

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN COLECTOR SOLAR
HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).**

**DANIELA JULIANA REY BENAVIDES
SERGIO RAMÓN CONTRERAS GARCÍA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO -MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN COLECTOR SOLAR
HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).**

**DANIELA JULIANA REY BENAVIDES
SERGIO RAMÓN CONTRERAS GARCÍA**

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

Director

**PHD. JULIÁN ERNESTO JARAMILLO IBARRA
Ingeniero Mecánico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO -MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA**

2014

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestros sinceros agradecimientos:

A Dios, por brindarnos las herramientas más importantes para realizar este proyecto: vida y salud.

A la Universidad Industrial de Santander y a la Escuela de Ingeniería Mecánica por ser los gestores de nuestra formación profesional.

Al profesorado de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por compartirnos su conocimiento y experiencia en cada una de las etapas de nuestra carrera.

A nuestro director de proyecto, Ing. Julián Jaramillo, por su orientación, colaboración y dedicación para el desarrollo de esta tesis de grado.

Al profesor, Ing. Omar Gélvez por su ayuda importante e indicaciones durante esta tesis de grado.

A los técnicos profesionales, Henry Cruz, Gonzalo Calderón y Freddy Vargas por su oportuna colaboración en la construcción del prototipo.

A nuestras familias, que nos apoyaron moral y económicamente para llevar a cabo este proyecto de grado, con el fin de alcanzar nuestra meta de ser ingenieros mecánicos.

A nuestros amigos y compañeros que nos acompañaron durante este proceso.

DEDICATORIA

Desde lo más profundo, a Dios por su infinito amor, por siempre acompañarme en los momentos de alegría, de desánimo y de angustia, por ser el amor de mi vida y todo se lo debo a ÉL.

A Mi papá Jorge, por su apoyo incondicional, dedicación, esfuerzo, entrega y amor que siempre me ha demostrado con sus hechos y guiarme para que cumpla de manera satisfactoria mis metas.

A mi mamá Adriana, por su entrega, amor, paciencia, comprensión y ser siempre la mejor de las madres, por creer en mis capacidades y por ayudarme a soñar.

A mi hermana Gabriela, por su compañía, apoyo incondicional y su incomparable ternura.

A mis abuelos Marcos y Ruth, mis tías Alexandra y Mónica y a mis primas Korina y Manuela, por su cariño, apoyo y compañía.

A mi novio Andrés, por su cariño, comprensión y colaboración.

A los amigos (Mafe, Aleja, Mellyssa, Vanessa, Sergio, Jerson y Daniel) que acompañaron y apoyaron en este proceso.

Daniela Juliana Rey Benavides

DEDICATORIA

A Dios todopoderoso por haberme brindado los medios para poder realizar este logro.

A la Virgen María Auxiliadora por su protección y amor desde los cielos, nunca me desamparaste madre mía.

A mi madre Guillermina García, por su total entrega, compañía, amor, ejemplo, protección, comprensión y colaboración.

A mi hermana Andrea Contreras, por su cariño, compañía, consejos y colaboración.

A mi hermano mayor Sergio Andrés Contreras, un ángel que está en el cielo.

A mi hermosa novia María Fernanda Gómez, por su amor, comprensión, apoyo y compañía.

A mis familiares y amigos, personas con las que siempre pude contar.

Les estoy profundamente agradecido, este logro también es de ustedes...

Sergio Ramón Contreras García

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	24
1.FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	26
2.JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA	27
3.OBJETIVOS	29
3.1 OBJETIVO GENERAL	29
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN	31
4.1 CARACTERÍSTICAS DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO	31
5. ENERGÍAS RENOVABLES Y NO RENOVABLES	33
5.1 DEFINICIÓN DE ENERGÍA	33
5.2 ENERGÍAS NO RENOVABLES	33
5.2.1 Inconvenientes de las energías no renovables	34
5.2.2 Energía nuclear	34
5.3 ENERGÍAS RENOVABLES	35
5.3.1 Tipos de energías renovables	36
5.3.1.1 Energía hidráulica	36
5.3.1.2 Energía eólica	37
5.3.1.3 Energía a partir de la biomasa	37
5.3.1.4 Energía geotérmica	39
5.3.1.5 Energía de flujo de mareas o energía tidal	40
5.3.1.6 Energía solar	43
6. ENERGIA SOLAR TERMICA Y FOTOVOLTAICA	44
6.1 RADIACIÓN SOLAR	44
6.1.1 Instrumentos de Medición de radiación solar	46
6.1.2 Posición solar	53
6.2 ENERGIA SOLAR TÉRMICA	57
6.2.1 Colectores solares	62
6.2.1.1 Sistemas de captación: captadores solares de placa plana	63
6.2.2 Sistemas de captación: captadores solares de tubos al vacío	66
6.2.3 Sistemas de captación: concentradores solares	69

6.2.4 Sistemas de circulación del fluido	71
6.2.5 Sistemas de almacenamiento	73
6.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	74
6.3.1 Materiales semiconductores	74
6.3.2 Efecto fotovoltaico	75
6.3.3 Las celdas solares	76
6.3.4 Características de una celda solar	77
6.3.5 Propiedades ópticas de una celda solar	78
6.3.6 Sistemas de conversión de energía fotovoltaica	79
6.3.6.1 Partes de un sistema de conversión de energía fotovoltaica	79
6.3.6.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos	82
6.3.6.3 Sistemas fotovoltaicos conectados a la red	82
6.3.6.4 Tecnologías fotovoltaicas de película delgada (thin film)	83
6.3.6.5 Celdas solares orgánicas.....	84
7. COLECTORES SOLARES HÍBRIDOS (TÉRMICOS Y FOTOVOLTAICOS)	87
7.1 CARACTERÍSTICAS DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO	87
7.1.1 Ventajas de un sistema colector solar híbrido	88
7.1.2 Desventajas de un sistema colector solar híbrido	89
7.2 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO DE PLACA Y TUBOS (Sheet and tube)	89
7.3 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO ACANALADO	90
7.4 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO DE DOBLE ABSORBEDOR	91
7.5 COLECTOR SOLAR HÍBRIDOS CON LENTE CONCENTRADOR.....	92
7.6 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO DE FLUJO LIBRE	92
8. DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	94
8.1 DISEÑO TÉRMICO DEL CAPTADOR DEL COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)	94
8.1.1 Criterios de diseño	94
8.1.2 Selección de materiales	97
8.1.3 Definición de variables de entrada	100
8.1.4 Definición de variables de salida	103
8.1.5 Modelo térmico utilizado	107
8.1.5.1 Esquema de resistencias térmicas del captador solar	108
8.1.5.2 Ecuaciones del modelamiento térmico del captador solar	109

8.1.5.3 Verificación del modelamiento térmico del captador solar	117
8.1.6 Determinación de parámetros a analizar para el diseño	118
8.1.6.1 Datos obtenidos	118
8.1.6.2 Datos a variar	119
8.1.7 Simulación para el diseño térmico del captador solar	120
8.1.7.1 Datos de entrada a la simulación	120
8.1.7.2 Datos obtenidos	120
8.1.7.3 Simulación de parámetros para el diseño del captador solar	122
8.2 DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO	136
8.2.1 Criterios de diseño	137
8.2.2 Cálculo del radio de aislamiento	138
8.3 DISEÑO HIDRÁULICO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTVOLTAICO)	141
8.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTVOLTAICO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO	148
8.4.1 Cálculo de la demanda energética total	149
8.4.2 Selección del módulo fotovoltaico	150
8.4.3 Selección del controlador o regulador de carga	152
8.4.4 Selección de la batería a utilizar	153
8.4.5 Selección del inversor	154
9. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTVOLTAICO)	156
9.1 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL CAPTADOR	156
9.1.1: Placa absorbadora y tubos	156
9.1.2 Unión entre el serpentín de tubo y la placa absorbadora.....	158
9.1.3 Unión entre la placa absorbadora y el módulo fotovoltaico.....	159
9.1.4 Marco interno de madera.	160
9.1.5 Aislamiento interno del captador.	161
9.1.6 Construcción del marco externo de aluminio.....	162
9.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO.	164
9.2.1 Tanque plástico de polietileno.....	165
9.2.2 Carcasa de aluminio.	167
9.2.3 Aislamiento en espuma de poliuretano.	169

9.3 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOSTENIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	171
9.4 MONTAJE GENERAL DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	174
9.4.1 Montaje del captador solar a la estructura.....	174
9.4.2 Montaje del sistema hidráulico.....	175
9.4.3 Montaje del sistema fotovoltaico.....	177
10.PRUEBAS Y ANÁLISIS DE DATOS COLECTOR SOLAR HÍBRIDO	180
10.1 SISTEMAS DE ADQUISICIÓN DE DATOS	180
10.2 DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE PARA LAS PRUEBAS	184
10.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	187
10.4 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELAMIENTO TEÓRICO Y COMPARACIÓN CON LAS PRUEBAS REALIZADAS AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	207
11. COMPARACION ENTRE EL CAPTADOR SOLAR DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO RESPECTO AL CAPTADOR SOLAR EN UN COLECTOR DE PLACA PLANA Y UN MÓDULO FOTOVOLTAICO SEPARADOS	216
12. COSTOS DEL PROYECTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO.....	223
13. CONCLUSIONES.....	226
14. RECOMENDACIONES.....	229
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	230
BIBLIOGRÁFÍA	234
ANEXOS	237

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Partes principales de un sistema colector híbrido (Térmico y fotovoltaico).	32
Figura 2. Central de energía nuclear.....	35
Figura 3. Represa para generación de energía eléctrica.....	36
Figura 4. Fuentes de producción de energía eléctrica en Colombia, año 2008.....	37
Figura 5. Campo de turbinas eólicas en tierra y mar	38
Figura 6. Generación de biomasa.....	39
Figura 7. Planta de energía geotérmica.	40
Figura 8. Represa marítima La Rance, Francia.....	41
Figura 9. Turbinas de propulsión sumergidas.	42
Figura 10. Sistema semi-sumergido de conversión de energía de marea..	42
Figura 11. Central solar térmica.	43
Figura 12. Esquema sobre radiación solar incidente y constante solar	45
Figura 13. Gráfica del espectro de la radiación solar	46
Figura 14. Piranómetro para radiación total horizontal	48
Figura 15. Piranómetro para radiación difusa	48
Figura 16. Partes de un piranómetro.....	49
Figura 17. Pirheliómetro Angstrom	50
Figura 18. Partes de un pirheliómetro.....	50
Figura 19. Pirheliómetro sensovant primera clase	51
Figura 20. Solarímetro electrónico	51
Figura 21. Heliómetro.....	52
Figura 22. Esquema representativo de la latitud y longitud terrestre	53
Figura 23. Movimiento de la tierra en torno al sol.....	55
Figura 24. Declinación solar	55
Figura 25. Ángulo horario	56
Figura 26. Ángulos de posición solar	57
Figura 27. Absorción, reflexión y transmisión.....	59
Figura 28. Sistema de producción de agua caliente.....	60
Figura 29. Sistema para climatización de piscinas	60
Figura 30. Calefacción solar	61

Figura 31. Sistema basado en enfriadora térmica de absorción o de adsorción accionada por energía solar para enfriamiento de agua	62
Figura 32. Vista en corte de un captador solar de placa plana	66
Figura 33. Tubo de vacío simple.....	67
Figura 34. Tubo de vacío de flujo directo	68
Figura 35. Esquema de un tubo de calor	69
Figura 36. Concentrador solar cilíndrico parabólico	71
Figura 37. Sistema de circulación termosifónico	72
Figura 38. Sistema de circulación forzada	73
Figura 39. Tanque de almacenamiento (acumulador e intercambiador con sistema auxiliar de calentamiento).....	74
Figura 40. Efecto fotovoltaico en un semiconductor	76
Figura 41. Esquema celda solar	77
Figura 42. Curva característica de una celda solar	78
Figura 43. Esquema de una superficie texturada de una celda solar	79
Figura 44. Panel o módulo fotovoltaico	79
Figura 45. Regulador de carga	80
Figura 46. Batería solar	81
Figura 47. Inversor	81
Figura 48. Sistema fotovoltaico autónomo	82
Figura 49. Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica	83
Figura 50. Celda fotovoltaica de película delgada.....	84
Figura 51. Celdas solares transparentes	84
Figura 52. Celda solar orgánica	86
Figura 53. Esquema general de un colector solar híbrido	87
Figura 54. Colector solar híbrido de placa y tubos.	90
Figura 55. Colector solar híbrido acanalado.	91
Figura 56. Colector solar híbrido de doble absorbedor.....	91
Figura 57. Colector solar híbrido con lente concentrador	92
Figura 58. Colector solar híbrido de flujo libre.....	93
Figura 59. Partes del captador.....	97
Figura 60. Esquema térmico del captador solar (flujos de calor).....	107
Figura 61. Esquema de resistencias térmicas en el captador solar.....	109
Figura 62. Esquema de resistencias térmicas simplificadas.....	112

Figura 63. Analogía del módulo fotovoltaico-placa absorbedora como una aleta	114
Figura 64. Cuadro sinóptico de los datos geométricos del captador solar	119
Figura 65. Cuadro sinóptico de las condiciones de operación	120
Figura 66. Cuadro sinóptico de los datos del material de la placa absorbedora	120
Figura 67. Guide MATLAB simulación de parámetros para el diseño del captador solar	123
Figura 68. Diagrama de flujo para la simulación de parámetros para el diseño del captador solar	124
Figura 69. Gráficas diámetro interno respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar	126
Figura 70. Gráficas paso entre tubos respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar	128
Figura 71. Gráficas espesor del aislante respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar	130
Figura 72. Gráficas espesor de la capa de pegante respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar	132
Figura 73. Gráficas flujo másico respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar	134
Figura 74. Capas del tanque de almacenamiento	138
Figura 75. Esquema de resistencias térmicas en el tanque de almacenamiento	138
Figura 76. Esquema del circuito hidráulico	141
Figura 77. Tramo de tubería de aluminio	142
Figura 78. Puntos de análisis del sistema hidráulico	143
Figura 79. Guide de MATLAB para el cálculo de la bomba en el colector solar híbrido	146
Figura 80. Diagrama de flujo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico	148
Figura 81. Guide en MATLAB para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico	150
Figura 82. Módulo fotovoltaico YINGLI SOLAR.....	152
Figura 83. Controlador de carga INTELLIGENT DC-DC.....	153
Figura 84. Batería seleccionada MTEK 121050.....	154
Figura 85. Inversor escogido marca COBRA.....	155
Figura 86. Cable eléctrico de conexión para la batería.....	155
Figura 87. Placa absorbedora	157
Figura 88. Serpentín de tubo de aluminio	157
Figura 89. Soldadura de los tubos y la placa absorbedora	158
Figura 90. Placa absorbedora y tubos de aluminio	159

Figura 91. Aplicación del pegante al módulo fotovoltaico	159
Figura 92. Unión entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbadora	160
Figura 93. Marco interno de madera	160
Figura 94. Colchón de aislamiento de lana de vidrio	161
Figura 95. Montaje del aislamiento en el marco interno.	161
Figura 96. Montaje módulo fotovoltaico, placa absorbadora y marco interno de madera.....	162
Figura 97. Elementos componentes del marco externo.....	163
Figura 98. Marco externo de aluminio y sus partes	163
Figura 99. Marco externo de aluminio del captador solar	163
Figura 100. Captador del colector solar híbrido	163
Figura 101. Tanque de almacenamiento completo en Solidworks.....	165
Figura 102. Tanque plástico de polietileno	166
Figura 103. Unión Tanque-Manguera	166
Figura 104. Tapa del tanque plástico	167
Figura 105. Fondo de la carcasa inferior	168
Figura 106. Proceso de elaboración de la cara inferior y prisma octogonal de la cubierta del tanque	168
Figura 107. Carcasa superior	169
Figura 108. Proceso de aplicación de la espuma de poliuretano	170
Figura 109. Tanque de almacenamiento de agua construido	170
Figura 110. Estructura de sostenimiento sin pintar	172
Figura 111. Sistema de posicionamiento	173
Figura 112. Estructura de sostenimiento pintada y bases de los elementos del colector	173
Figura 113. Pieza de fijación del captador-estructura	174
Figura 114. Pieza de fijación del captador-estructura instalado	174
Figura 115. Válvula reguladora de caudal (cortina)	175
Figura 116. Aislamiento de la manguera	176
Figura 117. Bomba de circulación de agua instalada	177
Figura 118. Batería en la estructura	178
Figura 119. Regulador e inversor en la estructura	178
Figura 120. Esquema de conexiones del sistema fotovoltaico	179
Figura 121. Montaje general del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico).....	179
Figura 122. Esquema de conexión field-point.....	180
Figura 123. Interfaz gráfica en LabView para adquisición de datos	181

Figura 124. Programación gráfica en LabView para adquisición de datos	182
Figura 125. Prueba del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)	184
Figura 126. Multímetro de pinzas Fluke	185
Figura 127. Esquema de medición eléctrica del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)	185
Figura 128. Gráfica de calor captado ($q_{s\beta}$) y calor útil (q_u) vs. Tiempo del colector solar híbrido	195
Figura 129. Eficiencia térmica vs Tiempo del colector solar híbrido	197
Figura 130. Gráficas eficiencia térmica vs Temperatura reducida del colector solar híbrido..	199
Figura 131. Gráficas temperatura del tanque vs Tiempo del colector solar híbrido	201
Figura 132. Eficiencia eléctrica vs. Temperatura del panel del colector solar híbrido.....	203
Figura 133. Potencia eléctrica vs tiempo producida por el módulo fotovoltaico en el colector solar híbrido.....	204
Figura 134. Gráficas irradiación, calor útil (real y teórico) vs. Tiempo	208
Figura 135. Gráficas eficiencia térmica (real y teórico) vs. Tiempo	209
Figura 136. Gráficas eficiencia térmica vs temperatura reducida (real y teórico)	211
Figura 137. Eficiencia eléctrica vs. Temperatura del panel (real y teórico)	213
Figura 138. Potencia eléctrica vs tiempo producida por el módulo fotovoltaico en el colector solar híbrido (real y teórica)	214
Figura 139. Diagrama de flujo de la simulación de un captador solar de un colector de placa plana	218
Figura 140. Colector solar híbrido (captador solar), colector placa plana (captador solar) y módulo fotovoltaico.	219
Figura 141. Gráfica comparativa entre un colector de placa plana y un colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) de eficiencia térmica respecto a la temperatura reducida	222

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos para la simulación de parámetros a analizar para el diseño	121
Tabla 2. Resultados de la variación de la conductividad térmica de la placa absorbedora	135
Tabla 3. Valores de entrada para el cálculo del radio de aislamiento del tanque	139
Tabla 4. Dimensiones finales de diseño del tanque de almacenamiento	140
Tabla 5. Rugosidades de materiales	144
Tabla 6. Datos de entrada para el diseño hidráulico del colector solar híbrido ...	145
Tabla 7. Resultados del diseño hidráulico	146
Tabla 8. Tabla de carga del sistema fotovoltaico	149
Tabla 9. Características eléctricas del panel solar YINGLI SOLAR JS 145P-17	151
Tabla 10. Especificaciones del regulador de carga.	152
Tabla 11. Descripción de bloques LabView	183
Tabla 12. Condiciones de operación del captador solar	186
Tabla 13. Condiciones de operación del sistema fotovoltaico	187
Tabla 14. Variables a analizar en el colector solar híbrido (térmico)	187
Tabla 15. Variables a analizar en el colector solar híbrido (fotovoltaico)	187
Tabla 16. Resultados de prueba realizada el 5 de agosto (captador solar)	189
Tabla 17. Resultados de prueba realizada el 6 de agosto (captador solar)	190
Tabla 18. Resultados de prueba realizada el 15 de agosto (captador solar)	191
Tabla 19. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 5 de agosto	192
Tabla 20. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 6 de agosto	193
Tabla 21. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 15 de agosto	194

Tabla 22. Resultados finales de las pruebas realizadas al colector solar híbrido	206
Tabla 23. Resultados comparativos teóricos y reales en el colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico).....	207
Tabla 24. Parámetros eléctricos y especificaciones del módulo fotovoltaico Yingli Solar YL70P-17b	217
Tabla 25. Resultados de simulación de colector solar de placa plana (captador) en MATLAB	220
Tabla 26. Comparación entre colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), colector de placa plana y módulo fotovoltaico	221
Tabla 27. Costos del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico).....	223

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. COMPORTAMIENTO REAL RESPETO AL TEÓRICO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO PERTENECIENTE AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).....	238
ANEXO B. GRÁFICAS DE LAS TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO) VS TIEMPO DE OPERACIÓN	240
ANEXO C. PRUEBA REALIZADA EL 8 DE AGOSTO: FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO SIN CIRCULACIÓN DE AGUA POR EL CAPTADOR SOLAR.....	242
ANEXO D. MEDICIONES REALIZADAS POR LAS TERMOCUPLAS, PIRÁNÓMETROS, VOLTÍMETROS Y PINZAS AMPERIMÉTRICAS AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)	244
ANEXO E. ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN DE LA RADIACIÓN DEL COLECTOR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)	251
ANEXO F. PLANOS CAD DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)	254
ANEXO G. MANUAL DE USUARIO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO	277

RESUMEN

TÍTULO:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).

AUTORES:

Daniela Juliana Rey Benavides

Sergio Ramón Contreras García**

PALABRAS CLAVE:

COLECTOR SOLAR HIBRIDO, TÉRMICO, FOTOVOLTAICO, COMBI-PANEL.

DESCRIPCIÓN:

El sol es la fuente de energía más importante para la tierra, actualmente, la demanda de energía está creciendo aún más y las energías renovables como la energía solar, están tomando interés en la vida de la humanidad. Además un factor de relevancia es el espacio disponible para instalar cada dispositivo de energía solar. A veces el espacio es una limitación, cuando la energía solar térmica y fotovoltaica se necesita al mismo tiempo, pero si no hay espacio suficiente, los sistemas híbridos toman parte en la ingeniería con el fin de resolver este problema.

Este trabajo muestra una investigación de un tipo de sistemas híbridos, los colectores híbridos térmicos y fotovoltaicos, algunos conceptos de diseño, haciendo énfasis en el colector solar híbrido de placa y tubos, el modelo matemático que permite su diseño y simulación, los materiales de los cuales está hecho, el proceso de construcción de un prototipo de un colector solar híbrido térmico y fotovoltaico, los componentes de la parte térmica como el tanque de almacenamiento de agua y la parte fotovoltaica que permite la alimentación eléctrica a la bomba de circulación, incluyendo la respectiva selección con base en los requerimientos o condiciones de operación.

Se desarrolla un modelo matemático que permite analizar el comportamiento del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), luego se muestra una comparación hecha entre el modelo teórico y los resultados de las pruebas realizadas con el prototipo construido. La diferencia entre la teoría y la realidad se calculó y con base en los resultados, la característica principal de un colector solar híbrido térmico y fotovoltaico se comprueba: menor eficiencia pero mayor producción de energía que la misma área de captación parcialmente separada en un módulo fotovoltaico y un colector solar térmico.

* Trabajo de Grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PHD. Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Ingeniero Mecánico.

ABSTRACT

TITLE:

DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SOLAR THERMAL PHOTOVOLTAIC HYBRID COLLECTOR PROTOTYPE*

AUTHORS:

Daniela Juliana Rey Benavides

Sergio Ramón Contreras García**

KEYWORDS:

SOLAR THERMAL PHOTOVOLTAIC HYBRID COLLECTOR, COMBI-PANEL.

DESCRIPTION:

The sun is the most important source of energy for the earth, nowadays the energy demand is growing even more and renewable energies like solar energy are taking interest in mankind life. Furthermore a fact of relevance is the available space to install every solar energy device. Sometimes the space is a limitation when solar thermal and photovoltaic energy is needed at the same time, but if there is not enough space, the hybrid systems become part in engineering in order to solve this problem.

This work shows an research of one kind of hybrid systems, the solar thermal photovoltaic hybrid collectors, some design concepts, emphasizing on the tube and sheet hybrid solar collector, the mathematical model that allows its design and simulation, the materials it is made of, the construction process of a solar thermal photovoltaic hybrid collector prototype, the components of the thermal part as the water storage tank and the photovoltaic part that allows the electrical feeding to the circulation pump, including the respective selection based on the operation requirements or conditions.

A mathematical model is developed. It allows analyzing the performance of the solar thermal photovoltaic hybrid collector. Then a comparison made between the theoretical model and the results of the tests made with the constructed prototype is shown. The difference between the theory and reality is calculated. Based on the results, the main characteristic of a solar thermal photovoltaic hybrid collector is proved: less efficiency but more energy production than the same collecting area partially separated in a photovoltaic module and a solar thermal collector.

* Degree Thesis

** Physical Mechanical Engineer Faculty. Mechanical Engineering School. Director: PHD. Julián Ernesto Jaramillo Ibarra, Mechanical Engineer.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se pueden apreciar los impactos negativos sobre el medio ambiente que genera la explotación de los recursos no renovables, provocando escasez de los mismos ante una población mundial en crecimiento y por consiguiente una demanda energética mayor. Para evitar una crisis energética global se están promoviendo las energías alternativas que ofrecen soluciones sostenibles y ecológicas que protejan el entorno y permitan satisfacer las necesidades de la humanidad.

El sol es la fuente principal de energía que llega a la superficie terrestre, ya que de él dependen la mayoría de procesos naturales presentes en el planeta, todos los días envía grandes cantidades de energía radiante hacia la tierra que permiten el desarrollo de la vida.

Tomando como referencia la inminente crisis energética mundial, el constante crecimiento de la población originando un espacio cada vez más reducido y los problemas ligados a la explotación de energías no renovables, hacen necesaria una solución funcional y compacta que permita aprovechar una fuente de energía (solar) y convertirla de manera dual (térmica y eléctrica), sin generar contaminación y sin ocupar mucho espacio.

En este proyecto se muestra el diseño y construcción de un sistema de calefacción de agua por circulación forzada totalmente autónomo, que aprovecha la energía solar para convertirla en energía térmica y eléctrica de forma simultánea en una misma área de captación, aprovechando dicha energía eléctrica para el funcionamiento de la bomba de circulación del sistema.

La metodología a seguir para el diseño de este prototipo de calefacción llamado: *COLECTOR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)* fue la siguiente.

Revisión del estado del arte de la energía solar, sus mecanismos de aprovechamiento: térmicos y fotovoltaicos. Los subsistemas o elementos que los constituyen, funcionamiento, principios físicos y termodinámicos.

Estudio sobre los colectores solares híbridos térmicos y fotovoltaicos “PVT” o “combipaneles”, principio de funcionamiento, criterios de diseño, modelos matemáticos de un colector híbrido, similitudes y modificaciones respecto al modelo de un colector solar térmico, aspectos de manufactura, características, ventajas y desventajas.

Una vez realizada la revisión del estado del arte, se procedió a seleccionar un criterio de diseño del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), con el que se tuvo en cuenta la disponibilidad de elementos constituyentes del mismo y la complejidad de la manufactura, dando como resultado un colector solar híbrido de placa plana, seleccionando el respectivo modelo matemático para realizar una simulación del comportamiento en MATLAB. Sin embargo para dimensionar el sistema se debe tener en cuenta principalmente el tamaño del módulo fotovoltaico y sus respectivos elementos auxiliares que a su vez dependen de la energía requerida por el sistema (bomba de circulación). Para seleccionar la bomba se retoman conceptos de pérdidas en tubería. Luego se diseña el tanque de almacenamiento cuyo criterio principal es almacenar el agua caliente en un periodo de 24 horas. Se realiza un diseño CAD del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), de acuerdo al dimensionamiento se procede a la construcción del prototipo.

Finalmente un sistema de medición se hace necesario para poder conocer, predecir y comparar el comportamiento del sistema; con la ayuda del software LabView y un programa con su respectiva interfaz gráfica se permiten visualizar las variables de importancia que deben ser medidas en el estudio del colector solar híbrido térmico y fotovoltaico.

1. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El planteamiento del problema se enfoca en la necesidad de generar una alternativa a los sistemas de calefacción convencionales, los cuales representan un costo energético adicional, para el usuario y un impacto ambiental a largo plazo, contribuyendo a crear conciencia sobre la aplicación de sistemas que utilicen energías renovables para satisfacer una necesidad de obtener agua sanitaria a una temperatura agradable.

Los sistemas de calefacción de agua por captación de energía solar, se clasifican según como se presenta la circulación del fluido a través de ellos en dos grandes categorías: sistemas de circulación forzada y sistema de circulación natural, estos dos sistemas son una buena opción ya que cumplen con el objetivo de calentar el agua, sin embargo para llevar a cabo esta función, presentan ciertas desventajas: En los sistemas de circulación forzada, se suele utilizar una bomba centrífuga, para que el agua del tanque fluya a través del colector y retorne al tanque a mayor temperatura, siendo una desventaja el consumo de energía eléctrica que esta bomba origina, sabiendo de ante mano, que esta proviene de la red eléctrica, la cual es producida por termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles o hidroeléctricas, que alteran los ecosistemas al construir las represas. Los sistemas de circulación natural (termosifónicos) son una solución al impacto ambiental y la disponibilidad de electricidad, porque son independientes debido a la no utilización de bomba centrífuga, y por consiguiente de energía eléctrica, sin embargo, también tiene ciertas desventajas, ya que tiende a ser un sistema rígido, en el cual se necesita que el tanque tenga cierta elevación con respecto al colector, los caudales generados por el efecto termosifón pueden no ser suficientes para cumplir con la capacidad, siendo limitada su aplicabilidad. El problema de este proyecto es diseñar un sistema de calefacción de agua por circulación forzada que tenga la ventaja de ser autónomo como el sistema de circulación natural, que cumpla con los requerimientos de caudal y que sea funcional.

2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

La energía ha sido y será parte fundamental en el desarrollo de la humanidad desde sus inicios. Su disponibilidad ha estado fuertemente ligada a la actividad económica de una región, sin embargo las fuentes de energía convencional no son ilimitadas. El crecimiento de la población es proporcional al incremento en los requerimientos energéticos y su escasez genera un aumento en los costos y la mayoría de aprovechamientos de estas energías convencionales genera impactos en el medio ambiente.

En un contexto global donde el consumo energético crece exponencialmente, se hace necesario que desde la ingeniería se planteen soluciones, que hagan los sistemas energéticos más eficientes y menos dependientes de la utilización de combustibles fósiles. Es importante destacar que los países europeos han sido pioneros, en la investigación e implementación de sistemas cuyas fuentes energéticas son renovables, por lo pronto hay mucha disponibilidad de ellas en el medio ambiente En el año 2012 a nivel mundial la producción de energías renovables llegó a representar el 2 [%] del consumo mundial, lo cual sigue siendo poco significativo con respecto al dominio del carbón y el petróleo con el 30 [%] y el 33 [%] respectivamente **[1]**.

La energía solar es la principal fuente de energética del planeta, dependiendo de ella todos los fenómenos naturales y el equilibrio en los ecosistemas, la cantidad de energía solar que fluye hacia la tierra es astronómica. Pero debido a la posición del sol respecto a la tierra, los movimientos de rotación y traslación, los trópicos, el relieve de la superficie y las estaciones climáticas, hacen que las disponibilidades de radiación solar sean variables alrededor de la tierra **[2]**.

Colombia, debido a su posición geográfica en el planeta, dentro de la zona tórrida y en la región andina, posee condiciones climáticas variadas y especiales que afectan la disponibilidad del recurso solar, que representa una oportunidad de

energía limpia para un desarrollo sostenible [3]. De esta manera, el territorio nacional tiene un buen potencial energético solar en toda su extensión, con un promedio diario multianual cercano a $4,5 \frac{kW}{m^2}$ [4]. El departamento de Santander, con radiación de $4,0 \frac{kW}{m^2}$ diaria [4] (Valor del mes con menor radiación), cuyas condiciones hacen viable el uso de la energía solar, tanto para aplicaciones térmicas y eléctricas, lo cual hace favorable la investigación, diseño e implementación de estas tecnologías de energías alternativas que nos permitan hacer un mejor aprovechamiento del recurso solar.

El desarrollo de sistemas de aprovechamiento de energía solar se ha dividido en dos grandes grupos: sistemas de energía solar térmica y sistemas fotovoltaicos. Generalmente estos sistemas se han implementado de manera independiente, pero en lugares donde no hay suficiente espacio y el requerimiento es calentar agua sin dependencia de la energía eléctrica o el gas natural; Se hace necesaria una solución que una estos dos tipos de sistemas en uno solo (colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)).

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Contribuir con el compromiso misional de la Universidad Industrial de Santander que hace énfasis en la transferencia de conocimientos y tecnologías para el desarrollo y servicio de la sociedad mediante el diseño y construcción de un prototipo de colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) de circulación forzada que permita calentar agua y así mismo generar la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, siendo totalmente autónomo. Con el fin de investigar las distintas formas de aprovechamiento de la energía solar.

3.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Diseñar y construir un prototipo de sistema colector híbrido que permita calentar agua para almacenarla en un tanque de almacenamiento de 50 litros.

Diseñar y construir el sistema de almacenamiento de agua (tanque), permitiendo que conserve la energía captada por el colector solar híbrido y permitiendo la disponibilidad del fluido de trabajo (agua caliente).

Diseñar el sistema de circulación y distribución del fluido de trabajo (agua) con los siguientes parámetros a tener en cuenta:

- Seleccionar la bomba centrífuga-motor eléctrico con la cual se cumpla el caudal requerido para el sistema y permita mantener la circulación adecuada en todo el sistema.
- Diseñar el sistema de alimentación del tanque al colector (tuberías y válvulas).
- Diseñar el arreglo de tubos del conjunto captador de energía solar (colector).

Seleccionar y adecuar el sistema fotovoltaico para integrarlo al colector solar híbrido de tal manera que se cumplan los requerimientos de alimentación eléctrica

de la bomba centrífuga instalada para la circulación del fluido de trabajo (agua) (Circulación forzada).

- Seleccionar el sistema de autonomía eléctrica con equipos como la batería, el regulador de corriente y el inversor.

Medir las variables a considerar más importantes del prototipo del colector solar híbrido como: el voltaje y la corriente producida por el sistema fotovoltaico (amperímetros y voltímetros), las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo (agua) del colector (termocuplas) y presión (manómetros) del sistema.

- Comparar eficiencias, y generación de energía por unidad de área de un colector híbrido con los sistemas de colector solar térmico de placa plana y panel fotovoltaico por separado.

4. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

4.1 CARACTERÍSTICAS DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO

Los colectores híbridos pueden convertir la energía radiante incidente en energía térmica y eléctrica, utilizando los elementos propios de cada sistema por separado en un mismo espacio [5].

Las partes de un sistema de aprovechamiento de energía solar híbrido (térmico y fotovoltaico) se disponen de tal forma que permitan obtener un beneficio dual:

- Mejoramiento del desempeño del panel fotovoltaico: La cantidad de potencia eléctrica entregada por los sistemas de paneles fotovoltaicos es inversamente proporcional a la temperatura a la cual este el panel. Si el calor absorbido por el panel es disipado de forma continua, este puede tener un mejor rendimiento que si se deja calentar. (Colector solar híbrido sin cubierta de vidrio).
- En un sistema híbrido el calor que acumula el panel fotovoltaico es transferido a una placa (placa de absorción), la cual transfiere este calor y como está en contacto con la tubería de agua, por conducción el calor se transfiere a la tubería y luego por convección forzada al agua.

En la figura 1 se muestran las partes del sistema híbrido con cubierta de vidrio [6].

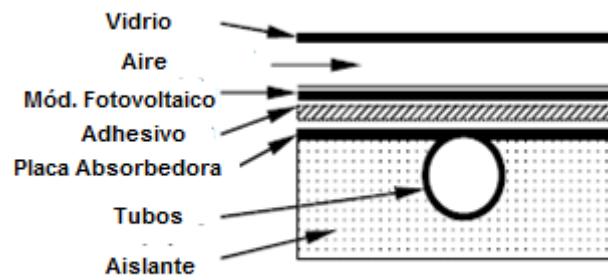
En un sistema híbrido el agua es la que “refrigera” el panel fotovoltaico al retirar el calor que dicho panel acumule a lo largo de su operación.

Los colectores solares de tubos al vacío se utilizan en aplicaciones para fines completamente térmicos, este tipo de colector es más eficiente que el colector de placa plana, sin embargo no es una opción viable para un colector híbrido pues los tubos hacen difícil la adecuación de una superficie que permita captar radiación para convertirla en energía térmica y eléctrica al mismo tiempo.

Un aspecto muy importante de estos sistemas híbridos (térmicos y fotovoltaicos) es que tienen eficiencias menores a las que presenta cada uno por separado, sin

embargo si se unen un colector solar y un panel fotovoltaico, tienen mayor producción de energía por unidad de área que un módulo fotovoltaico al lado de un colector solar térmico con áreas parciales, siendo la suma de éstas equivalentes al área de colector solar híbrido [7].

Figura 1. Partes principales de un sistema colector híbrido (fotovoltaico y térmico)



Fuente: The Experimental Performance of an Unglazed PVT Collector with Two Different Absorber Types.

En aplicaciones de colectores híbridos generalmente se utilizan las celdas de silicio cristalino y amorfo, pero las más adecuadas para esta aplicación son los silicios cristalinos debido a que se requiere una mayor eficiencia para asegurar un buen desempeño [8].

5. ENERGÍAS RENOVABLES Y NO RENOVABLES

5.1 DEFINICIÓN DE ENERGÍA

La energía en general, suele definirse cómo la capacidad para realizar un trabajo, sin embargo, existen más definiciones dependiendo de los tipos de energía cómo: cinética, potencial, mecánica, térmica, solar, química, eléctrica, entre otras.

Todas estas sub-clasificaciones cumplen una misma condición, que es la conservación de la energía. La energía no puede emerger de forma espontánea, ni tampoco desaparecer abruptamente, siempre sufre cambios siguiendo un gradiente, transformándose de un tipo de energía a otro.

Todas las criaturas del planeta transforman constantemente energía, aprovechándola, tanto para procesos naturales que les permite vivir, como artificiales que los realizan los seres humanos para desarrollar distintos procesos y proyectos que aparte de ser necesarios, aumentan o mantienen su calidad de vida.

5.2 ENERGÍAS NO RENOVABLES

Gran parte del desarrollo humano a lo largo de su historia ha sido gracias a la conversión de energía química (intrínseca en la materia) a energía térmica. La combustión fue el proceso de transformación de energía más importante para la humanidad, desde el descubrimiento del fuego, incluso hasta nuestros días. Toda la energía almacenada en la tierra en forma de energía química ha sido aprovechada por el ser humano, con esta conversión de energía química a energía térmica también se pudo obtener energía eléctrica, gracias a los generadores y las máquinas de vapor con las que se mejoraron los procesos de aprovechamiento de energía cinética y potencial en diversos aspectos cómo la locomoción.

5.2.1 Inconvenientes de las energías no renovables

Los sistemas de aprovechamiento de energías no renovables o convencionales tienen dos inconvenientes. Primero: los estudios realizados, inventos, pruebas etcétera, fueron desarrollados en épocas en que la tecnología no era la suficiente para prevenir el impacto que tuvieron en el entorno natural de la tierra, incluso con las tecnologías actuales, los desechos de estos procesos de transformación de energía siguen siendo nocivos para el ecosistema. Segundo: El inconveniente más importante es que las fuentes de combustible no son infinitas, estas energías están limitadas a la existencia del combustible en la tierra, cada año la población mundial crece de forma exponencial y por consiguiente una mayor demanda de energía surgirá, ocasionando un decrecimiento cada vez más acelerado de las reservas de petróleo, gas e incluso madera.

No solo los productos de la combustión son dañinos para la naturaleza, también los procesos de explotación, que implican una invasión y deterioro a ecosistemas generando una alteración a las cadenas tróficas y a los ciclos naturales, devastando y extinguiendo especies animales y vegetales, así como alterar las propiedades físicas y químicas del terreno, dejándolo inutilizable y desértico.

Con el paso del tiempo se han realizado estudios y se han propuesto alternativas a estas energías convencionales, que son comúnmente llamadas energías renovables.

5.2.2 Energía nuclear

La energía producto de las reacciones e interacciones subatómicas de materiales radioactivos es una alternativa para la producción principalmente de energía eléctrica. La energía nuclear es considerada una energía limpia a diferencia de los sistemas que funcionan a gas o combustibles derivados del petróleo, sin embargo este tipo de energía tiene un riesgo enorme, el cual radica en la posibilidad de que

en algún momento, ocurra un accidente que provoque una contaminación radioactiva en las zonas aledañas (figura 2).

Figura 2. Central de energía nuclear



Fuente: http://www.plataformaurbana.cl/copp/albums/userpics/10079/normal_central_nuclear.jpg

5.3 ENERGÍAS RENOVABLES

Las energías renovables son una opción y una solución a los procesos de aprovechamiento de energía convencionales y sus impactos ambientales respectivamente.

Son métodos de transformación y aprovechamiento de energía que tienen la característica de ser sostenibles, es decir: utilizan fuentes de energía que pueden considerarse inagotables o que tienen alta disponibilidad y causan un impacto casi nulo en los ecosistemas.

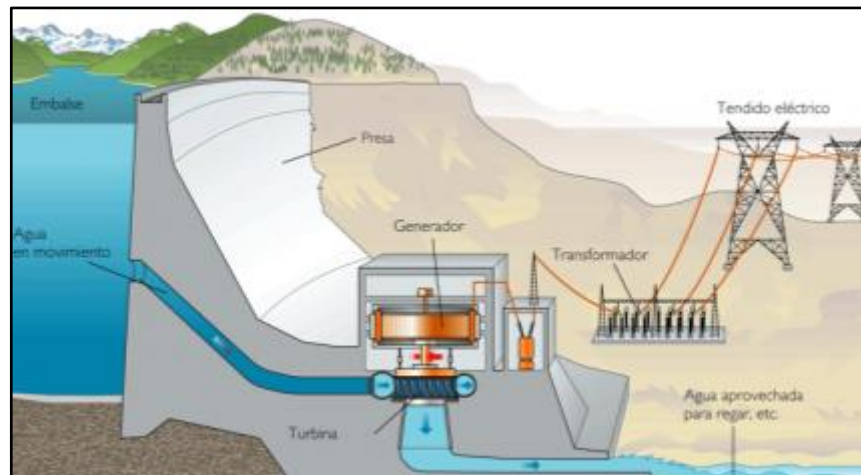
5.3.1 Tipos de energías renovables

Las energías renovables tienen una clasificación y nombre según sea el tipo de fuente que utilicen, la fuente puede ser: la luz solar, las masas de agua, las masas de viento, el calor proveniente del núcleo de la tierra y la biomasa.

5.3.1.1 Energía hidráulica

Se basa en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial que tienen las corrientes y depósitos de agua, convirtiendo principalmente la energía hidráulica en energía eléctrica, se caracteriza por ser una energía limpia, aunque requiere espacios adecuados por el humano como represas y embalses artificiales, que en ciertas ocasiones pueden ser perjudiciales para la fauna y flora local (figura 3).

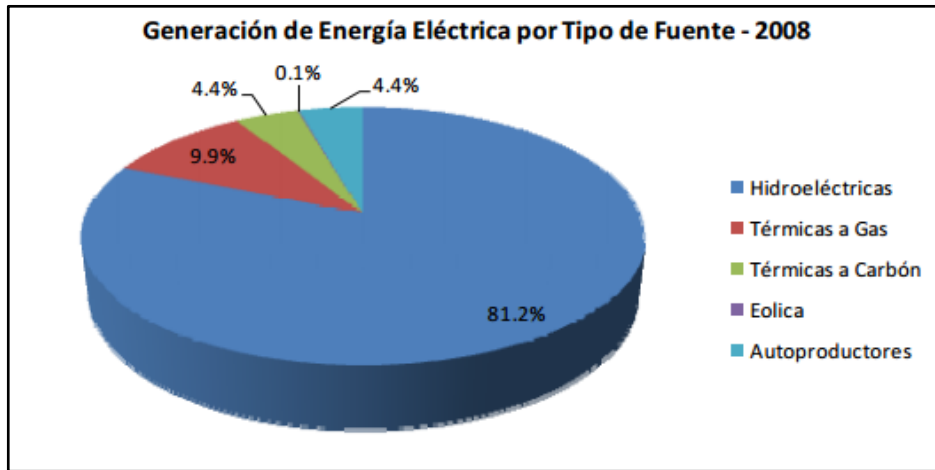
Figura 3. Represa para generación de energía eléctrica



Fuente: <http://arcangel.belug.org.ve/wp-content/uploads/2010/08/Represa.jpg.png>

En Colombia las hidroeléctricas son la forma de producción de electricidad más común debido a la riqueza en fuentes hídricas de la región (figura 4). El sector de energía hidráulica es el que predomina, seguida de las plantas térmicas que usan combustible.

Figura 4. Fuentes de producción de energía eléctrica en Colombia, año 2008



Fuente: http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/UserFiles/File/ENERGIA/URE/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Proure.pdf

5.3.1.2 Energía eólica

Consiste en el aprovechamiento de las corrientes de aire presentes en el entorno atmosférico, el movimiento de las masas de viento es consecuencia del sol y de la energía que de él llega a la tierra. La energía eólica también se transforma en energía eléctrica por medio de unos dispositivos llamados turbinas eólicas. Las turbinas eólicas pueden instalarse en campos abiertos e incluso ya se encuentran parques eólicos en el mar (figura 5).

5.3.1.3 Energía a partir de la biomasa

La energía de biomasa es una fuente inagotable; es toda la materia orgánica presente en la tierra, generalmente es una alternativa de producción de energía térmica. La biomasa se genera en distintas formas, sin embargo el origen principal es el sol. Los procesos de generación de biomasa tienen su inicio en el aprovechamiento de la energía del sol por las plantas, que a su vez son aprovechadas por los demás seres vivos.

Existen dos tipos de biomasa: la biomasa natural y la biomasa residual.

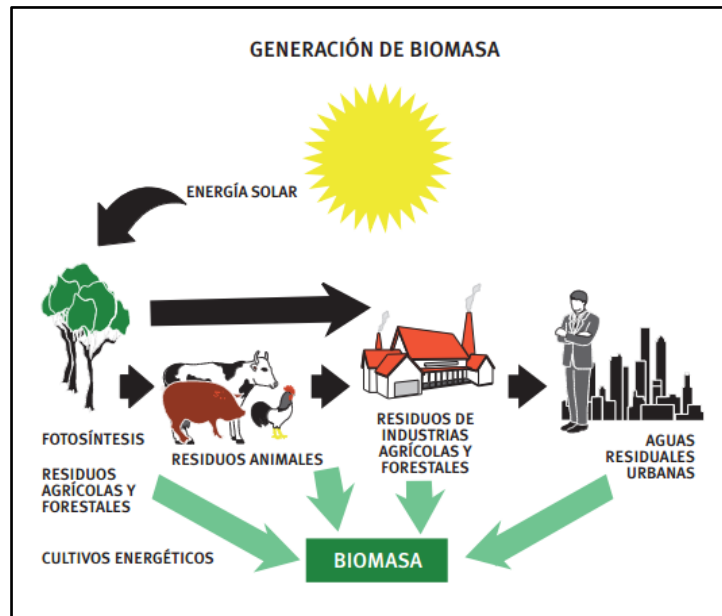
La biomasa natural proviene de leña y árboles o cultivos destinados únicamente para ser utilizados en procesos de combustión o fabricación de combustibles de origen vegetal. Sin embargo, en el caso de la leña, actualmente existe una problemática en cuanto a la deforestación, cuya principal causa no es la producción energía a partir de biomasa sino productos de papelería principalmente, generando daños graves al ecosistema. La biomasa residual es un aprovechamiento de los residuos de procesos o de los mismos seres vivos que son aprovechables para la producción principalmente de gas que es usado en procesos de combustión. Aunque también desechos vegetales como: el bagazo, serrín, cascarilla de cereales como el arroz, son quemados para la producción de energía térmica con combustibles como etanol (figura 6).

Figura 5. Campo de turbinas eólicas en tierra y mar



Fuente: http://www.electrosector.com/wpcontent/uploads/2012/01/parque_eolico2.jpg
<http://www.construyeargentina.com/wp-content/uploads/2013/03/31.jpg>

Figura 6. Generación de biomasa



Fuente: <http://opex-energy.com/biomasa/generacion%20de%20biomasa.jpg>

5.3.1.4 Energía geotérmica

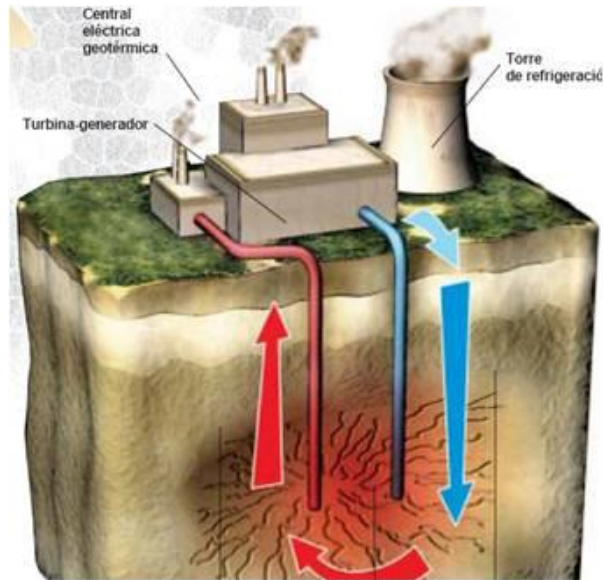
Es la energía que aprovecha el calor interior de la tierra, el cual calienta las aguas subterráneas hasta obtener vapor (figura 7), naturalmente se observa la consecuencia de este fenómeno en los llamados géiseres.

En un sistema de aprovechamiento de energía geotérmica, el vapor es utilizado para mover turbinas y producir electricidad.

Las plantas de energía geotérmica generalmente se encuentran cerca de regiones geológicamente activas.

La energía geotérmica tiene ciertas limitaciones, una de ellas es que junto con el vapor de agua pueden surgir otros gases como sulfuros, amoníaco y otros agentes que pueden ser contaminantes e incluso nocivos para la salud. También existe la posibilidad de dañar el suelo, ocasionando fisuras o erosión debido al enfriamiento de las capas geológicas.

Figura 7. Planta de energía geotérmica



Fuente: <http://www.telecable.es>

5.3.1.5 Energía de flujo de mareas o energía tidal

La energía transportada por las corrientes oceánicas o el aumento y disminución en la marea están siendo aprovechadas para la generación de electricidad en algunos países, la energía de flujo de mareas se puede aprovechar de muchas maneras, entre ellas se destacan tres tipos:

- Almacenamiento de energía potencial en una represa con el cambio de mareas.
- Uso de turbinas de propulsión sumergidas en el mar.
- Uso de estructuras semi-sumergidas.

El almacenamiento de energía potencial producto del cambio de mareas consiste en que mediante una represa construida en la entrada de un golfo, se acumula agua de mar cuando hay marea alta, al disminuir la marea el nivel de agua acumulada es mayor que el nivel del mar y se procede a devolver el agua de nuevo al mar pero antes pasa por unas turbinas dentro de la represa, moviendo

turbinas conectadas a generadores para producir electricidad, es un sistema muy parecido a las hidroeléctricas (figura 8). Las turbinas de propulsión son parecidas a las turbinas eólicas (figura 9), pero estas ya se encuentran sumergidas en el agua, aprovechando las corrientes marinas, giran y generan electricidad, sin embargo el ambiente salino es muy corrosivo y estos sistemas deben estar bajo constantes regímenes de mantenimiento.

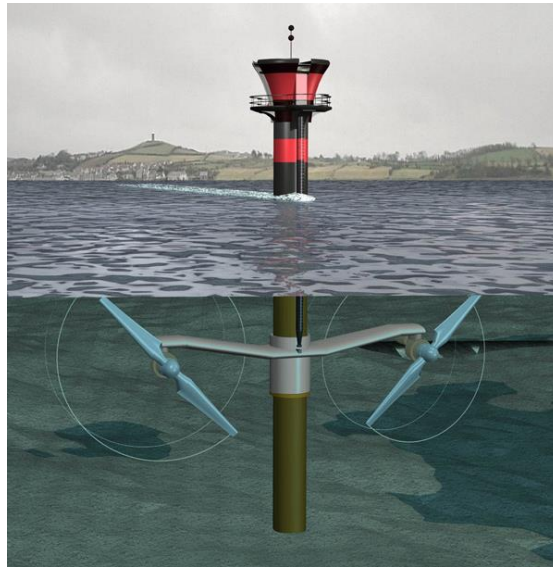
Las estructuras semi-sumergidas son un invento novedoso implantado en el reino unido por la empresa Ocean Power Delivery LTD (figura 10]. Consiste en cuerpos cilíndricos articulados flotantes en el océano los cuales internamente, mediante sistemas hidráulicos como: acumuladores, motores hidráulicos y generadores entre otros. Y aprovechando el movimiento oscilatorio de la superficie oceánica, bombean aceite hidráulico a altas presiones hacia los motores hidráulicos que a su vez están conectados a generadores.

Figura 8. Represa marítima La Rance, Francia.



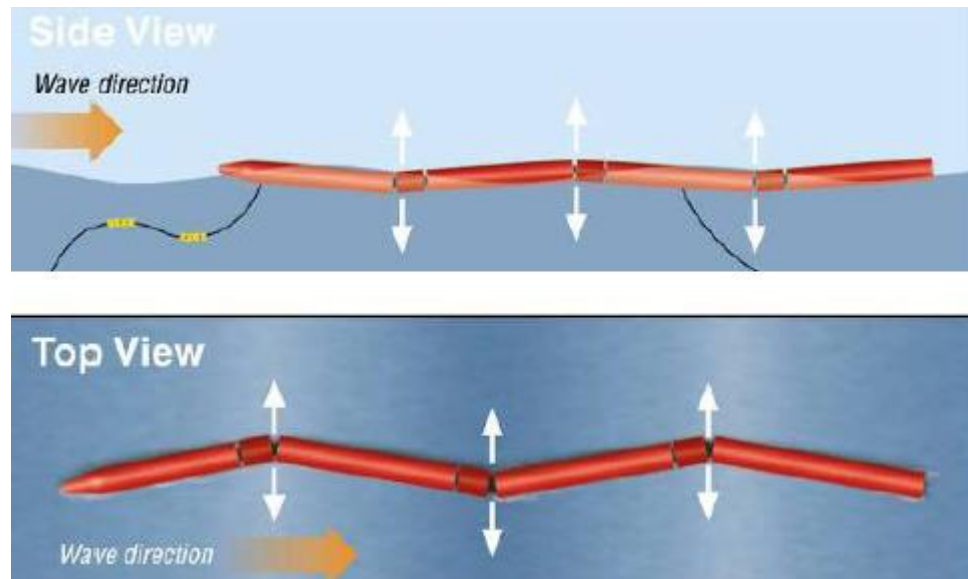
Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Barrage_de_la_Rance.jpg

Figura 9. Turbinas de propulsión sumergidas



Fuente: <http://www.alternative-energy-news.info/images/technical/seagen-generator.jpg>

Figura 10. Sistema semi-sumergido de conversión de energía de marea



Fuente: http://hydropower.inel.gov/hydrokinetic_wave/pdfs/day1/09_heavesurge_wave_devices.pdf

5.3.1.6 Energía solar

Es el aprovechamiento de la energía proveniente del sol que llega a la tierra en forma de radiación. La energía contenida en la radiación solar se aprovecha para convertirla, principalmente en energía térmica y eléctrica, aunque también existen dispositivos que permiten la conversión de energía solar a mecánica y química. La fuente de energía solar es un recurso que puede ser considerado inagotable, sin embargo, el recurso solar en una región es totalmente dependiente de las condiciones climáticas y geográficas.

La energía solar es una fuente de energía no contaminante y con alta disponibilidad, generando cada vez más interés en su estudio, así como el mejoramiento en la eficiencia de los procesos o métodos de conversión y aprovechamiento de esta energía. Las dos grandes ramas de la energía solar son: la energía solar térmica y la energía solar fotovoltaica, que se utilizan para procesos de calefacción y de producción de energía eléctrica, respectivamente (figura 11).

Figura 11. Central solar térmica



Fuente: <http://cmapspublic3.ihmc.us/rid=1JBBZKXCD1V4RZNSPC9/Central%20solar%20t%C3%A9rmica.jpg>

6. ENERGÍA SOLAR

6.1 RADIACIÓN SOLAR

El sol es una masa gigantesca y gaseosa con un diámetro de $1,39 \cdot 10^9$ [m] y una distancia promedio de la tierra de $1,5 \cdot 10^{11}$ [m], posee una temperatura de cuerpo negro de 5777 [K]. La energía producida al interior del sol a millones de grados de temperatura, se transfiere a la superficie y luego es irradiado al espacio [9]. Como fuente de energía provee a la tierra una cantidad por hora mayor al consumo mundial actual en el mismo intervalo de tiempo de $1,5 \frac{KW}{m^2}$ [10], que intercepta la atmósfera y aproximadamente el 70% de la energía queda en el mar, y el resto es aprovechada por la superficie terrestre. La energía solar que recibe la tierra es de tal magnitud que le permite cumplir con todos los procesos biológicos, y además permite ser captada y aprovechada para aplicaciones específicas.

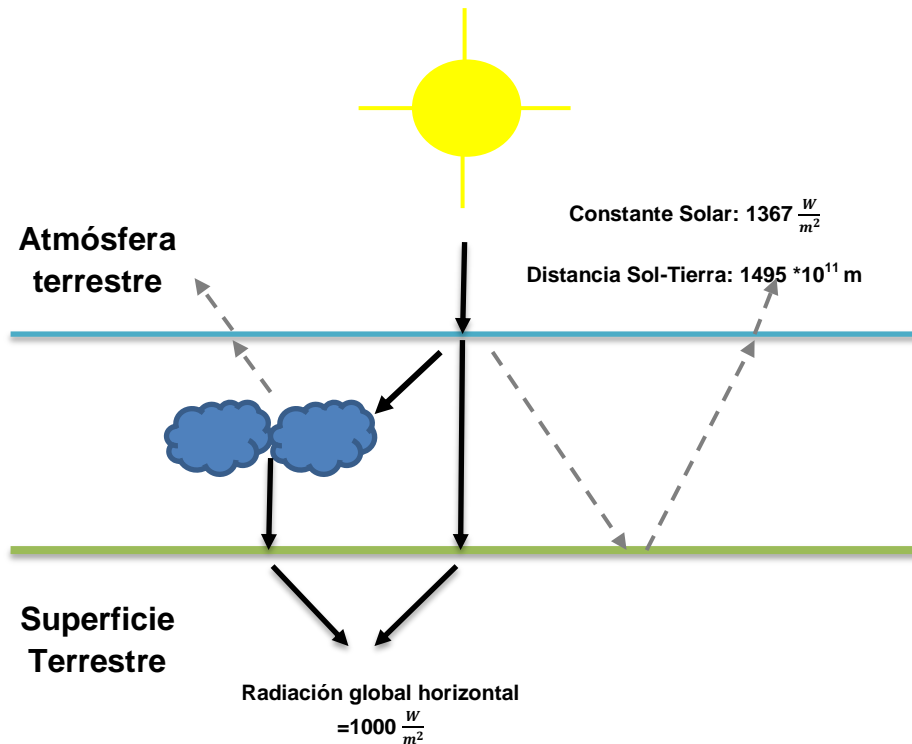
De tres maneras inciden los rayos solares a la superficie terrestre:

- **Radiación directa:** es la radiación emitida por el sol, que no es afectada por la atmósfera (no ha sufrido ninguna dispersión).
- **Radiación difusa:** proveniente del sol, la radiación difusa es aquella que ha sufrido un cambio debido a la dispersión y absorción de los cuerpos que se encuentran en la atmosfera que se encuentran en la atmosfera.
- **Radiación por abledo o reflejada:** Es la radiación directa y difusa que se recibe por la energía relegada en el suelo o las superficies cercanas.

Las proporciones de radiación se determinan por los factores geográficos, condiciones meteorológicas, con las cuales se determina si un día estará lluvioso, nublado o demasiado soleado, la inclinación de la superficie objetivo respecto al plano horizontal teniendo en cuenta que por la dirección de los rayos una superficie puede recibir máxima radiación difusa [9] y mínima radiación reflejada.

La constante solar es la energía proveniente del sol que incide sobre una superficie normal a la dirección de propagación de los rayos solares, medida respecto a la distancia sol-tierra fuera de la atmosfera terrestre, tiene un valor de $1367 \left[\frac{W}{m^2 \cdot hr} \right]$ [10]. Aunque para las aplicaciones térmicas y fotovoltaicas se considera un valor de radiación incidente global horizontal de $1000 \left[\frac{W}{m^2 \cdot hr} \right]$, este determina sus características de operación. Además tiene en cuenta los efectos de atenuación como las nubes, el valor, horas de sol, bruma, polución etc. (figura 12).

Figura 12. Esquema sobre radiación solar incidente y constante solar

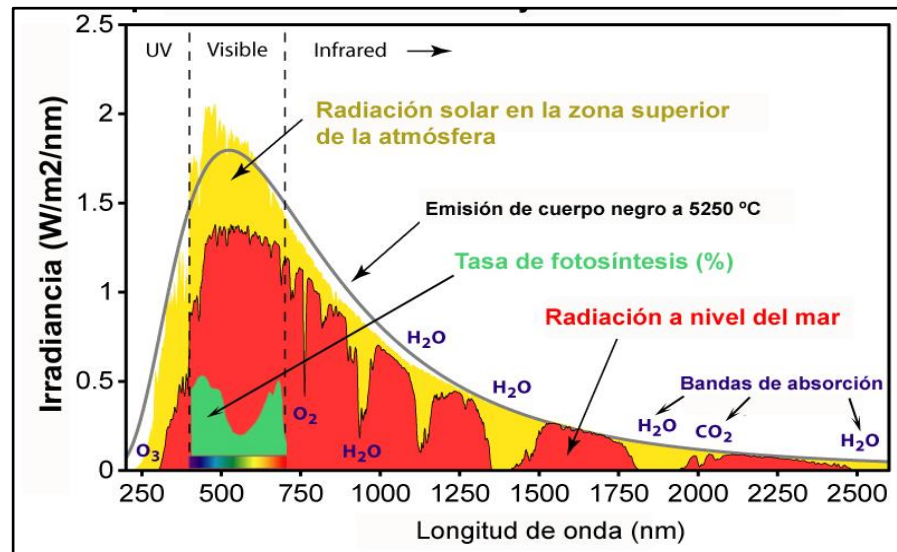


Además de las maneras como se presenta la radiación solar, se debe tener en cuenta los siguientes conceptos:

Radiación de onda corta: Es la radiación propiamente originada del sol y se encuentra en un rango de $0.3 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$ [9].

Radiación de onda larga: Es la radiación que proviene de todo lo que se encuentre a temperatura ambiente, y corresponde a toda la radiación que tenga longitudes de onda mayores de 3 μm . Esta es producida por la atmósfera, por el colector o por cualquier otro cuerpo [9].

Figura 13. Gráfica del espectro de la radiación solar



Fuente: <https://naturalmenteciencias.files.wordpress.com/2011/11/espectro-solar-y-fotosintesis.jpg>

6.1.1 Instrumentos de Medición de radiación solar

Piranómetro

Es un instrumento diseñado para medir la densidad de flujo de radiación solar en una superficie horizontal. Los sensores utilizados para estos instrumentos deben responder a todo el espectro de radiación solar independientemente de inclinación de la misma.

Un piranómetro produce una señal de voltaje proveniente de una termopila siendo función de la radiación incidente. Es necesaria la utilización de un potenciómetro para la detección de esta salida. Además los datos de radiación deben ser integrados para un periodo de tiempo, hora o día.

El piranómetro es ampliamente utilizado para medir radiación total horizontal (figura 14), pero también mide radiación difusa, para este propósito el piranómetro tiene un anillo que produce sombra a la cúpula de cristal (figura 15), verificándose que en ningún momento de la medición, los rayos solares lleguen directamente a la cúpula, por lo cual se altera el valor para la radiación difusa.

Un piranómetro está constituido por tres partes principales:

Termopila: Formada por superficies blancas y negras capaz de absorber un rango de longitudes en onda entre 300 a 5000 [um], y con una respuesta muy precisa al coseno del ángulo de incidencia [9]. Las superficies negras de la termopila absorben la radiación solar y la transforma en calor, que atraviesa el piranómetro convirtiéndose en una señal eléctrica.

Cúpula de cristal: Para la protección de los efectos del viento y las condiciones climatológicas se utilizan uno o dos vidrios esféricos con espesores uniformes, que no causen distorsiones en la medida del espectro de radiación, limitando la respuesta de 300 a 2800 [um].

Entre otras clases de piranómetros tenemos:

- Piranómetros con sensores de elementos bimetálicos calentados por la radiación solar, los cuales son accionados por resortes y no requieren energía eléctrica.
- Piranómetros con sensores fotovoltaicos, presentan una menor precisión que los instrumentos con termopila aunque son más fáciles de usar, tienen una respuesta aún más selectiva en el espectro de la radiación solar, y la radiación reflejada les es un poco inconveniente para la medición real de la radiación total horizontal.

Figura 14. Piranómetro para radiación total horizontal



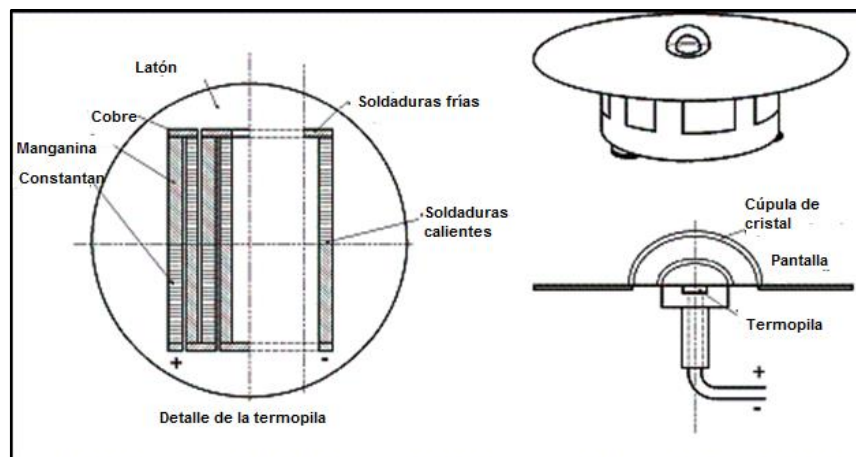
Fuente: https://encryptedtbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQRuIUWQ_Wy8sJmZdth--PBo25_Qtl_buj8NV0SZKHFHYkNgLiwA

Figura 15. Piranómetro para radiación difusa



Fuente: <http://www.darrera.com/archivos/productos/img/lppyra12-piranometro-primer-clase-anillo-sombra.jpg>

Figura 16. Partes de un piranómetro



Fuente: <http://www.sapiensman.com/ESDictionary/imagenes/pyranometer.gif>

Pirheliómetro:

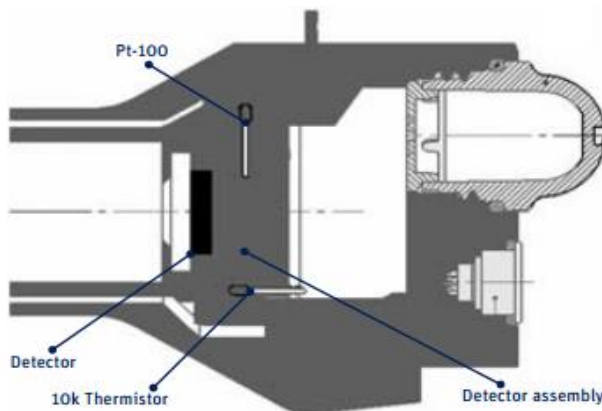
Es un instrumento diseñado para la medición de la radiación directa normal (figura 17). Su diseño tiene una superficie de recepción que debe permanecer perpendicular a los rayos solares. Con una base metálica sujeta a un cilindro hueco giratorio (figura 18), dentro de este se encuentra el sensor (termopila). El cilindro tiene un movimiento azimutal en el plano horizontal y un movimiento angular que dirige todo el instrumento hacia el sol. Además contiene un blanco óptico ubicado en la parte posterior que asegura la incidencia de paralela de los rayos solares al sensor. Existen varias clases de pirheliómetro según las normas estándar de la ISO y de la OMM se clasifican en primarios y secundarios utilizados para calibración que tienen sensores medidores diferenciales de flujo calorífico y en pirheliómetros de primera y segunda clase utilizados para mediciones que tienen como sensor una termopila (figura 18). Los factores considerados para evaluar la precisión son: sensibilidad, estabilidad del factor de calibración, error máximo debido a las variaciones de temperatura ambiente, errores debidos a la respuesta espectral del receptor, no-linealidad de la respuesta, ángulo de apertura, constante de tiempo del sistema y efectos del equipo auxiliar.

Figura 17. Pirheliómetro Angstrom



Fuente: http://1.bp.blogspot.com/_00euacF4MRk/Strx1f6nz_I/AAAAAAAAAF0/Aq-nN1nM2OI/s320/pirangstrom.jpg

Figura 18. Partes de un pirheliómetro



Fuente: www.kippzonen.com/Download/.../CHP-1-Pyrheliometer-Spanish-Manu...

Figura 19. Pirheliómetro sensovant primera clase



Fuente: <http://sensovant.com/img/meteorologia/radiacion-solar/sensor-medidor-radiacion-solar-termoelectrico-piranometro-termico-DR01.png>

Solarímetro:

Es un instrumento de medición de irradiancia directa y difusa (figura 20), con la capacidad de medir y mostrar un valor con exactitud y una manera fácil y rápida. Es un instrumento de medición directa, en un amplio rango espectral, y permite portabilidad en las mediciones. Para el control de instalaciones térmicas y fotovoltaicas son muy adecuadas.

Figura 20. Solarímetro electrónico

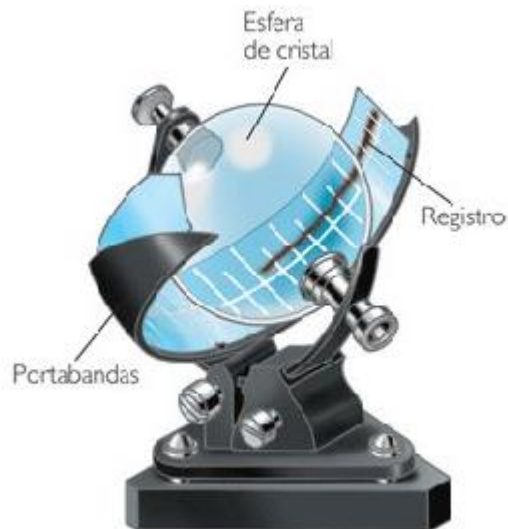


Fuente: <http://www.tecnometrica.com.mx/Solarimetro-Medidor-digital-de-Radiacion-de-energia-solar-SM-206.html>

Heliómetro:

Un instrumento que mide la intensidad lumínica solar, registrando los intervalos de tiempo donde la radiación incidente es la necesaria para producir sombras distintas, determinando las horas de sol que se presentan en un día (figura 21). Registra la duración del brillo solar en horas y décimas por medio de una esfera de cristal que actúa como un lente convergente en todas las direcciones. El Foco sobre una banda de registro que se dispone concéntrica a la esfera, sujeta por un soporte. Cuando la luz incide en la esfera se produce un surco en el registro, desde que sale el sol hasta que se oculta al final del día. Las interrupciones en el registro se presentan cuando hay mucha nubosidad. La esfera de vidrio, proporciona que la medida sea indiferente a la posición solar.

Figura 21. Heliómetro



Fuente: [http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/heliometro.ht](http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/heliometro.html)

[ml](#)

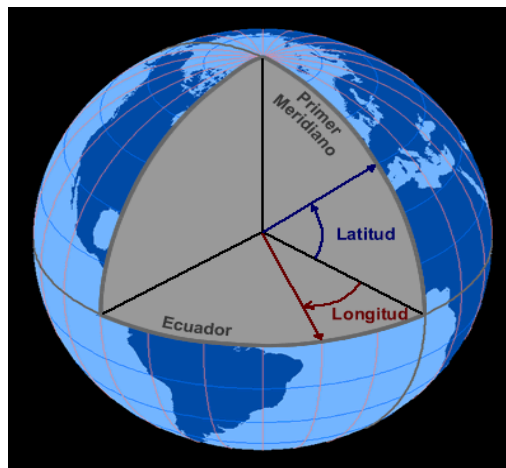
6.1.2 Posición solar

Dirección de la radiación solar: las relaciones geométricas entre un plano en particular orientación relativa con respecto a la tierra.

Latitud: Es la posición angular entre el plano del ecuador respecto a una recta desde un punto hasta que se intercepta con éste. Se mide en grados sexagesimales, la parte decimal en minutos y en segundos sexagesimales. Según los hemisferios norte y sur, cambia el sentido la posición angular. La latitud norte es positiva y la latitud sur negativa. Cabe resaltar que para la aplicación de sistemas de aprovechamiento de energía solar, la tierra se divide en grandes zonas latitudinales: primero la zona entre trópicos que comprende desde el trópico de cáncer (23° Norte) [11], y el trópico de capricornio (23° Sur) [11] que corresponde al clima tropical y desértico, segundo la zona entre los trópicos con los círculos polares tanto ártico y antártico que corresponde los climas templado, subtropical y subpolar, tercero la zona ente los círculos polares ártico (66° Norte) y antártico (66° Sur) [11] y el paralelo 90° (Norte o Sur) [ϕ].

$$[-90^\circ < \phi < 90] \quad [11]$$

Figura 22. Esquema representativo de la latitud y longitud terrestre

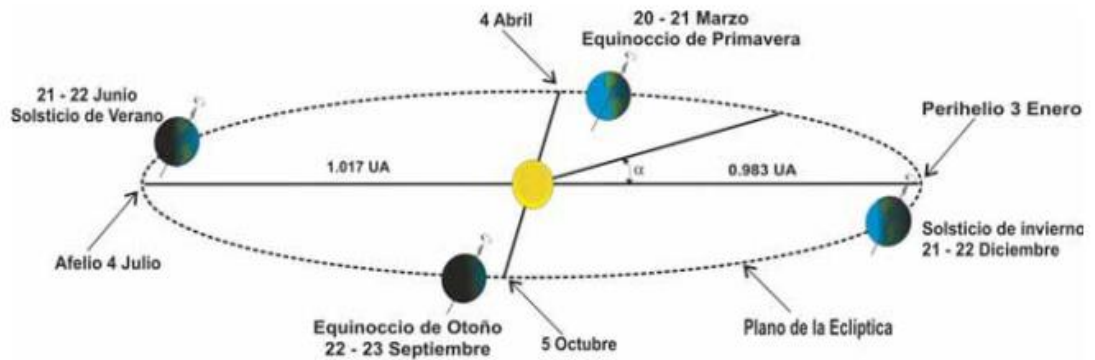


Fuente: http://www.windows2universe.org/earth/images/latlon400slice_3.sp.gif

Longitud: Es la posición angular entre el meridiano base, (meridiano de Greenwich), siendo el plano base el paralelo donde se encuentre el punto en la superficie terrestre (que constituye una circunferencia cuyo centro es la intersección entre el eje vertical de la tierra y dicho plano). La longitud se mide igualmente en grados sexagesimales, minutos sexagesimales, y segundos sexagesimales. Usualmente se mide de 0 a 180 [°] desde el meridiano base, hacia el este siendo positivo, y el oeste negativo. Con los meridianos se establecen los husos horarios, que son los meridianos en múltiplos de 15 [°] y 24 [°] en total que cubren toda la tierra. De acuerdo a la ubicación de un lugar en la tierra, respecto a los meridianos de referencia, se establece una expresión que permite corregir la hora de que dicta el meridiano, con la hora real en el lugar establecido, también llamada hora solar, con el cual se calculan los ángulos de posición solar [12].

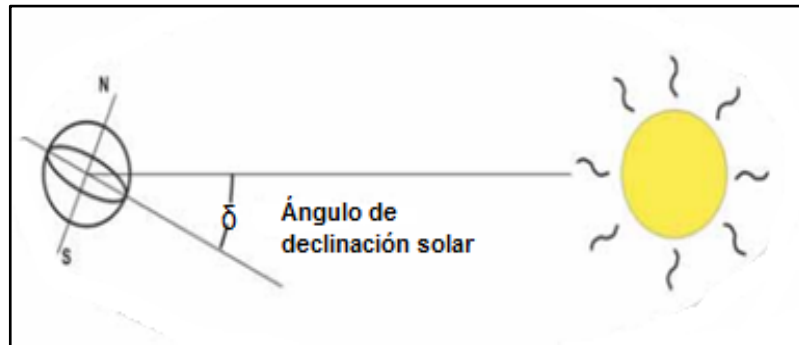
Declinación solar: La tierra gira alrededor del sol en su eje de rotación respecto al plano de traslación. La declinación solar es el ángulo entre el plano del ecuador y la distancia horizontal entre el sol y la tierra. Debido al movimiento de traslación esta posición angular varía para cada día del año. El signo de la declinación es positivo cuando el sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, entre el 21 de marzo al 22/23 de septiembre y negativo cuando incide perpendicularmente en el hemisferio sur, entre el 22/23 de septiembre hasta el 21 de marzo. El máximo valor para la declinación sucede en el hemisferio norte el 21/22 de Junio es de + 23.45 [°], y mínimo valor en el hemisferio sur, el 21/22 de diciembre de -23.45 [°]. Durante los equinoccios (de primavera y de otoño), el valor de la declinación solar es de 0° [10].

Figura 23. Movimiento de la tierra en torno al sol



Fuente: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf

Figura 24. Declinación solar



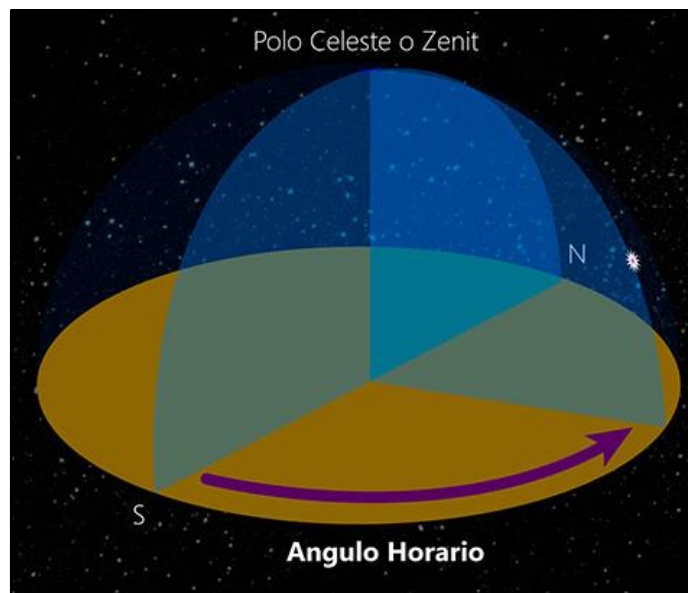
Fuente: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/7-Apendice_A.pdf

$$[-23,45^\circ < \delta < 23,45^\circ] \quad [9]$$

Pendiente: $[\beta]$ es el ángulo de la superficie con respecto a la horizontal cuando. Cuando $\beta > 90$, la superficie tiene una componente hacia abajo.

Ángulo horario: es la posición angular que indica la intersección entre el meridiano del sol y el meridiano local siendo su sentido de este (positivo) a oeste (negativo). Se usa para medir la hora, que corresponde al valor de $15 [^\circ]$ por hora [9].

Figura 25. Ángulo horario



Fuente: <http://atacamaviva.cl/Jana/Imagenes/Conceptos/AnguloHorario1.jpg>

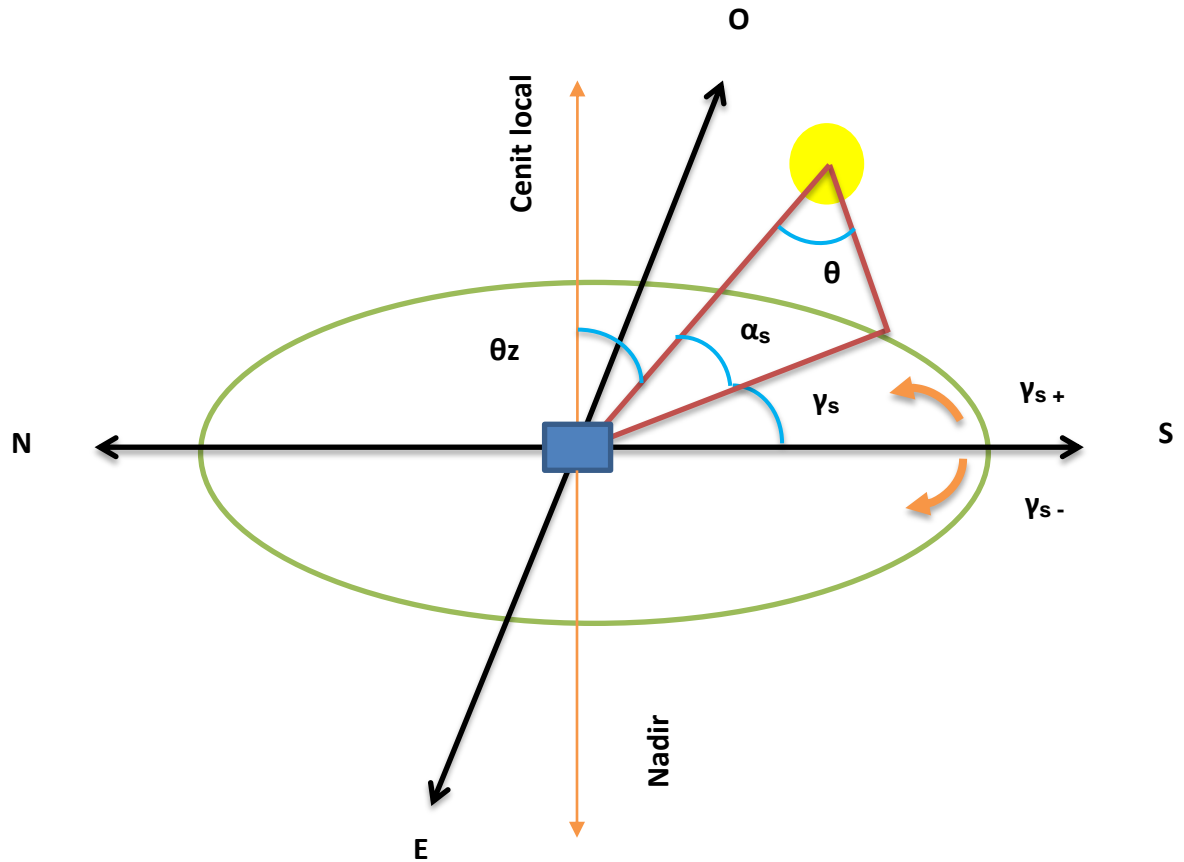
Ángulo de incidencia: $[\theta]$ Es el ángulo entre la normal de la superficie y el rayo incidente [9].

Ángulo de zenit: $[\theta_z]$ el ángulo de zenit es entre la vertical y el rayo de sol. Cuando la superficie es horizontal el ángulo de zenit es igual al ángulo de incidencia [9].

Ángulo de elevación: $[\alpha_s]$ es el complemento del ángulo de incidencia. Es el ángulo de la horizontal con respecto al rayo de sol [9].

Azimut del sol: $[\gamma_s]$ Es el desplazamiento angular sobre la proyección del rayo en el plano horizontal [9].

Figura 26. Ángulos de posición solar



6.2 ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

La mayor fuente de energía que llega a la tierra proviene del sol, que brinda la energía necesaria para todos los procesos biológicos y es aprovechada por sistemas pasivos (edificaciones) y por sistemas activos (sistemas de agua caliente sanitaria). Algunas ventajas de la energía solar son:

- Poco impacto ambiental
- No produce residuos contaminantes para el ambiente
- Es una fuente inagotable de energía
- Permite el aprovechamiento de las aplicaciones para zonas apartadas, donde la energía eléctrica es de costosa y difícil instalación.

- Permite autonomía energética.

Y algunas desventajas como:

- La energía irradiada por el sol, es fluctuante de acuerdo a las zonas de la tierra, los movimientos de rotación y traslación y las estaciones climáticas.
- Grandes requerimientos de energía a nivel industrial, demanda grandes espacios de tierra, con lo cual se pueden afectar ecosistemas.
- Costo inicial alto.

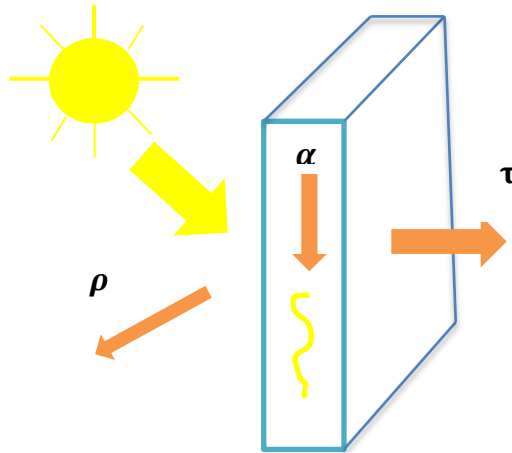
Se define la energía solar térmica como la transformación de la irradiación proveniente del sol, en calor. La radiación solar llega en forma de fotones, viajando en forma de onda, siendo esta cantidad inversamente proporcional a la longitud de onda, es decir entre menor longitud de onda, mayor es la energía **[10]**. Cuando la energía radiante pasa por un cuerpo suceden tres fenómenos:

Absorción(α): Es un fenómeno de superficie que permite un cambio de energía interna dentro del cuerpo en particular, aumentando su temperatura. La capacidad de un cuerpo para absorber radiación es la absorptividad.

Reflexión (ρ): Es un fenómeno donde el cuerpo devuelve una parte de la energía incidente en él hacia el recinto. La reflectividad de un cuerpo depende de la temperatura de la superficie del material, de la longitud de onda incidente y del ángulo de incidencia. Se habla de dos formas de reflexión: La reflexión especular que se produce en superficies pulimentadas en los que el rayo reflejado tiene el mismo ángulo que el rayo incidente. Y la reflexión difusa se produce en superficies sin brillo o rugosas que reflejan en forma difusa en todas las direcciones.

Transmisión (τ): Cuando una superficie, cuyo material deja pasar gran parte de la energía incidente se denomina transparente. La transmisividad corresponde a la fracción de energía que transmite la superficie.

Figura 27. Absorción, reflexión y transmisión.

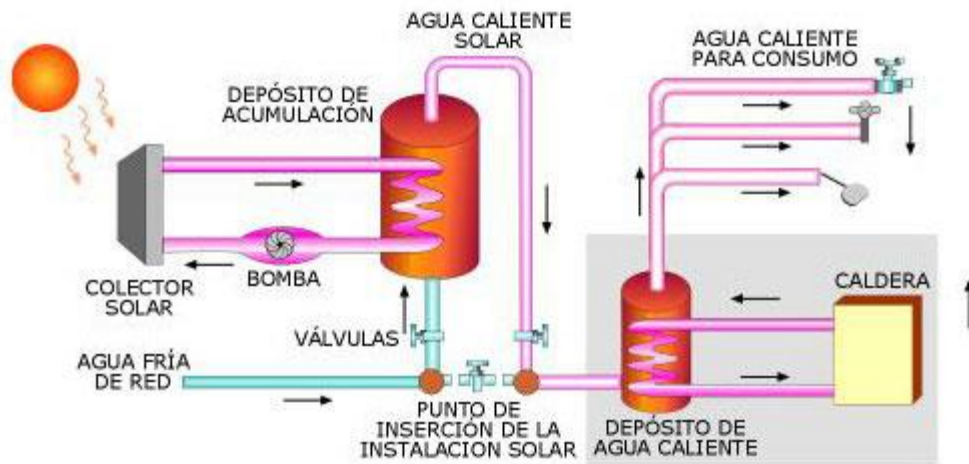


Para convertir la radiación solar en calor, los sistemas solares térmicos utilizan placas absorbentes, aisladas en su parte posterior, con lo cual se aumenta la temperatura, de tal manera que las placas emitan energía radiante infrarroja. La radiación solar modifica el estado de agitación térmica de los componentes moleculares atómicos y subatómicos del material produciendo cambios en su energía interna.

Dentro de las aplicaciones de la energía solar térmica se tiene:

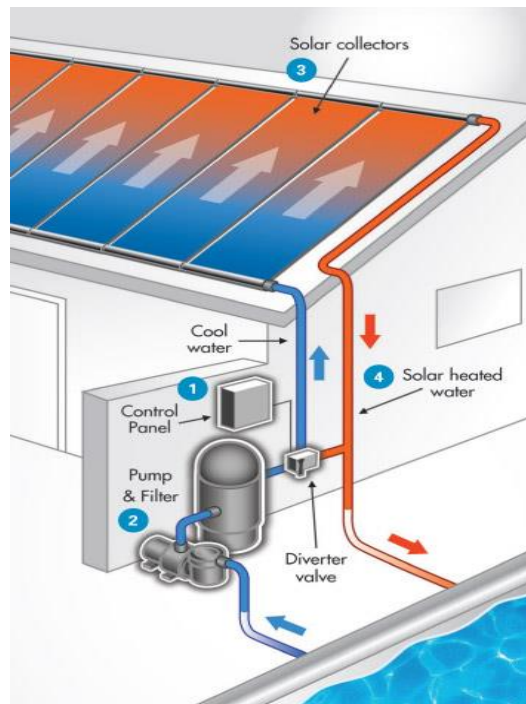
Producción de agua caliente sanitaria y climatización de piscinas: es la aplicación más utilizada, de acuerdo a la demanda que esto requiere, permitiendo reemplazar los sistemas habituales que utilizan gas natural y energía eléctrica. Estos sistemas manejan temperaturas hasta los 60 [°C]. Son sistemas que permiten una mayor adaptabilidad según las necesidades energéticas. Principalmente conformado por un sistema captador donde la energía proveniente del sol es aprovechada en forma de calor y transferida al fluido en circulación, un sistema de almacenamiento que permite tener disponibilidad del fluido y mantener la temperatura del mismo de acuerdo a las fluctuaciones solares, y por un sistema de control que permite tener en funcionamiento correcto el sistema.

Figura 28. Sistema de producción de agua caliente



Fuente: http://www.empresaeficiente.com/images/empresas/tecnologias/28/img_04.jpg

Figura 29. Sistema para climatización de piscinas



Fuente: <http://atmospherltda.com/sitio/climatizacion-de-piscinas/>

Calefacción solar (suelo radiante solar): la calefacción solar consiste en aprovechar los rayos solares para convertirse en energía térmica o eléctrica, que permita calentar un local hasta llegar a la temperatura de confort. El principio es el mismo utilizado en la producción de agua caliente sanitaria, se necesita captar, convertir y almacenar energía. El suelo radiante solar transfiere calor al local, por medio de unas tuberías subterráneas, en las cuales circula agua caliente, proporcionando una uniformidad en la temperatura ambiente del local. Suelen ser sistemas complejos en su diseño e instalación (figura 30).

Figura 30. Calefacción solar

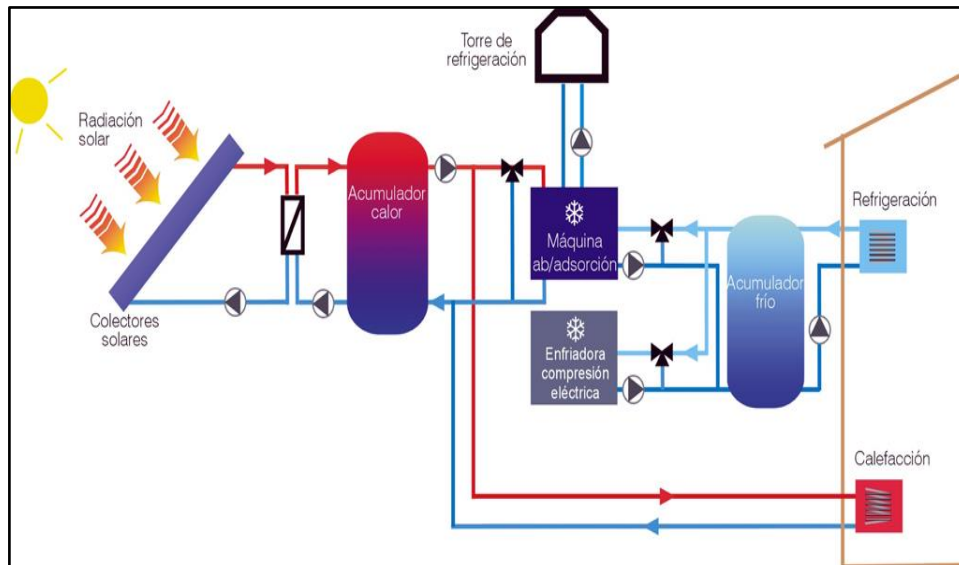


Fuente: <https://www.empresacastellon.com/imagenes/productos/2489-3n4/esquemasolar1.jpg>

Producción de frío : la energía térmica solar utilizada para sistemas de refrigeración y producción de frío, obtiene un mayor rendimiento de las instalaciones solares, además de evitar la emisión de los gases de invernadero como CFC y HCFC, que han sido determinantes para la reducción de la capa. Los sistemas de mayor aplicabilidad son las máquinas de refrigeración por absorción y adsorción. La refrigeración por absorción consiste en utilizar la capacidad de

absorber calor de pares de sustancias como el agua y el amoniaco y que se produzca cambio de estado, de líquido a gaseoso. A diferencia de los ciclos de refrigeración por compresión, el cambio de presión entre la salida del evaporador y la entrada del condensador, lo realiza un compresor. En las aplicaciones solares, por medio de captadores solares, por donde por un sistema de acumulación se tiene agua caliente que es enviada a la máquina de absorción, para el realizar el ciclo de refrigeración (figura 31).

Figura 31. Sistema basado en enfriadora térmica de absorción o de adsorción accionada por energía solar para enfriamiento de agua



Fuente: <http://aiguasol.coop/2010/12/11/refrigeracion-solar/>

6.2.1 Colectores solares

Un colector solar es un sistema con varios subsistemas, que permiten aprovechar la radiación solar, para transformarla en calor, y ser utilizada para una aplicación en particular. Aunque la aplicación de mayor interés es la obtención de agua caliente sanitaria.

En síntesis un colector solar se compone de:

Sistema de captación: Encargado principalmente de la conversión energética de la radiación solar a calor, denominado captador solar térmico.

Sistema de circulación: Es la serie de componentes que permite que el fluido tenga un camino, una velocidad de circulación y presión determinada para realizar todo el recorrido de los circuitos en el sistema.

Sistema de acumulación: consiste en almacenar la energía captada de tal forma que se pueda hacer uso de ella en el momento en que el sistema captador esté funcionando en un bajo rendimiento, cuando hay baja radiación solar (si es de día) o cuando no esté funcionando (si es de noche).

Sistema de control: Para colectores automatizados, permite dar órdenes precisas a las bombas de circulación, válvulas y recibe la señal de los sensores instalados en el colector solar, con el fin de estar dentro de los puntos de operación óptimos.

Sistema energético auxiliar: Se hace la utilización de éste, con el fin de proveer energía eléctrica al sistema de control, además de la bomba de circulación (para los sistemas de circulación forzada), y las resistencias eléctricas que complementan los sistemas de acumulación.

Se hará énfasis en los sistemas de captación, sistemas de circulación y sistemas de acumulación, ya que es de mayor interés en esta investigación.

6.2.1.1 Sistemas de captación: captadores solares de placa plana

Un captador es una clase especial de intercambiador de calor que transforma energía solar radiante en calor. Un colector solar difiere en varios aspectos a la mayoría de intercambiadores de calor. Por lo general el intercambio de fluido a fluido, con altas tasas de transferencia de calor y radiación como un factor poco importante. En el colector solar, la transferencia de energía viene de una fuente distante de energía radiante a un fluido. El flujo de radiación incidente es

aproximadamente $1000 \left[\left(\frac{W}{m^2} \right) \right]$ [9], siendo esta variable. El rango de las longitudes de onda es desde 0.3 a 3 $[\mu m]$, que es considerablemente más corta que la emitida por la mayoría de las superficies absorbentes. Así el análisis de colectores solares presenta únicamente problemas de baja y variable flujos de energía y la amplia importancia de la radiación. Los colectores de placa plana pueden ser diseñados para aplicaciones que entreguen temperaturas moderadas que no superen los 100 $[^{\circ}C]$. Estos usan radiación solar directa y difusa, no requieren seguimiento y requieren poco mantenimiento. Son mecánicamente más simples que los colectores concentradores. La importancia de los colectores de placa plana, en los procesos térmicos es de tal manera, que su comportamiento térmico se trata en considerable detalle. En muchos casos de diseño, las ecuaciones para el colector permanecen reducidas en una forma simple [3].

La placa negra absorbente transfiere la energía al fluido. Las cubiertas internas y externas sobre la placa negra absorbente reduce las pérdidas de convección y radiación con la atmosfera y el aislamiento reduce las pérdidas de calor por conducción. Los colectores de placa plana son montados en una posición estacionaria con una orientación optimizada por la localización particular para una época del año [4].

Características generales de los captadores solares de placa plana:

- La máxima temperatura que un colector instalado puede alcanzar es la temperatura de equilibrio estático, ya que es la temperatura que la instalación solar alcanzará cuando este parada.
- Se utilizan dos cubiertas o aumentar el espesor de la cubierta transparente para minimizar las pérdidas por convección y radiación.
- La placa captadora (absorbente) se recubre con pintura de color negro, aunque es más recomendable utilizar superficies selectivas que tienen un coeficiente de absorción mayor que el coeficiente de emisión para una mejor absorción de la radiación solar.

- El colector debe ser resistente a la presión de la red.
- El aislamiento debe resistir a altas temperaturas sin deteriorarse. Generalmente, se coloca entre la placa y el aislante una capa reflectante que impida que el aislante reciba la radiación.

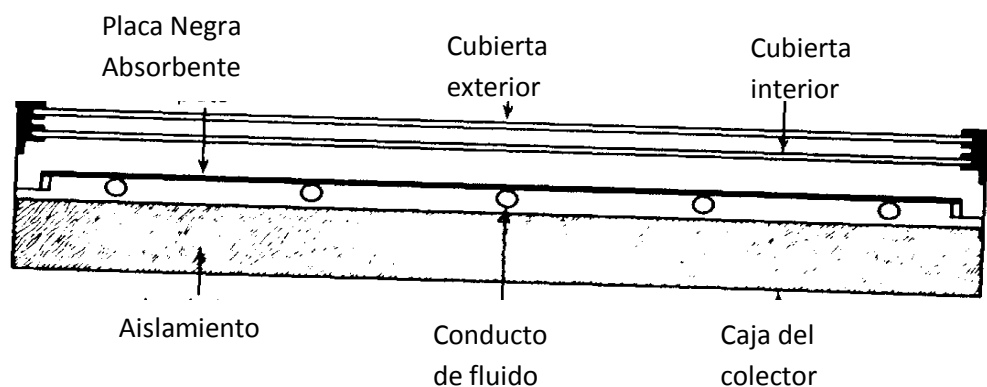
Partes del captador de placa plana

1. Cubierta transparente: Su función principal es reducir las pérdidas de calor superiores por convección, además cumple un papel muy importante, ya que permite el efecto invernadero dentro del captador, asegurando también la estanqueidad. Usualmente se utiliza vidrio templado, para tener buenas propiedades mecánicas, mejor transmisión de la energía radiante del sol, y opacidad para la radiación infrarroja, generando un aumento considerable de la temperatura de la placa absorbente, y por consiguiente una mayor captación de energía por parte del fluido (figura 32).
2. Placa absorbente: Recibe en su cara superior la energía radiante proveniente del sol, transmitida a través de la cubierta transparente, se encarga de transferir el calor generado hacia los tubos, por los cuales va circulando el fluido de trabajo. Generalmente los materiales usados son el cobre y el aluminio, debido a su buena conductividad térmica, y en ocasiones se les realiza un revestimiento de superficie selectiva, para mejorar la absorción y disminuir la emisión de energía.
3. Tuberías: Permiten la circulación del fluido de trabajo, sus características más importantes son su diámetro y distribución (parrilla de tubos o serpentín) permite determinar el flujo másico de agua a calentar del cual depende considerablemente el rendimiento del sistema. Usualmente, para permitir una buena conducción del calor entre la placa y los tubos, estos deben ser del mismo material.
4. Aislamiento: Reduce al mínimo las pérdidas de calor, en la parte posterior del sistema. Si hay incrementos de temperatura, que permitan los 100 [°C],

debe resistir estas temperaturas, además de humedad debido a condensaciones en la tubería.

5. Carcasa: Protege y sostiene todas las capas del captador solar, y la estructura que permite la adaptación al lugar donde se ubicará y el respectivo desmonte. Se caracteriza por tener rigidez, facilidad de anclaje, resistencia a cambios de temperatura y resistencia a la corrosión [9].

Figura 32. Vista en corte de un captador solar de placa plana



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes - Duffie & Beckman Pag.135

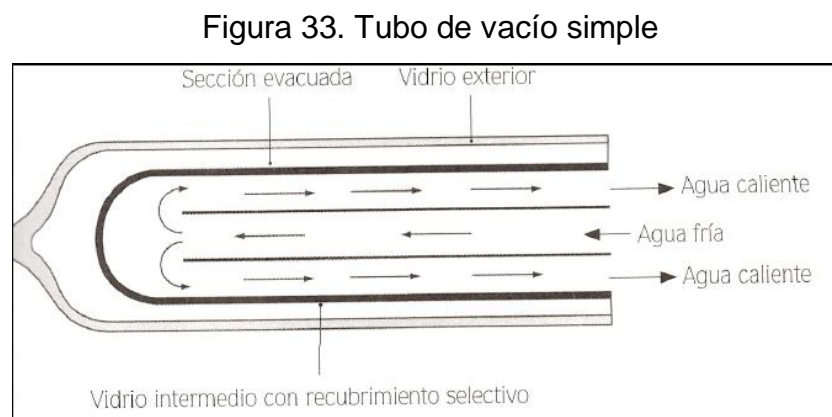
6.2.2 Sistemas de captación: captadores solares de tubos al vacío

La tecnología de tubos de vacío es actualmente la más eficaz de las empleadas en los colectores solares térmicos. Los colectores solares de tubo de vacío son el resultado de la aplicación de alta tecnología en el diseño, en la fabricación y en la selección de los materiales empleados, con la finalidad de conseguir una elevada eficiencia y rendimiento en su vida útil. Una mayor captación de la irradiación solar (incluso en días nublados y con lluvia, aumentando las horas solares efectivas), por su configuración circular. Una mayor temperatura en el colector en época invernal y una mínima pérdida de calor. Capacidad de trabajar a altas temperaturas. Los distintos sistemas de colectores de tubo de vacío se basan en los tubos evacuados. Estos están conformados por dos tubos concéntricos entre los cuales se ha aspirado el aire produciéndose un vacío. En uno de los extremos ambos

tubos se unen sellándose el vacío. En la operación, se observa que los captadores solares de tubos al vacío presentan disminución en el coeficiente de pérdidas de calor, haciéndolo propicio para aprovechar mejor la radiación solar difusa, en aquellos momentos donde se presente nubosidad o lluvia. Se utilizan también reflectores, para lograr captación adicional

Hay tres clases de colectores con tubos de vacío:

- Tubos de vacíos simple: este sistema es únicamente utilizado en calentadores solares termosifónicos. Son instalados directamente con el depósito acumulador y que por lo tanto contienen agua. En la pared del tubo evacuado se sitúa una capa de color oscuro de material absorbente. Cuando la radiación solar incide sobre la capa de un material absorbente se transforma en calor y eleva la temperatura del agua que está en contacto con él [13]. Presentan escasas pérdidas de calor pero poca protección a las temperaturas bajas (figura 33).

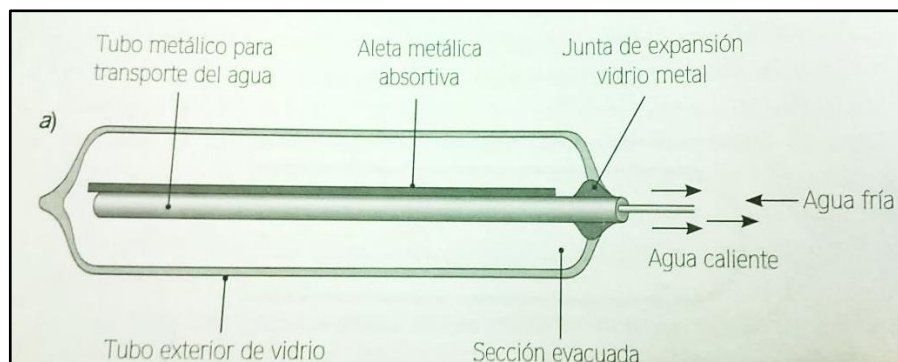


Fuente. Sistemas de calentamiento solar de agua-Isaac Pilatowsky Pág.23

- Tubo de vacío de flujo directo: la placa absorbente lleva insertado un tubo coaxial por donde circula el fluido en contracorriente. El fluido entra por el interior del tubo coaxial y retorna por la cavidad que está en contacto con la placa de este modo la energía. Los colectores de tubo de vacío de flujo directo

colocan en el interior del tubo evacuado una plancha de material absorbente adecuado que hace las veces de transformador la radiación solar en calor. El absorbedor es recorrido en su superficie por un tubo con flujo directo en el circula un fluido que eleva su temperatura en contacto con él. Los colectores de tubo de vacío de flujo directo tienen la ventaja de poder adoptar una posición tanto horizontal como vertical, lo cual no merma su rendimiento ya que el tubo puede rotar sobre su eje inclinándose el absorbedor [13] (figura 34).

Figura 34. Tubo de vacío de flujo directo

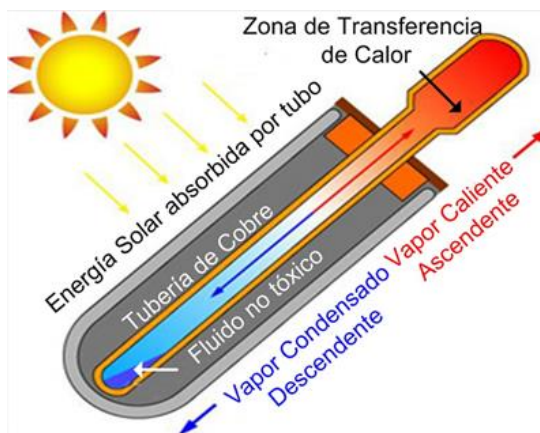


Fuente. Sistemas de calentamiento solar de agua-Isaac Pilatowsky Pág.24

- Tubos de calor: son tubos cerrados con características y propiedades del fluido específicas. Cuando el sol incide sobre el absorbedor adosado al tubo, el fluido se evapora y absorbe calor (calor latente). Como gas asciende sobre el líquido hasta lo alto del tubo donde se sitúa el foco frío. Allí se licua y cede su calor latente al fluido que nos interesa calentar volviendo a caer al fondo del tubo por gravedad. Este proceso se repite mientras dure la radiación del Sol o hasta que el colector ha alcanzado una temperatura muy alta (de en torno los 130 grados o más. El tubo de calor es considerado como un superconductor térmico por lo eficaz de su funcionamiento (figura 35). Los colectores de tubos de calor tienen la ventaja de no sufrir pérdidas por la noche ya que el proceso de transferencia

de calor no es reversible. El funcionamiento de un tubo de calor es así: 1) La radiación solar incide en el absorbedor que se calienta y transmite ese calor al tubo. 2) El calor recibido provoca que el fluido en el interior del tubo se evapore y ascienda portando energía (calor latente). 3) El fluido evaporado cede su calor latente al fluido más frío que circula por el exterior de la cabeza del tubo y al hacerlo se licua 4) El fluido de nuevo en estado líquido cae por gravedad al fondo del tubo para reiniciar el proceso [13].

Figura 35. Esquema de un tubo de calor



Fuente. <http://www.solounplaneta.com/wp-content/uploads/2007/11/functubos.jpg>

6.2.3 Sistemas de captación: concentradores solares

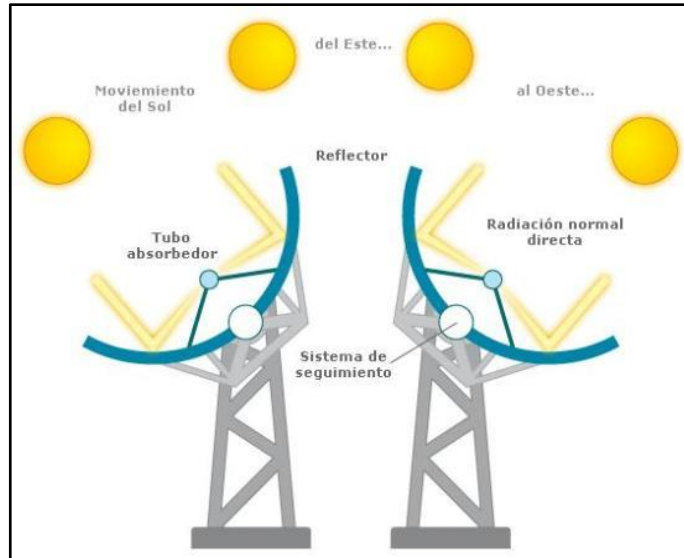
Los concentradores solares son otro tipo de sistema de captación solar, que debido a su configuración permite trabajar a temperaturas más altas de operación, que los captadores solares convencionales (placa plana), en un área menor además de minimizar las pérdidas de calor que ocurren. En los concentradores podemos encontrar variadas opciones, pueden ser clasificados según el comportamiento del haz radiante del sol en: reflectores o refractores. La forma de la placa absorbidora puede ser: cilíndrica, esférica y en revolución. Y su forma de acuerdo a los rayos incidentes en: convexos, cóncavos o planos. Los concentradores solares son altamente dependientes de un modelo óptico que

determina el aprovechamiento de la radiación solar en energía térmica de alta temperatura. La apertura, y la radiación directa son muy importantes para asegurar una muy buena eficiencia energética, pero se hace prioritario el diseño de un sistema de seguimiento solar, que a medida que la posición del sol cambie, el sistema también esté sincronizado, para aprovechar la radiación solar en todas sus instancias. Los concentradores solares trabajan en un rango de temperaturas entre los 150 y los 800 [°C] [9], por lo que son usados a nivel industrial, y para un trabajo continuo de 11 horas diarias. Según el tipo de concentrador, utiliza un sistema de seguimiento que funciona con un servomecanismo, modificando el momento en uno o dos ejes (figura 36).

Un concentrador solar tiene principalmente tres partes:

- Reflector: Refleja y concentra la radiación solar directa hacia el tubo absorbedor. Usualmente son espejos, que permite que la radiación se refleje de forma especulativa.
- Tubo absorbedor: Contiene el fluido calorportante, que circula dentro de él donde indican toda la energía captada. Se encuentra en la línea focal, cuando se tienen concentradores cilíndricos parabólicos. Son dos tubos concéntricos, el tubo exterior de vidrio, y el tubo interior metálico, que dentro de él circula el fluido, y entre tubos se presenta un vacío. Permite una menor pérdida de calor por convección.
- Sistema de seguimiento: Su objetivo es que siempre el concentrador solar esté en la posición indicada de tal manera, que capte la radiación directa en mayores proporciones en cualquier momento del día, además de mantener el foco de incidencia. De acuerdo con las proporciones del sistema, se utilizan accionamientos eléctricos, mecánicos e hidráulicos.

Figura 36. Concentrador solar cilíndrico parabólico



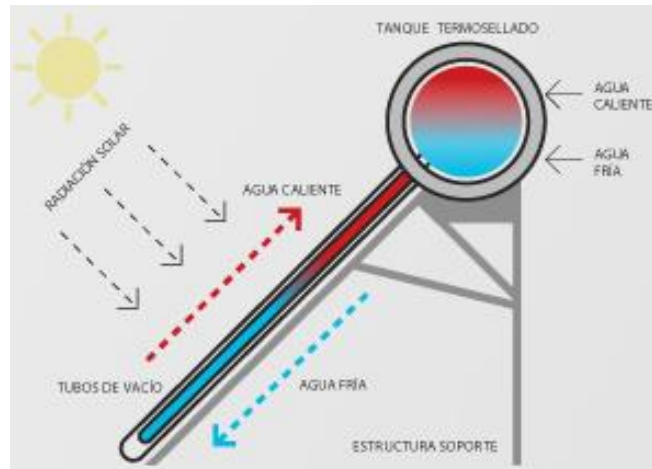
6.2.4 Sistemas de circulación del fluido

Los colectores solares para energía térmica, son diseñados principalmente permitir la ganancia de calor latente a un fluido en circulación. Es importante destacar las dos formas en las cuales se realiza este proceso:

Circulación natural: Se denomina también termosifónico. La circulación en termosifón se da cuando, en la parte superior del sistema de captación, el tanque de almacenamiento es colocado de forma horizontal, donde se tiene un suministro de agua fría, que puede ser proveniente del acueducto o un tanque más elevado, que proporcione la columna de agua necesaria que permita el flujo de agua dentro del sistema captador (figura 37). El proceso se sigue así, de acuerdo al aumento de temperatura, los fluidos disminuyen su densidad y aumentan su presión, lo que le permite ascender de dentro del arreglo de tubos del captador, y llegar al tanque de almacenamiento, el agua más caliente, se posiciona en la parte superior y en agua fría en la parte inferior más densa, que por el peso de la columna de agua, además del aumento de presión en el tanque por el aumento de la temperatura, el fluido circula hacia el captador. El circuito hidráulico debe ser corto, para que no

haya pérdidas de presión importantes, requiere unas demandas de espacio importantes, además de una estructura que resista el peso del tanque de almacenamiento. Es ventajoso porque no requiere energía eléctrica para alimentar bombas ni ventiladores.

Figura 37. Sistema de circulación termosifónico

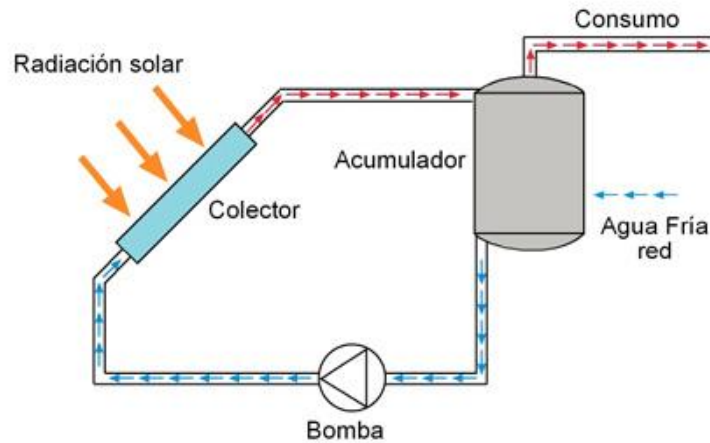


Fuente: <http://www.e-cologica.com.ar/img/img10.jpg>

Circulación Forzada: Requiere de una bomba, que succione el agua fría desde el tanque de almacenamiento (figura 38) y entre a una presión tal que permita que el fluido realice todo el recorrido por el arreglo de tubos del captador, y el agua caliente ingrese al tanque de almacenamiento. La ubicación del tanque es indiferente, puede colocarse en cualquier lugar, pero la bomba tiene que tener la capacidad necesaria para cumplir su función. Se realiza un control de la cantidad de flujo, y además deben colocarse válvulas anti retorno, que no permitan que el flujo descargado por la bomba se devuelva. Son sistemas más versátiles en cuanto a la ubicación del tanque y del captador. Como inconveniente se tiene que consume energía eléctrica de acuerdo a la potencia nominal del motor eléctrico de la bomba, lo cual hace el sistema totalmente dependiente de energía eléctrica. Los tipos de bomba para esta aplicaciones, se adaptan a los requerimientos del sistema, pueden ser centrifugas o de desplazamiento positivo. Las bombas

centrifugas trabajan en puntos de operación de altos caudales, pero la altura que alcanza la bomba es menor, y las bombas de desplazamiento positivo, trabajan en puntos de operación de bajo caudal y alta altura de cabeza de bomba.

Figura 38. Sistema de circulación forzada



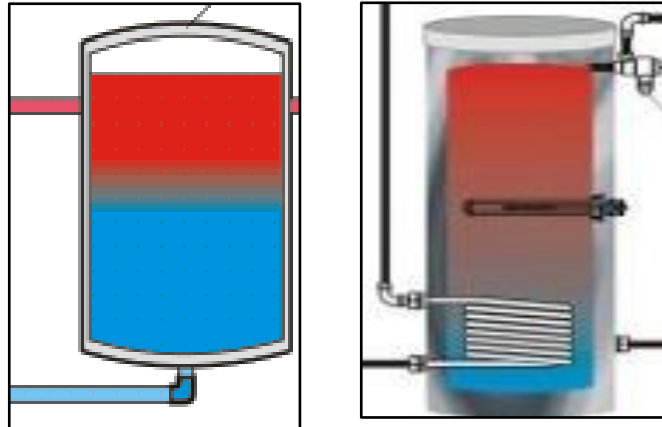
Fuente: http://www.empresaeiciente.com/images/empresas/tecnologias/22/img_03.jpg

6.2.5 Sistemas de almacenamiento

Para los colectores solares el almacenamiento de energía es imprescindible, teniendo en cuenta que la disponibilidad del recurso solar es fluctuante porque depende de las condiciones climatológicas. El tanque es el componente del sistema de almacenamiento, cuya función está en contener el fluido de trabajo y además evitar que la transferencia de calor hacia el ambiente sea la suficiente para perder el calor ganado en el sistema de captación. También se encuentran tanques de almacenamiento que además tienen un sistema de calentamiento auxiliar e intercambiadores de calor (figura 39), cuando la temperatura ambiente está muy baja y el fluido se enfría rápidamente, permiten el sostenimiento de la temperatura final conseguida por el captador en el tiempo de operación. Es

necesaria la estratificación dentro del tanque, ya que entre más fría entre el agua al colector, mayor eficiencia térmica tendrá.

Figura 39. Tanques de almacenamiento (acumulador y con intercambiador de calor y sistema auxiliar de calentamiento)



6.3 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La luz proveniente del sol está formada por una serie de ondas electromagnéticas que tienen unas partículas de energía llamadas “fotones”, como las nombró el científico Albert Einstein. Esta energía presente en la luz es aprovechada por sistemas que transforman la irradiación proveniente del sol en electricidad.

Para entender el efecto fotovoltaico primero es necesario conocer en qué materiales se presenta este efecto.

6.3.1 Materiales semiconductores

Son materiales que tienen propiedades eléctricas que están en medio de los dieléctricos y los conductores como los metales. Los materiales semiconductores tienen enlaces de sus electrones del último nivel que a comparación de los dieléctricos, son más débiles y de los metales, son más fuertes. Un semiconductor

puede comportarse como un conductor bajo alguna perturbación o condición específica.

La conductividad eléctrica consiste en la facilidad de movimiento de los electrones en los átomos, esto se debe a que las fuerzas de enlace son muy débiles. Los metales cumplen con esta condición, sus electrones pueden viajar casi libremente y por ello conducen la electricidad.

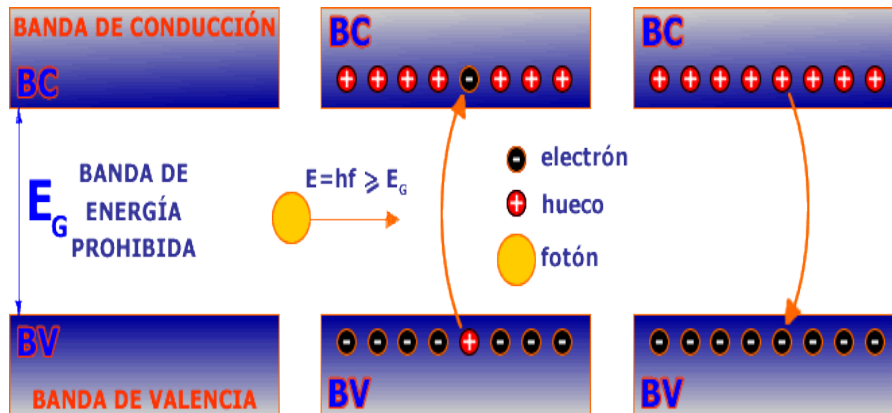
6.3.2 Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es el que rige los procesos de conversión de energía solar a eléctrica. Para que ocurra dicho efecto se necesita una superficie de un material semiconductor y un haz de luz incidiendo en ella (figura 40).

El haz de luz actúa como un excitador, porque parte de la energía que tiene es absorbida por el material semiconductor para arrancar los electrones de valencia (electrones en el último nivel). Los electrones abandonan su átomo convirtiéndose en cargas negativas y el átomo el cual fue abandonado por su electrón se convierte en una carga positiva llamada agujero.

Tanto las cargas positivas como las negativas creadas en el material semiconductor gracias a la incidencia de la luz se pueden mover a lo largo del material, el material se vuelve conductor gracias al paso de los electrones a otro estado, desde la llamada banda de valencia hacia la banda de conducción, pasando por la banda de diferencia o energía prohibida (band gap). Esto se produce gracias a que cierta radiación a una determinada longitud de onda es absorbida para poder separar los electrones, el resto de longitudes de onda que no son útiles para el efecto fotovoltaico son absorbidas en forma de calor (Radiación infrarroja).

Figura 40. Efecto fotovoltaico en un semiconductor



Fuente: http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/images/saltoeg.gif

6.3.3 Las celdas solares

Las celdas solares son los dispositivos que permiten la conversión de la luz solar a electricidad. Se componen de un contacto positivo y un contacto negativo por donde viajan los pares hoyo y electrón formados por la excitación de la luz absorbida (figura 41).

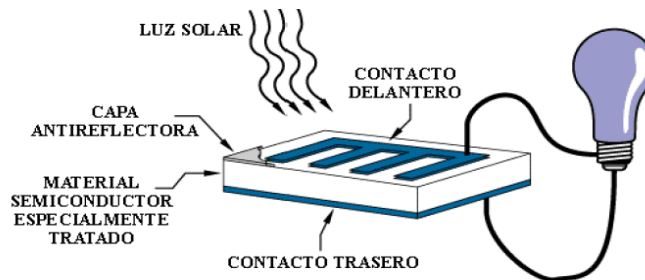
Los contactos permiten el viaje de las cargas a través de ellos, generando potencia eléctrica, generalmente son de aluminio.

Las celdas solares generalmente están fabricadas a partir de un elemento semiconductor cómo lo es el silicio aunque también se han creado celdas a partir de otros elementos cómo el Germanio, Indio, Arseniuro de Galio, y Teluro de Cadmio.

En el caso de las celdas de silicio, se destacan dos zonas: el silicio tipo N al cual se le añade átomos de fósforo a su estructura cristalina (Dopping), y el Silicio tipo P el cual se le añade Boro, los electrones viajan por la zona de silicio tipo N y los hoyos (cargas positivas) por la parte de silicio tipo P estas dos capas se unen y forman el cuerpo total de la celda solar [14].

El silicio para la fabricación de celdas solares puede venir de dos formas, el silicio cristalino y el silicio amorfo, dentro del silicio cristalino está el silicio policristalino y el monocristalino, la diferencia entre el silicio monocristalino y el policristalino es el tamaño o límite de grano, siendo el monocristalino el que menor límite de grano presenta, puesto que entre más límite de grano más pérdida de energía existe, entonces ello explica por qué las celdas de Silicio monocristalino tienen un mejor rendimiento que las celdas de policristalino. El silicio amorfo se considera de menor calidad que el silicio cristalino, siendo este último el más apetecido para el mercado de celdas fotovoltaicas [14].

Figura 41. Esquema celda solar



Fuente: http://www.anes.org/anes/formularios/EnergiaRenovable/images/cell_cell_s

6.3.4 Características de una celda solar

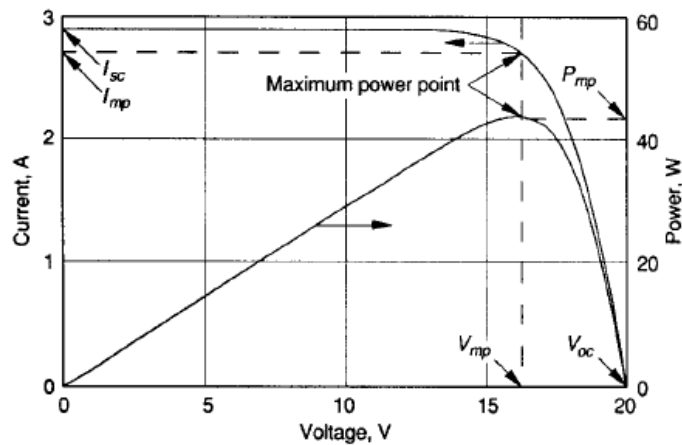
Las celdas solares, gracias al efecto fotovoltaico tienen un voltaje, corriente y potencia característicos. Los parámetros de una celda solar son:

- Voltaje de circuito abierto V_{oc} .
- Corriente de corto circuito I_{sc} .
- Potencia máxima de operación P_{mp} .
- Voltaje máximo de operación V_{mp} .
- Corriente máxima de operación I_{mp} .

El voltaje de circuito abierto (V_{oc}) es aquel valor que alcanza una celda sin carga eléctrica, estando sometido a condiciones estándar: radiación $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$, velocidad del viento de $1 \left[\frac{m}{s} \right]$ y temperatura de $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$, la corriente de cortocircuito (I_{sc}) es la que aparece cuando el voltaje es cero. Los valores máximos de operación de voltaje y corriente (V_{mp} e I_{mp}) son aquellos que la celda alcanza, bajo las mismas condiciones estándar pero mientras está en funcionamiento (alimentando una carga). La Potencia máxima (P_{mp}) corresponde al producto entre el V_{mp} y la I_{mp} .

El comportamiento de esta curva y por consiguiente de la salida eléctrica, depende tanto de la radiación de la luz solar incidente como de la temperatura de la celda solar (figura 42).

Figura 42. Curva característica de una celda solar.

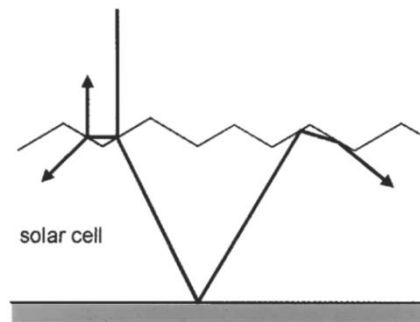


Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes Duffie & Beckman [9]

6.3.5 Propiedades ópticas de una celda solar

Los estudios realizados en las celdas solares en el campo de la óptica han tenido como fin aprovechar la mayor cantidad de radiación incidente posible, dando como resultado superficies texturadas con alta absorptividad actuando casi como superficies selectivas, sin embargo con emisividades mayores a comparación de una superficie netamente selectiva (figura 43).

Figura 43. Esquema de una superficie texturada de una celda solar.



Fuente: Practical Handbook of Photovoltaics Fundamentals and Applications [14].

6.3.6 Sistemas de conversión de energía fotovoltaica

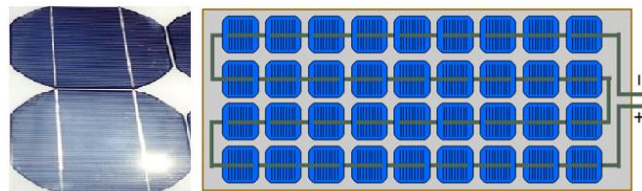
Un sistema fotovoltaico es un grupo de elementos cuyo funcionamiento en conjunto permite la conversión de la energía solar en energía eléctrica.

6.3.6.1 Partes de un sistema de conversión de energía fotovoltaica

Panel

Es el conjunto de celdas solares conectadas entre sí en serie o en paralelo, que captan la energía solar y la convierten en energía eléctrica por medio del efecto fotovoltaico, un conjunto de paneles forma un arreglo (figura 44).

Figura 44. Panel o módulo solar



Fuente: http://www.energianow.com/Instructivos/Componentes_Sistema_Fotovoltaico.pdf

Regulador de Carga

En sistemas autónomos se necesita este dispositivo, su función principalmente es de protección puesto que la potencia generada por el módulo es irregular ya que depende de la disponibilidad y es posible que la energía que le llegue a la batería pueda sobrecargarla (figura 45), así mismo la energía de la batería puede pasar al panel y dañarlo, es por ello que se requiere un diodo de bloqueo y el regulador de carga (el diodo de bloqueo puede hacer parte del sistema regulador aunque generalmente hace parte del panel).

Figura 45. Regulador de carga.



Fuente: https://autosolar.es/images/stories/virtuemart/product/regulador_de_carga_steca_10a_12v_24v_prs_solarix10101.jpg

Baterías

Las baterías también son necesarias en un sistema autónomo, se encargan de almacenar la energía proporcionada por el panel y también compensar dicha energía cuando el panel no pueda suplir electricidad, en las aplicaciones para las cuales el sistema se ha implementado.

Las baterías son del tipo electroquímico y usualmente se encuentran constituidas de Plomo-Acido, Plomo-Acido-Calcio y Níquel-Cadmio (figura 46). Estas últimas presentan mayor capacidad que las otras y por consiguiente son más costosas en el mercado.

Figura 46. Baterías Solares.



Fuente: <http://energiaslimpiasecuador.com/images/MT121000G.jpg>

Inversor o Convertidor

La principal función de este dispositivo es convertir la corriente directa de voltaje más bajo (DC) en corriente alterna con voltaje más alto (AC) (figura 47). Es un dispositivo que se usa tanto en sistemas autónomos como sistemas conectados a la red.

Figura 47. Inversor.



Fuente: http://mco-s2-p.mlstatic.com/inversor-de-corriente-cobra-cpi-480-400-w-para-tu-carro-1291-MCO17846859_9371-O.jpg

Existen dos tipos de sistemas fotovoltaicos: los sistemas autónomos y los sistemas conectados a la red.

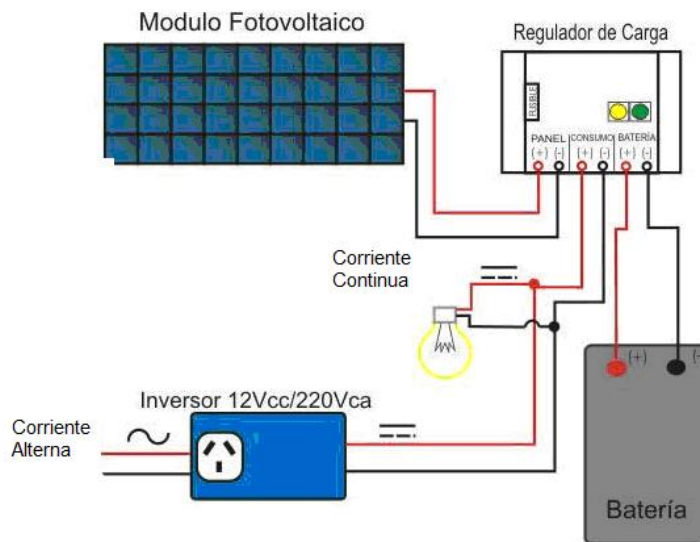
6.3.6.2 Sistemas fotovoltaicos autónomos

Los sistemas de energía solar fotovoltaica autónomos requieren subsistemas de almacenamiento como lo son las baterías, que les permita tener independencia de todo tipo de fuente externa energética y funcionalidad para operar cuando no hay disponible la cantidad mínima necesaria para generar energía eléctrica a partir del efecto fotovoltaico (figura 48).

6.3.6.3 Sistemas fotovoltaicos conectados a red

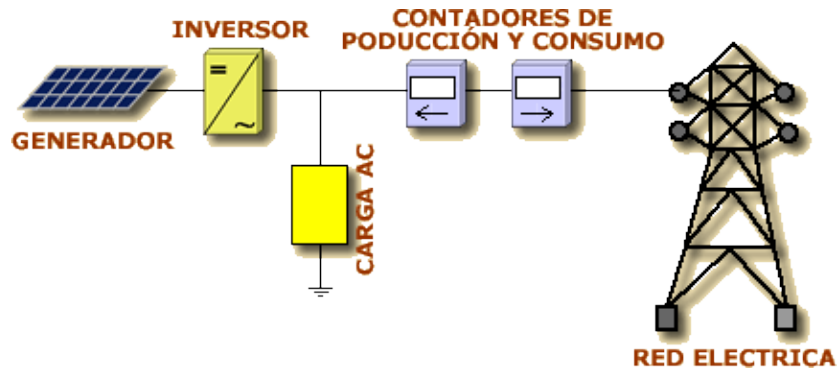
Estos sistemas carecen de subsistemas de almacenamiento como baterías, sin embargo están conectados a la red la cual puede actuar como una fuente y suplir la carga cuando la energía solar no sea la suficiente. Si la disponibilidad de energía solar es mayor a la demanda, este exceso de energía puede ser enviado a la red e incluso vendido a las empresas prestadoras de servicio de electricidad (figura 49).

Figura 48. Sistema fotovoltaico autónomo.



Fuente: <http://conscienciadespierta.files.wordpress.com/2012/10/sistema-pv-apoyo-copy.jpg> / Editado por Autores.

Figura 49. Sistema fotovoltaico conectado a la red eléctrica



Fuente: http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/05_tipos/02_conec_red/01_basico/images/conectados.gif

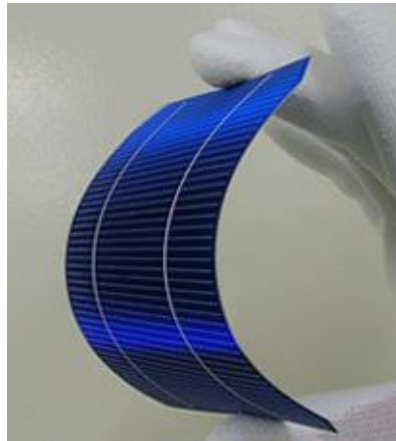
6.3.6.4 Tecnologías fotovoltaicas de película delgada (thin film)

Una tecnología nueva de sistemas de generación de energía eléctrica fotovoltaicos son las películas delgadas y flexibles, formadas por varias capas de contactos y materiales semiconductores de silicio amorfo (a-Si) y otra capa de silicio microcristalino ($\mu\text{-Si}$). La capa de silicio amorfo absorbe una parte del espectro solar, la parte restante que traspasa esta capa es absorbida por la otra capa de silicio microcristalino (figura 50).

Otros materiales que se usan para fabricar películas delgadas fotovoltaicas son telurio de cadmio (CdTe), también cobre, galio, indio y selenio (Cu Ga, In y Se₂) [14].

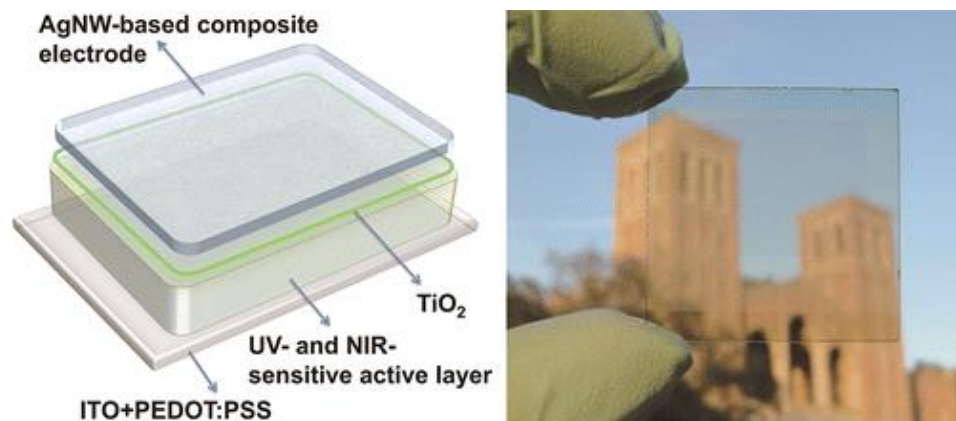
Esta tecnología flexible aumenta el rango de aplicaciones en las que la energía solar fotovoltaica puede ser utilizada. También se están estudiando celdas fotovoltaicas transparentes pero aún están en fase de estudio y no se comercializan actualmente (figura 51).

Figura 50. Celda fotovoltaica de película delgada



Fuente: <http://www.cumo.it/cumo/cumo-innova/Ultra-thin-HIT-Solar-Cell-Sanyo.jpg>

Figura 51. Celdas solares transparentes



Fuente: <http://cdn.phys.org/newman/gfx/news/2012/transparents.gif>

6.3.6.5 Celdas solares orgánicas

Las celdas solares orgánicas son dispositivos hechos de pequeñas moléculas de materiales semiconductores (a base de carbono) o polímeros (figura 52), en forma de tintas que convierten la luz incidente en energía eléctrica por medio de procesos químicos como la oxido-reducción [15].

Se diferencian principalmente de las celdas fotovoltaicas convencionales en dos cosas: el mecanismo de conversión de luz a electricidad y los métodos de fabricación. Otra diferencia es que en los contactos ya no se utiliza aluminio sino un óxido conductor transparente (TCO) [15].

Estas tecnologías son de hecho más delgadas y se pueden fabricar mediante procesos de impresión, evaporación al vacío y técnicas de revestimiento por rodado, cuya ventaja principal es la gran producción en masa a un considerable bajo costo respecto a la tecnología tradicional fotovoltaica. Contrastando con la gran cantidad de energía necesaria para fabricar celdas solares convencionales. Al ser delgadas y flexibles, este tipo de celdas orgánicas pueden ser fácilmente. Otra ventaja que ofrece la tecnología de los semiconductores orgánicos es que todas las propiedades necesarias como lo son ópticas, eléctricas y mecánicas pueden ser elaboradas o sintetizadas para satisfacer los requerimientos de funcionalidad de una celda fotovoltaica [15].

Desde principios de 1980, la eficiencia de las celdas solares orgánicas se ha incrementado desde menos de 1% hasta un 8% a finales del año 2010. Actualmente se han alcanzado eficiencias de un 11% [15].

En conclusión se está llegando a obtener una energía más limpia con las celdas orgánicas, economizar los recursos para su producción y comercialización.

Un reto o desventaja de esta tecnología respecto a las anteriores es la vida útil que está en promedio de unos 3 a 5 años de duración en comparación a las celdas de silicio que tienen una duración aproximada de 20 años, sin embargo tienen también un costo tanto energético como comercial de disposición final más económico [15].

Figura 52. Celda solar orgánica

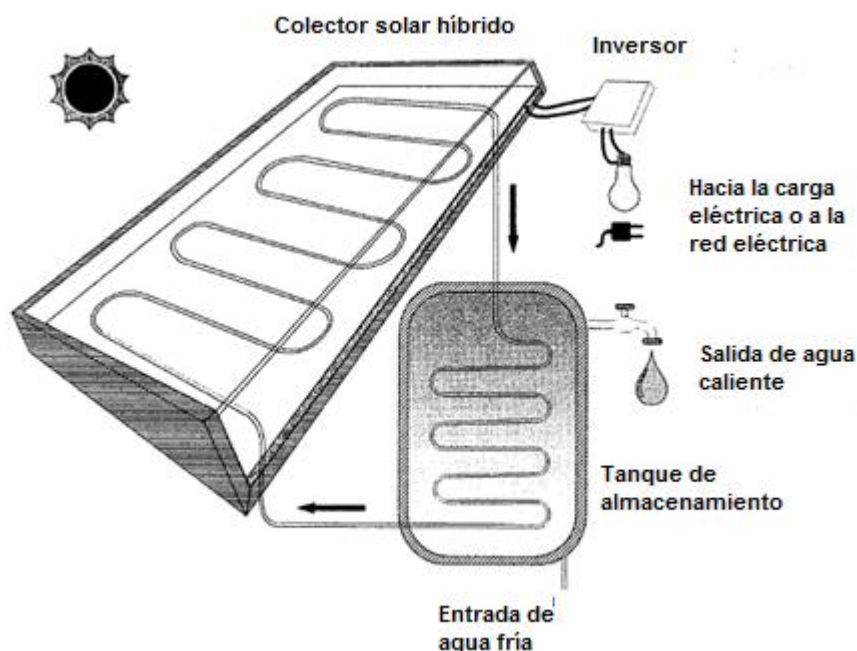


Fuente: Organic solar cells GLOWACKI, Eric.

7. COLECTORES SOLARES HÍBRIDOS (TÉRMICOS Y FOTOVOLTAICOS)

Un colector híbrido es la unión o combinación de dos sistemas de energía solar: los sistemas de energía solar térmicos y los fotovoltaicos. La característica principal de estos sistemas es la obtención de energía eléctrica y térmica de forma simultánea y proveniente de un mismo dispositivo con un área común.

Figura 53. Esquema general de un colector solar híbrido.



Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

En la figura 53 se puede observar el propósito de este tipo de sistemas, que es aprovechar la energía solar de dos formas distintas: eléctrica y térmica.

7.1 CARACTERÍSTICAS DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO

La unión de estos dos sistemas tiene ciertas características. Estos sistemas ahorran espacio, pero el costo que tienen que pagar es una reducción en las eficiencias tanto eléctricas como térmicas del sistema.

La causa principal de la reducción de la eficiencia eléctrica es que si hay presencia de cubiertas superiores de vidrio adicionales, las pérdidas por reflexión se ven aumentadas, disminuyendo la cantidad de energía que llega a las celdas y por consiguiente disminuyendo la salida eléctrica del panel, sin embargo la cubierta adicional ofrece un aislamiento que beneficia el rendimiento térmico del colector híbrido.

Si no existe una cubierta, el rendimiento eléctrico del panel fotovoltaico aumenta, pero las pérdidas superiores de calor aumentan, ocasionando un desempeño térmico menor.

La reducción de la eficiencia térmica se debe a que la energía proveniente de la luz no incide directamente a la placa de absorción, sino que debe pasar por el panel fotovoltaico y una porción es utilizada para producir electricidad, el resto es aprovechado para calentar el fluido de trabajo del colector. El efecto fotovoltaico utiliza ondas con menor longitud de onda y mayor frecuencia son las que tienen más energía contenida en los fotones, las ondas con longitudes de onda mayores son las que generan el calentamiento en el panel.

La generación de energía por unidad de área es mayor que tener los dos sistemas por separado formando un área equivalente a la de un colector híbrido, es decir, que por ejemplo, un metro cuadrado de área de colector híbrido produce más cantidad de energía que tener esa misma área distribuida la mitad para un colector solar térmico y un panel fotovoltaico.

7.1.1 Ventajas de un sistema colector solar híbrido

- Ahorro de espacio.
- Reducción de tiempo y costos de instalación, porque se instala un dispositivo en vez de dos.
- Como todo sistema de energía renovable, no genera desechos contaminantes.

7.1.2 Desventajas de un sistema colector solar híbrido

- Operación a menores eficiencias.
- Costos de fabricación altos. Se requiere de otros aditivos o componentes especiales adicionales para el correcto funcionamiento del conjunto.

Los colectores híbridos pueden trabajar con fluidos como: aire, agua o la combinación de ambos.

Cada tipo de colector solar híbrido tiene un concepto de diseño diferente, puesto que para cada fluido se debe contar con ciertas modificaciones físicas al colector.

En general existen 5 grupos principales de conceptos de diseño de colectores solares híbridos que trabajen con los 3 tipos de fluido de trabajo anteriormente enunciados.

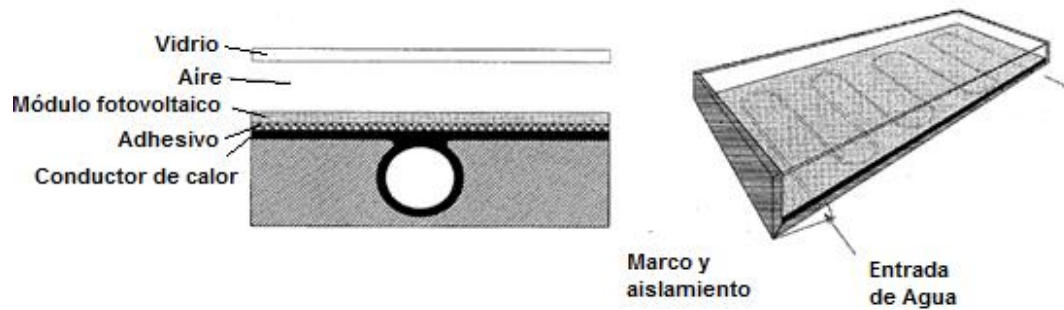
7.2 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO DE PLACA Y TUBOS (*Sheet and tube*)

El concepto de este tipo de colector híbrido es el más común y simple, es la unión de una placa de absorción con tubos a un módulo fotovoltaico comercial con una cubierta de vidrio, las modificaciones son casi nulas comparado a un colector solar térmico de placa plana.

Sin embargo debe existir una buena transferencia de calor del módulo fotovoltaico hacia los tubos dentro de los cuales circula el fluido de trabajo, porque el que absorbe la radiación incidente es el módulo fotovoltaico, entonces se requiere de una buena conducción de calor entre estos dos elementos (figura 54).

Las celdas fotovoltaicas se consideran cómo superficies selectivas, puesto que tienen gran absorptividad, sin embargo a diferencia de las superficies netamente selectivas, tiene una emisividad alta. Este es un factor que en este tipo de colectores es difícil de cambiar, luego se debe hacer énfasis en disminuir la resistencia térmica presente entre el panel fotovoltaico y la placa de absorción.

Figura 54 Colector solar híbrido de placa y tubos.



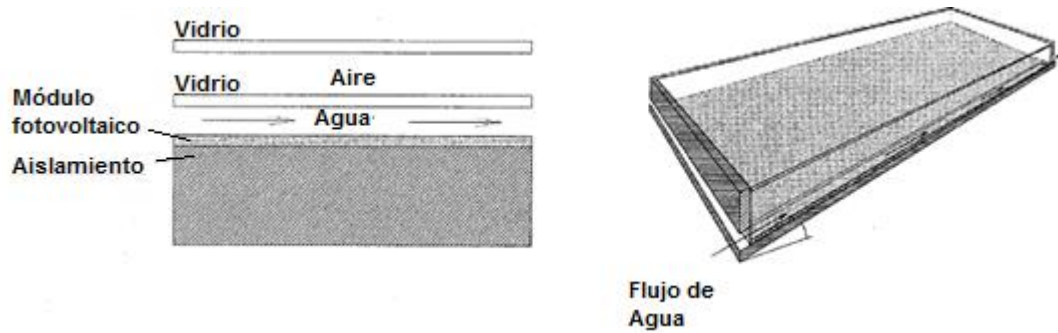
Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

Los colectores híbridos de placa y tubos pueden presentar o no, cubiertas adicionales, se considera que más de dos cubiertas en los colectores híbridos no genera ningún beneficio, puesto que las pérdidas por reflexión ocasionan un rendimiento eléctrico pobre. Así mismo también existen colectores híbridos sin cubierta, los cuales muestran un aumento en su rendimiento eléctrico puesto que están siendo refrigerados con agua que pasa por los tubos.

7.3 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO ACANALADO

Este concepto de diseño tiene como característica que el agua está en contacto directo con el panel fotovoltaico, tiene dos cubiertas (figura 55), entre la cubierta exterior y la interior hay aire encapsulado, mientras que entre la cubierta interior y el panel circula agua. Este tipo de colector requiere un buen aislamiento o encapsulamiento del módulo fotovoltaico, también se debe tener en cuenta la presión del agua que circula por el colector puesto que puede superar la resistencia del vidrio. Experimentos realizados demostraron que a una altura de canal mayor a 5 mm se presentan burbujas de aire en el agua, lo que disminuye el rendimiento térmico considerablemente.

Figura 55. Colector solar híbrido acanalado.

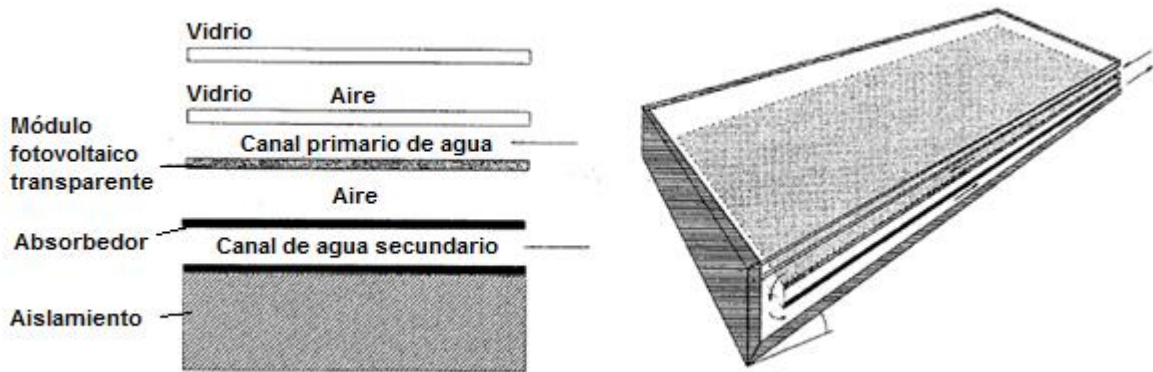


Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

7.4 COLECTOR SOLAR HIBRIDO DE DOBLE ABSORBEDOR

Teóricamente este diseño se caracteriza por un aumento en la salida térmica y eléctrica, también por el uso de una tecnología novedosa que es la aplicación de módulos fotovoltaicos translucidos que permitirían un mejor desempeño tanto térmico como fotovoltaico. La estructura y partes de este tipo de colector híbrido se muestran en la figura 56.

Figura 56. Colector solar híbrido de doble absorbedor.



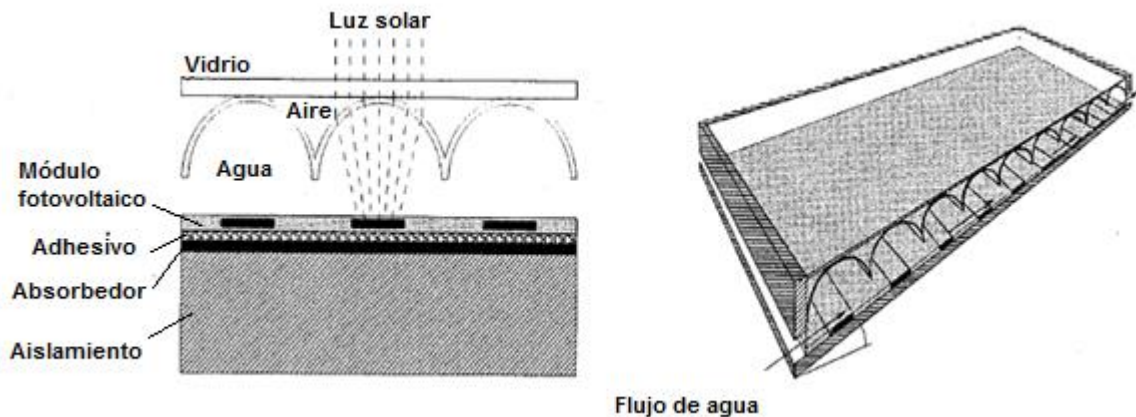
Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

7.5 COLECTOR SOLAR HÍBRIDO CON LENTE CONCENTRADOR

Este tipo de colectores híbridos tiene un diseño especial, en vez de usar los comúnmente llamados “lentes de Fresnel” [16] para concentrar radiación directa, usa una modificación que le permite concentrar radiación difusa, especialmente para sitios donde no hay mucha radiación directa (figura 57).

La desventaja principal de este tipo de colector es que se requiere de técnicas de manufactura avanzadas tanto para el vidrio, como de celdas fotovoltaicas especialmente producida para tal aplicación, aumentando excesivamente los costos.

Figura 57. Colector solar híbrido con lente concentrador.

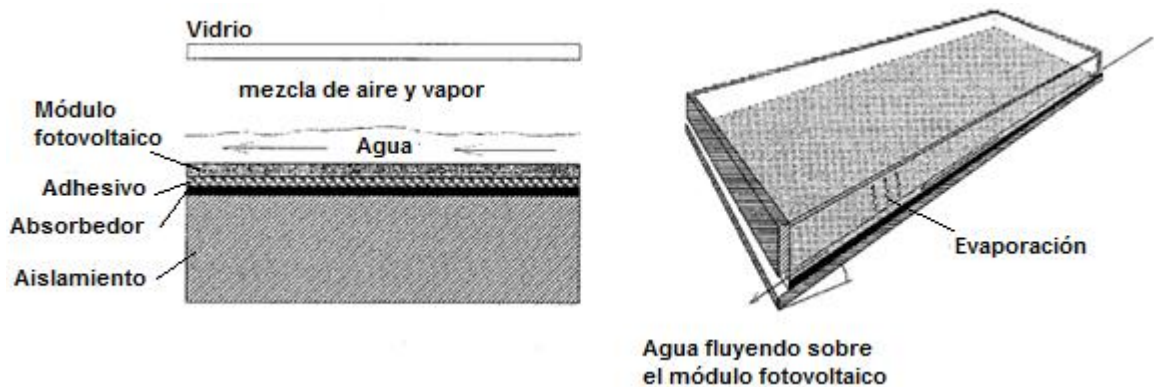


Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

7.6 COLECTOR HÍBRIDO DE FLUJO LIBRE

A diferencia del colector acanalado no se requiere una cubierta de vidrio adicional para separar el fluido del aire, entonces las pérdidas de reflexión y costos de material (vidrio) se reducen. Este tipo de colectores deben trabajar con fluidos cuyo punto de ebullición es muy alto para mejorar su rendimiento, porque se evita que se presente condensación y reduzca la transmisión de la radiación (figura 58). Aún se está estudiando el uso del agua en este tipo de colector.

Figura 58. Colector híbrido de flujo libre.



Fuente: Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. De Vries, Douwe [16].

Cada concepto de diseño tiene sus propias características, ventajas y desventajas que pueden ser viables para situaciones o casos específicos, igualmente los respectivos modelos térmicos difieren en cada concepto de diseño.

En el diseño y aplicación de colectores solares híbridos se debe tener en cuenta que para obtener un mejor rendimiento eléctrico se requiere que el módulo fotovoltaico esté a la menor temperatura posible, pero el rendimiento térmico demanda altas temperaturas, se debe llegar a un equilibrio o establecer una prioridad sobre qué es lo que más se necesita.

El concepto de diseño elegido en este proyecto es el colector híbrido de placa y tubos, debido a la disponibilidad de sus componentes y tecnologías existentes, teniendo en cuenta los procesos de manufactura que la construcción de este implica.

8. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

8.1 DISEÑO TÉRMICO DEL CAPTADOR SOLAR DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

8.1.1 Criterios de diseño

El captador solar es la parte más importante del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), sobre el cual incide la fuente energética (energía solar) y se realiza la respectiva conversión de ella mediante los mecanismos de transferencia de calor (conducción, convección y radiación).

Cubierta

Su propósito es permitir que la radiación incidente, sea transmitida a través de ella, ser la protección de panel fotovoltaico de la intemperie, crear el efecto invernadero dentro del captador, es decir permitir la transmisión de energía solar hacia el interior del captador y limitar en gran manera las pérdidas de calor por convección y radiación infrarroja hacia el ambiente, presentando efectos significativos tanto en la eficiencia térmica como en la eficiencia eléctrica.

Se deben verificar las propiedades ópticas del material (transmisividad, reflectividad, y absorptividad). La cubierta del captador debe tener una alta transmisividad, baja absorptividad y baja reflectividad de la radiación con longitudes de onda que correspondan al espectro que cubre la radiación térmica (ultravioleta, visible e infrarroja), características de un material transparente.

La cubierta debe soportar las condiciones meteorológicas, la intemperie y los cambios abruptos de temperatura. El material de la cubierta, debe tener unas propiedades específicas para la aplicación de los colectores solares, que mejoren la eficiencia térmica del sistema captador de energía solar. Estas serán especificadas en la selección de materiales.

Módulo fotovoltaico

El módulo fotovoltaico en el captador solar cumple la función de: suministrar la energía eléctrica de consumo de la carga y absorber la radiación solar incidente. Gracias a las propiedades ópticas de las celdas solares, cuya superficie es considerada selectiva (alta absorptividad, baja transmisividad y baja reflectividad), se absorbe la radiación para cumplir los requerimientos térmicos y eléctricos del colector solar híbrido.

Es importante destacar los siguientes aspectos:

La temperatura de lámina del módulo fotovoltaico no debe exceder las temperaturas de operación especificadas por el fabricante.

El área seleccionada, debe cumplir como mínimo los requerimientos de potencia eléctrica (voltaje y corriente), que deben ser suministrados a la bomba para la respectiva circulación del fluido, por todo el sistema durante todo el tiempo de operación del sistema.

Para una mejor eficiencia eléctrica, las conexiones de las celdas solares se realizan en serie, minimizando las resistencias eléctricas, para disminuir las pérdidas de voltaje y permitir un flujo de corriente más continuo.

Pegante (contacto entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbadora)

Dentro del captador, cumple la función de permitir la unión entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbadora cuyas características indican una conductividad térmica baja. Este pegante debe asegurar una unión fija, con lo cual no haya deslizamiento entre las capas del colector, dando consistencia y rigidez. Es un elemento clave para la adecuada transferencia de calor hacia la placa absorbadora.

Placa absorbedora

El calor disipado por el módulo fotovoltaico que se transfiere por medio del adhesivo, debe ser recibido por la placa absorbedora, que es el elemento que absorbe el calor producido por el calentamiento del módulo fotovoltaico, para transferirlo a los tubos por donde se encuentra circulando el fluido de trabajo (agua). Como característica principal debe tener una alta conductividad térmica, por lo general se escogen materiales metálicos y en muchas ocasiones se les realizan tratamientos superficiales y selectivos, para mejorar la eficiencia de los mecanismos de transferencia de calor entre la placa absorbedora y los tubos.

Tubos

Contienen el fluido de trabajo del sistema completo, que circula por el captador solar. Como aspectos a tener en cuenta se tiene:

La distribución de los tubos, que tiene una significativa incidencia en el comportamiento que van a tener las pérdidas de energía en el fluido, las cuales se explicarán posteriormente cuando se realice el diseño hidráulico.

El material se debe escoger metálico, debido a la unión con la placa absorbedora, si es posible que estas dos sean del mismo material, con alta conductividad térmica, y que debido a la presencia del fluido de trabajo (agua), no se presente óxido ni desgaste prematuro.

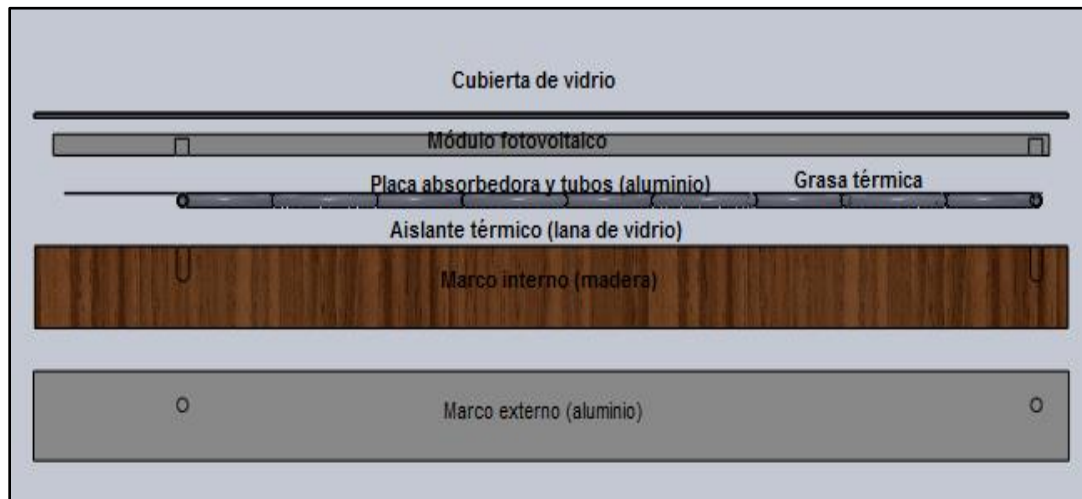
Aislante térmico

Permite minimizar de manera adecuada las pérdidas de calor hacia el ambiente de las placas superiores del captador solar, permitiendo que se conserve la temperatura adecuada a la salida del fluido. Como aspectos de selección debe tener una baja conductividad térmica y su espesor debe ser el adecuado de tal manera que no afecte significativamente la eficiencia térmica del sistema. Además de su resistencia a la humedad y a altas temperaturas sin degradarse sus propiedades.

Marco

Es donde van instaladas todas las capas del captador solar. Debe tener un diseño que permita fijar cada una de las partes de tal manera que queden rígidas y seguras para la funcionalidad del captador. Los criterios para la selección del material son la rigidez, baja conductividad térmica (para el marco interno), ligero y resistente a la humedad e intemperie (para el marco externo). El segundo criterio permite hacer mínimas las pérdidas de calor (coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas), en conjunto con el aislante térmico (marco interno).

Figura 59. Partes del captador solar



8.1.2 Selección de materiales

Para el modelamiento térmico del captador solar se seleccionan los siguientes materiales, según los criterios de diseño anteriormente planteados, estos valores serán ingresados a la simulación del captador solar:

Cubierta

Se selecciona **vidrio** con bajo contenido de hierro (**vidrio templado**) con:

Transmisividad 0.92

Espesor del vidrio 5 [mm]

El espesor de vidrio seleccionado corresponde al encontrado en el mercado local.

Módulo fotovoltaico

Se selecciona **un módulo fotovoltaico marca YINGLI SOLAR SERIE JS 145 YL145P-17b**, policristalino, con conexiones internas en serie cuyas especificaciones principales son:

<i>Potencia máxima</i>	145 [W]
<i>Voltaje máxima de operación</i>	18,90 [V]
<i>Corriente máxima de operación</i>	7,99 [A]
<i>Ancho</i>	1,47 [m]
<i>Largo</i>	0,68 [m]
<i>Voltaje de circuito abierto</i>	22.5 [V]
<i>Corriente de corto circuito</i>	8,47 [A]

Los requerimientos de potencia eléctrica del prototipo colector híbrido (térmico y fotovoltaico) que se tuvieron en cuenta para esta selección, se especificarán más en detalle en la sección 8.3 y 8.4.

Adhesivo

El adhesivo seleccionado fue grasa térmica adhesiva, marca KAFUTER que usualmente se usa en los disipadores de calor que se encuentran en los equipos electrónicos.

Cantidad a aplicar 640 [g]

Conductividad térmica 0,8 $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$ [17]

Placa absorbedora

Se selecciona **lámina de aluminio**, cumpliendo con los criterios establecidos y siendo de fácil adquisición en el mercado local con especificaciones importantes como:

<i>Conductividad térmica</i>	237,0 [$\frac{W}{m \cdot K}$] [18]
<i>Espesor</i>	0.9 [mm]
<i>Area</i>	0.94 [m ²]
<i>Largo</i>	1.442 [m]
<i>Ancho</i>	0.65 [m]

Tubos

Se seleccionan **tubos de aluminio** que corresponden al mismo material de la placa absorbedora, asegurando la calidad del proceso de unión (soldadura) entre éstos.

Aislante

Se selecciona **lana de vidrio**, ya que es de fácil adquisición en el mercado local y porque permite atrapamiento de aire, con lo cual se produce un aislamiento térmico, absorbe humedad, y resiste hasta 200 [°C], sin degradar sus propiedades características.

<i>Conductividad térmica</i> <i>lana de vidrio</i>	0,07 [$\frac{W}{m \cdot K}$] [18]
---	-------------------------------------

Marco

Para el captador solar, tendremos 2 marcos, que componen la estructura que fija las capas del mismo. Para el marco interno se selecciona **madera**, por tener

buena resistencia mecánica, rigidez y baja conductividad térmica, haciendo en conjunto un mejor aislamiento, con la fibra de vidrio. Para el marco externo seleccionamos **aluminio**, por ser resistente a la humedad y liviano.

<i>Espesor de madera</i>	1.2 [cm]
<i>Ancho de madera (interior)</i>	70 [cm]
<i>Largo de caja de madera (exterior)</i>	150 [cm]

8.1.3 Definición de variables de entrada

Datos para la posición solar: para el diseño de sistemas que aprovechan la energía solar, deben escogerse parámetros como los que se ven a continuación, debido a la rotación y traslación de la tierra respecto al sol, ya que este varía su posición en el tiempo afectando directamente la irradiación que llega al captador. Como dato adicional, se coloca la reflectividad de los alrededores como un dato constante.

<i>Mes</i>	<i>Mes del año para el cual se realiza se diseño</i>
a	<i>Día del mes</i>
m	<i>Minutos de la hora</i>
φ	<i>Latitud de Bucaramanga</i>
β	<i>Inclinación del colector solar [°]</i>
γ_p	<i>Azimut de pared [°]</i>
ρ_g	<i>Reflectividad de los alrededores</i>

Datos geométricos del captador solar: son los que determinan el dimensionamiento del captador solar, influyendo significativamente en la cantidad de energía útil (térmica y eléctrica) que se obtendrá por cada ciclo de operación. [19].

N	Número de cubiertas de vidrio
N_{tub}	Número de tubos del serpentín
D_i	Diámetro interno de los tubos [m]
D	Diámetro externo de los tubos [m]
W_{pv}	Ancho del panel fotovoltaico
W	Paso entre tubos
L_{pv}	Largo del módulo fotovoltaico
L_c	Longitud del captador solar [m]
W_c	Ancho de captación [m]
A_c	Área de captación [m ²]
A_{pv}	Área del módulo fotovoltaico [m ²]
L_a	Espesor del aislante [m]
L_p	Espesor de la placa absorbidora [m]
$L_{topglass}$	Espesor de la cubierta de vidrio [m]
$L_{pvglass}$	Espesor de la capa de vidrio de la lámina fotovoltaica [m]
L_{EVA}	Espesor de EVA de la lámina fotovoltaica [m]
L_{tedlar}	Espesor de la capa de Tedlar [m]
L_s	Espesor celda PV [m]
L_{pv}	Espesor de la lámina PV [m]
L_{glue}	Espesor del adhesivo [m]

Datos constantes y propiedades de los materiales: en este conjunto de datos se encuentran las propiedades ópticas (absortividad, transmisividad, emisividad) y propiedades térmicas características de los materiales seleccionados para cada una de las capas del captador [20].

η_{pv}	Eficiencia nominal celda PV
B_{pv}	Coef. térmico de disminución $\frac{\text{eficiencia}}{\text{potencia}}$
σ	Constante de Steffan & Boltzmann
ε_g	Emisividad Vidrio
ε_{pv}	Emisividad módulo fotovoltaico
α_{pv}	Absortividad de módulo fotovoltaico
α_p	Absortividad de la placa de absorción
τ_g	Transmisividad del vidrio
$\tau\alpha$	Producto de la transmisividad y la absortividad del módulo fotovoltaico
K_g	Conductividad térmica de la cubierta $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_p	Conductividad de la placa absorbedor $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_a	Conductividad del aislante $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_{pv}	Conductividad del módulo fotovoltaico $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_{glu}	Conductividad térmica del pegante o adhesivo $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_{EVA}	Conductividad del material EVA $\left[\frac{W}{m * K}\right]$
K_{tedl}	Conductividad del material Tedlar $\left[\frac{W}{m * K}\right]$

Condiciones de operación: para el desarrollo del modelo térmico es necesario establecer: la temperatura de entrada del fluido (dato inicial en la simulación), el flujo másico que va establecido según los requerimientos energéticos del sistema (eficiencia térmica), y la temperatura media del fluido, que es importante en cuanto al cálculo de propiedades del mismo.

T_{in}	Temperatura de entrada al colector [K]
\dot{m}	Flujo másico $\left[\frac{Kg}{s}\right]$
T_{inc}	Temperatura inicial de entrada [°C]
T_{fluout}	Temperatura inicial de la salida del fluido para cálculo de propiedades [°C]

Datos de radiación y temperatura ambiente: la radiación total y difusa horizontal son medidas por los piranómetros Kipp & Zonen del tipo CMP 3 pertenecientes al laboratorio de sistemas térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Aunque también se tomaron datos de radiación y temperatura ambiente de la estación meteorológica de la escuela de Ingeniería Eléctrica, medidos en el año 2010. Se escoge el día en el cual hay menor radiación y temperatura ambiente. Se diseña con base en estos datos para garantizar el funcionamiento del captador solar en cualquier época del año, cumpliendo con los requerimientos mínimos en días de baja radiación y obteniendo mejores resultados en días de alta radiación. El diseño bajo estas condiciones permite dimensionar adecuadamente las variables geométricas del captador solar.

H_t	Radiación total horizontal $\left[\frac{W}{m^2 * \Delta t} \right]$
H_d	Radiación difusa horizontal $\left[\frac{W}{m^2 * \Delta t} \right]$
t_{ambFv}	Temperatura ambiente [$^{\circ}F$]
t_{ambC}	Temperatura ambiente [$^{\circ}C$]

8.1.4 Definición de variables de salida

Cálculo de la posición solar y radiación solar: para este proceso, se debe calcular los ángulos que según el tiempo (día y mes), indican la posición del sol, y la manera como éste incide al captador solar, dentro de la simulación se realiza también el cálculo de la radiación que es dependiente de las condiciones anteriormente mencionadas. Cuyas variables de salida son:

<i>h</i>	<i>Vector de horas de medición</i>
<i>min</i>	<i>Minutos en decimales</i>
<i>in</i>	<i>Vector día del año</i>
<i>dia</i>	<i>Día del mes</i>
<i>b</i>	<i>Relación del día del año con el número de días totales</i>
δ	<i>Declinación solar [°]</i>
<i>w</i>	<i>Ángulo de hora solar [°]</i>
α_s	<i>Ángulo de elevación [°]</i>
γ_s	<i>Ángulo de azimut solar [°]</i>
θ_z	<i>Ángulo de cenit</i>
θ	<i>Ángulo de Incidencia</i>
<i>Rb</i>	<i>Razón de la radiación directa</i>
<i>qsβ</i>	<i>irradiación $\left[\frac{W}{m^2 * hr} \right]$</i>

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (de pérdidas): en el diseño térmico, se presentan las variables de salida que son dependientes de las variables de entradas especificadas, para el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor del captador solar. Es de significativa importancia porque indica la tasa de calor que se pierde, dirigiéndose al exterior del captador solar (térmico y fotovoltaico).

h_w	<i>Coef. de convección externo del viento $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>
f_f	<i>Correlacion para el coeficiente de transferencia de calor en la parte superior.</i>
<i>e</i>	<i>Coef. de emisividad</i>
U_{top}	<i>Coef. global de transferencia de calor de la parte superior del captador solar. $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>
P_c	<i>Perímetro de la superficie captadora [m]</i>
H_c	<i>Distancia entre el vidrio y la lámina PV [m]</i>
h_{ca}	<i>Coef. de conducción $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>
U_{edge}	<i>Coef. global de transferencia de calor en los laterales del captador solar. $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>
U_{bot}	<i>Coef. global de transferencia de calor en el fondo del captador solar $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>
U_{Loss}	<i>Coef. global de transferencia de calor de perdidas del captador solar $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$</i>

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido: el fluido de trabajo que pasa por los tubos dentro del captador, tiene variaciones considerables debido a la variación de temperatura, en los intervalos de tiempo determinados para la simulación realizada. Como variable de entrada tenemos la temperatura media del fluido, que cambia a medida que el sistema esté en operación y las variables de salida son las siguientes:

<i>Denflu</i>	Densidad del fluido (agua) $\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
<i>cpflu</i>	Calor específico del fluido (agua) $\left[\frac{W}{Kg * K}\right]$
<i>kflu</i>	Calor específico del fluido (agua) $\left[\frac{W}{Kg * K}\right]$
<i>Prflu</i>	Número de Prandtl del fluido (agua)
<i>vsflu</i>	Viscosidad dinámica del fluido (agua) $[Pa * s]$
Propiedades <i>agua</i>	Función de propiedades del fluido (agua)
<i>Re</i>	número de Reynolds
<i>Nu</i>	número de Nusselt
<i>htube</i>	coeficiente de transferencia de convección del fluido por los tubos. $\left[\frac{W}{m^2 * K}\right]$

Cálculo del factor de remoción de calor: define la razón entre la energía útil real ganada por captador solar y la ganancia útil de calor asumiendo que todo el captador se encuentra a la temperatura de entrada del fluido.

<i>m</i>	raíz de la razón ente el coeficiente global de pérdidas del captador y las resistencias térmicas del mód. fotovoltaico y la placa absorbadora
<i>F</i>	factor de eficiencia de aleta
<i>F_{prim}</i>	factor de eficiencia del captador.
<i>F_R</i>	factor de remoción de calor

Cálculo del calor útil y eficiencia térmica: es la cantidad de calor, que realmente calienta el fluido de trabajo que se encuentra circulando en los tubos,

permitiendo la elevación de la temperatura del mismo, a través de la circulación por el captador solar.

$Q_{u_{asum}}$	<i>calor útil que produce el captador solar [W]</i>
$\tau\alpha_{eff}$	<i>Producto de la transmisividad y la absorptividad efectiva del módulo fotovoltaico y el vidrio</i>
T_{out}	<i>temperatura de Salida [K]</i>
$T_{lam_{calc}}$	<i>temperatura de lámina en el módulo fotovoltaico calculada [K]</i>
<i>error</i>	<i>indica que tan cercana está la Temperatura de lámina asumida con la calculada</i>
η_{th}	<i>eficiencia térmica [%]</i>

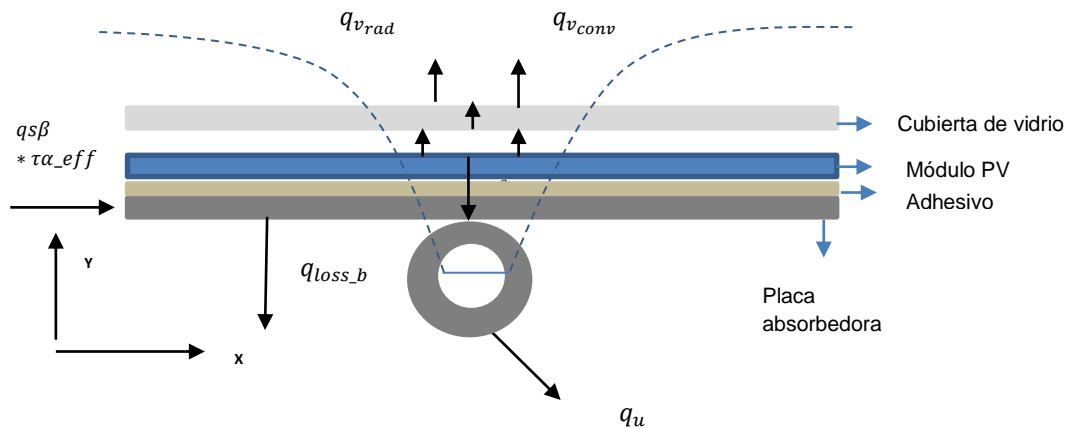
Cálculo de la potencia eléctrica del panel fotovoltaico y eficiencia eléctrica:

La irradiación que llega al captador, es absorbida primeramente por el módulo fotovoltaico, por medio del efecto fotovoltaico, parte de esa energía incidente se convierte en potencia eléctrica, cuya medida es necesaria para determinar la carga de la batería y por consiguiente la alimentación continua de la bomba cuando esté en funcionamiento el sistema.

n_{pv}	<i>eficiencia del módulo fotovoltaico</i>
n_{el}	<i>eficiencia eléctrica del módulo de acuerdo con la temperatura de lámina</i>
Pot_{el}	<i>Potencia eléctrica de salida respecto a cada intervalo de tiempo. [W]</i>

8.1.5 Modelo térmico utilizado

Figura 60. Esquema térmico del captador solar



Para el modelamiento del sistema del captador solar híbrido se especifican las siguientes condiciones:

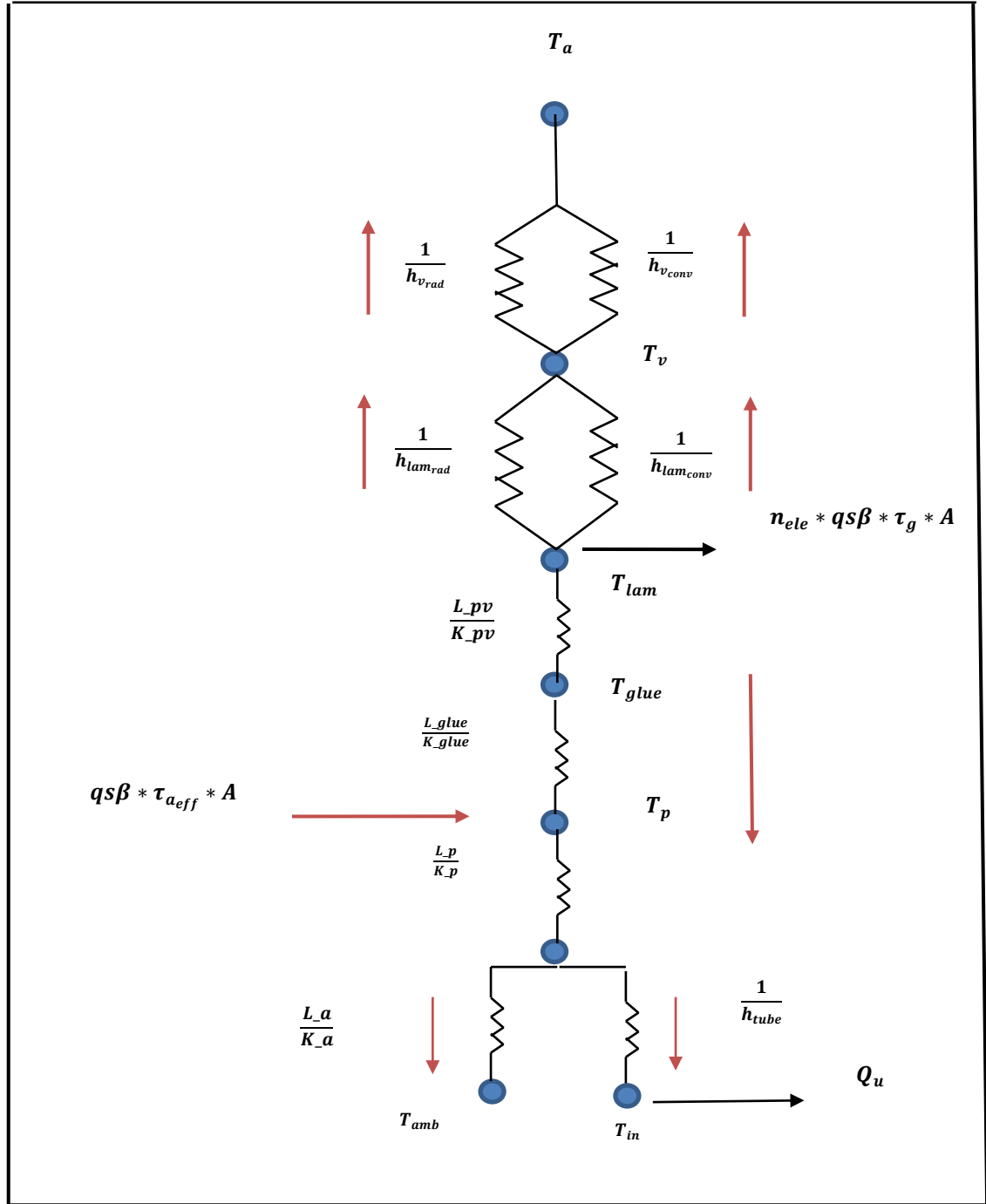
- Modelamiento en estado estable.
- Los flujos de calor entre cada una de las capas componentes del captador solar se asumen unidimensionales.
- Se utiliza un modelo óptico con base en las ecuaciones de Fresnel (anexo E) que calcula el factor de transmisividad-absortividad del módulo fotovoltaico que junto su transmisividad y eficiencia eléctrica, permiten calcular el factor transmisividad-absortividad efectivo que representa la fracción de irradiación que recibe la placa absorbidora [20].
- Se asume el serpentín como un tubo largo y recto, ignorando los efectos de curvatura [19].
- No se consideran las variaciones de área en la unión del tubo y la placa absorbidora, ya que la estimación de estos efectos solo producen un 0.1 [%] de aumento en la eficiencia térmica [19].

- Solo se considera la conducción entre las capas del captador que corresponden a: el módulo fotovoltaico, el pegante, la placa absorbadora, los tubos y el aislante.
- Debido a los pequeños espesores de cada capa (menores de 10 mm), se toma una temperatura uniforme por capa.
- Los efectos de sombra y viento se toman despreciables.
- El área de la placa absorbadora y el área del módulo fotovoltaico en contacto, se toman aproximadamente iguales (área efectiva de transferencia de calor).

8.1.5.1 Esquema de resistencias térmicas del captador solar

En la figura 61, se observa el esquema de resistencias térmicas y flujos de calor que se presentan en el captador solar, en los cuales se basan las ecuaciones presentes en el modelamiento térmico del captador solar que se especifica en la sección 8.1.5.2.

Figura 61. Esquema de resistencias térmicas en el captador solar



8.1.5.2 Ecuaciones del modelamiento térmico del captador solar

Las ecuaciones que se observan a continuación obedecen a las condiciones y criterios de diseño basadas en los modelos planteados por los autores DUFFIE AND BECKMAN [9] y ZONDAG [20] en sus respectivos estudios sobre el colector solar de placa plana y el colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico).

Cálculo de la posición y radiación solar

La formulación presentada se encuentra en grados en las expresiones que son argumento para las funciones seno y coseno, para la determinación de la posición y radiación solar.

Tiempo solar: Es la corrección de la hora respecto al meridiano de referencia horario estándar [9].

$$diatime = (dia - 1) * \left(\frac{360}{365}\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (1)$$

$$E = 229.2 * \left(0.000075 + (0.001868 * \cos(diatime)) - (0.032077 * \sin(diatime)) - (0.014615 * \cos(2 * (diatime))) - (0.04089 * \sin(2 * (diatime)))\right) \text{ [}^\circ\text{]} \quad (2)$$

$$solartime = h + \frac{(4 * (L_{bog} - L_{xx})) + E}{60} \text{ [hora]} \quad (3)$$

Ángulo hora (w): Es el desplazamiento angular del sol, este a oeste, en el meridiano local, debido a la rotación de la tierra 15° sobre su propio eje [9].

$$w = ((solartime) - 12) * 15 \text{ [}^\circ\text{]} \quad (4)$$

Declinación (δ): es la posición angular del sol a mediodía con respecto al ecuador [9].

$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284 + dia}{365}\right) [^\circ] \quad (5)$$

Ángulo de elevación (α_s): es el complemento del ángulo de incidencia. Es el ángulo de la horizontal con respecto al rayo de sol [9].

$$\alpha_s = \arcsin(\sin(\delta) * \sin(\varphi) + \cos(\delta) * \cos(w) * \cos(\varphi)) [^\circ] \quad (6)$$

Ángulo de azimut solar (γ_s): Es el desplazamiento angular sobre la proyección del rayo en el plano horizontal [9].

$$\gamma_s = \arcsin\left(\cos(\delta) * \frac{\sin(w)}{\cos(\alpha_s)}\right) [^\circ] \quad (7)$$

Ángulo de cenit (θ_z): el ángulo de zenit es entre la vertical y el rayo de sol. Cuando la superficie es horizontal el ángulo de zenit es igual al ángulo de incidencia [9].

$$\theta_z = 90 - \alpha_s [^\circ] \quad (8)$$

Ángulo de incidencia (θ): el ángulo entre la normal de la superficie y el rayo incidente [9].

$$\theta = \arccos(\cos(\theta_z) * \cos(\beta) + \sin(\theta_z) * \sin(\beta) * \cos(\gamma_s - \gamma_p)) [^\circ] \quad (9)$$

Razón de la radiación directa (R_b): es el factor geométrico, que relaciona la inclinación de la radiación directa horizontal, y la inclinación del captador solar [9].

$$R_b = \frac{(\cos(\varphi - \beta) * \cos(\delta) * \cos(w)) + (\sin(\varphi - \beta) * \sin(\delta))}{(\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(w) + (\sin(\varphi) * \sin(\delta)))} \quad (10)$$

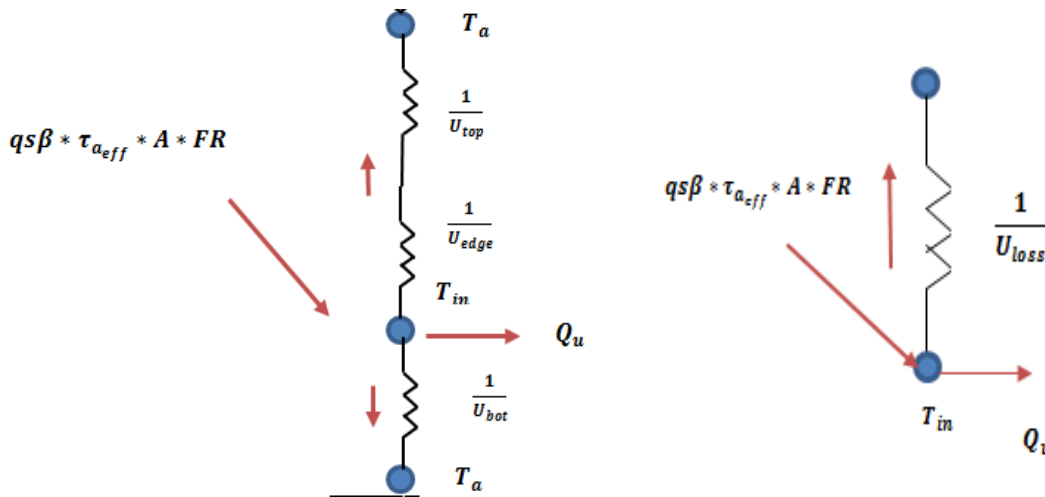
Irradiación ($q_{s\beta}$): es la cantidad de energía solar incidente, afectada por la inclinación del captador solar y la energía solar reflejada, que entra al captador, por unidad de área, cada intervalo de tiempo medido, ya que es una medida que cambia instantáneamente [9].

$$q_{s\beta} = (Hb * Rb) + \left(Hd * \left(\frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right) + \left(\rho_g * (Hb + Hd) * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right) \right) \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (11)$$

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas

Una forma simplificada de representar en los cálculos las resistencias térmicas mostradas en la figura 61 es el coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas que es la suma de los coeficientes de pérdidas superiores, laterales e inferiores (figura 62).

Figura 62. Esquema de resistencias térmicas simplificadas



Coefficiente de convección externo (h_w): se usa la correlación 12 [9], que está en función de la velocidad del viento, que influye en la cantidad de calor que el captador pierde hacia el ambiente.

$$h_w = 2.8 + (3 * V_w) \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (12)$$

Coefficiente global de transferencia de calor de pérdidas superiores del captador solar (U_{top}): debido a que la radiación solar entra por la parte superior del captador, hay pérdidas de calor significativas en esta zona del captador, que son cuantificadas con las siguientes expresiones [19]:

$$f_f = (1 + 0.089 * h_w - 0.1155 * h_w * \varepsilon_{pv}) * (1 + 0.07866 * N) \quad (13)$$

$$c = 520 * (1 - 0.000051 * (\beta^2)) \quad (14)$$

$$e = 430 * \left(1 - \left(\frac{100}{T_{lam}} \right) \right) \quad (15)$$

$$U_{top} = \left(\left(\left(\frac{N}{\left(\frac{c}{T_{lam}} \right) * \left(\frac{T_{lam} - T_a}{N + f_f} \right)} + \frac{1}{h_w} \right) \right)^{-1} \right) + \frac{\sigma * (T_{lam}^2 + T_a^2) * (T_{lam} + T_a)}{\left((\epsilon_{pv} + 0.00591 * N * h_w)^{-1} \right) + \left(\frac{2 * N + f_f - 1 + 0.133 * \epsilon_{pv}}{\epsilon_g} \right)^{-N}} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (16)$$

Coeficiente global de transferencia de calor laterales del captador solar (U_{edge}): este valor cuantifica la pérdidas de calor, por unidad de área y grado kelvin, teniendo en cuenta el perímetro y la capa de aislante lateral [19].

$$P_c = 2 * L_c + 2 * W_c \quad (17)$$

$$H_c = L_{pv} + L_p \quad (18)$$

$$U_{edge} = \frac{K_a * P_c * H_c}{L_a * A_c} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (19)$$

Coeficiente global de transferencia de calor de la parte inferior del captador solar (U_{bot}): se cuantifica las pérdidas de calor que se presentan, que son representadas por el espesor de la capa de aislante inferior y su conductividad térmica [19].

$$U_{bot} = \frac{K_a}{L_a} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (20)$$

Coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas del captador solar. (U_{loss}) [19].

$$U_{Loss} = U_{top} + U_{edge} + U_{bot} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (21)$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido

Número de Reynolds: determina régimen del fluido de trabajo, ya sea laminar o turbulento [18].

$$Re_i = \frac{4 * \dot{m}}{\pi * D_i * v_{sflu}} \quad (22)$$

Utilizando las expresiones de flujo interno [1], para el cálculo del número de Nusselt [18].

$$Re_i < 2300$$

$$Nu = 4.364$$

$$Re_i > 2300$$

$$Nu = 0.023 * (Re_i^{0.8}) * (Pr_{flu}^{0.4}) \quad (23)$$

Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección: determina la tasa de calor que se transferirá al fluido, por unidad de área y grado kelvin de incremento [18].

$$h_{tube} = \frac{Nu * k_{flu}}{D_i} \left[\frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (24)$$

Cálculo del factor de remoción de calor

Para analizar la transferencia de calor entre el módulo fotovoltaico-placa absorbidora y el serpentín de tubos, se realiza una aproximación que consiste en suponer que el conjunto módulo-placa sobre el tubo se comporta como una aleta (figura 63), a partir de este análisis aproximado se deducen las expresiones que permiten calcular el factor de remoción de calor.

Figura 63. Analogía del módulo fotovoltaico-placa absorbidora con una aleta



Raíz de la razón entre el coeficiente global de pérdidas del captador y las resistencias térmicas del módulo fotovoltaico y la placa absorbidora. (m): esta expresión corresponde a la constante de proporcionalidad que afecta la distribución de temperaturas entre la placa absorbidora y la conducción de calor hacia los tubos [19].

$$m = \left(\frac{U_{Loss}}{K_{pv} * L_{pv} + K_p * L_p} \right)^{0.5} \quad (25)$$

Factor de eficiencia de aleta (F) : Es el factor que permite cuantificar que cantidad de calor absorbido se transmite por medio de la aleta, que corresponde a la porción de área entre dos tubos consecutivos [19].

$$F = \frac{\tanh\left(m * \frac{W - D}{2}\right)}{m * \frac{W - D}{2}} \quad (26)$$

Factor de eficiencia del captador (F'): representa la razón entre la energía útil ganada (es decir a la temperatura del fluido), y la ganancia que resultaría si el fluido que circula por el captador estuviera a temperatura ambiente [19].

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{Loss}}}{W * \left(\left(\frac{1}{U_{Loss} * (D + F * (W - D))} \right) + \left(\frac{1}{W * h_{ca}} \right) + \frac{1}{\pi * D_i * h_{tube}} \right)} \quad (27)$$

Se debe calcular el coeficiente de conducción (h_{ca}) entre el módulo fotovoltaico y la capa de pegante.

$$h_{ca} = \left(\frac{L_{EVA}}{K_{EVA}} + \frac{L_{tedlar}}{K_{tedlar}} + \frac{L_{glue}}{K_{glue}} \right)^{-1} \quad (28)$$

Factor de remoción de calor (F_R) : es la cantidad que relaciona la energía útil ganada en toda la superficie del colector, respecto a la energía útil obtenida del colector a la temperatura de entrada del fluido teniendo en cuenta el calor absorbido por las aletas y por los tubos [19].

$$F_R = \left(\frac{\dot{m} * Cp}{A_c * U_{Loss}} \right) * \left(1 - \exp\left(-\frac{A_c * U_{Loss} * F'}{\dot{m} * Cp}\right) \right) \quad (29)$$

Cálculo del calor útil, eficiencia térmica y eléctrica

Eficiencia eléctrica (η_{el}): es un parámetro que mide el rendimiento del módulo fotovoltaico que disminuye respecto a la eficiencia nominal a medida que aumenta la diferencia de la temperatura de operación con la temperatura del módulo a condiciones estándar (25 [°C]) [19].

$$n_{el} = n_{pv} * (1 - 0.0045 * (T_{lam} - 25)) = \frac{V * I}{qs\beta * A_c} \quad (30)$$

Factor transmisividad-absortividad: este factor determina el efecto de las propiedades ópticas del módulo fotovoltaico, que afectan el porcentaje de la irradiación incidente que realmente calienta el agua que circula por los tubos [19].

$$\tau_{\alpha_{eff}} = \tau_{\alpha} - \tau_{pv}\eta_{el} \quad (31)$$

Calor útil del captador solar (Q_u) : es la cantidad de energía que finalmente llega al fluido en circulación para su calentamiento [19].

$$Q_u = \left(A_c * F_R * \left((\tau_{\alpha_{eff}} * qs\beta) - U_{Loss} * (T_{in} - T_a) \right) \right) [W] \quad (32)$$

La diferencia de temperatura entre la salida y la entrada de los tubos del captador solar. (Δ_T) : Es la relación entre el calor útil ganado sobre el calor sensible del fluido de trabajo [19].

$$\Delta_T = \left(\frac{Q_u}{\dot{m} * C_p} \right) [K] \quad (33)$$

Temperatura de lámina en el módulo fotovoltaico calculada ($T_{lam_{calc}}$) : es el cálculo de la temperatura de lámina (parte superior del módulo fotovoltaico), es una ecuación que permite encontrar el valor real de esta temperatura a las condiciones del operación del captador solar [19].

$$T_{lam_{calc}} = T_{in} + \left(\frac{\Delta_T}{2} \right) + \left(\frac{Q_{casum}}{A_{pv} * h_{ca}} \right) [K] \quad (34)$$

Eficiencia térmica (η_{th}): Es la relación entre la energía útil entregada al fluido de trabajo, y la energía captada por el área de transferencia de calor [19].

$$\eta_{th} = \frac{Q_u [KJ]}{q_{s\beta} [\frac{KJ}{m^2}] * A_c [m^2]} = \frac{(\dot{m} * C_p * \Delta_T) [W]}{q_{s\beta} [\frac{W}{m^2}] * A_c [m^2]} \quad (35)$$

Cálculo de la potencia eléctrica del módulo fotovoltaico

Potencia eléctrica (Pot_{el}): La cantidad energía eléctrica que produce el módulo fotovoltaico [19].

$$Pot_{el} = n_{el} * q_{s\beta} * A_{pv} * \tau_g [W] \quad (36)$$

8.1.5.3 Verificación del modelamiento térmico del captador solar

El modelo térmico anteriormente presentado se programa en MATLAB, como herramienta de cálculo indispensable para el diseño del captador solar y simulación de la operación del captador de forma teórica para ser comparado con los resultados obtenidos de las mediciones que se realizarán con el prototipo a construir.

Para confirmar la correcta implementación del modelo térmico en MATLAB se realiza una etapa de verificación.

Para realizar esta verificación se tomaron los valores que están en el artículo de ZONDAG [19], que corresponden a: datos geométricos del captador solar, radiación y temperatura ambiente. Dichos valores fueron las variables de entrada al programa realizado en MATLAB del modelo en estado estable de una dimensión para obtener un valor de eficiencia térmica cuando la temperatura reducida es cero ($T_{in} = T_a$). Luego se consulta el mismo valor en el artículo y se

observó que el resultado del programa tiene una desviación de 0,16 [%] menos respecto al valor presentado por el autor.

Se concluye que el modelo térmico en estado estable en una dimensión está bien implementado y que la desviación es causada por parámetros o criterios asumidos que no estaban especificados en el artículo consultado.

<i>Eficiencia térmica</i> $\eta_{th}(T_{red} = 0)$	
Artículo ZONDAG [20]	Simulación MATLAB
62,5 [%]	62,3 [%]

8.1.6 Determinación de parámetros a analizar para el diseño

Con las variables de entrada y salida, que involucran todo el captador solar y las respectivas ecuaciones que permiten relacionarlas. El objetivo es encontrar un diseño que en lo posible se ajuste a los requerimientos mínimos del sistema, que sea funcional, práctico, eficiente y sostenible energéticamente.

Es necesario identificar cómo se comportan los datos que se introducirán a las simulaciones para el establecimiento del captador solar.

8.1.6.1 Datos obtenidos:

Datos para la posición solar: Para este compendio de datos solo la latitud y la longitud son obtenidas del Instituto Geográfico Agustín Codazzi [21], siendo para este proyecto, la información relacionada a la ciudad de Bucaramanga.

Datos de las condiciones climáticas y de radiación: Dentro de este conjunto de datos se encuentran los relacionados con la radiación total horizontal, la radiación directa normal, la temperatura ambiente, la velocidad del viento que fueron tomados de la estación meteorológica y climática perteneciente a la escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de Universidad Industrial de Santander, que sirvió para escoger el día de baja radiación y se obtienen los promedios de

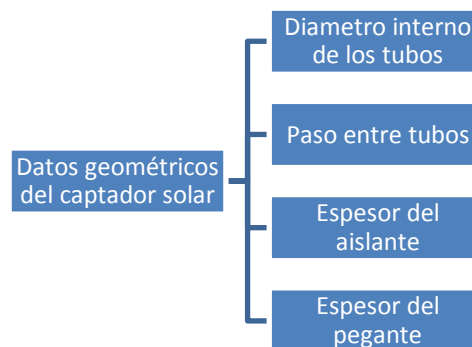
radiación solar (total y directa normal) para ese día, siendo introducidos en la simulación, se realiza lo mismo con la temperatura ambiente y la velocidad del viento.

Datos constantes y propiedades de los materiales: Pertencientes a los materiales, estos datos obtenidos de forma experimental, se consideran fijos de acuerdo a la selección de materiales para todas las capas del captador solar, de acuerdo a estudios y pruebas realizadas en artículos [19] [22], como datos ya verificados que entran a la simulación para el diseño del captador solar.

8.1.6.2 Datos a variar:

Datos geométricos del captador solar: Estos datos permiten el dimensionamiento del captador solar dentro de la simulación, cuyos resultados permitirán analizar donde se encuentran los puntos adecuados de operación, y así realizar el dimensionamiento final del captador. Los valores se escogen según los criterios de diseño y se introducen en la simulación.

Figura 64. Cuadro sinóptico de los datos geométricos del captador solar



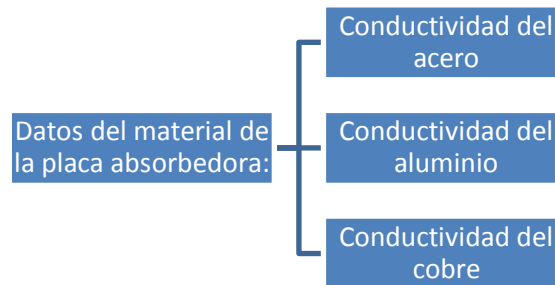
Condiciones de operación: Corresponde a los datos de flujo másico que son determinados por el diseñador según los criterios y condiciones establecidas.

Figura 65. Cuadro sinóptico de las condiciones de operación



Datos del material de la placa absorbadora: Se busca con los datos de conductividad térmica de tres materiales acero, aluminio y cobre. Realizándose una comparación entre sí.

Figura 66. Cuadro sinóptico de los datos del material de la placa absorbadora



8.1.7 Simulación para el diseño térmico del captador solar

8.1.7.1 Datos de entrada a la simulación

Estos datos son ingresados de acuerdo a los criterios de diseño, en donde se busca el día de menor radiación y una inclinación del captador que permita un mejor aprovechamiento de la energía captada con el fin de tener un margen de seguridad en el que el captador cumpla los requerimientos bajo condiciones de radiación escasas.

8.1.7.2 Datos obtenidos

En la tabla 1 se encuentran los datos obtenidos que son las variables de entrada para la simulación de parámetros para el diseño del captador solar, que se describieron anteriormente, y que se utilizan en los respectivos cálculos que se realizan dentro de la programación de la simulación [19]

Tabla 1. Datos de entrada para la simulación de parámetros a analizar para el diseño

VARIABLES DE ENTRADA EN LA INTERFAZ GRAFICA	VALOR	UNIDADES
mes	Abril	Meses del año
a (día del mes)	20	días
Standartime (hora)	12	m
T_{inc} (temperatura de entrada al colector)	25	°C
β (inclinación del captador)	0	grados
Φ (latitud)	7,12	grados
L_{xx} (longitud local)	73,12	grados
L_{bog} (longitud estándar)	74.05	grados
DATOS OBTENIDOS INTERNOS DE LA SIMULACIÓN	VALOR	UNIDADES
H_t (radiación global horizontal promedio por hora)	131	$\frac{W}{m^2 * hr}$
H_b (radiación directa normal)	80	$\frac{W}{m^2 * hr}$
ρ_g (reflectividad del suelo)	0,4	
T_a (temperatura ambiente)	25	°C
V_w (velocidad del viento)	1	$\frac{m}{seg}$
N (número de cubiertas)	1	
L_c (longitud del captador solar)	0,65	m
W_c (ancho del captador solar)	1,442	m
A_c (ancho del captador solar)	0,94	m^2
L_p (espesor de la placa de absorción)	0,0009	m
$L_{top, glass}$ (espesor de la cubierta de vidrio)	0,0050	m
L_{EVA} (espesor de EVA de la lámina fotovoltaica)	0,0005	m
L_{tedlar} (espesor de la capa de Tedlar)	0,0001	m
L_s (espesor módulo fotovoltaico)	0,0004	m
η_{pv} (eficiencia nominal módulo fotovoltaico)	0,145	m
β_{pv} (coeficiente térmico de disminución de eficiencia/potencia)	0,0045	$\frac{1}{W}$
σ (constante de Steffan & Boltzmann)	5,67 * (10 ⁻⁸)	$\frac{W}{m^2 * K^4}$
Cp (calor específico del fluido de trabajo)	4180	$\frac{J}{Kg * K}$
ϵ_g (emisividad Vidrio)	0,8	
ϵ_{pv} (emisividad módulo fotovoltaico)	0,9	
α_{pv} (absortividad módulo fotovoltaico)	0,8	
α_p (absortividad de la placa de absorción)	0,8	
τ_g (transmisividad del vidrio)	0,92	
τ_α (Producto transmisividad –absortividad)	0,74	
K_g (Conductividad térmica vidrio)	0,8	$\frac{W}{m * K}$
K_p (Conductividad de la placa absorbadora Acero ingenieril=51.9; Aluminio=237; Cobre=401)	51,9/ 237/ 401	$\frac{W}{m * K}$
K_a (Conductividad del aislante lana de vidrio)	0,04	$\frac{W}{m * K}$
K_{pv} (Conductividad del módulo fotovoltaico)	84	$\frac{W}{m * K}$
K_{glue} (Conductividad térmica del pegante o adhesivo)	0,8	$\frac{W}{m * K}$
K_{EVA} (Conductividad del material EVA)	0,35	$\frac{W}{m * K}$
K_{tedlar} (Conductividad del material Tedlar)	0,2	$\frac{W}{m * K}$

8.1.7.3 Simulación de parámetros para el diseño del captador solar

La programación que permite realizar la simulación se implementa en MATLAB cuya presentación se realiza a través de una interfaz gráfica (GUIDE).

Se realiza un código que funciona en un ciclo correspondiente a un periodo de tiempo, donde se introducen los vectores correspondientes a cada parámetro, cuyos resultados de eficiencia térmica, calor útil y variación de temperatura del agua que circula por el captador permiten evaluar según los criterios de diseño establecidos.

La interfaz gráfica (GUIDE) utilizada para mostrar los resultados de la simulación, está en la figura 67. Ya ingresados los datos de entrada, con el botón calcular se presentan tres gráficas, la que se ubica en la parte izquierda indica la variación del delta de temperatura del captador ($T_{\text{salida}} - T_{\text{entrada}}$), la del centro indica la variación del calor útil y la de la derecha muestra la eficiencia térmica respecto al parámetro a seleccionar en el menú de opciones de los parámetros que se analizan.

La simulación en MATLAB, se ejecuta según el diagrama de flujo que se presenta en la figura 68.

Figura 67. Guide MATLAB simulación de parámetros para el diseño del captador solar

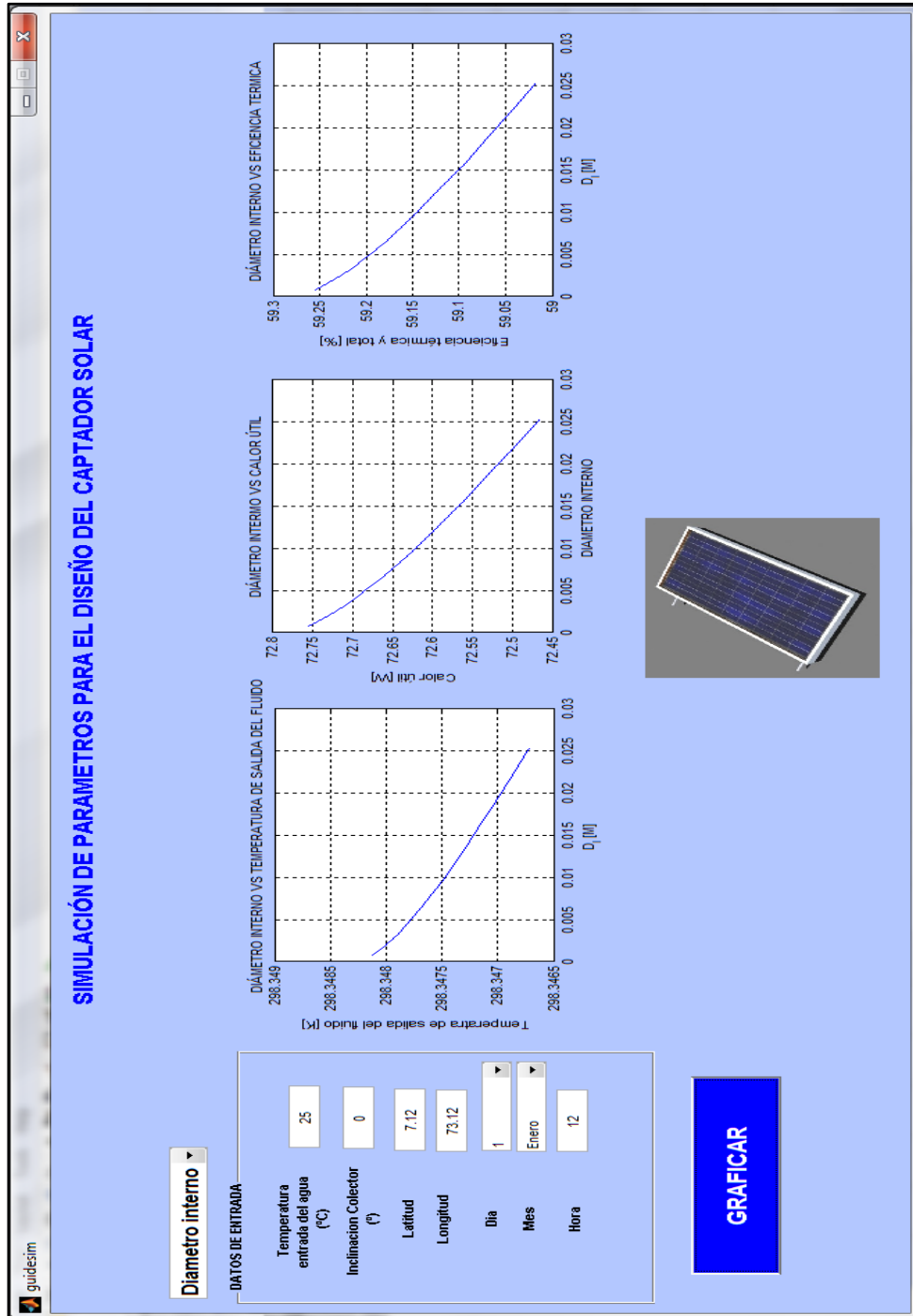
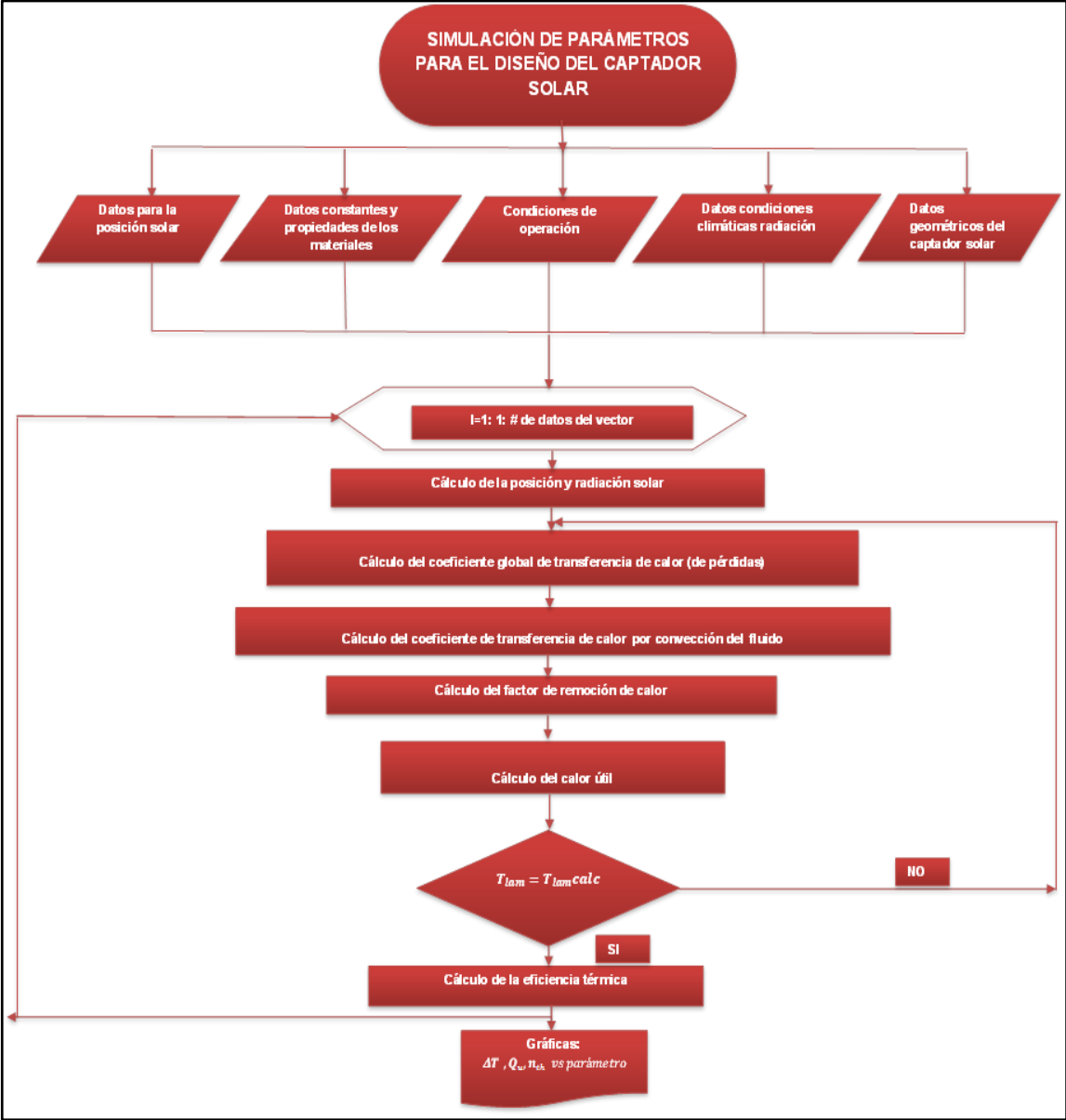


Figura 68. Diagrama de flujo para la simulación de parámetros para el diseño del captador solar



Diámetro interno

Para la búsqueda del valor adecuado de diámetro interno en el arreglo de tubos que contienen el fluido de trabajo (agua) en circulación se introducen un rango de valores que corresponden a valores normalizados de tubería en pulgadas, ya que así se referencian en los catálogos y en los puntos de venta. Debido a esto el vector de diámetro interno está compuesto por los siguientes valores:

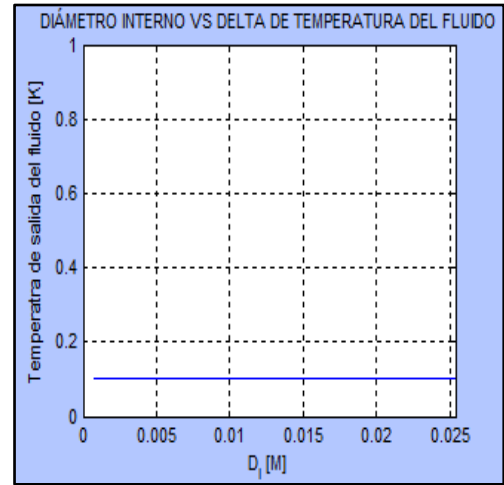
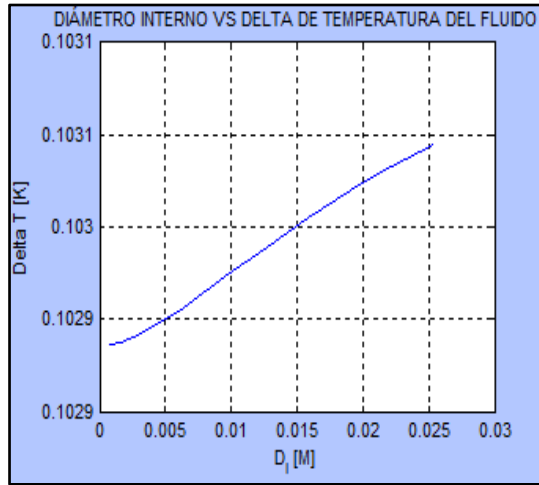
$$D_i = \left[\frac{1}{32}'' , \frac{1}{16}'' , \frac{1}{8}'' , \frac{1}{4}'' , \frac{3}{8}'' , \frac{1}{2}'' , \frac{5}{8}'' , \frac{3}{4}'' , \frac{7}{8}'' , 1'' \right]$$

Para un flujo volumétrico de $10 \left[\frac{L}{min} \right]$ se obtienen las gráficas mostradas en la figura 69, como resultado de la simulación.

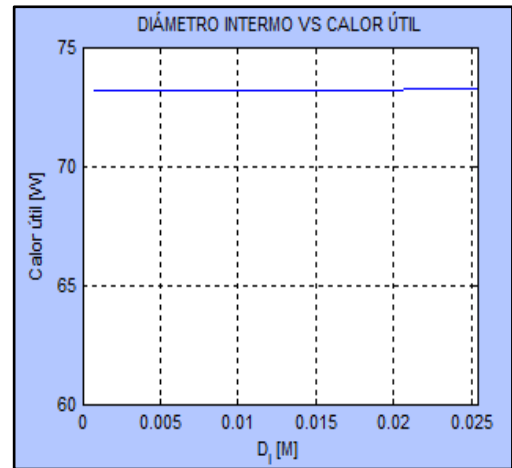
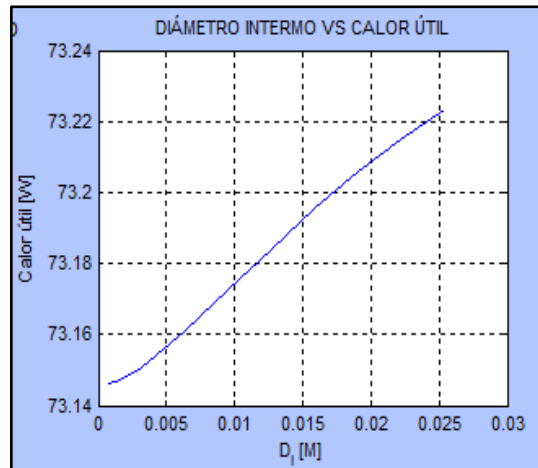
En la figura 69a se muestra el delta de temperatura del fluido que aumenta en el orden de las milésimas de grados kelvin, en la figura 69b el calor útil del captador solar aumenta en centésimas de vatios y en la figura 69c la eficiencia térmica aumenta en el orden de las centésimas respecto al aumento del diámetro interno de acuerdo al vector planteado en fracciones de pulgada. Según los criterios de diseño, se escogió el valor de diámetro interno del serpentín de tubos de $\frac{1}{2}''$, buscan un punto medio donde el delta de temperatura del fluido, el calor útil y la eficiencia térmica del captador solar sean los adecuados, además que faciliten la manufactura, el montaje, menor ocupación de espacio, que no permita el incremento en la resistencia térmica desde el módulo fotovoltaico al agua en circulación y más económico. En las figuras 70a, 70b y 71c, existen dos columnas de gráficas, la columna izquierda muestra una escala amplificadas en las ordenadas y la columna derecha muestra la curva a una escala normal.

Figura 69. Gráficas diámetro interno respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar

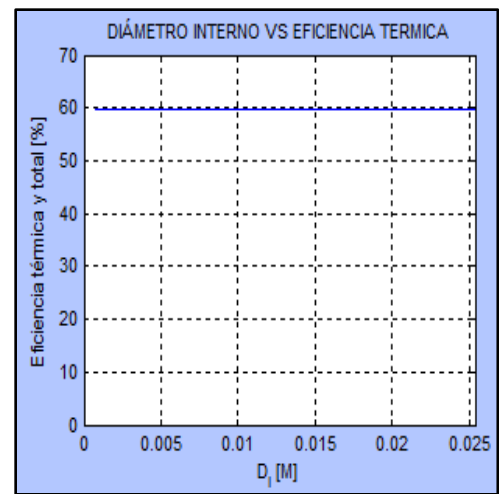
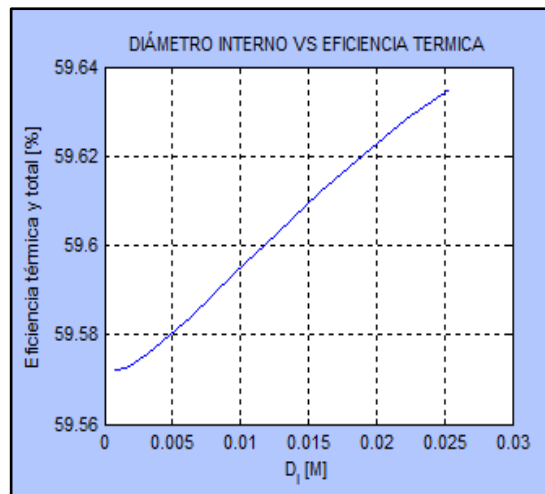
69a.



69b.



69c.



Paso entre tubos

El número de tramos de una sola tubería dispuesta en forma de serpentín (como se detalla en el diseño hidráulico), es el que se ha denominado como número de tubos, aumentado este valor, el espacio entre tubos se hace menor. Según las ecuaciones planteadas, el paso entre tubos afecta el factor de remoción de calor, que es directamente proporcional al calor útil que realmente calentará el agua que circula por los tubos. Entonces para efectos de la simulación se escogió un vector con los siguientes valores para el número de tubos

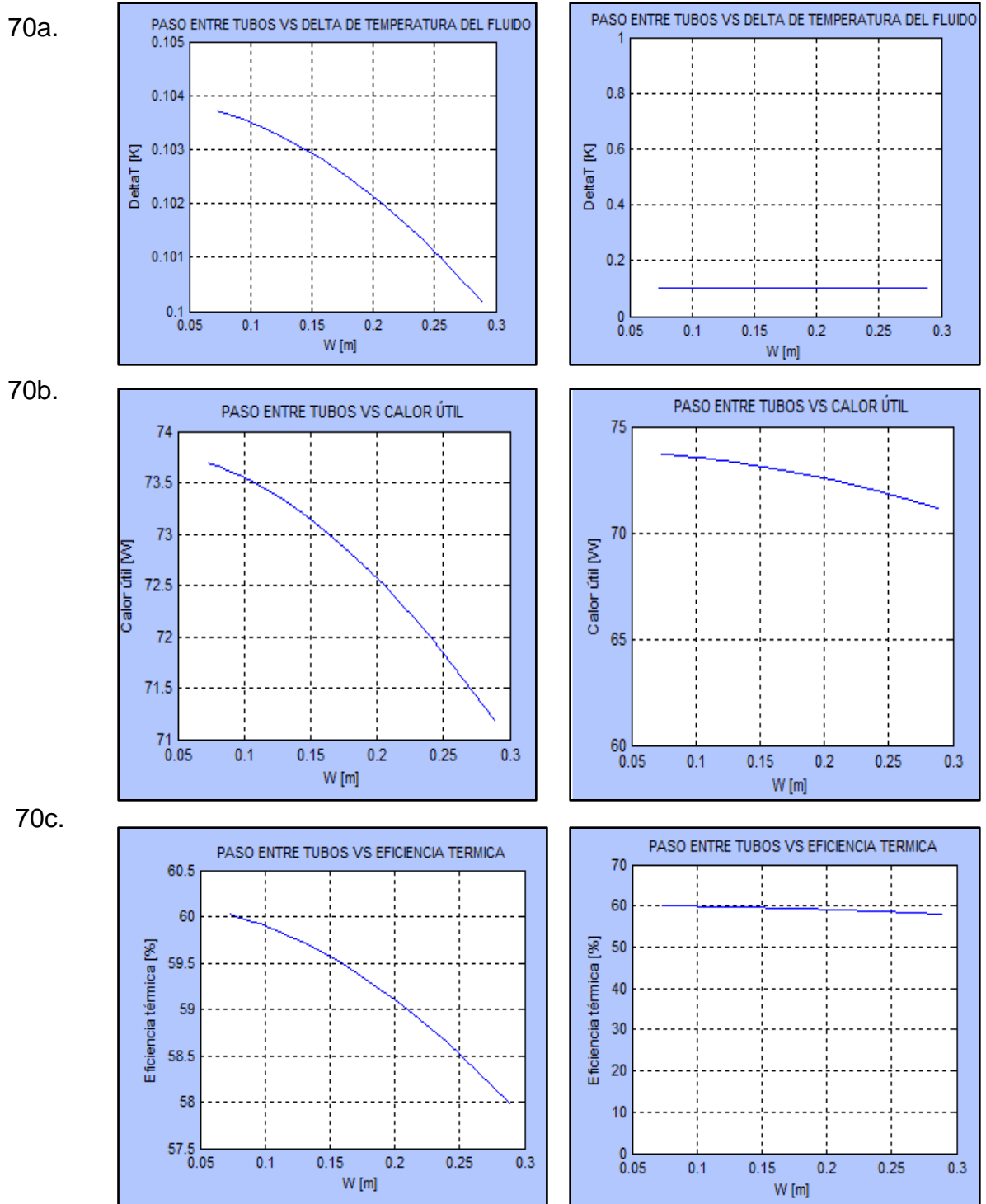
$$N_{tub} = [5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20]$$

Siendo el paso entre tubos, la razón entre el ancho de la placa absorbidora y el número de tubos.

$$W = \frac{W_c}{N_{tub}} [m] \quad (37)$$

Como resultado de la simulación se muestran 3 graficas (Figura 70a, 70b y 70c), en la Figura 70a el delta de temperatura del fluido presenta una disminución del orden de las milésimas de grados kelvin, siendo el paso entre tubos no muy significativo para la variación del delta de temperatura del fluido. En cambio para las figuras 70b y 70c, el calor útil y la eficiencia térmica en el captador solar tiene una disminución en décimas de sus magnitudes respecto al aumento del paso entre tubos. El rango de valores de paso entre tubos en que se debe diseñar el captador solar es de 0 a 0,2 [m], según lo observado, para obtener valores más adecuados de calor útil y eficiencia térmica en el captador. El doblado de tubos en serpentín se realiza en una maquina manual (dobladora de tubos), con las poleas que se encuentran en ella se realizan las curvaturas respectivas, la polea más pequeña encontrada fue de 4" de diámetro, con el cual se forma la curvatura interna del tubo, seleccionándose el paso entre tubos de 14 [cm] o 0,14 [m] que corresponde a 10 tubos.

Figura 70. Gráficas de paso entre tubos respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar



Espesor del aislante

Para minimizar las pérdidas de calor en el captador solar se debe añadir el respectivo aislamiento de los tubos, se debe colocar un material aislante como lana de vidrio, con una conductividad térmica baja. Se realiza la simulación por medio de un vector de valores de espesor del aislante (lana de vidrio) que se presenta a continuación:

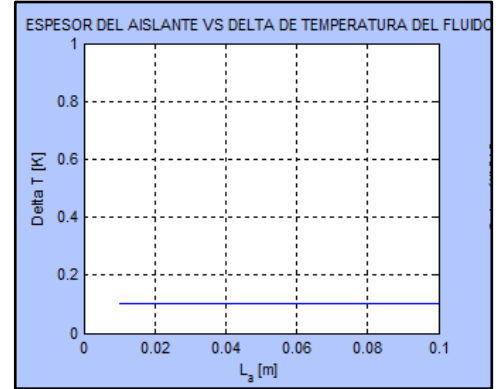
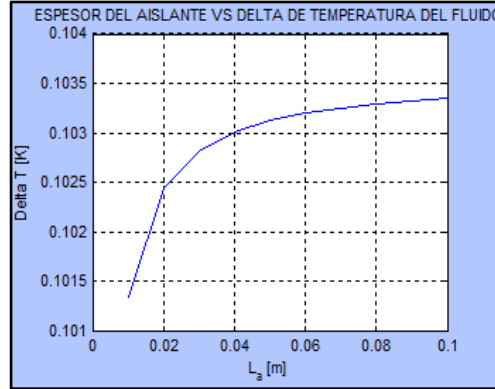
$$L_a = [0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.1]$$

Debido al resultado obtenido se presentan las gráficas (figuras 71a, 71b y 71c), en la figura 71a, el delta de temperatura del fluido incrementa en el orden de milésimas de grados kelvin, debido a esto en la gráfica de la derecha, se observa un comportamiento constante a medida del incremento del espesor del aislante.

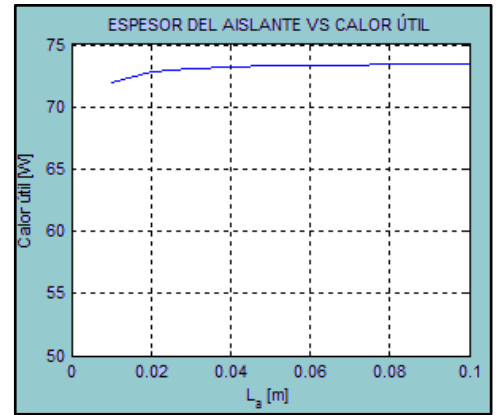
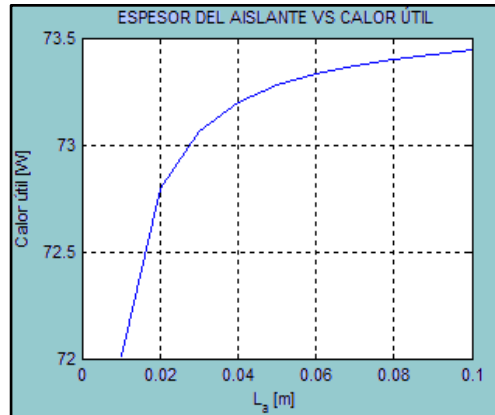
Para la figura 71b, el calor útil presenta incremento en décimas de [W], siendo el espesor del aislante significativo para incrementar el calor útil en el captador, decrece el coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas, debido a esto en la figura 71c se observa el incremento de la eficiencia térmica en unidades de porcentaje. Además según la tendencia de la curva obtenida, el aumento es prácticamente lineal hasta 4 [cm] de espesor de aislante, luego el aumento va siendo más lento, tendiendo a ser constante. Es decir que colocar un espesor de aislante desde 4 [cm] en adelante no representa un incremento de calor útil, mientras no se cambie algún otro parámetro en el modelamiento del captador solar.

Figura 71. Gráficas espesor del aislante respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar

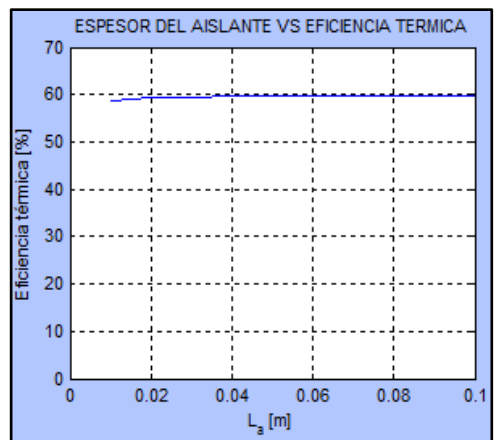
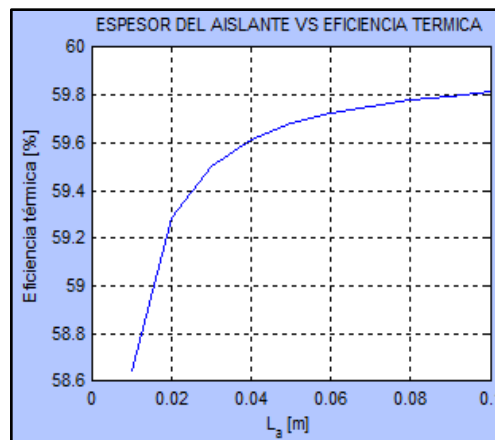
71a.



71b.



71c.



Espesor de la capa de pegante (grasa térmica)

Como se enunció anteriormente, la aplicación de una capa adhesiva entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbadora se hace necesaria para la transferencia de calor por conducción a los tubos por los cuales va el agua. Para saber la cantidad de material se debe buscar entre que valores se puede encontrar un comportamiento de la temperatura de salida del fluido y la eficiencia térmica que sea adecuado y permita, como resultado, valores significativos que favorezcan la operación del captador solar.

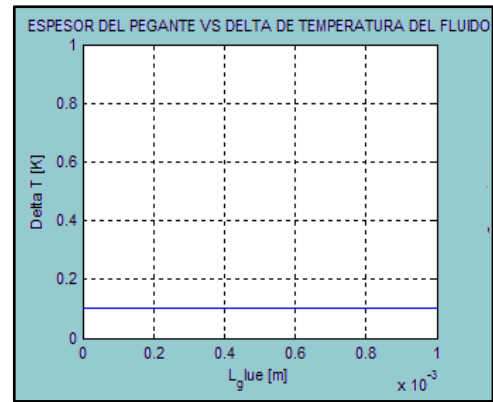
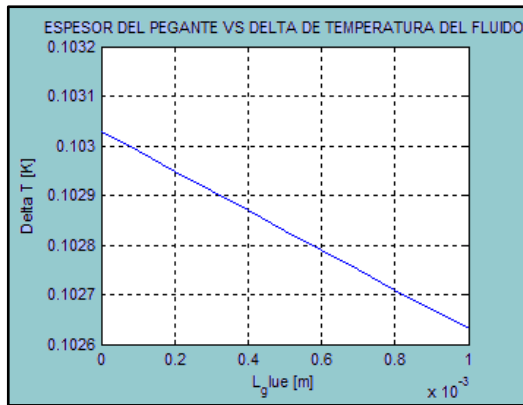
En la simulación se utilizó el siguiente vector de valores para el espesor del pegante termo conductor:

$$L_{glue} = [0,0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1][mm]$$

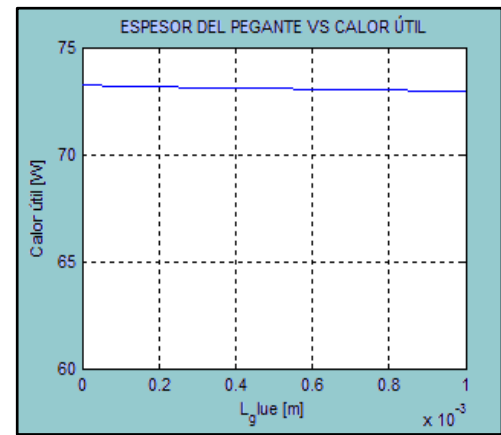
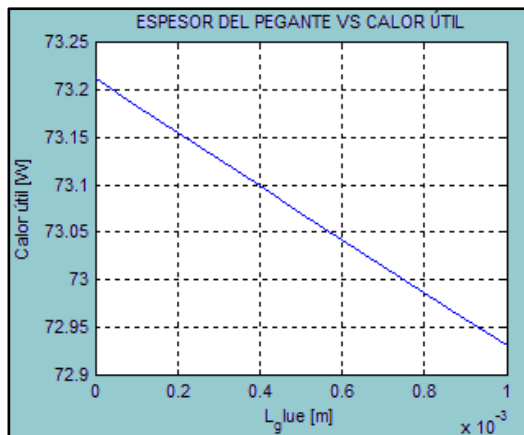
La figura 72 presenta los resultados gráficos de la simulación variando el espesor de la capa de pegante. En la figura 72a, el delta de temperatura del fluido va decreciendo en milésimas de grados kelvin, a medida que el espesor de la capa de pegante aumenta, en síntesis el delta de temperatura del fluido es aproximadamente constante respecto al vector planteado para este parámetro de diseño. En la figura 72b, el calor útil presenta una tasa de decrecimiento en centésimas de vatios [W] lo cual incide en el comportamiento de la eficiencia térmica (figura 72c) que decrece en centésimas de porcentaje. Debido a esto se puede decir que el espesor de la capa de pegante no afecta significativamente el rendimiento térmico del captador solar (dentro de los valores del vector), cabe resaltar que un valor de espesor de capa de pegante considerable aumenta la resistencia térmica, disminuyendo drásticamente el calor útil que llega al agua. Para el diseño del captador solar se escoge un espesor de la capa de pegante (grasa térmica), de 0.5 [mm], para garantizar el contacto entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbadora, y la disipación de calor efectiva entre las dos capas del captador solar.

Figura 72. Gráficas espesor de la capa de pegante respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar.

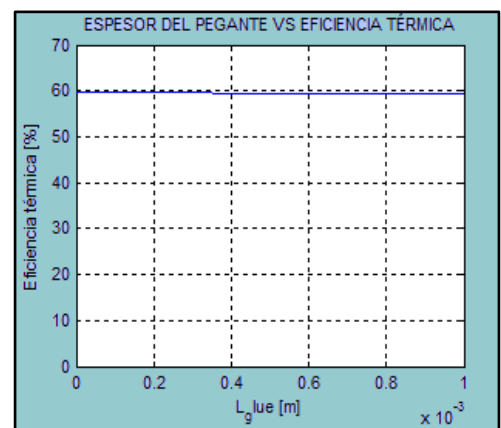
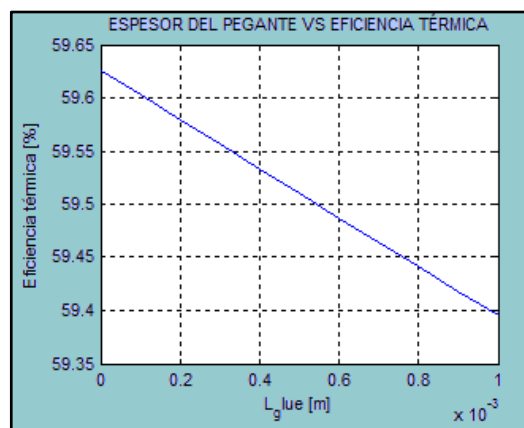
72a.



72b.



72c.



Flujo másico

El calor útil, que determina la transferencia de calor efectiva en el captador solar, está influenciado fuertemente por este parámetro, que puede ser modificado en el sistema hidráulico del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico). El flujo másico es una de las variables que determina el valor del factor de remoción de calor del captador solar, el cual es directamente proporcional al calor útil que realmente llegará desde la capa superior donde se presenta la irradiación hasta el agua que fluye por los tubos. El objetivo es encontrar una serie de valores que permitan buenos comportamientos del captador solar en cuanto a temperatura de salida del fluido y la eficiencia térmica que determinan la capacidad de calentamiento del sistema.

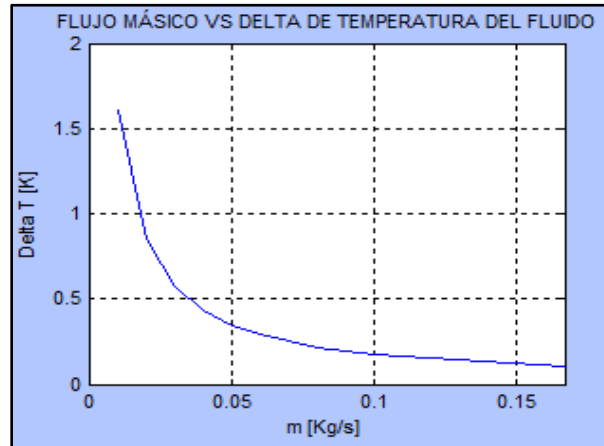
Para la simulación se determinó un vector con los siguientes valores:

$$\dot{m} = [0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10, 0.1667] \left[\frac{kg}{s} \right]$$

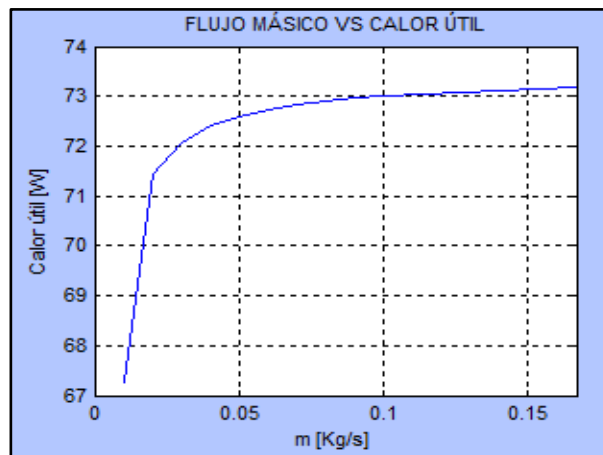
En la figura 73, se presentan las gráficas que muestran los resultados de la simulación para la variación del flujo másico. En la figura 73a, el delta de temperatura del fluido decrece de acuerdo al recorrido por todos los puntos del vector de flujo másico asignado de 0 a $0,05 \left[\frac{kg}{s} \right]$ decrece rápidamente la curva, y a partir de allí, decrece de forma más lenta hasta el valor final de $0,1667 \left[\frac{kg}{s} \right]$. En cambio para las figuras 73b y 73c, se presenta crecimiento acelerado de 0 a $0,05 \left[\frac{kg}{s} \right]$, y un crecimiento más lento hasta $0,1667 \left[\frac{kg}{s} \right]$, lo que permite inferir que el flujo másico es un factor determinante para el desempeño del captador solar. Para seleccionar el flujo másico que va circular por los tubos del captador, como criterio de diseño, cabe resaltar, que se busca un captador solar que sea térmicamente y eléctricamente eficiente ya que el módulo fotovoltaico tiene que trabajar en un rango de temperaturas de operación $-40 -85 \text{ [}^\circ\text{C]}$, si se presentan calentamientos mayores a $85 \text{ [}^\circ\text{C]}$, el módulo fotovoltaico puede dañarse, así el delta de temperatura del fluido por cada ciclo se vea disminuido.

Figura 73. Gráficas flujo másico respecto al delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica del captador solar

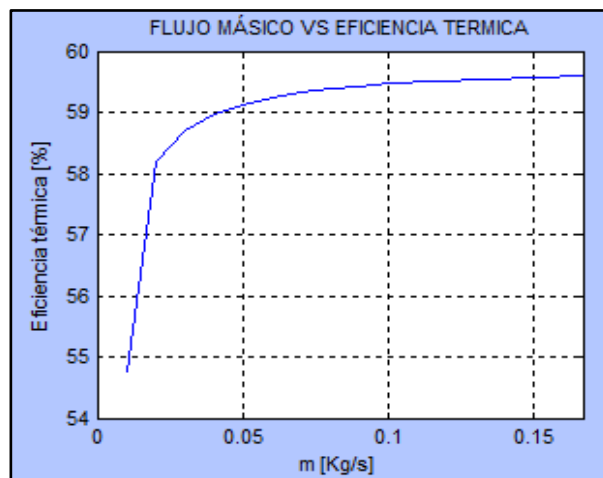
73a.



73b.



73c.



Con el fin de tener mayor calor útil y por ende mayor eficiencia, el flujo másico escogido para la operación del captador solar es $0,1667 \left[\frac{kg}{s}\right]$, debido a que un aumento a partir de este valor no causa diferencia relevante en las variables presentada en la figura 73.

Conductividad térmica de la placa absorbadora

La elección del material con el cual se diseña la placa absorbadora ya está previamente definido, pero con esta simulación se busca mirar entre los tres materiales más usados para este tipo de aplicaciones: acero, aluminio y cobre, que temperatura de salida del fluido y eficiencia térmica se alcanza para cada uno de los materiales descritos. La conductividad térmica es una propiedad característica de los materiales que determina su potencial de rata de transferencia de calor por conducción, clave en el funcionamiento del captador solar, siendo un sistema en su mayoría conductivo. En la tabla 2, se presenta los resultados del delta de temperatura del fluido, calor útil y eficiencia térmica, para cada uno de los materiales escogidos.

Tabla 2. Resultados de la variación de la conductividad térmica de la placa absorbadora

	Conductividad térmica	Delta de temperatura del fluido [K]	de Calor útil [W]	Eficiencia térmica [%]
Acero	51,9000	0,1027	72,9800	59,4200
Aluminio	237,0000	0,1030	73,2000	59,6200
Cobre	401,0000	0,1031	73,3000	59,7000

Aunque las diferencias de los materiales y las variables calculadas, no son muy notorias, se escoge el valor de $237 \left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$, el cual pertenece a la conductividad térmica del aluminio, además presenta una ventaja importante, que es muy ligero

respecto a los otros materiales, es más fácil de conseguir en el mercado local y más económico.

8.2 DISEÑO TÉRMICO DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

8.2.1 Criterios de diseño

Para el consumo de agua caliente, se tomó una capacidad de 50 litros diarios, haciendo referencia al consumo de una persona para una ducha corta [13]. Con esta justificación se diseña el sistema de almacenamiento que consiste principalmente en un tanque.

La función de este sistema de almacenamiento es que al terminar la operación del captador solar, debido a la poca disponibilidad del recurso solar, la energía almacenada se mantenga, es decir que la temperatura del agua esté cercana a la alcanzada en la condición final de operación del colector solar híbrido. Proyectando el prototipo a construir, a una aplicación real. Se asume que el tanque tiene un consumo único y total en la mañana, con reposición inmediata.

Para efectos prácticos, el agua de reposición se requiere para que el captador solar haga un mejor aprovechamiento de la energía incidente y presente un mejor desempeño a lo largo del día, además de proteger el módulo fotovoltaico, para que no se presenten aumentos de temperatura que puedan dañar las celdas.

Lo que se busca es diseñar el sistema de almacenamiento, de tal manera que se minimicen las pérdidas de calor hacia el ambiente, que permita tener disponibilidad del fluido y autonomía de un día, debido a las condiciones climáticas y meteorológicas que produzcan días muy nublados o lluvias.

Este sistema de almacenamiento debe ser higiénico, por lo cual no se pueden utilizar materiales que proliferen en: óxido y bacterias, para garantizar la calidad del agua para un posible uso doméstico.

Debido a los criterios que se establecieron anteriormente, se tiene:

- Tanque cilíndrico de 60 litros de capacidad, de polietileno con tapa: Soporta temperaturas cercanas a los 90 [°C] sin presentar alguna deformación, no es un material poroso, luego no permite el alojamiento de partículas de suciedad, ya que está en contacto con el agua. No presenta oxidación de ningún tipo.
- Espuma de poliuretano como aislante, con una conductividad térmica de $0.019 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$, siendo un material recomendado para el uso de sistemas de almacenamiento de agua caliente, cuyo espesor se calculará posteriormente [22].
- La carcasa exterior, será de aluminio, por ser un material que no presenta óxido, ligero, que se puede adaptar de una manera más fácil, a la forma del tanque cilíndrico. El peso total de este sistema, fue determinante para escoger este material, además de dar un buen aspecto estético y un buen precio en el mercado.

8.2.1 Cálculo del radio de aislamiento

Para determinar el espesor de aislante se requiere calcular el radio de aislamiento.

Para realizar este proceso se debe asumir que:

- Se toma una temperatura de 40 [°C], como la máxima temperatura que alcanza el agua dentro del sistema, en todo su volumen, al final de la operación del colector solar híbrido.
- El calor de pérdidas del agua en el tanque corresponda a una disminución en la temperatura de 2 [°C].
- El tiempo de almacenamiento se toma para un día.
- Se asume una temperatura ambiente promedio de 20 [°C].
- Es despreciable la transferencia de calor por radiación del tanque hacia el ambiente.
- Al final de la operación del colector solar híbrido, no hay circulación de agua entonces el agua dentro del tanque se toma como una masa estática.

- La transferencia de calor del agua hacia el exterior se asume por conducción en estado transitorio.
- Un cálculo del número de Biot para la masa de agua contenida permite confirmar que el sistema se puede tomar como un sólido de resistencia interna despreciable ya que el número de Biot calculado es de 0,02. Entonces se asume que no hay variaciones de temperatura dentro de la masa de agua y se considera toda a 40 [°C].

En la figura 74, se puede observar una vista superior del tanque a diseñar, en el cual se observan las resistencias térmicas que se presentan allí y en la figura 75 el esquema de resistencias térmicas que permite visualizar las variables de salida del cálculo.

Figura 74. Capas del tanque de almacenamiento

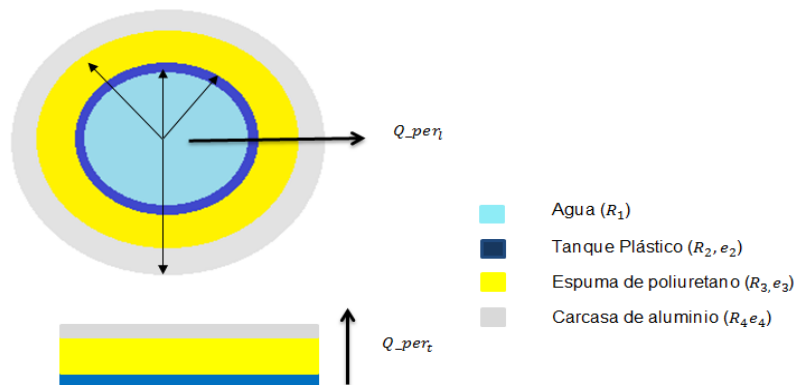
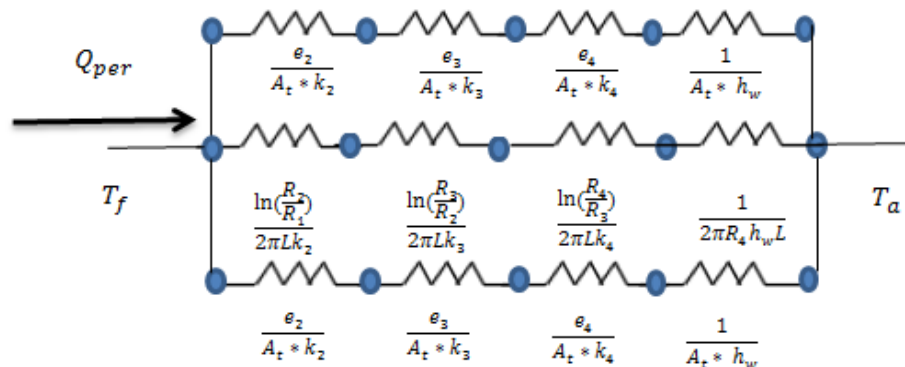


Figura 75. Esquema de resistencias térmicas en el tanque de almacenamiento



Los datos de entrada para el cálculo del radio de aislamiento del tanque se encuentran en la tabla 3.

Tabla 3. Valores de entrada para el cálculo del radio de aislamiento del tanque

Variable	Cantidad	Unidades
Masa de agua	50	Kg
Diámetro interno del tanque (D_1)	0,45	m
Espesor del tanque (e_2)	4	mm
Altura del tanque (L)	0,56	m
Conductividad térmica del tanque (K_2)	0,5 [22]	W/m*K
Conductividad térmica de la espuma poliuretano (K_3)	0,019 [22]	W/m*K
Conductividad térmica del aluminio (K_4)	237 [18]	W/m*K
Velocidad del viento	1	m/seg
Temperatura del agua inicial	40	°C
Temperatura ambiente	20	°C
Espesor del aluminio (e_4)	0,4	mm
Disminución de temperatura del agua almacenada	2	°C
Delta de tiempo	24	horas

La variación de la temperatura en el tanque de almacenamiento (conducción transitoria) se calcula con la siguiente expresión:

$$T_{S+1} = (T_s - T_a) + e^{\frac{-UA_{tanq} * dt}{M * Cp}} + T_a \quad (38)$$

Para el cálculo del coeficiente global de pérdidas en el tanque de almacenamiento se utiliza la siguiente expresión:

$$UA_{tanq} = \frac{1}{\left(\frac{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}{2\pi K_2 L}\right) + \left(\frac{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}{2\pi K_3 L}\right) + \left(\frac{\ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right)}{2\pi K_4 L}\right) + \frac{1}{2\pi h_w R_4 L}} + \frac{1}{\frac{e_2}{A_t * k_2} + \frac{e_3}{A_t * k_3} + \frac{e_4}{A_t * k_4} + \frac{1}{A_t * h_w}} + \frac{1}{\frac{e_2}{A_t * k_2} + \frac{e_3}{A_t * k_3} + \frac{e_4}{A_t * k_4}} \left[\frac{W}{K}\right] \quad (39)$$

Con todas las variables de entrada definidas, se procede a realizar el cálculo del radio de aislamiento mínimo para la condiciones establecidas, siendo esta la única incógnita en el sistema de ecuaciones planteado, que da como resultado una diferencia desde el radio externo del tanque y el radio interno de la carcasa de aluminio R_3 y R_2 (delta de aislamiento) de 6,8 [cm]. Entonces se define el espesor de aislamiento como 7 [cm].

Las dimensiones diametrales de diseño para el tanque de almacenamiento, asumiendo una sección transversal cilíndrica se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Dimensiones finales de diseño del tanque de almacenamiento

Variable	Valor (cm)
Diámetro interno del tanque (D_1)	45,60
Diámetro externo del tanque (D_2)	46,00
Diámetro externo del aislamiento (D_3)	60,00
Diámetro externo de la carcasa de aluminio (D_4)	60,04

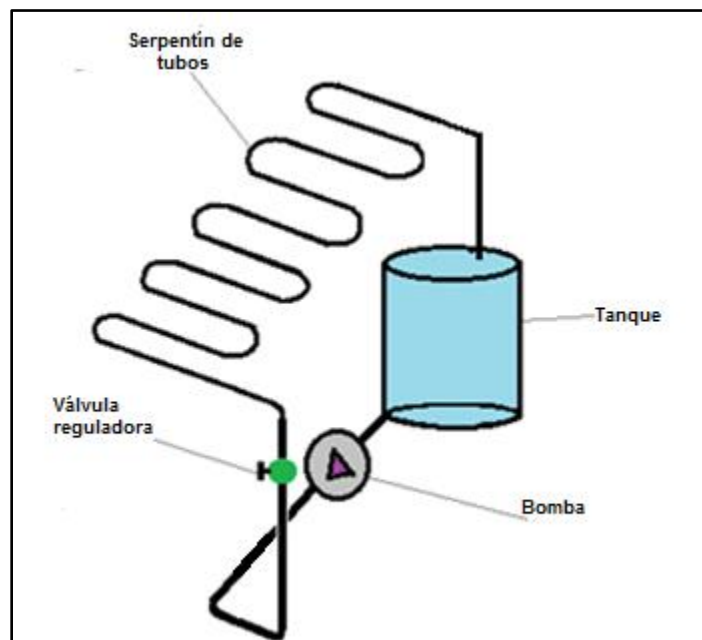
En el límite entre el fondo del tanque plástico, y el fondo de la carcasa se coloca el mismo delta de aislamiento de 7 [cm], para garantizar que no haya una pérdida de calor, más alta que la permitida por el criterio de diseño.

El coeficiente global de transferencia de calor en $[\frac{W}{K}]$ corresponde al valor de 0.25 $[\frac{W}{K}]$ debido a las resistencias térmicas enunciadas en la figura 75.

8.3 DISEÑO HIDRÁULICO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

El diseño del sistema hidráulico del colector solar híbrido tiene como objetivo conocer la altura de bombeo necesaria para compensar las pérdidas por fricción y por accesorios y así conocer la potencia hidráulica que permite seleccionar la bomba de circulación de agua.

Figura 76. Esquema del circuito hidráulico



Con el esquema anterior se definieron 3 zonas principales: El tramo del tanque hacia el captador solar, el tramo dentro del captador solar y el tramo desde la salida del captador solar hacia el tanque. El análisis de pérdidas se realizó tomando como referencia 4 puntos en las 3 zonas, los cuales son:

- 1- Entrada a la bomba.
- 2- Entrada al captador.

- 3- Salida del captador.
- 4- Entrada al tanque.

Zona 1: Tramo del tanque al captador solar (Puntos 1 al 2)

En este tramo está la bomba hidráulica, la válvula de cortina (reguladora de caudal) y el tramo de manguera con una longitud correspondiente de 1,6 [m].

La manguera seleccionada es de plástico reforzada con fibras de lino que le proporcionan una resistencia a temperaturas hasta de 60-70 [°C].

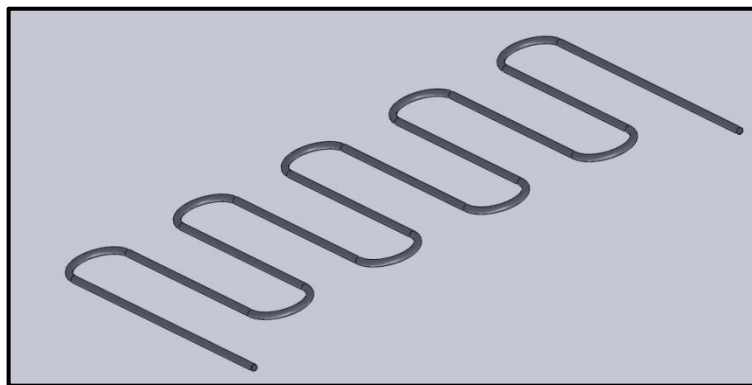
Zona 2: Tramo de tubería del captador solar (Puntos 2 al 3).

Este tramo contiene el serpentín de tubería de aluminio soldado a la placa de absorción, contiene N número de tubos y el número de dobleces en U corresponden a N-1 tubos, siendo así 10 tubos con 9 dobleces para este caso.

Zona 3: Tramo del captador solar al tanque (Puntos 3 al 4).

Este tramo es el final del circuito hidráulico, corresponde a una longitud de manguera de 1 [m] que devuelve el agua del sistema hacia el tanque.

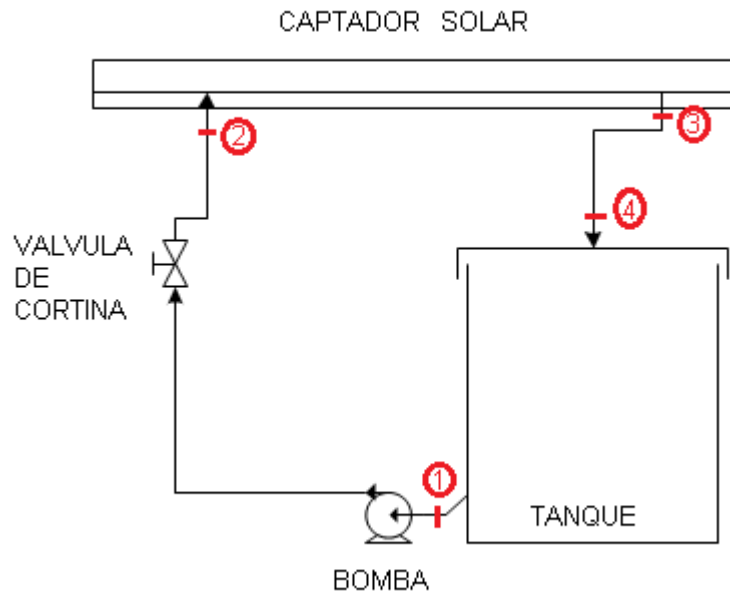
Figura 77. Tramo de tubería de aluminio



Se realizan ciertas suposiciones cómo que el tanque está levemente presurizado y que la presión en el punto 1 o de succión de la bomba, corresponde a una altura piezométrica de 0,6 metros de columna de agua, las propiedades del fluido como

viscosidad y densidad se tomaron con la temperatura promedio del sistema, entre la temperatura que alcanza (simulada en el modelo térmico) y la temperatura inicial o ambiente (figura 78).

Figura 78. Puntos de análisis del sistema hidráulico



Con lo anterior se procede a realizar el análisis por medio de la ecuación general de la energía entre dos puntos [23].

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2 * g} + Z_1 + h_{bomba} - h_{Loss_{14}} = \frac{P_4}{\gamma} + \frac{V_4^2}{2 * g} + Z_4 \quad (40)$$

La altura de pérdidas $h_{Loss_{14}}$ comprende las pérdidas a lo largo de la tubería debido a la fricción y las pérdidas locales, esta altura se obtiene por medio de las ecuaciones de cálculo del factor de fricción de Darcy con la ecuación empírica de Swamee & Jain (41) para flujo turbulento y el factor de fricción a total turbulencia que se utiliza para las pérdidas locales producidas por la válvula y los segmentos de tubo en U.

$$h_{Loss14} = \left(f * \left(\frac{L_{14}}{D_{14}} \right) + K_{14} \right) * \frac{V_{14}^2}{2 * g} [m] \quad (41)$$

Para efectos de cálculo se toma un valor de rugosidad de tubería de aluminio, 0,015 [mm], material del que está hecho el serpentín de la tubería y las mangueras se consideran lisas.

Tabla 5. Rugosidades de materiales

Material de construcción	Rugosidad (k:mm)
Tuberías de plástico	
Polietileno (P.E).....	0,002
Cloruro de polivinilo (PVC).....	0,02
Tuberías metálicas	
Tuberías estiradas, sin soldadura de latón, cobre, plomo.....	0.0015-0.01
Aluminio.....	0.015-0.06

Fuente: <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/HIDRAULICA2013.pdf>

Para calcular las pérdidas en el serpentín se asume que cada tramo curvo que forma 180° está formado por dos codos de 90° de radio de curvatura largo, cuya constante de pérdidas correspondiente es $K_{90} = 20 * fT$, entonces las pérdidas por curvatura total serían correspondientes a 18 codos de 90° [23].

Para solucionar el sistema y obtener las presiones correspondientes en cada punto, se analizan adicionalmente subdivisiones del sistema como del punto 1 al 2 y 1 al 3, también se realiza un análisis de energía en la entrada y salida al tanque.

Para solucionar el sistema es necesario hacer una última suposición, como el tanque es cerrado y ligeramente presurizado, se asume una presión de entrada a la bomba P1, que es igual a la presión correspondiente a 0,6 metros de columna de agua.

La potencia calculada de la bomba se expresa cómo el producto entre la altura, el peso específico del fluido y el caudal.

$$Pot_{bomba_{calculada}} = h_{bomba} * \gamma * Q \quad [W] \quad (41)$$

Las ecuaciones anteriores se ingresaron en un programa en MATLAB con su respectivo guide que permite al usuario calcular las pérdidas, observar las presiones absolutas presentes en cada punto de análisis para el colector dado.

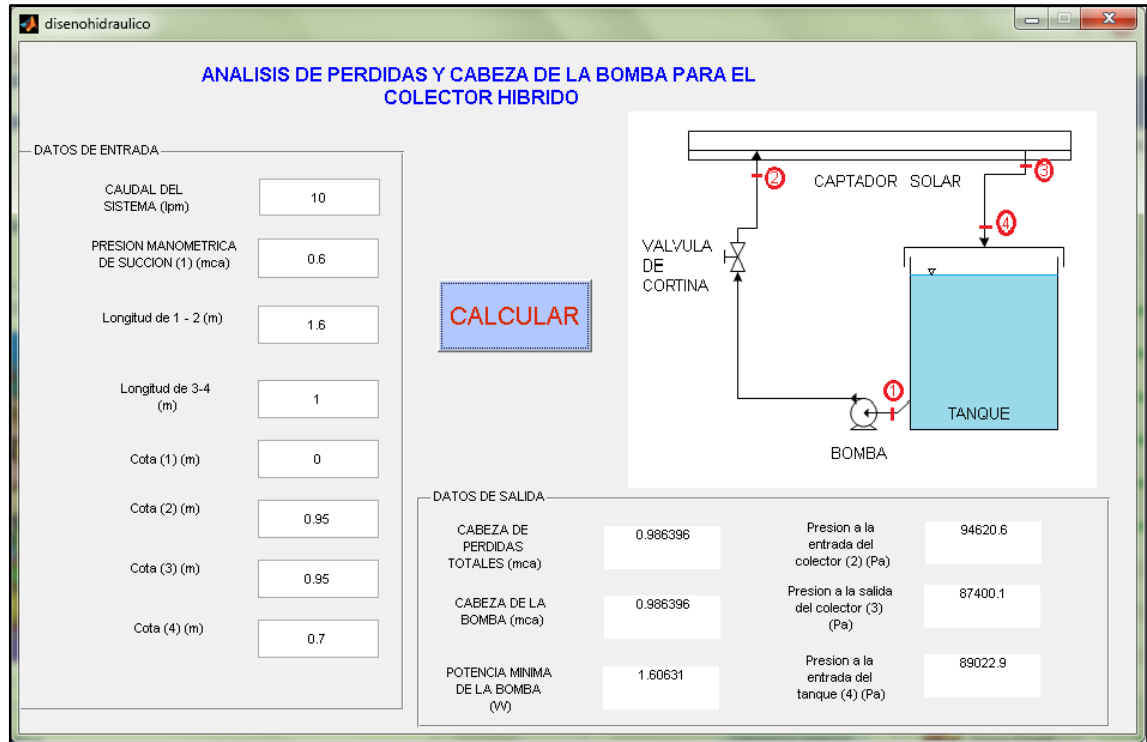
Los datos de entrada para el programa con sus respectivos valores y unidades se consignan en la tabla 7.

Tabla 6. Datos de entrada para el diseño hidráulico del colector solar híbrido

DATOS	VALOR	UNIDADES
Caudal del sistema	10	LPM
Presión asumida (1)	0,6	m. columna de agua (mca)
Long. Tramo manguera 1-2	1.6	m
Long. Tramo manguera 3-4	1	m
Cota (1)	0	m
Cota (2)	0,95	m
Cota (3)	0,95	m
Cota (4)	0,7	m

Estos datos se ingresan en la siguiente interfaz guide de MATLAB donde se muestra el esquema del sistema y se muestran los resultados a partir de los datos de entrada anteriormente tabulados (figura 79).

Figura 79. Guide de MATLAB para el cálculo de la bomba en el colector solar híbrido



Los resultados obtenidos correspondientes al cálculo hidráulico del sistema se muestran en la tabla 7.

Tabla 7. Resultados del diseño hidráulico

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
$h_{bomba} [m]$	0,9863
$h_{Loss} [m]$	0,9863
$P_2 [Pa]$	94620
$P_3 [Pa]$	87400
$P_4 [Pa]$	89022.9
$Pot_{bomba\ calculada} [W]$	1,606

En el mercado, conseguir una bomba con estos requerimientos es difícil, sin embargo se tiene un criterio aproximado para su respectiva selección.

La bomba que más se acerca a los requerimientos es una bomba de desagüe de lavadora con valores nominales de potencia, altura y caudal de 35 [W], 1,2 [m] y 22 [LPM] respectivamente.

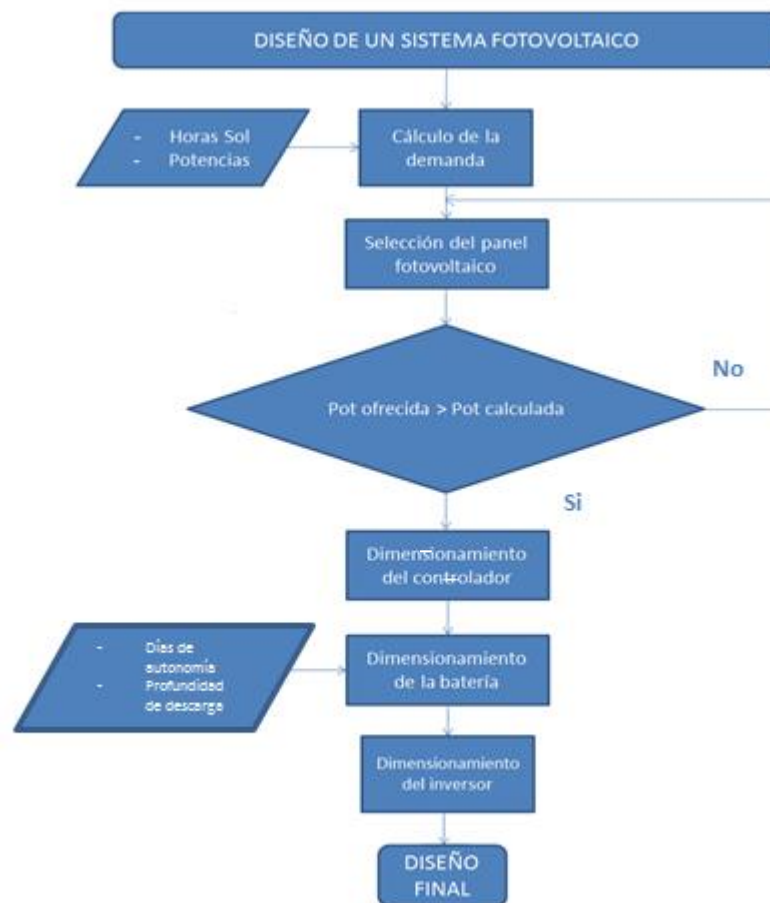
Como las presiones en el sistema hidráulico y son tan pequeñas, debido a que la bomba es de una altura pequeña, se descartan posibles daños en la tubería y manguera causados por esfuerzos de presión y el uso de manómetros para medir las presiones en cada punto del colector no es viable porque la escala de medición de los manómetros disponibles no alcanza a medir dichas presiones, por eso no es necesario implementarlos en el prototipo.

8.4 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO

El dimensionamiento (diseño y selección) de los componentes del sistema fotovoltaico autónomo tiene como fin implementar los elementos adecuados para el funcionamiento autónomo del colector híbrido térmico y fotovoltaico.

Para diseñar la capacidad del sistema fotovoltaico se realiza un proceso de dimensionamiento básico de diseño de sistemas fotovoltaicos (figura 80).

Figura 80. Diagrama de flujo para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico



Para comenzar el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico se debe conocer principalmente la demanda de energía total.

8.4.1 Cálculo de la demanda energética total

A partir de la demanda de energía eléctrica total se debe calcular la potencia mínima que debe ofrecer el módulo fotovoltaico. Para ello se realizó una tabla que muestra los elementos que funcionarán por medio de la energía eléctrica generada por el sistema fotovoltaico.

Se deben diferenciar los tipos de potencia; si es potencia AC o DC y realizar este análisis para cada uno.

Se deben distinguir los elementos, su cantidad, la potencia unitaria en [W], la potencia total para todos los elementos de un mismo tipo en [W], las horas de funcionamiento o de uso y la energía total en [W·h] que corresponde a multiplicar las horas de uso con la potencia total.

Tabla 8. Tabla de carga del sistema fotovoltaico

POTENCIA DC					
Elemento	Cant.	Pot. Unitaria [W]	Potencia Total [W]	Horas Uso [h]	Energía Total [W·h]
Ventilador	1	2,04	2,04	10	20,4
Total			2,04		

POTENCIA AC					
Elemento	Cant	Pot. Unitaria [W]	Potencia Total [W]	Horas Uso [h]	Energía Total [W·h]
Bomba	1	35	35	10	350
Total			35		350

La energía total es 370,4 [W·h] y la potencia total es 37,04 [W]. Estos datos son la partida para el dimensionamiento y selección del sistema fotovoltaico autónomo.

Se realizó un programa en MATLAB que permitiera dimensionar el sistema fotovoltaico a implementar, el cual tiene como principal entrada la energía total calculada, las horas de funcionamiento, las eficiencias de los subsistemas y conexiones y demás parámetros para dimensionar no solo el panel sino la batería, regulador e inversor (figura 81).

Figura 81. Guide en MATLAB para el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico.

8.4.2 Selección del módulo fotovoltaico

Una vez calculada la energía total en [W·h] se procede a calcular las horas sol de la ubicación que corresponden a las horas en las que se recibe una irradiación equivalente a $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Con los datos meteorológicos disponibles de radiación total y difusa se calcula la irradiación para el mes con más baja radiación.

$$Horas_{sol} = \frac{qs\beta_{prom} \left[\frac{W}{m^2} \right]}{1000 \left[\frac{W}{m^2 h} \right]} = \frac{3123,488}{1000} = 3,123 [h] \quad (43)$$

El resultado de la irradiación promedio diaria ($qs\beta_{prom}$) es 3123,488 $\left[\frac{W}{m^2}\right]$. Y las horas sol correspondientes son 3,123 aproximadamente.

Teniendo en cuenta esto se calcula la potencia mínima requerida.

$$Pot_{\text{mínima requerida}} = \frac{\text{Energía}_{\text{total}} [W \cdot h]}{\text{Horas Sol} [h]} = 138 [W] \quad (44)$$

La potencia mínima debe ser menor a la potencia ofrecida por el módulo fotovoltaico seleccionado en los catálogos. La potencia mínima calculada corresponde aproximadamente a 138 [W]. Uno de los módulos fotovoltaicos que cumplen con la condición de que la potencia mínima requerida sea menor que la ofrecida es el de marca **YINGLI SOLAR** modelo **JS 145p-17b** de 36 celdas de silicio policristalino con salida de potencia de 145 [W] y 12 [V] DC (figura 82). Las especificaciones eléctricas del módulo se muestran en la tabla 9 tomada del catálogo respectivo. También el catálogo del módulo fotovoltaico brinda información de las características térmicas como los coeficientes de operación, que son valores experimentales dados que permiten conocer el comportamiento de la salida de módulo fotovoltaico (P_{max} , I_{sc} y V_{oc}) respecto a la diferencia entre la temperatura de operación y la temperatura estándar.

Tabla 9. Características eléctricas del panel solar YINGLI SOLAR JS 145P-17b

Potencia máxima	145	Pmax [W]
Voltaje máximo	18,29	Vmax [V]
Corriente máxima	7,99	I _{max} [A]
Eficiencia del módulo	14,5	%
Voltaje de circuito abierto	22,5	V _{oc} [V]
Corriente de corto circuito	8,47	I _{sc} [A]
Coefficiente de operación Pmax	-0,45	[%]
Coefficiente de operación Voc	-0,37	[%]
Coefficiente de operación Isc	0,06	[%]

Figura 82. Módulo fotovoltaico YINGLI SOLAR



Fuente: [http://www.merkasol.com/WebRoot/StoreLES/Shops/62387086/4F37/C141/6C65/6629/D59B/C0A8/28BC/EC37/Paneles Solares Yingli Solar.jpg](http://www.merkasol.com/WebRoot/StoreLES/Shops/62387086/4F37/C141/6C65/6629/D59B/C0A8/28BC/EC37/Paneles%20Solares%20Yingli%20Solar.jpg)

8.4.3 Selección del controlador o regulador de carga

Para seleccionar el controlador o regulador sólo se debe comprobar que los parámetros del controlador estén conformes a los parámetros del módulo fotovoltaico, es decir que sean iguales o mayores a las características eléctricas del panel solar.

Para el sistema existente se seleccionó un controlador marca Intelligent DC-DC con la siguientes especificaciones. El voltaje máximo del módulo que puede recibir el regulador o controlador de carga es 50 [V] y el voltaje máximo del módulo es 22,5 [V] y la corriente máxima del regulador es 15 [A] que comparada con la corriente del panel que es 8,47 [A] también está por encima, por consiguiente el regulador de carga se puede utilizar para este panel (figura 82).

Tabla 10. Especificaciones del regulador de carga.

ESPECIFICACIONES	VALOR	UNIDADES
Voltaje de operación	12/24	[V]
Voltaje máximo panel	50	[V]
Corriente máxima panel	15	[A]

Figura 83. Controlador de carga INTELLIGENT DC-DC.



8.4.4 Selección de la batería a utilizar

Para seleccionar una batería adecuada para el sistema fotovoltaico que corresponda a las condiciones de demanda se deben establecer parámetros importantes tales como los días de autonomía, que son los días que el sistema puede funcionar sin generación de electricidad por parte del módulo fotovoltaico, caso que puede ocurrir en un día sin suficiente disponibilidad solar. Con lo anterior se concluye que los días de autonomía son el factor más importante a la hora de seleccionar una batería porque entre más días de autonomía se requieran, el tamaño de la batería aumenta.

Para seleccionar la batería se calcula una capacidad mínima de batería, que está dada por la ecuación 45.

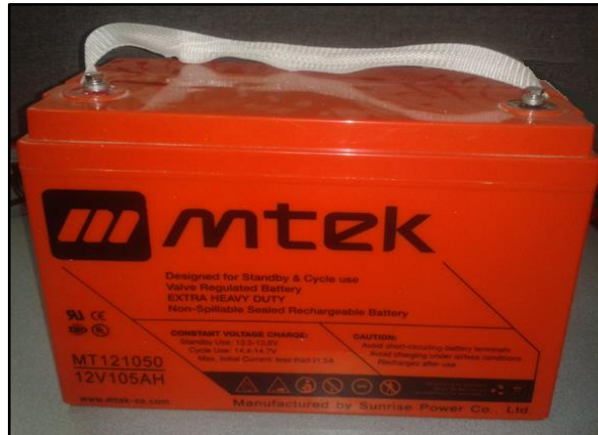
$$CAP_{min} = \left(\frac{\text{Energía Total}}{\text{Profundidad de descarga} * \text{Voltaje de la batería}} \right) * (\text{Días autonomía} + 1) \quad (45)$$

Las unidades de capacidad de una batería están dadas en Amperios por hora [A·h] esta capacidad calculada debe ser menor a la capacidad ofrecida por las baterías en el mercado y corresponder al voltaje de carga proveniente del panel, luego la batería debe ser de 12 [V]. Y su profundidad de descarga varía entre el 50 [%] y el 80 [%]. La batería disponible es una batería marca M-TEK 121050 esta referencia corresponde a una batería de 12 [V] y 105 [A·h] de capacidad (figura

84), que comparada con los 90 [A·h] calculados, puede utilizarse ya que su capacidad es mayor a la que se requiere (calculada).

Las baterías tienen una vida útil entre 3 y 6 años [24].

Figura 84. Batería seleccionada MTEK 121050



8.4.5 Selección del inversor

El inversor es el dispositivo que convierte la potencia DC en AC y para su selección se tienen en cuenta dos parámetros importantes: la potencia total del sistema y la eficiencia del inversor. Con estos dos datos se calcula la potencia nominal mínima que debe tener el inversor.

$$Pot_{nom\,inversor} = \frac{Potencia\ total\ sistema\ [W]}{Eficiencia\ del\ inversor} \quad (46)$$

Para tener un valor más conservativo en la práctica se recomienda restarle un 2% a la eficiencia nominal del inversor, porque puede ser menos eficiente debido a las pérdidas en el cableado.

Se selecciona un inversor marca Cobra de eficiencia 88 [%] con voltaje de operación de 12 [V] y potencia máxima de operación de 800 [W] (figura 85). Teniendo en cuenta que la potencia total que viene dada por la demanda es 37,04 [W] y conociendo la eficiencia del inversor se calcula la potencia mínima nominal

que corresponde al valor de 43,75 [W]. De acuerdo a esto, no se están pasando los límites de funcionamiento del inversor.

Figura 85. Inversor escogido marca COBRA



Se seleccionó el sistema eléctrico de autonomía para el colector híbrido térmico y fotovoltaico, se realizó un proceso básico de diseño y selección igual al que se hace para escoger un sistema de paneles para satisfacer una demanda de energía eléctrica. Para conectar los dispositivos se utilizó cable eléctrico de bajo amperaje, debido a que la corriente máxima del sistema fotovoltaico no supera los 10 amperios.

Figura 86. Cable eléctrico de conexión para la batería



9. CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

La construcción del colector solar híbrido se dividió en tres partes importantes: construcción y montaje del captador solar, construcción y montaje del tanque de almacenamiento con el respectivo sistema hidráulico, diseño y construcción de la estructura y conexiones finales.

9.1 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL CAPTADOR SOLAR

Conociendo el tamaño del módulo fotovoltaico anteriormente dimensionado, se procede a construir el captador solar, siguiendo la metodología y procesos de manufactura explicados a continuación.

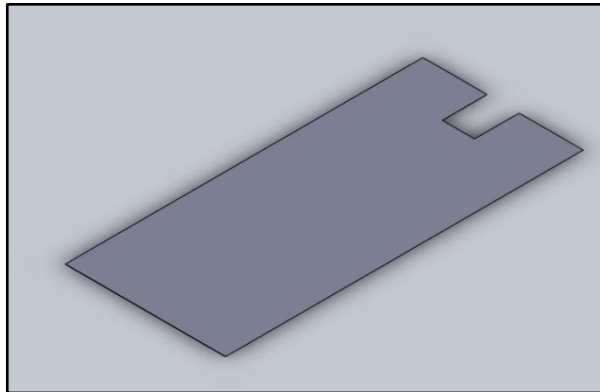
9.1.1 Placa absorbedora y tubos

Los procesos de manufactura que se utilizaron para la fabricación la placa absorbedora y tubos, fueron: corte, aplanado, doblado de los tubos y soldadura.

La lámina de aluminio de 0,9 [mm] de espesor, se consigue en forma enrollada, de 1 [m] de ancho y la longitud que se desee, en este caso se compraron 1,5 [m] de longitud para poder recortarla de forma rectangular por medio de una máquina cortadora manual y un aplanado de la lámina realizado también de forma manual. Las medidas que se recortaron fueron las siguientes: 0,65 [m] x 1,44 [m].

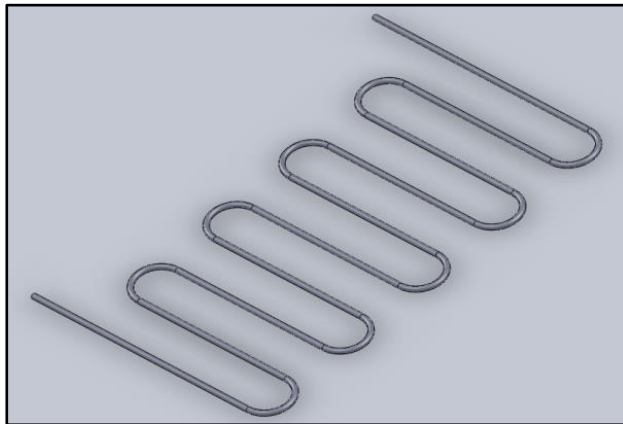
Para evitar interferencias con la caja del diodo de bloqueo del módulo fotovoltaico se realizó un corte adicional con forma rectangular en uno de los extremos de la lámina de 13 [cm] x 18 [cm]. La figura 87 muestra la forma de la placa absorbedora.

Figura 87. Placa absorbadora



Se utilizaron tubos de aluminio de 5/8" de diámetro externo nominal en tramos de longitud de 6 [m]. Para abarcar el área de la placa absorbadora se necesitaron 2 tramos que en total sumaron 7,4 [m] (figura 88). El paso entre tubos (previamente comprobado por la simulación de parámetros del diseño del captador solar) tiene un criterio que está dentro del intervalo de 10 [cm] y máximo 20 [cm] en la distancia entre centros de tubo a tubo, para efectos de manufactura la distancia de doblado mínima disponible para 5/8" de diámetro externo de tubo disponible para doblar (en U) fue de 14 [cm], dando como resultado un número de 10 tubos con 9 dobleces.

Figura 88. Serpentín de tubo de aluminio



9.1.2 Unión entre el serpentín de tubo y la placa absorbidora

El proceso de unión entre el tubo y la placa absorbidora que se realizó fue soldadura autógena (figura 89), se requiere de especial cuidado para realizar la unión entre tubos y láminas de aluminio porque si las láminas son muy delgadas el calor tiende a “arrugarlas” por el efecto de la expansión térmica.

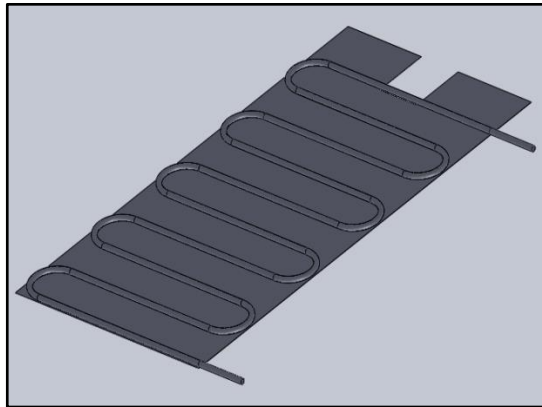
Como la lámina de aluminio es muy delgada y se corre el riesgo de traspasarla con el soplete, la soldadura de los tubos a la lámina no fue continua, se realizó por puntos con cierta separación con el fin de evitar daños irreversibles tanto en la placa absorbidora como en los tubos. Después de soldado, la placa absorbidora y tubos se realizó la respectiva prueba hidrostática inyectando aire a una presión mayor a 10 [Psi] dentro de los tubos sumergidos en una piscina de agua, en busca de posibles fugas generadas durante el proceso de soldadura.

Figura 89. Soldadura de los tubos y la placa absorbidora



Al someter la lámina de aluminio a temperaturas altas se genera una expansión térmica, que provoca que la superficie de la placa absorbidora no quede completamente plana.

Figura 90. Placa absorbedora y tubos de aluminio



9.1.3 Unión entre la placa absorbedora y el módulo fotovoltaico

La unión entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbedora se llevó a cabo con la condición de que el calor producto de la radiación que no es convertida en electricidad del panel sea completamente absorbido por la placa de aluminio, por ello se escogió un adhesivo o pegante que se caracteriza por tener conductividad térmica, en el mercado se consiguen pegantes o grasas térmicas con conductividades desde $0,8 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ hasta $4 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$. Se utilizaron 8 tubos de 80 [g] de un pegante termo conductor marca KAFUTER de referencia K-5202 con un valor de $0,8 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ de conductividad térmica para esparcirlos en las superficies a pegar. Es un pegante de alta viscosidad con gravedad específica aproximadamente de 1,6 color gris, que se seca en un período de 24 horas.

Figura 91. Aplicación del pegante al módulo fotovoltaico



Figura 92. Unión entre el módulo fotovoltaico y la placa absorbedora



9.1.4 Marco interno de madera

Para proporcionar protección y sostenimiento al conjunto módulo fotovoltaico, placa absorbedora y tubos, se diseñó marco de madera en forma de caja de madera de mediana densidad (MDF) la cual tiene 12 [mm] de espesor. El marco interno de madera tiene la función de sostener en varios puntos el módulo y la placa absorbedora, garantizando la unión de ambos y evitando que se lleguen a flexionar.

Figura 93. Marco interno de madera



Se compone de una serie de vigas de 55 [cm] x 5 [cm] , también de madera que están en contacto con la placa absorbedora para dar sostenimiento, el espaciamiento interno es de 70 [cm] x 150 [cm] dentro del cual se pondrá el módulo fotovoltaico, la décima viga (derecha) está segmentada en 2 partes esto es para que la caja donde se encuentra el diodo de bloqueo del módulo

fotovoltaico no interfiera en el montaje, también se le realizó una ranura para que se puedan poner los tubos de salida y entrada de agua al captador.

9.1.5 Aislamiento del captador

Para el aislamiento del captador se seleccionó lana de vidrio cuya conductividad térmica es de $0,03 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$ y se dispuso de una pared de 4 [cm] de aislamiento inferior. El colchón de lana de vidrio tiene un espesor de 4 [cm] y las medidas son de 1,20 [m] x 1,50 [m].

Figura 94. Colchón de aislamiento de lana de vidrio.



Con la lana de vidrio se llenaron los espacios entre los refuerzos de madera donde estarán localizados los tubos (figura 95).

Figura 95. Montaje del aislamiento en el marco interno



Finalmente se realizó el montaje del módulo con la placa absorbadora y el marco interno de madera previamente aislado con lana de vidrio (figura 96).

Figura 96. Montaje módulo fotovoltaico, placa absorbadora y marco interno de madera



Conociendo la envergadura del captador se dispone a diseñar el marco externo de aluminio cuya función principal es la de protección del captador del entorno.

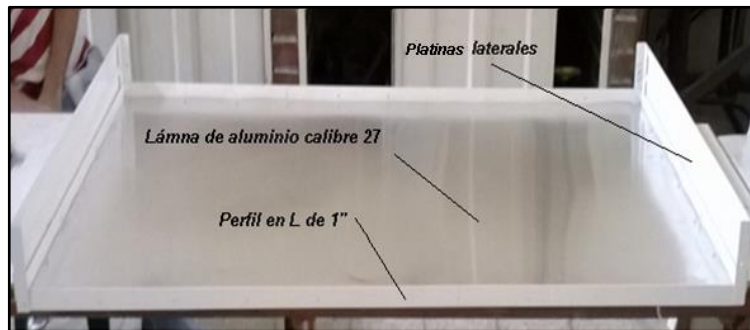
9.1.6 Construcción del marco externo de aluminio

Teniendo en cuenta que la madera y el módulo fotovoltaico son elementos que son pesados, no es recomendable añadir más peso al captador, por lo cual una opción de carcasa hecha en acero galvanizado fue inmediatamente descartada, se diseñó un arreglo estructural con perfil y lámina de aluminio que proporcionará la resistencia suficiente sin tener una ganancia considerable de peso. El perfil de aluminio elegido por estética, resistencia y poco peso fue un perfil en L de 1 pulgada, y platinas de aluminio de color blanco que cubran los laterales del captador, ambos calibre 18 (figura 97). La cubierta posterior se fabricó con lámina de aluminio sin pintar de calibre 27 (0,4 [mm]) de espesor, la cual sólo se ocupa de garantizar una separación del captador con el exterior, mas no de sostenimiento (figura 97).

Figura 97. Elementos componentes del marco externo



Figura 98. Marco externo de aluminio y sus partes



La unión entre las partes del marco externo se realizó con tornillos y remaches. Para un adecuado sellamiento de la estructura y el exterior, con el fin de garantizar que no existan infiltraciones o humedad que puedan afectar el captador, se le adicionó un sellamiento con silicona anti hongo. El marco externo se armó y se selló, como se muestra en la figura 99.

Figura 99. Marco externo de aluminio del captador solar



Teniendo el marco externo listo, se monta en el captador. El paso final es el montaje de la parte superior del marco externo que será un vidrio templado de 5 líneas o 5 [mm] de espesor, el cual será desmontable para un eventual mantenimiento (figura 100).

Figura 100. Captador del colector solar híbrido



9.2 CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

El tanque de almacenamiento se compone de tres partes:

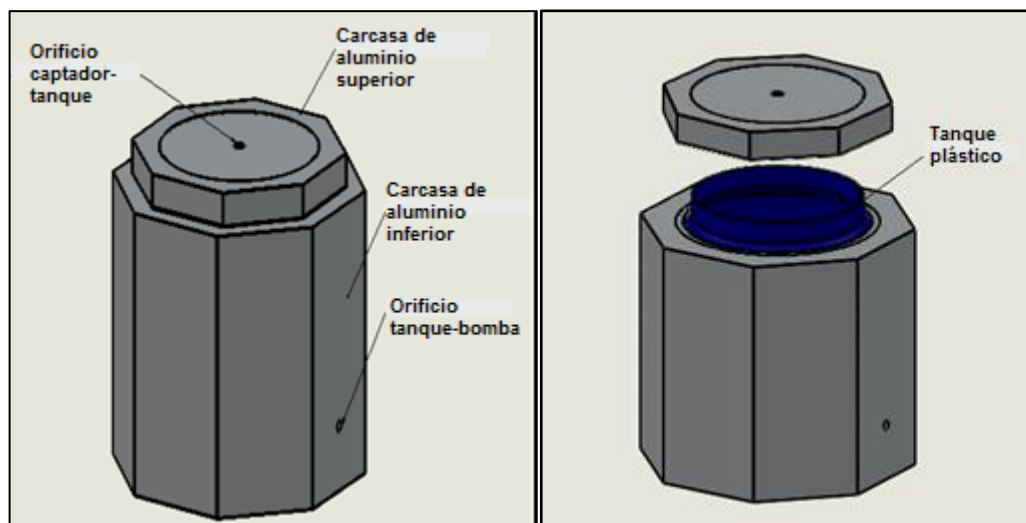
El tanque plástico de polietileno con capacidad de 60 litros, el cual se compró totalmente nuevo de tal manera, que tenga las condiciones mínimas para la salubridad del agua.

El aislamiento en espuma de poliuretano, que permite conservar a buena temperatura el agua en el tanque cuya energía obtenida es proveniente del captador solar.

La carcasa de aluminio que protege el aislamiento en espuma de poliuretano y da un acabado de mejor presentación al tanque, además de ser ligero y un material que permite ser trabajado con mayor facilidad.

En la parte superior posee una tapa, la cual permite sellado, conservación de la energía obtenida en el captador solar y que la pérdida de calor hacia el ambiente sea la mínima posible.

Figura 101. Tanque de almacenamiento completo en Solidworks



9.2.1 Tanque plástico de polietileno

Se dispuso de un tanque plástico, con una capacidad mayor a la propuesta inicialmente, que se llena parcialmente con un volumen de 50 [L]. En la figura 102 se puede observar la forma original con la que se adquirió el tanque plástico.

Figura 102. Tanque plástico de polietileno



Se realizaron cinco modificaciones importantes al tanque plástico:

- Orificio de salida tanque-bomba de 1 ¼" a aproximadamente 8 cm del fondo del tanque, que permite la columna de agua suficiente para ayudar a la succión de la bomba hacia el captador solar. Debido a que se debe fijar bien la manguera se utilizó Sintesolda, que se aplicó entre el área superficial cercana entre manguera y tanque, hasta asegurar una unión adecuada tanto por el exterior y el interior del tanque. Se realizó una prueba, llenando el tanque de agua y que presente vaciado a través de la manguera, no se observaron fugas de agua ni desprendimiento (figura 103).

Figura 103. Unión Tanque-Manguera



- Remoción de las pestañas de la tapa, permite una facilidad en la construcción ya que limita la distancia hasta donde debe llegar la carcasa inferior, que debe ajustarse con la carcasa superior en la que va inmersa la tapa del tanque, para evitar pérdidas de calor en esta unión. (figura 104).

Figura 104. Tapa del tanque plástico



- Orificio de entrada captador-tanque, que permite la recepción del agua caliente desde el captador que se mezcla con el volumen de agua disponible y se realizó en la parte superior central de la tapa.
- Se realizaron 8 agujeros en la periferia de la tapa del tanque plástico, para unir ésta a la carcasa de aluminio superior por medio de remaches.
- Remoción de las agarraderas del tanque, para evitar interferencias al momento de la aplicación de la capa de aislamiento con espuma de poliuretano.

9.2.2 Carcasa de aluminio

Se seleccionó una lámina de aluminio calibre 22 de 0,4 [mm] de espesor de un metro de ancha, ya que es un material que no presenta óxido y es muy ligero. De acuerdo al cálculo del radio de aislamiento, se obtuvo que el diámetro externo con el aislamiento incluido es de 60 [cm] y una altura desde el fondo del tanque al límite con la tapa, de 62 [cm]. Con estas medidas se procede a realizar el desarrollo en la lámina, el cual consiste en tres partes:

- Fondo de la carcasa inferior (figura 105).
- Prisma octogonal de la carcasa inferior del tanque (figura 106).
- Carcasa superior (figura 107).

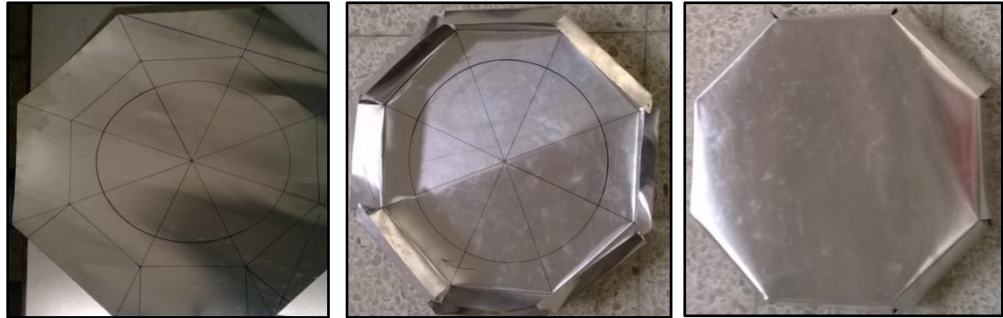
Figura 105. Fondo de la carcasa inferior



Figura 106. Proceso de elaboración de la cara inferior y prisma octogonal de la carcasa inferior del tanque.



Figura 107. Carcasa superior

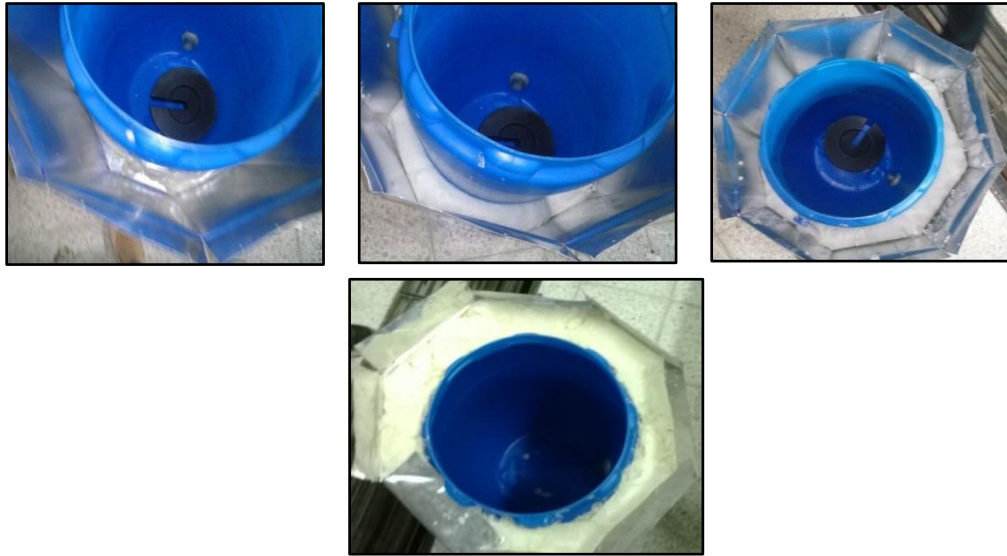


9.2.3 Aislamiento en espuma de poliuretano

Con el tanque, la carcasa de aluminio y las especificaciones mencionadas, se procede a la acomodación del tanque dentro de la carcasa. Previamente debe indicarse en qué cara de la carcasa inferior se ubica la manguera de succión de la bomba, y allí abrir un orificio con la medida del diámetro externo de la manguera. Se debe verificar que el tanque plástico este centrado respecto a la carcasa externa.

La espuma de poliuretano se consigue mediante una reacción exotérmica de un reactivo A (poliol), y un reactivo B (isocianato), que deben verterse en cantidades iguales en un recipiente y mezclarse por un lapso de tiempo máximo de 10 segundos. Cuando la espuma llega al punto chicle, se empieza a endurecer rápidamente y ahí deja de expandirse. Se utilizaron 2 kilogramos de cada uno de los reactivos. En la figura 108 se observa la aplicación de la espuma de poliuretano en el espacio de aislamiento (entre tanque y carcasa de aluminio). Entre la carcasa superior y la tapa también se aplicó capa de aislamiento en espuma de poliuretano dentro del espacio entre la carcasa de aluminio y la tapa plástica.

Figura 108. Proceso de aplicación de la espuma de poliuretano



Para los detalles finales del tanque, en los dobleces se colocó cinta adhesiva súper resistente de color gris, que permitió darle mejor presentación, además de garantizar las uniones, y ocultar los remaches e imperfecciones que haya sufrido el material, en el armado de la carcasa (figura 109).

Figura 109. Tanque de almacenamiento de agua construido



9.3 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DE SOSTENIMIENTO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

La estructura de sostenimiento del colector solar híbrido fue realizada con perfiles de tubo cuadrado de acero laminado en caliente y perfil en ángulo de acero laminado en frío.

Las especificaciones más importantes que se tuvieron en cuenta al construir la estructura fueron:

- La resistencia necesaria para soportar los componentes más pesados como: el captador que pesa aproximadamente 70 [Kg], el tanque de almacenamiento que al estar lleno de agua llega a pesar 60 [Kg] y la batería con 35 [Kg].
- Brindar el espacio necesario para ubicar los demás dispositivos propios de una instalación fotovoltaica autónoma.
- Inclinación variable con rango de 0 a 40 [°] con incrementos de 10 [°]
- Facilidad en el desplazamiento.

Para cumplir con las especificaciones anteriores, especialmente la de resistencia, se utilizaron tubos cuadrados de 1 ½" para la estructura, con espesores de calibre 16 para los marcos de soporte principal, y calibre 18 para los travesaños de refuerzo, el perfil en ángulo se escogió de 1 ¼" con 1/8" de espesor.

La estructura se construyó en el taller de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander.

Se cortaron, ensamblaron y soldaron las partes dando como resultado una estructura resistente, funcional y estética. Para el sistema de inclinación variable se utilizó un eje de 1 pulgada de diámetro y 1,7 [m] de longitud de acero 4140, soportado por 2 chumaceras. Y finalmente para la estructura que sostiene el captador fabricada en perfil en ángulo, se le añadió un marco cuadrado de refuerzo con dos travesaños, los cuales son de tubo cuadrado de 1 pulgada calibre 18. También se le añadieron 4 ruedas para facilitar el movimiento de la

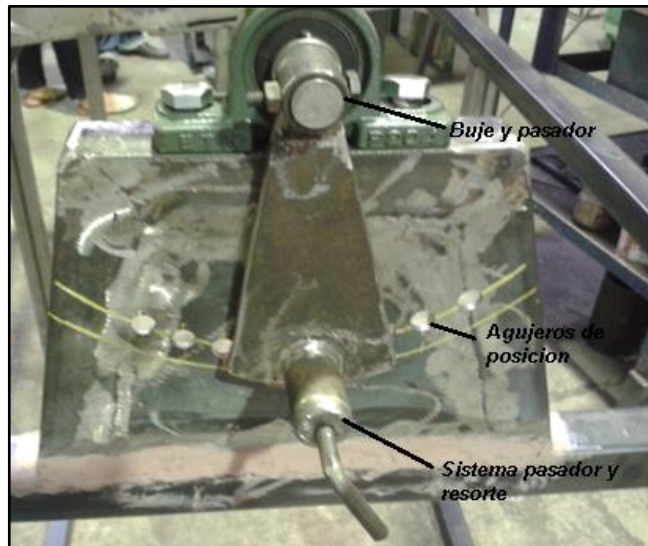
misma, cada rueda soporta 125 [Kg] (dato de fábrica) y por consiguiente su selección fue adecuada para la aplicación (figura 110).

Figura 110. Estructura de sostenimiento sin pintar



Posteriormente se realizó el sistema de posicionamiento (figura 111) para obtener un inclinación variable para el captador solar. Se realizó con platina perforada cada 10 grados, una platina con un sistema de pasador y resorte que permite un fácil posicionamiento y un buje que se fija al eje por medio de un prisionero que actúa como pasador.

Figura 111. Sistema de posicionamiento



Finalmente se procedió a pintar la estructura con anticorrosivo y esmalte blanco respectivamente. Después de pintada se le añadió un piso de lámina corrugada de aluminio a las partes donde va situado el tanque y los dispositivos del sistema fotovoltaico y a la parte donde va la batería, una base de madera, como es recomendado para evitar la descarga de esta al estar en contacto con una base no conductora como lo es la madera (figura 112).

Figura 112. Estructura de sostenimiento pintada y bases de los elementos del colector.



9.4 MONTAJE GENERAL DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

9.4.1 Montaje del captador solar a la estructura

La estructura del captador se diseñó con una tolerancia de 2 [mm] en el ancho y en el largo, para que al colocar el captador sobre la misma, quede lo más justo posible, pero con el sistema de posicionamiento puede haber riesgo de volcamiento. Debido a eso se colocaron refuerzos en ángulo en acero, a cada una de las esquinas del captador y la sujeción se realizó a través de tornillos de 1/8 [in] de diámetro y 3/4 [in] de largo. Las dimensiones se pueden observar en el anexo F, en el plano 21

Figura 113. Pieza de fijación del captador-estructura



Figura 114. Pieza de fijación del captador-estructura instalado



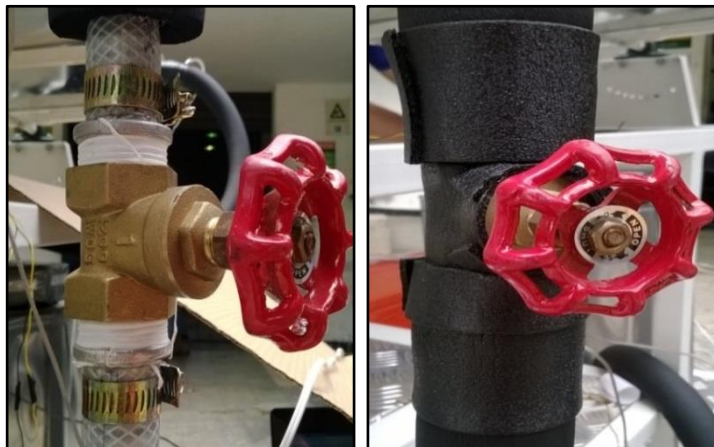
9.4.2 Montaje del sistema hidráulico

➤ Componentes del sistema hidráulico

- 20 [cm] de manguera de PVC reforzada con lona de diámetro externo de 1 ½" y ¼" de espesor.
- 2.6 [m] de manguera de PVC reforzada con lona de diámetro externo 1" y ¼" de espesor
- 2.8 [m] de espuma elastómerica para aislamiento térmico tubular de 7/8" de diámetro interno y ½" de espesor (para las mangueras).
- Válvula reguladora de caudal de una 1" de diámetro.
- Abrazaderas metálicas (rango de apriete hasta ½").
- Bomba de circulación de agua, para un caudal máximo de $22 \left[\frac{L}{min} \right]$.

➤ **Instalación de válvula reguladora de caudal (cortina):** Su instalación se realiza en el tramo de manguera que conecta la descarga de la bomba con la entrada del captador solar (figura 115). Siendo la rosca de la válvula de 1" de diámetro, se requieren dos acoples de acero, en forma cónica, que previamente deben ser forrados en teflón y respectiva abrazadera metálica a lado y lado con adecuado apriete, deben entrar forzados a los tramos de mangueras.

Figura 115. Válvula reguladora de caudal (cortina)



- **Aislamiento térmico de tramos de manguera:** con la espuma elastomérica se permite que el agua en circulación no pierda el calor ganado en el captador solar. Siendo una espuma flexible, la manguera se inserta dentro de ella hasta que quede totalmente cubierta por ella. El tramo tanque- bomba (succión), el tramo bomba-captador (descarga), y el tramo captador tanque, están cubiertos por esta espuma aislante, asimismo se cubrió la válvula reguladora de caudal, por ser metálica puede presentar algunas pérdidas de calor que se quieren evitar (figura 116).

Figura 116. Aislamiento de la manguera



- **Montaje de la bomba de circulación:** Antes de instalar la bomba de circulación, se comprueba que sin carga alcance el caudal máximo nominal, que está escrito en su ficha técnica que es de $22 \left[\frac{L}{min} \right]$, para esto se conectan las mangueras de succión y descarga, con un recipiente aforado y un cronómetro, la bomba de circulación entregó $22 \left[\frac{L}{min} \right]$. Los orificios de succión y descarga se forran en cinta de teflón, para que al conectar las mangueras y dar apriete a las abrazaderas, evitar las fugas. La bomba de circulación con todo ya conectado, se enciende verificando que el caudal

esté realizando el recorrido correctamente, que no haya ninguna fuga de agua en el sistema, además de garantizar la columna de agua en el tanque de almacenamiento para que la bomba no presente cavitación (figura 117).

Figura 117. Bomba de circulación de agua instalada



9.4.3 Montaje del sistema fotovoltaico

El sistema fotovoltaico está conformado por el módulo fotovoltaico, el regulador, el inversor, y la batería.

Para realizar el cableado primero se ubican en las posiciones respectivas para cada elemento dentro de la estructura de sostenimiento general. La batería está colocada en un marco especial (figura 118) y allí tiene un piso de madera, teniéndola aislada de contacto con alguna parte metálica de la estructura. El regulador y el inversor también son colocados en una base de madera, pero no está apoyada a la estructura (figura 119).

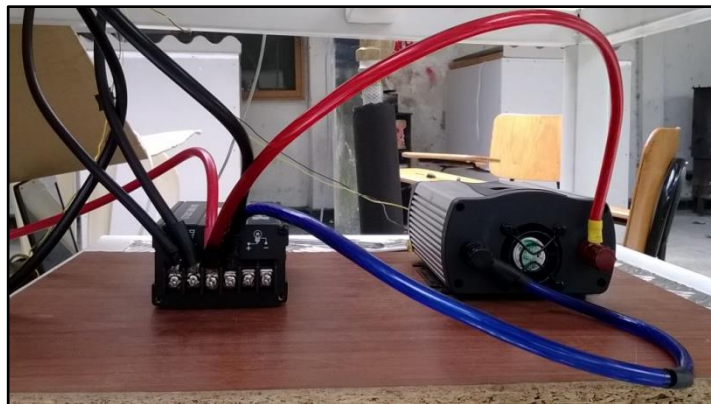
En la figura 120, se presenta el esquema de conexiones, que se describe así: los cables terminales del módulo fotovoltaico se conectan al regulador, según la señalización de los terminales, los cables que son para conectar el regulador y la batería, se conectan primero al regulador, para evitar algún corto circuito y luego si a la batería. El regulador no presenta terminales para la conexión al inversor,

debido a eso, la batería y el inversor deben conectarse en paralelo, para obtener el voltaje necesario para la carga del sistema, en este caso la bomba de circulación.

Figura 118. Batería en la estructura



Figura 119. Regulador e inversor en la estructura



La conexión inversor-carga se hace a través de la toma corriente que tiene el inversor, y el flujo de corriente hacia la carga, se abre o se cierra por medio de un interruptor integrado al inversor. El ventilador de corriente directa, que acompaña a la bomba debe ser conectado en paralelo con la batería y el inversor al regulador, debido a que las terminales de corriente directa del regulador solo funcionan si el panel no está recibiendo luz o radiación solar.

Figura 120. Esquema de conexiones del sistema fotovoltaico

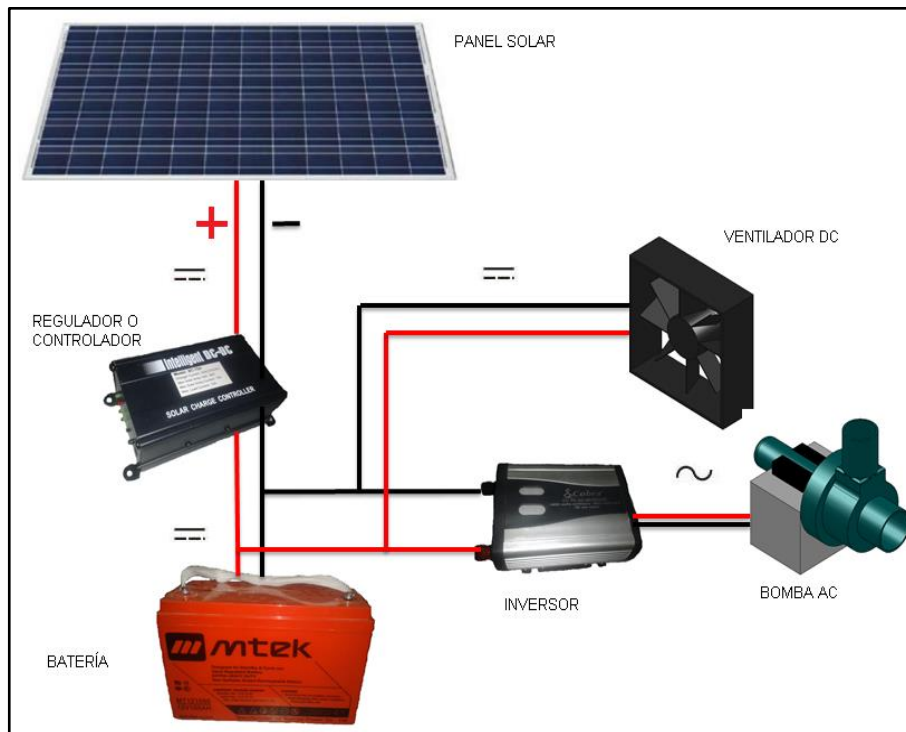


Figura 121. Montaje general del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)



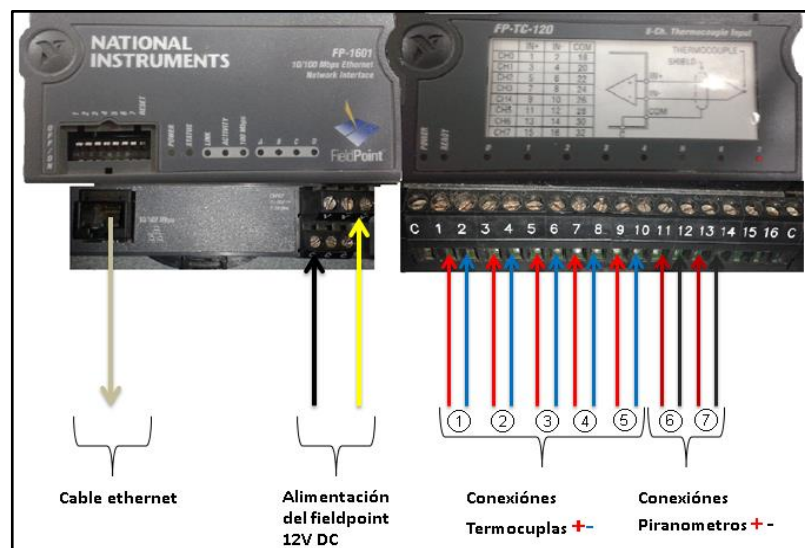
10. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS COLECTOR SOLAR HÍBRIDO

10.1 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos consta de un módulo (field-point) National Instruments con su respectivo módulo de termocuplas TC-120 con 8 entradas digitales, que se conecta al computador por medio de un cable ethernet y se alimenta mediante una fuente que genera el voltaje necesario para el funcionamiento del sistema.

En la figura 122 se muestra el esquema de conexión del módulo de adquisición de datos y el módulo de termocuplas.

Figura 122. Esquema de conexión field-point.



Las termocuplas utilizadas son del tipo J, se utilizaron 5 en total las cuales se encargan de medir:

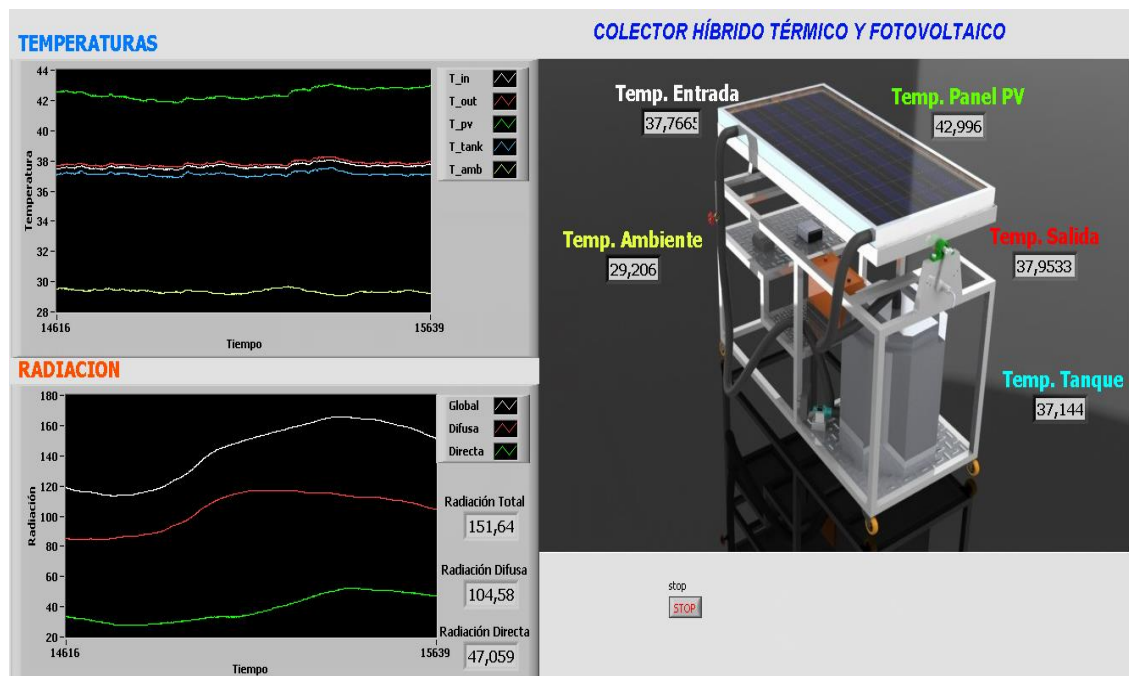
1. La temperatura de entrada al colector.
2. La temperatura a la salida del colector.
3. La temperatura de la superficie del panel fotovoltaico.

4. La temperatura al interior del tanque de almacenamiento de agua.
5. La temperatura ambiente.

Los últimos dos puertos; 6 y 7, reciben la señal enviada por los piranómetros de radiación global y difusa, respectivamente y se configuraron los dos últimos puertos para recibir señales de voltaje que por medio de unas constantes propias del piranómetro permiten convertir voltios a $[\frac{W}{m^2}]$.

Las señales tanto de temperatura como de voltaje se envían al computador por medio del cable Ethernet donde gracias a un programa realizado con el software de National Instruments llamado LabView se pueden mostrar en una interfaz y guardar para su posterior análisis (figura 123). El programa creado en LabView para leer las señales enviadas por los sensores de radiación y temperatura se encuentra en la figura 124.

Figura 123. Interfaz gráfica en LabView para adquisición de datos.



En la tabla 11 se explica la funcionalidad de cada uno de los bloques utilizados en la programación gráfica.

Figura 124. Programación gráfica en LabView para la adquisición de datos.

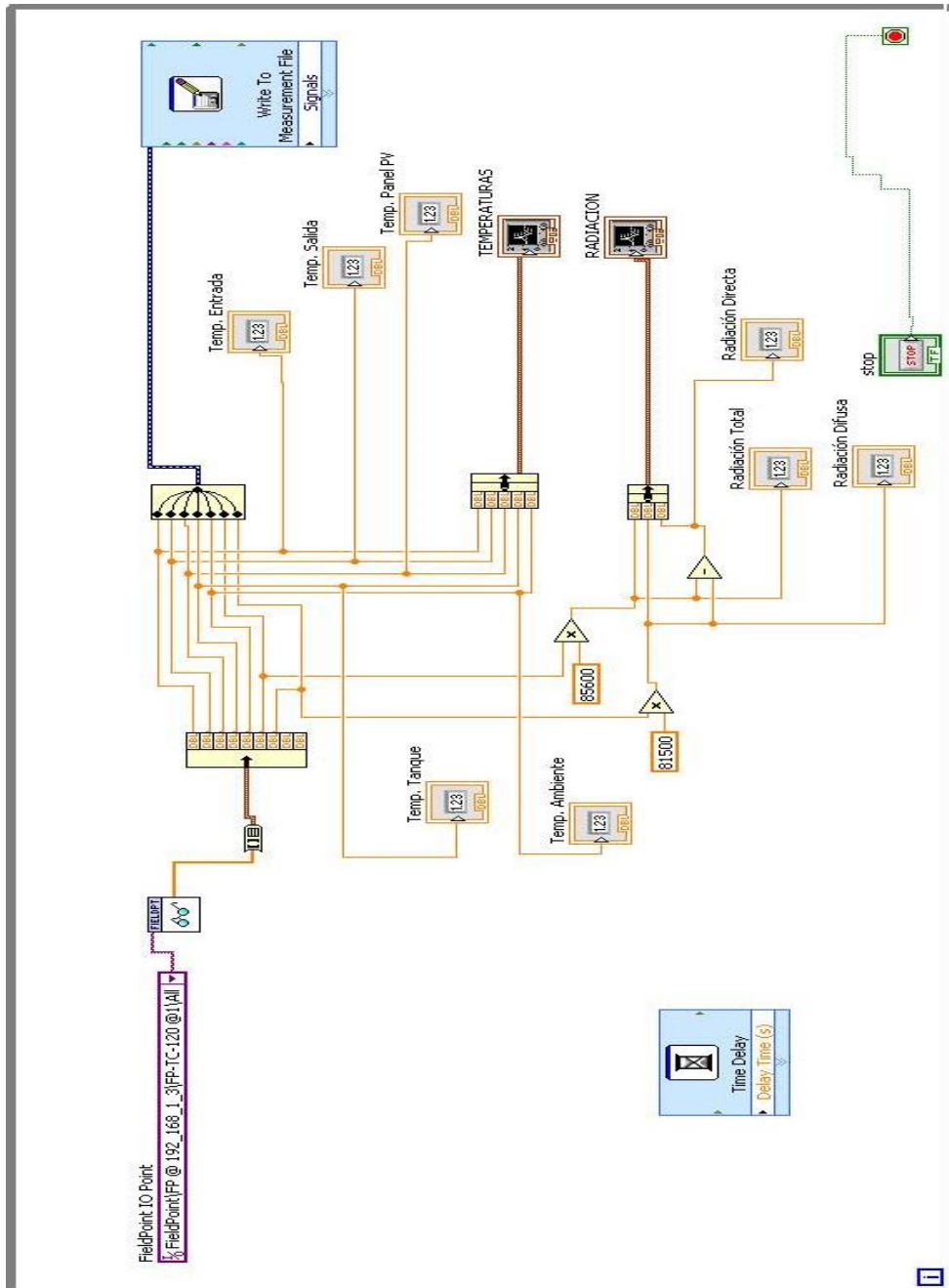
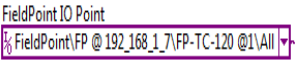


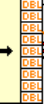

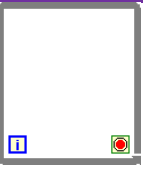
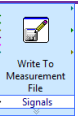





Tabla 11. Descripción de bloques LabView

ELEMENTO	FUNCIÓN	SIMBOLO
Conexión de Field Point (Entrada –Modulo de Termocuplas, Salida- Modulos AO y DO)	Extraer los datos del módulo de entrada del field point a la interfaz de programación gráfica de labview.	
Lector de datos FIELD POINT	Posee una conexión de entrada y otra de salida, que obtiene los valores medidos.	
Array to cluster	Los datos entran como una matriz entonces este elemento permite agruparlos según el canal de entrada.	
Unbundle	Divide los datos ingresados en el clúster, en elementos individuales	
Indicador numérico	Permite observar el valor que se está midiendo en la interfaz gráfica.	
Ciclo While	El Ciclo While ejecuta el código que contiene hasta la terminal condicional, una terminal de entrada, recibe un valor Booleano específico. a cantidad de iteraciones para el Ciclo While siempre comienza en cero	
Almacenador de datos	Permite escribir los datos que se toman del proceso de medición y guardarlos en un documento de texto.	
Gráfica (Waveform chart)	Permite mostrar cómo se comportan los datos a través del tiempo.	
Time delay	Es un intervalo de tiempo donde se extraen los datos del field point	
Sumador, Diferenciador o Ganancia	Es utilizado para introducir operaciones matemáticas a las variables a controlar	

La señal eléctrica enviada por los piranómetros se multiplica por dos constantes, siendo $85600 \left[\frac{W}{m^2 * mV} \right]$ la constante del piranómetro que mide la radiación global y

$81500 \left[\frac{W}{m^2 * mV} \right]$ la constante del piranómetro que mide la radiación difusa, lo que permite obtener datos de radiación en $\frac{W}{m^2}$.

10.2 DESCRIPCION DEL MONTAJE PARA LAS PRUEBAS

Las pruebas se realizaron en el interior de las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, en un sitio donde el sol tiene cobertura la mayor parte del tiempo en el día.

Previamente se conectaron los dispositivos del sistema de adquisición de datos, se conectaron las cinco termocuplas y los dos piranómetros y se conectó la bomba al sistema fotovoltaico.

Figura 125. Prueba del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)



También se verificó la estanqueidad del sistema hidráulico de circulación de agua del colector y el volumen de agua contenido en el tanque de almacenamiento que debe ser de 50 litros (figura 125).

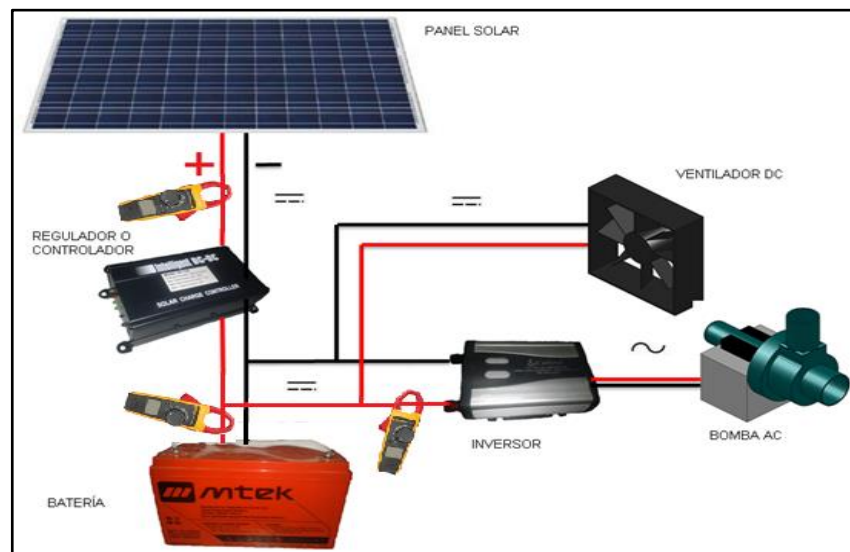
Para tener datos de potencia generada por el sistema fotovoltaico se utilizó un multímetro marca Fluke (figura 126) el cual permitió tomar voltaje del panel, voltaje de la batería, corriente del panel, corriente de la batería, y corriente que llega al inversor donde se conecta la carga que es la bomba, el ventilador recibe una corriente de 0,17 A y por consiguiente se hizo énfasis en la corriente que llegaba al inversor donde estaba conectada la bomba de circulación de agua (figura 127).

Figura 126. Multímetro de pinzas Fluke.



Fuente: http://assets.fluke.com/images/products/clampmeters/373_07a_328px_x_220px.

Figura 127. Esquema de medición eléctrica del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)



Para realizar las pruebas se procedió a tomar medidas de temperatura y radiación en un horario donde la disponibilidad solar en el sitio escogido estuviera siendo favorable para ese momento. Además la válvula reguladora de caudal estuvo totalmente abierta durante las pruebas, y por la carga del sistema hidráulico, la bomba de circulación entregó en operación $10 \left[\frac{L}{min} \right]$. El intervalo de tiempo entre los datos medidos y tabulados es de 10 minutos, para capturar un mayor número de puntos que darán mejor resolución a las gráficas a analizar. La temperatura inicial del agua en el tanque para el día 6 de agosto, es de 28,33 [°C], ya que se utilizó el agua del día 5 de agosto y al final de la operación de ese día se dejó el tanque sin tapa para que enfriara y así no desperdiciar agua.

Las condiciones de operación a las que se realizaron las pruebas para el captador solar se especifican en la tabla 12.

Tabla 12. Condiciones de operación del captador solar

	5/08	6/08	15/08
Inicio de la prueba	9:00 a.m	9:00 a.m	10:30 a.m
Inclinación del captador solar	0°	20°	10°
Temperatura inicial del agua (tanque)	24,35 [°C]	28,33 [°C]	23,75 [°C]
Velocidad del viento	1 [m/s]		
Caudal de operación	$10 \left[\frac{L}{min} \right]$		
Volumen de agua almacenada	50 [L]		
Intervalo entre datos	10 minutos (600 datos).		

Las condiciones de operación para el análisis del sistema fotovoltaico se muestran en la tabla 13.

Tabla 13. Condiciones de operación del sistema fotovoltaico

	5/08	6/08	15/08
Potencia nominal máxima (alterna)	35 [W]		
Potencia nominal máxima (directa)	1.57 [W]		
Eficiencia nominal módulo fotovoltaico	14.5 %		
Eficiencia nominal inversor	88%		

10.3 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS REALIZADAS AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

En las tablas 14 y 15 se enuncian las variables a analizar como resultado de las pruebas realizadas al colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) de acuerdo con los datos medidos, por el sistema de adquisición de datos Field Point –National Instruments. Los datos obtenidos durante la medición se encuentran en el anexo D.

Tabla 14. Variables a analizar en el colector solar híbrido (térmico)

Variable	Unidades
Irradiación (Energía Solar incidente)	KJ
Energía útil (Captador Solar)	KJ
Eficiencia térmica (Captador Solar)	%
Energía total acumulada (Tanque)	KJ
Temperatura reducida	(°C*m/W)

Tabla 15. Variables a analizar en el colector solar híbrido (fotovoltaico)

Variable	Unidades
Energía entregada (módulo fotovoltaico)	W-h
Energía consumida (carga alterna)	W-h
Energía consumida (carga directa)	W-h
Energía de carga y descarga batería	W-h

Se presenta en las tablas 16, 17, y 18, los resultados de las pruebas realizadas los días 5, 6 y 15 de agosto, que corresponden a las mediciones de temperatura y radiación. En las tablas 19, 20 y 21 se encuentran los resultados que corresponden a las mediciones de voltaje y corriente del sistema fotovoltaico.

Para el cálculo de las variables a analizar presentadas en la tabla 14 se utilizan las siguientes expresiones:

$$\text{Energía solar incidente} = qs\beta * A_c * \frac{600 [\text{seg}]}{1000} [\text{KJ}] \quad (47)$$

$$\text{Energía útil} = Q_u * \frac{600 [\text{seg}]}{1000} [\text{KJ}] \quad (48)$$

M_{agua} = Masa de agua en el tanque de almacenamiento [Kg]

ΔT_{tanq} = Delta de temperatura en el tanque en cada intervalo de tiempo [°C]

$$\text{Energía total acumulada} = \frac{M_{\text{agua}} * C_{pflu} * (\Delta T_{\text{tanq}})}{1000} [\text{KJ}] \quad (49)$$

$$\text{Temperatura reducida} = \frac{(T_{in} - T_a)}{qs\beta} \left[\frac{^{\circ}\text{C} * m^2}{W} \right] \quad (50)$$

El número de datos registrados con cada tabla corresponde hasta la hora que se realizó la medición, lo cual indica, que la radiación dentro de ese intervalo de tiempo fue la mayor posible, luego la nubosidad fue permanente, y si se continuaba la operación, el valor de la energía útil decrece notablemente, asimismo la eficiencia térmica. Los datos de energía solar incidente, energía útil y energía total acumulada son tomados para los intervalos determinados. La temperatura reducida que corresponde a la diferencia entre la temperatura de entrada del fluido al captador solar y la temperatura ambiente, se observa negativa por que la temperatura ambiente es mayor que la temperatura de entrada del fluido proveniente del tanque en los primeros intervalos de tiempo de operación, aumentando de acuerdo al calentamiento del agua en el colector solar híbrido

Tabla 16. Resultados de prueba realizada el 5 de agosto (captador solar)

Hora	Irradiación (Energía Solar incidente) (KJ)	Energía útil (Captador Solar) (KJ)	Eficiencia térmica (Captador Solar) (%)	Energía total acumulada (Tanque) (KJ)	Temperatura reducida (°C*m ² /W)
9:00-9:10	157,66	102,53	64,53	78,14	-0,0079
9:10-9:20	359,85	233,43	64,36	208,39	-0,0063
9:20-9:30	401,81	261,47	64,57	377,70	-0,0060
9:30-9:40	394,15	254,98	64,19	586,09	-0,0053
9:40-9:50	399,73	247,84	61,52	761,91	-0,0023
9:50-10:00	401,46	245,89	60,77	989,83	-0,0013
10:00-10:10	411,43	245,09	59,11	1107,05	0,0005
10:10-10:20	426,72	260,98	60,68	1334,97	-0,0011
10:20-10:30	430,28	256,03	59,04	1484,75	0,0008
10:30-10:40	456,22	272,48	59,26	1751,74	0,0006
10:40-10:50	449,48	258,07	56,97	1934,08	0,0032
10:50-11:00	422,79	239,21	56,14	2181,54	0,0041
11:00-11:10	395,40	218,30	54,78	2363,88	0,0056
11:10-11:20	261,72	131,58	49,88	2526,68	0,0109
11:20-11:30	286,04	137,67	47,75	2722,04	0,0129
11:30-11:40	432,62	221,36	50,77	2774,14	0,0095
11:40-11:50	379,89	199,58	52,13	3008,57	0,0084
11:50-12:00	309,50	148,54	47,62	3177,89	0,0132
12:00-12:10	303,26	138,76	45,40	3321,15	0,0156
12:10-12:20	470,71	239,49	50,48	3451,39	0,0100
12:20-12:30	340,62	159,52	46,47	3601,17	0,0146
12:30-12:40	413,50	197,45	47,38	3718,39	0,0135
12:40-12:50	432,93	209,18	47,94	3900,73	0,0130
12:50-13:00	409,18	189,35	45,91	4128,65	0,0153
13:00-13:10	311,35	116,58	37,15	4200,28	0,0248
13:10-13:20	455,67	210,49	45,83	4337,03	0,0153
13:20-13:30	269,00	93,19	34,38	4473,79	0,0279
13:30-13:40	332,50	118,61	35,39	4506,35	0,0266
13:40-13:50	324,40	116,25	35,56	4545,42	0,0265
13:50-14:00	398,19	169,41	42,21	4844,97	0,0192
14:00-14:10	272,49	74,75	27,22	4838,46	0,0357
14:10-14:20	253,09	66,55	26,09	4838,46	0,0369
14:20-14:30	223,76	50,46	22,37	4968,70	0,0409
14:40-14:50	208,38	31,47	14,99	4936,14	0,0459
14:50-15:00	253,48	64,43	25,22	4937,08	0,0372

Tabla 17. Resultados de prueba realizada el 6 de agosto (captador solar)

Hora	(Energía Solar Captada) (KJ)	Energía útil (Captador Solar) (KJ)	Eficiencia térmica (Captador Solar) (%)	Energía total acumulada (Tanque) (KJ)	Temperatura reducida (Captador solar) ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)
9:00-9:10	174,48	77,05	44,16	26,05	0,016127
9:10-9:20	279,35	141,65	50,71	65,12	0,009078
9:20-9:30	325,00	171,17	52,67	201,87	0,007268
9:30-9:40	227,41	114,02	50,14	332,11	0,010388
9:40-9:50	289,34	145,42	50,26	410,26	0,010085
9:50-10:00	373,84	200,48	53,63	566,55	0,006551
10:00-10:10	234,40	118,60	50,60	494,92	0,010152
10:10-10:20	180,69	80,16	44,36	599,11	0,016919
10:20-10:30	229,91	107,11	46,59	599,11	0,014203
10:30-10:40	246,45	116,91	47,44	774,94	0,01325
10:40-10:50	295,75	146,77	49,63	885,64	0,010865
10:50-11:00	296,80	149,84	50,49	996,35	0,010007
11:00-11:10	269,94	130,76	48,44	1289,39	0,012419
11:10-11:20	451,07	235,09	52,12	1413,12	0,008318
11:20-11:30	309,34	156,00	50,43	1621,50	0,010556
11:30-11:40	145,96	48,85	33,47	1836,40	0,029037
11:40-11:50	197,91	72,52	36,64	1797,33	0,025364
11:50-12:00	443,64	220,88	49,79	1934,08	0,010728
12:00-12:10	236,65	101,55	42,91	2272,71	0,01879
12:10-12:20	275,97	114,97	41,66	2357,37	0,020078
12:20-12:30	342,76	155,73	45,43	2487,61	0,015861
12:30-12:40	354,41	162,16	45,76	2624,36	0,015683
12:40-12:50	538,23	267,61	49,72	2943,45	0,011392
12:50-13:00	389,45	174,68	44,85	3112,77	0,016903
13:00-13:10	423,01	190,04	44,92	3282,08	0,016835
13:10-13:20	351,98	140,25	39,84	3360,22	0,022256
13:20-13:30	510,64	238,59	46,72	3549,07	0,014967
13:30-13:40	491,82	221,93	45,12	3692,34	0,016776
13:40-13:50	213,14	46,12	21,64	3894,21	0,04197
13:50-14:00	257,66	66,54	25,82	3835,60	0,037414
14:00-14:10	384,19	148,36	38,62	4017,94	0,02351

Tabla 18. Resultados de prueba realizada el 15 de agosto (captador solar)

Hora	(Energía Solar Captada) (KJ)	Energía útil (Captador Solar) (KJ)	Eficiencia térmica (Captador Solar) (%)	Energía total acumulada (Tanque) (KJ)	Temperatura reducida (Captador solar) ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)
10:30-10:40	426,59	303,13	71,06	397,24	-0,01227
10:40-10:50	484,06	335,08	69,22	657,72	-0,00973
10:50 -11:00	482,88	312,05	64,62	1061,47	-0,00464
11:00-11:10	380,25	238,48	62,72	1308,92	-0,00276
11:10-11:20	278,26	167,56	60,22	1387,07	-0,00063
11:20-11:30	255,42	154,33	60,42	1654,06	-0,00110
11:30-11:40	200,22	110,47	55,17	1816,86	0,00446
11:40-11:50	204,74	110,78	54,11	1966,64	0,00556
11:50-12:00	222,58	116,43	52,31	2044,79	0,00763
12:00-12:10	211,94	107,97	50,95	2135,96	0,00909
12:10-12:20	229,99	119,01	51,74	2253,17	0,00822
12:20-12:30	132,93	55,79	41,97	2324,80	0,01896
12:30-12:40	131,30	49,33	37,57	2429,00	0,02387
12:40-12:50	113,53	34,83	30,68	2500,63	0,03161
12:50-13:00	109,14	31,29	28,67	2520,17	0,03384
13:00-13:10	103,81	26,47	25,50	2546,22	0,03744
13:10-13:20	126,89	41,54	32,74	2624,36	0,02925
13:20-13:30	101,54	21,90	21,57	2656,92	0,04189
13:30-13:40	105,12	23,84	22,68	2682,97	0,04063
13:40-13:50	89,34	16,89	18,91	2663,43	0,04487
13:50-14:00	91,10	15,54	17,00	2722,04	0,04705

Tabla 19. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 5 de agosto

Hora	Energía entregada (PV) [W-h]	Energía consumida (CA) [W-h]	Energía consumida (CC) [W-h]	Energía de carga y descarga de la batería [W-h]	Consumo energético (CA) [W-h]	Consumo energético (CC) [W-h]
9:00-9:10	6,19	4,55	0,26	1,38	4,55	0,26
9:10-9:20	13,05	4,26	0,26	8,25	8,81	0,52
9:20-9:30	14,12	4,26	0,26	9,21	13,07	0,78
9:30-9:40	13,61	4,20	0,26	8,73	17,27	1,04
9:40-9:50	13,58	4,87	0,26	8,12	22,14	1,3
9:50-10:00	13,56	4,56	0,26	8,37	26,70	1,56
10:00-10:10	13,82	3,73	0,26	9,46	30,43	1,82
10:10-10:20	14,40	4,26	0,26	9,36	34,69	2,08
10:20-10:30	14,36	4,20	0,26	9,40	38,89	2,34
10:30-10:40	15,23	4,20	0,26	10,16	43,09	2,6
10:40-10:50	14,75	4,70	0,26	9,26	47,79	2,86
10:50-11:00	13,84	4,43	0,26	8,62	52,22	3,12
11:00-11:10	12,97	4,80	0,26	7,40	57,02	3,38
11:10-11:20	8,67	4,26	0,26	3,81	61,28	3,64
11:20-11:30	9,89	4,50	0,26	4,80	65,78	3,9
11:30-11:40	14,99	4,23	0,26	10,00	70,01	4,16
11:40-11:50	12,74	4,47	0,26	7,44	74,47	4,42
11:50-12:00	10,43	4,11	0,26	5,63	78,58	4,68
12:00-12:10	10,36	4,70	0,26	4,99	83,28	4,94
12:10-12:20	16,09	4,02	0,26	11,11	87,30	5,20
12:20-12:30	11,28	5,21	0,26	5,30	92,51	5,46
12:30-12:40	13,91	4,20	0,26	8,86	96,71	5,72
12:40-12:50	14,32	4,47	0,26	8,94	101,17	5,98
12:50-13:00	13,46	4,26	0,26	8,33	105,43	6,24
13:00-13:10	10,26	3,27	0,26	6,37	108,70	6,5
13:10-13:20	15,18	3,80	0,26	10,45	112,50	6,76
13:20-13:30	8,70	5,17	0,26	2,87	117,67	7,02
13:30-13:40	11,26	3,68	0,26	6,93	121,35	7,28
13:40-13:50	10,85	3,79	0,26	6,40	125,13	7,54
13:50-14:00	13,26	4,00	0,26	8,37	129,13	7,80
14:00-14:10	8,94	4,26	0,26	4,10	133,39	8,06
14:10-14:20	8,55	3,65	0,26	4,31	137,04	8,32
14:20-14:30	7,65	4,02	0,26	3,06	141,06	8,58
14:40-14:50	7,27	4,00	0,26	2,73	145,06	8,84
14:50-15:00	8,82	4,91	0,26	3,31	149,97	9,10

Tabla 20. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 6 de agosto

Hora	Energía entregada (módulo fotovoltaico) [W-h]	Energía consumida (carga alterna) [W-h]	Energía consumida (carga directa) [W-h]	Energía de carga y descarga de la batería [W-h]	Consumo energético (Carga alterna) [W-h]	Consumo energético (Carga directa) [W-h]
9:00-9:10	6,38	3,90	0,26	2,22	3,90	0,26
9:10-9:20	9,74	4,47	0,26	5,01	8,37	0,52
9:20-9:30	10,88	3,63	0,26	6,99	11,99	0,78
9:30-9:40	7,39	4,34	0,26	2,79	16,33	1,04
9:40-9:50	9,58	4,15	0,26	5,17	20,48	1,3
9:50-10:00	12,05	4,08	0,26	7,71	24,56	1,56
10:00-10:10	7,36	4,18	0,26	2,92	28,74	1,82
10:10-10:20	5,78	4,24	0,26	1,28	32,98	2,08
10:20-10:30	7,59	4,47	0,26	2,86	37,45	2,34
10:30-10:40	8,13	3,88	0,26	3,99	41,33	2,6
10:40-10:50	9,67	4,67	0,26	4,74	46,00	2,86
10:50-11:00	9,58	3,60	0,26	5,72	49,60	3,12
11:00-11:10	8,57	5,33	0,26	2,98	54,93	3,38
11:10-11:20	14,34	3,96	0,26	10,12	58,89	3,64
11:20-11:30	9,38	3,96	0,26	5,16	68,26	3,9
11:30-11:40	4,51	5,02	0,26	-0,77	72,77	4,16
11:40-11:50	6,39	5,48	0,26	0,64	78,26	4,42
11:50-12:00	14,37	4,40	0,26	9,71	82,66	4,68
12:00-12:10	7,14	4,66	0,26	2,22	87,31	4,94
12:10-12:20	8,45	3,74	0,26	4,45	91,05	5,2
12:20-12:30	10,61	4,50	0,26	5,86	95,55	5,46
12:30-12:40	10,68	3,63	0,26	6,79	99,17	5,72
12:40-12:50	16,17	4,05	0,26	11,86	103,22	5,98
12:50-13:00	11,27	3,96	0,26	7,05	107,18	6,24
13:00-13:10	12,23	4,95	0,26	7,02	112,13	6,5
13:10-13:20	10,34	4,50	0,26	5,58	116,63	6,76
13:20-13:30	14,58	4,21	0,26	10,11	120,85	7,02
13:30-13:40	13,82	3,13	0,26	10,44	123,97	7,28
13:40-13:50	6,39	4,63	0,26	1,49	128,61	7,54
13:50-14:00	7,82	4,73	0,26	2,83	133,34	7,80
14:00-14:10	11,41	4,95	0,26	6,20	138,29	8,06

Tabla 21. Resultados energía eléctrica colector solar híbrido 15 de agosto

Hora	Energía entregada (módulo fotovoltaico) [W-h]	Energía consumida (carga alterna) [W-h]	Energía consumida (carga directa) [W-h]	Energía de carga y descarga de la batería [W-h]	Consumo energético (Carga alterna) [W-h]	Consumo energético (Carga directa) [W-h]
10:30-10:40	12,55	4,20	0,26	8,09	4,20	0,26
10:40-10:50	13,64	4,18	0,26	9,20	8,38	0,52
10:50 -11:00	13,45	4,28	0,26	8,91	12,66	0,78
11:00-11:10	10,78	4,15	0,26	6,37	16,80	1,04
11:10-11:20	8,36	4,02	0,26	4,08	40,92	1,30
11:20-11:30	7,84	4,28	0,26	3,31	48,77	1,56
11:30-11:40	6,31	4,14	0,26	1,91	55,08	1,82
11:40-11:50	6,51	4,57	0,26	1,68	61,59	2,08
11:50-12:00	7,03	4,47	0,26	2,31	68,62	2,34
12:00-12:10	6,75	4,34	0,26	2,15	75,37	2,60
12:10-12:20	7,29	4,02	0,26	3,01	82,66	2,86
12:20-12:30	4,33	4,08	0,26	-0,01	86,99	3,12
12:30-12:40	4,32	4,18	0,26	-0,12	91,31	3,38
12:40-12:50	3,76	4,21	0,26	-0,71	95,07	3,64
12:50-13:00	3,65	4,40	0,26	-1,01	98,72	3,90
13:00-13:10	3,48	4,15	0,26	-0,93	102,19	4,16
13:10-13:20	4,23	4,37	0,26	-0,40	106,42	4,42
13:20-13:30	3,39	4,33	0,26	-1,20	109,81	4,68
13:30-13:40	3,51	4,33	0,26	-1,08	113,33	4,94
13:40-13:50	3,00	4,33	0,26	-1,59	116,33	5,20
13:50-14:00	3,10	4,55	0,26	-1,72	120,88	5,46

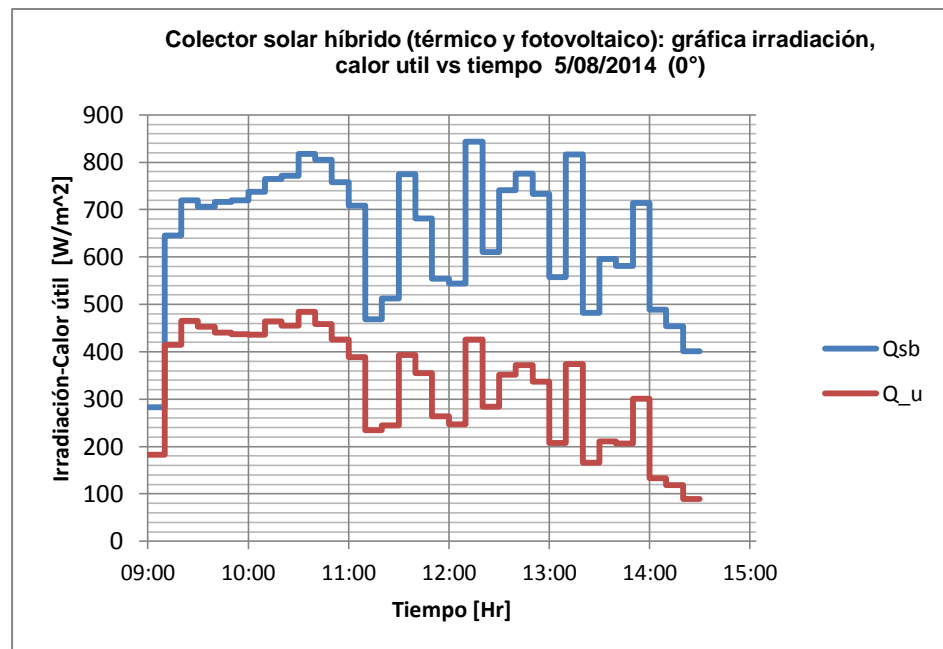
Los datos medidos de corriente y voltaje en el módulo fotovoltaico, batería e inversor se presentan en forma de energía, ya que por ser datos instantáneos, su fluctuaciones son significativas, dentro de un intervalo de tiempo de 10 minutos, con los datos medidos en las horas exactas y planteando un producto entre la potencia producida por cada uno de los implementos del sistema fotovoltaico y el

intervalo de tiempo entre cada medición, se obtienen valores aproximados de la energía producida por el módulo fotovoltaico, la energía de consumo por cada intervalo de la carga de corriente alterna, la energía de consumo por cada intervalo la energía de carga-descarga de la batería (el valor positivo corresponde a carga, y el valor negativo a descarga) y el consumo energético de cada una de las cargas, del cual se infiere, que el día de pruebas que se presentó más consumo fue el 5 de agosto, debido a que hubo un amplio margen de tiempo, con radiación significativa para el funcionamiento eficiente del colector solar híbrido.

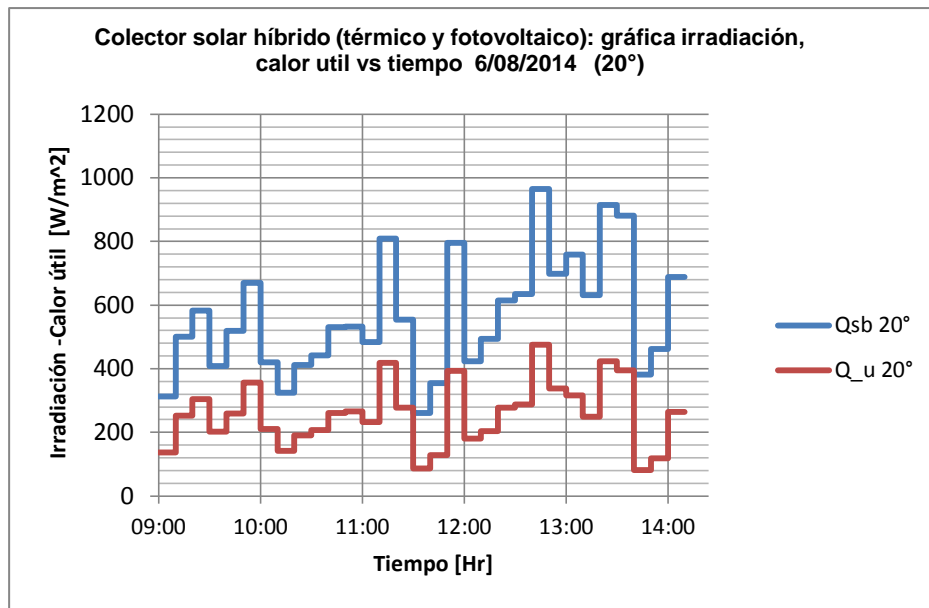
En la figura 128 se observan gráficas de la irradiación ($q_{s\beta}$) y el calor útil producido en el captador (q_u) en función del tiempo, para cada uno de los días de pruebas, se observa que ambas curvas tienen la misma forma porque a partir de la irradiación se obtiene el calor útil, el desfase entre las gráficas es una representación de la eficiencia térmica del captador solar.

Figura 128. Gráfica de calor captado ($q_{s\beta}$) y calor útil (q_u) vs. Tiempo, del colector solar híbrido

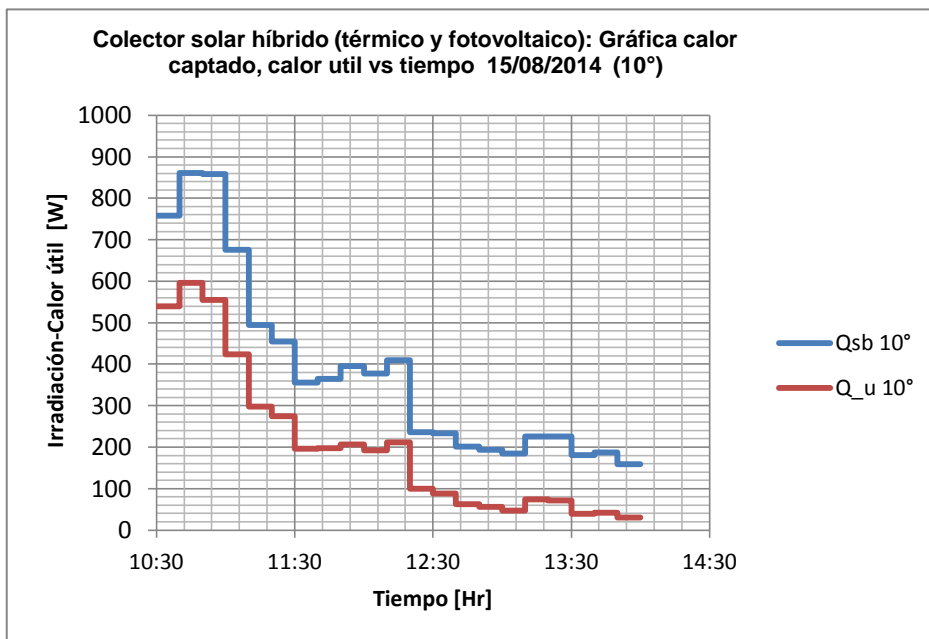
128a.



128b.



128c.

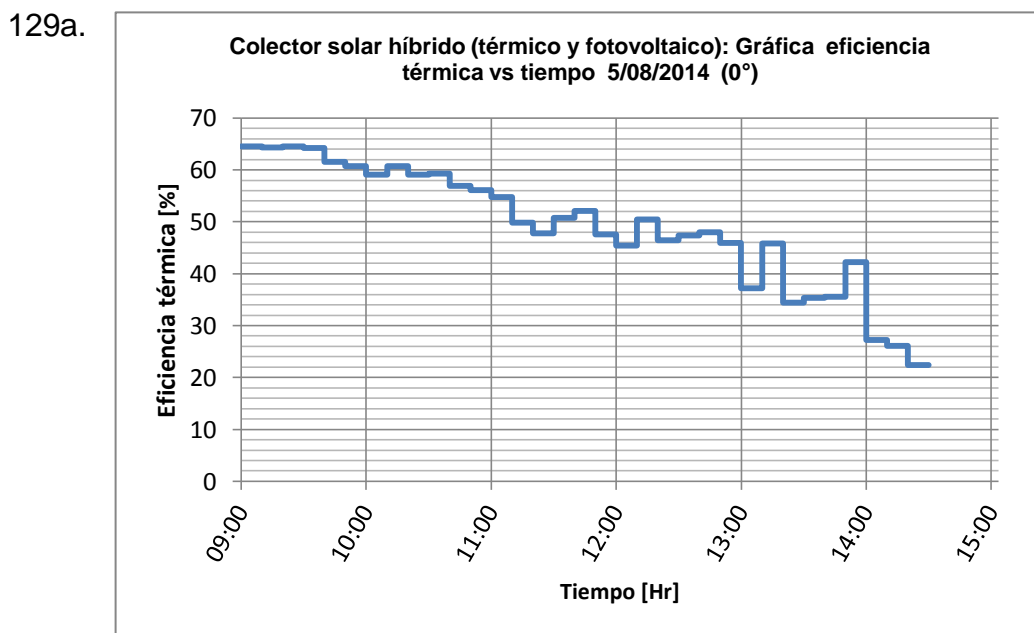


Las figuras 128a, y 128b, presentan un comportamiento similar, que corresponden a dos días donde se presentaron constantes interferencias a la luz solar por el paso de las nubes, cabe destacar que se midieron valores de irradiación y calor

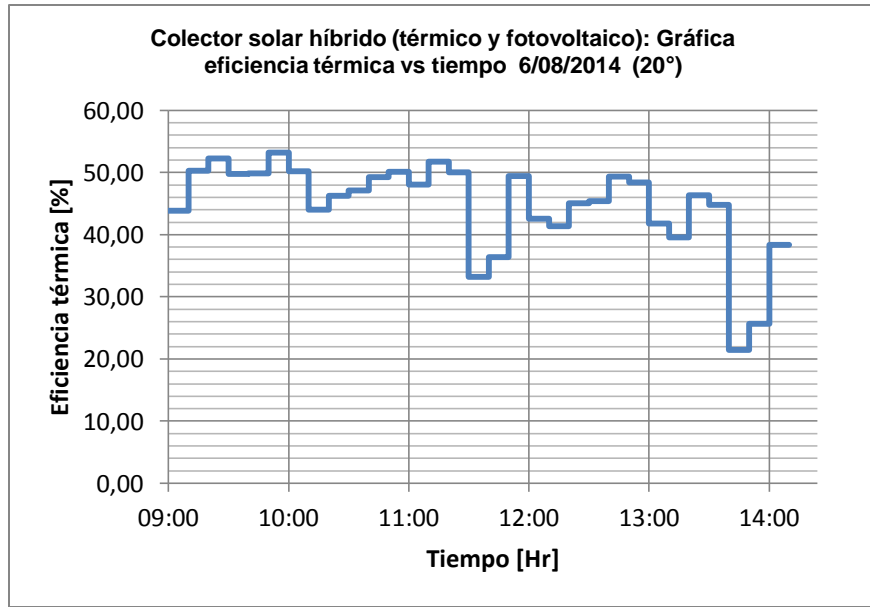
útil más altos, pero en la figura 128c, se observa que los valores de irradiación y calor útil son altos al principio y luego decrecen considerablemente, sin fluctuaciones importantes ya que el día fue muy nublado, estando el sol oculto entre las nubes durante el transcurso de la operación del captador ese día.

La figura 129 muestra que la eficiencia térmica disminuye con el paso del tiempo, porque al recircular el agua, esta no va a absorber la misma cantidad de energía, que en los ciclos de operación anteriores, siendo menor la energía útil que el agua va a ganar. Si se quiere mantener una eficiencia mayor, se debe asegurar siempre una temperatura de entrada de fluido baja. Esto se logra con tanques de almacenamiento altamente estratificados. En la figura 129b, se observa un comportamiento distinto en la eficiencia inicial, es más baja porque en ese día la temperatura inicial del fluido fue mayor comparada con la temperatura inicial de los demás días, disminuyendo el calor útil y la eficiencia al principio de la operación. También influye la inclinación, que disminuye la irradiación incidente al captador solar.

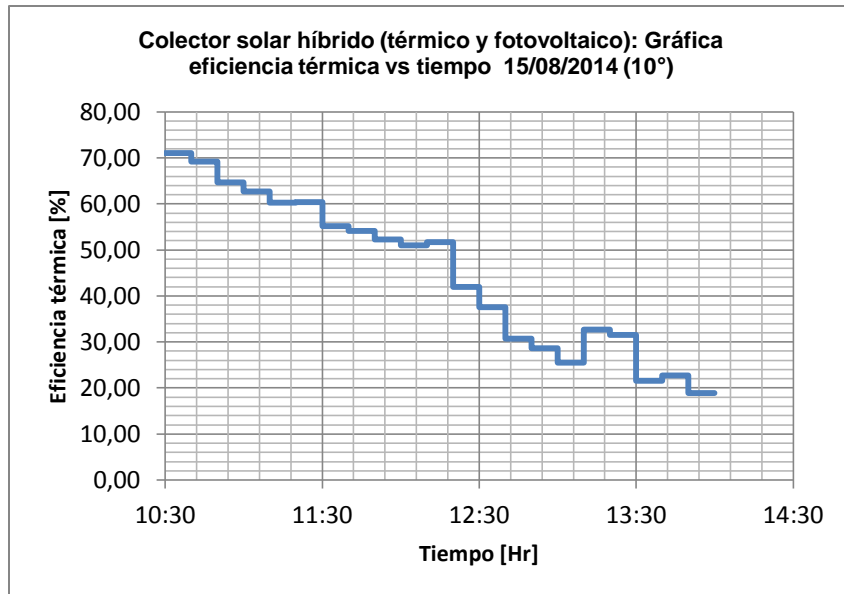
Figura 129. Eficiencia térmica vs tiempo del colector solar híbrido



129b.



129c.

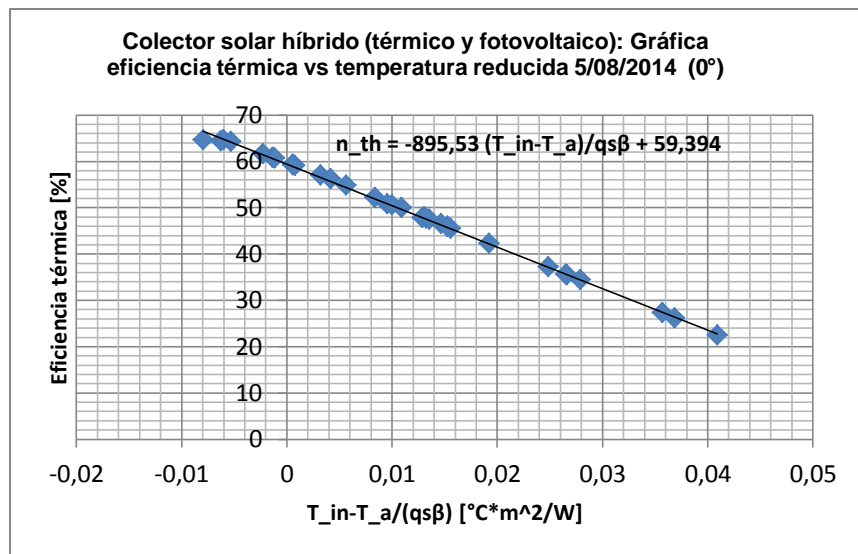


El rasgo característico de la eficiencia térmica, es que decrece de acuerdo al avance de la operación del colector solar híbrido en el tiempo de operación, pero también presenta fluctuaciones de acuerdo al crecimiento súbito de la irradiación en los intervalos de tiempo designados.

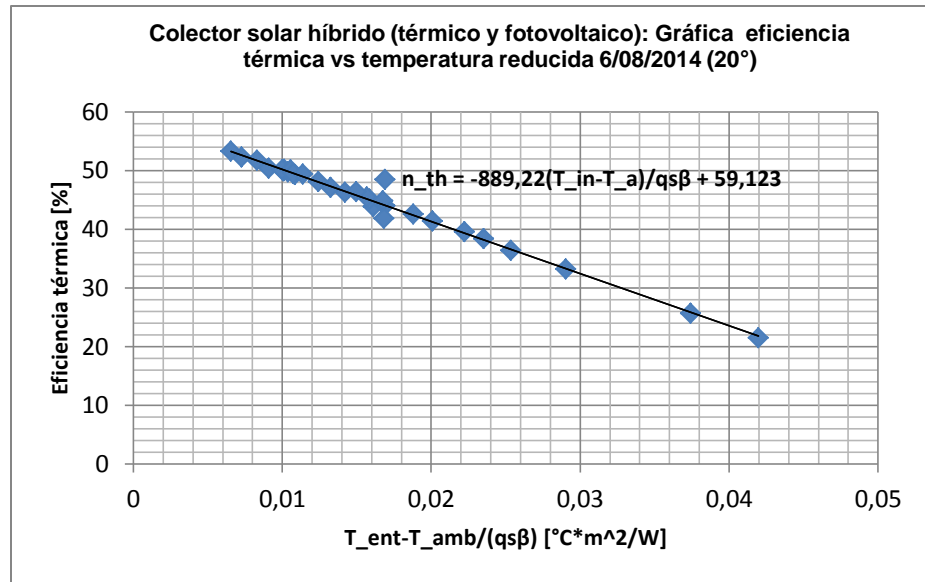
Una forma de evaluar la eficiencia térmica de un captador solar es respecto a la temperatura reducida, la cual se define como: $T_{red} = \frac{T_{in}-T_a}{qs\beta}$ la gráfica permite observar la tendencia de la eficiencia a disminuir a medida que la diferencia entre la temperatura de entrada y la temperatura ambiente respecto a la radiación incidente en la superficie del colector, esto se debe a que a mayor diferencia de temperatura las pérdidas de energía aumentan y por consiguiente la eficiencia térmica decrece. El comportamiento de cada una de las gráficas de la figura 130, que corresponden a los días de prueba indica que los resultados reales, tratan de mantener la linealidad entre las variables relacionadas. Los valores de eficiencia térmica son mayores cuando se presentan los valores de temperatura reducida negativos, es decir cuando la temperatura ambiente es mayor que la temperatura de entrada del captador solar. Cabe destacar el comportamiento en la figura 130b, que la distribución de los puntos, en la parte positiva de la abscisas debido a que el colector solar híbrido empezó su operación con una temperatura inicial de agua en el tanque de 28 °C, estando por encima de la temperatura ambiente durante todo el tiempo de la operación del colector solar híbrido.

Figura 130. Gráficas eficiencia térmica vs temperatura reducida del colector solar híbrido

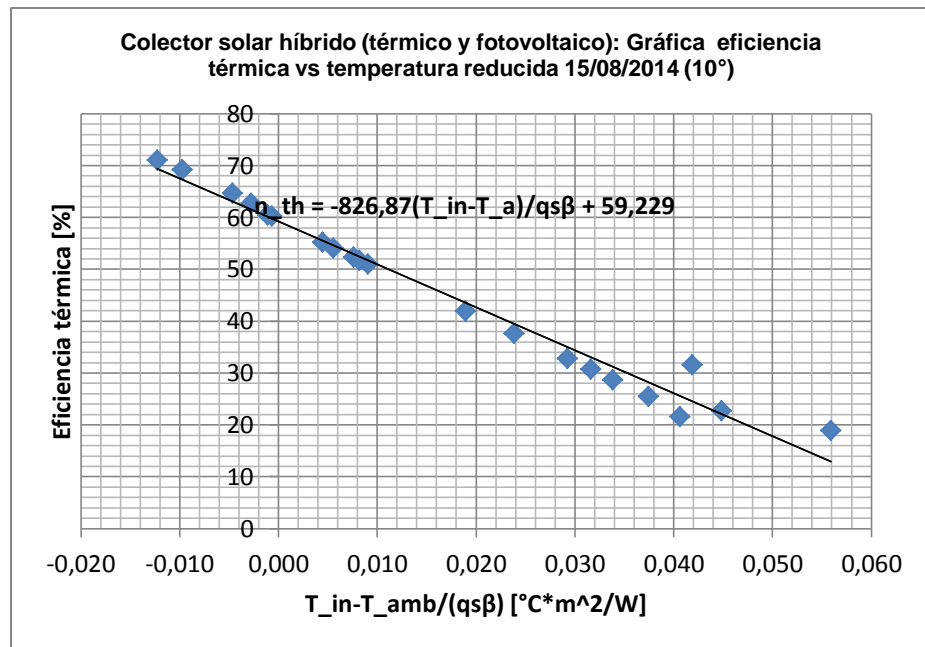
130a.



130b.



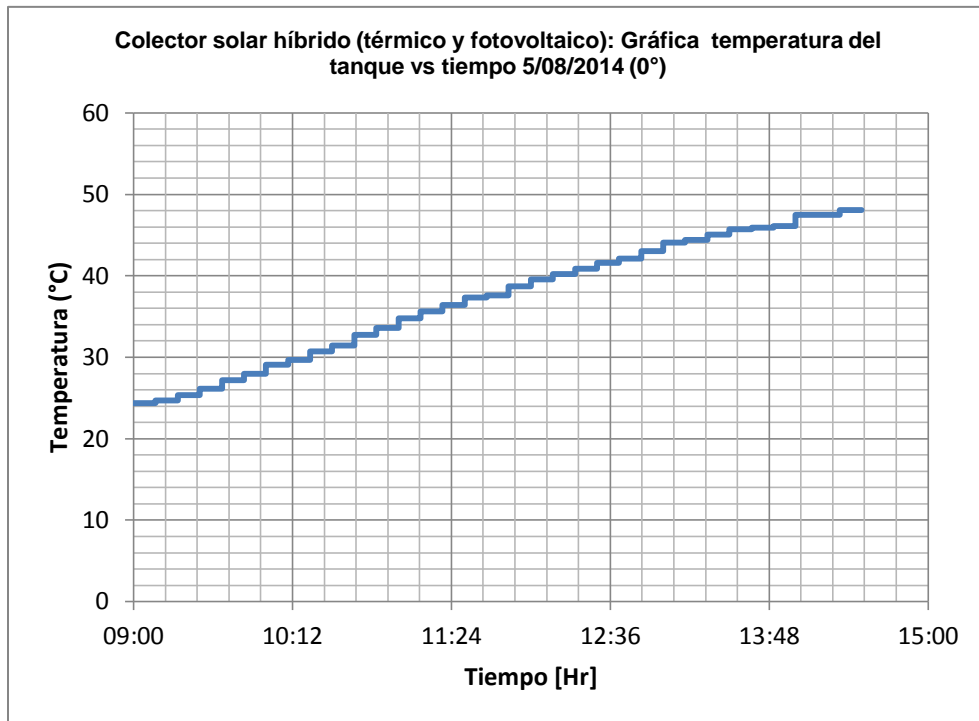
130c.



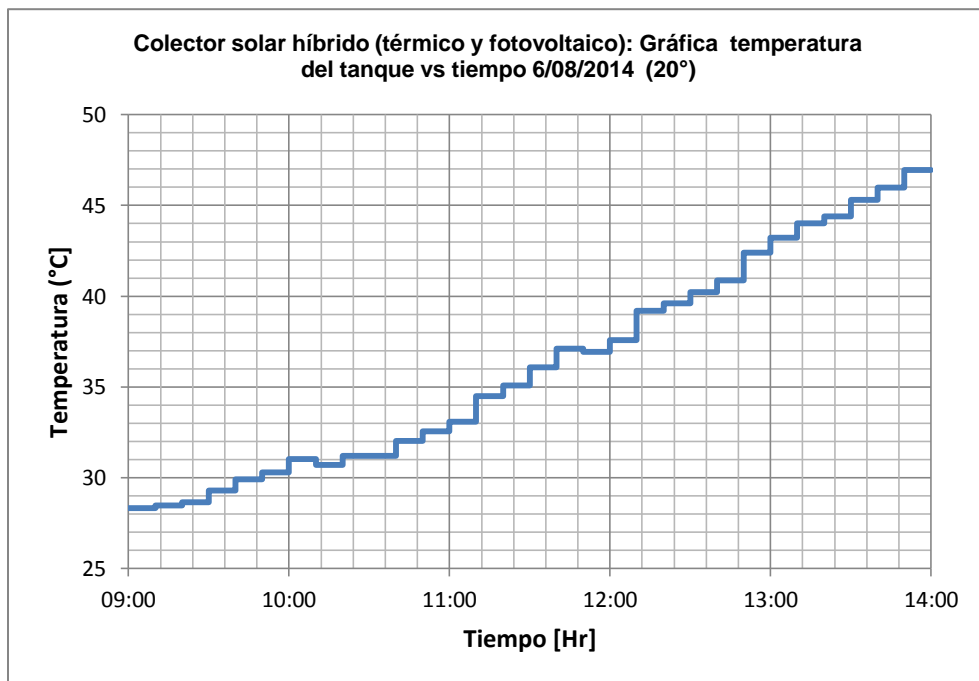
En la figura 131, las gráficas que muestran el incremento de temperatura de la capacidad total del tanque de almacenamiento (50 Litros) a través del tiempo de operación.

Figura 131. Gráficas temperatura del tanque vs tiempo del colector solar híbrido

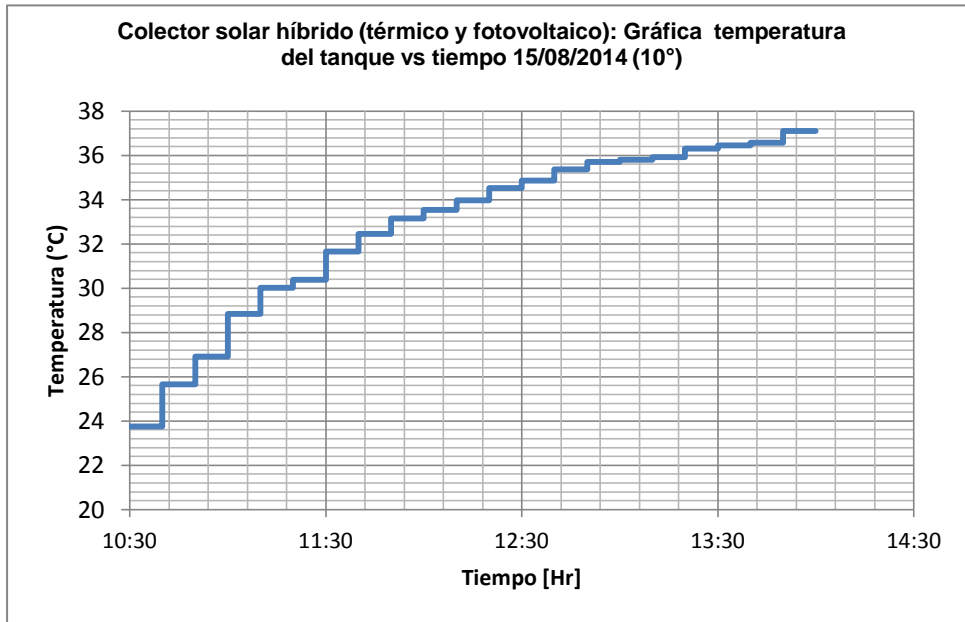
131a.



131b.



131c.



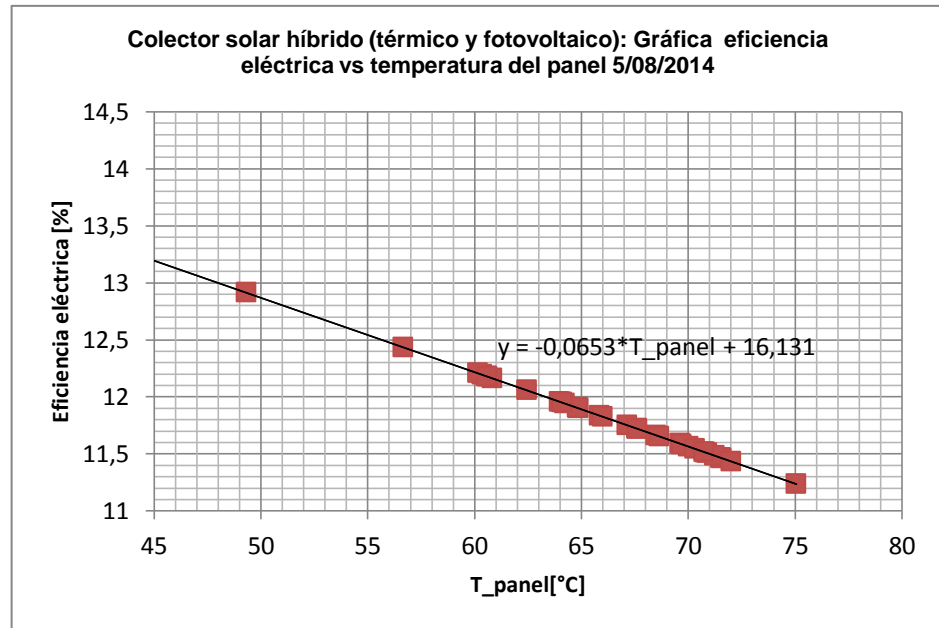
Los incrementos de temperatura del agua que es almacenada en el tanque dependen en gran medida de cuánta energía útil se haya producido respecto a la energía solar incidente, aunque también se deben tener en cuenta las pérdidas de calor que se presentan en el tanque y en el recorrido que realiza el fluido, aunque se procuró que para el prototipo sean las menores posibles. La comparación de real y teórica del comportamiento de la temperatura en el tanque de almacenamiento cuando termina la operación a final de la prueba realizada el 6 de agosto se observa en el anexo A.

Como el colector híbrido es del tipo placa y tubos con cubierta, no se espera un aumento en la eficiencia eléctrica debido a que se le añade una cubierta adicional al panel, aumentando las pérdidas por reflexión del mismo y también aumentando la temperatura al reducir notoriamente la convección superior del panel. Si el colector híbrido fuera del tipo sin cubierta, se esperaría un mejoramiento en su rendimiento eléctrico ya que en la parte superior estaría refrigerado por el aire y en la parte inferior estaría refrigerado por el fluido de trabajo, lo que disminuiría la temperatura de las celdas fotovoltaicas y mejoraría el rendimiento.

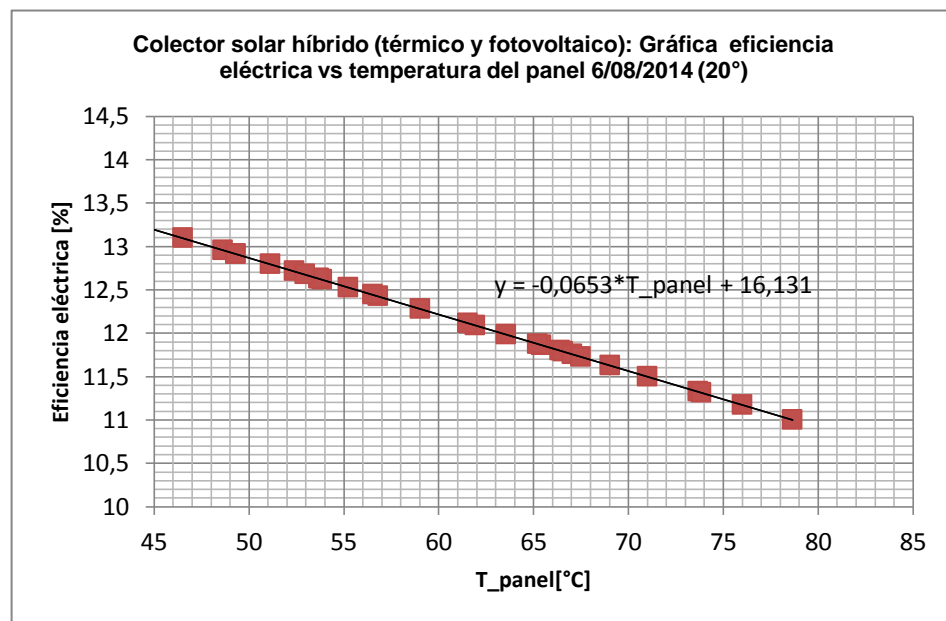
Cabe resaltar que el módulo fotovoltaico en el colector solar híbrido, se encuentra funcionando en el rango de 11 a 13 [%] de eficiencia, de acuerdo al aumento de su temperatura que llegó hasta 79 [°C] (Figuras 132b y 132c) y 75 [°C] (Figura 132a).

Figura 132. Eficiencia eléctrica vs. Temperatura del panel del colector solar híbrido

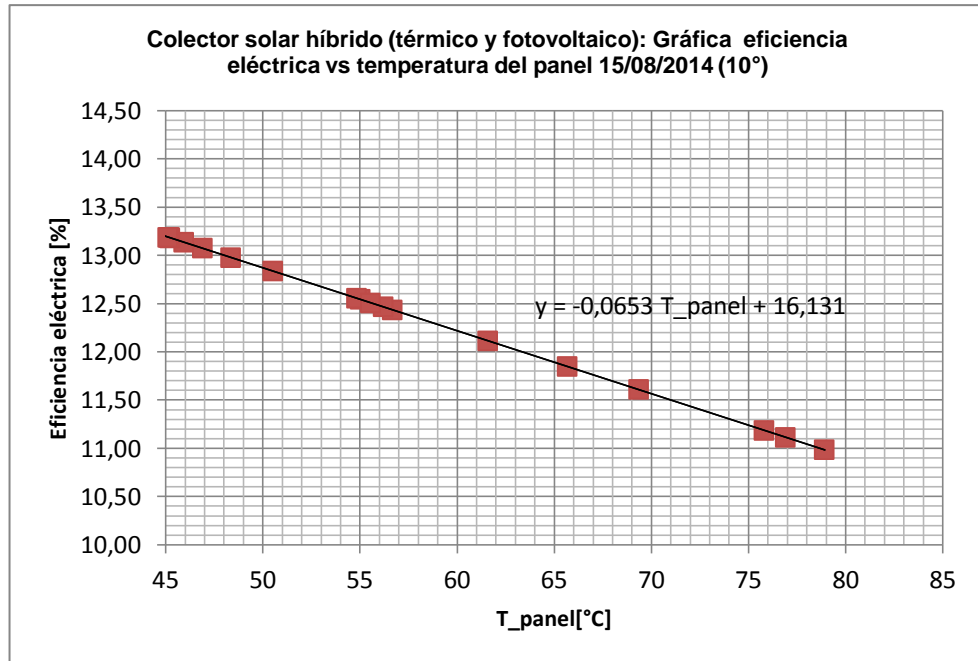
132a.



132b.



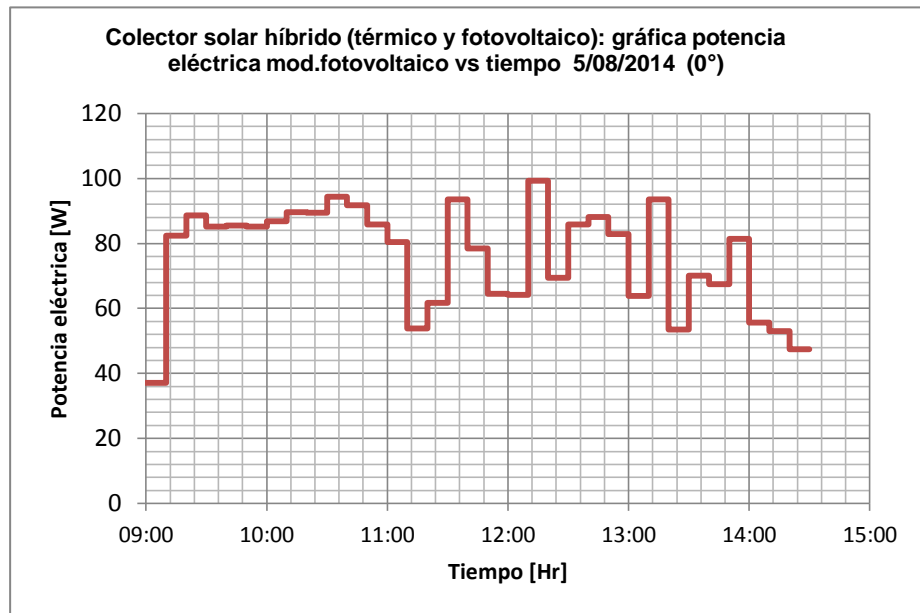
132c.



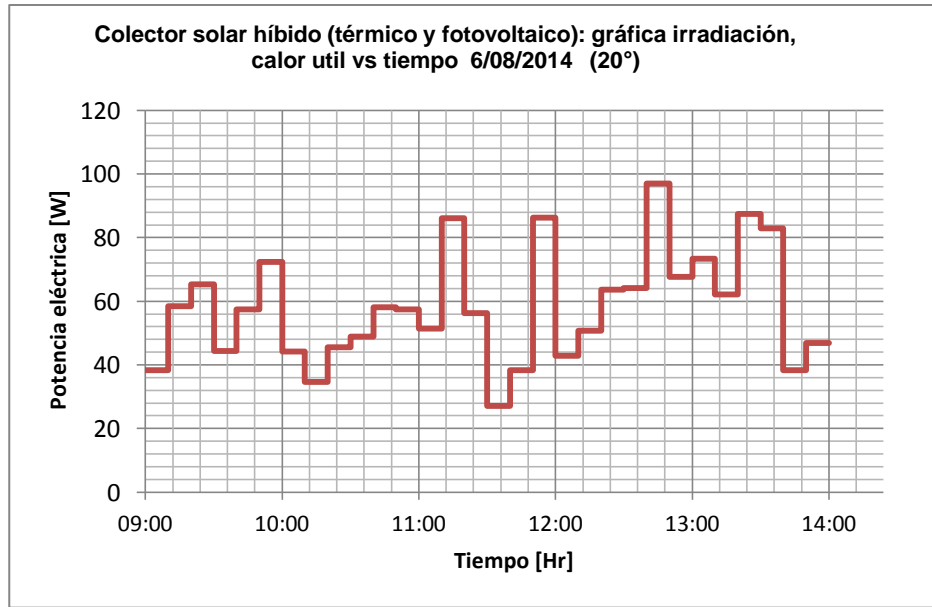
En la figura 133, se muestran las gráficas que corresponden a la potencia eléctrica producida por el módulo fotovoltaico durante las pruebas realizadas.

Figura 133. Potencia eléctrica vs tiempo producida por el módulo fotovoltaico en el colector solar híbrido

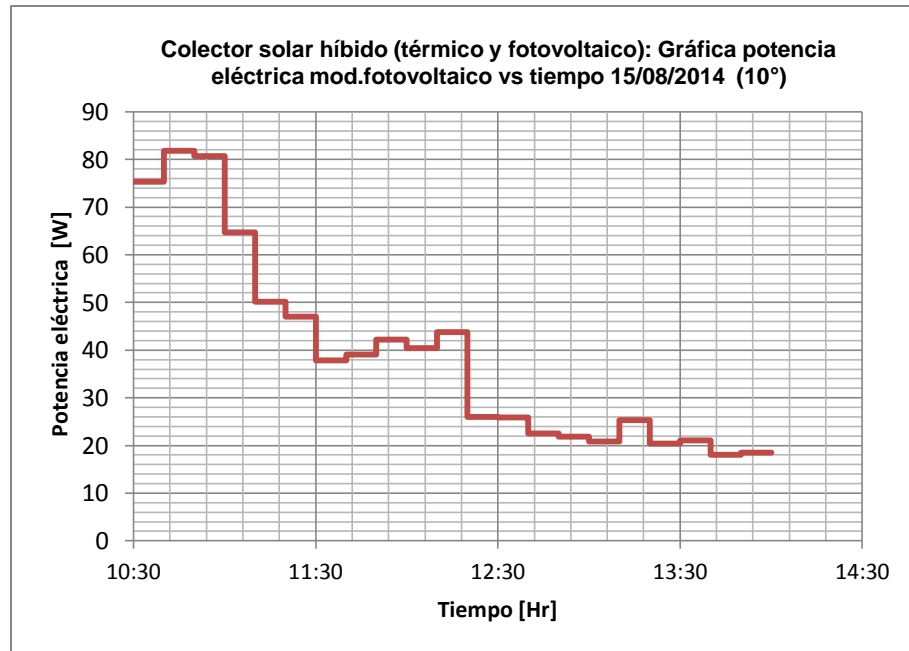
133a.



133b.



133c.



La causa de la disminución en la potencia generada en el módulo fotovoltaico a lo largo de la operación del colector solar híbrido se debe al aumento de temperatura en el módulo fotovoltaico. La potencia máxima que entregó el módulo fotovoltaico fue de 100 W.

En la tabla 22 se presentan los resultados diarios correspondientes a las pruebas realizadas, donde se presenta la eficiencia térmica total, la eficiencia eléctrica total, la energía solar incidente total, energía útil total, energía del módulo fotovoltaico total y el delta de temperatura del agua en la capacidad de 50 [L].

Tabla 22. Resultados finales de las pruebas realizadas al colector solar híbrido

	05/08/2014	6/08/2014	15/08/2014
Eficiencia térmica/día	50%	45%	48%
Eficiencia eléctrica/día	12%	11%	11%
%Rendimiento	62 %	56 %	59%
Energía total captada (KJ)	12081,50	9817,66	4984,86
Energía útil (térmica) (KJ)	6085,04	4461,80	2392,71
Energía (mód. fotovoltaico) (W-h)	396,00	292,20	137,27
Delta de temp. del agua (°C)	24	20	14

10.4 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN DEL MODELAMIENTO TEÓRICO Y COMPARACIÓN CON LAS PRUEBAS REALIZADAS AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO).

Se realizó una simulación en MATLAB, con base en el modelo teórico térmico utilizado para el análisis de parámetros de diseño del captador solar, con la diferencia que se introdujeron los vectores que contienen los datos de la radiación solar (total y difusa) para cada uno de los intervalos de tiempo medidos, además se incluyó el vector de la temperatura ambiente correspondiente. Los resultados se presentan en la tabla 23. El modelamiento teórico muestra claramente que los valores de eficiencia térmica, energía útil total diaria y energía módulo fotovoltaico total diaria, mayores que los valores reales, obtenidos de las pruebas realizadas al prototipo.

Tabla 23. Resultados comparativos teóricos y reales en el colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)

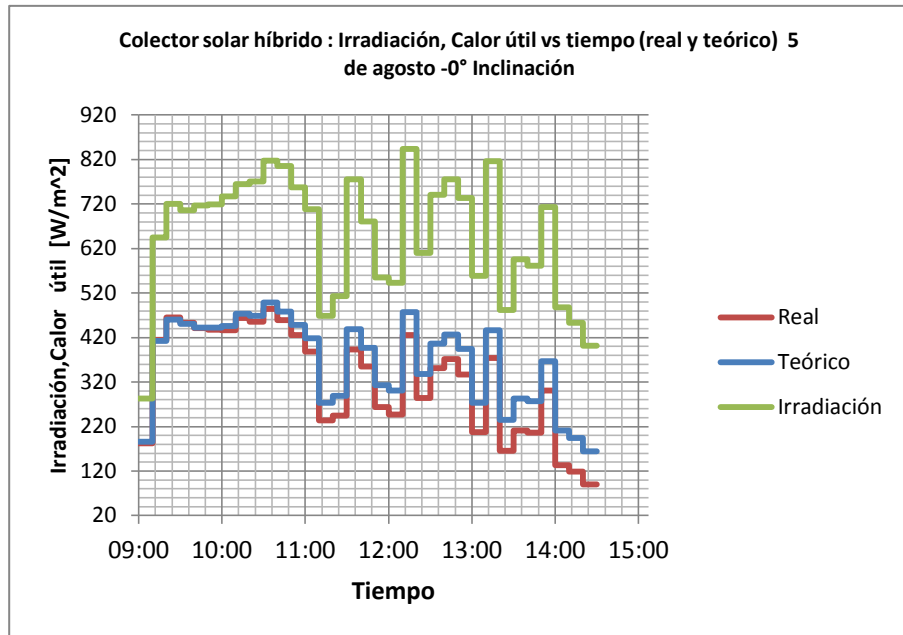
	05/08/2014		6/08/2014		15/08/2014	
	Teórico	Real	Teórica	Real	Teórico	Real
Eficiencia térmica/día	56%	50%	52%	45%	54%	48%
Eficiencia eléctrica/día	13%	12%	13%	11%	12%	11%
%Rendimiento	69%	62%	65%	56%	66%	59%
Energía solar incidente (KJ)	12081,50		9817,66		4984,86	
Energía útil (térmica) (KJ)	6817,29	6085,04	5024,17	4461,80	2691,81	2322,90
Energía producida (Mód.Fotovoltaico) (W-h)	437,32	396,00	347,10	292,20	164,45	137,27
Delta de temperatura del agua (°C)	16	24	12	20	6	14

La figura 134 corresponde a la irradiación, calor útil (real y teórico), presentándose gráficas (figuras 134a, 134b y 134c) correspondientes para los 4 días de pruebas, la figura 135 corresponde a la eficiencia térmica con las gráficas acordes (figuras

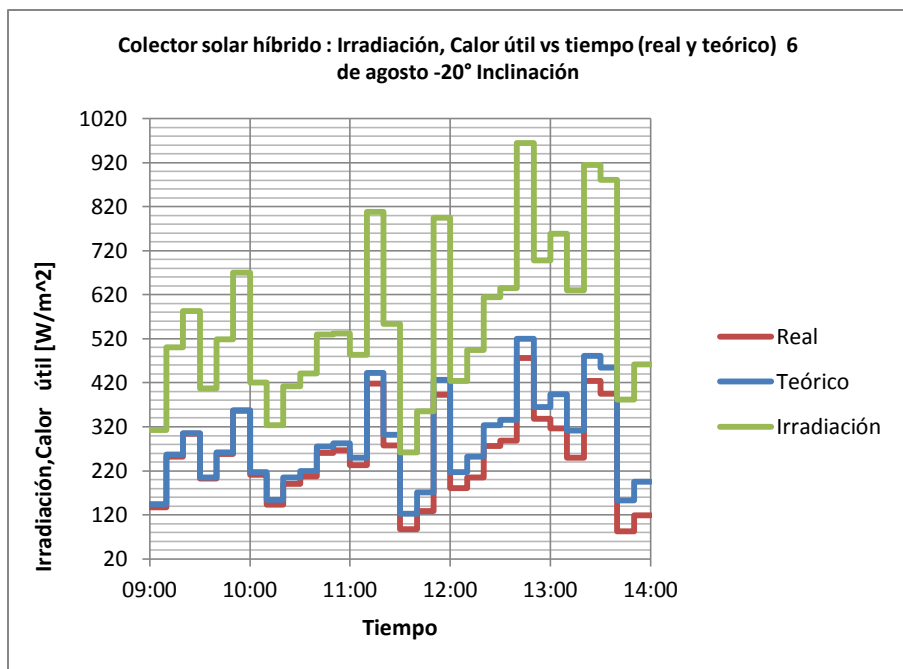
135a, 135b y 135c) respecto al tiempo de operación del prototipo de acuerdo a cada día.

Figura 134. Gráficas irradiación, calor útil (real y teórico) vs. Tiempo

134a.



134b.



134c.

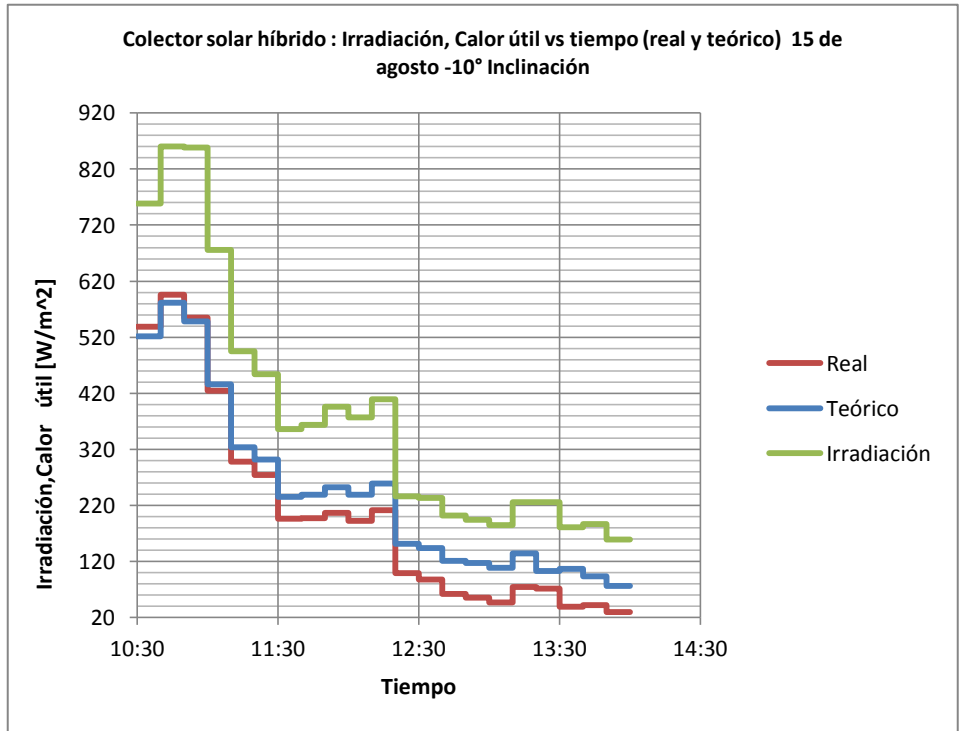
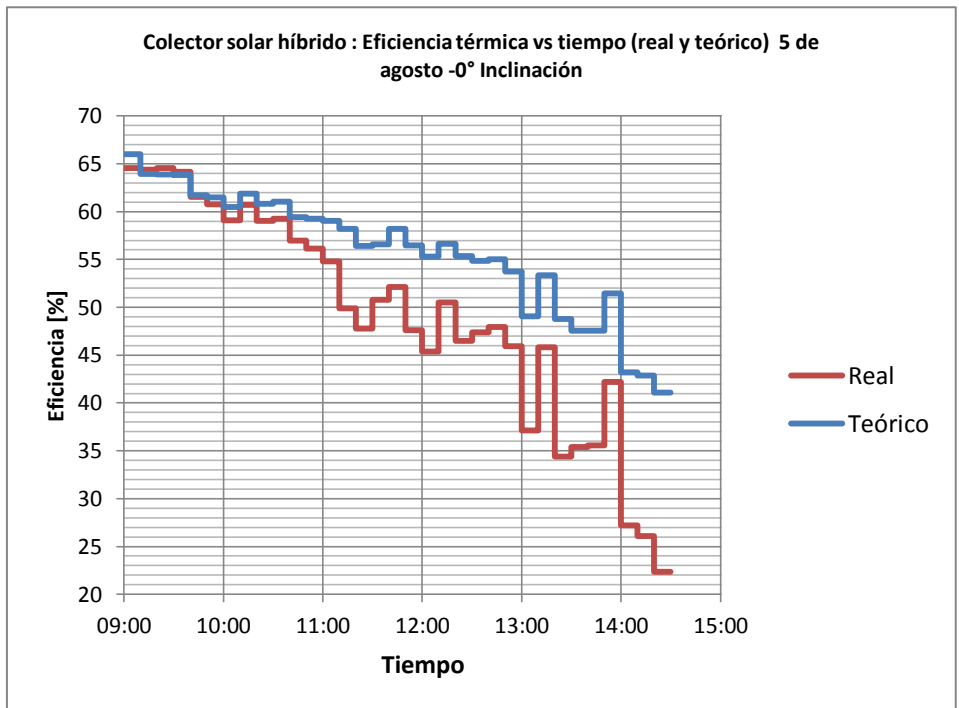
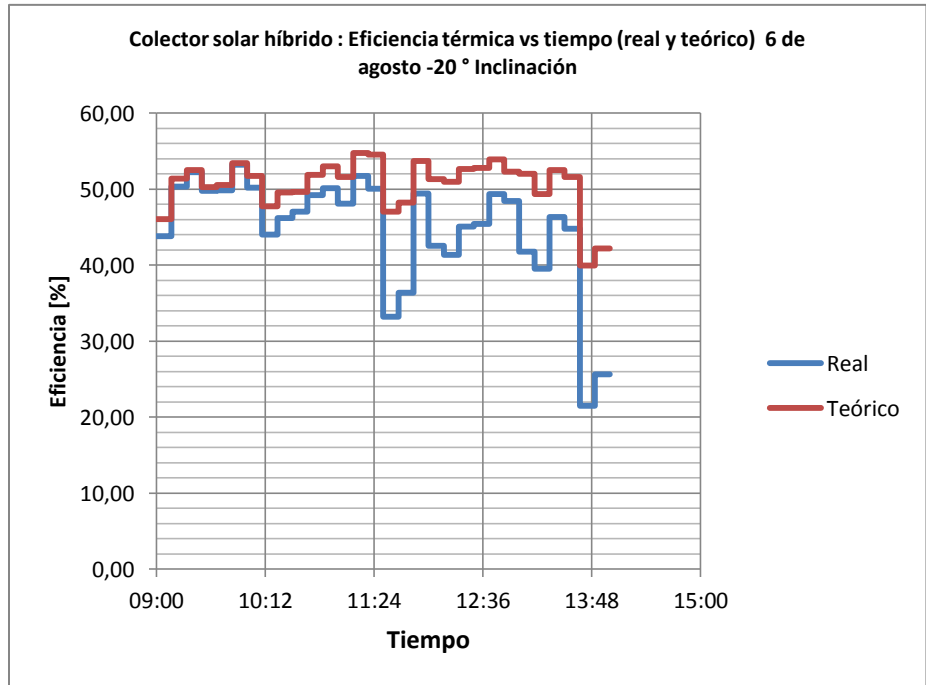


Figura 135. Gráficas eficiencia térmica (real y teórico) vs. Tiempo

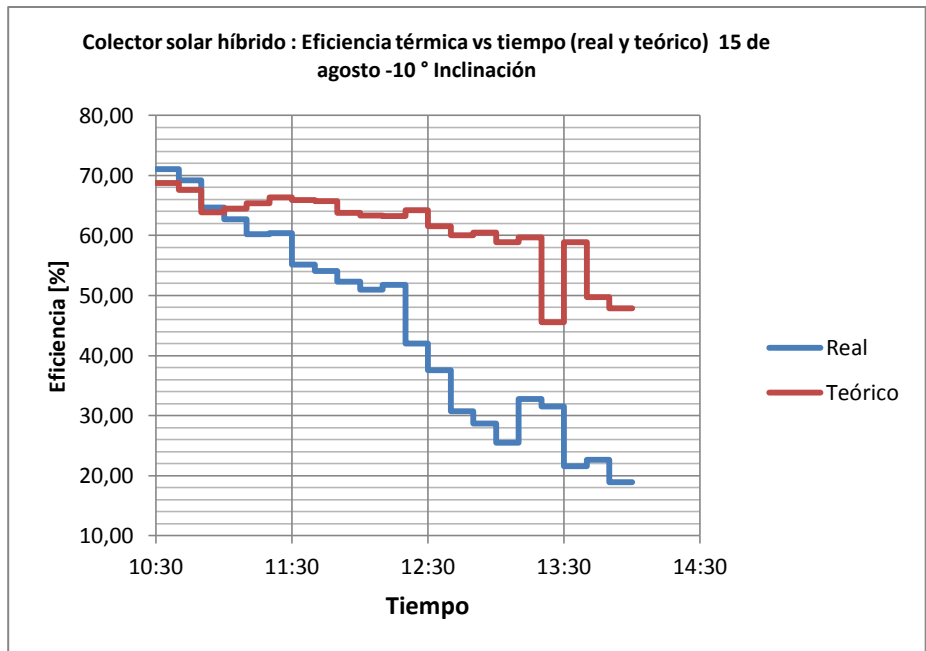
135a



135b.



135c.



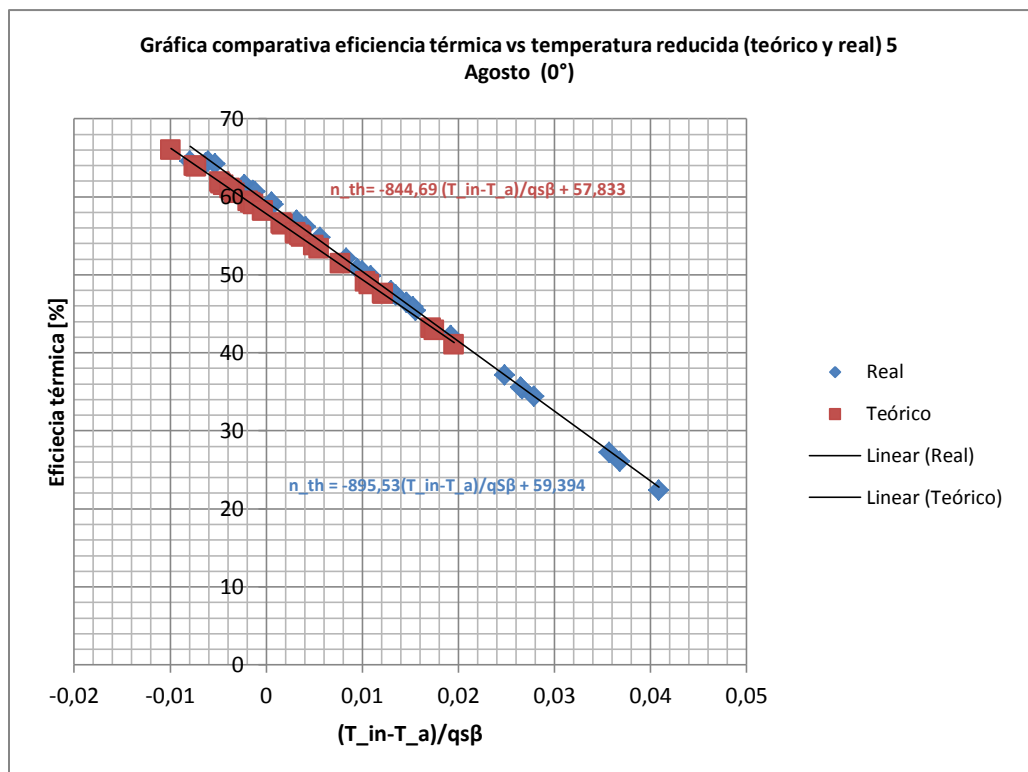
La diferencia entre resultados de eficiencia real y teórica (figura 135) se debe a que en el modelo teórico simulado, las temperaturas alcanzadas son menores y por ende las pérdidas son menores, como en el prototipo existen factores de construcción como el hecho que la placa absorbadora no es completamente plana

y no tiene un contacto homogéneo con el módulo fotovoltaico, que hace que la temperatura alcanzada en el prototipo real sea mucho mayor que el modelo teórico, aumentando la magnitud de las pérdidas en el captador.

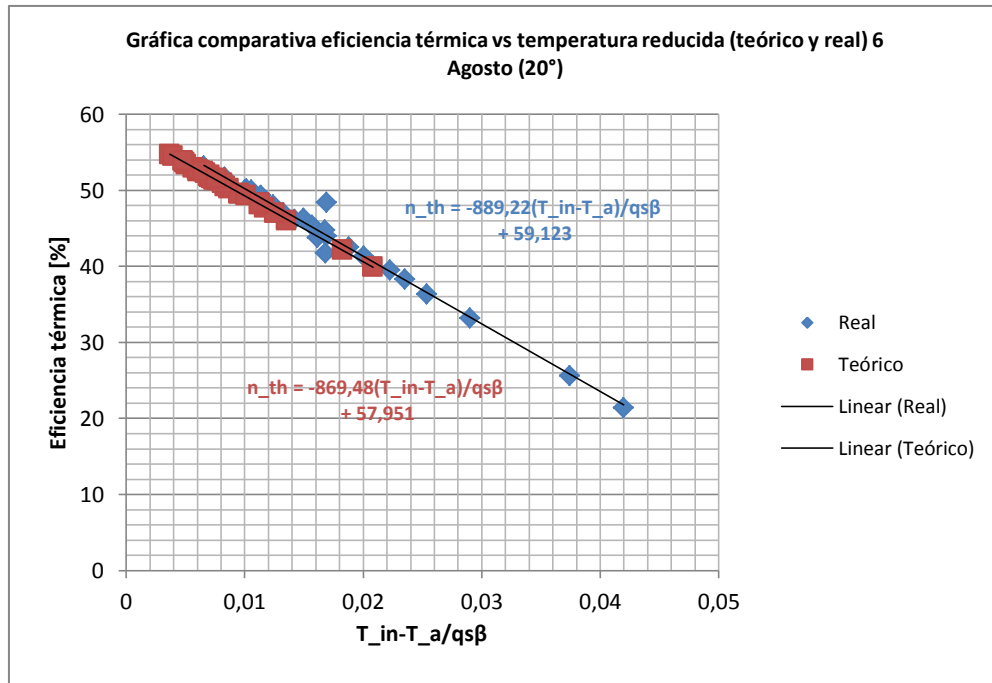
En la figura 136, se encuentran las gráficas que indican la relación entre la eficiencia térmica y la temperatura reducida, tanto teórica como real. La diferencia está en que teóricamente, el captador solar simulado tiene mayor eficiencia térmica, pero menor temperatura reducida, esto indica que hay mayor calentamiento del agua que circula por el captador en el prototipo construido.

Figura 136. Gráficas eficiencia térmica vs temperatura reducida (real y teórico)

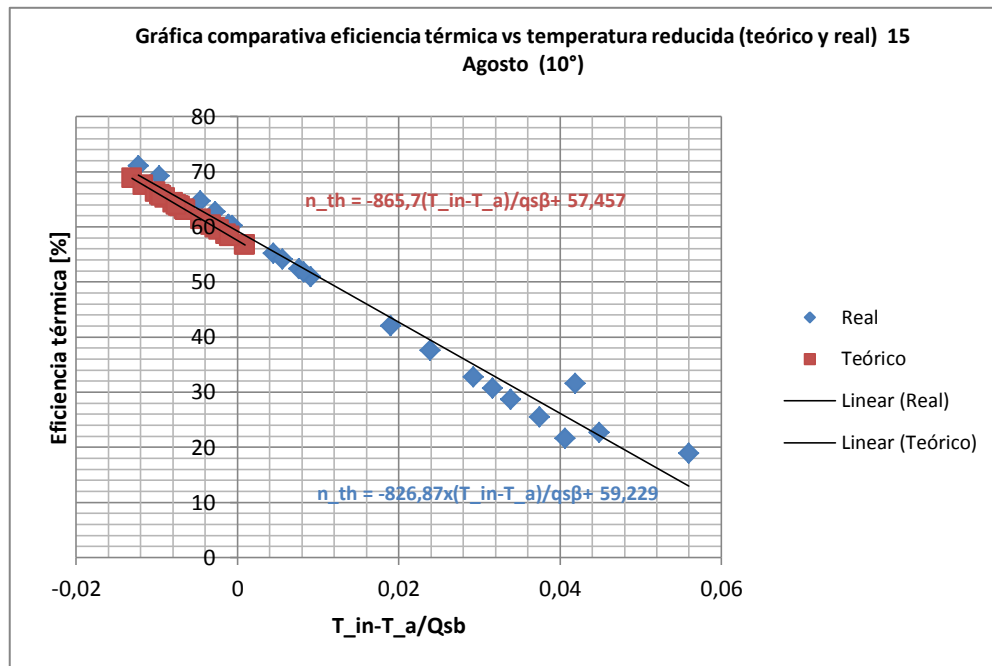
136a.



136b.



136c.

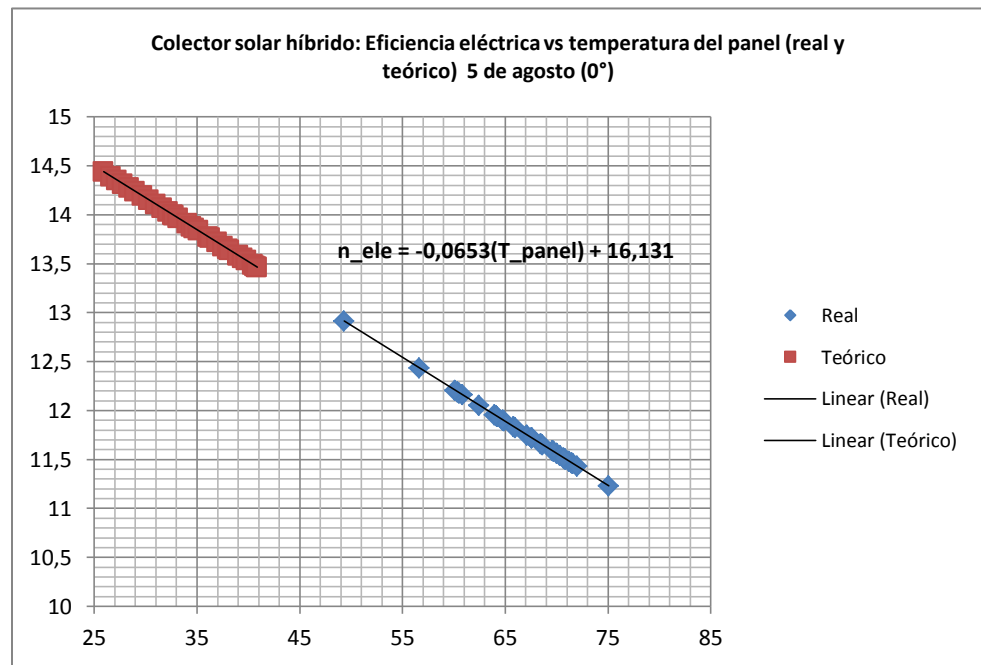


En la figura 137, se presentan las gráficas de eficiencia eléctrica respecto a la temperatura del módulo fotovoltaico (real y teórico), lo cual se infiere que en la parte teórica el módulo fotovoltaico, trabaja con una eficiencia eléctrica de 13 a 14

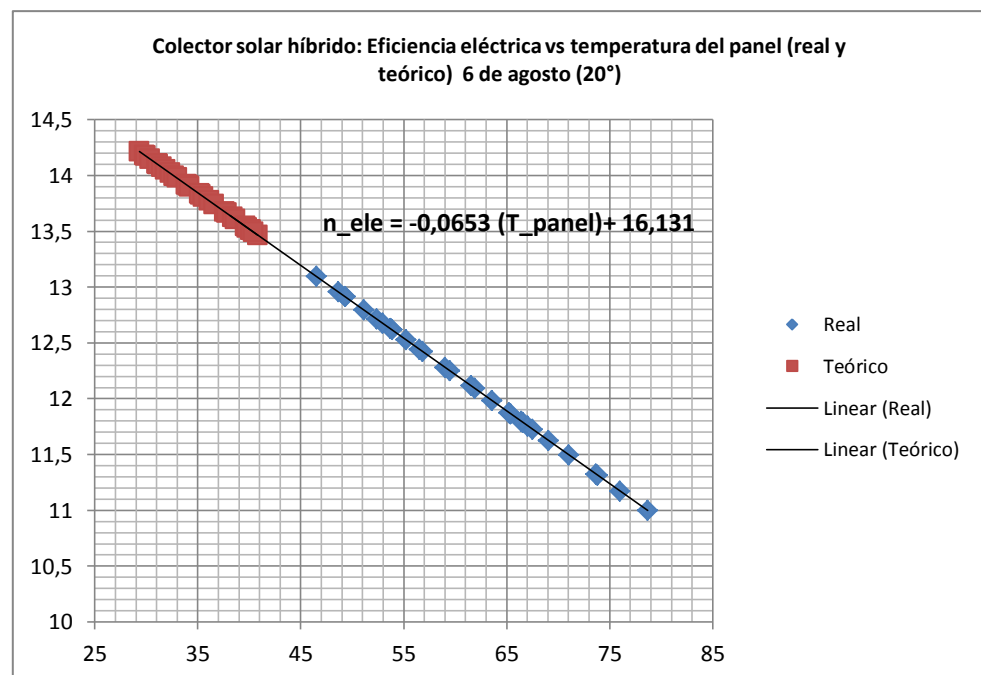
[%], a temperaturas de operación hasta 40 [°C], estando en una zona más segura. En cambio el prototipo real alcanza temperaturas hasta de 79 [°C] y la eficiencia eléctrica oscila entre 11 y 13 [%].

Figura 137. Eficiencia eléctrica vs. Temperatura del panel (real y teórico)

137a.



137b.



137c.

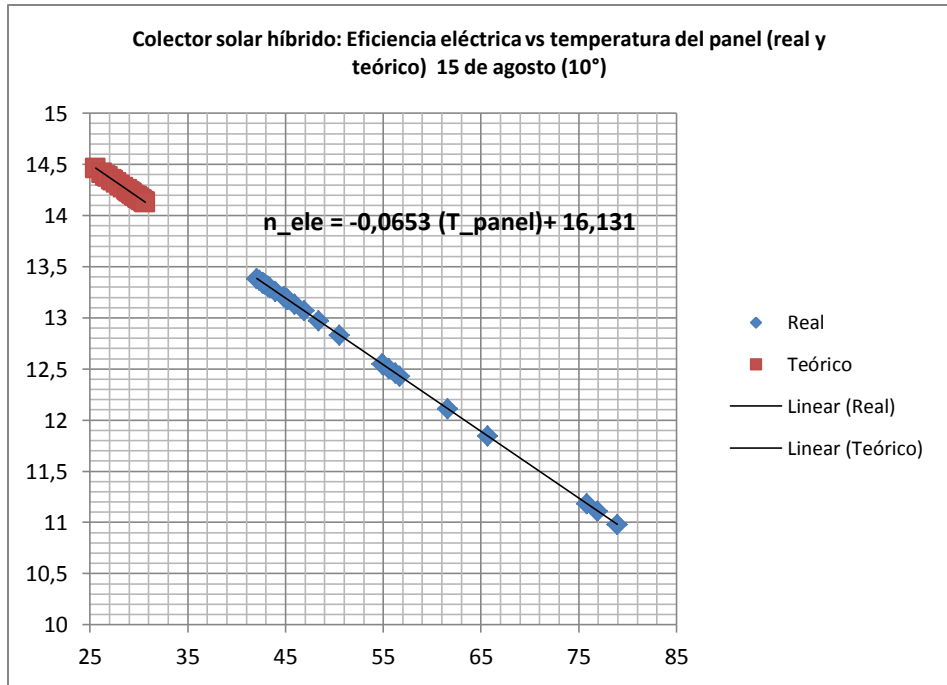
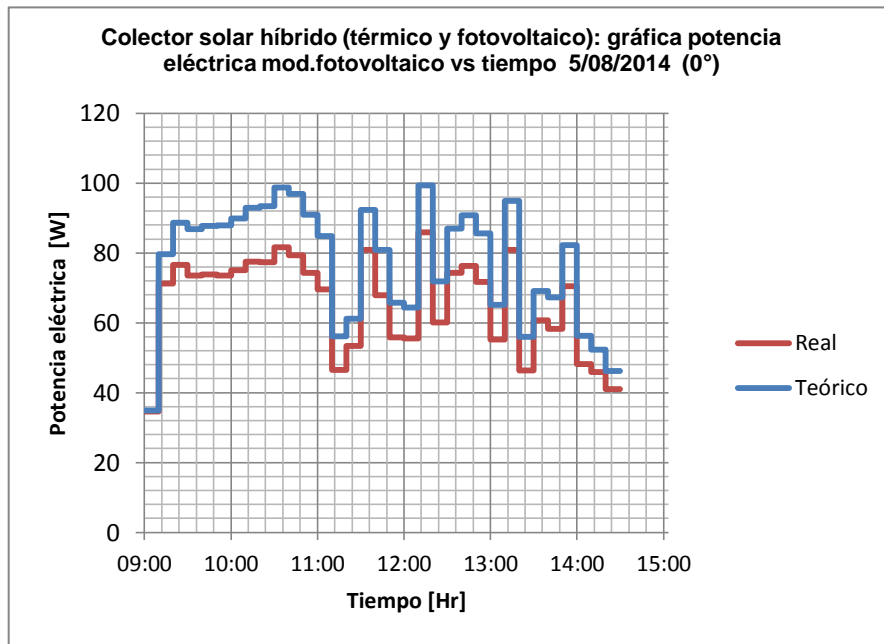
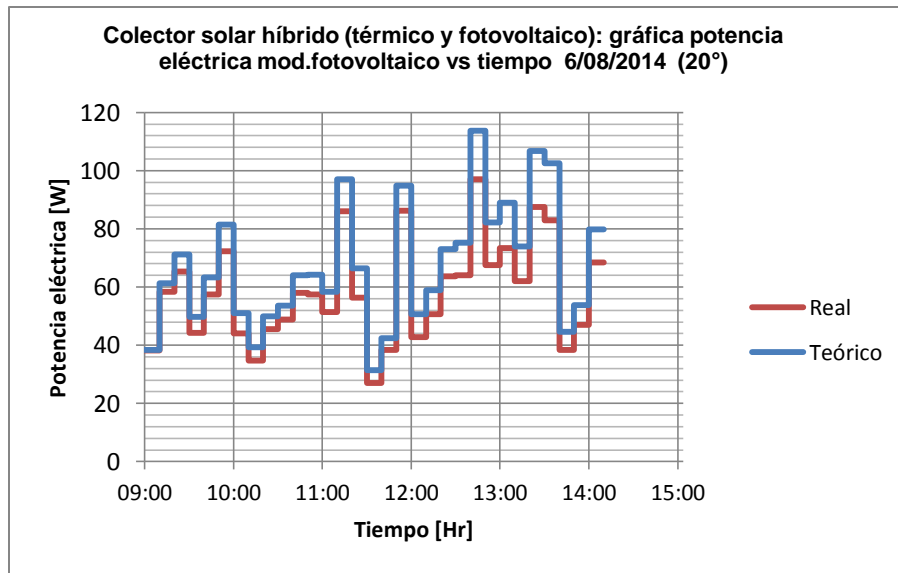


Figura 138. Potencia eléctrica vs tiempo producida por el módulo fotovoltaico en el colector solar híbrido (real y teórica)

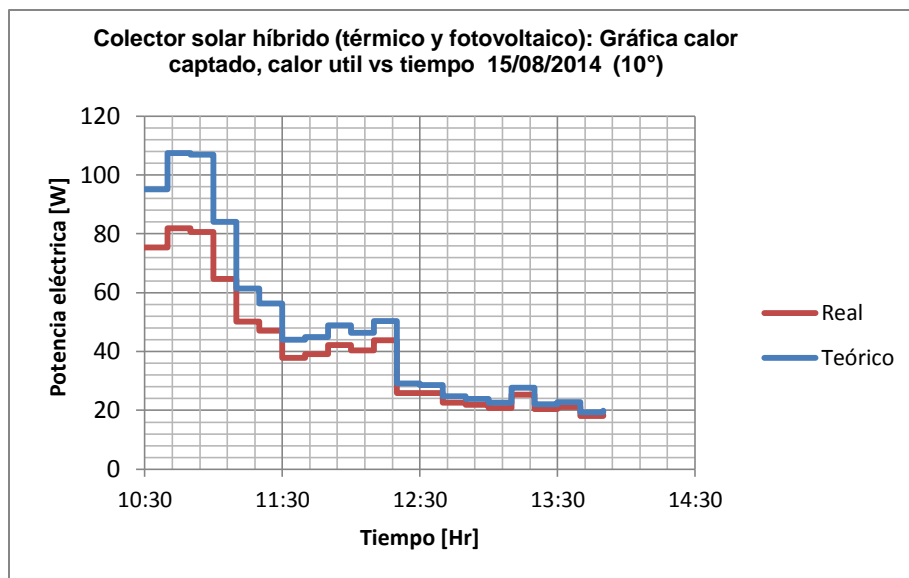
138a.



138b.



138c.



En la figura 138, la causa principal de la desviación entre las curvas reales es que en el modelo teórico, la temperatura del módulo fotovoltaico no sobrepasa los 40 [°C] y en el modelo real llega a temperaturas más altas, debido a esto la producción de energía eléctrica del módulo es mayor teóricamente que en el prototipo real. La inclinación también es un factor muy importante porque de esta depende cuanta irradiación incide sobre el captador, que es proporcional a la energía eléctrica producida en el módulo fotovoltaico.

11. COMPARACION ENTRE EL CAPTADOR SOLAR DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO RESPECTO AL CAPTADOR SOLAR EN UN COLECTOR DE PLACA PLANA Y UN MÓDULO FOTOVOLTAICO SEPARADOS

Para comparar el rendimiento de un colector solar híbrido con sus componentes básicos por separado: módulo fotovoltaico y un colector solar térmico. Se realizó un estudio centrándose en el elemento de captación, porque para realizar una metodología más exhaustiva es necesario tener cada uno de estos sistemas, cumpliendo la condición de que la suma de las áreas de captación del colector solar y del módulo fotovoltaico sean equivalentes al área de captación del colector solar híbrido y que las características geométricas del captador solar, sean iguales en el colector térmico e híbrido.

Por razones económicas, no fue viable adquirir otro módulo fotovoltaico y construir otro colector, sin embargo se pueden obtener ciertas predicciones respecto a cómo sería la producción de energía de los dispositivos por separado usando modelos teóricos.

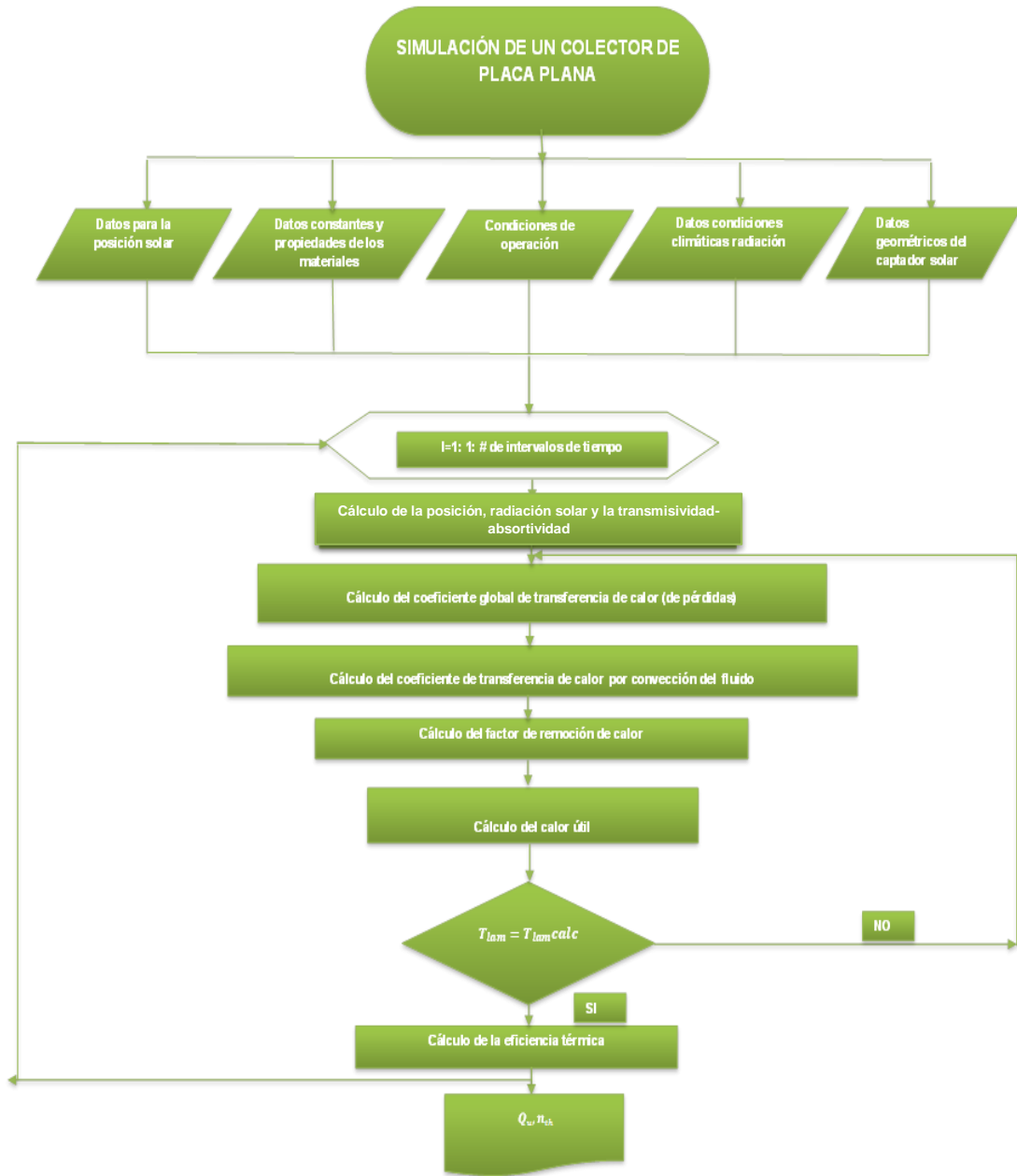
Se puede inferir que un módulo fotovoltaico de menor, por ejemplo la mitad del área del panel utilizado, produce menor cantidad de energía eléctrica, por consiguiente se cumple la característica de un colector híbrido que produce más energía por cantidad de área que cada sistema por separado con un área parcial de captación. Para un módulo fotovoltaico de la mitad del área del colector solar híbrido, se selecciona un módulo fotovoltaico **Yingli Solar YL70P-17b** cuyas especificaciones y parámetros eléctricos a las condiciones estándar de $1000 \left[\frac{W}{m^2} \right]$ de irradiación y $25 [^{\circ}C]$ se muestran en la tabla 27.

Tabla 24. Parámetros eléctricos y especificaciones del módulo fotovoltaico Yingli Solar YL70P-17b

Parámetros eléctricos y especificaciones	Valor
Potencia máxima	70 [W]
Eficiencia del módulo fotovoltaico	13,80 [%]
Voltaje (Potencia máxima)	18,00 [V]
Corriente (Potencia máxima)	3,89 [A]
Voltaje de circuito abierto	22,30 [V]
Corriente de corto circuito	4,15
Largo del módulo fotovoltaico	770,00 [mm]
Ancho del módulo fotovoltaico	660 [mm]
Temperatura del módulo fotovoltaico nominal	46 °C

Por otra parte, para apreciar el rendimiento de un colector solar térmico respecto al colector híbrido, se realizó una simulación de un colector térmico con un área parcial equivalente a la mitad del colector híbrido para observar y comparar el calor útil, bajo las mismas condiciones, es decir utilizando los datos de radiación y temperatura ambiente medidos, asimismo la inclinación del colector. Para la comparación de un colector solar híbrido se realiza una simulación en MATLAB de un colector de placa plana del área parcial del colector solar híbrido térmico y fotovoltaico. En la figura 139 se observa el diagrama de flujo, que permite observar el orden de los cálculos realizado en la programación.

Figura 139. Diagrama de flujo de la simulación de un captador solar de un colector de placa plana



Para realizar esta comparación se utilizaron los datos de radiación (total y difusa) medidos con los piranómetros, además de los datos de la temperatura ambiente y temperatura de entrada del fluido al captador solar, medidos con las termocuplas del día 5 de agosto, con una inclinación del captador solar de 0 [°]. En la tabla 25

se presentan los resultados de la simulación del colector de placa plana realizada en MATLAB, en el mismo intervalo de tiempo, en el cual el prototipo funcionó ese día.

Al colector de placa plana simulado, se le agregó el cálculo del factor transmisividad-absortividad (anexo E), que interviene directamente en el valor del calor útil que se producirá de acuerdo al modelo planteado. Otro factor a tener en cuenta es que la superficie de la placa absorbidora se asume con una capa de pintura negra para aumentar la absortividad del aluminio utilizado.

Se asume que el módulo fotovoltaico, está expuesto directamente al sol, sin ninguna cubierta adicional con lo cual se toma que está trabajando con su temperatura de operación nominal de 46 [°C] y para el mismo intervalo de tiempo simulado para el colector de placa plana, con lo cual se calcula la cantidad de energía producida por el módulo fotovoltaico.

Figura 140 Colector solar híbrido (captador solar), colector placa plana (captador solar) y módulo fotovoltaico

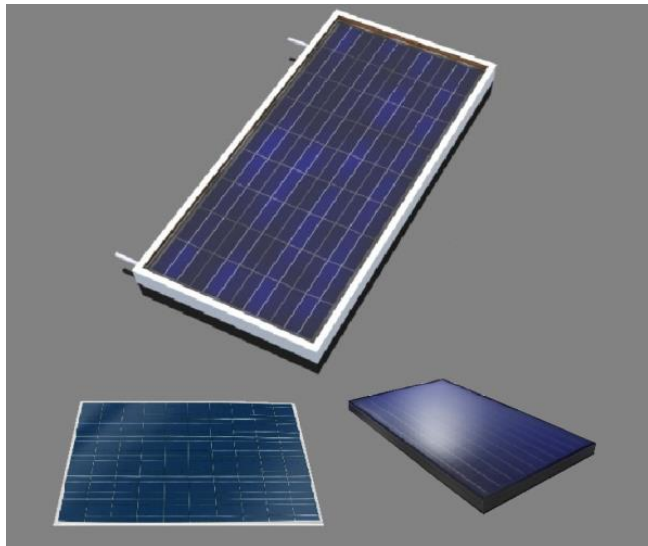


Tabla 25. Resultados de simulación de colector solar de placa plana (captador) en
MATLAB

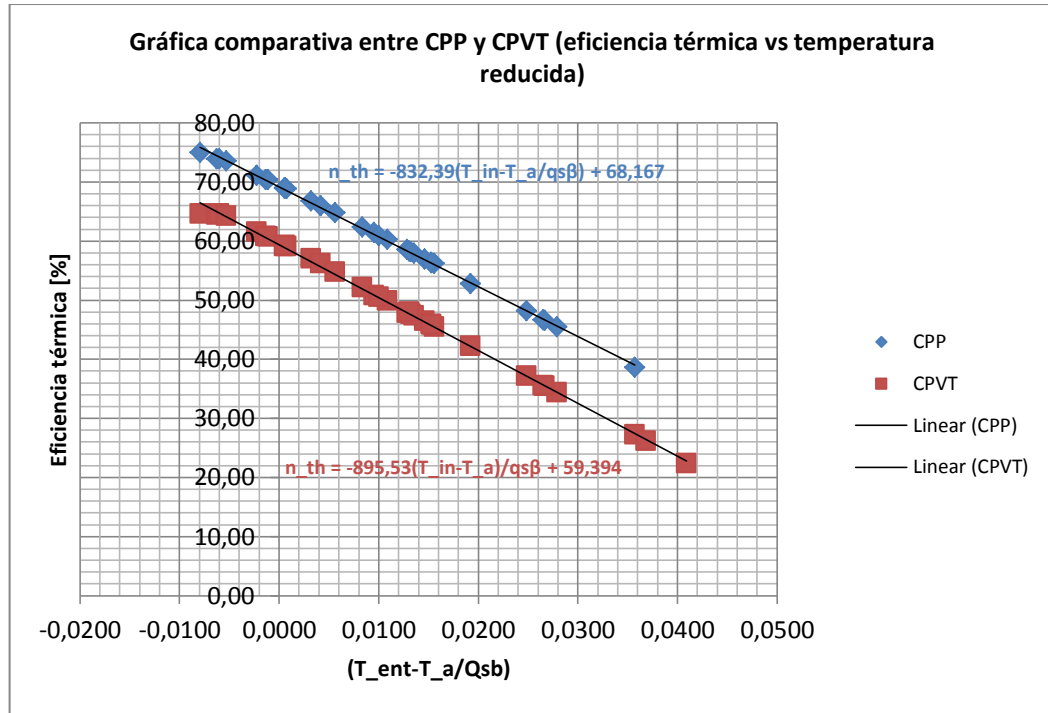
Energía captada (KJ)	Energía útil (KJ)	Eficiencia térmica (%)	Temperatura reducida ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}^2/\text{W}$)
79,45	59,53	74,93	-0,0079
181,34	133,92	73,85	-0,0063
202,48	149,56	73,87	-0,0060
198,62	145,95	73,48	-0,0053
201,43	143,13	71,06	-0,0023
202,30	142,40	70,39	-0,0013
207,33	142,80	68,87	0,0005
215,03	151,25	70,34	-0,0011
216,83	149,13	68,78	0,0008
229,90	158,55	68,96	0,0006
226,50	151,21	66,76	0,0032
213,05	140,55	65,97	0,0041
199,25	128,94	64,71	0,0056
131,89	79,47	60,25	0,0109
144,14	84,42	58,57	0,0129
218,01	133,87	61,40	0,0095
191,44	119,35	62,34	0,0084
155,97	90,75	58,19	0,0132
152,82	85,87	56,19	0,0156
237,20	144,49	60,91	0,0100
171,65	97,74	56,94	0,0146
208,37	120,61	57,88	0,0135
218,16	127,12	58,27	0,0130
206,19	116,16	56,34	0,0153
156,90	75,59	48,18	0,0248
229,62	129,24	56,28	0,0153
135,55	61,58	45,43	0,0279
167,55	77,95	46,52	0,0266
163,47	76,15	46,58	0,0265
200,66	105,79	52,72	0,0192
137,32	52,94	38,56	0,0357

Tabla 26. Comparación entre el captador de: colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), colector de placa plana y módulo fotovoltaico

	Colector de placa plana	Módulo fotovoltaico	Prototipo Colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)
Eficiencia térmica	61%	N/A	50%
Eficiencia eléctrica	N/A	13%	12%
% Rendimiento	61%	13%	60%
Energía útil (KJ)	3523,00	N/A	6085,04
Energía eléctrica (Módulo fotovoltaico) (W-h)	N/A	201,36	396,00

Con la tabla 26, se puede observar que cada uno de los sistemas por separado, tanto el colector de placa plana, como el módulo fotovoltaico son más eficientes energéticamente, pero en producción de energía se necesita tanto más área de cada uno para igualar lo producido por él área de un colector solar híbrido, que permite en un área determinada compacta (la adición de las áreas de colector de placa plana y el módulo fotovoltaico) transformar la energía proveniente del sol y convertirla en energía térmica (calentamiento de agua) y en energía eléctrica (Carga de batería y bomba de circulación). Se hace imprescindible que los sistemas de aprovechamiento de la energía solar ocupen menos espacio, mejorando la adaptabilidad y la demanda de éstos.

Figura 141. Gráfica comparativa entre un colector de placa plana y un colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) de eficiencia térmica respecto a la temperatura reducida.



Finalmente se puede realizar un análisis para evaluar el desempeño de un colector solar híbrido térmico y fotovoltaico, el cual consiste en una relación o porcentaje de rendimiento que se puede cuantificar por medio del concepto de eficiencia y un balance de energía. Esta relación depende de la energía útil que el captador produce, respecto a la energía que incide sobre el mismo, que puede ser descrita como la suma de las energías producidas (tanto eléctrica como térmica) y la energía solar incidente.

$$\%_{\text{Rendimiento}} = \frac{E_{th\text{util}} + E_{pv}}{E_{sb}} \quad (51)$$

Para el 5 de agosto del 2014, y una inclinación de 0 [°], el prototipo del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), obtuvo un porcentaje de rendimiento de 62 [%].

12. COSTOS DEL PROYECTO Y ANÁLISIS ECONÓMICO

En la tabla 27 se presentan los costos de los materiales utilizados y de construcción del prototipo del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico).

Tabla 27. Costos del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico)

CONCEPTO	VALOR
MATERIALES COMPRADOS (CAPTADOR SOLAR)	
Vidrio	\$ 90.000
Módulo fotovoltaico de 145 W	\$ 551.500
Lámina de aluminio	\$ 58.400
Tubos de aluminio	\$ 23.900
Lana de vidrio	\$ 5.000
Marco de madera	\$ 70.000
Marco de aluminio	\$ 85.000
Grasa térmica	\$ 135.000
SUBTOTAL	\$1.013.800
MATERIALES COMPRADOS (SISTEMA HIDRAULICO)	
Bomba de circulación	\$ 33.000
Manguera	\$ 30.000
Válvula reguladora de caudal	\$ 32.000
SUBTOTAL	\$ 95.000
MATERIALES COMPRADOS (TANQUE DE ALMACENAMIENTO)	
Lámina de aluminio	\$ 45.000
Espuma de Poliuretano	\$ 46.000
Tanque de polietileno	\$ 79000
SUBTOTAL	\$ 170.000
MATERIALES COMPRADOS (ESTRUCTURA COLECTOR)	
Perfiles cuadrados y en ángulo	\$ 123.400
Eje de acero 4140	\$ 27.000
Chumaceras	\$18.000
Lámina de aluminio corrugado	\$ 87.000
Pintura	\$ 38.000
Ruedas	\$ 40.000
SUBTOTAL	\$ 315.400
MATERIALES COMPRADOS (SISTEMA FOTOVOLTAICO)	
Cable	\$ 10.000
Termocuplas	\$ 49.000
Batería de 105 A-h	\$ 350.000
Inversor	\$ 150.000
Regulador	\$ 100.000
SUBTOTAL	659.000
MATERIALES COMPRADOS (CONSTRUCCIÓN Y MONTAJE)	
Remachadora	\$ 17.000
Tornillos y remaches	\$ 9.000
Brocas	\$ 4.000
Silicona anti hongo	\$ 12.500
SUBTOTAL	\$ 42.500
MANUFACTURA	
Soldadura placa-tubos	\$ 150.000
Soldadura estructura	\$ 250.000
Implementos de protección	\$ 29.300
Mano de obra	\$ 350.000
SUBTOTAL	\$ 429.300
TRANSPORTE	\$200.000
TOTAL	\$ 3.000.000

Actualmente la implementación de los sistemas solares necesita una inversión inicial alta para aplicaciones como: el calentamiento de agua y la producción de energía eléctrica. Se hace necesario plantear las condiciones para observar la viabilidad económica de la aplicación de este tipo de sistemas.

- Para calentar 50 litros de agua (correspondiente a la capacidad utilizada en las pruebas al prototipo) unos 20 [°C] por encima de su temperatura inicial de operación se necesitan 4183 [KJ] en energía térmica, que convirtiéndose en unidades comerciales de energía corresponden a 1,16 [kW-h]. Además la producción energética promedio del módulo fotovoltaico es de 0,40 [kW-h]. Siendo el total de la energía del colector solar híbrido de 1,56 [kW-h/día] (*Energía total_{CPVT}*).
- El costo del kilovatio-hora [kW-h] según la ESSA (Electrificadora de Santander S.A.), para una residencia estrato 4 es de 376,12 [\$/kWh] **[25]**. Para calcular el costo anual (energía eléctrica) de la energía producida por el colector solar híbrido (CPVT) se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{\$Energía eléctrica anual} = \text{Energía total}_{CPVT} * \$kWh * \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}} * \frac{12 \text{ meses}}{1 \text{ año}} \quad (52)$$

$$\text{\$Energía eléctrica anual} = \$211.228$$

En términos económicos, el proyecto del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) tuvo una inversión inicial (F_0) de \$ 3.000.000. Se requiere saber cuál es el número de periodos (años) en que se recuperará la inversión inicial.

Para estimar el periodo de retorno de inversión se recurre a los conceptos de **[26]**:

- Valor presente neto (VPN): es un método que constituye la suma de los flujos de descuento futuros (F_t) de un proyecto en un número de periodos (t) y la inversión inicial del mismo (F_0), cuyo valor determina la viabilidad de una inversión.

- La tasa interna de retorno (TIR): Es la tasa en la cual el valor presente neto es igual a 0.

$$VPN = F_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t} \quad (53)$$

$$F_t = \$Energía\ eléctrica\ anual * (1 + g) \quad (54)$$

- Tasa de interés de oportunidad (TIO): es la tasa de interés más alta que se toma para realizar un proyecto, se compara con la TIR para evaluar la viabilidad del mismo.

Si TIR > TIO : el proyecto es viable

- Tasa de inflación (g): es la tasa que determina la pérdida del valor del dinero en el tiempo.

Se programan flujos de descuentos futuros (F_t) a través del número de periodos (t) que son constituidos por la variación del costo de la energía eléctrica anual. La tasa de inflación generada en el país es 3,2% anual y la tasa de interés efectiva anual de 28,92 % (TIO) [27]. De acuerdo con los criterios de evaluación económica de proyectos, se procede a calcular la tasa interna de retorno (TIR), la cual dio como resultado 30 [%] comparada con la tasa de interés de oportunidad (TIO), es mayor y por consiguiente el proyecto es viable. Además se encontró que el número de periodos correspondiente al retorno de la inversión ($VPN = 0$) es de aproximadamente 15 años.

13. CONCLUSIONES

- Se integraron conceptos de distintas áreas de conocimiento cursadas a lo largo de la carrera como: transferencia de calor, termodinámica, mecánica de fluidos, diseño, programación gráfica, procesos de manufactura y electricidad, usando herramientas software de cálculo como MATLAB, Engineering Equation Solver (EES) y Microsoft Excel, software de programación gráfica LabView y software de diseño asistido por computadora como SolidWorks.
- Se realizó una revisión del estado del arte de los sistemas colectores híbridos térmicos y fotovoltaicos, su estado actual en el mercado, sus ventajas y desventajas, así como otras alternativas de hibridación de sistemas de energías alternativas. Se concluyó que la integración de distintos tipos de sistemas de aprovechamiento de energía están tomando gran interés en el mundo y que a medida que avanza la tecnología, la integración entre estos sistemas para lograr un beneficio determinado e incluso una sinergia en la producción de energía y aumento en la eficiencia son más factibles.
- Se aplicaron diversos procesos de manufactura durante la etapa de construcción, usando materiales disponibles en la región, la construcción en su mayoría se realizó en las instalaciones de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, dando como resultado un prototipo funcional, que cumple con los requerimientos y objetivos establecidos al principio en la propuesta realizada para este proyecto.
- Se logró construir un prototipo de colector solar híbrido que no necesita fuentes de energía eléctrica externa logrando una autonomía de energía eléctrica convencional.
- El sistema colector híbrido térmico y fotovoltaico tiene una limitación y es la temperatura de operación del módulo fotovoltaico cuyo rango de temperaturas de servicio es de -40° a 85 [°C] si se llegara a superar esta temperatura algunas celdas del módulo fotovoltaico podrían dañarse, por eso se debe

asegurar que la placa absorbidora sea de cobre o aluminio y la resistencia térmica entre el módulo fotovoltaico y la placa sea la mínima posible.

- La eficiencia térmica y eléctrica del colector híbrido decrece a medida que la temperatura del fluido que recircula en este aumenta, porque el agua cada vez absorbe menos calor del módulo fotovoltaico, ocasionando que este se caliente cada vez más, aumentando así las pérdidas de calor.
- En un colector solar híbrido se presentan dos situaciones intrínsecas al captador solar construido que afectan la eficiencia o rendimiento de la parte térmica y eléctrica:
 - La presencia de una cubierta de vidrio mejora el rendimiento térmico, pero disminuye el rendimiento eléctrico. Sin embargo la circulación de agua permite refrigerar el módulo fotovoltaico y mejorar un poco su rendimiento eléctrico, aprovechando simultáneamente el calor acumulado por este para el calentamiento del agua.
 - La presencia de un módulo fotovoltaico disminuye el rendimiento térmico porque este es una capa que aumenta la resistencia térmica entre la placa y la radiación. Adicionalmente las propiedades ópticas del módulo fotovoltaico reducen el valor del factor de transmisividad-absortividad.
- La construcción de un sistema híbrido (térmico y fotovoltaico) debe realizarse teniendo en cuenta el elemento o componente más crítico, en este caso el componente que se tuvo en cuenta principalmente en el diseño fue el módulo fotovoltaico, su criticidad radica en los límites de temperatura de operación y el área calculada para la alimentación eléctrica de la bomba de circulación.
- Debido a la acumulación de calor en el captador y la emisión de radiación infrarroja proveniente del módulo fotovoltaico la cual se refleja en la cubierta superior, se presenta un efecto invernadero que eleva considerablemente la temperatura del módulo fotovoltaico. Como consecuencia el agua alcanzó una variación de temperatura mayor que la estimada teóricamente.
- Según las pruebas realizadas, se concluye que el día que tuvo mejor rendimiento el colector solar híbrido fue el 5 de agosto con una inclinación de

0°, sin embargo esta no es la inclinación óptima, pero si es cercana a comparación de las inclinaciones de los otros días. Una inclinación óptima es aquella a la que los rayos del sol sean perpendiculares a la superficie captadora, luego se pudo haber logrado un mejor rendimiento con la orientación adecuada respecto al día del año.

- El comportamiento del sistema fotovoltaico fue de constante carga y descarga de la batería, donde la carga se alimentaba de la batería, cuando esta estaba completamente cargada o de la batería y el panel cuando la batería estaba en fase de carga. Se concluye que por la conexión realizada, la batería estuvo la mayoría del tiempo cargándose para mantener el voltaje constante necesario para la operación de la bomba de circulación.
- Los resultados obtenidos en las pruebas realizadas al captador solar tienen una desviación de 10% en la eficiencia térmica y eléctrica respecto al modelo matemático utilizado teóricamente, siendo adecuadas las pruebas realizadas al prototipo construido.
- En la comparación del captador solar perteneciente al colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), con un captador solar de un colector de placa plana y un módulo fotovoltaico, se dedujo que al compactar el aprovechamiento de energía solar térmica y energía solar fotovoltaica hay disminución de la eficiencia particular de cada uno de los sistemas, pero la producción de energía aumenta, debido a que se ocupa menos espacio y se aprovecha dos tipos de energía: para calentar el agua contenida en el tanque de almacenamiento, y para garantizar la circulación de la misma a través del captador alimentando eléctricamente la bomba de circulación.
- Una alternativa, cuando no se cuenta con el suficiente espacio para instalar dos sistemas de aprovechamiento de energía solar: térmico y fotovoltaico, por separado, es un colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico) que provee un ahorro en instalación aunque tiene costos de fabricación altos, produciendo energía térmica y eléctrica en forma simultánea.

14. RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos sobre colectores híbridos, en especial del tipo térmico y fotovoltaico de placa plana, se puede hacer una optimización del tipo de placa absorbedora y la distribución de los tubos, teniendo en cuenta la disponibilidad del material y los procesos de manufactura que se le deban realizar respectivamente.
- Se puede cambiar el tipo de tecnología fotovoltaica usada por una más eficiente y más fácil de usar, como lo son las láminas flexibles fotovoltaicas.
- Se puede realizar un estudio de la acumulación de calor en cada uno de los elementos constituyentes del captador para poder encontrar alternativas de mejoramiento de la eficiencia del colector híbrido.
- Se puede realizar un estudio de los otros modelos existentes de colectores híbridos e incluso realizar otros prototipos de los demás tipos de colectores híbridos térmicos y fotovoltaicos, así como un estudio económico de viabilidad para implementarlos en una situación real.
- Para asegurar un mejoramiento en el rendimiento (eficiencia térmica y eléctrica) se debe procurar usar tanques de almacenamiento con mayor estratificación, es decir con mayor capacidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRITISH PETROLEUM COMPANY. BP Statistical Review of World Energy: 2013 Report [Online] Londres, Inglaterra: 2013 [Citado 20 nov,2013]. Disponible de World Wide Web: < <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013.html>>
- [2] BUREAU VERITAS FORMACIÓN, MÉNDEZ MUÑIZ, Javier María. CUERVO GARCÍA, Rafael. Energía solar térmica. Madrid: Fundación Confemetal, 2009.P.17- 77.
- [3] BALBIS MOREJÓN, Milén. TOVAR OSPINO Iván Rafael. BALAGUERA MANTILLA Jorge Eliécer. Energía solar térmica. Barranquilla: Corporación universitaria de la costa, 2009. 87p.
- [4] MINISTERIO DE AMBIENTE REPUBLICA NACIONAL DE COLOMBIA. Atlas solar de radiación en Colombia. [Online] Bogotá, Colombia: 2005 [Citado 10 oct, 2013]. Disponible de World Wide Web: < http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf>
- [5] CHARALAMBOUS, P.G. ed al. Photovoltaic thermal collectors: A review. London: London South Bank University, 2006.
- [6] KIM, Jin-Hee.Kim, Jun-Tae. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types. Budaen-dong: *Kongju National University, 2012.*
- [7] ZONDAG H.A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands,2011.

- [8] ENERGIANOW.com. Componentes de un sistema fotovoltaico [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 20 nov, 2013] .Disponible de World Wide Web: http://www.energianow.com/Instructivos/Componentes_Sistema_Fotovoltaico.pdf
- [9] BECKMAN, William A. DUFFIE, John A. Solar engineering of thermal processes. Mexico: Prentice Hall, 1997. P. 3-46,295-307.
- [10] PAREJA APARICIO, Miguel. Radiación solar y su aprovechamiento. Madrid: Marcombo, 2010.
- [11] CIESE.ORG. Trópicos terrestres [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 14 jul, 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://ciese.org/ciberaprendiz/latylong/tropicos.htm>
- [12] SOCIALES DIGITAL.WORDPRESS.COM Latitud y longitud terrestres [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 13 jul, 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://socialesdigital.wordpress.com/ciencias-sociales-1%C2%BA-eso-criterios-de-evaluacion/1-coordenadas-geograficas-longitud-y-latitud-como-localizar-un-lugar-concreto-en-la-superficie-terrestre-los-husos-horarios/>
- [13] PILATOWSKY FIGUEROA, Isaac. MARTINEZ STREVEL, Rodolfo. Sistemas de calentamiento solar de agua: una guía para el consumidor. México: Editorial Trillas, 2009.
- [14] MARVARK, Tom. CASTAÑER, Luis. Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications. Estados Unidos de América: Editorial El Sevier.
- [15] GLOWACKI, Eric D. Organic solar cells. New York: Department of chemical engineering University of Rochester, 2012.
- [16] DE VRIES, Douwe. Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. Eindhoven: Eindhoven University Press, 1998.P. 9-100.

- [17] ALIBABA.COM. Kafuter thermal electrically conductive adhesive. [Citado 1 Jun, 2014]. Disponible de World Wide Web: [http://kafuter.en.alibaba.com/product/658364000219246453/Hot Sell in INDIA LED Bulbs Kafuter 5202 Thermal Electrically Conductive Adhesive.html](http://kafuter.en.alibaba.com/product/658364000219246453/Hot_Sell_in_INDIA_LED_Bulbs_Kafuter_5202_Thermal_Electrically_Conductive_Adhesive.html)
- [18] DEWITT, David P. INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. Estados Unidos de América: John Willey and sons, 2011.P.111-228,981.
- [19] ZONDAG H.A. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2000.
- [20] ZONDAG H.A. The yield of different combined PV-thermal collector design Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2003.
- [21] INSTITUTO GEÓGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Latitud y longitud de Bucaramanga [Citado, 15 jun, 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://www.igac.gov.co/>
- [22] INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN. Productor y materiales: propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación térmica. Valencia: 2011.
- [23] MOTT, Robert. Mecánica de Fluidos. Estados Unidos de América: Pearson Education, 2006.
- [24] ORBEGOZO, Carlos. ARIVILCA, Roberto. Energía solar fotovoltaica. Manual técnico para instalaciones domiciliarias. Perú: Green Energy Consultoría y Servicios SRL.
- [25] ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. Tarifas 2014. [Citado, 20 sep, 2014]. Disponible de World Wide Web: [http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202014/Tarifa ESSA_201409.pdf](http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202014/Tarifa_ESSA_201409.pdf)

[26] BACA CURREA, Guillermo. Ingeniería económica 8 Ed. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 2001.

[27] BANCO DE LA REPÚBLICA. Tasas de interés. [Citado, 20 Sep, 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://www.banrep.gov.co/es/tasas-interes>.

BIBLIOGRAFÍA

- ALIBABA.COM. Kafuter thermal electrically conductive adhesive. [Citado 1 Jun,2014] Disponible de World Wide Web: [http://kafuter.en.alibaba.com/product/658364000-219246453/Hot Sell in INDIA LED Bulbs Kafuter 5202 Thermal Electrically Conductive Adhesive.html](http://kafuter.en.alibaba.com/product/658364000-219246453/Hot_Sell_in_INDIA_LED_Bulbs_Kafuter_5202_Thermal_Electrically_Conductive_Adhesive.html)
- BACA CURREA, Guillermo. Ingeniería económica 8 Ed. Bogotá: Fondo Educativo Panamericano, 2001.
- BALBIS MOREJÓN, Milén. TOVAR OSPINO Iván Rafael. BALAGUERA MANTILLA Jorge Eliécer. Energía solar térmica. Barranquilla: Corporación universitaria de la costa, 2009. 87p.
- BANCO DE LA REPÚBLICA. Tasas de interés. [Citado, 20 sep,2014]. Disponible de World Wide Web: <http://www.banrep.gov.co/es/tasas-interes>.
- BECKMAN, William A. DUFFIE, John A. Solar engineering of thermal processes. Mexico: Prentice Hall, 1997.P.3-46,295-307.
- BITRISH PETROULEUM COMPANY. BP Statistical Review of World Energy: 2013 Report [Online] Londres, Inglaterra: 2013 [Citado 20 nov, 2013]. Disponible de World Wide Web: < <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/statistical-review-of-world-energy-2013.html>>
- BUREAU VERITAS FORMACIÓN, MÉNDEZ MUÑIZ, Javier María. CUERVO GARCÍA, Rafael. Energía solar térmica. Madrid: Fundación Confemetal, 2009.P.17- 77.
- CHARALAMBOUS, P.G. ed al. Photovoltaic thermal collectors: A review. London: London South Bank University, 2006.
- CIESE.ORG. Trópicos terrestres [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 14 jul, 2014]. Disponible de World Wide Web: <http://ciese.org/ciberaprendiz/latylong/tropicos.htm>

- DE VRIES, Douwe. Design of a photovoltaic/thermal combi-panel. Eindhoven: Eindhoven University Press, 1998.P. 9-100.
- DEWITT, David P. INCROPERA, Frank P. Fundamentals of heat and mass transfer. Estados Unidos de América: John Willey and sons,2011.P.111-228,981.
- ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. Tarifas 2014. [Citado, 20 sep, 2014]. Disponible de World Wide Web: http://www.essa.com.co/site/Portals/14/Docs/Tarifas/tarifas%202014/Tarifa ESSA_201409.pdf
- ENERGIANOW.com. Componentes de un sistema fotovoltaico [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 20 nov, 2013] .Disponible de World Wide Web: http://www.energianow.com/Instructivos/Componentes_Sistema_Fotovoltaico.pdf
- GLOWACKI, Eric D. Organic solar cells. New York: Department of chemical engineering University of Rochester, 2012.
- INSTITUTO GEÓGRAFICO AGUSTÍN CODAZZI. Latitud y longitud de Bucaramanga [Citado, 15 jun,2014] Disponible de World Wide Web: <http://www.igac.gov.co/>
- INSTITUTO VALENCIANO DE LA EDIFICACIÓN. Productor y materiales: propiedades de aislantes térmicos para rehabilitación térmica. Valencia: 2011.
- KIM, Jin-Hee.Kim, Jun-Tae. The experimental performance of an unglazed PVT collector with two different absorber types. Budaen-dong: *Kongju National University, 2012.*
- MARVARK, Tom. CASTAÑER Luis. Practical handbook of photovoltaics fundamentals and applications. Estados Unidos de América: El Sevier.
- MINISTERIO DE AMBIENTE REPUBLICA NACIONAL DE COLOMBIA. Atlas solar de radiación en Colombia. [Online] Bogotá, Colombia: 2005

[Citado 10 oct, 2013]. Disponible de World Wide Web: <
http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/0-Primera_Parte.pdf>

- MOTT, Robert .Mecánica de Fluidos. Estados Unidos de América: Pearson Education, 2006.
- ORBEGOZO, Carlos. ARIVILCA, Roberto. Energía solar fotovoltaica. Manual técnico para instalaciones domiciliarias. Perú: Green Energy Consultoría y Servicios SRL.
- PAREJA APARICIO, Miguel. Radiación solar y su aprovechamiento. Madrid: Marcombo,2010.
- PILATOWSKY FIGUEROA, Isaac. MARTINEZ STREVEL, Rodolfo. Sistemas de calentamiento solar de agua: una guía para el consumidor .México: Editorial Trillas, 2009.
- SOCIALESDIGITAL.WORDPRESS.COM Latitud y longitud terrestres [Online]. s.l=s.n,s.f. [Citado 13 jul, 2014] Disponible de World Wide Web: <http://socialesdigital.wordpress.com/ciencias-sociales-1%C2%BA-esocriterios-de-evaluacion/1-coordenadas-geograficas-longitud-y-latitud-como-localizar-un-lugar-concreto-en-la-superficie-terrestre-los-husos-horarios/>
- ZONDAG H.A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Petten: Energy Research Centre of the Netherlands, 2011.
- ZONDAG H.A. The yield of different combined PV-thermal collector design Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2003.
- ZONDAG H.A. The thermal and electrical yield of a PV-thermal collector Eindhoven: Eindhoven University of Technology, 2000.

ANEXOS

ANEXO A. COMPORTAMIENTO REAL RESPETO AL TEÓRICO EN EL TANQUE DE ALMACENAMIENTO PERTENECIENTE AL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

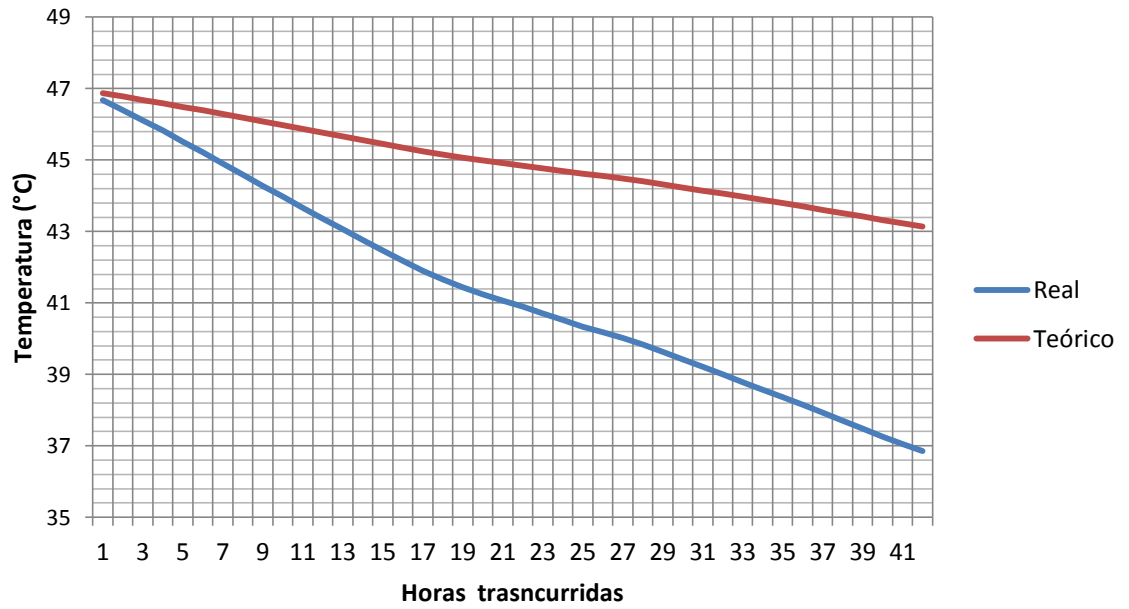
En la sección 8.2 se obtuvo el coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas en el tanque de almacenamiento es $0,25 \left[\frac{W}{K}\right]$, siendo un valor teórico debido a los criterios de diseño y los parámetros establecidos en el modelo matemático. Pero en la construcción del tanque de almacenamiento, la geometría tuvo cambios significativos para mayor facilidad de construcción (de cilíndrico a octogonal), además de cierto huelgo en la tapa, y el respectivo agujero realizado en el centro de la tapa dentro de la cual se introduce la manguera que comunica con la salida del captador solar. Debido a esto se calcula un coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas promedio en el tanque de almacenamiento experimental de acuerdo a la última medición de la temperatura del agua en el tanque el día 6 de agosto, fue de $46,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$, el cual se dejó con la respectiva tapa durante 42 horas, y se procedió a medir la temperatura en el tanque el día 8 de agosto, cuyo valor fue $36,9 \text{ [}^\circ\text{C]}$. Con la ecuación que se presenta a continuación, se calcula la temperatura final del tanque, realizando un análisis transitorio en el tanque de almacenamiento.

$$T_{s+1} = T_s - T_a + e^{\frac{-UA_{tan}*dt}{M*Cp}} + T_a$$

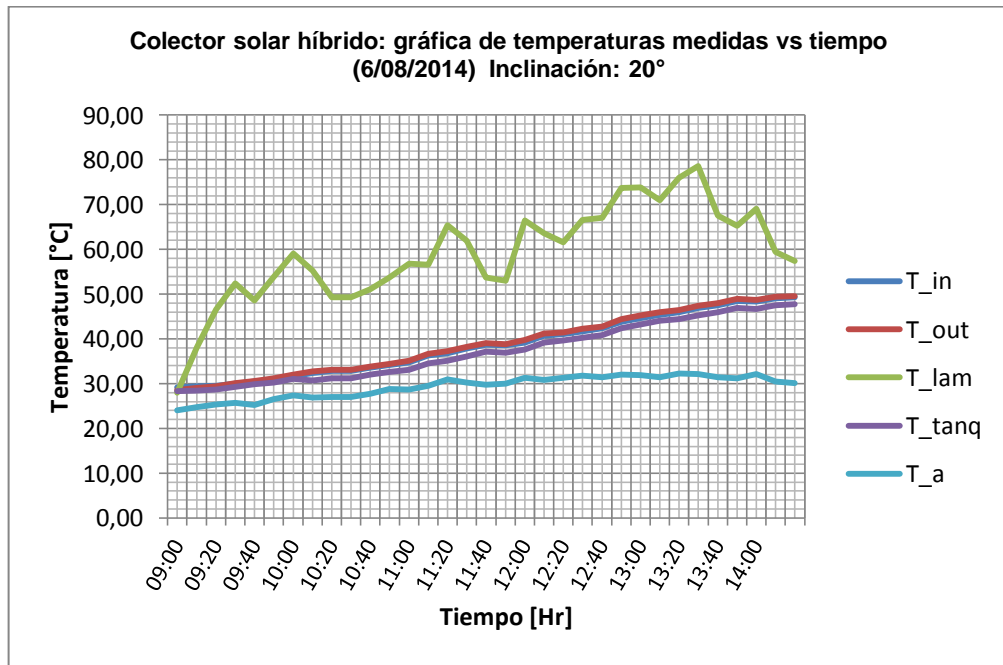
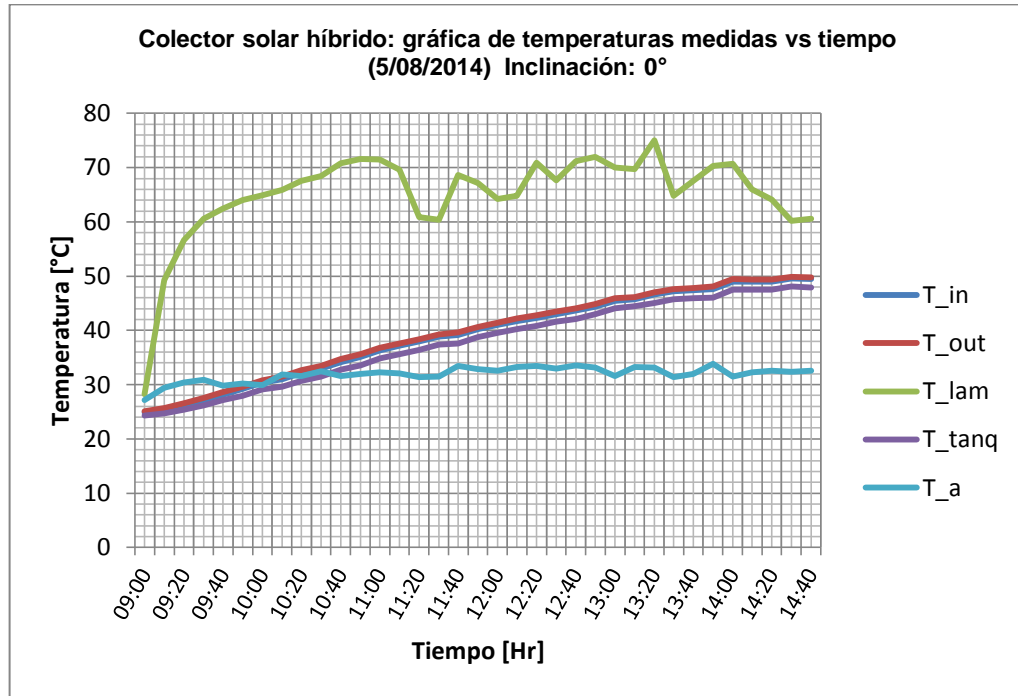
Como resultado se obtiene un coeficiente de transferencia de calor de pérdidas experimental de $0,79 \left[\frac{W}{K}\right]$.

En la siguiente gráfica se observa el decrecimiento de la temperatura respecto al tiempo en número de horas sin operación del colector solar híbrido (térmico y fotovoltaico), en comparación el comportamiento real y teórico de la temperatura.

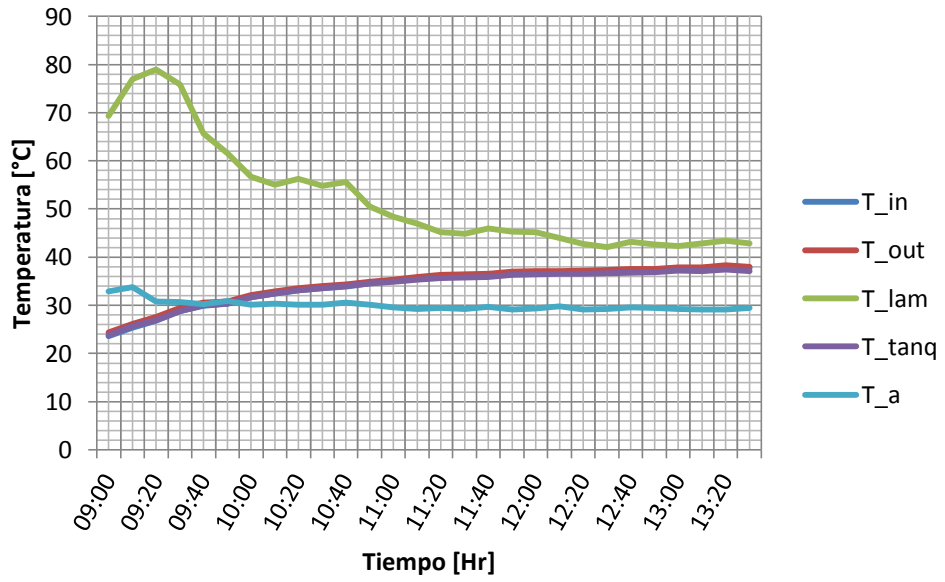
Comportamiento (real y teórico) de la temperatura del agua en el tanque de almacenamiento



ANEXO B. GRÁFICAS DE LAS TEMPERATURAS MEDIDAS EN EL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO) VS TIEMPO DE OPERACIÓN



Colector solar híbrido: gráfica de temperaturas medidas vs tiempo
(6/08/2014) Inclinación: 20°



ANEXO C. PRUEBA REALIZADA EL 8 DE AGOSTO: FUNCIONAMIENTO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO SIN CIRCULACIÓN DE AGUA POR EL CAPTADOR SOLAR

- Se necesita observar los efectos de la eficiencia eléctrica del módulo fotovoltaico sin flujo de agua por los tubos del captador.
- Se midieron los datos de radiación (total y difusa), la temperatura del panel, voltaje y corriente del sistema fotovoltaico (módulo fotovoltaico, batería e inversor).
- Se observa que la carga alterna consume más energía, que cuando está conectada al captador debido a que aumenta la velocidad de flujo.
- La temperatura máxima de módulo fotovoltaico alcanzada durante la prueba fue de 56 °C, porque la irradiación promedio en el intervalo de la medición fue de 287 [W/m²]. La inclinación del captador solar fue de 0 [°].

Energía producida total del módulo fotovoltaico [W-h]	Eficiencia eléctrica [η_{ele}]
102,17	11%

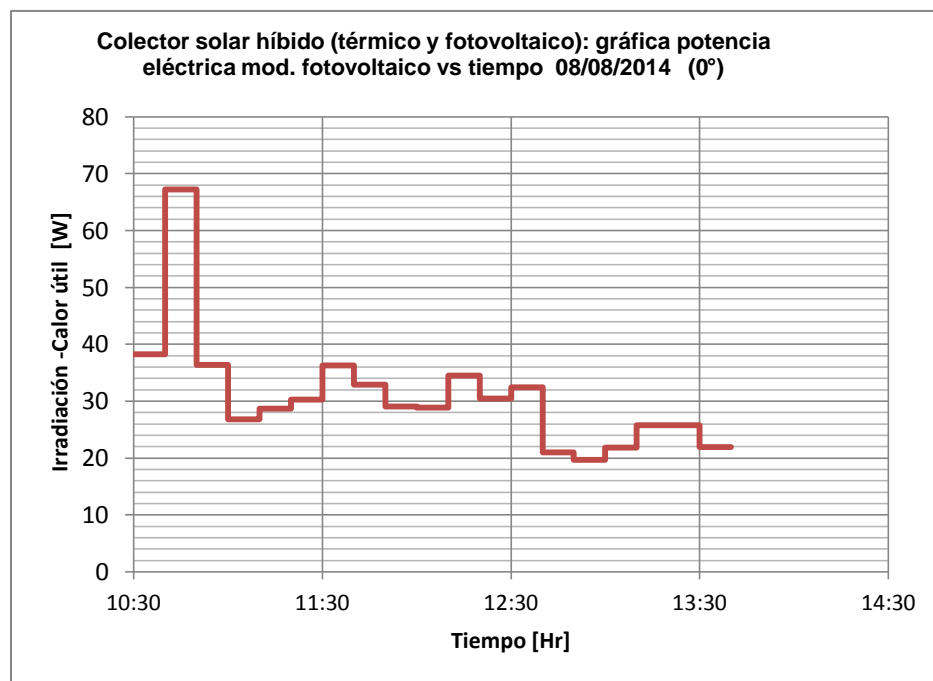


Tabla de resultados de la prueba 8 de agosto, sin circulación de agua por el captador solar

Hora	T_panel	Irradiación (W/m ²)	Energía captada (W-h)	Energía producida Módulo fotovoltaico
10:30	49,28405	346,5088	53,70886	6,38181
10:40	56,66148	631,5568	97,8913	11,19814
10:50	59,46304	347,536	53,86808	6,07157
11:00	57,40856	252,7768	39,1804	4,464417
11:10	56,07004	268,9552	41,68806	4,783648
11:20	56,44358	284,1064	44,03649	5,043254
11:30	57,09728	342,0576	53,01893	6,051156
11:40	57,43969	310,728	48,16284	5,487022
11:50	57,31517	273,92	42,4576	4,840217
12:00	56,47471	271,2664	42,04629	4,814541
12:10	56,59922	324,5952	50,31226	5,757281
12:20	57,93774	288,3008	44,68662	5,077628
12:30	57,93774	306,7904	47,55251	5,403272
12:40	57,25292	232,9176	36,10223	4,117047
12:50	56,10117	196,88	30,5164	3,501146
13:00	53,89105	182,4992	28,28738	3,28294
13:10	52,77043	201,2456	31,19307	3,641148
13:20	52,80156	237,8824	36,87177	4,303331
13:30	52,80156	237,6256	36,83197	4,298686
13:40	52,55253	201,5024	31,23287	3,64988

Se comprobó que sin circulación de agua dentro del captador solar híbrido, la eficiencia eléctrica disminuye respecto a la eficiencia alcanzada por el captador solar con circulación a 0° de inclinación, porque bajo esta condición se pierde el efecto refrigerante del agua.

**ANEXO D. MEDICIONES REALIZADAS POR LAS TERMOCUPLAS,
PIRÁNÓMETROS, VOLTÍMETROS Y PINZAS AMPERIMÉTRICAS AL
COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)**

5 de Agosto del 2014						
T_ent [°C]	T_sal [°C]	T_panel [°C]	T_tan [°C]	T_a[°C]	Radiación global (W/m ² *Δt)	Radiación difusa (W/m ² *Δt)
24,91	25,07	28,21	24,35	27,15	282,54	129,50
25,38	25,72	49,32	24,72	29,42	644,90	150,49
26,09	26,53	56,66	25,35	30,42	720,08	127,81
27,12	27,53	60,55	26,16	30,89	706,35	106,94
28,15	28,61	62,45	27,15	29,77	716,36	100,54
29,21	29,64	63,98	27,99	30,17	719,46	102,61
30,36	30,76	64,88	29,08	29,95	737,33	108,81
30,98	31,48	65,84	29,64	31,85	764,73	117,62
32,13	32,66	67,59	30,73	31,54	771,12	123,52
32,97	33,47	68,49	31,45	32,51	817,60	130,15
34,19	34,72	70,79	32,72	31,60	805,51	127,53
35,12	35,62	71,57	33,60	31,98	757,69	133,56
36,27	36,83	71,51	34,78	32,29	708,60	144,91
37,21	37,61	69,61	35,65	32,10	469,04	138,58
38,02	38,36	60,83	36,43	31,42	512,61	185,81
38,82	39,23	60,37	37,36	31,45	775,31	252,93
39,17	39,60	68,65	37,61	33,47	680,81	269,27
40,19	40,66	67,15	38,73	32,85	554,66	266,95
41,00	41,41	64,23	39,54	32,54	543,48	258,47
41,69	42,16	64,82	40,23	33,25	843,57	295,50
42,34	42,81	70,89	40,85	33,41	610,43	248,06
43,00	43,49	67,62	41,56	32,97	741,04	248,49
43,65	44,09	71,23	42,12	33,53	775,85	252,07
44,40	44,89	72,01	43,00	33,19	733,29	256,00
45,46	45,95	70,02	44,09	31,60	557,97	251,42
45,74	46,14	69,70	44,43	33,25	816,61	253,98
46,61	47,04	75,06	45,08	33,16	482,07	275,17
47,26	47,60	64,82	45,74	31,39	595,88	210,75
47,39	47,82	67,59	45,89	31,98	581,36	229,74
47,60	48,07	70,33	46,08	33,88	713,60	231,20
48,94	49,44	70,73	47,51	31,51	488,34	212,51
48,94	49,35	66,00	47,48	32,23	453,56	216,04
49,00	49,35	64,10	47,48	32,60	401,00	206,93
49,56	49,88	60,15	48,10	32,41	373,44	200,21

6 de Agosto del 2014						
	T_sal [°C]	T_panel [°C]	T_tan [°C]	T_a [°C]	Radiación global (W/m ² *Δt)	Radiación difusa (W/m ² *Δt)
29,14	28,58	27,99	28,33	24,10	349,40	111,06
29,36	28,99	38,14	28,46	24,82	567,11	105,72
29,58	29,36	46,51	28,65	25,35	657,78	114,90
29,98	30,08	52,40	29,30	25,75	456,14	97,37
30,45	30,61	48,63	29,92	25,22	580,64	105,14
30,89	31,17	53,86	30,30	26,50	749,31	123,30
31,70	32,04	59,03	31,04	27,43	463,06	125,06
32,38	32,75	55,23	30,70	26,90	350,55	145,88
32,82	33,07	49,32	31,20	26,96	445,38	185,26
32,82	33,07	49,32	31,20	26,96	475,51	210,24
33,53	33,81	51,12	32,04	27,77	569,57	256,34
34,16	34,47	53,70	32,57	28,83	570,49	262,50
34,72	35,12	56,82	33,10	28,71	516,08	262,51
36,30	36,65	56,54	34,50	29,58	876,42	293,10
36,80	37,27	65,41	35,09	30,95	598,23	225,22
37,86	38,26	61,92	36,09	30,26	276,33	165,34
38,73	39,11	53,70	37,11	29,74	377,41	195,46
38,54	38,79	52,96	36,93	30,02	861,57	276,57
39,23	39,73	66,40	37,58	31,26	453,13	213,46
40,72	41,16	63,57	39,20	30,79	526,03	273,71
41,07	41,47	61,55	39,60	31,32	659,55	277,31
41,72	42,22	66,56	40,23	31,76	680,85	299,99
42,37	42,81	67,06	40,88	31,39	1029,77	502,31
43,87	44,40	73,69	42,40	32,07	732,86	489,86
44,65	45,21	73,84	43,21	31,88	787,66	617,46
45,42	45,95	71,01	44,02	31,39	651,52	553,56
45,92	46,48	76,02	44,40	32,23	935,53	898,08
46,89	47,45	78,67	45,30	32,10	941,81	482,68
47,51	47,95	67,49	45,98	31,48	413,97	159,87
48,47	48,94	65,22	46,95	31,20	499,03	212,18
48,32	48,75	69,05	46,67	32,13	751,82	259,73
49,10	49,44	59,46	47,54	30,51	269,34	135,78
49,25	49,56	57,41	47,70	30,17	179,69	160,84

15 de Agosto del 2014						
T_ent [°C]	T_sal [°C]	T_panel [°C]	T_tan [°C]	T_a[°C]	Radiación global (W/m ² *Δt)	Radiación difusa (W/m ² *Δt)
23,63	24,35	69,36	23,76	32,94	781,57	159,17
25,38	26,19	76,93	25,66	33,75	887,42	145,37
26,81	27,62	78,92	26,90	30,79	882,85	206,72
28,77	29,46	75,84	28,83	30,64	693,21	220,02
29,95	30,51	65,69	30,02	30,26	504,21	257,98
30,36	30,79	61,61	30,39	30,86	462,19	254,90
31,67	32,10	56,69	31,67	30,08	361,74	217,61
32,41	32,85	55,04	32,44	30,39	369,78	225,50
33,13	33,56	56,23	33,16	30,11	402,83	215,97
33,53	33,97	54,86	33,53	30,11	382,92	228,30
33,94	34,34	55,57	33,97	30,58	416,31	220,89
34,56	34,90	50,53	34,53	30,08	239,47	167,65
35,12	35,37	48,38	34,87	29,55	236,77	158,27
35,62	35,87	46,92	35,37	29,24	204,59	142,26
36,05	36,30	45,21	35,71	29,49	196,63	138,84
36,18	36,40	44,83	35,81	29,27	187,04	132,62
36,27	36,49	45,95	35,93	29,67	228,74	159,35
36,74	36,96	45,24	36,30	29,18	182,95	131,91
36,89	37,14	45,14	36,46	29,30	189,31	140,28
36,89	37,08	43,99	36,58	29,77	160,86	121,50
37,02	37,21	42,72	36,49	29,11	143,25	105,03
37,18	37,33	42,06	36,65	29,27	124,91	89,75
37,27	37,49	43,18	36,77	29,61	165,13	118,76
37,36	37,58	42,68	36,89	29,42	144,79	102,66
37,74	37,92	42,31	37,21	29,21	123,68	91,95
37,74	37,92	42,90	37,11	29,11	158,77	113,09
38,11	38,30	43,43	37,46	29,08	153,77	106,28
37,74	37,95	42,81	37,11	29,49	133,97	97,88

5 de Agosto del 2014					
Voltaje Panel (V)	Corriente panel (A)	Voltaje bateria (V)	Corriente bateria (A)	Voltaje carga (V) Inversor	Corriente carga (A) Inversor
13,1	1,5	13	0,6	13	2,1
15,7	4,8	14,2	3	14,2	1,8
17,7	5	14,2	3,2	14,2	1,8
17,2	4	14	1,2	14	1,8
17,4	3,8	14,6	0,9	14,6	2
17,3	3,6	14,4	2,8	14,4	1,9
16,5	3,6	14	1,7	14	1,6
16,8	3,4	14,2	1,3	14,2	1,8
16,8	3,6	14	1,6	14	1,8
16,8	3,6	14	3,8	14	1,8
16,3	4,5	14,1	3,1	14,1	2
16,8	3,8	14	1,8	14	1,9
16,2	4,4	14,4	2,4	14,4	2
15,5	4,6	14,2	2,4	14,2	1,8
14,9	3,6	14,2	2	14,2	1,9
14,9	4	14,1	2,2	14,1	1,8
16,7	4,2	14,1	3,1	14,1	1,9
15,7	4,3	14	2,2	14	1,76
15,2	4	14,1	2,3	14,1	2
15,6	4,2	14,2	2,1	14,2	1,7
16,2	7	14,2	4,9	14,2	2,2
15,7	4,2	14	2,1	14	1,8
16,4	3,8	14,1	2,8	14,1	1,9
16	4,5	14,2	2,5	14,2	1,8
15,8	4	14	2	14	1,4
14,3	2,7	13,4	0,7	13,4	1,7
16,8	5,2	14,1	5,3	14,1	2,2
14,5	4,1	13,8	2,9	13,8	1,6
16,3	4,3	14,2	2,5	14,2	1,6
16,8	2,7	14,1	1,6	14,1	1,7
16,4	3	14,2	1,8	14,2	1,8
14,2	2,4	13,7	0,4	13,7	1,6
15,6	4,1	14,2	2,2	14,2	1,7
16,5	3,9	14,1	1	14,1	1,7
14,1	1,4	13,4	0,9	13,4	2,2
14,6	2,4	13,7	0,4	13,7	1,8
14,2	3,2	13,6	1	1	2,2
14,2	2,3	13,5	0,3	13,5	1,8
14	1,8	13,3	0,2	13,3	2
14	2,1	13,3	0	13,3	1,8
14	1,8	13,3	0,4	13,3	2,2
13,9	2,6	13,2	0,3	13,2	1,9
13,8	1	13,1	0,9	13,1	1,8
13,8	1	13	1	13	2

6 de Agosto del 2014					
Voltaje Panel (V)	Corriente panel (A)	Voltaje bateria (V)	Corriente bateria (A)	Voltaje carga (V) Inversor	Corriente carga (A) Inversor
13,7	0,8	13	1,2	13	1,8
13,6	3,5	13,4	1,6	13,4	2
17,7	3	14,5	1,5	14,5	1,5
14,5	3,8	13,7	1,6	13,7	1,9
13,8	0,9	13,1	1	13,1	1,9
14,9	2,8	13,6	1,5	13,6	1,8
13,9	1,6	13,2	0,3	13,2	1,9
14,1	1,7	13,4	0,2	13,4	1,9
14,2	2,1	13,4	0,3	13,4	2
14,6	4,1	13,7	2,3	13,7	1,7
16,8	4,8	14	1,6	14	2
14,2	3,7	13,5	1,4	13,5	1,6
14,6	3,6	13,9	1,8	13,9	2,3
19,5	2,2	13,2	1,6	13,2	1,8
19,5	2,2	13,2	1,6	13,2	1,8
14,5	2,7	13,7	0,9	13,7	2,2
14,5	3,7	14,3	0,8	14,3	2,3
20,4	0,9	13,2	1,1	13,2	2
14	2,3	13,3	0,1	13,3	2,1
14,2	3,7	13,2	1,2	13,2	1,7
15,8	3,4	14,2	1,6	14,2	1,9
14,2	2,5	13,6	0,5	13,6	1,6
20	0,8	13,5	1,1	13,5	1,8
19,4	1	13,2	1	13,2	1,8
14,2	2,7	13,5	0,5	13,5	2,2
14,2	2,1	13,5	0	13,5	2
19,1	0,7	13,3	1,4	13,3	1,9
17	0,6	13,4	0,8	13,4	1,4
14,7	6,5	13,9	4,5	13,9	2
16,6	3,4	14,2	2	14,2	2
14,2	2,7	13,5	0,5	13,5	2,2
16,8	4,1	14,1	3	14,1	1,7
14,4	3,4	13,7	0,8	13,7	2,4
13,5	1,1	13	0,7	13	1,8
13,6	0,6	12,9	1,4	12,9	2

15 de Agosto del 2014					
Voltaje Panel (V)	Corriente panel (A)	Voltaje bateria (V)	Corriente bateria (A)	Voltaje carga (V) Inversor	Corriente carga (A) Inversor
16,2	5	14	3,6	14	1,8
19,5	0,4	13,2	1,4	13,2	1,9
19,7	6,6	13,5	4,7	13,5	1,9
19,6	0,7	13,1	5,3	13,1	1,9
19,6	0,6	13,4	1,2	13,4	1,8
19,5	0,9	13,5	1	13,5	1,9
14,5	3,6	13,8	1,8	13,8	1,8
14,4	2,9	13,7	0,9	13,7	2
14,1	2,6	13,4	0,7	13,4	2
14,5	2,6	13,7	0,7	13,7	1,9
20,5	0,3	13,4	1,5	13,4	1,8
14,4	2,8	13,6	0,9	13,6	1,8
20	0,9	13,2	1	13,2	1,9
14	1,9	13,3	0	13,3	1,9
13,9	1,6	13,2	0,3	13,2	2,0
13,9	1,6	13,1	0,3	13,1	1,9
13,8	1,6	13,1	0,4	13,1	2
13,7	1,5	13	0,5	13	2
13,8	1,7	13	0,3	13	2
13,7	1,6	13	0,4	13	2,0
13,8	1,7	13	0,4	13	2,1
13,7	1,4	13	0,5	13	1,9
13,7	1,1	13	0,7	13	1,8
13,7	1,1	13	0,7	13	1,8
13,6	1,6	13	0,4	13	2
13,6	1,2	13	0,6	13	1,8
13,7	1	13	1	13	2
13,7	1,4	13	0,6	13	2
13,7	1,3	13	0,8	13	2,1
13,7	1,2	13	0,9	13	2
13,7	1,1	13	0,8	13	1,9
13,7	1,2	13	0,9	13	2,1
13,7	1	13	0,8	13	1,8

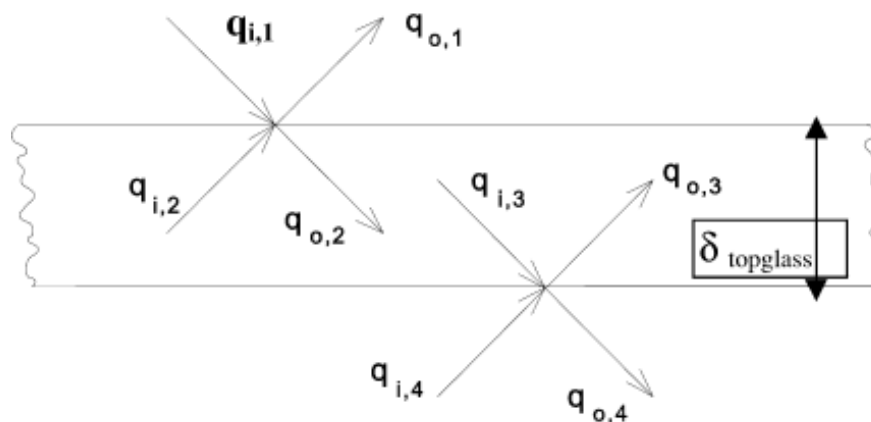
ANEXO E. ABSORCIÓN Y TRANSMISIÓN DE LA RADIACIÓN DEL COLECTOR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)

En el estudio de los colectores solares, las propiedades ópticas son una parte muy importante, ya que la radiación que incide sobre el colector sufre fenómenos tanto de transmisión, absorción y reflexión que pueden beneficiar o perjudicar el desempeño del colector solar.

Para determinar cuanta radiación llega al colector solar híbrido se necesita de un modelo matemático óptico que permita hallar la fracción que se transmite y absorbe llamada tau-alpha ($\tau\alpha$). El cual se toma como un valor constante que se utiliza en el modelo matemático del colector solar.

El método descrito se llama el método de la radiación neta. El método resuelve el balance de energía que fluye en cada interface del colector, en este caso el colector híbrido.

Tomando una capa de vidrio, el modelo matemático tiene las siguientes variables:



$$q_{i,1} = G$$

$$q_{o,1} = R_{1,2} * q_{i,1} + (1 - R_{1,2}) * q_{i,2}$$

$$q_{i,2} = q_{o,3} * \exp \left[-\frac{K d_{top, glass}}{\cos \theta} \right]$$

$$q_{o,2} = (1 - R_{1,2}) * q_{i,1} + R_{1,2} * q_{i,2}$$

Los valores $R_{1,2}$ se hallan por medio de las ecuaciones de Fresnell:

$$R = \frac{1}{2} * (R_{\rightarrow} + R_{\uparrow})$$

$$R = \frac{1}{2} * \left(\left(\frac{(\sin^2)[\theta_i - \theta_r]}{(\sin^2)[\theta_i + \theta_r]} \right) + \left(\frac{(\tan^2)[\theta_i - \theta_r]}{(\tan^2)[\theta_i + \theta_r]} \right) \right)$$

Donde K es el coeficiente de extinción, y n es el índice de refracción, los ángulos θ pueden ser determinados por las relaciones de Snell:

$$\frac{\sin \theta_r}{\sin \theta_i} = \frac{n_i}{n_r}$$

El proceso descrito anteriormente se debe aplicar para cada una de las capas del colector dando como resultado un sistema de ecuaciones que se puede resolver por métodos matriciales.

Tanto K como n son dependientes de la longitud de onda, las ecuaciones se resuelven por cada intervalo de longitud de onda y luego se integran respecto a todo el espectro solar. Se asume que la radiación solar no tiene polarización neta, esto quiere decir que la luz incidente se divide en polarizaciones: 50% paralela y 50% perpendicular. Tau-alpha ($\tau\alpha$) se determina para cada modo separadamente (paralelo y perpendicular) y luego los resultados se suman.

Para efectos de cálculo se asume reflexión especular, luego la reflexión difusa no se toma en cuenta. Un aspecto que genera complicaciones es que la superficie del panel no es homogénea y que tiene distintas partes, como la malla de

contacto superior, las mismas celdas fotovoltaicas y el espacio que se deja entre las celdas para efectos de dilatación térmica. Entonces se debe calcular el valor de Tau-alpha (τ_α) para cada una y se realiza un promedio de los valores resultantes de esas partes, ponderado con cada área respectiva.

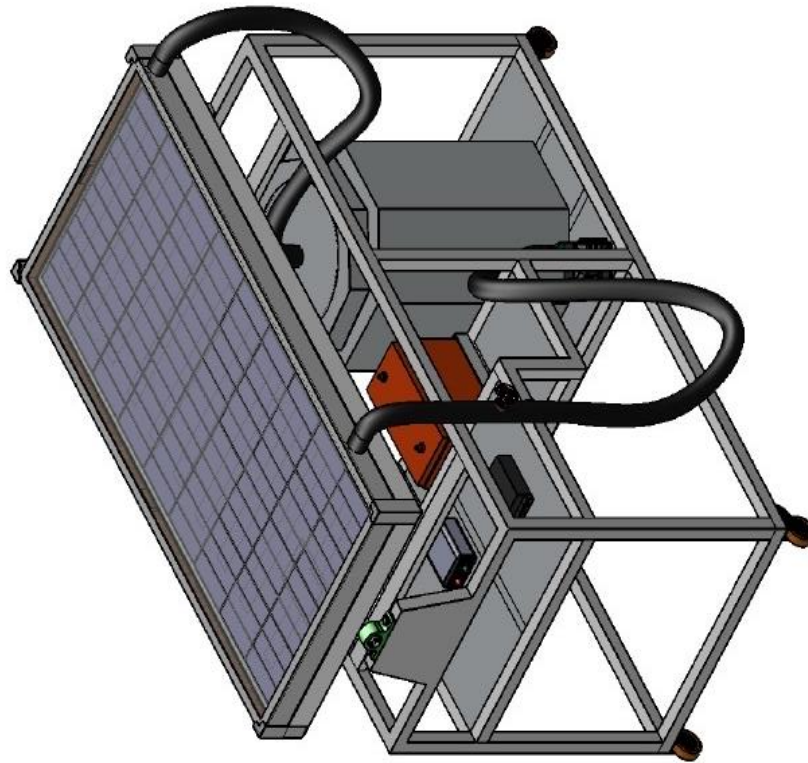
El modelo matemático resulta en una subestimación del valor real de tau-alpha por que para el modelo hay cambio de radiación entre las superficies del material del panel fotovoltaico, hecho que no es posible, sin embargo es una buena estimación.

La siguiente tabla muestra los valores resultantes del estudio óptico realizado a los colectores híbridos donde muestra el producto τ_α para cada concepto de diseño, para los colectores tipo canal se hallan valores de τ_α para el agua en el espectro de radiación estándar.

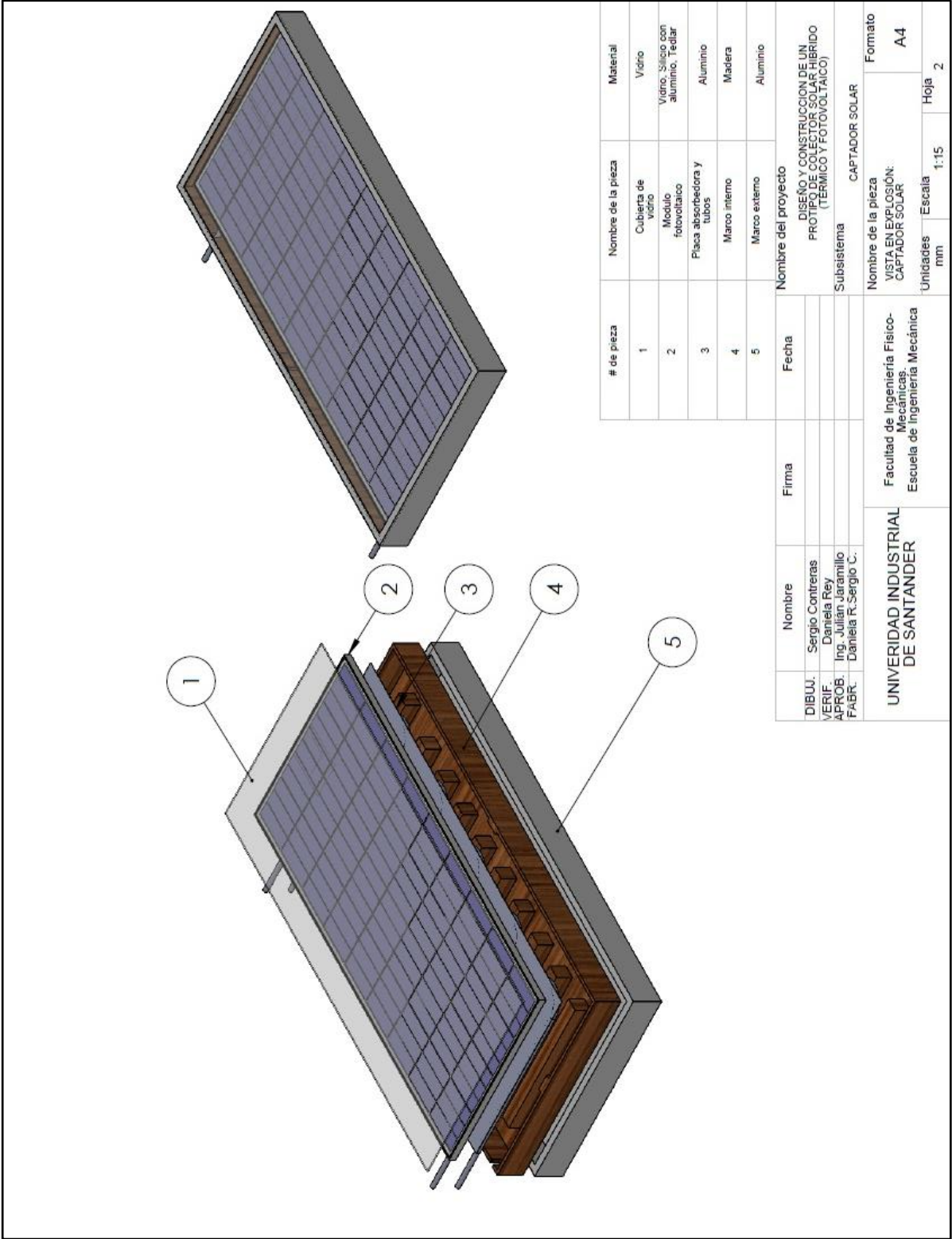
Valores del producto τ_α para distintos conceptos de diseño colectores híbridos.

Design concept	τ_α	$\tau_{\alpha, \text{water}}$	τ_{PV}
Uncovered sheet-and-tube PVT-collector	0.78	–	1
One-cover sheet-and-tube PVT-collector	0.74	–	0.92
Two-cover sheet-and-tube PVT-collector	0.71	–	0.84
Channel above PV	0.62	0.16	0.87
Channel underneath opaque PV	0.74	–	0.92
Channel underneath transparent PV	0.55 first absorber 0.12 second absorber	0.10	0.92
Free flow PVT-collector	0.62	0.17	0.88
Two-absorber PVT-collector (insulated type)	0.52 first absorber 0.12 second absorber	0.16	0.87
Two-absorber PVT-collector (non-insulated type)	0.52 first absorber 0.11 second absorber	0.14 upper channel 0.013 lower channel	0.87

ANEXO F. PLANOS CAD DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTVOLTAICO)



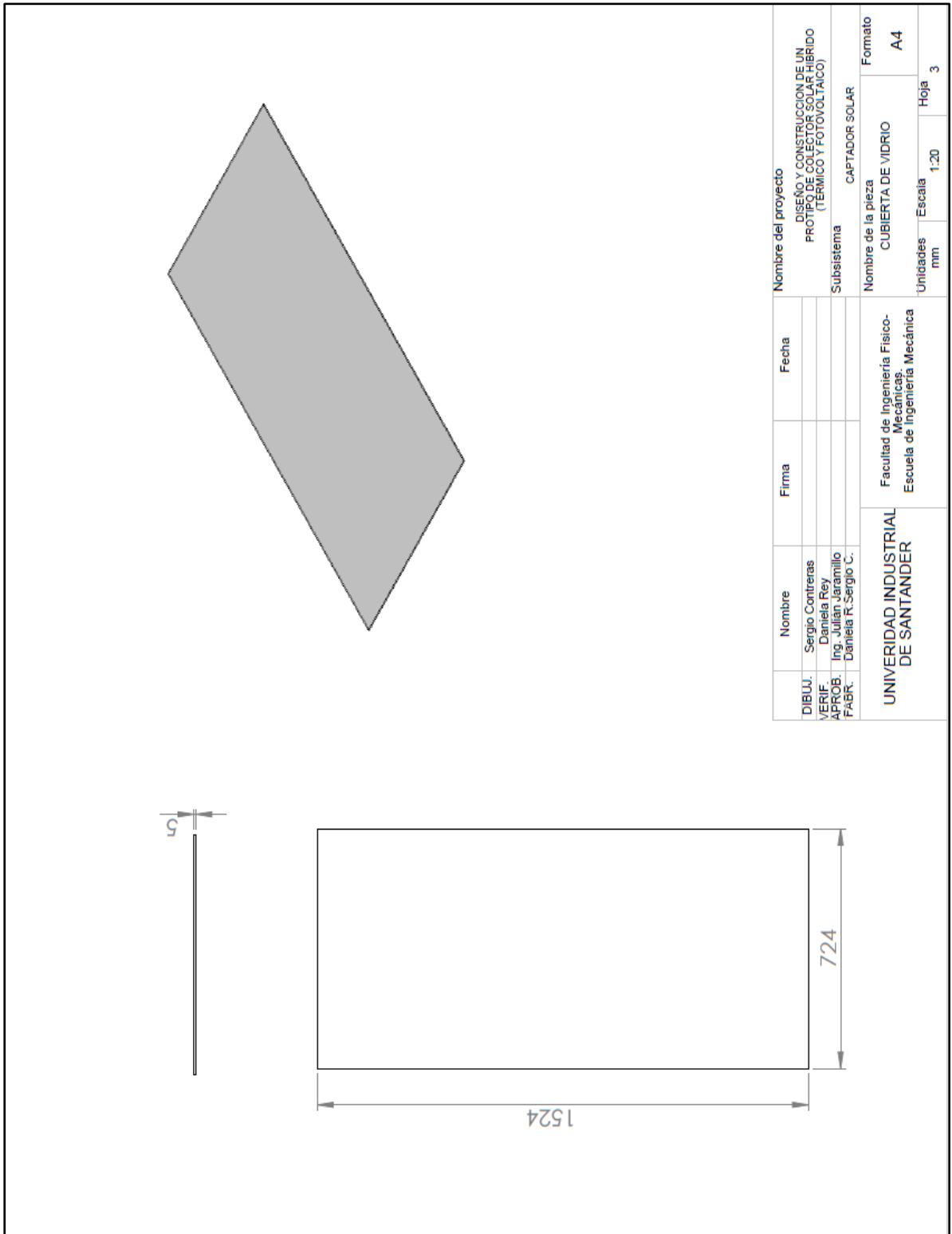
DIBUJ:	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto
VERIF:	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
APROB:	Daniela Rey			PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO
PAQR:	Ing. Julian Jaramillo			(TÉRMINICO Y FOTOVOLTAICO)
	Daniela R. Sergio C.			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica		Nombre de la pieza
				COLECTOR SOLAR HIBRIDO
				Formato
				A4
				Unidades
				mm
				Escala
				1:15
				Hoja
				1



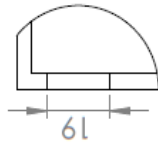
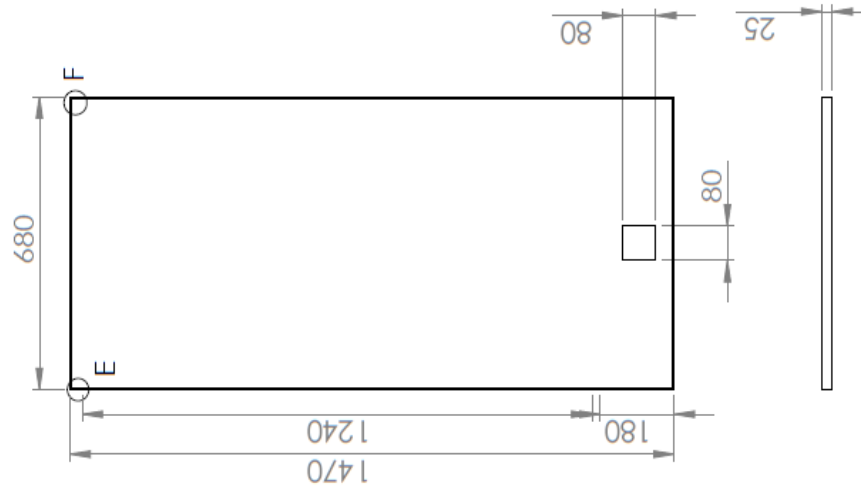
# de pieza	Nombre de la pieza	Material
1	Cubierta de vidrio	Vidrio
2	Modulo fotovoltaico	Vidrio, Silicio con aluminio, Teflar
3	Placa absorbedora y tubos	Aluminio
4	Marco interno	Madera
5	Marco externo	Aluminio

Nombre del proyecto		DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE CAPTADOR SOLAR (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)
Subsistema		CAPTADOR SOLAR
Nombre de la pieza		VISTA EN EXPLOSION: CAPTADOR SOLAR
Formato		A4
Unidades		mm
Escala		1:15
Hoja		2

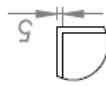
DIBUJ:	Sergio Contreras	Firma	
VERIF:	Daniela Rey		
APROB:	Ing. Julian Jaramillo		
PABR:	Daniela R. Sergio C.		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica Escuela de Ingeniería Mecánica	



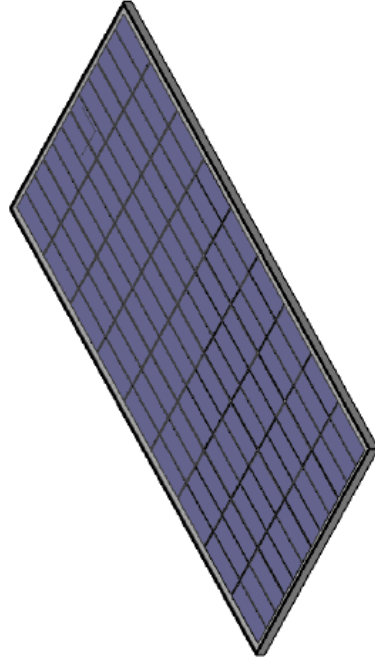
Nombre del proyecto		Fecha	
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE CUBIERTA DE VIDRIO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)			
Subsistema		CAPTADOR SOLAR	
Nombre de la pieza		Formato	
CUBIERTA DE VIDRIO		A4	
Unidades		Escala	
mm		1:20	
		Hoja	
		3	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica	
DIBUJ.	Sergio Contreras	Firma	
VERIF.	Daniela Pez		
APROB.	Ing. Julián Jaramillo		
FABR.	Daniela R. Sergio C.		



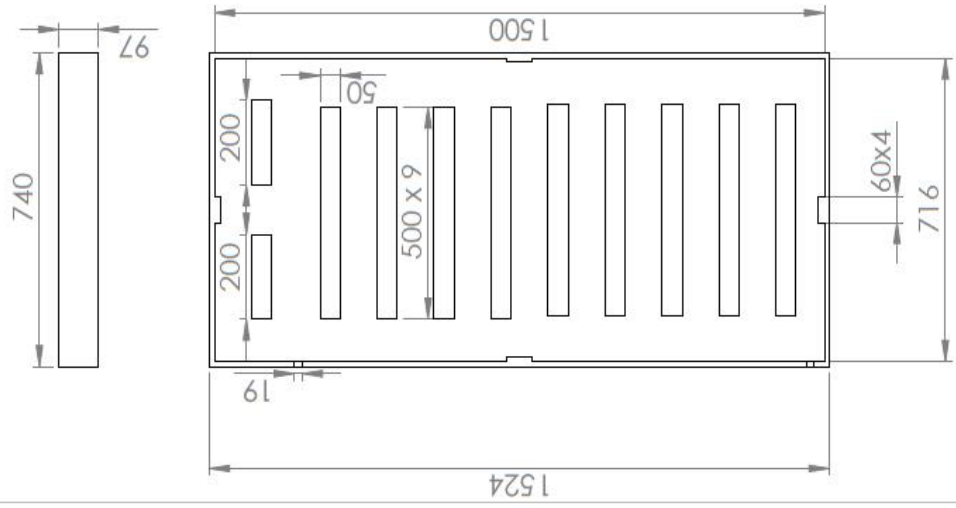
DETALLE E
ESCALA 1 : 2



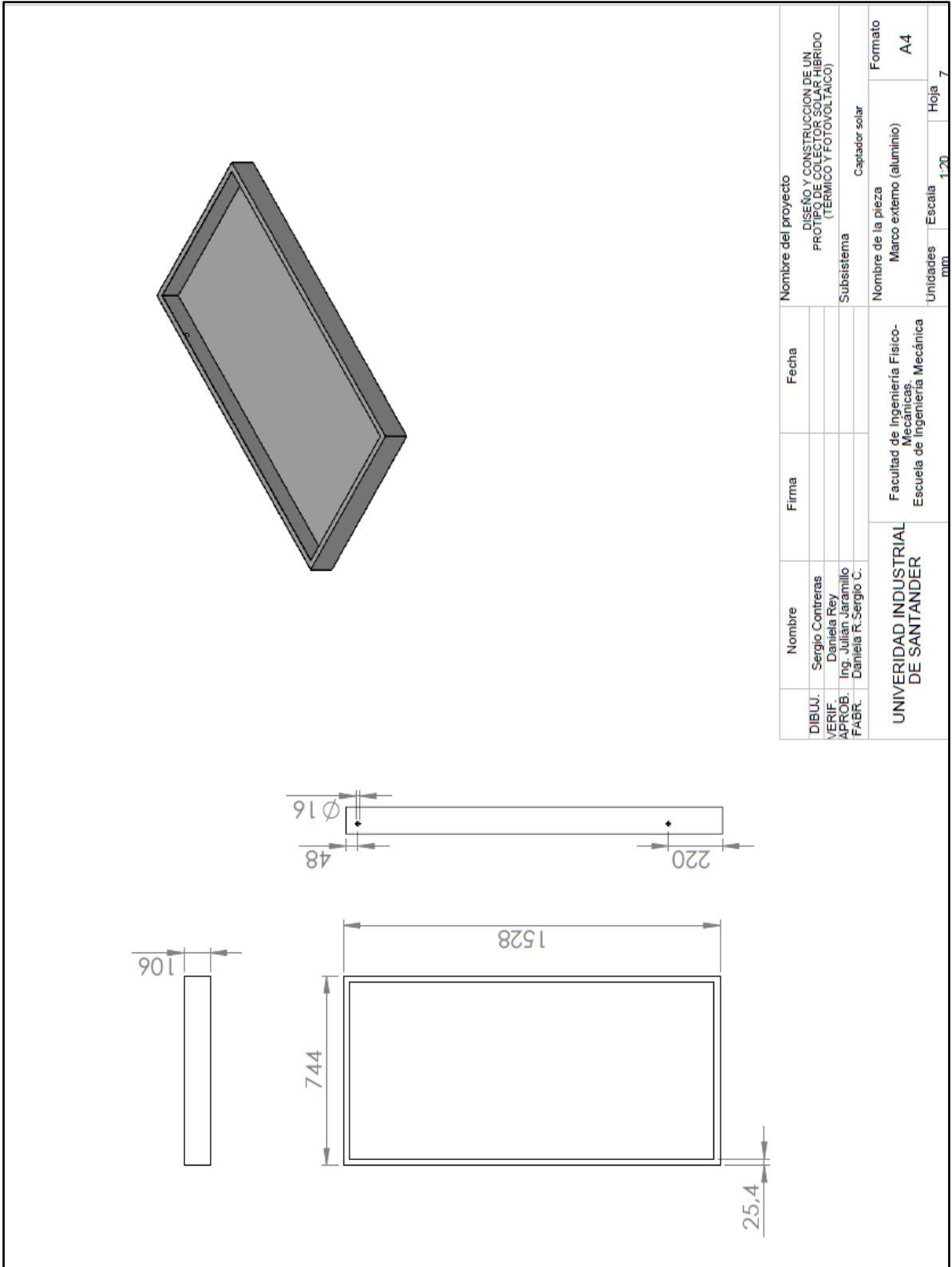
DETALLE F
ESCALA 1 : 5



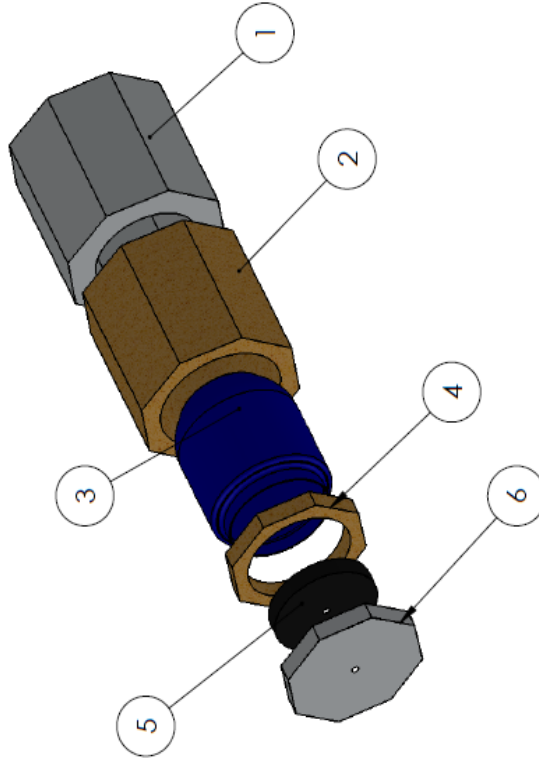
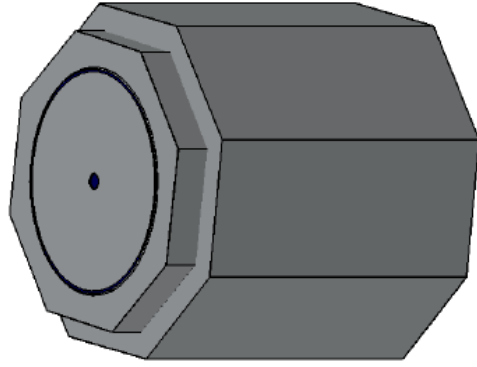
DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto	
VERIF.	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)	
APROB.	Daniela Rey				
FABR.	Ing. Julian Jaramillo Daniela R. Sergio C.				
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Subsistema	CAPTADOR SOLAR
				Nombre de la pieza	Formato
				MODULO FOTOVOLTAICO	A4
				Unidades mm	Hoja
				Escala 1:15	4



DIBUJ. VERIF. APROB. FABR.	Nombre Sergio Contreras Daniela Rey Ing. Julian Jaramillo Daniela R. Sergio C.	Firma	Fecha	Nombre del proyecto DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO) Subsistema CAPTADOR SOLAR
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica		Nombre de la pieza Marco interno (madera) Unidades mm Escala 1:20 Hoja 6
				Formato A4



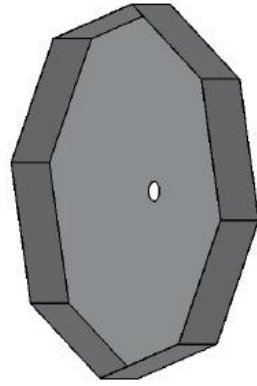
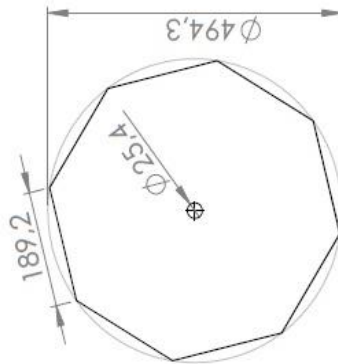
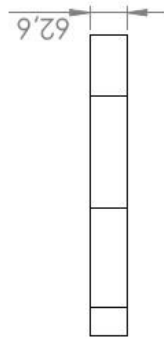
Nombre del proyecto		Fecha	
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)			
Subsistema			
Nombre de la pieza		Formato	
Marco externo (aluminio)		A4	
Unidades		Escala	
mm		1:20	
		Hoja	
		7	
Nombre		Firma	
DIBUJ. Sergio Contreras			
VERIF. Daniela Rey			
APROB. Ing. Julián Jaramillo			
FABR. Daniela R. Sergio C.			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica	



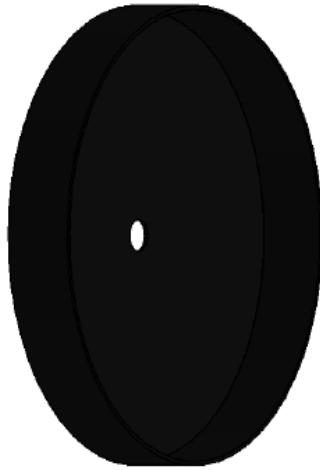
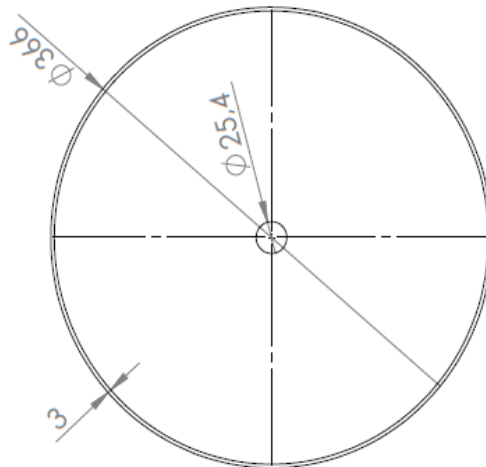
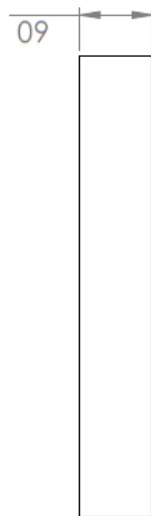
# de pieza	Nombre de la pieza	Material
1	Carcasa inferior	Aluminio
2	Aislamiento inferior	Espuma de poliuretano
3	Tanque plástico	Poliétileno
4	Aislamiento superior	Espuma de poliuretano
5	Tapa plástica	Poliétileno
6	Carcasa superior	Aluminio

DIBUJ.	Nombre	Firma
VERIF.	Sergio Contreras	
APROB.	Daniela Rey	
FABR.	Ing. Julian Jaramillo	
	Daniela R. Sergio C.	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica

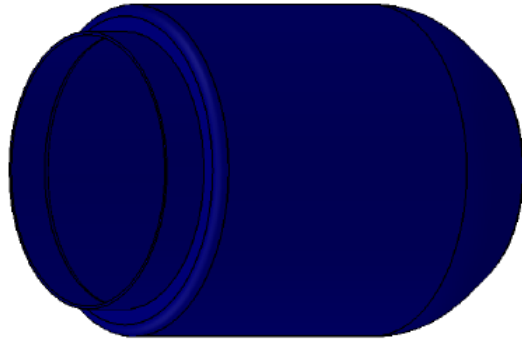
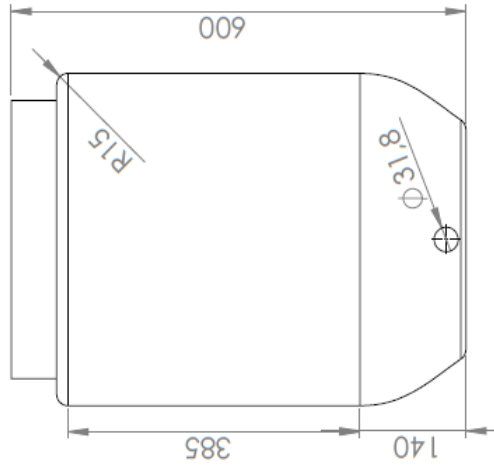
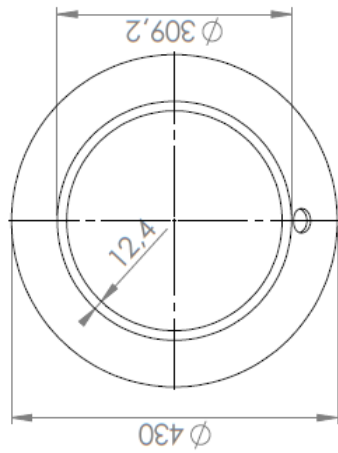
Nombre del proyecto		DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TÉRMINICO Y FOTOVOLTÁICO)
Subsistema		TANQUE DE ALMACENAMIENTO
Nombre de la pieza		VISTA EN EXPLOSIÓN: TANQUE DE ALMACENAMIENTO
Formato		A4
Unidades		mm
Escala		1:20
Hoja		8



DIBUJ.:	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto
VERIF:	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTECTOR DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)
APROB:	Ing. Julian Jaramillo			Subsistema TANQUE DE ALMACENAMIENTO
FABR:	Daniela R. Sergio C.			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica		Nombre de la pieza CARCAZA SUPERIOR (ALUMINIO)
				Formato A4
		Escala 1:8		Unidades mm
				Hoja 9

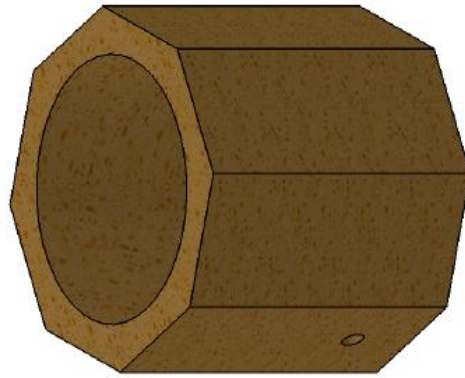
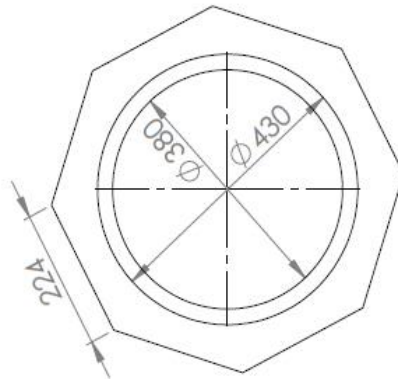
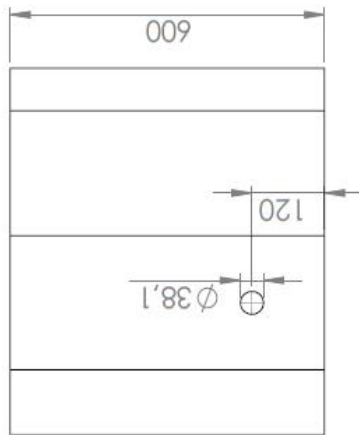


DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto	
VERIF.	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTIPLO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)	
APROB.	Ing. Julian Jaramillo				
FABR.	Daniela R. Sergio C.				
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Subsistema	TANQUE DE ALMACENAMIENTO
				Nombre de la pieza	TAPA PLASTICA
				Formato	A4
				Unidades	mm
				Escala	1:20
				Hoja	10

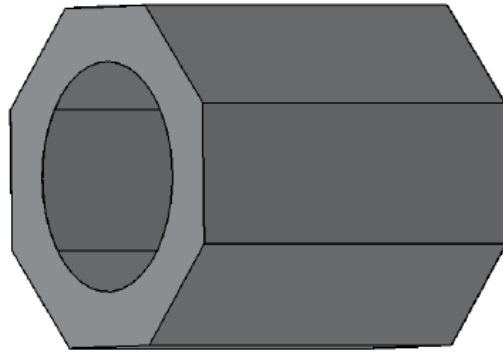
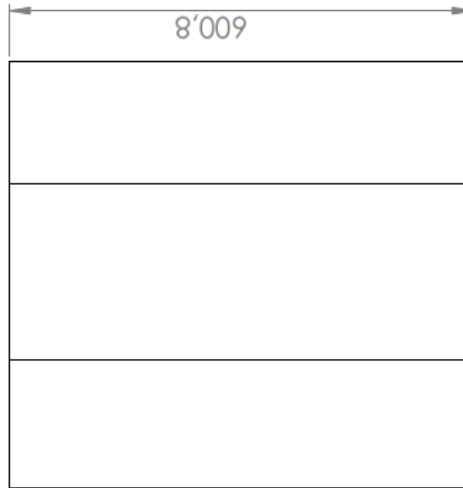
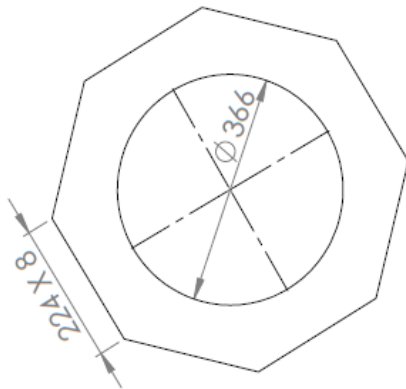


DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto	
VERIF.	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)	
APROB.	Daniela Rey				
FABR.	Ing. Julian Jaramillo Daniela R. Sergio C.				
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Subsistema	TANQUE DE ALMACENAMIENTO
				Nombre de la pieza	TANQUE DE POLIETILENO
				Escala	1:8
				Formato	A4
				Unidades mm	Hoja 11

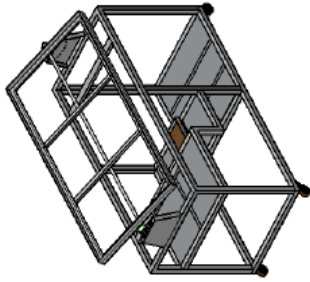
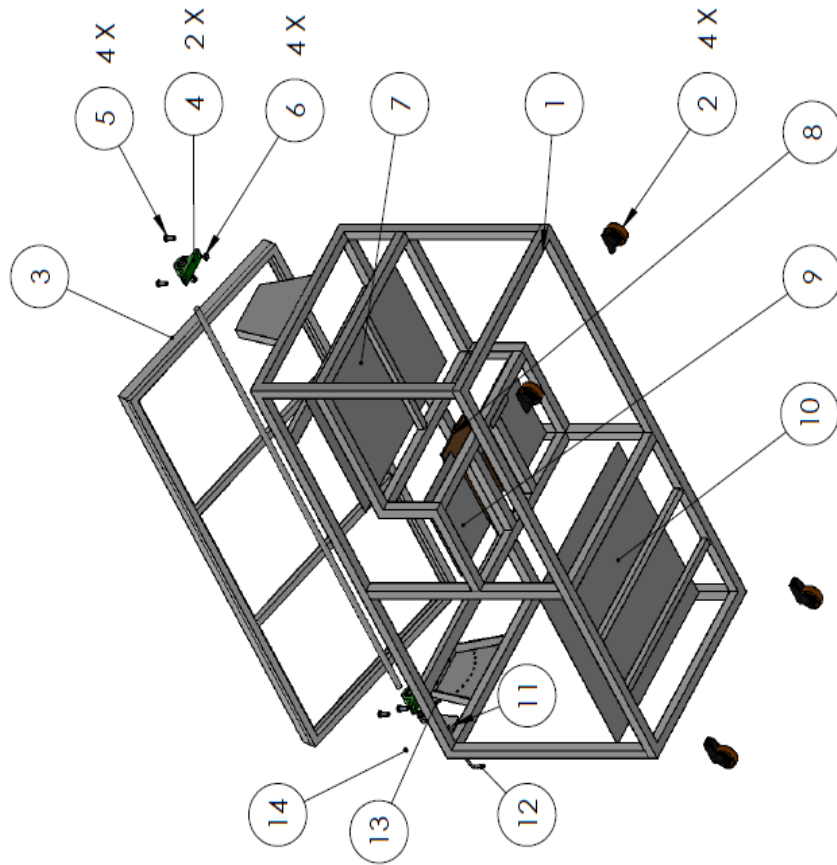
Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas.
Escuela de Ingeniería Mecánica



DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto
VERIF.	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO) Subsistema TANQUE DE ALMACENAMIENTO
APROB.	Daniela Rey			
	Ing. Milton Jaramillo			
FABR.	Daniela R. Sergio C.			
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Nombre de la pieza
				AISLAMIENTO INFERIOR TANQUE
				Formato
				A4
				Unidades
				mm
				Escala
				1:10
				Hoja
				12



DIBUJ. VERIF. APROB. FABR.	Nombre Sergio Contreras Daniela Rey Ing. Julia Jaramillo Daniela R. Sergio C.	Firma	Fecha	Nombre del proyecto DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROYECTO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TÉRMIICO Y FOTOVOLTAICO)
				Subsistema TANQUE DE ALMACENAMIENTO
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas Escuela de Ingeniería Mecánica				Nombre de la pieza CARCAZA INFERIOR (ALUMINO)
				Formato A4
		Unidades mm	Escala 1:8	Hoja 13

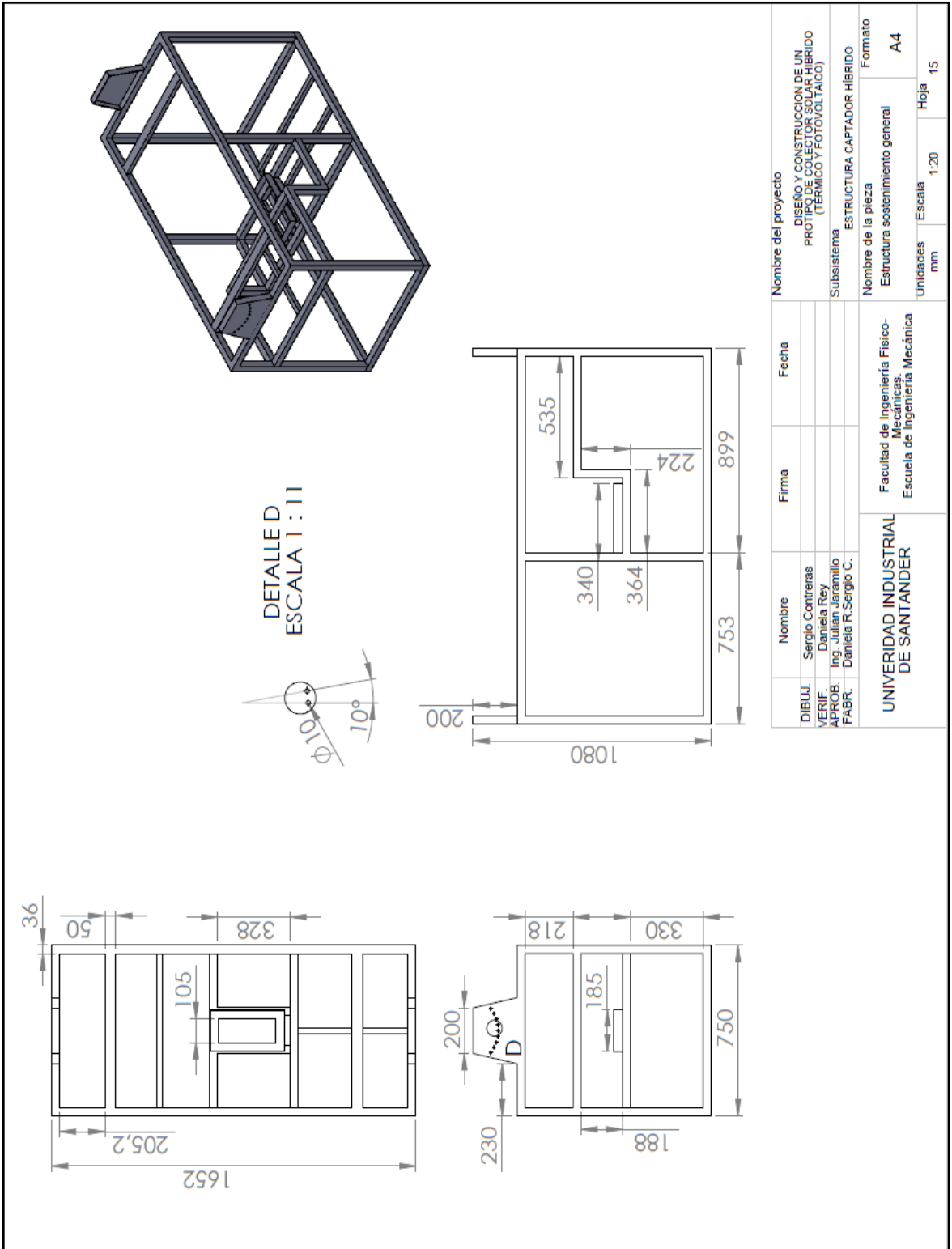


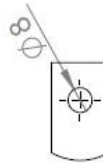
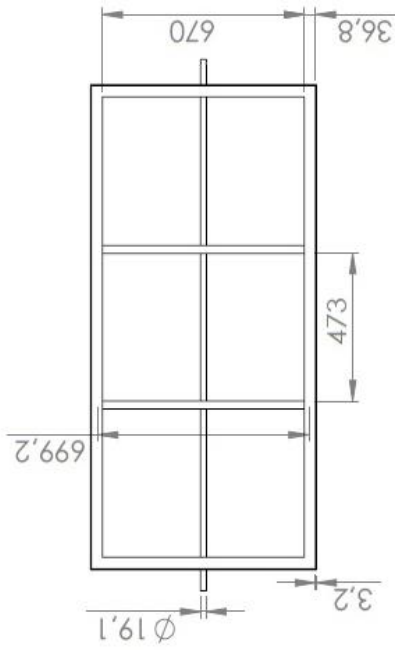
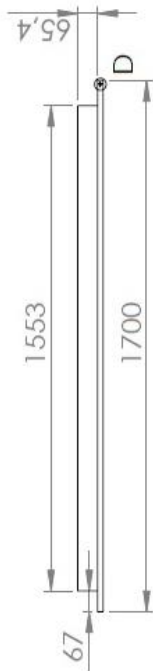
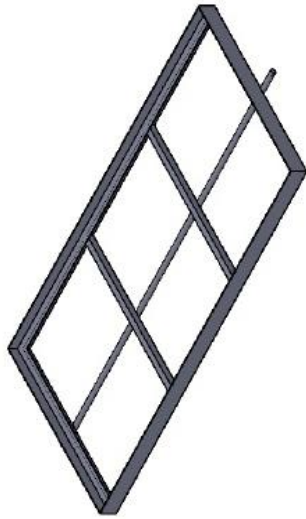
# de pieza	Nombre de la pieza	Material
1	Est. Soste. Gal	Acero Hot Rolled
2	Ruedas	Goma y acero
3	Est. Soste. Capilador	Acero Hot Rolled
4	Chumacera	Acero
5	Tomillo de 1/2 φ	Acero
6	Tuerca de 1/2 φ	Acero
7	Piso disp. electrónicos	Aluminio
8	Piso batería	Madera
9	Piso lateral batería	Aluminio
10	Piso tanque	Aluminio
11	Pieza de fijación de inclinación	Acero
12	Pin de fijación de ángulo	Acero
13	Tomillo de 1/4 φ	Acero
14	Tuerca de 1/4	Acero

DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha
VERIF.	Sergio Contreras		
APROB.	Daniela Rey		
FABR.	Ing. Julián Jaramillo Daniela R. Sergio C.		

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica
-------------------------------------	--

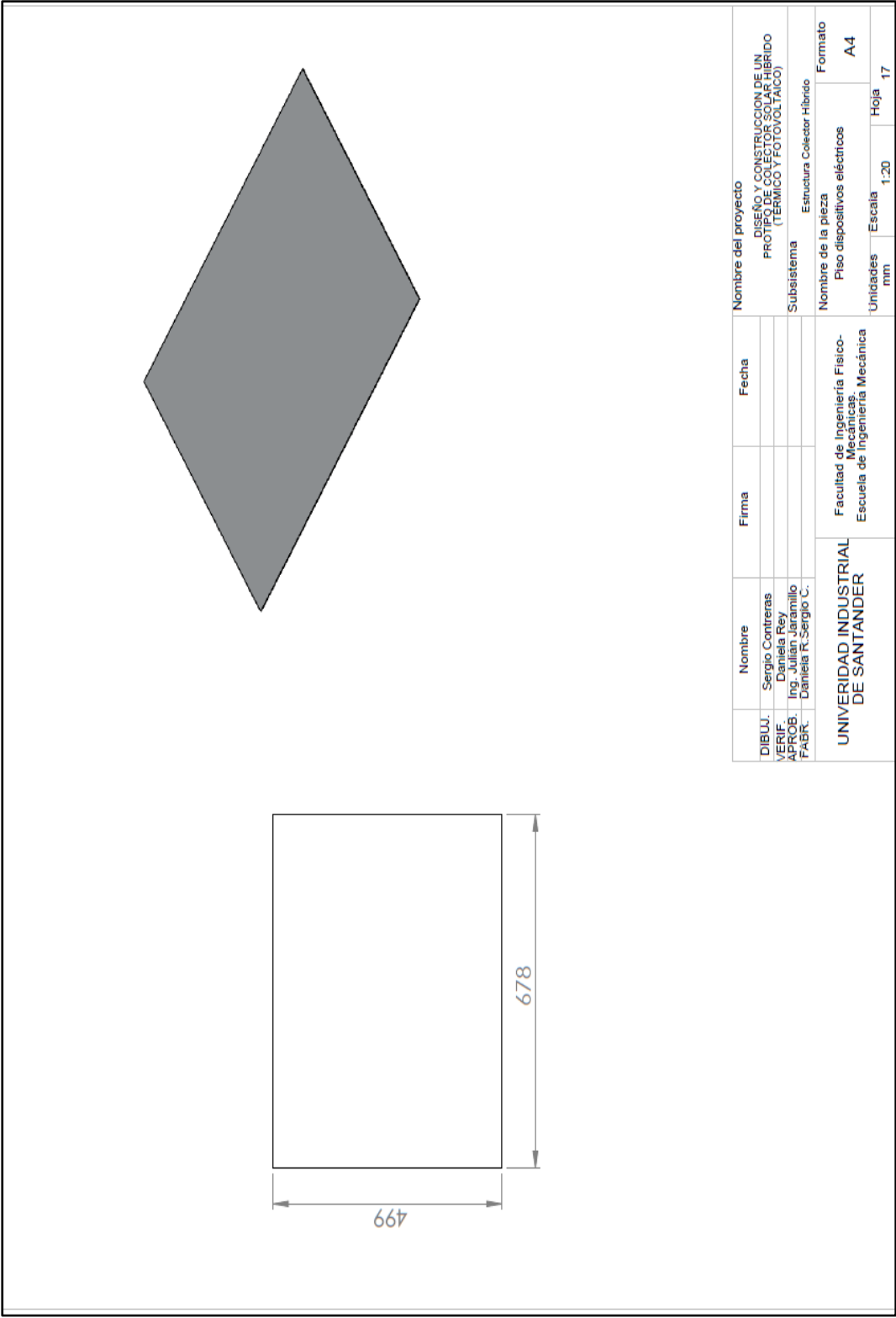
Nombre del proyecto DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TÉRMINICO Y FOTOVOLTAICO)		Formato A4
Subsistema ESTRUCTURA COLECTOR HIBRIDO		
Nombre de la pieza VISTA EN PERSPECTIVA ESTRUCTURA COLECTOR HIBRIDO		
Unidades mm	Escala 1:20	Hoja 14



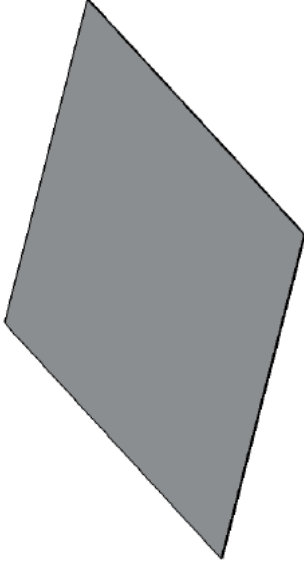
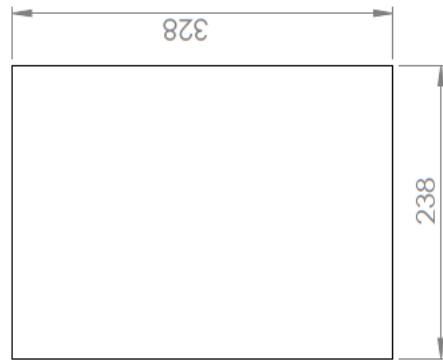


DETALLE
ESCALA 1 : 2

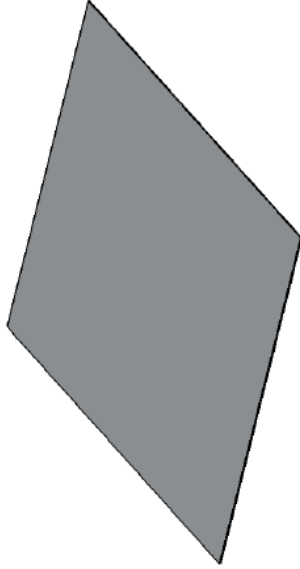
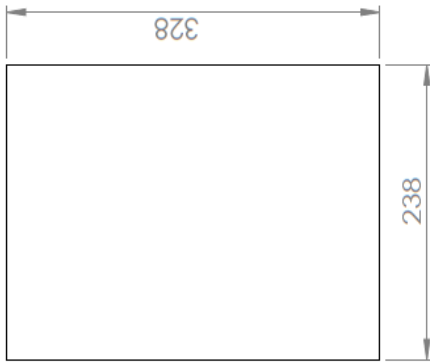
DIBUJ.	Sergio Contreras	Firma	Fecha	Nombre del proyecto	
VERIF.	Daniela Rey			DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROYECTO DE COLECTOR SOLAR HÍBRIDO (TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO)	
APROB.	Ing. Julián Jaramillo			Subsistema	
PAQR.	Daniela R. Sergio C.			Estructura Colector Híbrido	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Nombre de la pieza	
				Estructura de sostenimiento captador	
				Formato	
				A4	
				Unidades	
				mm	
				Escala	
				1:20	
				Hoja	
				16	



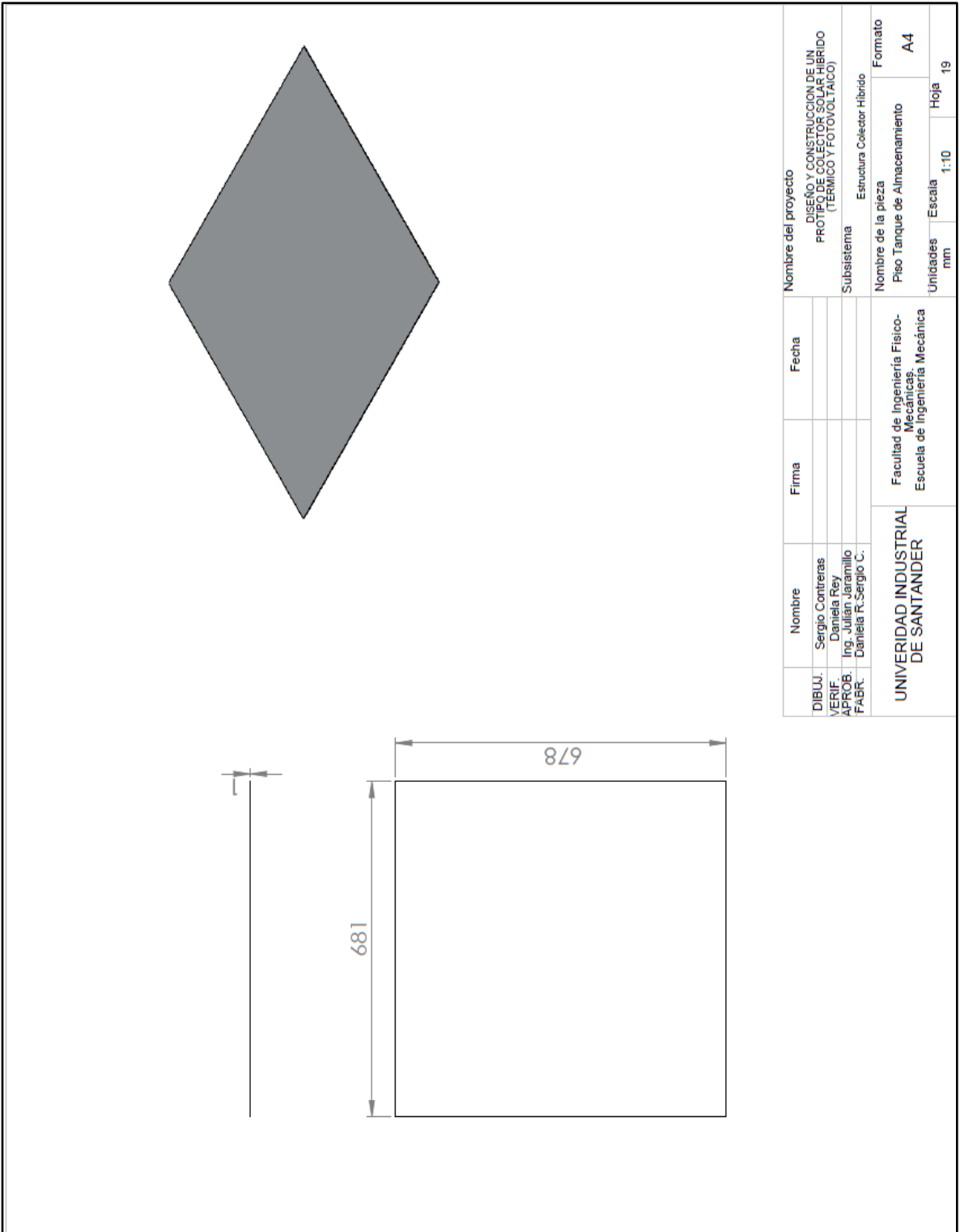
DIBUJ.	Nombre	Firma	Fecha	Nombre del proyecto			
VERIF.	Sergio Contreras			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)			
APROB.	Daniela Rey						
FABR.	Ing. Julián Jaramillo Daniela R. Sergio C.						
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER				Subsistema	Estructura Colector Híbrido		
				Nombre de la pieza		Piso dispositivos eléctricos	Formato
				Escala		1:20	A4
				Unidades	mm		
					Hoja	17	



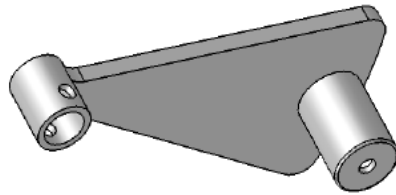
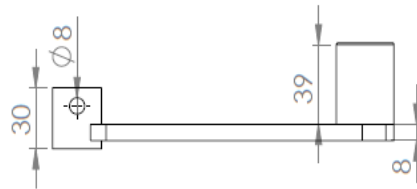
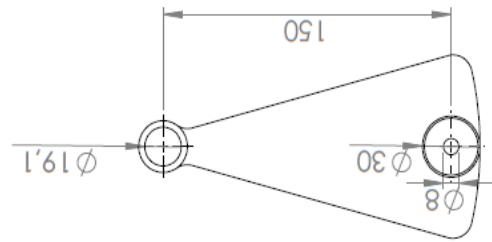
DIBUJ. VERIF. APROB. FABR.	Nombre Sergio Contreras Daniela Rey Ing. Juan Armando Daniela R. Sergio C.	Firma	Fecha	Nombre del proyecto DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROYECTO DE UN PISO LATERAL (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Fisico- Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica		Subsistema	Estructura Colector Hibrido
				Nombre de la pieza	Piso Lateral Bateria
				Unidades mm	Escala 1:5
				Formato	A4
				Hoja	18



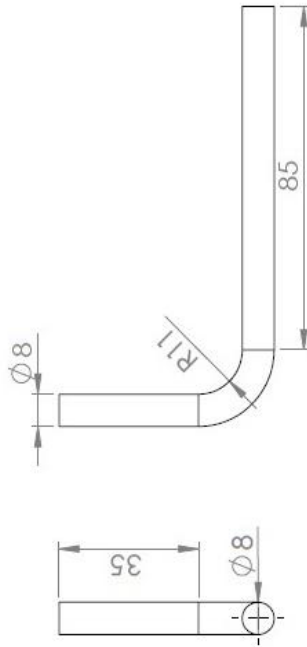
Nombre del proyecto		Nombre		Fecha		Firma	
DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROYECTO DE CASA HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)		Sergio Contreras					
Subsistema		Daniela Rey					
Estructura Colector Hibrido		Ing. Julian Jaramillo					
Nombre de la pieza		Daniela R. Sergio C.					
Piso Lateral Bateria				Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas.			
Formato				Escuela de Ingeniería Mecánica			
A4							
Unidades mm				Escala		Hoja 18	
				1:5			



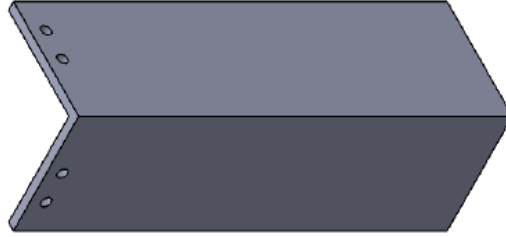
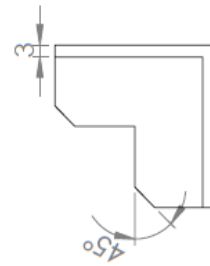
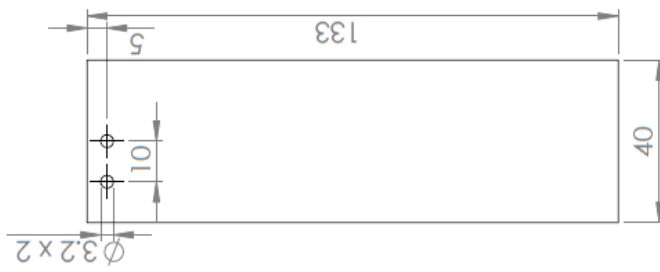
Nombre del proyecto		Nombre de la pieza		Formato	
DIBUJ.	Sergio Contreras	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)		A4	
VERIF.	Daniela Rey	Subsistema		Estructura Colector Hibrido	
APROB.	Ing. Julian Jaramillo	Nombre de la pieza		Piso Tanque de Almacenamiento	
FABR.	Daniela R. Sergio C.	Facultad de Ingeniería Físico-Matemática		Unidades	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Escuela de Ingeniería Mecánica		Escala	
				mm	
				1:10	
				Hoja	
				19	



DIBUJANTE:	Sergio Contreras	Firma:	Fecha:	Nombre del proyecto			
VERIFICADOR:	Daniela Rey			DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROYECTO DE UN SISTEMA HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)			
APROBADO:	Ing. Juan Saramillo			Subsistema:	Estructura Colector Hibrido		
FABRICADO:	Daniela R. Sergio C.			Nombre de la pieza:	Pieza de fijación de inclinación		
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER			Formato				
			Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas.			A4	
			Escuela de Ingeniería Mecánica			Unidades mm	Hoja
			Escala	1:2	1:20		



Nombre del proyecto		Nombre de la pieza		Formato	
DIBUJ.	Sergio Contreras	DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)		A4	
VERIF.	Daniela Rey	Subsistema		Estructura Colector Hibrido	
APROB.	Ing. Julián Jaramillo	Nombre de la pieza		Pin de fijación de ángulo	
FABR.	Daniela R. Sergio C.	Unidades		Escala	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		Facultad de Ingeniería Físico-Mecánica		mm	
		Escuela de Ingeniería Mecánica		1:20	
				Hoja	
				21	



Nombre		Firma		Fecha		Nombre del proyecto	
DIBUJ.	Sergio Contreras					DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTIPO DE COLECTOR SOLAR HIBRIDO (TERMICO Y FOTOVOLTAICO)	
VERIF.	Daniela Rey					Subsistema Estructura Colector Hibrido	
APROB.	Ing. Julian Jaramillo					Nombre de la pieza	
FABR.	Daniela R. Sergio C.					Pieza de ajuete estructura-captador	
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER						Unidades	
						mm	
Facultad de Ingeniería Físico-Matemática Escuela de Ingeniería Mecánica						Escala	
						1:20	
						Formato	
						A4	
						Hoja	
						22	

**ANEXO G. MANUAL DE USUARIO DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO
TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO**

MANUAL DE OPERACIÓN

PROTOTIPO DE UN COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO



**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

BUCARAMANGA

SANTANDER

2014

SISTEMAS DEL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO

El colector solar híbrido térmico y fotovoltaico se compone de dos sistemas que son indispensables para el funcionamiento del sistema en general. Los sistemas componentes son:

- **SISTEMA ELÉCTRICO**

El sistema eléctrico está compuesto por un sistema fotovoltaico autónomo, que consta de un módulo fotovoltaico, regulador de carga, batería e inversor, que es el encargado de alimentar la carga que se le ponga al sistema, en este caso es la bomba de circulación de agua, que permite que el sistema colector híbrido térmico y fotovoltaico sea independiente de una fuente externa de energía.

- **SISTEMA HIDRÁULICO**

El sistema hidráulico es el encargado de la circulación del agua en el colector híbrido. Su funcionamiento depende del sistema eléctrico y se compone de una bomba de circulación y dos tramos de manguera de pvc reforzada con lona.

- **SISTEMA DE CAPTACIÓN**

El sistema de captación es el encargado de absorber la radiación proveniente del sol y el entorno (radiación directa y difusa) y convertirla en calor para calentar el agua que pasa a través de él y electricidad que requiere la bomba para la circulación del agua en el sistema. El sistema se compone de la placa absorbedora, la distribución de tubos en serpentín, un marco interno de madera para sostener el conjunto de captación y contener el aislamiento que es lana de vidrio y el marco externo hecha de perfil y lámina de aluminio.

- **SISTEMA DE ALMACENAMIENTO**

El sistema de almacenamiento es el encargado de acumular el calor proveniente del captador y transferido al agua, se compone de un tanque de polietileno aislado

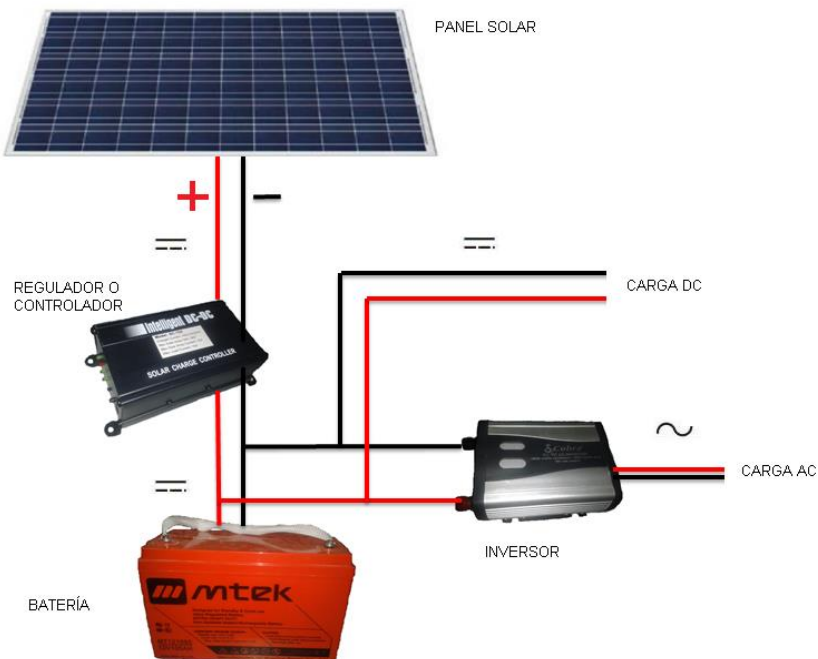
térmicamente con espuma de poliuretano y protegido externamente por una carcasa de lámina de aluminio.

- **SISTEMA DE SOSTENIMIENTO Y POSICIONAMIENTO**

El sistema de sostenimiento y posicionamiento se compone de un marco, dos apoyos y un pin de posicionamiento. El marco se encarga de sostener el colector, y gira mediante un eje soldado a él, en un extremo del eje se encuentra el dispositivo de posicionamiento que es un pin con un resorte, fijado a una platina. En los apoyos están atornilladas dos chumaceras que sostienen el eje y el marco, también se encuentran los puntos de referencia para el posicionamiento angular separados el uno del otro 10 [°].

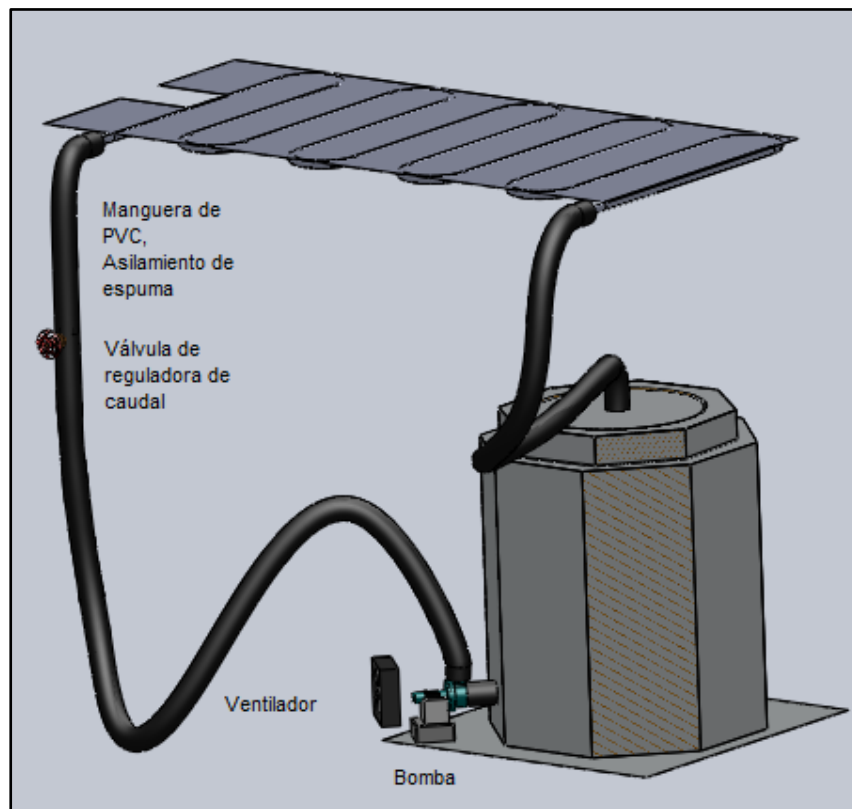
ESQUEMAS Y PARTES DE LOS SISTEMAS

SISTEMA ELÉCTRICO



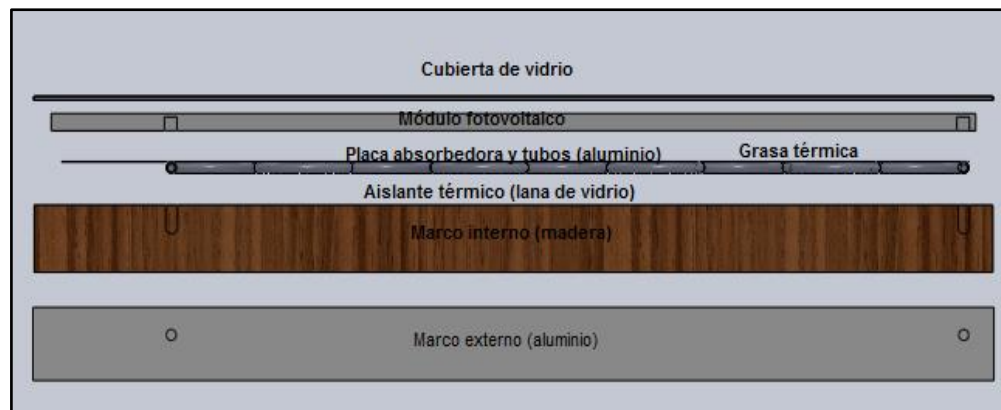
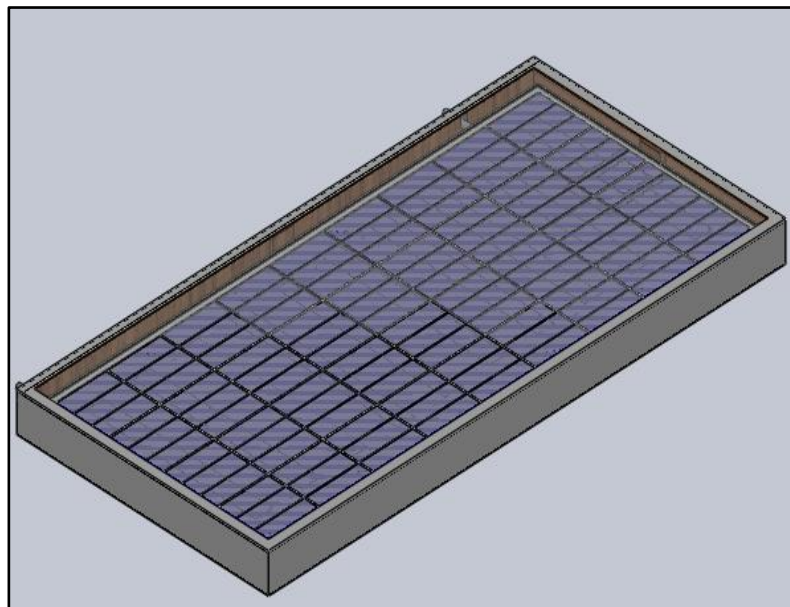
ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
PANEL SOLAR O MODULO FOTOVOLTAICO	Convertir radiación solar en energía eléctrica	Panel marca YINGLI SOLAR de 145 [W]
REGULADOR O CONTROLADOR	Proteger la batería de sobrecargarse	Regulador marca INTELLIGENT DC/DC
BATERIA	Acumular y proveer de energía eléctrica según sea la disponibilidad de radiación solar	Batería marca MTEK de 105 [A-h] y 12 [V]
INVERSOR	Convertir la corriente directa del sistema fotovoltaico en alterna, para alimentar la bomba.	Inversor marca COBRA de 400 a 800 [W] de operación, conversión a 115 V y 50 Hz de corriente alterna.

SISTEMA HIDRÁULICO



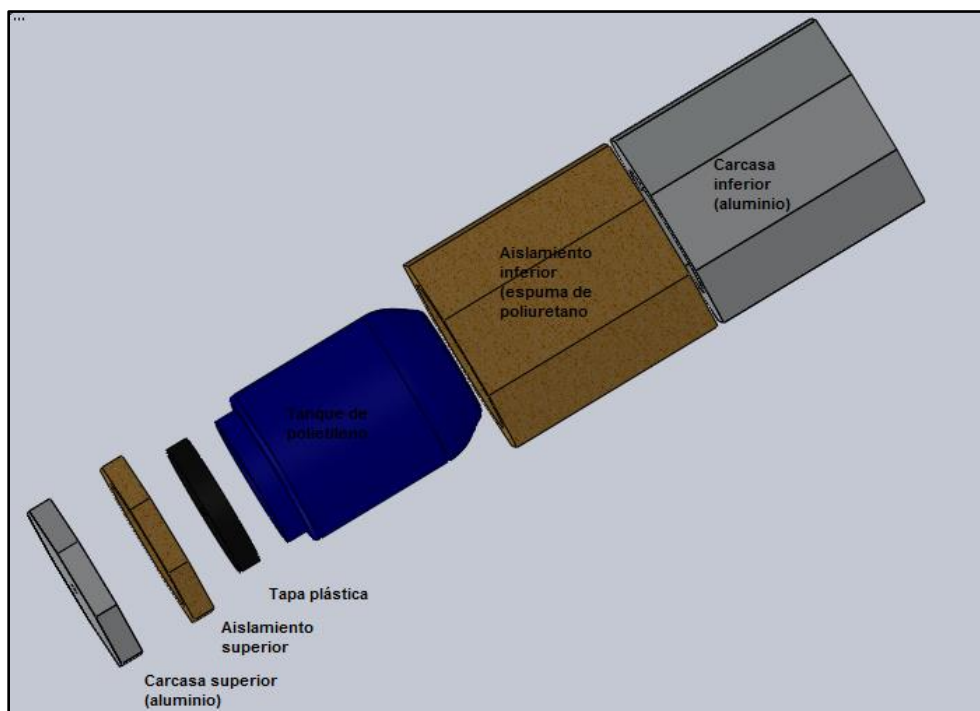
ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
MANGUERA DE PVC	Contiene el fluido de circulación (agua).	Manguera de pvc reforzada con lona de ¾ de pulgada de diámetro interno.
VENTILADOR	Prevenir el sobrecalentamiento de la bomba de circulación	Ventilador de 12 V DC, 0.17 A Y 2000 rpm.
BOMBA	Se encarga de circular el agua a través del colector híbrido	Bomba de desagüe de lavadora de 35 [W] de potencia.

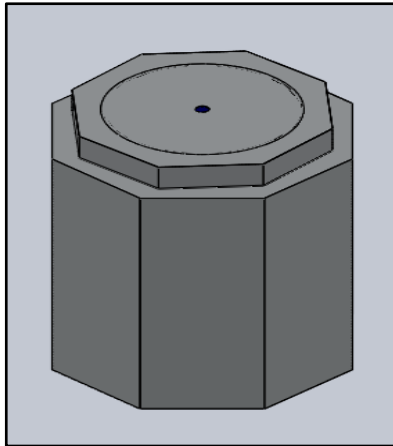
SISTEMA DE CAPTACIÓN



ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
PLACA ABSORBEDORA Y TUBOS	Transferir el calor absorbido al agua	Lámina de aluminio de 0.9 mm de espesor soldada a tubería de aluminio de 5/8 de diámetro interno.
MARCO INTERNO MADERA	Proteger, contener y sostener el la placa absorbedora, tubos, el módulo fotovoltaico y el aislante	Madera MDF 12 líneas de espesor.
VIDRIO	Permite aumentar el calor captado gracias a un efecto invernadero.	Vidrio templado de 5 mm de espesor marca Vitelsa.
MARCO EXTERIOR ALUMINIO	Sirve de protección externa a la madera y el captador.	Perfil de aluminio en ángulo de 1 pulgada y perfil para los laterales.

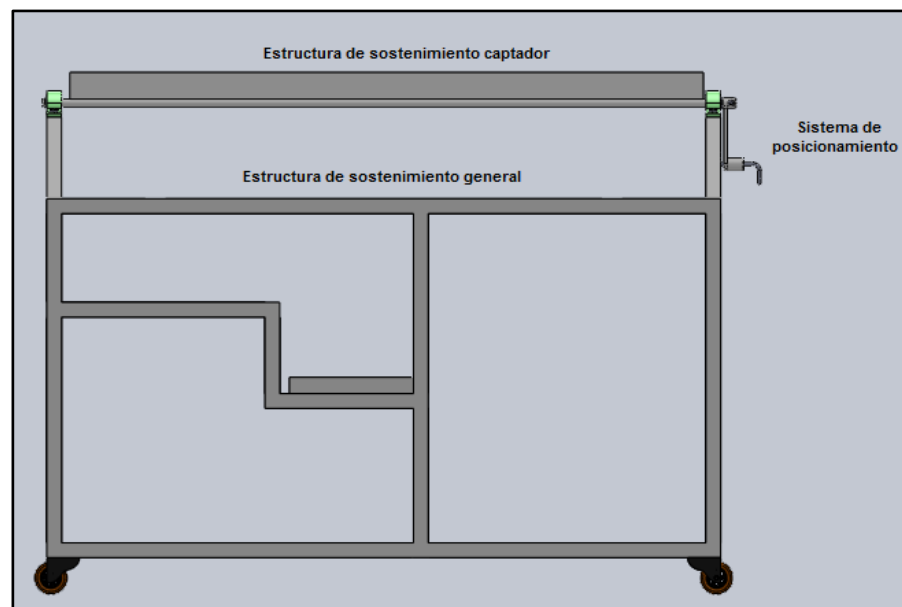
SISTEMA DE ALMACENAMIENTO

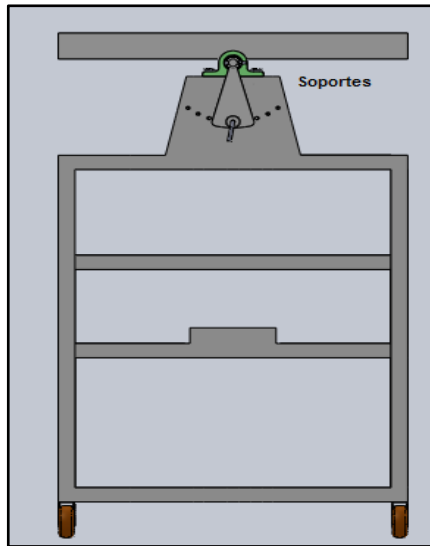




ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
TANQUE POLIETILENO	Contiene el agua que se va a calentar al circular por el captador solar.	Tanque de polietileno con capacidad máxima de 60 Litros.
AISLAMIENTO	Permite acumular y almacenar el calor absorbido por el agua.	Espuma de poliuretano de 7 cm de espesor.
CARCASA ALUMINIO	Protege el aislamiento del exterior y mejora el aspecto.	Lámina de aluminio de 0.4 mm de espesor.

SISTEMA DE SOSTENIMIENTO Y POSICIONAMIENTO





ELEMENTO	FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
ESTRUCTURA DE SOSTENIMIENTO	Sostiene el captador y permite el desplazamiento angular para lograr la inclinación deseada	Perfil en ángulo de acero cold rolled de 1/8' de espesor y 1 1/2 '. Reforzado con tubo cuadrado de 1' de lado donde se encuentra unido a un eje 4140 de 1,70 m de longitud de 3/4' de diámetro.
SISTEMA DE POSICIONAMIENTO	Se encarga de sostener el marco en una posición angular deseada	Material: ACERO estructural, montado en una platina de 1/4 de pulgada de espesor.
ESTRUCTURA GENERAL	Se encarga de sostener los soportes de la estructura de sostenimiento y los demás elementos componentes como el tanque de almacenamiento, la batería, regulador, inversor, bomba, ventilador y sistema de adquisición de datos	Chumaceras de 3/4 ', lámina de 1/8 de espesor y perfil cold rolled en ángulo de 1 1/2' de lado por 1/8' de espesor.

PRECAUCIONES ANTES DE USAR EL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO

Antes de utilizar el colector solar híbrido se deben tener ciertas precauciones.

- Verificar que el sistema de sostenimiento esté bien situado, esto significa que el pin de sostenimiento esté bien ubicado dentro de las perforaciones guía,

esto con el fin de evitar accidentes ya que el sistema captador tiene un peso aproximado de 70 kilos y una eventual caída puede causar lesiones graves.

- Verificar que la batería esté desconectada antes de realizar los siguientes ajustes y verificaciones al sistema eléctrico, también verificar que el inversor esté inicialmente apagado.
- Verificar correctamente las conexiones eléctricas, de la batería, panel, inversor, regulador y la bomba, que estén bien conectadas y debidamente aisladas para evitar posibles accidentes por cortocircuito o descarga y daño de la batería.
- Verificar el nivel de agua del tanque, probar el sistema hidráulico y que la válvula reguladora esté totalmente abierta para evitar posibles fugas de fluido al circular.
- Verificar que el vidrio esté lo más limpio posible.
- El captador solar debe estar cubierto, para evitar precalentamiento del panel que pueda generar desviaciones considerables en las mediciones.

RECOMENDACIONES ANTES DE USAR EL COLECTOR SOLAR HÍBRIDO TÉRMICO Y FOTOVOLTAICO

- Para posicionar el captador en el ángulo deseado (múltiplo de 10) se debe tener mucho cuidado (se sugieren dos personas para posicionar el captador, uno que sujete el captador y otro que manipule el pin de sostenimiento) debido a que el captador es muy pesado.
- Observar que el marco no tenga movimiento relativo respecto al eje, de ser así apretar la tuerca del pasador que une el eje a la platina de posicionamiento (hacerlo a una inclinación horizontal preferiblemente para evitar imprecisiones).
- Con las conexiones eléctricas verificadas adecuadamente se procede a conectar la batería.
- Luego se enciende el inversor, el cual emitirá un sonido que indica que está encendido (prende un led rojo y uno verde al tiempo en el momento que se

enciende, luego solo queda encendido un led verde que es el led correspondiente al status de power ON).

- Si en algún momento enciende un led rojo en el regulador y/o en el inversor (led de alerta o error en conexiones), se debe apagar el inversor y desconectar inmediatamente la batería, puede haber un error en la conexión eléctrica que ocasione un corto.
- Si no prenden los led rojos y solo quedan prendidos los verdes entonces el sistema está bien conectado.
- En el regulador el led que debe estar prendido es el led de carga (Charger) esto indica que está pasando corriente del panel para cargar la batería. Por el tipo de conexión realizada, el panel tiene intervalos de tiempo donde alimenta la batería solamente o la carga o ambos.
- Conectar debidamente las termocuplas al sistema de adquisición de datos, asimismo los piranómetros y la fuente de alimentación al fieldpoint, y abrir el archivo en LabView para tomar y guardar los datos.
- Encender la bomba conectada al inversor, el ventilador está conectado directamente a la batería y comenzará a funcionar cuando se conecte la batería.
- Si se va a trabajar con distintos caudales, se recomienda apagar la bomba y desacoplar la manguera del tanque, encender de nuevo para que sea vertida en un recipiente aforado y con un cronómetro medir el tiempo de llenado, variando el caudal con la válvula reguladora (prueba y error) para lograr el flujo deseado.
- Destapar el captador híbrido térmico y fotovoltaico.
- Mientras se miden las variables prestar atención a una: LA TEMPERATURA DEL PANEL SOLAR NO DEBE SUPERAR LOS 85 [°C] ya que el rango de operación del panel es de -40 a 85 [°C]
- Si eventualmente el panel está tan caliente, que alcanza una temperatura cercana a 85 [°C] se recomienda cubrir inmediatamente el panel solar para evitar que las celdas de este se quemen y esperar a que su temperatura baje

gracias al flujo de agua, mientras está cubierto esos datos deben ser ignorados y no tenidos en cuenta para el cálculo, es solo una medida de emergencia para protección del sistema.

RECOMENDACIÓN DE LIMPIEZA

- Procurar que el vidrio del captador no se raye ni se ensucie, siempre limpiarlo para no afectar su rendimiento a la hora de las pruebas.
- El elemento que tiende a ensuciarse más fácilmente por sedimentación es el tanque de almacenamiento, para su limpieza se recomienda desacoplar la manguera de llegada al captador, encender la bomba y desocupar el mayor volumen posible para que se pueda sacar el tanque de la estructura y poder desocuparlo totalmente, desacoplar la bomba para una manipulación más fácil.