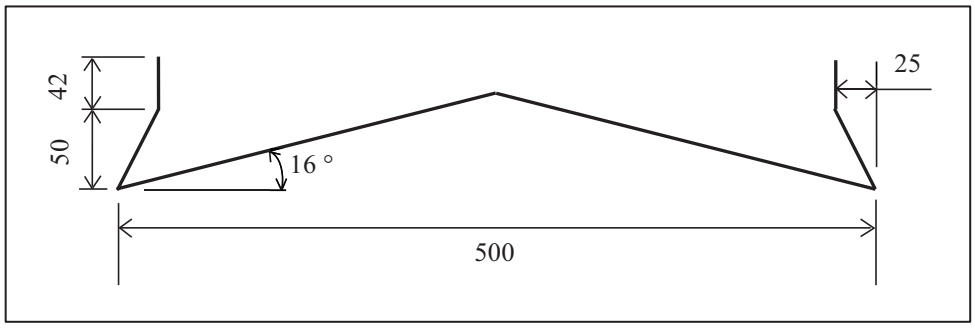
Inicialmente, se analizarán las tres primeras modificaciones con el colector solar plano acoplado a la Torre de destilación, después se hará lo mismo, pero suponiendo el uso de un colector de tubos al vacío. En ambos casos, las simulaciones corresponderán al día 22 de diciembre de 2011.

5.5.1. SIMULACIÓN CON COLECTOR SOLAR PLANO

5.5.1.1. Dimensiones y forma de los depósitos en la Torre de destilación

La distancia entre la superficie de evaporación y de condensación en cada etapa del desalinizador es de **15.5 cm** (ver la **Tabla 5.18**). Esta dimensión se puede reducir al remplazar la forma de los depósitos por una V invertida. Con este cambio, también disminuye la cantidad de agua en los compartimientos y el material utilizado en su construcción. En la **Figura 5.25** se muestra la sección transversal de uno de los depósitos con sus dimensiones en milímetros; el hecho de que las paredes anterior y posterior de los compartimientos se inclinen hacia dentro, dejando un espacio sin agua, permite que allí se ubiquen los canales de recolección del destilado, posibilitando que la mencionada distancia disminuya hasta los **5.6 cm**, casi tres veces menos que su valor original.

Figura 5.25 Sección transversal de los depósitos con forma de V invertida



Los nuevos parámetros requeridos para la simulación del desalinizador de múltiples etapas con colector plano se presentan en la siguiente tabla:

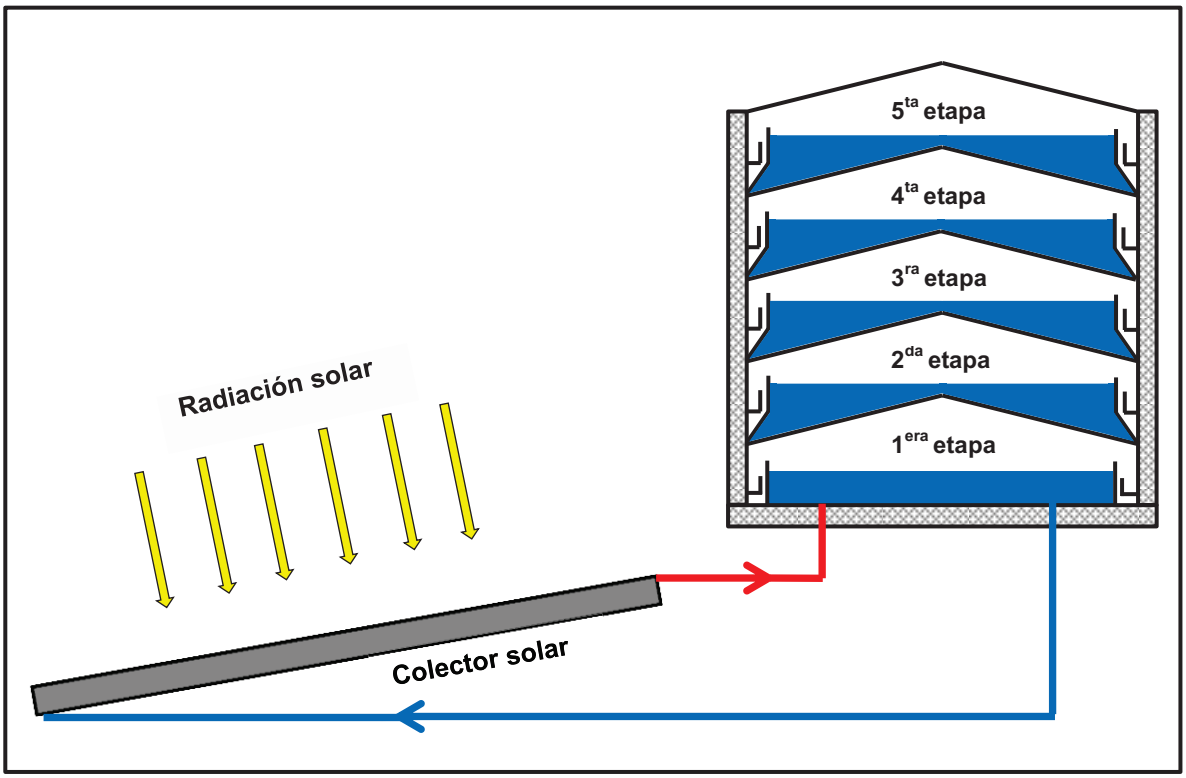
Tabla 5.23 Nuevas constantes empleadas en la simulación del Desalinizador solar de múltiples etapas con colector plano

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Área de la superficie libre del agua en los depósitos	A_{wn}	0.334	m^2
Área de la base del Depósito principal	A_f	0.371	m^2
Área del fondo de los depósitos	A_{bn}	0.386	m^2
Masa de agua en el Depósito principal	m_w	13.36	kg
Masa de agua en el resto de Depósitos	m_{wn}	14.952	kg
Área de la cubierta de la Torre de destilación	A_t	0.386	m^2
Área de las paredes del Depósito principal	A_s	0.185	m^2
Área de las paredes del resto de compartimientos	A_{sn}	0.2533	m^2
Distancia entre la superficie de evaporación y condensación en cada compartimiento	x_n	0.056	m

5.5.1.2. Número de etapas en la Torre de destilación

K. Schwarzer et al. **[40]** afirman que el número óptimo de etapas en la Torre de destilación varía entre 5 y 7; por medio de la simulación se determinará cuál de estos números es el más conveniente. En la **Figura 5.26** se observa el esquema del destilador solar de 5 etapas con colector plano. Es notorio en relación al equipo construido, que el volumen de agua en los compartimientos y la separación entre estos se reducen considerablemente (ver la **Figura 4.8**).

Figura 5.26 Desalinizador solar de 5 etapas con colector plano



5.5.1.3. Energía entregada por el colector solar y temperatura inicial del agua en los depósitos

Puesto que se conocían las temperaturas del agua cuando se analizó el funcionamiento del destilador de 3 etapas, el calculó de la energía suministrada por el colector (Q_u) se llevó a cabo en una hoja de Microsoft Excel. No obstante, debido a que las características del aparato serán diferentes, dichos cómputos ya no son válidos; siendo necesario que se estime Q_u por medio de la simulación.

Los bloques de simulación de Q_u se exponen en la **Figura 5.27** y los sub-bloques del coeficiente total de pérdidas del colector (U_L) se ilustran en el **Anexo VI.** Para verificar su validez, la simulación que incorpora el cálculo de Q_u se realizó primero con el prototipo de 3 etapas, obteniéndose: $Q_{u,total} = 3038.6$ Wh, $m_e = 2.997$ kg, $m_{e1} = 2.053$ kg y $m_{e2} = 1.408$ kg.

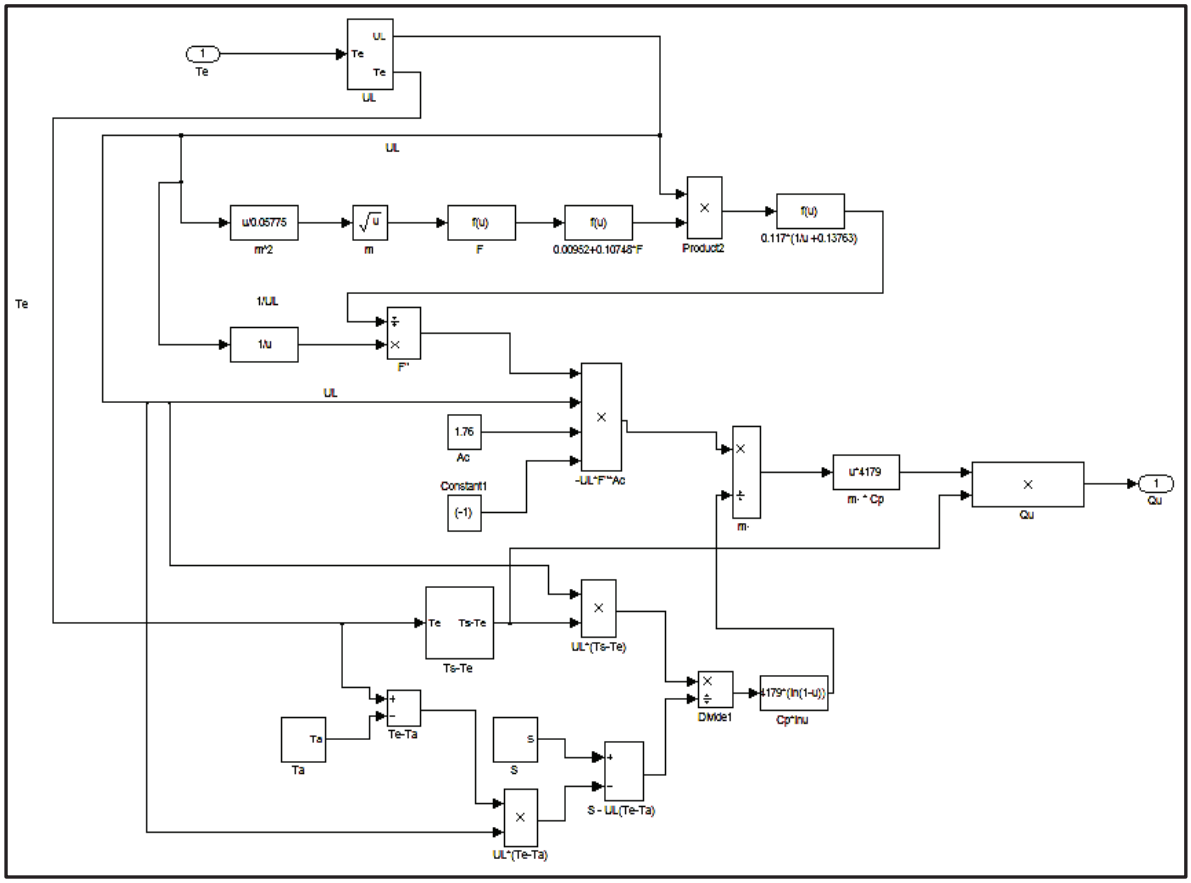
Con la primera simulación (ver la **Tabla 5.21**) y calculando Q_u en una hoja de Excel se obtuvieron: $Q_{u,total} = 3031.779$ Wh, $m_e = 2.986$ kg, $m_{e1} = 2.041$ kg y $m_{e2} = 1.403$ kg. Ambos resultados son muy similares, este es un indicativo de que a través de la simulación, la predicción de Q_u es confiable.

La elección correcta de la temperatura inicial del agua en cada depósito es un factor importante, del que depende en buen grado la exactitud de la simulación. En el prototipo que fue probado, las temperaturas a las 9 AM del día 22 de diciembre de 2011 fueron: T_w = 40.1 °C, T_{w1} = 31.1°C y T_{w2} = 26 °C; advirtiéndose una reducción de alrededor del 20 % entre cada una. Cabe mencionarse, que en los demás días de observación, las temperaturas a esta misma hora se mantuvieron en valores semejantes; es entonces razonable asumir que la variación de temperatura entre cada compartimiento tiende a ser constante.

Con una disminución del 10 % y conservando los extremos de 40.1 y 26 °C, las temperaturas del desalinizador de 5 etapas al inicio de la simulación serán: T_w = 40.1 °C, T_{w1} = 36.1 °C, T_{w2} = 32.5 °C, T_{w3} = 29.3 °C y T_{w4} = 26 °C.

Para el caso de 7 etapas, las temperaturas iniciales serán: T_w = 40.1 °C, T_{w1} = 37.3 °C, T_{w2} = 34.7 °C, T_{w3} = 32.3 °C, T_{w4} = 30 °C, T_{w5} = 27.9 °C y T_{w6} = 26 °C; con una variación del 7 % entre cada una.

Figura 5.27 Bloques de simulación de la energía entregada por el colector solar, Q_u



5.5.1.4. Selección de las constantes C_i y n_i

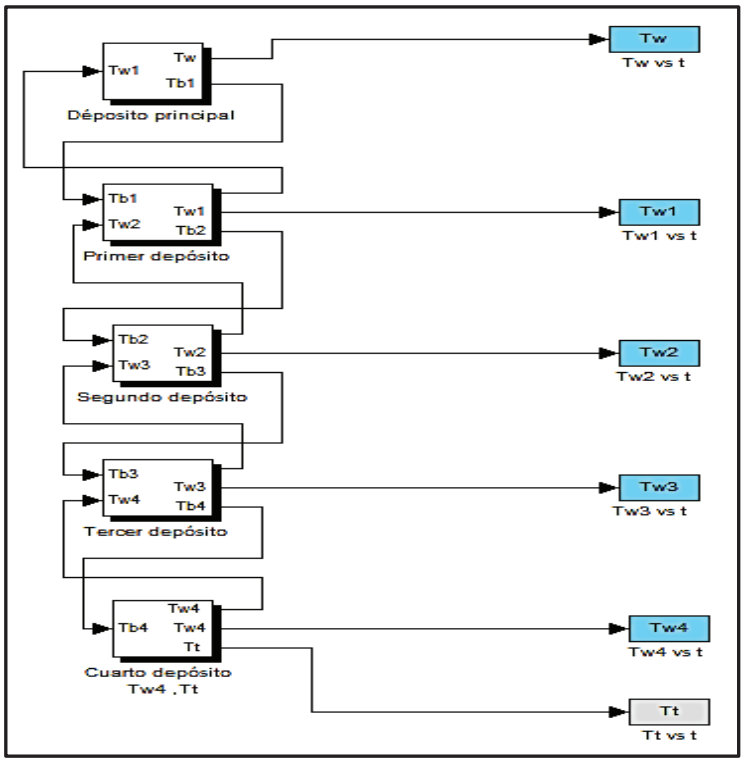
Como ya se mencionó, cuando disminuye la distancia entre las superficies de evaporación y condensación en un sistema de destilación, aumenta la generación de agua. Sin embargo, si las constantes usadas por Dunkle y las evaluadas experimentalmente son aplicadas en una simulación donde se ha reducido considerablemente esta distancia, ocurrirá lo contrario[14]. Este efecto es más notorio con el modelo de Dunkle, que en general tiende a subestimar la producción de agua (ver la **Sección 5.4.3**). Por tal motivo, se utilizarán las constantes obtenidas experimentalmente para el prototipo de 3 etapas, estas son:

Depósito Principal, $C = 0.0273$ y $n = 0.4156$

Compartimentos restantes, $C_i = 0.07056$ y $n_i = 0.3615$

En la **Figura 5.28** se aprecia la ventana principal del programa de simulación del desalinizador de 5 etapas, los bloques y sub-bloques de cada depósito son en esencia iguales a los del equipo construido, únicamente se diferencian por los parámetros de la **Tabla 5.23**.

Figura 5.28 Ventana principal del programa de simulación del desalinizador de 5 etapas



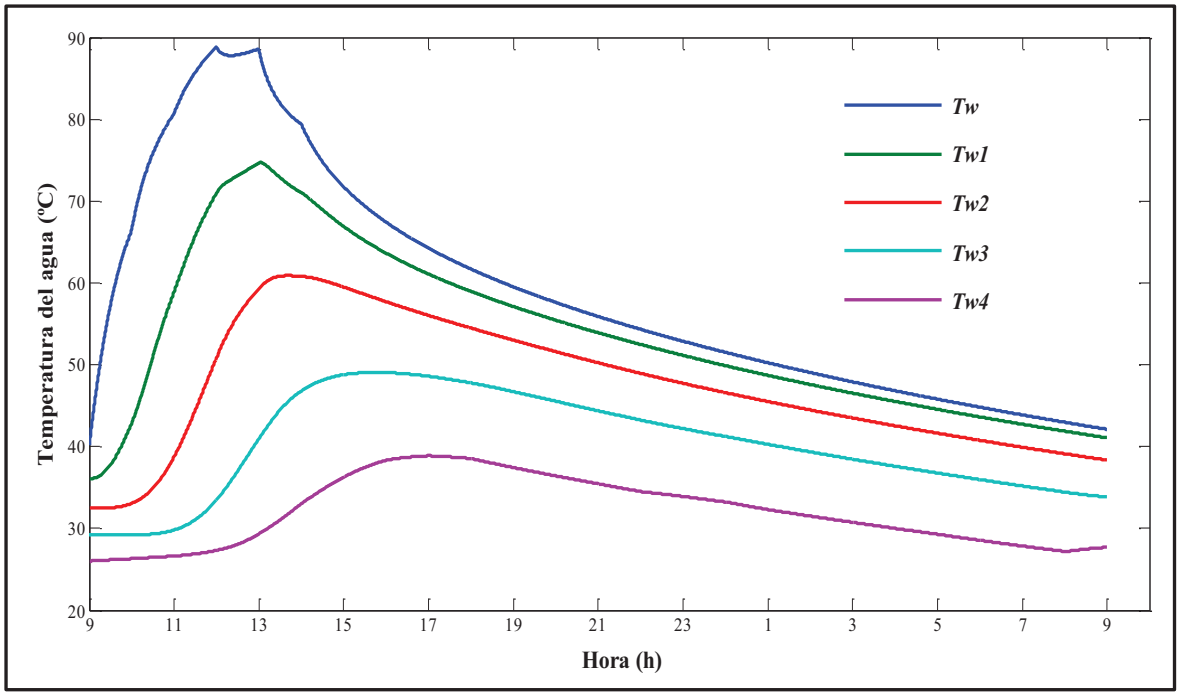
[14] Este fenómeno no tendrá una influencia significativa en la exactitud de la simulación, pues la misma corregirá en gran medida cualquier error generado.

5.5.1.5. Resultados de la Simulación

a) Desalinizador de 5 etapas

Los perfiles de temperatura del desalinizador de 5 etapas se muestran en la **Figura 5.29**, estos corresponden a la simulación del día 22 de diciembre de 2011. La gráfica es similar a la del prototipo de 3 etapas, pero con una diferencia menor de temperatura entre cada depósito. Además, la reducción de agua en los compartimientos permite que las temperaturas sean mayores; por ejemplo, en el Depósito principal se alcanzan casi los 90 °C.

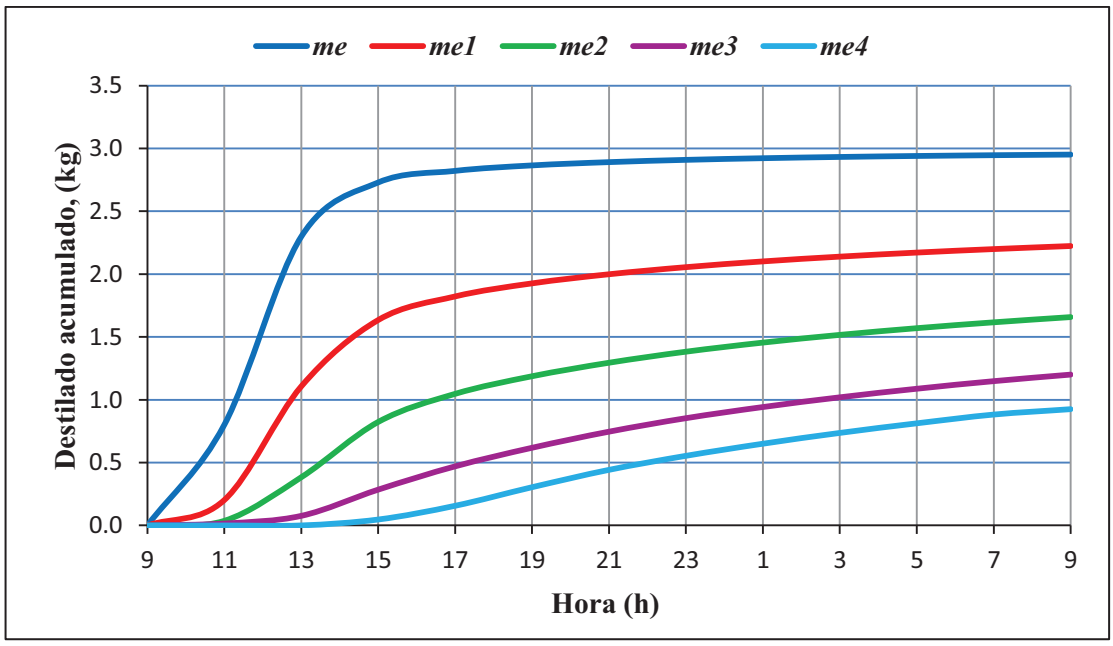
Figura 5.29 Perfiles de temperatura de la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector plano (22/12/2011)



En La **Figura 5.30** se visualiza el destilado acumulado en el desalinizador de 5 etapas. La producción total aumento bastante; sin embargo, pese a que el volumen de líquido en el Depósito principal se redujo a menos de la mitad, la masa de agua destilada generada por este compartimiento no se incrementó. Las posibles causas de este fenómeno son:

- Disminución de la eficiencia del colector originada por la elevada temperatura del agua.
- Aumento de la resistencia térmica en la Torre de destilación al pasar de 3 a 5 etapas.

Figura 5.30 Producción acumulada de agua en el desalinizador de 5 etapas con colector plano, simulación de un día de operación (22/12/2011)



La energía entregada por el colector y el agua generada en cada depósito son iguales a: $Q_{u,total}$ = 2745.1 Wh, m_e = 2.959 kg, m_{e1} = 2.21 kg, m_{e2} = 1.607 kg, m_{e3} = 1.168 kg, m_{e4} = 0.905 kg y $\sum m_{ei}$ = **8.85 kg**.

El Coeficiente de Rendimiento (COP) y la Relación de Ganancia de Salida (GOR) son:

$$\mathrm{COP}_{\text{simulación,5}} = \frac{8.85\ \text{kg}}{2.959\ \text{kg}} = 3$$

$$\mathrm{GOR}_{\text{simulación,5}} = \frac{8.85 \cdot 2390 \times 10^3}{2745.1 \cdot 3600} = 2.14$$

Para el prototipo de 3 etapas se obtuvo:

$$Q_{u,total} = 3031.779\ \text{Wh},\ m_e = 2.986\ \text{kg}\ \text{ y } \sum m_{ei} = 6.43\ \text{kg}$$

$$\mathrm{COP}_{\text{simulación,3}} = 2.15 \text{ y } \mathrm{GOR}_{\text{simulación,3}} = 1.4$$

Tomando en cuenta la salinidad del agua, los nuevos valores de producción, COP y GOR son:

$$\sum m_{ei} = \mathbf{7.08\ kg},\ \mathrm{COP}_{\text{simulación,5}} = 2.4 \text{ y } \mathrm{GOR}_{\text{simulación,5}} = 1.71$$

Con las modificaciones realizadas, la producción total de agua, el COP y el GOR aumentaron un 38, 40 y 50 %, respectivamente; esto representa una mejora notable en el desempeño del desalinizador. No obstante, las altas temperaturas en el Depósito principal provocaron que la eficiencia del colector descienda al 28.7 %.

b) Desalinizador de 7 etapas

Los resultados de la simulación fueron poco satisfactorios, en consecuencia no se mostrarán las gráficas de temperatura y destilado acumulado, tan sólo se indicarán la energía suministrada por el colector y el destilado generado en los depósitos:

$$Q_{u,total} = 2736 \text{ Wh},\ m_e = 2.908 \text{ kg},\ m_{e1} = 2.128 \text{ kg},\ m_{e2} = 1.493 \text{ kg}$$

$$m_{e3} = 1.005 \text{ kg},\ m_{e4} = 0.662 \text{ kg},\ m_{e5} = 0.458 \text{ kg},\ m_{e6} = 0.39 \text{ kg y } \sum m_{ei} = \mathbf{9.044\ kg}$$

Al pasar de 5 a 7 etapas, el incremento de producción es mínimo; por lo tanto, para las características del equipo simulado, el número óptimo de etapas en la Torre de destilación es de 5.

5.5.2. SIMULACIÓN CON COLECTOR SOLAR DE TUBOS AL VACÍO

La baja eficiencia de un colector plano, especialmente a elevadas temperaturas y condiciones de cielo nublado, puede corregirse con el uso de un colector de tubos al vacío. Las particularidades del proceso de destilación del agua salina determinan que el tipo de panel a emplearse sea uno de tubos caloricos (ver la **Sección 2.12.2.2.2**), pues únicamente el extremo en forma de bulbo que estos poseen entra en contacto con el agua, facilitando su limpieza. En China se fabrican colectores con tubos de calor completamente de vidrio (all glass heat pipe), propiedad que permitiría el funcionamiento del colector con agua salina, sin más cuidado que la limpieza de los bulbos.

La ubicación geográfica del Ecuador es una ventaja en cuanto a la utilización de colectores con tubos de calor. En otras latitudes[15], si se desea duplicar la generación de agua en un desalinizador solar que opera con tubos al vacío, necesariamente tendría que construirse otro aparato o ampliar el tamaño del existente, con las dificultades que esto conlleva.

[15] Especialmente en latitudes mayores a 20 ° norte o sur

En el país, los paneles solares planos y de tubos al vacío pueden disponerse con una orientación Sur o Norte; de modo que para duplicar la producción del mismo desalinizador solar, simplemente se ubica otro panel en el lado contrario de la Torre de destilación. De esta forma los costos descienden significativamente, circunstancia que promueve la implementación y desarrollo de la desalinización solar con tubos al vacío. Una de las pocas desventajas en el uso de colectores tubulares radica en el costo adicional que requieren los orificios para los tubos, los mismos que deben perforarse en las paredes de la torre.

5.5.2.1. Área del colector solar y dimensiones de los depósitos en la Torre de destilación

Comúnmente, los tubos al vacío tienen una longitud de 1800 mm y están formados por dos tubos concéntricos, uno interior y otro exterior, con un diámetro de 48 y 58 mm, respectivamente. Un área de absorción[16] de 2 m^2 requiere de 24 tubos, si entre estos se deja una separación de 15 mm, el largo de los depósitos de la Torre de destilación será de 1800 mm, en lugar de los 742 mm originales. La distancia entre la superficie de evaporación y condensación en el Depósito principal también será un poco mayor, ya que los tubos impiden que los canales de recolección del destilado se coloquen por debajo del nivel del líquido, como si ocurre en los otros compartimientos. Los bulbos que sobresalen en el extremo de los tubos tienen una longitud de 150 mm y un diámetro de 48 mm, esto obliga a que la altura del agua en el Depósito principal sea de al menos 100 mm.

Los nuevos parámetros requeridos para la simulación del desalinizador con colector de tubos calóricos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5.24 Nuevas constantes empleadas en la simulación del Desalinizador solar de múltiples etapas con colector de tubos al vacío

PARÁMETRO	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADES
Área de la superficie libre del agua en el Depósito principal	A_w	0.9	m^2
Área de la superficie libre del agua en el resto de compartimientos	A_{wn}	0.81	m^2
Área de la base del Depósito principal	A_f	0.9	m^2
Área del fondo de los depósitos	A_{bn}	0.936	m^2

[16] El área de absorción de un tubo al vacío es igual al diámetro exterior de su tubo interior multiplicado por su longitud

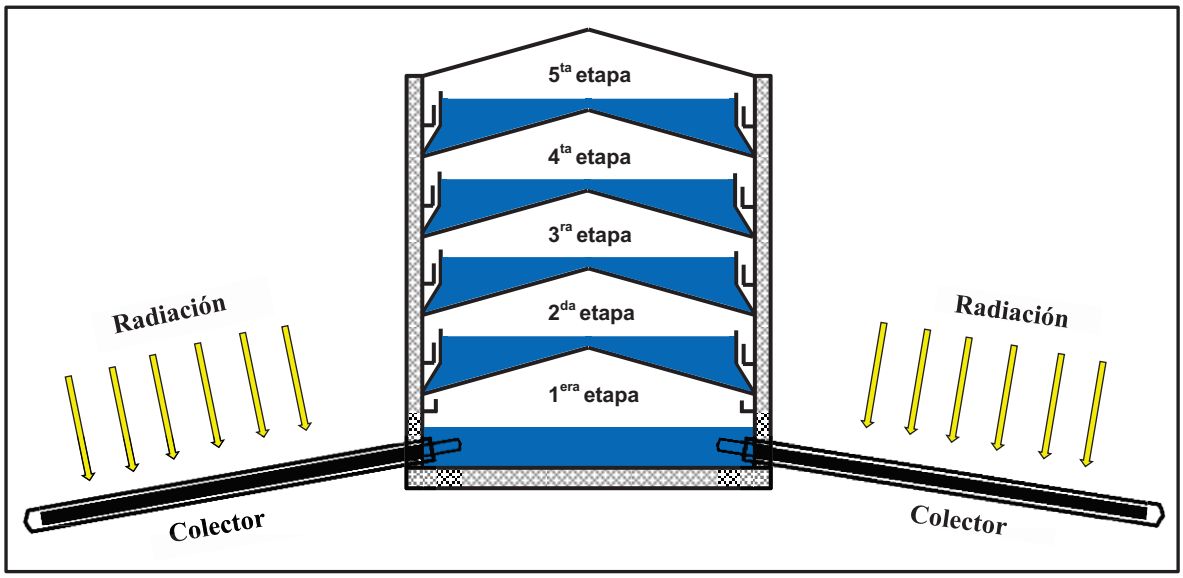
Área de la cubierta de la Torre de destilación	A_t	0.936	m^2
Área de las paredes del Depósito principal	A_s	0.68	m^2
Área de las paredes del resto de compartimientos	A_{sn}	0.4692	m^2
Distancia entre la superficie de evaporación y condensación en el Depósito principal	x	0.076	m
Distancia entre la superficie de evaporación y condensación en el resto de compartimientos	x_n	0.056	m
Masa de agua en el Depósito principal	m_w	77	kg
Masa de agua en el resto de compartimientos	m_{wn}	36.27	kg
Masa del fondo de los depósitos	m_{bn}	6.486	kg
Masa de la cubierta de la Torre de destilación	m_t	6.486	kg

En el sistema propuesto se acoplarían 24 tubos a cada lado de la Torre de destilación, esto es equivalente a un área de absorción de 4 m^2. El cálculo de la eficiencia de los colectores tubulares en base a su área de apertura[17] (A_p) es una práctica usual, para este caso en cuestión, A_p es 4.6 m^2. Ahora es preciso verificar si la relación entre A_p y el área del Depósito principal (A_w) se aproxima a 5, cifra donde la producción de agua es máxima (ver la **Sección 4.5**). El resultado de (A_p/A_w) es 5.1, valor que asegura el adecuado funcionamiento del destilador solar.

En la **Figura 5.31** se visualiza el esquema del desalinizador solar de 5 etapas con un colector de tubos de calor a cada lado de la Torre de destilación.

[17] El área de apertura de un tubo al vació se define como el diámetro interior de su tubo exterior multiplicado por su longitud

Figura 5.31 Desalinizador solar de 5 etapas con colector de tubos de calor



5.5.2.2. Energía útil entregada por el colector solar

A falta de la curva de rendimiento de un panel solar con tubos calóricos de vidrio, el cálculo de la energía suministrada por el colector se llevará a cabo suponiendo una eficiencia constante. Por lo general, se considera que la eficiencia promedio de los paneles con tubos al vacío es del 50 %; en la **Tabla 5.25** se expone la energía entregada por los dos colectores en el día 22 de diciembre de 2011, correspondiente a un área de apertura de 4.6 m^2. Se escogió el horario de 9 AM a 15 PM porque en este periodo de tiempo los sistemas solares de calentamiento proporcionan la mayor parte de su energía útil; además, los niveles de radiación desde las 15 PM fueron muy bajos.

Tabla 5.25 Radiación solar y Energía entregada por los dos colectores con tubos de calor (22/12/2011)

Hora (h)	Radiación solar promedio (W/m^2)	Energía entregada por los dos colectores (Q_u) (Wh)
9:00-10:00	790.78	1818.794
10:00-11:00	953.93	2194.039
11:00-12:00	1028.12	2364.676
12:00-13:00	865.97	1991.731
13:00-14:00	536.52	1233.996
14:00-15:00	247.76	569.848
TOTAL		10173.084

5.5.2.3. Resultados de la Simulación

a) Desalinizador de 5 etapas

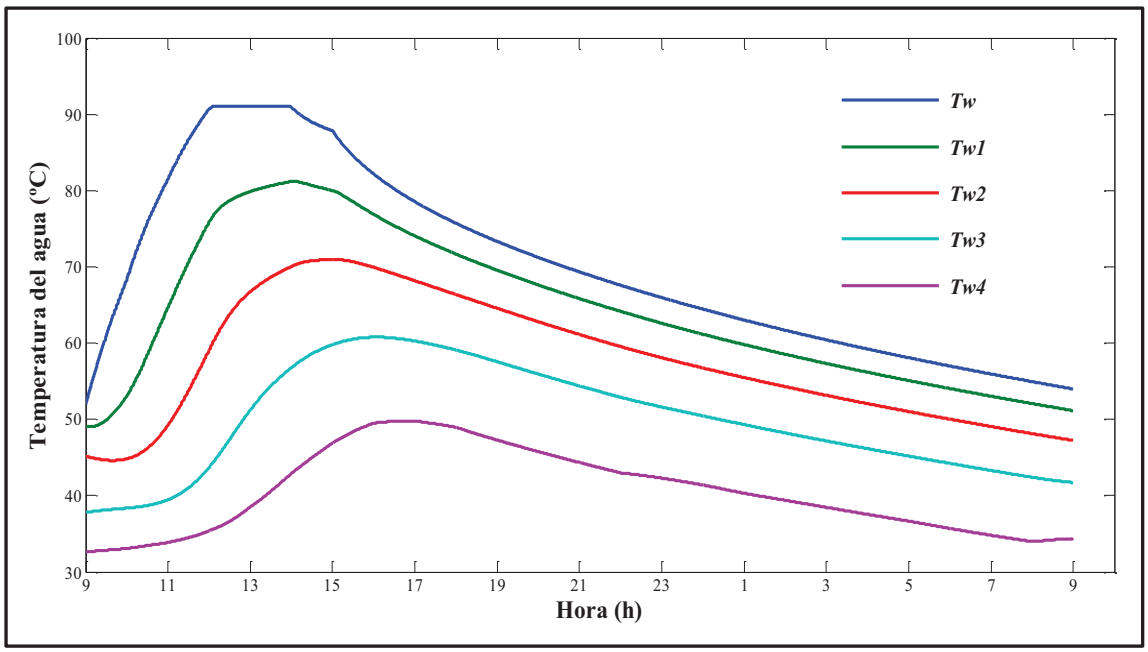
Las simulaciones anteriores y el funcionamiento del aparato construido se caracterizan porque las temperaturas iniciales (9 AM) y finales (9 AM del día siguiente) son similares, con una variación de entre 1 y 5 °C, aproximadamente. Sin embargo, al correr esta simulación, las temperaturas finales fueron muy superiores a las iniciales, con una diferencia que va desde los 6.6 hasta los 13 °C. Esta situación se puede explicar por el hecho de que un ingreso mayor de energía, también trae consigo un incremento general en las temperaturas del sistema.

Una solución rápida y simple para este inconveniente consiste en ejecutar nuevamente la simulación, remplazando las temperaturas iniciales por las finales (ver la **Tabla 5.26**); y en caso de presentarse discrepancias, los datos de entrada se modificarán hasta que los resultados sean satisfactorios.

Tabla 5.26 Temperaturas iniciales y finales en la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector de tubos de calor

TEMPERATURAS (°C)	T_w	T_{w1}	T_{w2}	T_{w3}	T_{w4}
Iniciales, 9 AM (22/12/11)	40.1	36.1	32.5	29.3	26
Finales, 9 AM (23/12/11)	51.9	49.1	45.2	37.8	32.6
Diferencia	**11.8**	**13**	**12.7**	**8.5**	**6.6**

Figura 5.32 Perfiles de temperatura en la simulación del desalinizador de 5 etapas con colector de tubos de calor (22/12/2011)



Con la corrección realizada, los resultados de la simulación mejoraron mucho; en la **Figura 5.32** se observa que la variación entre las temperaturas iniciales y finales disminuyó significativamente, siendo menor a 4 °C en todos los compartimientos de la Torre de destilación.

Debido a que se tiene un mayor ingreso de energía, la temperatura en el Depósito principal alcanzó durante más de 2 horas el punto de ebullición del agua, 91 °C a la altura de la ciudad de Quito. El modelo matemático utilizado en la simulación no toma en cuenta el fenómeno de ebullición, en consecuencia, la producción estimada durante este intervalo de tiempo es mucho menor a la real. No obstante, la elevada tasa de generación de vapor provocaría que la ebullición tenga una duración bastante inferior a 2 horas, restringiéndose en gran medida el error de la simulación.

La masa de agua destilada producida por los 5 depósitos es:

m_e = **10.257 kg**, m_{e1} = 8.297 kg, m_{e2} = 6.692 kg, m_{e3} = 5.315 kg, m_{e4} = 4.315 kg y $\sum m_{ei}$ = **34.878 kg**.

El Coeficiente de Rendimiento (COP) y la Relación de Ganancia de Salida (GOR) son:

$$\mathrm{COP}_{\text{simulación,5}} = \frac{34.879\ \text{kg}}{10.257\ \text{kg}} = 3.4$$

$$\mathrm{GOR}_{\text{simulación,5}} = \frac{34.879 \cdot 2390 \times 10^3}{10173.084\ \cdot 3600} = 2.27$$

Tomando en consideración la salinidad del agua, la producción total, el COP y el GOR son:

$\sum m_{ei}$ = 27.902 kg, $\mathrm{COP}_{\text{simulación,5}}$ = 2.72 y $\mathrm{GOR}_{\text{simulación,5}}$ = 1.82

En comparación al desalinizador de 5 etapas con colector plano, el COP y el GOR se incrementaron un 13 y 6 %, respectivamente. Cifras con las que no es posible apreciar en su verdadera magnitud el beneficio de los colectores de tubos al vacío. Con este propósito es preciso expresar la producción de agua destilada en litros por cada metro cuadrado del colector solar, L/m^2/d.

b) Desalinizador de 7 etapas

Al igual que con desalinizador de 5 etapas, las temperaturas iniciales (ver la **Sección 5.5.1.3**) se remplazaron por las finales, estas últimas son: $T_w = 53.8$ °C, $T_{w1} = 51.8$ °C, $T_{w2} = 49$ °C, $T_{w3} = 45.4$ °C, $T_{w4} = 40.7$ °C, $T_{w5} = 34.7$ °C y $T_{w6} = 27.6$ °C.

El destilado acumulado en cada depósito para un día de simulación es:

m_e = **9.542 kg**, m_{e1} = 7.576 kg, m_{e2} = 5.947 kg, m_{e3} = 4.626 kg

m_{e4} = 3.557 kg, m_{e5} = 2.699 kg, m_{e6} = 2.055 kg y $\sum m_{ei}$ = **36.002 kg**

La **Tabla 5.27** muestra la producción diaria (L/m^2), COP y GOR de la simulación del desalinizador con 3, 5 y 7 etapas; las siglas DSMP y DSMT significan desalinizador de múltiples etapas con colector solar plano y de tubos al vacío, respectivamente. Es fácil advertir que al pasar de 5 a 7 etapas, la producción de agua crece muy poco, motivo por el cual, el número óptimo de etapas en el desalinizador que opera con tubos al vacío es de 5.

Tabla 5.27 Producción diaria, COP y GOR de la simulación del desalinizador solar con 3, 5 y 7 etapas

22/12/2011						
Número de etapas	**DSMP**			**DSMT**		
	Producción (L/m^2 /d)	**COP**	**GOR**	**Producción (L/m^2 /d)**	**COP**	**GOR**
3	2.92	1.72	1.12	-	-	-
5	4.02	2.40	1.71	6.06	2.72	1.82
7	4.11	2.48	1.75	6.26	3.01	1.88

En esta misma tabla se puede verificar que el uso de tubos de calor en lugar del panel plano (destilador de 5 etapas), supone un aumento del 50 % en la generación de agua por cada metro cuadrado del colector; esto equivale a un incremento del 107 % en relación al destilador de 3 etapas.

El área del colector plano utilizado en este proyecto es de 1.76 m^2 y su precio fue de 425.6 USD. En el mercado local cada tubo al vacío tiene un costo aproximado de 20 USD (tubo de circulación natural[18], ver la **Sección 2.12.2.2.1)**; al importarlos directamente desde China, el precio de los tubos caloricos de vidrio oscila entre 5 y 10 USD. Para una superficie de apertura de 4.6 m^2 se necesitan 48 tubos, a un costo total de 480 USD[19], es decir, menos de la mitad por cada metro cuadrado.

Aunque su uso implique una elevación en los gastos de construcción de la Torre de destilación, por todo lo expuesto es evidente que en aplicaciones de desalinización solar, los colectores con tubos caloricos son más económicos y beneficiosos que los paneles planos.

[18] Los tubos de circulación natural son más baratos que los tubos de calor
[19] Valor que no considera los costos de envío, estos podrían ser bajos si los tubos se adquieren en grandes cantidades.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Se cumplió el objetivo de diseñar, construir y simular un desalinizador solar térmico modular con una capacidad diaria promedio de 4 litros de agua destilada.

- La desalinización solar térmica es recomendable para satisfacer las necesidades de agua de uso doméstico (específicamente para beber o preparar alimentos) de pequeñas comunidades o grupos aislados que no disponen de fuentes de agua dulce, pero sí de agua salada o salina.

- La costa del Ecuador y las islas Galápagos presentan condiciones favorables para la implementación de la desalinización solar térmica. La escasez de agua dulce, el aislamiento geográfico y los elevados niveles de radiación solar hacen particularmente de Galápagos un lugar muy propicio para el desarrollo de esta tecnología.

- El procedimiento para calcular la energía suministrada por el colector solar es exacto y muy conveniente, especialmente cuando no se conoce la curva de rendimiento del colector y se requiere evaluar el desempeño de un día específico.

- La eficiencia promedio del colector solar plano es relativamente baja, las principales causas de este fenómeno son: un flujo de agua muy pequeño a través del colector, las altas temperaturas alcanzadas en el Depósito principal y los reducidos niveles de radiación en horas de la tarde.

- Los resultados de la simulación tienen una muy buena correspondencia con los datos experimentales. Esto fue posible gracias a un adecuado modelo matemático del sistema, a la precisa evaluación de las propiedades termofísicas del agua y el aire, al cálculo correcto de la energía entregada por el colector y al conocimiento de todas las variables meteorológicas necesarias para efectuar la simulación (radiación solar, velocidad del viento y temperatura ambiente).

- La exactitud al predecir la producción del desalinizador solar aumenta con la obtención experimental de las constantes C, n, C_1 y n_1. Esta afirmación se comprobó al calcular la masa de destilado a partir de la temperatura promedio del agua y de la superficie de condensación en los dos primeros depósitos del destilador. Sin embargo, en la simulación del equipo construido, tanto las constantes obtenidas experimentalmente así como las propuestas por Dunkle proporcionaron buenos resultados.

- La simulación del aparato construido no requiere de la obtención experimental de las constantes C, n, C_1 y n_1.

- El análisis de conductividad eléctrica del agua generada por el desalinizador revela que prácticamente todas las sales disueltas fueron removidas. Igualmente, de acuerdo al examen microbiológico, el agua destilada cumple con la norma 1108 para el agua potable.

- El análisis de mejoras al desalinizador por medio de la simulación mostró que la producción total de agua, el COP y el GOR pueden incrementarse un 38, 40 y 50 %, respectivamente. Si adicionalmente se utilizan tubos al vacío, la producción por cada metro cuadrado de colector (L/m^2) puede aumentar en un 107 %.

- Para el desalinizador solar que opera con un colector plano o con un panel de tubos al vacío, la simulación determinó que el número óptimo de etapas en la Torre de destilación es de 5.

- En comparación con los paneles planos, los colectores con tubos calóricos de vidrío son una mejor alternativa para aplicaciones de desalinización solar; pues poseen una mejor eficiencia a bajos niveles de radiación y altas temperaturas, no requieren de un intercambiador de calor que los proteja contra la corrosión y son más económicos.

6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda calcular la energía suministrada por el colector y efectuar la simulación del desalinizador de al menos dos días distintos, de esta manera se tendría un valor más preciso de la eficiencia promedio del colector y se validarían por completo los resultados de la simulación.

- Para mejorar la eficiencia del colector solar se recomienda aumentar el flujo de agua que circula por el mismo. Con este propósito, el Depósito principal debe ubicarse a una altura superior, modificación que incrementaría la presión de empuje que moviliza al fluido. Complementariamente, podrían sustituirse las tuberías de conexión por otras de mayor diámetro, y así reducir las pérdidas de energía por fricción.

- Se recomienda construir un equipo de pruebas que permita analizar simple y rápidamente el efecto de parámetros tales como el ángulo de inclinación de la superficie de condensación, la distancia y diferencia de temperatura entre esta última y la superficie de evaporación, cantidad de agua en los depósitos, etc. Asimismo, bajo un amplio rango de condiciones, este dispositivo podría determinar definitivamente, si es necesaria o no la obtención experimental de las constantes C_i y n_i.

- Se recomienda realizar un estudio más profundo de los colectores con tubos calóricos y de su influencia en el desempeño del destilador solar.

- Por todos los beneficios y ventajas que esto representa, se recomienda remplazar el colector solar plano por uno de tubos calóricos de vidrío (all glass heat pipe).

- Para facilitar su uso, se recomienda que la simulación tenga una ventana de menú donde sea posible introducir rápidamente información sobre el área de evaporación, distancia entre las superficies de evaporación y condensación, cantidad de agua en los depósitos, etc. El programa de simulación desarrollado carece de esta útil ventana, resultando un poco largo y tedioso el efectuar cambios en las características del destilador solar.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aden B. Meinel, Marjorie P. Meinel; "Applied Solar Energy"; Addison-Wesley; Massachusetts; 1976.
2. Adhikari R. S.; Kumar Ashvini; "Transient simulation studies on a multi-stage stacked tray solar still"; Desalination 91; 1993.
3. Bernard J. Nebel, Richard T. Wright; "Ciencias Ambientales, Ecología y desarrollo sostenible"; Prentice Hall; Sexta edición; México; 1999.
4. Bérriz Pérez Luis, Álvarez González Manuel; "Manual para el cálculo y diseño de calentadores solares"; Editorial CUBASOLAR; Habana, Cuba; 2008.
5. Cengel Yunus A.; "Transferencia de Calor"; McGraw Hill Interamericana; Segunda Edición; México; 2004.
6. Centro del Agua para América Latina y el Caribe; "Recursos Hídricos - Ecuador 2010"; México; 2010.
7. Consejo Mundial del Agua; "Visión Mundial del Agua"; Earthscan Publications Ltd; Londres; 2000.
8. Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), Corporación para la Investigación Energética (CIE); Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica; CONELEC y CIE; Ecuador; 2008; [en línea]; disponible en http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf
9. D. Yogi Goswami, Frank Kreith, Jan F. Kreider; "Principles of solar engineering"; Taylor & Francis; Second Edition; Philadelphia PA; 2000.
10. Duffie John A., Beckman William A.; "Solar Engineering of Thermal Processes"; John Wiley & Sons; Third Edition; United States of America; 2006.
11. Dunkle R.V.; "Solar Water Distillation: The Roof Type Still and a Multiple Effect Diffusion Still"; International Developments in Heat Transfer; A.S.M.E.; In Proceedings of International Heat Transfer; University of Colorado; 1961; pg. 895-897.
12. El-Dessouky H.T., Ettouney H.M.; "Fundamentals of Salt Water Desalination"; Elsevier Science B.V.; Netherlands; 2002.
13. Farrington Daniels; "Uso directo de la energía solar"; H. Blume Ediciones; España; 1977.
14. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO); "Water desalination for Agricultural Applications"; FAO; Rome; 2006.

15. http://www.soda-is.com/img/map_ed_13_world.pdf
16. Ibáñez Plana M., Rosell Polo J.R., Rosell Urrutia J.I.; "Tecnología solar"; Ediciones Mundi-Prensa; Madrid; 2004.
17. Incropera Frank P., DeWitt David P.; "Fundamentos de Transferencia de Calor"; Prentice Hall; Cuarta Edición; México; 1999.
18. Instituto de Recursos Mundiales; "Recursos Mundiales 1990-1991"; Instituto Panamericano de Geografía e Historia; México; 1991.
19. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC); "Causas de morbilidad Ecuador 2007" [en línea]; Disponible en: www.inec.gov.ec/
20. International Energy Agency; "Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme: Annex XII, Windows and Fenestration, Step 2- Thermal and solar Properties of Windows"; International Energy Agency; Delft; December 1987.
21. Jakob M.; "Heat Transfer"; Wiley & Sons; New York; 1949; Vol. I.
22. James E. Miller; "Review of Water Resources and Desalination Technologies"; Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico; 2003; [en línea]; Disponible en: http://ocw-mit.kemdiknas.go.id/courses/mechanical-engineering/2-500-desalination-and-water-purification-spring-2009/readings/MIT2_500s09_read19.pdf
23. Kalogirou Soteris A.; "Seawater desalination using renewable energy sources"; Progress in Energy and Combustion Science 31; 2005; pg. 253, 254.
24. Kalogirou Soteris A.; "Solar Energy Engineering: Processes and Systems"; Academic Press; United States of America; 2009.
25. Kalogirou Soteris A.; "Solar thermal collectors and applications"; Progress in Energy and Combustion Science 30; 2004; pg. 241,246,250,251.
26. Kumar S., Tiwari G.N.; "Estimation of Convective Mass Transfer in Solar Distillation Systems"; J. Solar Energy 57; 1996; pg. 459-460.
27. LeChevallier M.W., Au K-K; "Water treatment and pathogen control: Process Efficiency in achieving safe drinking water"; World Health Organization and IWA; Geneva; 2004.
28. Manwell J.F., McGowan J.G., Rogers A.L.; "Wind energy explained: theory, design and application"; John Wiley & Sons; Second Edition; West Sussex, England; 2009.
29. McAdams W. C.; "Heat Transmission"; McGraw Hill; Third Edition; New York; 1954.
30. Montgomery Richard H.; "Energía Solar: selección del equipo, instalación y aprovechamiento"; Editorial Limusa; México; 1994.

31. Morrison G. L., Ranatunga D. B. J.; “Thermosyphon Circulation in Solar Collectors”; Solar Energy 24; 1980; pg. 191-198.
32. Morrison G. L.; Braun J. E.; “System Modeling and Operation Characteristics of Thermosyphon Solar Water Heaters”; Solar Energy 34; 1985; pg. 389- 405.
33. Naciones Unidas; “La destilación solar como medio de satisfacer necesidades de agua de poca magnitud”; Naciones Unidas; Nueva York; 1972.
34. Organización Latinoamericana de Energía (OLADE); “Atlas de Climatología Solar”; Volumen II – America del Sur; OLADE; Quito, Ecuador; 1987.
35. Organización Mundial de la Salud (OMS); “Guías para la calidad del agua potable”; OMS; Tercera Edición; 2006; [en línea]; Disponible en: www.who.int/water_sanitation_health/dw q/gdwq3rev/.../index.html
36. Pourrut Pierre; “El Agua en el Ecuador”; Corporación Editora Nacional; Quito; 1995.
37. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.; “Tablas de Vapor”; Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.; México; 1970.
38. Sampathkumar K., Arjunan T.V., Pitchandi P., Senthilkumar P.; “Active solar distillation-A detailed review”; Renewable and Sustainable Energy Reviews 14; 2010; pg. 1506, 1509, 1510.
39. Sayigh A.A.M.; “Solar Energy Engineering”; Academic Press; New York; 1977.
40. Schwarzer K., Vieira da Silva E., Hoffschmidt B., Schwarzer T.; “A new solar desalination system with heat recovery for decentralised drinking water production”; Desalination 251; 2010; pg. 204-206.
41. Schwarzer K., Vieira da Silva E., Schwarzer T and Hoffschmidt B.; “Field results in Namibia and Brazil from new solar desalination system”; Desalination & Water Reuse Vol. 20/4.
42. Spiegel Murray R., Schiller John, Srinivasan R. Alu; “Probabilidad y Estadística”; McGraw Hill; Tercera Edición; México; 2010.
43. Sutherland Ken; “Filters and filtration handbook”; Elsevier; Fifth Edition; Oxford; 2008.
44. T. Muneer; “Solar Radiation and Daylight Models”; Elsevier Butterworth-Heinemann; Second Edition; Oxford; 2004.
45. Tiwari G.N., Tiwari A. K.; “Solar Distillation Practice for Water Desalination Systems”; Anamaya Publishers; New Delhi; 2008.

46. United States Southern Command; Evaluación de los Recursos de Agua del Ecuador; Estados Unidos; 1998.
47. William L. Masterton, Emil J. Slowinski, Conrad L. Stanitski; "Química General Superior"; McGraw-Hill; Sexta edición; México; 1989.
48. Wolfgang Palz; "Electricidad Solar"; Editorial Blume; Barcelona; 1978.
49. World Water Assessment Programme; The United Nations World Water Development Report: "Water for People, Water for Life"; UNESCO and Berghahn Books; Barcelona; 2003.
50. World Water Assessment Programme; The United Nations World Water Development Report 3: "Water in a Changing World"; Paris: UNESCO and London: Earthscan; 2009.
51. Zekai Sen; "Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques: Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy"; Springer; London; 2008.

ANEXOS

ANEXO I

CARACTERÍSTICAS DE LOS FILTROS DE BOLSA Y DE CARTUCHO

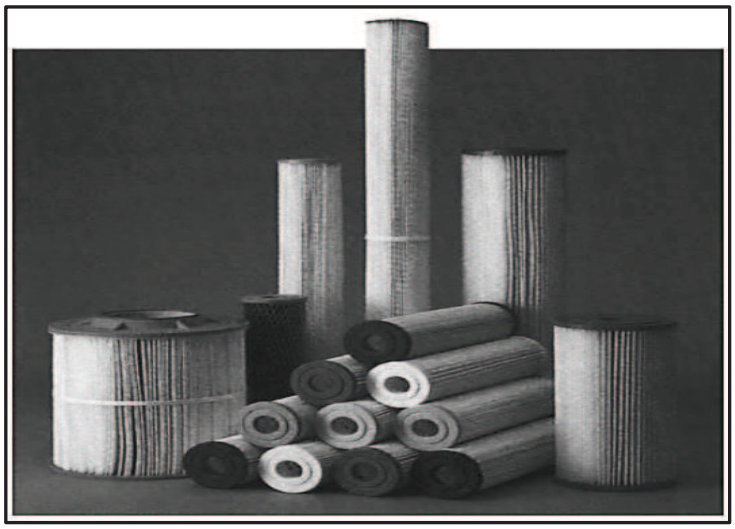
Un filtro de bolsa es aquel que contiene un material no rígido como medio filtrante, usualmente se hace pasar agua a presión desde el interior hasta el exterior de la bolsa. Por el contrario, un filtro de cartucho tiene un material rígido o una membrana como medio filtrante, y el agua a presión es conducida desde el exterior del filtro hacia su interior. Los filtros de bolsa y de cartucho se utilizan en pequeños sistemas de purificación y en la filtración de agua en el sitio de uso, también se emplean algunas veces en el pretratamiento de agua para procesos de filtración con membranas.

En los filtros de bolsa y los filtros de cartucho, la remoción de microorganismos se realiza por colado. Es así que la efectividad de la filtración depende del tamaño de poro en el material filtrante, que generalmente oscila entre 0.2 y 10 micras. En este caso, el tamaño de poro es el adecuado para remover protozoos como el Cryptosporidium y la Giardia. Microorganismos de menor tamaño, como los virus y la mayor parte de las bacterias, no son removidos por estos filtros.

Debido a que el mecanismo de remoción de partículas se da por colado, los filtros de bolsa y los filtros de cartucho, no requieren para su operación de un pretratamiento químico del agua de alimentación. El colado de grandes partículas compresibles puede obstruir los filtros, reduciendo su vida útil; también las algas y la elevada turbiedad del agua pueden taponarlos. Por tales motivos, estos filtros deben utilizarse con agua de buena calidad, siendo necesaria una prefiltración para eliminar las partículas de mayor tamaño **[27]**.

En la **Figura 108** se muestra un conjunto de filtros de cartucho, estos comúnmente tienen como medio filtrante una lámina de fieltro, papel u otro material. Para aumentar el área de filtración, la lámina se plisa alrededor de un cilindro en sentido longitudinal al eje del mismo. Los filtros de cartucho con láminas plisadas son muy populares, ya que pueden ser construidos a partir de cualquier material laminar apropiado **[43]**.

Figura I.1 Filtros de cartucho con lámina plisada



Fuente: Sutherland Ken; “Filters and filtration handbook”; 2008 **[47]**

ANEXO II

NORMA INEN 1108 PARA EL AGUA POTABLE (REQUISITOS MICROBIOLÓGICOS)

INEN

INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA **NTE INEN 1 108:2011**
Cuarta revisión

AGUA POTABLE. REQUISITOS.

Primera Edición

DRINKING WATER. REQUIREMENTS.

Second Edition

DESCRIPTORES: Protección ambiental y sanitaria, seguridad, calidad del agua, agua potable, requisitos.
AL 01.06-401
CDU: 628.1.033
CIIU: 4200
ICS: 13.060.20

Plaguicidas

	UNIDAD	Limite máximo permitido
Isoproturón	mg/l	0,009
Lindano	mg/l	0,002
Pendimetalina	mg/l	0,02
Pentaclorofenol	mg/l	0,009
Dicloroprop	mg/l	0,1
Alacloro	mg/l	0,02
Aldicarb	mg/l	0,01
Aldrín y Dieldrín	mg/l	0,00003
Carbofuran	mg/l	0,007
Clorpirifós	mg/l	0,03
DDT y metabolitos	mg/l	0,001
1,2-Dibromo-3-cloropropano	mg/l	0,001
1,3-Dicloropropeno	mg/l	0,02
Dimetoato	mg/l	0,006
Endrín	mg/l	0,0006
Terbutilazina	mg/l	0,007
Clordano	mg/l	0,0002

Residuos de desinfectantes

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Monocloramina,	mg/l	3

Subproductos de desinfección

	UNIDAD	Límite máximo permitido
2,4,6-triclorofenol	mg/l	0,2
Trihalometanos totales	mg/l	0,5
Si pasa de 0,5 mg/l investigar:		
• Bromodiclorometano	mg/l	0,06
• Cloroformo	mg/l	0,3
Acido tricloroacético	mg/l	0,2

Cianotoxinas

	UNIDAD	Límite máximo permitido
Microcistina-LR	mg/l	0,001

5.1.2 El agua potable debe cumplir con los siguientes requisitos microbiológicos.

Requisitos microbiológicos

	Máximo
Coliformes fecales (1):	
- Tubos múltiples NMP/100 ml ó	< 1,1 *
- Filtración por membrana UFC/ 100 ml	< 1 **
Cryptosporidium, número de ooquistes/100 litros	Ausencia
Giardia, número de quistes/100 litros	Ausencia

* < 1,1 significa que en el ensayo del NMP utilizando 5 tubos de 20 cm^3 ó 10 tubos de 10 cm^3 ninguno es positivo

** < 1 significa que no se observan colonias

(1) ver el anexo 1, para el número de unidades (muestras) a tomar de acuerdo con la población servida

(Continúa)

ANEXO III

DATOS DE RADIACIÓN SOLAR, TEMPERATURA AMBIENTE Y VELOCIDAD DEL VIENTO DEL DÍA 22 DE DICIEMBRE DE 2011[20]

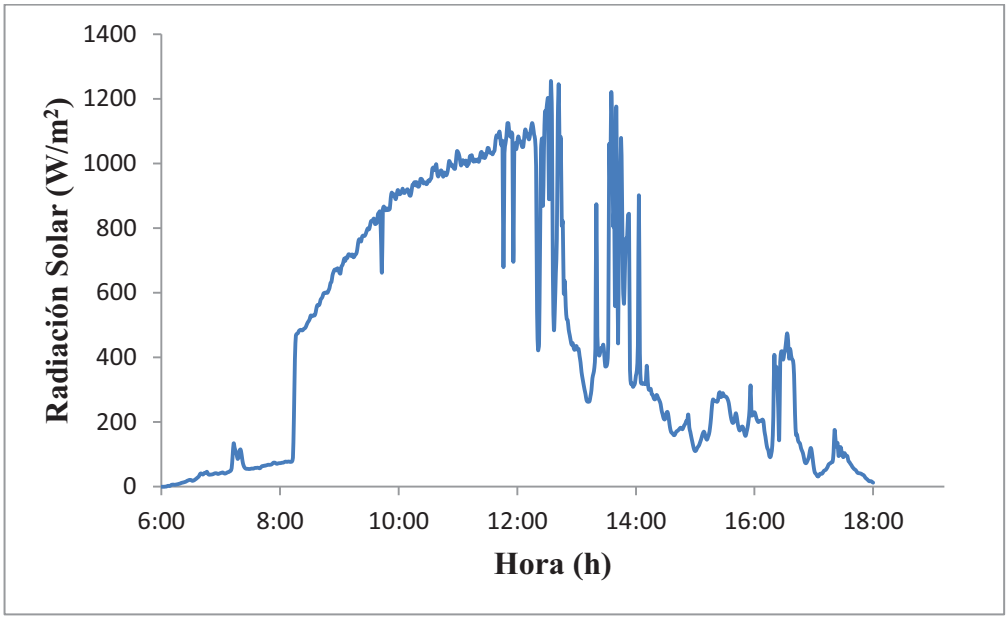
Radiación solar sobre una superficie plana

Hora	Radiación Solar (W/m^2)	Hora	Radiación Solar (W/m^2)
6:00	0	8:40	565.39
6:05	0.68	8:45	598.98
6:10	5.72	8:50	614.65
6:15	7.06	8:55	670.9
6:20	11.68	9:00	662.36
6:25	16.38	9:05	706
6:30	20.67	9:10	718.83
6:35	24.33	9:15	711.54
6:40	41.29	9:20	765.66
6:45	42.77	9:25	775.17
6:50	37.75	9:30	796.16
6:55	41.8	9:35	829.06
7:00	42.56	9:40	847.43
7:05	41.47	9:45	866.83
7:10	49.44	9:50	856.77
7:15	109.76	9:55	905.16
7:20	115.38	10:00	912.31
7:25	56.64	10:05	910.04
7:30	55.35	10:10	911.27
7:35	58.34	10:15	935.6
7:40	57.96	10:20	927.71
7:45	65.16	10:25	938.63
7:50	68.06	10:30	947.27
7:55	74.14	10:35	987.5
8:00	72.99	10:40	959.42
8:05	77.3	10:45	958.85
8:10	76.96	10:50	984.83
8:15	395.04	10:55	993.97
8:20	484.39	11:00	1034.94
8:25	490.17	11:05	1010.15
8:30	519.1	11:10	996.66
8:35	530.06	11:15	1008.62

[20] Estos datos corresponden a la azotea de la Facultad de Ingeniería Mecánica ubicada en la ciudad de Quito; información suministrada por el Laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética.

Hora	Radiación Solar (W/m^2)	Hora	Radiación Solar (W/m^2)
11:20	1012.57	14:40	164.79
11:25	1018.11	14:45	182.25
11:30	1047.58	14:50	194.95
11:35	1028.05	14:55	170.14
11:40	1086.74	15:00	110.28
11:45	1068.99	15:05	137.93
11:50	1124.06	15:10	160.00
11:55	1090.38	15:15	182.98
12:00	1065.16	15:20	265.18
12:05	1050.64	15:25	292.12
12:10	1089.22	15:30	279.46
12:15	1124.96	15:35	236.86
12:20	539.99	15:40	211.44
12:25	1075.58	15:45	173.89
12:30	1181.97	15:50	163.00
12:35	1149.6	15:55	240.08
12:40	767	16:00	230.66
12:45	807.56	16:05	202.92
12:50	519.07	16:10	172.98
12:55	439.3	16:15	95.49
13:00	434.49	16:20	408.13
13:05	354.46	16:25	147.13
13:10	268.53	16:30	411.46
13:15	298.43	16:35	396.14
13:20	873.91	16:40	347.13
13:25	429.83	16:45	137.27
13:30	372.47	16:50	89.31
13:35	1217.03	16:55	92.00
13:40	1176.11	17:00	59.40
13:45	1078.95	17:05	34.17
13:50	767.76	17:10	48.42
13:55	318.18	17:15	69.00
14:00	343.95	17:20	105.92
14:05	322.38	17:25	95.61
14:10	317.56	17:30	91.57
14:15	302.7	17:35	79.7
14:20	273.09	17:40	57.67
14:25	255.31	17:50	36.56
14:30	213.94	17:55	19.9
14:35	175.80	18:00	12.57

Radiación solar vs tiempo



TEMPERATURA AMBIENTE

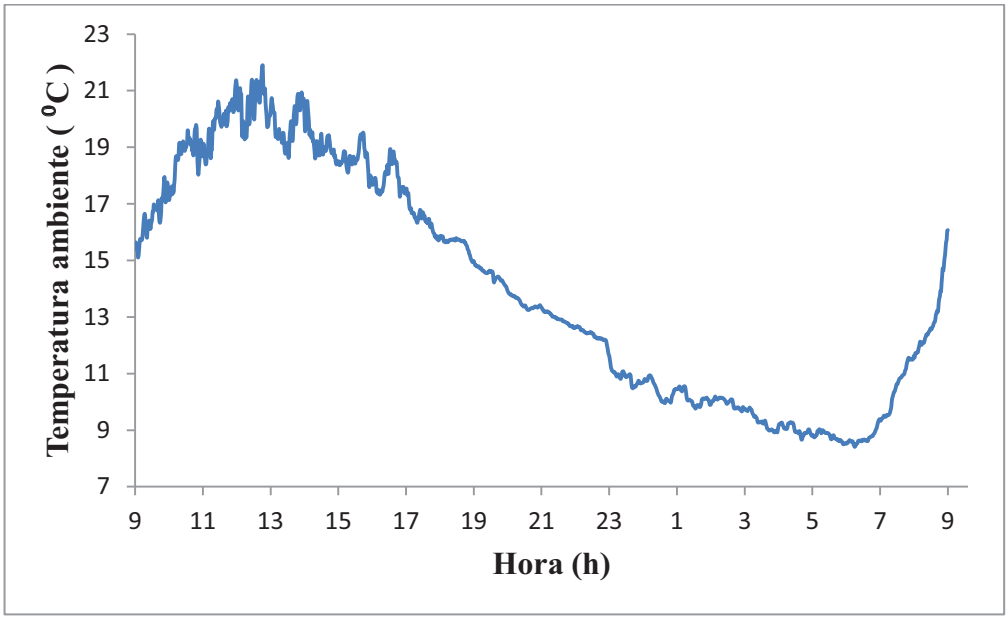
Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Hora	Temperatura Ambiente (°C)
9:00	15.4	10:50	18.8
9:05	15.1	10:55	18.8
9:10	15.7	11:00	18.7
9:15	16.4	11:05	18.4
9:20	16.0	11:10	19.4
9:25	16.4	11:15	18.9
9:30	16.4	11:20	19.6
9:35	16.8	11:25	20.4
9:40	16.8	11:30	20.0
9:45	16.5	11:35	19.8
9:50	17.4	11:40	20.0
9:55	17.3	11:45	20.4
10:00	17.1	11:50	20.5
10:05	17.6	11:55	20.3
10:10	17.9	12:00	21.2
10:15	18.7	12:05	20.9
10:20	19.1	12:10	19.4
10:25	19.2	12:15	19.4
10:30	19.0	12:20	20.8
10:35	19.2	12:25	20.8
10:40	19.2	12:30	20.4
10:45	19.4	12:35	21.4

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Hora	Temperatura Ambiente (°C)
12:40	20.6	16:10	17.4
12:45	21.9	16:15	17.4
12:50	21.1	16:20	17.6
12:55	19.7	16:25	18.0
13:00	20.3	16:30	18.4
13:05	20.2	16:35	18.4
13:10	19.4	16:40	18.6
13:15	19.7	16:45	18.0
13:20	19.2	16:50	17.4
13:25	18.9	16:55	17.6
13:30	19.2	17:00	17.5
13:35	19.6	17:05	17.1
13:40	19.6	17:10	16.7
13:45	19.8	17:15	16.5
13:50	20.7	17:20	16.3
13:55	20.9	17:25	16.8
14:00	20.1	17:30	16.7
14:05	20.6	17:35	16.4
14:10	19.6	17:40	16.5
14:15	19.2	17:45	16.3
14:20	18.8	17:50	16.0
14:25	18.9	17:55	15.8
14:30	19.5	18:00	15.8
14:35	18.9	18:05	15.9
14:40	19.3	18:10	15.6
14:45	19.2	18:15	15.7
14:50	18.9	18:20	15.7
14:55	18.6	18:25	15.7
15:00	18.5	18:30	15.8
15:05	18.5	18:35	15.7
15:10	18.9	18:40	15.7
15:15	18.3	18:45	15.6
15:20	18.7	18:50	15.4
15:25	18.4	18:55	15.1
15:30	18.4	19:00	15.0
15:35	18.7	19:05	14.8
15:40	19.5	19:10	14.8
15:45	19.4	19:15	14.7
15:50	18.8	19:20	14.6
15:55	17.6	19:25	14.6
16:00	17.8	19:30	14.6
16:05	17.9	19:35	14.3

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Hora	Temperatura Ambiente (°C)
19:40	14.4	23:10	11.0
19:45	14.4	23:15	11.0
19:50	14.3	23:20	10.8
19:55	14.1	23:25	11.1
20:00	13.9	23:30	10.9
20:05	13.8	23:35	11.0
20:10	13.8	23:40	10.5
20:15	13.7	23:45	10.5
20:20	13.6	23:50	10.7
20:25	13.4	23:55	10.7
20:30	13.4	0:00	10.7
20:35	13.3	0:05	10.8
20:40	13.3	0:10	10.9
20:45	13.3	0:15	10.9
20:50	13.4	0:20	10.7
20:55	13.4	0:25	10.4
21:00	13.3	0:30	10.2
21:05	13.2	0:35	10.0
21:10	13.2	0:40	10.0
21:15	13.1	0:45	10.1
21:20	13.0	0:50	10.0
21:25	13.0	0:55	10.3
21:30	12.9	1:00	10.4
21:35	12.9	1:05	10.5
21:40	12.8	1:10	10.4
21:45	12.8	1:15	10.6
21:50	12.7	1:20	10.1
21:55	12.7	1:25	10.1
22:00	12.6	1:30	9.9
22:05	12.7	1:35	9.8
22:10	12.5	1:40	9.8
22:15	12.5	1:45	10.1
22:20	12.4	1:50	10.1
22:25	12.5	1:55	10.1
22:30	12.4	2:00	9.9
22:35	12.3	2:05	10.0
22:40	12.3	2:10	10.1
22:45	12.2	2:15	10.1
22:50	12.2	2:20	10.1
22:55	12.1	2:25	10.1
23:00	11.6	2:30	9.9
23:05	11.1	2:35	10.0

Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Hora	Temperatura Ambiente (°C)
2:40	10.0	5:55	8.5
2:45	9.8	6:00	8.5
2:50	9.8	6:05	8.6
2:55	9.7	6:10	8.6
3:00	9.8	6:15	8.5
3:05	9.7	6:20	8.5
3:10	9.8	6:25	8.6
3:15	9.6	6:30	8.7
3:20	9.5	6:35	8.6
3:25	9.3	6:40	8.7
3:30	9.3	6:45	8.8
3:35	9.2	6:50	8.9
3:40	9.1	6:55	9.1
3:45	9.0	7:00	9.4
3:50	9.0	7:05	9.4
3:55	9.0	7:10	9.5
4:00	9.0	7:15	9.5
4:05	9.3	7:20	9.7
4:10	9.1	7:25	10.3
4:15	9.0	7:30	10.6
4:20	9.3	7:35	10.8
4:25	9.3	7:40	10.9
4:30	9.0	7:45	11.1
4:35	8.9	7:50	11.5
4:40	8.8	7:55	11.5
4:45	8.8	8:00	11.6
4:50	8.9	8:05	11.7
4:55	9.0	8:10	12.0
5:00	8.8	8:15	12.0
5:05	8.8	8:20	12.2
5:10	9.0	8:25	12.4
5:15	9.0	8:30	12.6
5:20	9.0	8:35	12.7
5:25	8.9	8:40	13.1
5:30	8.9	8:45	13.5
5:35	8.7	8:50	14.2
5:40	8.7	8:55	15.0
5:45	8.7	9:00	16.1
5:50	8.7	-	-

Temperatura Ambiente vs tiempo



VELOCIDAD DEL VIENTO

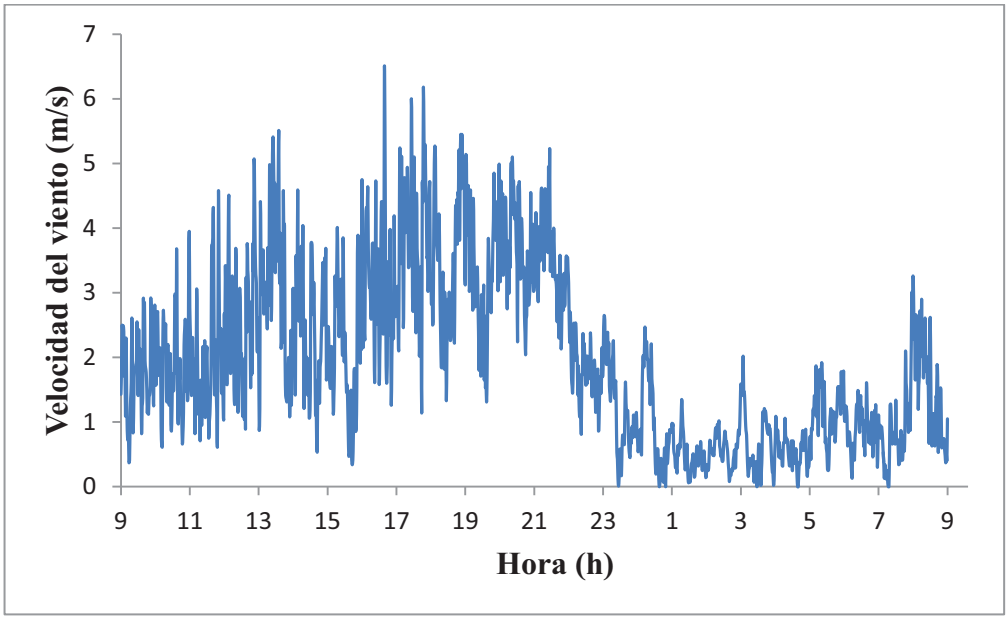
Hora	Velocidad del viento (m/s)	Hora	Velocidad del viento (m/s)
9:00	1.43	10:50	2.19
9:05	2.40	10:55	1.67
9:10	1.46	11:00	2.77
9:15	0.41	11:05	2.30
9:20	1.95	11:10	1.41
9:25	1.81	11:15	1.12
9:30	1.41	11:20	1.01
9:35	1.52	11:25	1.24
9:40	2.50	11:30	2.15
9:45	1.52	11:35	1.12
9:50	1.42	11:40	3.85
9:55	2.47	11:45	2.27
10:00	2.55	11:50	4.58
10:05	2.04	11:55	1.47
10:10	0.92	12:00	2.65
10:15	2.41	12:05	1.58
10:20	1.31	12:10	2.40
10:25	1.37	12:15	2.55
10:30	1.75	12:20	3.65
10:35	2.92	12:25	1.62
10:40	0.97	12:30	2.06
10:45	1.22	12:35	1.04

Hora	Velocidad del viento (m/s)	Hora	Velocidad del viento (m/s)
12:40	3.76	16:10	4.64
12:45	2.61	16:15	2.83
12:50	3.74	16:20	3.70
12:55	3.28	16:25	2.65
13:00	2.02	16:30	1.58
13:05	2.98	16:35	4.01
13:10	3.17	16:40	5.54
13:15	2.44	16:45	3.48
13:20	4.89	16:50	2.57
13:25	5.41	16:55	2.34
13:30	4.32	17:00	2.77
13:35	5.51	17:05	4.01
13:40	2.25	17:10	3.50
13:45	4.04	17:15	4.14
13:50	1.36	17:20	4.23
13:55	1.61	17:25	3.57
14:00	3.07	17:30	4.23
14:05	3.52	17:35	4.54
14:10	2.56	17:40	2.02
14:15	2.40	17:45	4.69
14:20	2.01	17:50	5.29
14:25	1.42	17:55	3.02
14:30	1.47	18:00	3.27
14:35	2.66	18:05	3.99
14:40	1.34	18:10	3.75
14:45	1.95	18:15	3.87
14:50	2.67	18:20	2.73
14:55	3.54	18:25	2.63
15:00	2.09	18:30	2.90
15:05	1.52	18:35	2.31
15:10	1.12	18:40	3.09
15:15	2.79	18:45	4.44
15:20	2.32	18:50	3.81
15:25	2.70	18:55	4.94
15:30	2.39	19:00	3.14
15:35	1.31	19:05	4.66
15:40	1.17	19:10	3.67
15:45	0.81	19:15	3.73
15:50	0.92	19:20	2.89
15:55	3.18	19:25	2.42
16:00	4.75	19:30	2.33
16:05	2.27	19:35	1.53

Hora	Velocidad del viento (m/s)	Hora	Velocidad del viento (m/s)
19:40	3.81	23:10	2.22
19:45	2.69	23:15	1.75
19:50	4.85	23:20	1.37
19:55	4.25	23:25	0.43
20:00	3.84	23:30	0.58
20:05	4.53	23:35	0.78
20:10	4.48	23:40	1.30
20:15	3.80	23:45	0.60
20:20	5.01	23:50	0.91
20:25	4.40	23:55	1.10
20:30	3.44	0:00	0.74
20:35	4.18	0:05	0.79
20:40	3.24	0:10	1.88
20:45	2.04	0:15	2.24
20:50	2.82	0:20	1.70
20:55	3.16	0:25	2.21
21:00	3.08	0:30	1.07
21:05	4.03	0:35	0.34
21:10	3.49	0:40	0.06
21:15	4.22	0:45	0.21
21:20	4.34	0:50	0.00
21:25	4.95	0:55	0.64
21:30	3.67	1:00	0.84
21:35	3.68	1:05	0.51
21:40	2.55	1:10	0.21
21:45	3.58	1:15	0.60
21:50	2.76	1:20	0.94
21:55	3.31	1:25	0.34
22:00	3.15	1:30	0.06
22:05	1.68	1:35	0.36
22:10	2.00	1:40	0.15
22:15	2.01	1:45	0.63
22:20	1.16	1:50	0.47
22:25	2.37	1:55	0.35
22:30	1.57	2:00	0.14
22:35	1.67	2:05	0.29
22:40	1.67	2:10	0.59
22:45	1.96	2:15	0.61
22:50	1.79	2:20	0.96
22:55	1.70	2:25	0.59
23:00	1.81	2:30	0.41
23:05	2.06	2:35	0.68

Hora	Velocidad del viento (m/s)	Hora	Velocidad del viento (m/s)
2:40	0.26	5:55	1.12
2:45	0.27	6:00	1.79
2:50	0.57	6:05	1.21
2:55	0.60	6:10	0.85
3:00	1.27	6:15	0.13
3:05	2.02	6:20	0.76
3:10	0.87	6:25	1.49
3:15	0.26	6:30	1.41
3:20	0.38	6:35	0.63
3:25	0.18	6:40	1.61
3:30	0.06	6:45	0.84
3:35	0.29	6:50	1.03
3:40	1.01	6:55	1.00
3:45	1.09	7:00	0.69
3:50	0.96	7:05	0.75
3:55	0.34	7:10	0.38
4:00	0.48	7:15	0.25
4:05	0.88	7:20	0.49
4:10	0.44	7:25	0.66
4:15	0.64	7:30	0.68
4:20	0.76	7:35	0.63
4:25	0.38	7:40	0.87
4:30	0.39	7:45	0.79
4:35	0.36	7:50	1.49
4:40	0.00	7:55	1.12
4:45	0.45	8:00	2.53
4:50	0.76	8:05	1.65
4:55	0.55	8:10	1.24
5:00	0.36	8:15	2.02
5:05	0.87	8:20	1.98
5:10	1.34	8:25	2.01
5:15	1.00	8:30	2.43
5:20	1.65	8:35	1.13
5:25	1.29	8:40	0.88
5:30	0.59	8:45	0.53
5:35	0.51	8:50	1.27
5:40	0.87	8:55	0.74
5:45	0.70	9:00	0.41
5:50	1.54	-	-

Velocidad del viento vs tiempo



ANEXO IV

DATOS MEDIDOS DE TEMPERATURA DEL AGUA EN LA TORRE DE DESTILACIÓN Y DE MASA DEL DESTILADO PRODUCIDO

Agua potable						
21/12/2011						
Hora (h)	T_w (°C)	T_{w1} (°C)	T_{w2} (°C)	Agua destilada producida (kg)		
				Depósito principal	Primer depósito	Segundo depósito
11:00-12:00	58.5	37.4	27.8	0.336	0.058	0.003
12:00-13:00	64.7	43.9	30.6	0.452	0.114	0.000
13:00-14:00	69.3	50.3	34.0	0.547	0.190	0.003
14:00-15:00	73.9	57.1	39.2	0.653	0.298	0.023
15:00-16:00	69.8	59.8	44.4	0.299	0.288	0.078
16:00-17:00	64.6	58.2	46.8	0.127	0.202	0.123
17:00-9:00	-	-	-	0.203	0.806	1.095
9:00-10:00	-	-	-	0.116	0.021	0.000
10:00-11:00	-	-	-	0.360	0.051	0.005
Subtotales				**3.093**	**2.028**	**1.330**
Total				**6.451**		

Agua potable						
22/12/2011						
Hora (h)	T_w (°C)	T_{w1} (°C)	T_{w2} (°C)	Agua destilada producida (kg)		
				Depósito principal	Primer depósito	Segundo depósito
9:00-10:00	46.2	32.1	26.5	0.116	0.021	0.000
10:00-11:00	59.4	36.6	27.6	0.360	0.051	0.005
11:00-12:00	69.1	45.2	30.5	0.621	0.138	0.000
12:00-13:00	74.0	54.5	35.3	0.727	0.270	0.002
13:00-14:00	70.2	58.2	40.6	0.359	0.300	0.041
14:00-15:00	66.5	57.9	44.4	0.210	0.231	0.080
15:00-16:00	61.3	55.9	45.6	0.086	0.156	0.091
16:00-17:00	58.3	53.8	45.6	0.052	0.112	0.115
17:00-9:00	-	-	-	0.134	0.665	1.024
Subtotales				**2.665**	**1.944**	**1.358**
Total				**5.967**		

Agua potable						
23/12/2011						
Hora (h)	**T_w (°C)**	**T_{w1} (°C)**	**T_{w2} (°C)**	**Agua destilada producida (kg)**		
				Depósito principal	**Primer depósito**	**Segundo depósito**
9:00-10:00	44.4	29.9	24.5	0.107	0.017	0.000
10:00-11:00	57.4	34.2	26.0	0.361	0.043	0.002
11:00-12:00	67.6	42.9	28.7	0.632	0.123	0.000
12:00-13:00	73.7	52.7	33.2	0.766	0.260	0.000
13:00-14:00	75.6	60.3	40.3	0.671	0.398	0.019
Subtotales				**2.537**	**0.841**	**0.021**
Total				**3.399**		

Agua potable						
03/01/2012						
Hora (h)	**T_w (°C)**	**T_{w1} (°C)**	**T_{w2} (°C)**	**Agua destilada producida (kg)**		
				Depósito principal	**Primer depósito**	**Segundo depósito**
9:00-10:00	47.2	32.9	27.8	0.125	0.019	0.006
10:00-11:00	59.1	37.1	28.6	0.398	0.052	0.001
11:00-12:00	62.3	43.9	31.1	0.338	0.107	0.005
12:00-13:00	61.8	47.2	33.8	0.300	0.139	0.019
13:00-14:00	58.1	48.2	36.0	0.145	0.133	0.042
14:00-15:00	54.4	47.4	37.2	0.079	0.105	0.050
15:00-16:00	51.4	46.0	37.4	0.050	0.082	0.064
16:00-17:00	48.6	44.3	36.6	0.027	0.065	0.069
17:00-9:00	-	-	-	0.095	0.416	0.609
Subtotales				**1.557**	**1.118**	**0.865**
Total				**3.540**		

Agua potable						
16/01/2012						
Hora (h)	T_w (°C)	T_{w1} (°C)	T_{w2} (°C)	Agua destilada producida (kg)		
				Depósito principal	Primer depósito	Segundo depósito
10:00-11:00	50.4	30.0	23.3	0.195	0.024	0.000
11:00-12:00	61.9	36.4	24.8	0.484	0.068	0.000
12:00-13:00	65.9	45.4	28.4	0.490	0.154	0.000
13:00-14:00	67.1	50.1	32.7	0.437	0.193	0.000
14:00-15:00	69.5	54.4	37.4	0.452	0.244	0.020
15:00-16:00	66.3	56.2	41.2	0.252	0.233	0.080
16:00-10:00	-	-	-	0.264	0.804	0.957
Subtotales				**2.574**	**1.720**	**1.057**
Total				**5.351**		

Agua salada			
18/01/2012			
Hora (h)	Agua destilada producida (kg)		
	Depósito principal	Primer depósito	Segundo depósito
11:00-12:00	0.405	0.018	0.000
12:00-13:00	0.602	0.085	0.000
13:00-14:00	0.415	0.140	0.000
14:00-15:00	0.322	0.188	0.004
15:00-9:00	0.122	0.596	0.578
9:00-10:00	0.081	0.008	0.000
10:00-11:00	0.208	0.025	0.000
Subtotales	**2.155**	**1.060**	**0.582**
Total	**3.797**		

ANEXO V

VALORES CALCULADOS PARA LA OBTENCIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CONSTANTES C, n, C_1 Y n_1

DEPÓSITO PRINCIPAL

21/12/2011						
Hora (h)	Ra (y)	m_e (kg)	R	m_e/R (z)	ln z (z')	ln y (y')
11:00-12:00	5861379.34169	0.336	0.01956	17.17734	2.84359	15.58390
12:00-13:00	6296777.80275	0.452	0.02571	17.57810	2.86665	15.65555
13:00-14:00	6265291.03858	0.547	0.02980	18.35533	2.90992	15.65054
14:00-15:00	6192542.92462	0.653	0.03362	19.42246	2.96643	15.63886
15:00-16:00	3476903.60875	0.299	0.01932	15.47763	2.73940	15.06165
16:00-17:00	2018496.45170	0.127	0.01056	12.03045	2.48744	14.51786
22/12/2011						
Hora (h)	Ra (y)	m_e (kg)	R	m_e/R (z)	ln z (z')	ln y (y')
9:00-10:00	3481009.00880	0.116	0.00832	13.93687	2.63454	15.06283
10:00-11:00	6378332.35060	0.360	0.02123	16.95983	2.83085	15.66842
11:00-12:00	7784328.33390	0.621	0.03395	18.28920	2.90631	15.86762
12:00-13:00	7122863.15710	0.727	0.03723	19.52583	2.97174	15.77882
13:00-14:00	4173558.01720	0.359	0.02265	15.85075	2.76322	15.24428
14:00-15:00	2802836.11100	0.210	0.01478	14.20597	2.65366	14.84614
15:00-16:00	1614359.94400	0.086	0.00787	10.92585	2.39113	14.29445
23/12/2011						
Hora (h)	Ra (y)	m_e (kg)	R	m_e/R (z)	ln z (z')	ln y (y')
9:00-10:00	3551569.32535	0.107	0.00776	13.79699	2.62445	15.08290
10:00-11:00	6345198.09645	0.361	0.01954	18.47958	2.91667	15.66321
11:00-12:00	7760127.51353	0.632	0.03213	19.67122	2.97916	15.86451
12:00-13:00	7570146.54606	0.766	0.03843	19.93304	2.99238	15.83972
13:00-14:00	5919097.41493	0.671	0.03392	19.78072	2.98471	15.59369

03/01/2012						
Hora (h)	Ra (y)	m_e (kg)	R	m_e/R (z)	$\ln z$ (z')	$\ln y$ (y')
9:00-10:00	3578922.37567	0.125	0.00888	14.07127	2.64414	15.09057
10:00-11:00	6156006.33404	0.398	0.02060	19.32068	2.96118	15.63294
11:00-12:00	5396910.64185	0.338	0.02143	15.77239	2.75826	15.50134
12:00-13:00	4297342.85702	0.300	0.01802	16.64550	2.81214	15.27351
13:00-14:00	2783429.38176	0.145	0.01138	12.74437	2.54509	14.83919
14:00-15:00	1908765.49126	0.079	0.00732	10.79561	2.37914	14.46197
15:00-16:00	1409098.04986	0.050	0.00503	9.94515	2.29709	14.15846
16:00-17:00	1076125.98545	0.027	0.00354	7.62127	2.03094	13.88888
16/01/2012						
Hora (h)	Ra (y)	m_e (kg)	R	m_e/R (z)	$\ln z$ (z')	$\ln y$ (y')
10:00-11:00	5217539.01119	0.195	0.01295	15.05765	2.71189	15.46754
11:00-12:00	7347911.80834	0.484	0.02530	19.13096	2.95131	15.80993
12:00-13:00	6359715.16282	0.490	0.02701	18.14257	2.89826	15.66549
13:00-14:00	5430746.74715	0.437	0.02530	17.26966	2.84895	15.50759
14:00-15:00	5088953.34038	0.452	0.02589	17.45564	2.85966	15.44258
15:00-16:00	3259237.05488	0.252	0.01670	15.09190	2.71416	14.99700

PRIMER DEPÓSITO

21/12/2011						
Hora (h)	Ra_1 (y_1)	m_{e1} (kg)	R_1	m_{e1}/R_1 (z_1)	$\ln z_1$ (z'_1)	$\ln y_1$ (y'_1)
11:00-12:00	2271620.14332	0.058	0.00396	14.63984	2.68375	14.63600
12:00-13:00	3239789.91910	0.114	0.00703	16.21350	2.78584	14.99102
13:00-14:00	4164062.81172	0.190	0.01113	17.07517	2.83763	15.24200
14:00-15:00	4872003.05681	0.298	0.01628	18.30440	2.90714	15.39902
15:00-16:00	4384011.53797	0.288	0.01683	17.11641	2.84004	15.29347
16:00-17:00	3221813.70218	0.202	0.01268	15.92992	2.76820	14.98546
22/12/2011						
Hora (h)	Ra_1 (y_1)	m_{e1} (kg)	R_1	m_{e1}/R_1 (z_1)	$\ln z_1$ (z'_1)	$\ln y_1$ (y'_1)
9:00-10:00	1315396.39733	0.021	0.00195	10.78904	2.37853	14.08965
10:00-11:00	2123221.16743	0.051	0.00361	14.11435	2.64719	14.56844
11:00-12:00	3610645.23679	0.138	0.00803	17.18582	2.84408	15.09940
12:00-13:00	5097454.02662	0.270	0.01509	17.88746	2.88410	15.44425
13:00-14:00	4852575.29131	0.300	0.01695	17.69973	2.87355	15.39502
14:00-15:00	3757988.60123	0.231	0.01406	16.43302	2.79929	15.13939
15:00-16:00	2797092.01833	0.156	0.01043	14.95152	2.70481	14.84409

23/12/2011						
Hora (h)	Ra_1 (y_1)	m_{e1} (kg)	R_1	m_{e1}/R_1 (z_1)	$\ln z_1$ (z'_1)	$\ln y_1$ (y'_1)
9:00-10:00	1264942.18313	0.017	0.00167	10.18743	2.32116	14.05054
10:00-11:00	1930013.93121	0.043	0.00297	14.49881	2.67407	14.47304
11:00-12:00	3469383.20654	0.123	0.00704	17.47877	2.86099	15.05949
12:00-13:00	5072570.07285	0.260	0.01392	18.67145	2.92700	15.43936
13:00-14:00	5690924.53784	0.398	0.02036	19.54815	2.97288	15.55438
03/01/2012						
Hora (h)	Ra_1 (y_1)	m_{e1} (kg)	R_1	m_{e1}/R_1 (z_1)	$\ln z_1$ (z'_1)	$\ln y_1$ (y'_1)
9:00-10:00	1196542.60744	0.019	0.00187	10.18312	2.32073	13.99495
10:00-11:00	2008961.45781	0.052	0.00355	14.65560	2.68482	14.51313
11:00-12:00	3125470.25280	0.107	0.00685	15.61362	2.74814	14.95510
12:00-13:00	3322256.84003	0.139	0.00832	16.70454	2.81568	15.01615
13:00-14:00	3065282.75093	0.133	0.00822	16.17635	2.78355	14.93565
14:00-15:00	2542799.55057	0.105	0.00690	15.21271	2.72213	14.74878
15:00-16:00	2132308.47502	0.082	0.00567	14.46742	2.67190	14.57272
16:00-17:00	1883221.57058	0.065	0.00476	13.65254	2.61393	14.44849
16/01/2012						
Hora (h)	Ra_1 (y_1)	m_{e1} (kg)	R_1	m_{e1}/R_1 (z_1)	$\ln z_1$ (z'_1)	$\ln y_1$ (y'_1)
10:00-11:00	1581764.01726	0.024	0.00202	11.87531	2.47446	14.27405
11:00-12:00	2791400.27350	0.068	0.00438	15.52207	2.74226	14.84205
12:00-13:00	4203115.88901	0.154	0.00892	17.26637	2.84876	15.25134
13:00-14:00	4438724.09039	0.193	0.01148	16.81185	2.82208	15.30588
14:00-15:00	4497979.11030	0.244	0.01389	17.56901	2.86614	15.31914
15:00-16:00	4064664.58175	0.233	0.01396	16.69635	2.81519	15.21784

ANEXO VI

BLOQUES DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR

Figura V.1 Ventana principal del programa de simulación

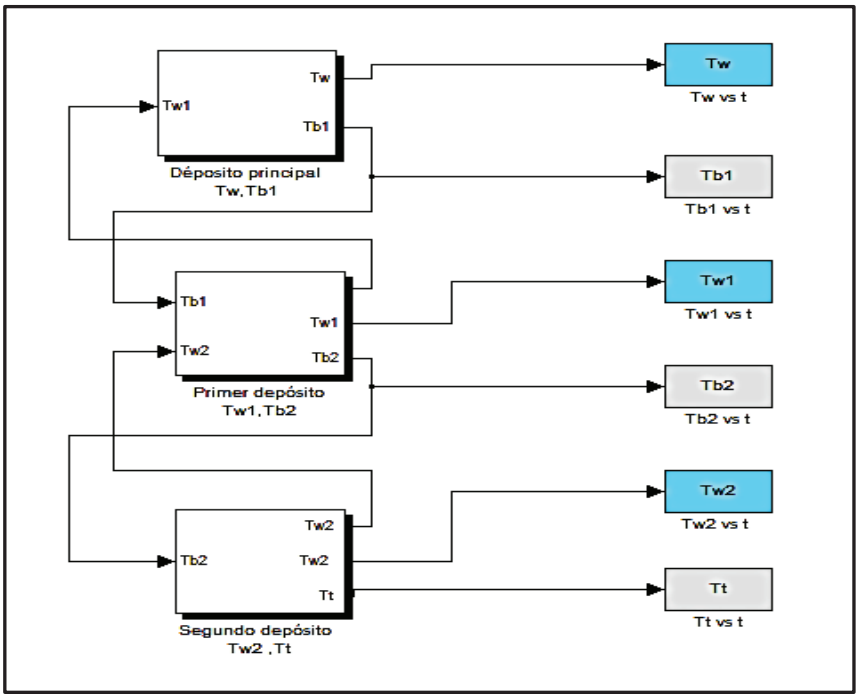


Figura V.2 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Depósito principal

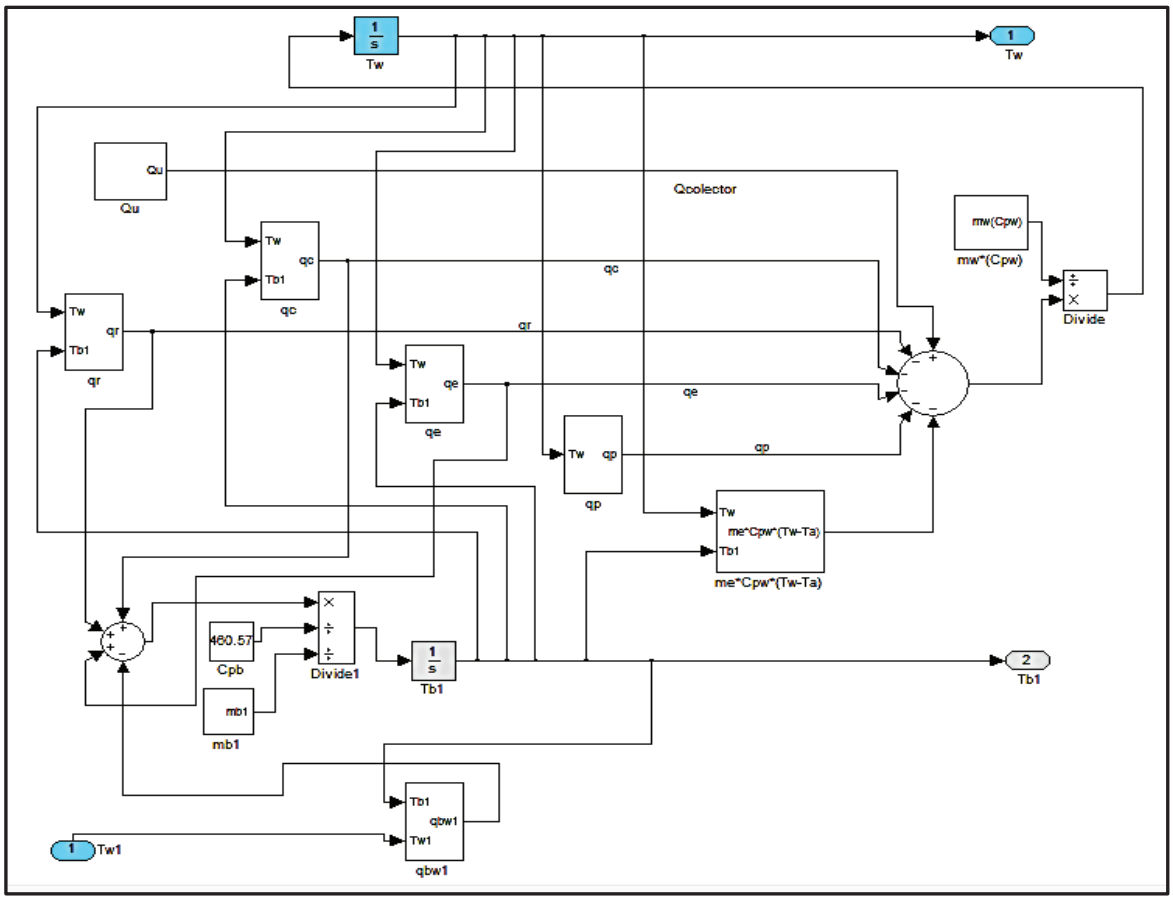


Figura V.3 Bloques Step de la energía entregada por el colector solar

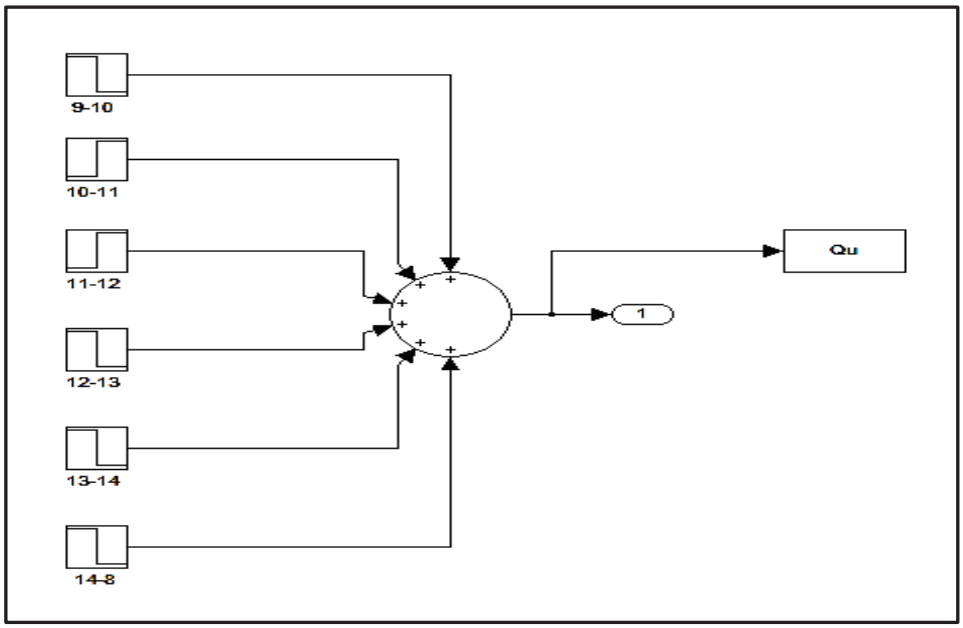


Figura V.4 Bloques del flujo de calor por radiación entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_r

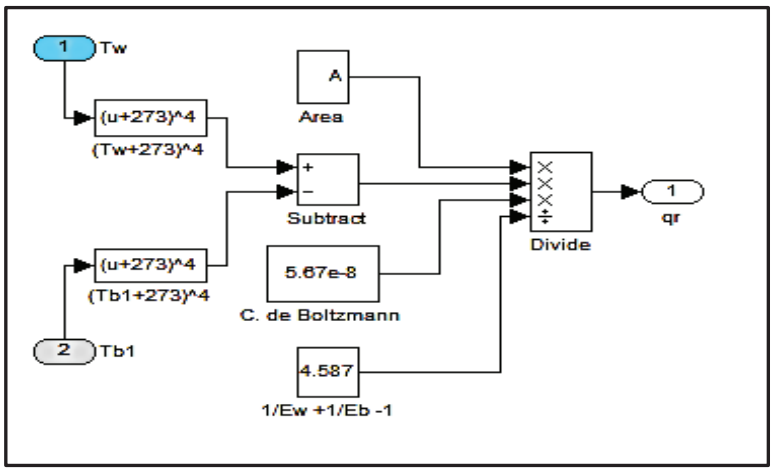


Figura V.5 Bloques del flujo de calor por convección entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_c

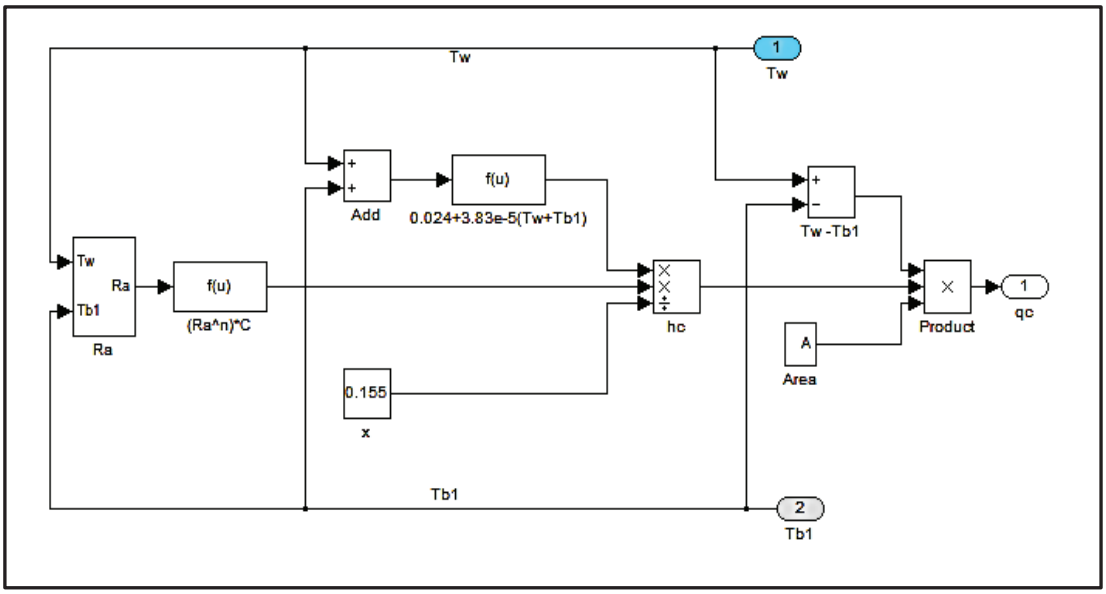


Figura V.6 Bloques para el cálculo del número de Rayleigh (Ra) del flujo de calor por convección, q_c

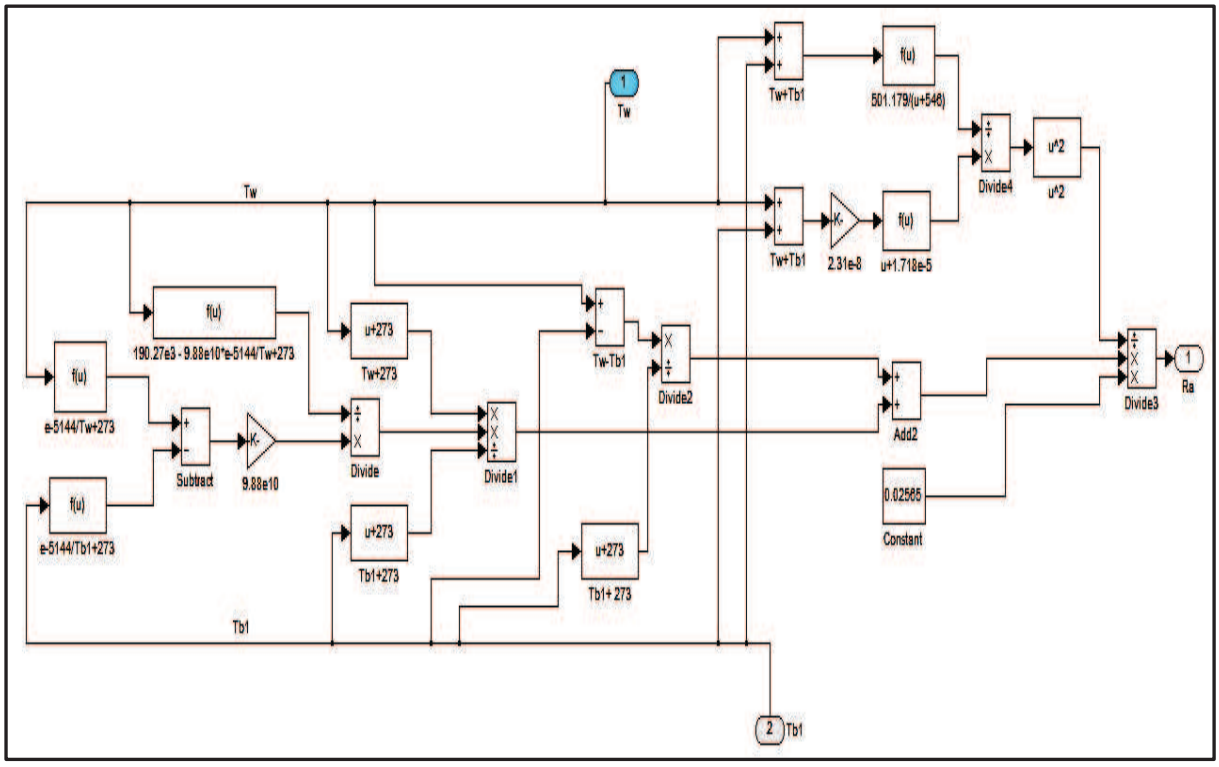


Figura V.7 Bloques del flujo de calor por evaporación entre el agua del Depósito principal y el fondo del Primer depósito, q_e

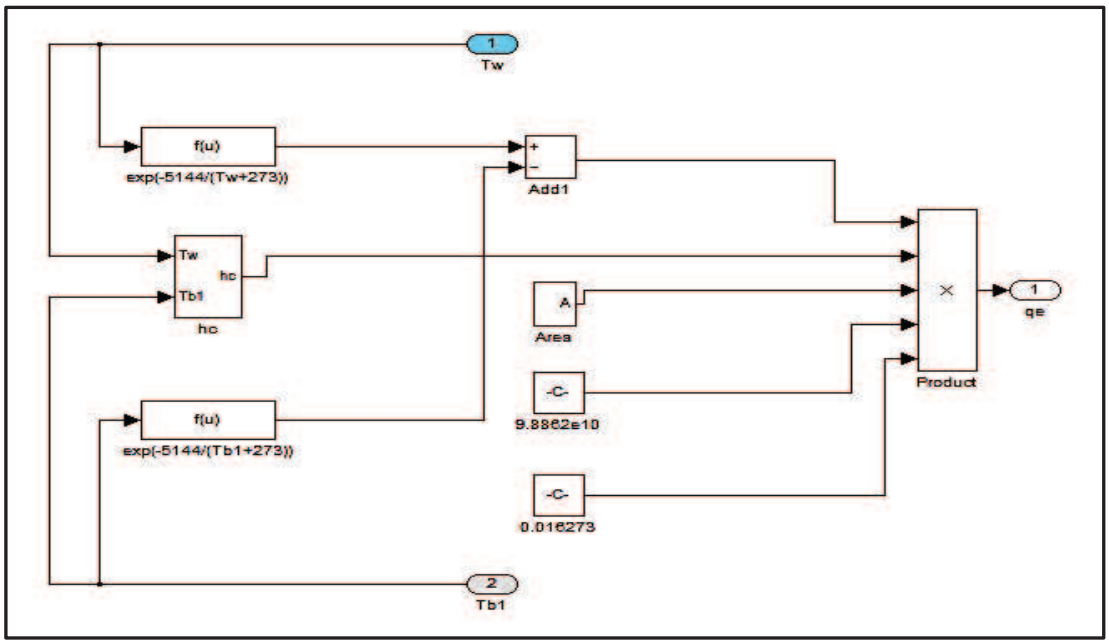


Figura V.8 Bloques del calor perdido desde el agua del Depósito principal hacia el medio ambiente, q_p

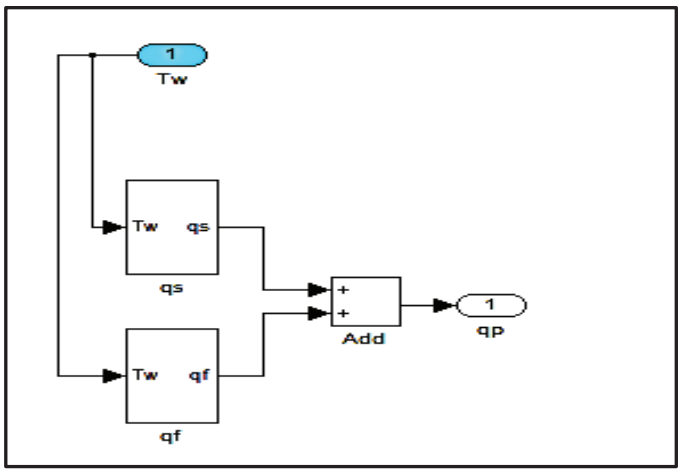


Figura V.9 Sub-bloques del calor perdido a través de las paredes del Depósito principal, q_s

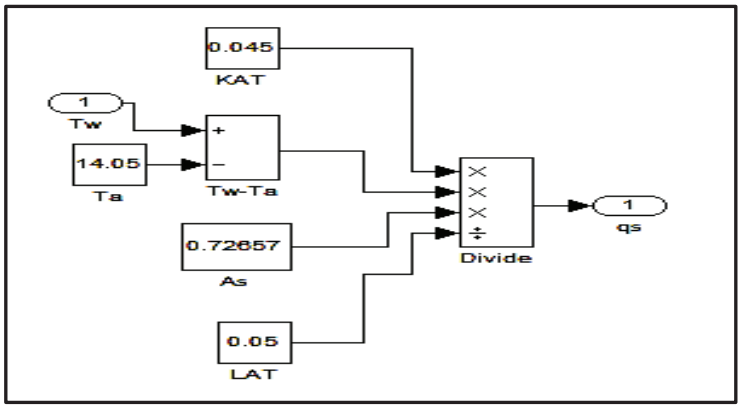


Figura V.10 Sub-bloques del calor perdido por la base del Depósito principal, q_f

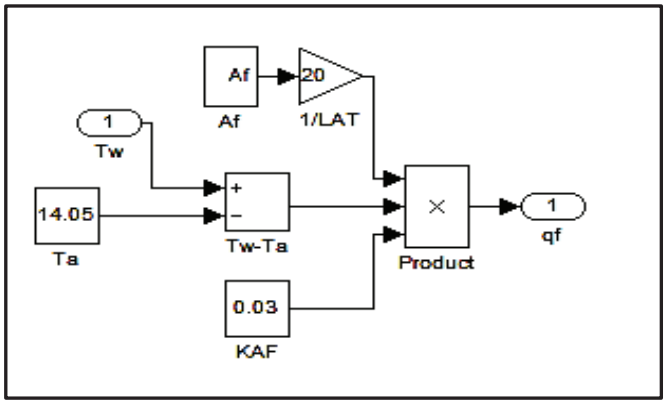


Figura V.11 Bloques para el cálculo de la masa de agua destilada producida en el Depósito principal, $\dot{m}_e$

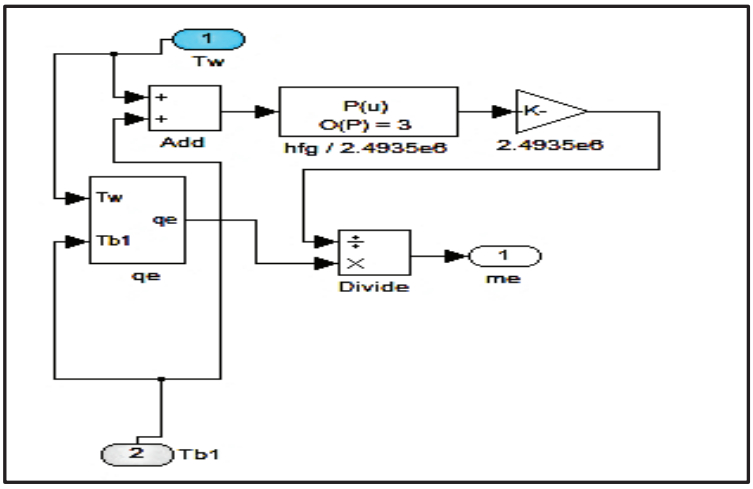


Figura V.12 Bloques del flujo de calor por convección entre el fondo y el agua del primer depósito, q_{bw1}

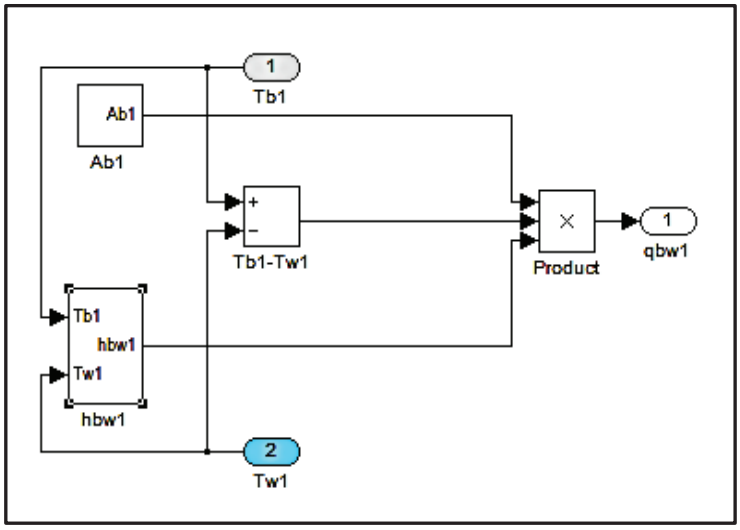


Figura V.13 Bloques del coeficiente de transferencia de calor por convección natural entre el fondo y el agua del primer depósito, h_{bw1}

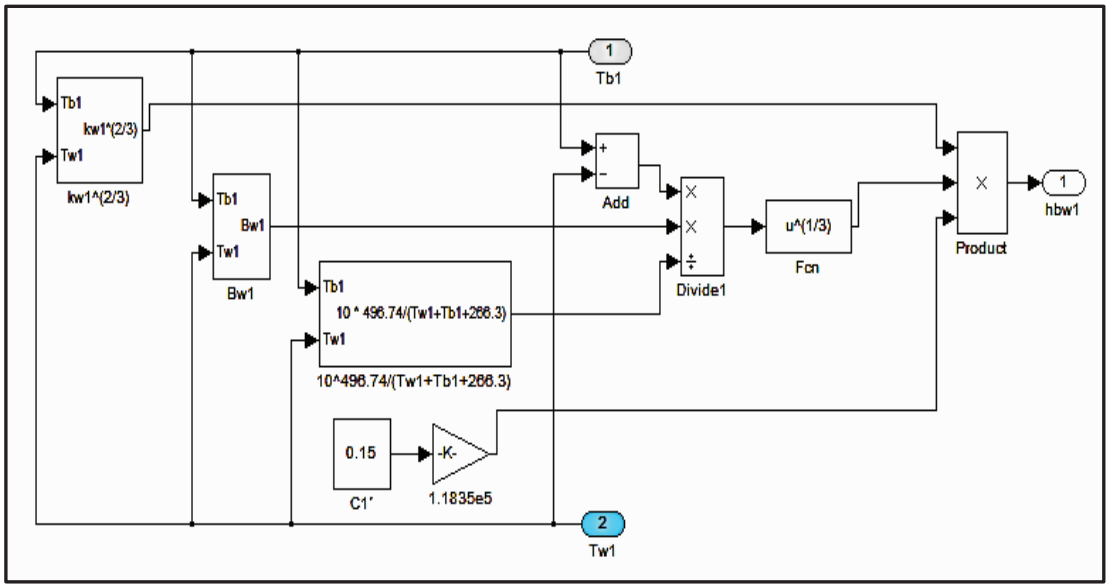


Figura V.14 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Primer depósito

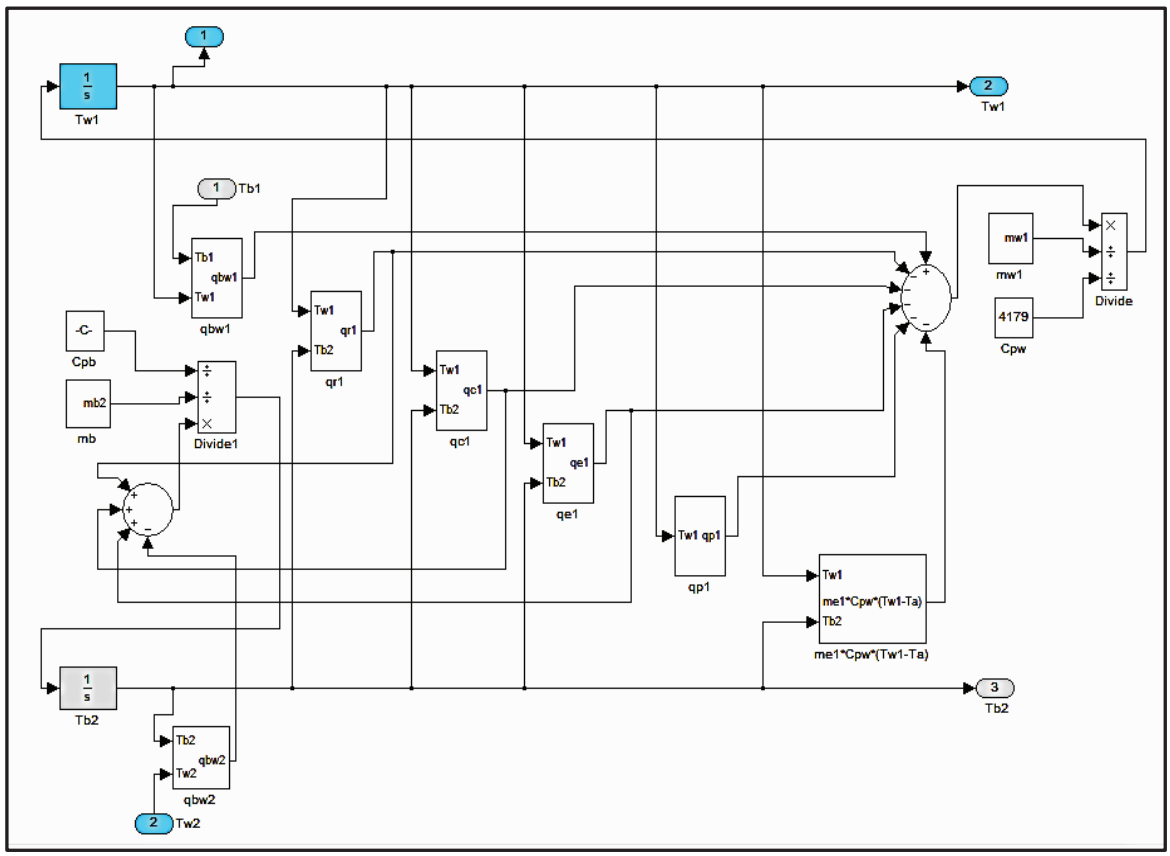


Figura V.15 Bloques de simulación de los flujos de calor y masa en el Segundo Depósito

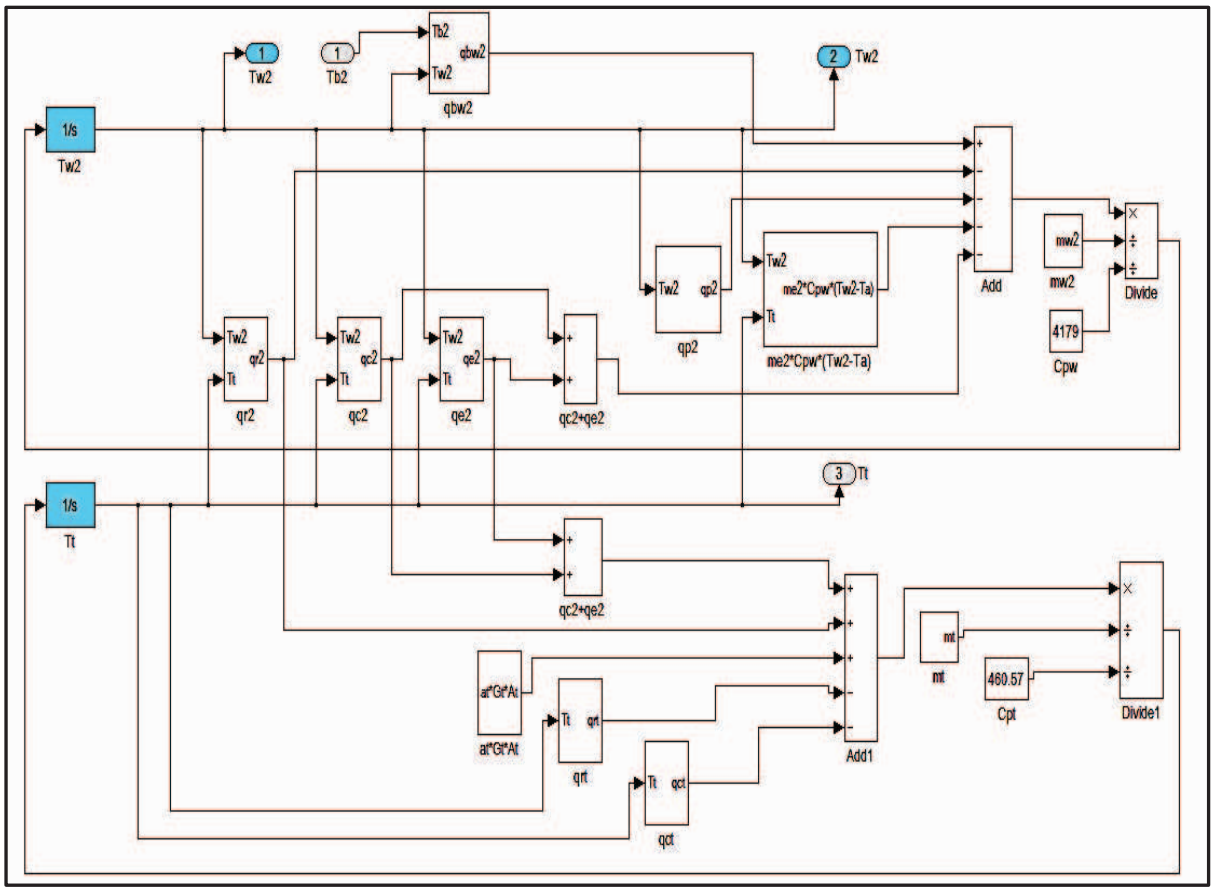


Figura V.16 Bloques de la radiación solar absorbida por la cubierta del Segundo depósito, $\alpha_t \cdot G_t \cdot A_t$

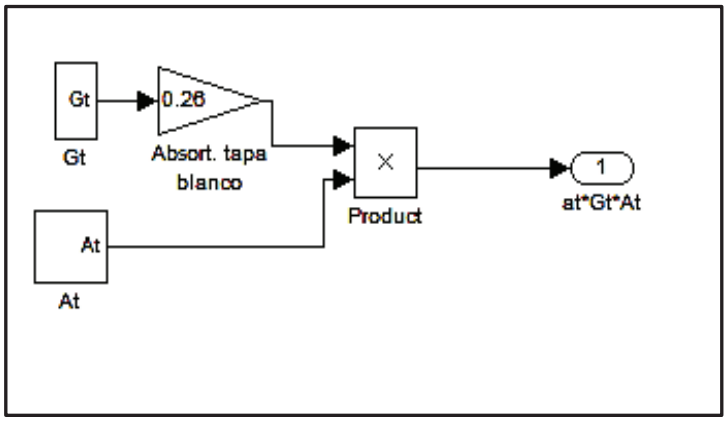


Figura V.17 Bloques Step de la radiación solar incidente sobre la cubierta del Segundo depósito, G_t

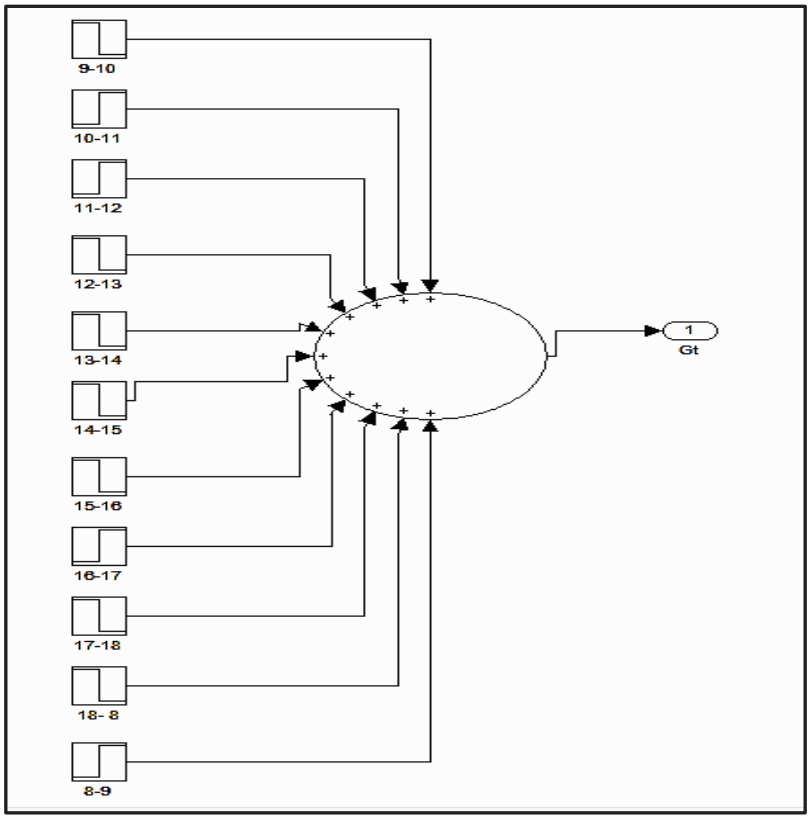


Figura V.18 Bloques del flujo de calor por radiación entre la cubierta del Segundo depósito y el cielo, q_{rt}

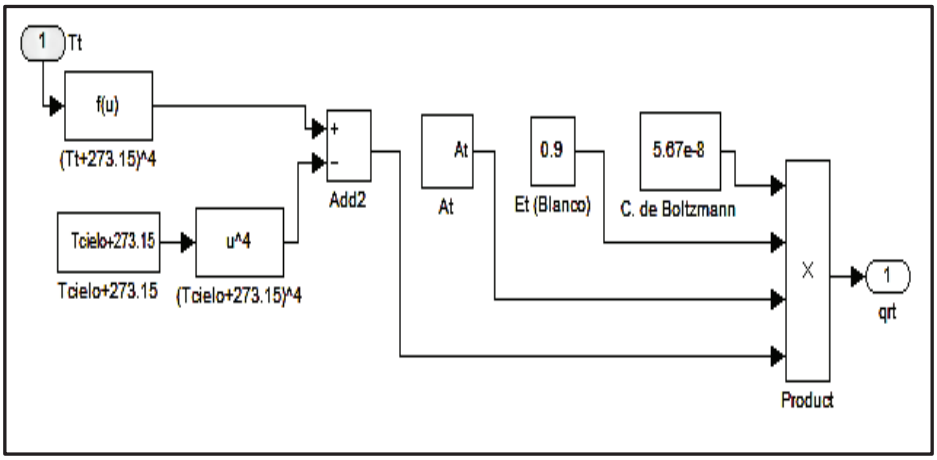


Figura V.19 Bloques para el cálculo de la temperatura del cielo, T_{cielo}

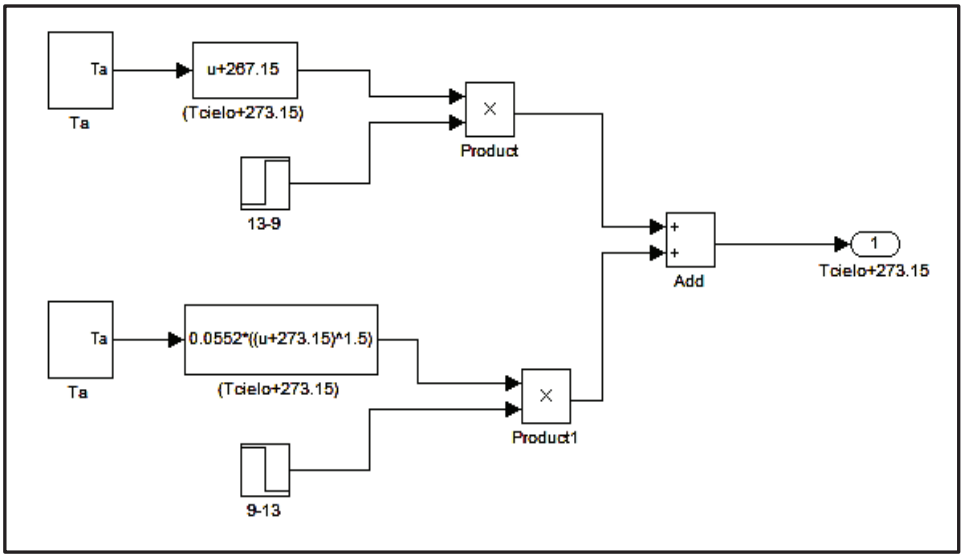


Figura V.20 Bloques Step de la temperatura ambiente promedio, T_a

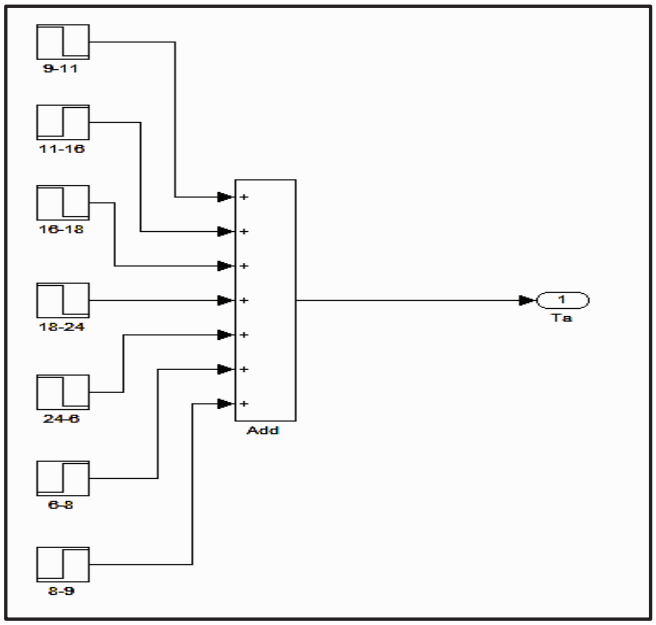


Figura V.21 Bloques del flujo de calor por convección entre la cubierta del Segundo depósito y el medio ambiente, q_{ct}

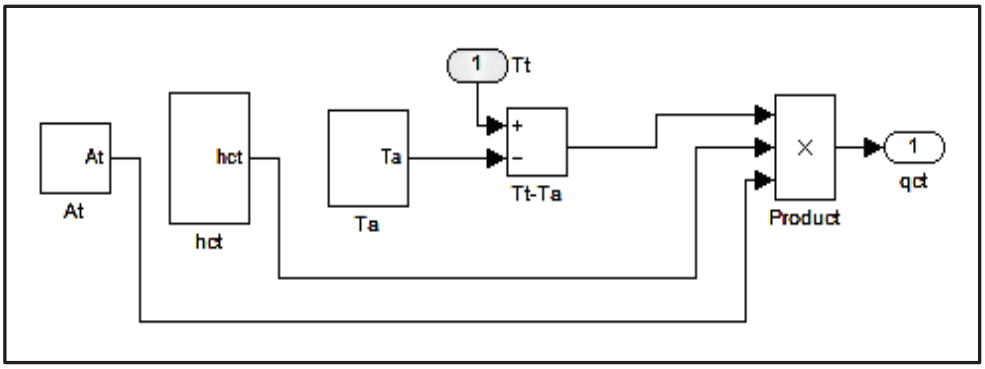


Figura V.22 Bloques del coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el aire circundante, h_{ct}

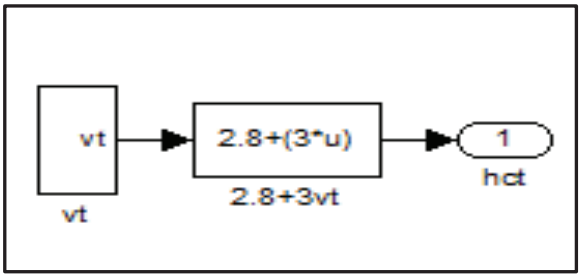


Figura V.23 Bloques Step de la velocidad promedio del viento sobre la cubierta del Segundo depósito, v_t

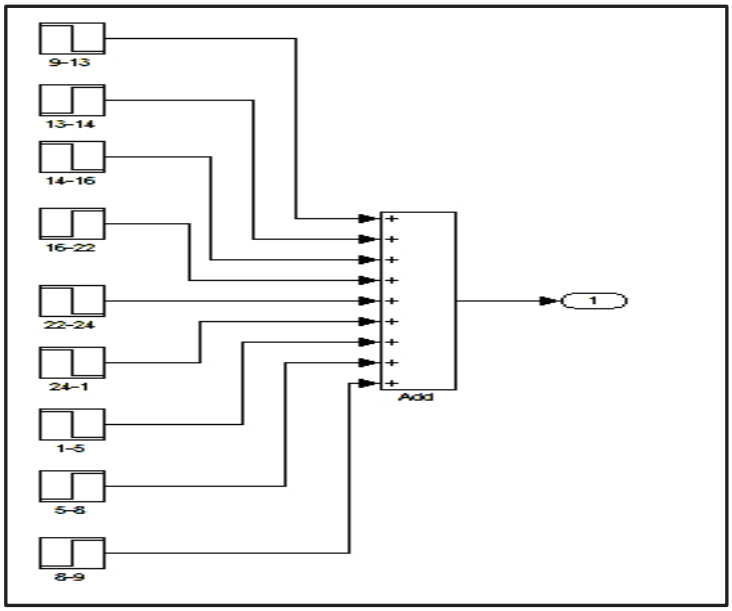
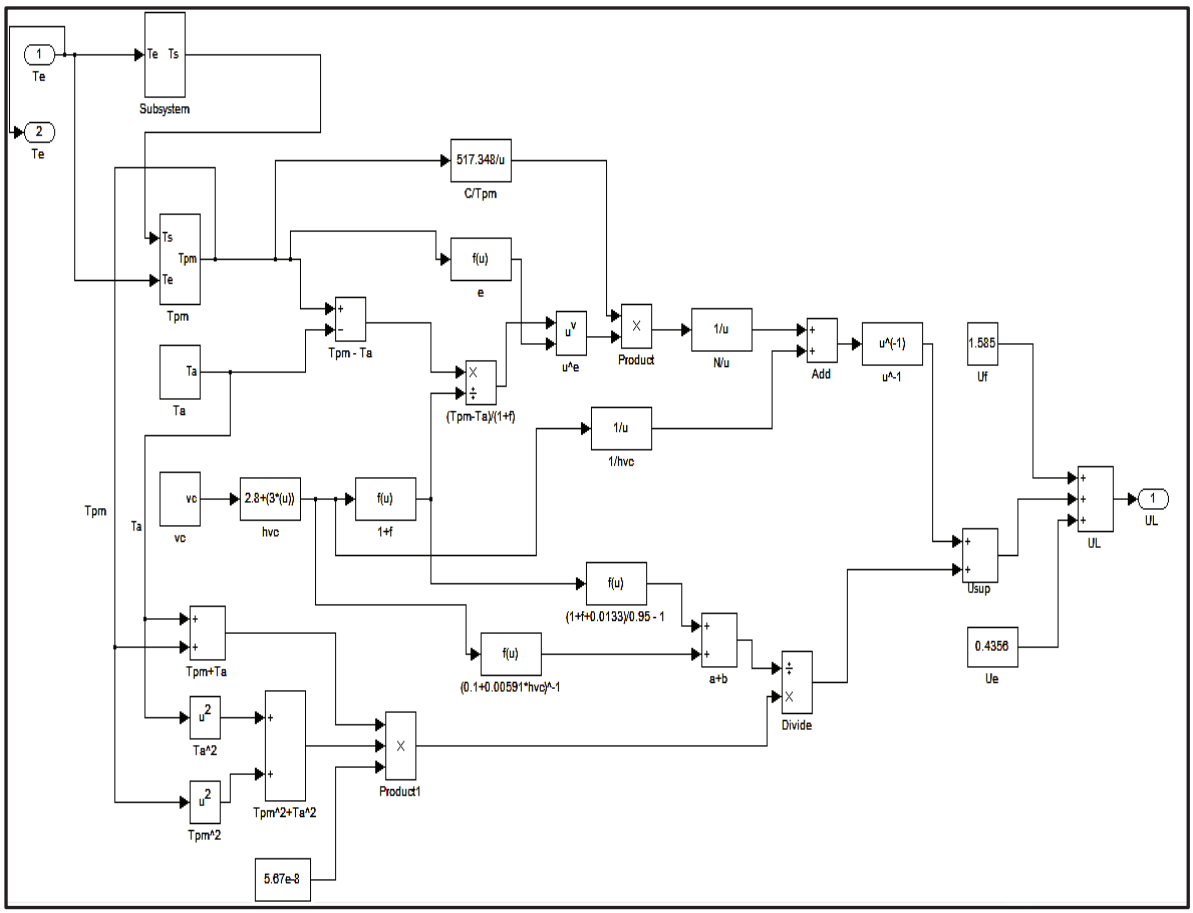


Figura V.24 Sub-bloques del coeficiente total de pérdidas del colector solar (U_L)



ANEXO VII

PLANOS DE CONSTRUCCIÓN DEL DESALINIZADOR SOLAR TÉRMICO