



ESPE

**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA**

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

**TEMA: ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO
UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR DE 8 mm PARA
CALENTAMIENTO DE AGUA Y CALEFACCIÓN DE AMBIENTE
PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DE
LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - ESPE**

AUTORES:

ALMACHE ALMEIDA, JACQUELINE ALEXANDRA

ANDRADE BECERRA, SEBASTIÁN ALEXANDER

DIRECTOR: ING. IBARRA, OSWALDO MSc.

SANGOLQUÍ

2016



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación “**ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR DE 8 mm PARA CALENTAMIENTO DE AGUA Y CALEFACCIÓN DE AMBIENTE PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE**”, realizado por la señorita **JACQUELINE ALEXANDRA ALMACHE ALMEIDA** y el señor **SEBASTIÁN ALEXANDER ANDRADE BECERRA**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que cumple los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a la señorita **JACQUELINE ALEXANDRA ALMACHE ALMEIDA** y al señor **SEBASTIÁN ALEXANDER ANDRADE BECERRA** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 05 de febrero de 2016

ING. OSWALDO ALEXANDER IBARRA JÁCOME MSC.

DIRECTOR



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **JACQUELINE ALEXANDRA ALMACHE ALMEIDA**, con cédula de identidad N° 171362511-7 y **SEBASTIÁN ALEXANDER ANDRADE BECERRA**, con cédula de identidad N° 171950830-9, declaramos que este trabajo de titulación **“ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR DE 8 mm PARA CALENTAMIENTO DE AGUA Y CALEFACCIÓN DE AMBIENTE PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE”** ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 05 de febrero de 2016

Jacqueline Alexandra Almache Almeida
C.C. 171362511-7

Sebastián Alexander Andrade Becerra
C.C. 171950830-9



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **ALMACHE ALMEIDA JACQUELINE ALEXANDRA Y ANDRADE BECERRA SEBASTIÁN ALEXANDER** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR DE 8 mm PARA CALENTAMIENTO DE AGUA Y CALEFACCIÓN DE AMBIENTE PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍAS RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 05 de febrero de 2016

Jacqueline Alexandra Almache Almeida

C.C. 171362511-7

Sebastián Alexander Andrade Becerra

C.C. 171950830-9

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mis padres, quienes han dado todo por mis hermanos y por mí, son lo más importante que tengo en mi vida y los amo con todo mi corazón.

Jacqueline Alexandra

Febrero, 2016

DEDICATORIA

Dedicado a la memoria de mi abuelo Patricio Andrade, cuyas enseñanzas de vida y cariño siempre guardaré en mi mente.

Este proyecto va dedicado además para todas las personas que de una u otra manera forman parte esencial de mi vida, a mis padres, a mi hermana, a mis tíos, tías, abuelos, amigos y familia quienes han estado detrás de mí, formando parte de este logro que ha trazado el final de una etapa de mi vida.

Sebastián Alexander

Febrero, 2016

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme dado la vida, por ser mi guía y mi todo, a la Virgen Inmaculada que desde pequeña ha guiado mis pasos y nunca me ha abandonado.

A mis padres Mario y Sonia por ser el motor principal de mi vida, mi mayor ejemplo de amor, trabajo y sacrificio, les agradezco con todo mi corazón, porque todo lo que soy se los debo a ellos.

A mis hermanos Xavier y Geovanny por todo su apoyo y cariño durante toda mi vida y ser un gran ejemplo para mí.

A mis sobrinos Cami y Nico y mi cuñada Carolina, por ser parte de mi vida y haber compartido gratos momentos juntos.

A mi compañero Sebastián por ser un gran amigo y apoyo durante toda esta etapa universitaria.

Al Ing. Lenin Abatta por haber estado presente impartiendo sus conocimientos en cada etapa del proyecto.

A mi director de tesis Ing. Alexander Ibarra y al Ing. José Guasumba quienes han colaborado con sus capacidades y conocimientos en el desarrollo de esta investigación.

Jacqueline Alexandra

Febrero, 2016

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme alcanzar este tan añorado logro y darme la energía para poder perseverar en los momentos difíciles que se han presentado a lo largo de este desafío.

Agradezco a mis padres, cuyo apoyo y amor incondicional han estado siempre presentes en mi mente y corazón para poder cumplir mis objetivos.

Agradezco a mi hermana por todo su cariño, inocencia y travesuras que me han sacado sonrisas desde el día que nació.

Agradezco a mi compañera y leal amiga Jacqui, cuyo apoyo, motivación y cariño me han ayudado a perseverar para cumplir todo aquello que se nos ha presentado desde los primeros años de universidad hasta el día de hoy sin importar la complejidad y dificultad de los problemas afrontados.

Agradezco a mi tía Cecilia, a quien considero mi segunda madre y cuyas manos y corazón siempre se han extendido para apoyarme a lo largo de mi vida profesional, estudiantil y personal.

Agradezco a todos los profesionales que forman parte del departamento de Energías Renovables, al ingeniero Lenin Abatta que nos ha prestado su ayuda desde el día de asignación del proyecto y se ha convertido en un gran amigo, al ingeniero Alexander Ibarra, cuya capacidad y conocimiento nos han llevado a culminarlo satisfactoriamente.

Agradezco a toda mi familia y amigos por estar presentes en todo momento y de forma incondicional.

Sebastián Alexander

Febrero, 2016

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xix
ÍNDICE DE ANEXOS	xxiv
RESUMEN.....	xxvi
ABSTRACT	xxvii
CAPÍTULO 1.....	1
GENERALIDADES	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Justificación e importancia.....	1
1.3 Alcance del proyecto.....	2
1.4 Objetivos	3
1.4.1. General	3
1.4.2. Específicos	3
CAPÍTULO 2.....	4
MARCO TEÓRICO	4
2.1 Fuentes de energía.....	4

2.2	Radiación, irradiancia e irradiación solar.....	7
2.3	Estimación del recurso solar	11
2.4	Colector solar	19
2.4.1	Colector Solar sin Concentración	20
2.4.2	Colector Solar de Concentración	24
2.5	Sistema solar térmico para calentamiento de agua	24
2.5.1	Sistema de Captación	25
2.5.2	Sistema de Intercambio	26
2.5.3	Sistema de acumulación.....	27
2.5.4	Circuito hidráulico	32
2.5.5	Sistema de Control	38
2.5.6	Alimentación Eléctrica.....	41
2.5.7	Estructura de apoyo.....	43
2.6	Sistema solar térmico para calefacción del ambiente	44
2.6.1	Comparación entre colectores solares de aire y de agua.....	44
2.6.2	Elementos de un sistema solar para calefacción de aire	44
2.7	Policarbonato.....	49
CAPÍTULO 3.....		51
DISEÑO MECATRÓNICO		51
3.1	Subsistema de calentamiento de agua	51
3.1.1	Colector solar	52
3.1.1.1	Selección del pegamento.....	52
3.1.1.2	Selección de los tubos de entrada y salida del colector	56
3.1.1.3	Cálculo de la resistencia del pegamento	58

3.1.2	Estructura de apoyo.....	62
3.1.3	Acumulador de agua caliente.....	72
3.1.4	Circuito hidráulico	76
3.1.4.1	Circuito hidráulico de alimentación.....	77
3.1.4.2	Circuito hidráulico de distribución.....	78
3.2	Subsistema de calefacción de ambiente	96
3.2.1	Selección del aerocirculador	97
3.3	Alimentación eléctrica del sistema.....	99
3.4	Sistema de control y adquisición de datos	111
3.5	Balance de energía en el colector solar de policarbonato	127
CAPÍTULO 4.....		149
CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN		149
4.1	Calentador de agua y calefactor de ambiente.....	149
4.2	Sistema de alimentación solar fotovoltaico.	171
4.3	Puesta en marcha.....	173
CAPÍTULO 5.....		175
ANÁLISIS DE RESULTADOS		175
5.1	Irradiación diaria útil recibida por cada colector solar.....	176
5.2	Análisis comparativo de los colectores de agua.....	179
5.2.1	Análisis de caudal-irradiancia del sistema	179
5.2.2	Análisis de rendimiento.....	183
5.2.3	Análisis comparativo con colectores comerciales.....	190
5.3	Análisis del colector para calefacción de aire	193

CAPÍTULO 6.....	198
ANÁLISIS DE COSTOS	198
6.1 Costo de implementación.....	198
6.1.1 Construcción e implementación de la cubierta	198
6.1.2 Implementación del sistema de alimentación eléctrica.....	199
6.1.3 Implementación del sistema de control y adquisición de datos.	200
6.2 Costos Varios	201
6.3 Rentabilidad del proyecto	202
6.3.1 Costos de implementación de un colector solar con policarbonato	202
6.3.2 Comparación con otros sistemas de calentamiento.....	203
CAPÍTULO 7.....	207
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	207
7.1 CONCLUSIONES	207
7.2 RECOMENDACIONES	208
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	210

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Perspectivas de crecimiento de la demanda mundial de energía.	4
Figura 2 Consumo total de energía primaria por fuente en Ecuador en el 2012.....	5
Figura 3 Componentes de la irradiación global.	7
Figura 4 Orientación de un módulo solar.....	9
Figura 5 Latitud y Longitud de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE	10
Figura 6 Ingreso de datos en la página meteorología y energía solar de la NASA....	15
Figura 7 Datos provenientes de la NASA de irradiación global media mensual con superficie horizontal.....	15
Figura 8 Gráfico comparativo de la estimación de G _{dm} (20°) por cuatro métodos empleados.	19
Figura 9 Componentes de un captador solar plano con cubierta.	21
Figura 10 Captador solar plano sin cubierta	22
Figura 11 Captador solar de tubos de vacío.....	22
Figura 12 Captador solar de tubos de calor.....	23
Figura 13 Captador solar esférico.	23
Figura 14 Captador solar de concentración.....	24
Figura 15 Componentes de un sistema solar térmico para calentamiento de agua. ...	25
Figura 16 Circuito hidráulico de transferencia de calor Directo.....	26
Figura 17 Circuito hidráulico de transferencia de calor Cerrado.	27
Figura 18 Tipos de acumuladores según el sistema de intercambio.	29

Figura 19 Espuma expansiva de poliuretano en aerosol.	31
Figura 20 Aislante de lana de vidrio.	31
Figura 21 Bomba electrosomergible 500gph.	34
Figura 22 Esquema de bloques del sistema de regulación y control.	38
Figura 23 Arduino Mega 2560.	39
Figura 24 Piranómetro.	40
Figura 25 Anemómetro.	40
Figura 26 Dallas temperature sensor ds18b20.	41
Figura 27 Paneles Solares Fotovoltaicos.	41
Figura 28 Baterías.	42
Figura 29 Regulador de carga CMP12.	43
Figura 30 Esquema de un sistema de calefacción de ambiente con colector de aire.	45
Figura 31 Instalación de calefacción de aire por termosifón.	46
Figura 32 Instalación de calefacción de aire con ventilación forzada.	46
Figura 33 Instalación de calefacción de aire con ventilación forzada y colector independiente.	47
Figura 34 Soplador Ts400 centrífugo.	48
Figura 35 Soplador ATT WOOD Turbo 3000.	48
Figura 36 Policarbonato y aplicaciones.	50
Figura 37 Diseño del primer prototipo.	52
Figura 38 Pegamento Llama Roja.	53

Figura 39 Sintaco Maxiflex 40.....	53
Figura 40 ABRO Super Glue.	54
Figura 41 Sinteco SinteSolda.	54
Figura 42 Tubería roscable de PVC Plastigama.	56
Figura 43 Tubería roscable de CPVC Plastigama.....	57
Figura 44 Tubería de polipropileno roscable Polimex.	57
Figura 45 Vista frontal y lateral del colector solar (medidas en cm).	59
Figura 46 Vista de sección A-A del colector solar (medidas en cm).	60
Figura 47 Corte lateral del colector solar y fuerzas de reacción (medidas en cm). ...	61
Figura 48 Vista de las secciones A1 y A2 pegadas con ABRO Super Glue.....	61
Figura 49 Modelo de simulación para el diseño de la estructura.	63
Figura 50 Asignación de tubos de la estructura.	63
Figura 51 Cargas puntuales debido al peso del agua.	65
Figura 52 Cargas puntuales debido al peso de personas.	66
Figura 53 Carga distribuida debido al peso de personas sentadas.	66
Figura 54 Carga distribuida debido a la acción del viento.....	68
Figura 55 Carga puntual y distribuida debido a la carga permanente del acero.	69
Figura 56 Resultados del análisis estructural.	71
Figura 57 Vista superior y frontal del tanque y la tapa (dimensiones en mm).	73
Figura 58 Corte lateral del tanque con aislamiento.....	76
Figura 59 Circuito hidráulico de distribución.	78

Figura 60 Corte de sección de un alveolo de policarbonato.	80
Figura 61 Curva de rendimiento de la bomba RULE 25D 500 GPH.....	95
Figura 62 Comparación gráfica entre ADT y Q con 13,6 VDC y 12 VDC.....	96
Figura 63 Regulador Solar CMP12.....	106
Figura 64 Conexión eléctrica.	110
Figura 65 Módulo SD.	115
Figura 66 Módulo RTC.....	116
Figura 67 LCD 16x2.	116
Figura 68 Conexión regulador de voltaje.....	118
Figura 69 Conexión a Fuente externa.	118
Figura 70 Selección de ancho de pista 1.	119
Figura 71 Selección de ancho de pista 2.	120
Figura 72 Placa Circuito de potencia.	121
Figura 73 Placa Circuito de control.	121
Figura 74 Diagrama de flujo para el llenado de tanques.....	122
Figura 75 Diagrama de flujo de control de bombas.....	123
Figura 76 Diagrama de flujo de control del soplador	124
Figura 77 Diagrama de flujo para visualización de variables	125
Figura 78 Diagrama de flujo para almacenamiento de datos.....	126
Figura 79 Esquema térmico del colector solar.....	128
Figura 80 Esquema eléctrico equivalente del colector.....	128

Figura 81 Calentador de agua y calefactor de ambiente con colector de policarbonato alveolar 8mm.	149
Figura 82 Instalación del policarbonato celular en sentido de la pendiente.	150
Figura 83 Procedimiento de corte de la plancha de policarbonato alveolar.	150
Figura 84 Corte de la plancha de policarbonato alveolar con estilete afilado.	151
Figura 85 Ranurado de 8mm x 98mm.....	152
Figura 86 Limado de la ranura de 8mm.	152
Figura 87 Pegado de un colector solar.	153
Figura 88 Colocación de chova en las placas.....	155
Figura 89 Distancia entre apoyos para instalación del policarbonato.....	155
Figura 90 Techo de la estructura.	156
Figura 91 Larguero de la estructura.	157
Figura 92 Taladrado de las placas base.....	158
Figura 93 Conexión apernada de un tubo horizontal con el larguero.	158
Figura 94 Tanque de almacenamiento y aislamiento.	160
Figura 95 Taladrado y colocación de pernos de expansión en el piso.	160
Figura 96 Apernado de las placas.	161
Figura 97 Pintado de la estructura con soplete.	161
Figura 98 Instalación de las planchas de policarbonato con uniones.....	162
Figura 99 Instalación del circuito de alimentación de agua.	162
Figura 100 Instalación de la manguera flexible de PVC.....	163

Figura 101 Instalación de accesorios del circuito de distribución.	163
Figura 102 Vista frontal del soplador.	164
Figura 103 Vista lateral del soplador.	164
Figura 104 Conducto de salida de la instalación para ventilación.	164
Figura 105 Instalación del piranómetro.	165
Figura 106 Instalación de anemómetro y veleta.	165
Figura 107 Instalación de sensores de temperatura superficial de la placa.....	166
Figura 108 Instalación de caudalímetros.....	167
Figura 109 Instalación de sensores de nivel.....	167
Figura 110 Cableado y colocación de canaletas en la estructura.	168
Figura 111 Placa electrónica del módulo de potencia.....	168
Figura 112 Placa electrónica del módulo de alimentación.....	169
Figura 113 Placa electrónica del módulo de control y adquisición de datos.	169
Figura 114 Vista frontal de la caja de control.	170
Figura 115 Vista lateral izquierda y derecha de la caja de control.	170
Figura 116 Sistema de alimentación solar fotovoltaico.	171
Figura 117 Ubicación y conexión de la batería y el regulador dentro de la caja.	172
Figura 118 Indicadores de carga del regulador.	173
Figura 119 LEDs indicadores de llenado del tanque.	174
Figura 120 LCD indicador de las variables del sistema.....	174
Figura 121 Datos obtenidos del sistema en tarjeta SD parte 1.....	175

Figura 122 Datos obtenidos del sistema en tarjeta SD parte 2.....	175
Figura 123 Irradiación diaria útil durante el mes de noviembre de 2015.	178
Figura 124 Gráfica de caudal – irradiancia del día 10 de diciembre de 2015.....	179
Figura 125 Curva de caudal – radiación.	182
Figura 126 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector solar negro.	184
Figura 127 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector solar transparente...	184
Figura 128 Rendimiento del colector solar de policarbonato pintado negro mate. .	187
Figura 129 Rendimiento del colector solar de policarbonato bronce.	187
Figura 130 Gráfico comparativo Colector negro – Colector transparente.....	188
Figura 131 Gráfico de temperatura máxima del fluido – Irradiación para el mes de noviembre de 2015.	189
Figura 132 Gráfico comparativo de rendimiento de varios tipos de colectores solares con los colectores de policarbonato desarrollados.	192
Figura 133 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector de aire.	193
Figura 134 Gráfico de rendimiento del colector solar de aire.....	194
Figura 135 Gráfico de temperatura máxima del aire – Irradiación para el mes de noviembre de 2015.	195
Figura 136 Gráfico de caudal – irradiancia para el colector solar de aire.....	197
Figura 137 Gráfico comparativo de la proyección de costos de los sistemas de calentamiento.	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Principales Energías renovables y no renovables.	6
Tabla 2 Datos de entrada para la aplicación del método de Armstrong Page.....	12
Tabla 3 Irradiación solar media mensual con inclinación de 20° por el método de Armstrong Page.	12
Tabla 4 Estimación de la irradiación media mensual por el método ISF.....	14
Tabla 5 Irradiación media mensual con inclinación de 20° a partir de datos provenientes de la NASA.....	16
Tabla 6 Irradiación media mensual con inclinación de 20° a partir de datos provenientes del CONELEC.....	17
Tabla 7 Tabla comparativa de los cuatro métodos empleados.....	18
Tabla 8 Selección del volumen de acumulación por desfase entre periodo de captación y consumo (García, 1999).	28
Tabla 9 Espesores mínimos para ductos que conducen potencias menores a 70 kW, conductividad de referencia 0,04 W/(mK) (NEC-11, 1996).....	34
Tabla 10 Instrumentos y accesorios hidráulicos.	36
Tabla 11 Tipos de válvulas.	37
Tabla 12 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del pegamento.....	55
Tabla 13 Tabla de conclusiones de selección del pegamento.....	55
Tabla 14 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del tipo de tubería.....	57
Tabla 15 Tabla de conclusiones de selección del tipo de tubería.	58

Tabla 16 Catálogo de tubería estructural rectangular (Formac, 2015).....	70
Tabla 17 Tabla resumen de fuerzas de reacción en los empotramientos.	72
Tabla 18 Tabla de especificaciones de un rollo de lana de vidrio sin papel.	74
Tabla 19 Tabla de especificaciones Ductoroll LV.....	74
Tabla 20 Espesor de referencia mínimo en aparatos y depósitos (RITE, 2011).	75
Tabla 21 Componentes del circuito hidráulico de alimentación.....	77
Tabla 22 Componentes del circuito hidráulico de distribución.	79
Tabla 23 Caudales recomendados por fabricantes de colectores solares.	80
Tabla 24 Velocidades en cada sección del sistema hidráulico.....	81
Tabla 25 Accesorios utilizados en el circuito hidráulico.	86
Tabla 26 Altura dinámica total de bombeo para distinta temperatura de fluido y caudal.	91
Tabla 27 Altura dinámica total de bombeo para distinta temperatura de fluido y caudal.	92
Tabla 28 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección de la bomba sumergible.	94
Tabla 29 Tabla de conclusiones de selección de la bomba.....	94
Tabla 30 Tabla de relación entre Altura Dinámica Total de la bomba y Caudal a voltajes de 13,6 VDC y 12 VDC.	96
Tabla 31 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del soplador.	98
Tabla 32 Tabla de conclusiones de selección del soplador.....	98

Tabla 33 Potencia requerida por los sensores.	100
Tabla 34 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del panel solar fotovoltaico.	102
Tabla 35 Tabla de conclusiones de selección del panel solar fotovoltaico.....	102
Tabla 36 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del regulador solar.	105
Tabla 37 Tabla de conclusiones de selección del regulador solar.	105
Tabla 38 Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección de la batería.	109
Tabla 39 Tabla de conclusiones de selección de la batería.....	109
Tabla 40 Especificaciones técnicas para selección de cable (DISENSA, 2015).	111
Tabla 41 Pines de conexión del módulo LC STUDIO MICRO SD CARD.	115
Tabla 42 Pines de conexión del módulo RTC.....	116
Tabla 43 Pines de conexión del LCD 16x2.....	117
Tabla 44 Características técnicas del sensor flotador.	117
Tabla 45 Propiedades ópticas del policarbonato alveolar de 8mm color bronce y pintura negra mate. (Danpalon, 2015).	134
Tabla 46 Promedio de los datos obtenidos del sistema en funcionamiento.....	135
Tabla 47 Propiedades físicas del agua a diferentes temperaturas	137
Tabla 48 Densidad del agua a diferentes temperaturas (Fullquímica, 2012).....	137
Tabla 49 Tabla de propiedades de materiales (Miliarium, 2012).	138
Tabla 50 Parámetros característicos de los distintos tipos de colectores solares....	140

Tabla 51 Promedio de los datos obtenidos del sistema en funcionamiento.....	144
Tabla 52 Propiedades físicas del aire a diferentes temperaturas.....	146
Tabla 53 Diámetro del disco de corte según la longitud de la sección transversal a cortar	154
Tabla 54 Distancia entre apoyos mínima según el espesor de la plancha.....	156
Tabla 55 Datos y unidades adquiridos por el sistema.	176
Tabla 56 Estimación de la irradiación global media para superficie inclinada 20° incidente sobre el colector solar del día 2 de noviembre de 2015.....	177
Tabla 57 Irradiación global útil para superficie inclinada 20° incidente sobre el colector solar durante el mes de noviembre de 2015.	177
Tabla 58 Valores de pendiente y ordenada para la relación caudal – irradiancia...	180
Tabla 59 Valores de rendimiento de los colectores para distintos días.....	183
Tabla 60 Tabla de errores del coeficiente de pérdida térmica de los colectores.....	186
Tabla 61 Temperatura máxima del fluido durante el mes de noviembre de 2015..	189
Tabla 62 Valores de rendimiento del colector para distintos días	193
Tabla 63 Tabla de errores del coeficiente de pérdida térmica del colector de aire..	194
Tabla 64 Temperatura máxima del fluido durante el mes de noviembre de 2015...	195
Tabla 65 Valores de pendiente y ordenada para la relación caudal – irradiancia del colector solar de aire.....	196
Tabla 66 Costos de construcción de la cubierta.	198
Tabla 67 Costos del sistema de alimentación eléctrica.....	199
Tabla 68 Costos del sistema eléctrico.	200

Tabla 69 Costos varios.....	201
Tabla 70 Totalidad de costos de la investigación.....	201
Tabla 71 Costos para una instalación doméstica.....	202
Tabla 72 Características técnicas de una ducha eléctrica.....	203
Tabla 73 Características técnicas del calefón a gas.	203
Tabla 74 Características técnicas del colector solar con policarbonato.	204
Tabla 75 Tabla comparativa entre distintos sistemas de calentamiento de agua.	204
Tabla 76 Proyección de costos a futuro de distintos sistemas de calentamiento de agua.....	205

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Estimación de la irradiación global para superficie inclinada por el método de Armstrong Page.....	212
Anexo 2: Coeficientes A y B para el método ISF.....	224
Anexo 3: Irradiación media diaria por el método de Armstrong Page.....	225
Anexo 4: Mapa de irradiación global en Ecuador.....	227
Anexo 5: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del pegamento.....	239
Anexo 6: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del tipo de tubería.....	241
Anexo 7: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección de la bomba.....	242
Anexo 8: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del soplador.....	243
Anexo 9: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del panel solar fotovoltaico.....	244
Anexo 10: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del regulador solar.....	245
Anexo 11: Evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes para la selección del tipo de la batería.....	246
Anexo 12: Plano de conjunto de la Estructura metálica – Descripción de tubos....	247
Anexo 13: Plano de montaje.....	248

Anexo 14: Plano de construcción Larguero – Placa, ubicación de agujeros de taladro.....	249
Anexo 15: Plano de construcción Techo – Placa 2.....	251
Anexo 16: Análisis de datos del policarbonato pintado de negro mate y policarbonato bronce para el mes de noviembre de 2015.....	252
Anexo 17: Programa en Arduino.....	282

RESUMEN

El proyecto de investigación realizado consistió en el desarrollo de una nueva alternativa para calentadores solares con el uso de colectores de policarbonato alveolar, material que se usa ampliamente en el área de construcción como cubiertas y techos con protección ultravioleta, con el fin de realizar un análisis comparativo que permita determinar la utilidad y aplicabilidad de este tipo de colector. Se implementaron tres colectores de placa plana sin cubierta en una estructura metálica, de los cuales dos están destinados al calentamiento de agua y uno para calefacción de aire, dada la necesidad de comparar los resultados del policarbonato con un cuerpo negro, uno de los colectores se pintó con esmalte negro mate. Se realizó el dimensionamiento, diseño y construcción de la estructura metálica de soporte, los colectores solares, sistema hidráulico y neumático para proseguir con la instrumentación y control del sistema, se realizaron pruebas de funcionamiento y posteriormente se implementó un sistema automático de adquisición de datos por un lapso de quince días durante el mes de noviembre de 2015. Con los datos obtenidos, se realizó un análisis energético y comparativo de los colectores solares, de los cuales se presentaron los resultados de la investigación, conclusiones y recomendaciones del proyecto elaborado.

PALABRAS CLAVE:

- **COLECTOR SOLAR**
- **POLICARBONATO ALVEOLAR**
- **CALENTADOR SOLAR DE BAJA TEMPERATURA**
- **CALEFACCIÓN SOLAR**
- **SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.**

ABSTRACT

The research project consisted of the development of a new alternative for solar heaters using alveolar polycarbonate collectors, a material that is widely used in the construction area as roofs and ceilings with UV protection, in order to perform a comparative analysis that determines the utility and applicability of this type of collector. Three flat plate collectors without cover were implemented in a metallic structure, two of them are intended for water heating and the other one for space heating, given the necessity to compare the results of polycarbonate with a black body, one of the collectors was painted with black matte paint. Dimensioning, design and construction of the metal support structure, solar collectors, hydraulic and pneumatic systems was performed to continue with the instrumentation and control system, subsequently functional tests were performed and then an automatic data acquisition was implemented by a period of fifteen days during the month of November 2015. With the data results, a comparative and energy analysis of the solar collectors was performed to present the research results, conclusions and recommendations of the project.

KEYWORDS:

- **SOLAR COLLECTOR**
- **ALVEOLAR POLICARBONATE**
- **LOW TEMPERATURE SOLAR WATER HEATING**
- **SOLAR SPACE HEATING**
- **DATA ACQUISITION SYSTEM.**

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Antecedentes

El consumo de energía por el ser humano se ha incrementado con el paso de los años y su empleo desmesurado en aplicaciones domésticas como calentamiento de agua y calefacción de aire hace que las personas busquen nuevas alternativas para evitar la dependencia de energías no renovables.

Ecuador ha incursionado en los últimos años en el ámbito de energías renovables dentro de su filosofía de cambio de la matriz productiva para suplir necesidades de la población mediante el empleo de energía solar para disminuir así el consumo de gas y energía eléctrica innecesaria.

Por esta razón, el departamento de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, en búsqueda constante de nuevas aplicaciones ha propuesto el diseño de un colector solar con policarbonato alveolar que aproveche la energía solar térmica para el calentamiento de agua y calefacción de aire.

1.2 Justificación e importancia

El consumo energético mundial utilizando energías convencionales es muy elevado y dada la visión actual de optimización de los recursos del planeta con el fin de preservar el medio ambiente, ha llevado a la búsqueda exhaustiva de energías alternativas para suplir necesidades inherentes en el ser humano, como son el calentamiento de agua y la calefacción del ambiente.

Debido a la situación económica actual y la iniciativa del cambio de la matriz productiva de acuerdo a las políticas gubernamentales, la Universidad de las Fuerzas

Armadas – ESPE se encuentra en constante búsqueda de desarrollo tecnológico a fin de promover el desarrollo del país; por esta razón el Departamento de Energías Renovables y el Laboratorio de Radiación Solar han tenido la iniciativa de buscar nuevos modelos de calentadores solares más económicos y eficientes.

Actualmente las cubiertas solares con policarbonato son muy empleadas como techos en el área de construcción para protección de rayos ultravioleta emitidos por el sol, sin embargo la energía disipada por este material es desperdiciada en su totalidad.

El desarrollo de este proyecto busca emplear la energía solar absorbida por el policarbonato, convertirla en energía térmica y emplearla para calentamiento de agua y calefacción de aire, aprovechando de esta manera la instalación de este tipo de cubiertas y dando una alternativa al empleo de energías convencionales.

Es importante conocer la eficiencia y establecer el comportamiento del sistema implementado para poder compararlo con otros tipos de colectores solares y así determinar la funcionalidad y utilidad del mismo.

1.3 Alcance del proyecto

El presente proyecto se enfoca en realizar desarrollar un calentador solar con policarbonato mediante la implementación de tres subsistemas que se componen de la siguiente manera:

- Módulo para calentamiento de agua con placa absorbadora de policarbonato bronce.
- Módulo para calentamiento de agua con placa absorbadora de policarbonato pintado de negro mate.
- Módulo para calefacción de ambiente con placa absorbadora de policarbonato bronce.

El posterior análisis de cada subsistema busca determinar el comportamiento y la eficiencia de cada colector solar implementado.

Adicionalmente se pretende mediante el desarrollo del prototipo obtener el modelo de una cubierta solar que permita calentar agua y aire además de cumplir con su función de protección solar y ultravioleta en aplicaciones de baja temperatura.

1.4 Objetivos

1.4.1. General

Analizar y desarrollar un prototipo utilizando policarbonato alveolar de 8 mm para calentamiento de agua y calefacción de ambiente.

1.4.2. Específicos

- Construir el prototipo de una cubierta solar con un diseño mecánico que procure el correcto análisis del sistema.
- Seleccionar e implementar los sensores y actuadores adecuados para el equipo.
- Implementar un sistema de control y monitoreo que permita manejar la información sobre las variables del prototipo.
- Realizar pruebas periódicas del sistema y realizar un estudio de las variables climatológicas y físicas que influyen en su comportamiento.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Fuentes de energía

Las actividades cotidianas del ser humano como el uso de medios de transporte, actividades domésticas y aplicaciones industriales exigen un suministro constante y controlado de energía, tomando en cuenta los recursos disponibles y la rentabilidad. Los problemas principales que se afrontan con el uso desmedido de la energía son la contaminación y agotamiento de recursos, debido a esto es inherente pensar en un uso eficiente y ahorro como soluciones.

La demanda mundial de energía en el año 2011 muestra que el petróleo es la fuente más solicitada, las fuentes provenientes de combustibles fósiles ocupan un 81% de la demanda y el total de fuentes de energía renovable no hidroeléctrica es del 11%, sin embargo se espera que para el año 2035 aumente hasta 15%, por lo cual es necesario potenciar el desarrollo de energías renovables para suplir el alto consumo a nivel mundial (Ver Figura 1).

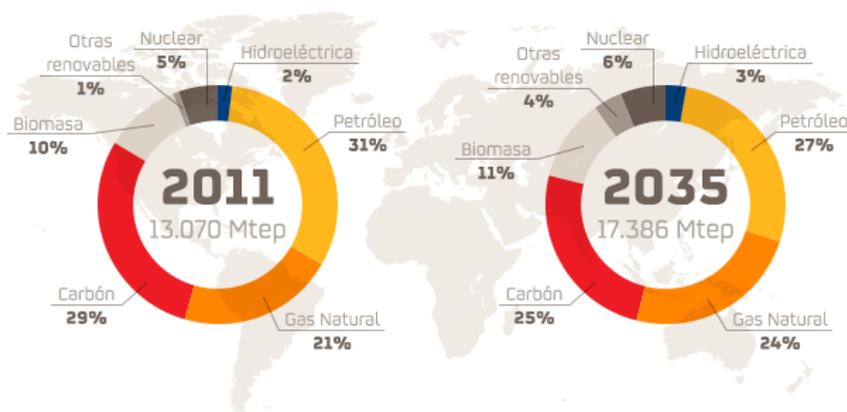


Figura 1 Perspectivas de crecimiento de la demanda mundial de energía.

Fuente: (Agencia Internacional de la Energía, 2013)

La situación en el Ecuador muestra en el año 2012 un consumo excesivo de petróleo de un 76%, y un total de energía renovable no hidroeléctrica de tan solo el 1%, por esta razón es sustancial buscar fuentes de energía alternativas cuyo consumo no altere al ecosistema (ver Figura 2).

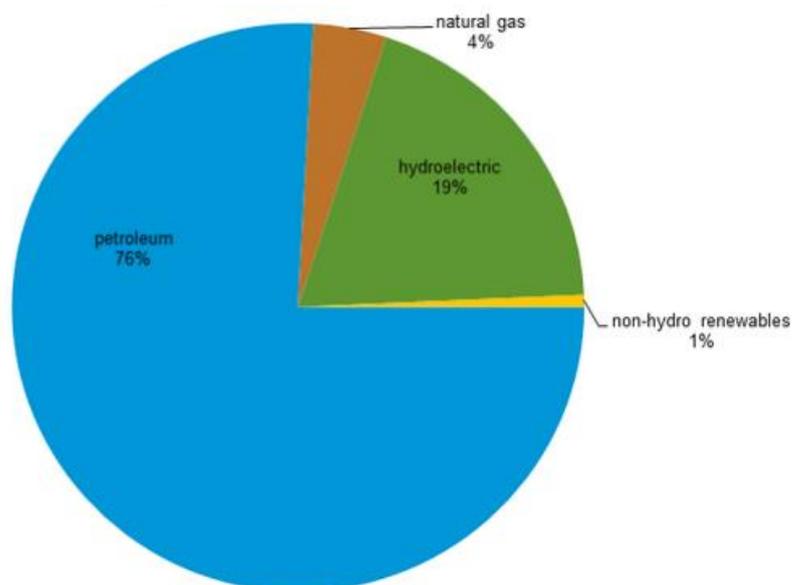


Figura 2 Consumo total de energía primaria por fuente en Ecuador en el 2012.

Fuente: (British Petroleum's 2013 Statistical Review of World Energy, 2013)

Las fuentes de energía se clasifican como renovables y no renovables. En la tabla 1 se muestra un resumen de los principales tipos de energía renovable y no renovable que existen actualmente, donde cabe recalcar que la energía hidroeléctrica es la más empleada actualmente por su gran potencial de generación eléctrica.

Tabla 1
Principales Energías renovables y no renovables.

Energías no renovables

Procedentes de combustibles fósiles Son fuentes de energía con tecnología bien desarrollada y proporcionan además materias primas para otros tipos de industrias como la química y la médica. Presentan inconvenientes como el transporte, almacenamiento y graves problemas ambientales debido a la emisión de gases como dióxidos de carbono, nitrógeno y azufre. Entre este tipo de fuentes de energía destacan el petróleo, gas natural, carbón.

Procedentes del uranio Se la conoce como energía nuclear, la cual es liberada al romper átomos de uranio mediante fisión nuclear. Su principal ventaja radica en que con una pequeña cantidad de materia prima se obtiene una gran cantidad de energía. Presenta inconvenientes por su elevado riesgo de contaminación, difícil almacenamiento y elevado costo de instalación y mantenimiento.

Energías renovables

Energía hidroeléctrica Esta fuente utiliza la energía potencial del agua asociada a saltos de agua y ríos, que al pasar por una turbina transmite esta energía a un generador y la convierte en energía eléctrica; presenta un impacto ambiental significativo en ecosistemas marinos, sin embargo su aportación energética es muy importante.

Energía eólica Transforma la energía cinética proveniente de las corrientes de aire en energía eléctrica y otras aplicaciones con energía mecánica; este tipo de fuente ha tenido un gran desarrollo en los últimos años debido a reducción de costos y mejoras tecnológicas. Presenta problemas debido a la intermitencia del viento, impacto ambiental en ecosistemas y difícil almacenamiento.

Energía solar Es aprovechada para producir electricidad mediante energía solar fotovoltaica y calor mediante energía solar térmica. La energía solar térmica utiliza colectores solares y sistemas de concentración y se utiliza para calentar agua y aire, este tipo de tecnología se ha convertido en una buena alternativa ecológica debido a que es económicamente competitiva. La energía solar fotovoltaica utiliza celdas que al interconectarse forman un panel solar, el cual genera energía eléctrica de consumo.

Biomasa Aprovecha la energía interna de los residuos orgánicos provenientes de desechos sólidos urbanos, forestales y agrícolas para transformarlos en combustibles sólidos, líquidos y gaseosos. Este tipo de energía contribuye a una mejor limpieza de los bosques y a aprovechar áreas de terreno que no son aptas para cultivo.

Energía geotérmica Este tipo de energía está asociada con el incremento de calor en el interior de la tierra, para transformarla en energía eléctrica y energía térmica utilizada principalmente para la calefacción.

2.2 Radiación, irradiancia e irradiación solar

Es importante definir y diferenciar los conceptos de radiación, Irradiancia e irradiación solar.

- Radiación

Es el conjunto de ondas electromagnéticas que proceden del sol en un espectro desde el infrarrojo hasta el ultravioleta.

- Irradiancia

Es la energía luminosa que proviene en su totalidad del sol e incide sobre el módulo solar. A la potencia total recibida por unidad de área de captación se la conoce como Irradiancia Global y consta de tres componentes (ver Figura 3):

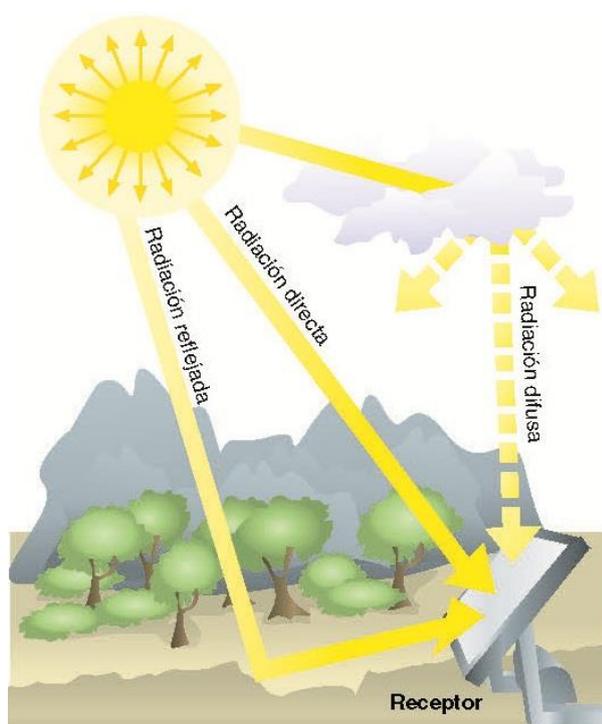


Figura 3 Componentes de la irradiación global.

Fuente: (CALCULATIONSOLAR BLOG, 2013)

- a) *Irradiancia Directa*: Es la parte de la radiación solar proveniente en línea recta desde el sol sin presentar cambios en su trayectoria. Si la superficie sobre la cual incide es perpendicular a esta línea, se denomina irradiancia directa normal.
- b) *Irradiancia Difusa*: Es parte de la radiación solar que llega a la superficie de captación de manera aleatoria debido a que la atmósfera absorbe y dispersa parte de la radiación. Su distribución es difícil de determinar, por ello se la aproxima suponiendo una incidencia uniforme desde todo el cielo.
- c) *Irradiancia reflejada o de Albedo*: Es parte de la radiación solar que se refleja en el suelo y otros objetos circundantes e incide sobre una superficie de captación. Su estimación se realiza suponiendo que el suelo es una superficie horizontal de extensión infinita y refleja con la misma intensidad en toda dirección y depende de la reflectividad del suelo.

- **Irradiación**

La irradiación se define como la irradiancia total en un intervalo de tiempo determinado, comúnmente un día o una hora.

- **Potencia de una instalación solar**

La potencia producida por un captador solar está dada por la ecuación (García, 1999):

$$PT = G * A * \eta \quad (1)$$

Dónde:

G: Irradiancia Global $\left[\frac{W}{m^2}\right]$

A: Área de captación $[m^2]$

η : Rendimiento del sistema de captación

- Orientación de los módulos

El módulo solar produce la mayor cantidad de energía posible cuando está orientado en línea recta hacia el sol, por esta razón resulta inherente determinar la mejor orientación del panel, tomando en cuenta las características geográficas del sitio de instalación (García, 1999).

Los ángulos que determinan la orientación de un módulo son:

- Acimut*: Es el ángulo sobre el plano horizontal que forman la dirección hacia el Ecuador terrestre y la proyección sobre este plano de la línea perpendicular a la superficie del módulo.
- Inclinación*: Es en ángulo que forma el plano del módulo con la superficie horizontal.

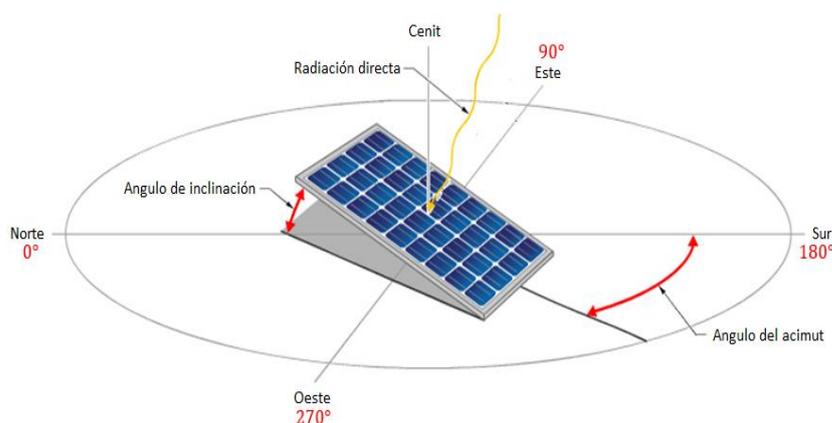


Figura 4 Orientación de un módulo solar

Fuente: (American Publishers Inc., 2010)

El acimut y la inclinación del módulo se determinan tomando en cuenta la posición del movimiento diario y anual del sol.

El movimiento del sol diariamente determina la energía que es capaz de absorber un captador solar, dicho movimiento se origina en el este y termina en el oeste. El 90% de la energía recibida diariamente se centra durante el mediodía, debido a una menor incidencia y dispersión de la atmósfera sobre los rayos solares; por lo tanto es conveniente que el módulo tenga una orientación de acimut igual a cero, es decir girado

hacia el ecuador, para permitir que el captador esté centrado directamente hacia el sol durante el mediodía (García, 1999).

Las estaciones determinan la altura de la trayectoria diaria del sol desde el amanecer hasta el atardecer, debido a esto el panel solar captará mayor o menor energía dependiendo del día en el que se encuentre, por lo que es importante determinar la inclinación del módulo que favorezca una mayor producción de energía en un determinado día que se considere más favorable. La inclinación del módulo depende de los siguientes factores:

- a) *Latitud*: Es la distancia existente entre cualquier punto del planeta y la línea ecuatorial, la cual se mide sobre el meridiano que pasa por aquel punto. Si el punto se ubica sobre el ecuador se denomina Norte (N) y si se ubica por debajo del ecuador se denomina Sur (S). Se mide entre un rango de 0 a 90°.

La latitud del Laboratorio de Radiación Solar ubicado en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE es de 0°18'48,56" S, obtenido de datos de Google Earth (ver Figura 5).



Figura 5 Latitud y Longitud de la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE

Fuente: (Google Maps, 2015)

- b) *Declinación solar*: Se define como el ángulo que forma el plano donde se ubica el ecuador con el sol al mediodía, este ángulo varía a lo largo del año.

- c) *Elevación del sol*: Se define como el ángulo formado por la línea que une el sol con la horizontal.

2.3 Estimación del recurso solar

2.3.1 Método de Armstrong Page

El método de Armstrong Page es un método para el cálculo de la irradiación media mensual que consiste en el ingreso de datos en una hoja de cálculo de Excel, los datos de entrada para la tabla son la latitud, el ángulo de inclinación Beta, constantes a y b que son factores climáticos y dependen de la región y factor de albedo. Los datos que se han tomado en cuenta para la elaboración del método son los siguientes:

Latitud: $0^{\circ}18'48,44''$ (Correspondiente a la ubicación de instalación del proyecto)

Beta: 20° (Debido a que el módulo se encuentra sobre la línea ecuatorial y por motivos de limpieza)

$a = 0,25$ $b = 0,45$ (región Sierra)

Factor de albedo = $0,4$ (Debido a que la instalación se la realizará sobre una superficie de concreto).

La aplicación del método de Armstrong Page, cuyos datos ingresados se encuentran en la tabla 2 nos da como resultado una tabla con los datos diarios de irradiación total sobre superficie inclinada, cuyos valores se han resumido en la tabla 3. Los valores completos que otorga el método se encuentran en el Anexo 1.

Tabla 2
Datos de entrada para la aplicación del método de Armstrong Page.

<i>Datos de entrada</i>			
	<i>Grados</i>	<i>Minutos</i>	<i>Segundos</i>
<i>Latitud</i>	0	18	48,56
<i>Latitud</i>	0,31325		
<i>Beta</i>	20		
<i>Angstrom page</i>			
<i>A</i>	0,25	Factor climático	
<i>B</i>	0,45		
<i>factor de albedo</i>	0,4		

Tabla 3
Irradiación solar media mensual con inclinación de 20° por el método de Armstrong Page.

Cálculo de Irradiación solar media mensual con superficie inclinada por el método de Armstrong Page

Mes	Gdm (20°) [Kwh/m²]
Enero	4,67
Febrero	4,62
Marzo	4,42
Abril	4,02
Mayo	3,61
Junio	3,38
Julio	3,47
Agosto	3,83
Septiembre	4,25
Octubre	4,53
Noviembre	4,64
Diciembre	4,66

Se verifica que el mes peor es junio con una irradiación media de 3,38 Kwh/m² y el mes mejor es enero con una irradiación media de 4,67 Kwh/m² (ver Tabla 3).

2.3.2 Método de Ingeniería Sin Fronteras (ISF)

El método propuesto para la obtención de la irradiación global se utiliza para estimar la cantidad de energía incidente sobre el captador solar de policarbonato por día. Este método se define en la siguiente ecuación:

$$G_{dm}(\beta) = A(\beta, \rho) * G_{dm}(0) + B(\phi, \beta) * G_{dm}(0)^2 \quad (2)$$

El coeficiente A depende directamente de la inclinación del módulo (β) y la reflectividad del suelo (ρ), el coeficiente B depende de la latitud (ϕ), y del ángulo de inclinación del módulo (García, 1999). Los valores de los coeficientes A y B se obtienen de tablas, las cuales se presentan en el Anexo 2, además los datos de irradiación media mensual con una inclinación de 0° se la obtuvo de la hoja de cálculo de Armstrong Page que se encuentra en el Anexo 3.

Para la aplicación del método ISF se han tomado en cuenta los siguientes datos:

$$\beta = 20^\circ$$

$$\rho \text{ (hormigón claro): } 0,4$$

$$\phi = -0,3141701^\circ$$

Los resultados de la media de la irradiación global mensual que incide sobre una superficie inclinada, utilizando el método de ISF se encuentran tabulados en el tabla 4, un ejemplo del cálculo realizado se muestra a continuación, donde se aplicó la ecuación 2 para el mes de octubre.

$$G_{dm}(\beta) = A(\beta, \rho) * G_{dm}(0) + B(\phi, \beta) * G_{dm}(0)^2$$

$$G_{dm}(20^\circ) = 0,982 * 4,45 + 0,0069 * 4,45^2$$

$$G_{dm}(20^\circ) = 4,51 \left[\frac{Kwh}{m^2} \right]$$

Tabla 4
Estimación de la irradiación media mensual por el método ISF.

	MES DEL AÑO					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	0,0196	0,0104	-0,0008	-0,0131	-0,0241	-0,03
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	4,31	4,46	4,52	4,39	4,16	4,01
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	4,60	4,59	4,42	4,06	3,67	3,46

	MES DEL AÑO					
	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	-	-0,0175	-0,0053	0,0069	0,0174	0,0227
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	4,07	4,27	4,44	4,45	4,33	4,25
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	3,54	3,87	4,26	4,51	4,58	4,58

El peor mes es junio con una irradiación de 3,46 Kwh/ m² y el mejor mes es enero con una irradiación de 4,60 Kwh/ m² (ver Tabla 4).

2.3.3 Estimación con datos provenientes de la NASA

Para la realización de este procedimiento se aplicó el método de ISF tomando en cuenta que los valores de irradiación solar media mensual en superficie horizontal se obtuvieron de la página de meteorología y energía solar de la NASA, datos que han sido tomados durante los últimos 22 años, para lo cual fue necesario ingresar los datos de latitud de 0,313° y longitud de -78,446° correspondientes a la ubicación del Laboratorio de Radiación Solar. Los datos ingresados se pueden ver en la figura 6 y los valores que otorga la NASA se encuentran en la figura 7. La estimación de la irradiación media mensual con superficie inclinada se tabuló en tabla 5.

Figura 6 Ingreso de datos en la página de meteorología y energía solar de la NASA.

Fuente: (NASA Atmospheric Science Data Center, 2015)

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m ² /day)												
Lat -0.312 Lon -78.446	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
22-year Average	4.13	4.34	4.55	4.33	4.12	4.01	4.26	4.46	4.26	4.24	4.30	3.98

Figura 7 Datos provenientes de la NASA de irradiación global media mensual con superficie horizontal

Fuente: (NASA Atmospheric Science Data Center, 2015)

Tabla 5
Irradiación media mensual con inclinación de 20° a partir de datos provenientes de la NASA.

	MES DEL AÑO					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	0,0196	0,0104	-0,0008	-0,0131	-0,0241	-0,03
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	4,13	4,34	4,55	4,33	4,12	4,01
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	4,39	4,46	4,45	4,01	3,64	3,46

	MES DEL AÑO					
	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	-0,0273	-0,0175	-0,0053	0,0069	0,0174	0,0227
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	4,26	4,46	4,26	4,24	4,30	3,98
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	3,69	4,03	4,09	4,29	4,54	4,27

El peor mes es junio con una irradiación de 3,46 Kwh/ m² y el mejor mes es noviembre con una irradiación de 4,54 Kwh/ m² (ver Tabla 5).

2.3.4 Estimación con datos provenientes del Consejo Nacional de Electricidad CONELEC

El CONELEC ha publicado en el año 2006 un atlas solar del Ecuador correspondiente a valores de irradiación solar media mensual sobre superficie horizontal obtenidos durante el periodo de enero de 1985 y diciembre de 1992 con una resolución de 1 km². Estos datos han sido corroborados mediante la medición de estaciones meteorológicas alrededor del país obteniendo un porcentaje de error del 10% como indica el Atlas Solar del Ecuador Con Fines de Generación Eléctrica elaborado por CONELEC.

Los mapas presentan colores para la identificación de la radiación global promedio en cada región, al ubicar el mapa en el sector de Sangolquí se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 6. Los mapas de Insolación Global del CONELEC se encuentran en el Anexo 4, estos datos se utilizaron para la estimación de la irradiación media mensual con superficie inclinada mediante el método de ISF.

Tabla 6
Irradiación media mensual con inclinación de 20° a partir de datos provenientes del CONELEC.

	MES DEL AÑO					
	ENERO	FEBRERO	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	0,0196	0,0104	-0,0008	-0,0131	-0,0241	-0,03
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	5,10	5,10	4,65	4,50	4,65	4,80
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	5,52	5,28	4,55	4,15	4,05	4,02

	MES DEL AÑO					
	JULIO	AGOSTO	SEPTIEMBRE	OCTUBRE	NOVIEMBRE	DICIEMBRE
A	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982	0,982
B	-0,0273	-0,0175	-0,0053	0,0069	0,0174	0,0227
Gdm (0°) [Kwh/m ²]	4,95	5,25	5,25	5,10	5,10	5,10
Gdm (20°) [Kwh/m ²]	4,19	4,67	5,01	5,19	5,46	5,60

El peor mes es junio con una irradiación de 4,02 Kwh/ m² y el mejor mes es diciembre con una irradiación de 5,60 Kwh/ m² (ver Tabla 6).

2.3.5 Comparación entre los métodos empleados

La estimación de la irradiación global media mensual por los cuatro métodos permite realizar una mejor valoración de la cantidad de irradiación con la que se puede contar para la realización del proyecto, así como estimar el peor mes y el mejor mes del año. En la tabla 7 se muestra un resumen de los resultados obtenidos por los cuatro métodos, en ella se puede observar que todas concuerdan en que el peor mes es junio, mientras que para el mejor mes, el método ISF y Armstrong Page muestran que el mejor mes es Enero, los datos de la NASA evidencian que el mejor mes es noviembre mientras que los datos de CONELEC muestran que el mejor mes es diciembre, sin embargo se puede apreciar que entre los meses de noviembre, diciembre y enero, los valores de irradiación son muy parecidos.

Tabla 7
Tabla comparativa de los cuatro métodos empleados.

Mes	Gdm (20°)			
	ISF	Armstrong Page	NASA	CONELEC
Enero	4,60	4,67	4,39	5,52
Febrero	4,59	4,62	4,46	5,28
Marzo	4,42	4,42	4,45	4,55
Abril	4,06	4,02	4,01	4,15
Mayo	3,67	3,61	3,64	4,05
Junio	3,46	3,38	3,46	4,02
Julio	3,54	3,47	3,69	4,19
Agosto	3,87	3,83	4,03	4,67
Septiembre	4,26	4,25	4,09	5,01
Octubre	4,51	4,53	4,29	5,19
Noviembre	4,58	4,64	4,54	5,46
Diciembre	4,58	4,66	4,27	5,60
Peor mes	Junio	Junio	Junio	Junio
Mejor mes	Enero	Enero	Noviembre	Diciembre

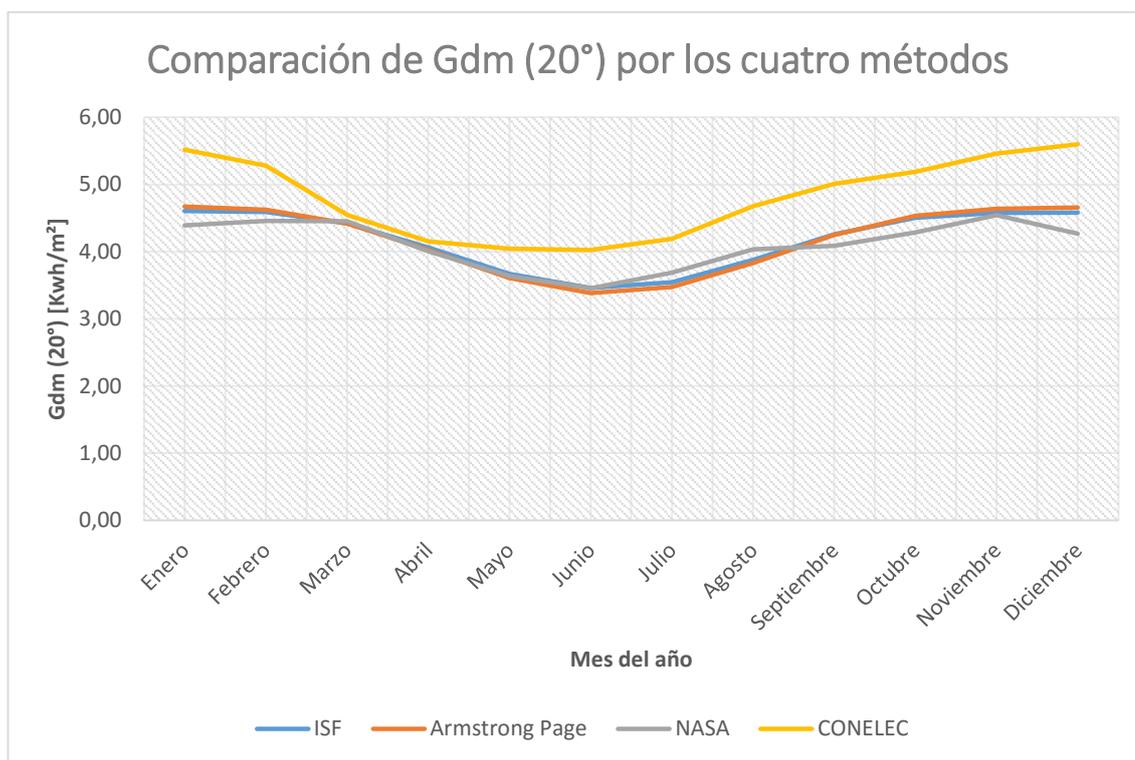


Figura 8 Gráfico comparativo de la estimación de Gdm (20°) por los cuatro métodos empleados.

En la figura 8 se aprecia un comportamiento similar de las curvas por los cuatro métodos, evidenciando un comportamiento decreciente desde el mes de enero hasta junio y creciente desde el mes de junio hasta diciembre, habiendo un desfase significativo de los valores del CONELEC respecto a los otros y dado que los datos obtenidos por este método son antiguos, se lo descarta.

2.4 Colector solar

Un colector solar es un dispositivo capaz de captar la radiación solar y la transforma en energía térmica, la cual es transferida hacia un fluido que circula por los ductos del colector. Dependiendo del tipo de colector y la temperatura que este alcance, puede ser utilizado a nivel doméstico como para calentamiento de agua o calefacción, y en

casos de mayor temperatura pueden llegar a ser utilizados para la generación de energía eléctrica.

Los colectores solares se dividen en 2 grupos:

- Colector solar sin concentración
- Colector solar de concentración

2.4.1 Colector Solar sin Concentración

Son utilizados en instalaciones de baja temperatura, iguales o menores a 90°C, pueden ser empleados para el calentamiento de agua sanitaria, climatización de piscinas y calefacción.

Dentro de estos tipos de colectores tenemos:

a) Colector Solar Plano Con Cubierta

Es un colector con forma plana, que recibe la radiación solar a través de los tubos que conforman el captador y lo transfiere al fluido que circula dentro de ellos. La temperatura máxima que proporciona este tipo de colector no supera los 90°C. Puede utilizar la radiación solar difusa, además de la radiación directa.

Composición de un captador solar plano con cubierta:

- Placa absorbente: sirve para optimizar el proceso de absorción de radiación solar para transmitir la energía al fluido, suele ser construida de cobre, aluminio, acero negro inoxidable, etc., y son recubiertas con pintura oscura.
- Superficie transparente: sirve para reforzar la absorción de energía térmica mediante el efecto invernadero, por lo general está construida de vidrio.
- Conducto: Son los canales por donde el fluido circula.
- Caja: Contiene todos los componentes, por lo general son hechas de aluminio.

- Aislamiento térmico: Se coloca en la parte posterior y lateral del captador para evitar pérdidas térmicas. Suelen utilizarse espumas de poliestireno, poliuretano, fibra de vidrio, etc.

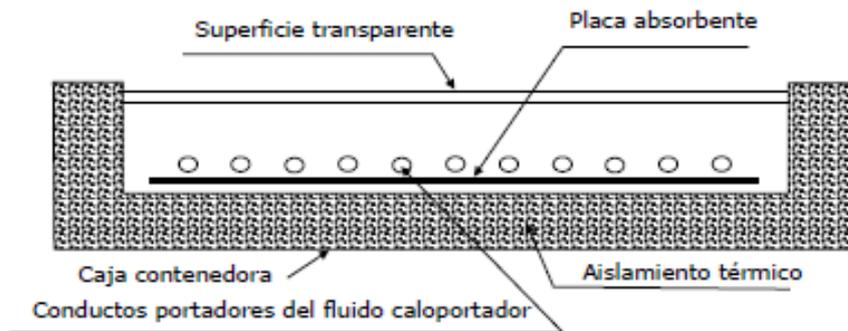


Figura 9 Componentes de un captador solar plano con cubierta.

Fuente: (Tobajas, 2012)

b) Colector Solar Plano sin Cubierta

Este tipo de colector solar plano no está aislado ni cubierto por una caja y/o cristal. Está compuesto por una gran cantidad de pequeños tubos de metal o de plástico que captan el calor del sol y lo transfieren al fluido de trabajo que se encuentra circulando dentro de estos.

Es el modelo más simplificado de captador solar y posee un práctico tamaño que puede instalarse fácilmente en cualquier superficie.

Se utiliza en el calentamiento de agua para aplicaciones simples, ya que en general son colectores que funcionan a un bajo rango de temperatura (10-40°C). El principal uso potencial para este tipo de colectores es el calentamiento de agua para piscinas.

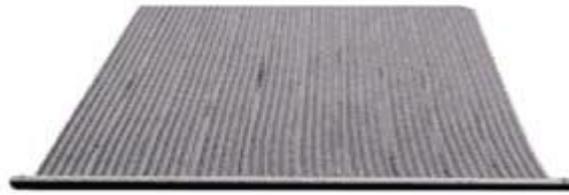


Figura 10 Captador solar plano sin cubierta

Fuente: (ITCCANARIAS, 2007)

c) Colector Solar de Tubos de Vacío

Este captador está formado por tubos a los cuales se los ha sellado y aislado, efectuado el vacío en su interior, con la finalidad de reducir pérdidas por convección. Este colector consta de dos tubos concéntricos dentro de un tubo de vidrio en donde se ha realizado el vacío. En el interior del tubo circula un fluido que se evapora por la radiación solar, y asciende al tubo superior, que a su vez cede calor al distribuidor que está situado en la parte superior, calentando el fluido que va al intercambiador. Son utilizados en la producción de agua caliente sanitaria y climatización de piscinas.

Este tipo de colector es más costoso que un colector solar plano tanto por los tubos como por la instalación, además la manipulación de un tubo de vacío es más delicada, debido a una menor resistencia por el vacío al que se someten.



Figura 11 Captador solar de tubos de vacío.

Fuente: (ITCCANARIAS, 2007)

d) Colector Solar Tubos de Calor

Este captador está formado por dos tubos concéntricos, el interior está pintado de negro y el exterior es de vidrio, el fluido atraviesa por el tubo interior y permite que el fluido se caliente por la absorción de la radiación solar. Son utilizados para calefacción.



Figura 12 Captador solar de tubos de calor.

Fuente: (SUNDA, 2011)

e) Colector Solar Cónico o Esférico

La superficie de captación de este colector es cónica o esférica y está cubierto por un vidrio de la misma geometría que el captador. Es utilizado en la producción de agua caliente sanitaria.



Figura 13 Captador solar esférico.

Fuente: (BRICOLARIS, 2012)

2.4.2 Colector Solar de Concentración

Son utilizados para sistemas solares térmicos de media y alta temperatura. El captador utiliza un reflector, por lo general son de tipo espejo, que concentra la radiación, produciendo elevadas temperaturas, captan la energía directa, por lo tanto requieren un movimiento continuo para dar seguimiento al sol.



Figura 14 Captador solar de concentración.

Fuente: (ANES, 2010)

2.5 Sistema solar térmico para calentamiento de agua

Una instalación térmica solar cuyo objetivo es el abastecimiento de Agua Caliente Sanitaria (ACS) consta básicamente de los componentes que se pueden apreciar en la figura 15.

Composición de un Sistema Solar Térmico:

- Sistema de captación: Está formado por el captador que se encarga de transformar la radiación solar en energía térmica para calentar el fluido que circula por su interior.
- Sistema de intercambio: Se encarga de realizar la transferencia de energía térmica.
- Sistema de acumulación: Se encarga de almacenar el fluido para su posterior uso.

- Circuito hidráulico: Constituido por elementos como tuberías, válvulas, bombas, vaso de expansión, purgadores, etc.
- Sistema de Control: se encarga de controlar automáticamente las variables eléctricas del sistema tanto de activación de sensores como de toma de datos.

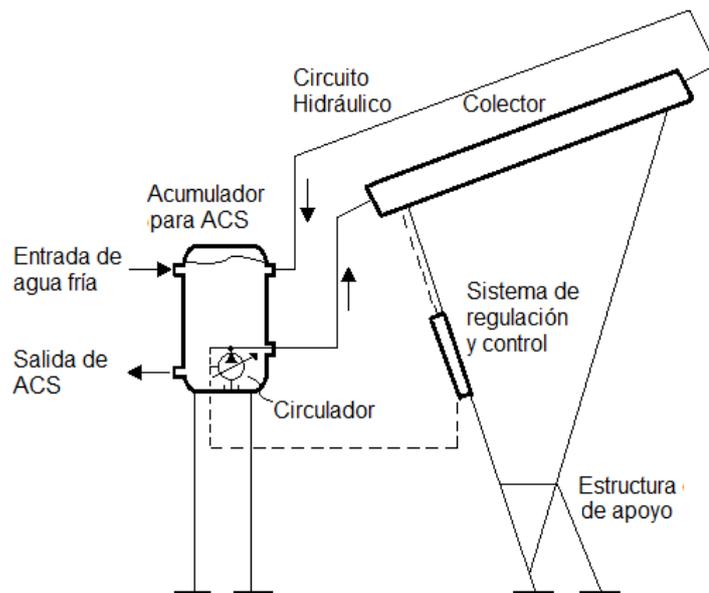


Figura 15 Componentes de un sistema solar térmico para calentamiento de agua.

2.5.1 Sistema de Captación

La circulación del fluido por el captador puede realizarse a través de la utilización de una bomba (circulación forzada) o por circulación natural basada en la diferencia de densidades (circulación por termosifón).

a) Circuitos por termosifón

El agua al calentarse disminuye su densidad, lo cual causa una estratificación dependiendo de la temperatura, de esta manera el agua caliente se ubica en la parte superior y el agua fría en la parte inferior. En este caso, el tanque de almacenamiento debe instalarse por encima del nivel de los colectores solares.

Este tipo de instalaciones constituyen sistemas compactos, ya que no poseen una bomba para su recirculación. Si la instalación contiene un solo módulo de captación para instalaciones domésticas pequeñas, entonces es más económico y simple que un sistema con circuito forzado.

b) Circuitos forzados

La recirculación del fluido por el captador se realiza con la intervención de una bomba, la cual tiene un caudal regulado según el nivel de radiación solar, con el fin de proporcionar condiciones óptimas para el sistema.

2.5.2 Sistema de Intercambio

El calor resultante de la conversión térmica de la radiación solar se almacena en un depósito de acumulación. La conexión y la transferencia de calor entre el captador solar y el depósito se efectúan a través de un circuito hidráulico de acuerdo con una de las siguientes configuraciones:

a) Circuito Directo

El fluido que circula por los captadores solares es el agua de consumo. Pueden existir problemas de corrosión.

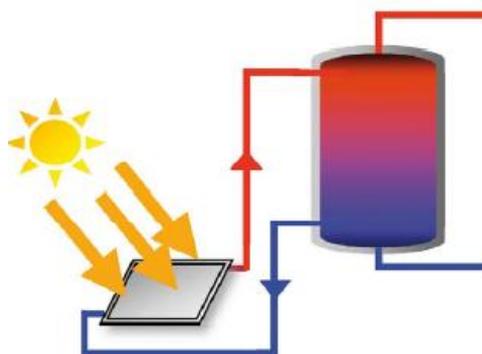


Figura 16 Circuito hidráulico de transferencia de calor Directo.

Fuente: (Instituto Tecnológico de Canarias, 2012)

b) Circuito Cerrado

Por los captadores circula un fluido térmico, en circuito cerrado (primario) y con intercambio térmico hacia el circuito de consumo (secundario) a través de un intercambiador de calor interior o exterior al depósito.

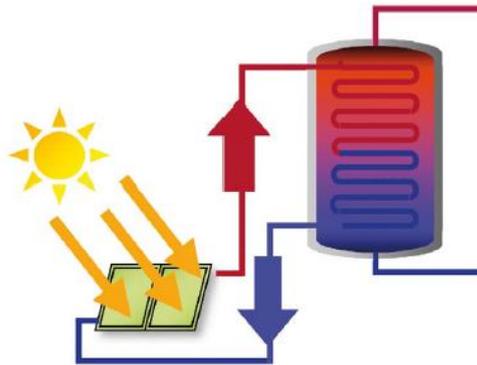


Figura 17 Circuito hidráulico de transferencia de calor Cerrado.

Fuente: (Instituto Tecnológico de Canarias, 2012)

2.5.3 Sistema de acumulación

El sistema de acumulación está constituido por un depósito o acumulador, que es el componente encargado del almacenamiento de energía térmica producida por el sistema de captación en forma de agua caliente; el depósito consta con varias conexiones para entrada y salida del fluido, además de tomas para dispositivos de medición como termómetros y sensores flotadores, material aislante para disminuir la pérdida de calor y en caso de tanques de acero se utiliza además un ánodo de sacrificio, cuya función es la de proteger al tanque de la corrosión.

- Volumen de acumulación

El volumen de acumulación depende del desfase entre el periodo de consumo y de captación, por lo cual debe considerarse el volumen de captación en función de este desfase como se indica en la tabla 8.

Tabla 8
Selección del volumen de acumulación por desfase entre periodo de captación y consumo (García, 1999).

Desfase entre periodo de captación y consumo	Volumen por metro cuadrado de área de captación [litros]
Sin desfase	35 – 50
Menor a 24 horas	50 – 75
Entre 24 y 72 horas	75 – 150
Mayor a 72 horas	Se determina mediante balance energético

También se debe considerar la Norma Ecuatoriana de Construcción (NEC-10), parte 14-1, Energía renovable, sistemas de calentamiento de agua con energía solar para uso sanitario en el Ecuador, la cual cita textualmente en su apartado 11.2.1 lo siguiente:

De preferencia la acumulación solar estará constituida por un solo depósito por sistema. El volumen de la acumulación tendrá un valor según el siguiente requisito:

$$50 \leq \frac{V}{A} \leq 180$$

Siendo V el volumen del acumulador y A el área de captación; V: l, Ac: m^2
 Se recomienda la instalación de medidores de presión y temperatura en la parte más alta del acumulador con el fin de la visualización de la temperatura y presión de servicio.” (NEC-10 Parte 14-1, 2010).

- Tipos de acumuladores

Según el sistema de intercambio:

- a) *Acumuladores sin sistema de intercambio:* Son tanques que acumulan el agua caliente para su consumo en un periodo de tiempo muy corto o inmediato, se utiliza en equipos con bajos volúmenes de almacenamiento.
- b) *Acumuladores de intercambio simple:* Están compuestos por un serpentín, el cual transporta el fluido del circuito primario, el serpentín es un intercambiador de calor que al circular a través del tanque calienta el agua de consumo contenido en

el acumulador; son idóneos para el consumo de agua caliente para volúmenes de agua superiores a 1000 litros.

- c) *Acumuladores de intercambio doble*: Están conformados por dos serpentines que provienen de dos captadores independientes, estos funcionan como sistema de apoyo mutuo mediante una fuente auxiliar que se conecta a uno de los serpentines.



Figura 18 Tipos de acumuladores según el sistema de intercambio.

Fuente:(CLEANENERGYSOLAR, 2015)

Según el material de construcción:

- a) *Acumuladores de acero al carbono*: Tienen capas de protección anticorrosiva y antibacteriana para uso sanitario, cuyas capas de revestimiento son de galvanizado en caliente por inmersión, vitrificado simple o de doble capa, resina epoxy.
- b) *Acumuladores de acero inoxidable*: Tienen un elevado costo debido a sus propiedades anticorrosivas y resistencia a altas temperaturas, sin embargo presentan inconvenientes con PH ácidos y aguas con alto contenido de cloruros, pudiendo ocasionar corrosión y picaduras.
- c) *Fibra de vidrio reforzada y plásticos*: Estos tipos de acumuladores están en desarrollo en la actualidad para mejorar sus propiedades, además tendrán una gran importancia a futuro debido a la disminución de costos de fabricación de este tipo de tanques en comparación a los de acero al carbono e inoxidable. En Ecuador existen tanques Rotoplas® para almacenamiento de agua con tres capas, una capa exterior UV que evita el desarrollo de algas, bacterias y el envejecimiento por

exposición a la intemperie, una capa espumosa que aísla térmicamente el agua contenida en el tanque, y una capa de recubrimiento antibacteriano.

Según la posición de instalación:

- a) *Acumuladores horizontales*: Se utiliza como parte integral en equipos compactos por termosifón, la temperatura dentro del tanque se mantiene bastante uniforme ya que no favorece la estratificación del agua. Existen acumuladores estandarizados en volúmenes de 150, 200, 300 y 400 litros.
- b) *Acumuladores verticales*: Este tipo de disposición favorece la estratificación del agua y son los más usados ya que permite un suministro instantáneo del agua caliente ubicado en la parte superior del tanque. Existen acumuladores estandarizados para uso sanitario con volúmenes de 150 y 300 litros, para viviendas unifamiliares con volúmenes de 750 y 1000 litros y para instalaciones con mayor demanda energética con volúmenes de entre 1000 y 7000 litros.

- **Aislamiento**

El aislamiento térmico del tanque tiene como objetivo reducir las pérdidas de calor del fluido almacenado por exposición a la intemperie.

La norma NEC-10, parte 14-1 recomienda lo siguiente respecto al material aislante en su apartado 13.5:

Con el aislante se debe tener un rango de grosor apropiado (no menor a 3 cm y preferentemente mayor a 5 cm), esto debido a que las pérdidas del colector se reducirán cuando el espesor del aislante sea mayor. Su disposición deberá incluir los lados laterales del colector solar. El material de aislante térmico constituye un tema de gran importancia, debido a que estos tienen tendencia a la humedad por ser materiales fibrosos. Se recomienda el uso de aislantes que tengan coeficientes k que se encuentren entre 0,014 y 0,035 Kcal/hr m°C y que sean estables. (NEC-10 Parte 14-1, 2010).

El espesor de aislamiento recomendable con el fin de obtener una pérdida de calor no mayor a 3°C por día con una temperatura de ambiente exterior inmediato del acumulador de 10°C según Manuel Tobajas, debe ser mayor a 5 cm aunque se recomienda un espesor de entre 8 y 15 cm. (Tobajas, M. 2012).

Se puede apreciar que con respecto al espesor del aislante térmico ambas fuentes corroboran un espesor mayor a 5 cm, por tanto esta consideración se toma en cuenta para el diseño.

Ejemplos de aislantes térmicos constituyen la fibra de vidrio y el poliuretano.



Figura 19 Espuma expansiva de poliuretano en aerosol.

Fuente: (Axton, 2015)



Figura 20 Aislante de lana de vidrio.

Fuente: (Isover, 2015)

2.5.4 Circuito hidráulico

Es un conjunto interconectado de componentes que forman parte del sistema solar térmico, los cuales se encargan de la circulación del fluido. La importancia tanto de su selección como de su implementación radica en que del circuito hidráulico depende el rendimiento del sistema.

Un circuito hidráulico para un sistema solar consta de los siguientes componentes:

- **Tuberías**

Son elementos encargados de transportar el líquido portador de calor y el agua caliente sanitaria a lo largo de su trayectoria desde el colector solar hasta el acumulador. Es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones para el diseño de la tubería:

a) Material

- Cobre: Entre sus principales características posee una alta ductilidad, resistencia a la corrosión, maleabilidad y competencia económica.
- Acero galvanizado: No es recomendable como material de circuito primario, se deteriora a temperaturas por encima de 65°C.
- Acero negro: Aconsejable en aplicaciones con caudales elevados en el circuito primario y prohibido en transporte de agua caliente sanitaria debido a problemas de oxidación que perjudica el agua potable.
- Plásticos: Son una buena alternativa con bajos costos, soportan la exposición a temperaturas de hasta 100°C o mayores. Presentan deterioro por la excesiva exposición al sol.

b) Caudal

El caudal es un parámetro muy importante y depende del tipo de aplicación que se requiera para la instalación, este oscila entre valores estándar de entre 40 y 70 litros por hora por metro cuadrado.

c) *Longitud*

Es importante minimizar la longitud de las tuberías, debido a la cantidad de pérdidas por carga debido al rozamiento de la tubería y el fluido. La pérdida de carga máxima debe ser de 0,7 bar, sin embargo se recomienda instalaciones con una pérdida no mayor a 0,4 bar. (Tobajas, M. 2012).

d) *Seguridad*

La elevación de la temperatura en el fluido portador de calor aumenta la presión ejercida dentro de las tuberías, por esta razón es importante proteger al equipo de sobrepresiones, además las tuberías no deben contener burbujas de aire ya que se afecta la transmisión del calor. Estos dos factores se pueden reducir y contrarrestar mediante el uso de purgadores y válvulas de seguridad. Es importante además realizar una instalación limpia para evitar el desarrollo de legionela, bacteria que se desarrolla a una temperatura de 37°C.

- **Aislantes**

Son elementos del circuito hidráulico encargados de disminuir las pérdidas caloríficas en los componentes principales del sistema solar térmico, tales como el colector, el acumulador y las tuberías.

Es importante considerar las siguientes características en un aislante térmico: colocación, costo, coeficiente de conductividad, resistencia y gama de temperaturas.

Con respecto al aislamiento térmico de tuberías, la norma ecuatoriana NEC-11 capítulo 13, especifica textualmente en su apartado 13.5.2.2:

Los ductos y accesorios de la red de impulsión de fluidos con temperaturas diferentes de la temperatura ambiente dispondrán de un aislamiento térmico suficiente para que la pérdida de calor no sea mayor que el 4 % de la potencia térmica que transportan, independientemente sea este de impulsión o retorno. Cuando la potencia térmica nominal a instalar de generación de calor o frío sea menor o igual que 70 Kw son válidos los espesores mínimos dados en la

Tabla 2.9. Para potencias mayores que 70 Kw deberá justificarse documentalmente que las pérdidas no son mayores que las indicadas anteriormente (NEC-11 Parte 13.5.2.2, 2011).

Tabla 9
Espesores mínimos para ductos que conducen potencias menores a 70 kW, conductividad de referencia 0,04 W/(mK) (NEC-11, 1996).

Tipo de fluido	Espesor (mm)
Fluido frío	22,5
Fluido caliente	18

- Bomba de circulación

Es el elemento electromecánico encargado de convertir la energía mecánica recibida en un elemento impulsor a energía cinética utilizada para vencer la resistencia de un fluido al paso a través del circuito hidráulico (tuberías y accesorios).

Las bombas más empleadas en instalaciones para calentamiento de agua sanitaria son las centrífugas que son bombas rotativas en las cuales ingresa el fluido por el centro de un rodete y debido a la fuerza centrífuga ejercida se impulsa el fluido hacia el exterior. Otros tipos de bombas utilizadas son las sumergibles, las cuales se ubican dentro del pozo o tanque y mediante la rotación de hélices impulsan el fluido hacia el exterior.



Figura 21 Bomba electrosumergible 500gph.

Fuente: (Rule pumps, 2015)

Las características de la bomba se determinan en función del tipo y composición del fluido a transportar y las pérdidas de carga ocasionadas en el circuito hidráulico.

El caudal del circuito hidráulico correspondiente al captador solar depende del tipo de conexión en caso de existir más de un colector solar (serie o paralelo).

- **Fluido Caloportador**

Es el fluido encargado de pasar a través de los colectores solares y absorber la energía térmica para transferirla al almacenador. Los fluidos caloportadores más comunes son: agua, agua con adición de anticongelante, fluidos orgánicos y aceites de silicona.

- **Instrumentos y accesorios**

Son elementos que cumplen la función de indicar variables físicas importantes del fluido y el circuito, así como de regular la correcta circulación del fluido a través del circuito evitando acumulación de aire, presiones excesivas y caudales elevados. Otros componentes son las válvulas, que se encargan de interrumpir parcialmente o completamente el paso de líquido a través del circuito hidráulico. En la tabla 10 se describen algunos de estos componentes y sus funciones y en la tabla 11 se muestran algunos tipos de válvulas utilizadas en sistemas de calentamiento de agua.

Tabla 10
Instrumentos y accesorios hidráulicos.

Elemento	Descripción	Ilustración
Vaso de expansión	Cumplen la función de absorber las dilataciones presentes en el fluido caloportador al momento de aumentar su temperatura, se utilizan por seguridad para evitar sobrepresiones producidas en la instalación. Los vasos de expansión solo son necesarios en instalaciones con intercambiador de calor.	
Purgador	Es el elemento encargado de eliminar y evitar la formación de bolsas de aire dentro del circuito del fluido caloportador, las cuales dan lugar a corrosión y circulación indebida del fluido; se instalan en la parte más alta del circuito para garantizar su correcto funcionamiento.	
Termómetro	Sirven para medir la temperatura del fluido. Existen termómetros de contacto que sirven para medir la temperatura superficial, no está en contacto directo con el fluido, mientras que los de inmersión permiten tener una lectura directa del líquido, ya que van introducidos dentro de la tubería.	
Termostato	Se encargan de transformar la señal de temperatura en una señal eléctrica, útil para poder manipular estos datos para el funcionamiento de un determinado sistema.	

Tabla 11
Tipos de válvulas.

Válvula	Descripción	Ilustración
De asiento	Poseen tapón en forma de disco que se encarga de cerrar el paso del fluido al pegarse sobre su asiento. Sirven tanto para la función de todo o nada como para regulación de caudal, además producen pérdidas de carga muy significativas.	
De compuerta	Poseen una cuña, que es la encargada de cerrar el paso del fluido a través del circuito, se utilizan para la función de todo o nada, nunca como elemento de regulación.	
Mariposa	Sirven como elemento de regulación o de interrupción de flujo, poseen una placa llamada mariposa como elemento de obturación. Al disminuir su área de paso, incrementa la pérdida de carga.	
De bola o de esfera	Poseen como elemento obturador una esfera, la cual al cerrarse se coloca sobre un agujero del mismo diámetro evitando el paso de fluido. Tienen pérdidas de carga mínimas cuando se encuentran completamente abiertas.	
De seguridad	Sirven para limitar la presión del circuito hidráulico para proteger a los elementos de sobrepresiones, por lo cual este se debe regular en un punto inferior al máximo soportado por el elemento crítico. Su utilización es normada y regulada en circuitos hidráulicos sometidos a presión.	
Multivía	Son válvulas que poseen una o más entradas y una o más salidas, de tal manera que es posible distribuir el flujo a través de cada vía según convenga dado el tipo de instalación. Existen válvulas de dos vías, tres vías, cuatro vías, 5 vías o más vías.	
Electroválvulas	Son elementos electromecánicos cuyo accionamiento se realiza por medio de un solenoide, que es una bobina que crea un campo magnético al ser energizado, permitiendo accionar un mecanismo de cierre o apertura de la válvula. Son útiles en procesos automáticos.	

2.5.5 Sistema de Control

Es el elemento que se encarga de tomar las decisiones en base a los datos obtenidos del entorno, como el nivel de irradiancia absorbida por el colector solar y el nivel de agua contenida dentro del tanque, para poder dar órdenes de funcionamiento o parada a los actuadores.

Las funciones que contempla el sistema de regulación y control son las siguientes:

- Ser una central de almacenamiento de la información del sistema y su entorno.
- Enviar órdenes de funcionamiento y regulación a los elementos actuadores.
- Visualizar en una pantalla la temperatura de los puntos críticos de la instalación.

El sistema de control consta de un circuito de control y un circuito de potencia. El circuito de control se encarga de procesar las variables físicas medidas y determinar la orden específica a enviar en función de parámetros prefijados; el circuito de potencia por su parte, se encarga de recibir las señales de control y convertirlas a señales adecuadas para los elementos actuadores, las cuales deben considerarse en función de la potencia requerida de los actuadores a utilizar.

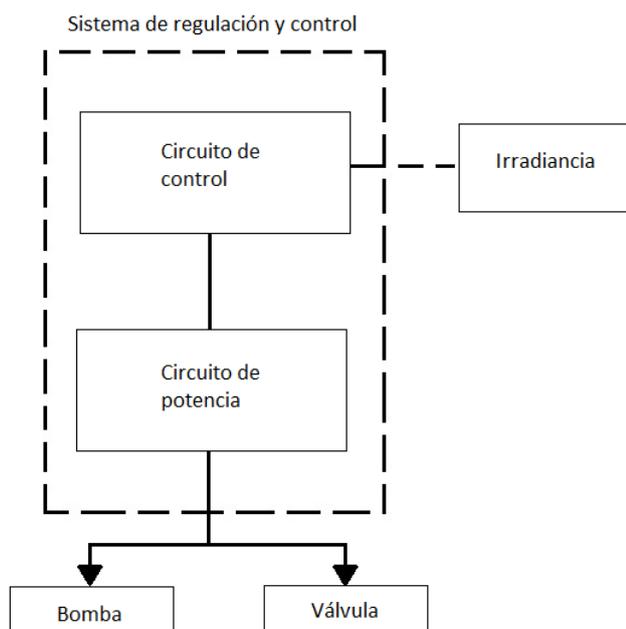


Figura 22 Esquema de bloques del sistema de regulación y control.

Los elementos que conforman el sistema de control son los siguientes:

- **Microcontrolador**

Arduino es un microcontrolador de software libre, que permite al usuario realizar programas utilizando las distintas entradas y salidas que nos ofrece. La programación se realiza mediante el lenguaje propio de Arduino (Arduino programming language) basado en Wiring. El software se puede descargar de su página oficial que incluye los drivers de todas las tarjetas disponibles.

Consta de varias entradas y salidas analógicas y digitales que le permiten realizar diferentes actividades como: lectura de sensores, envío de señales para activar actuadores, etc.

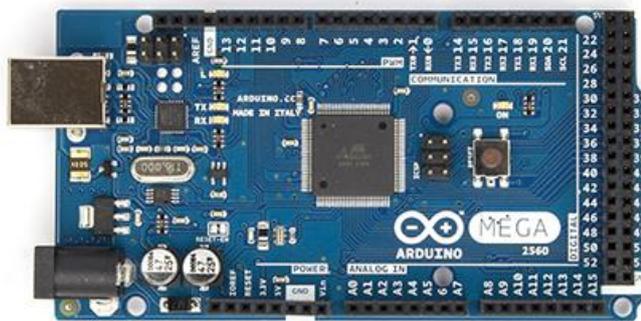


Figura 23 Arduino Mega 2560.

Fuente: (Arduino, 2015)

- **Sensores**

- a) *Piranómetro*: Instrumento para medir la radiación solar global a una superficie plana, es decir que está diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar tanto de la componente directa como difusa en un campo de 180°. La medición se realiza en kilovatios por metro cuadrado. Está formado por un fotodiodo de silicio que se encarga de convertir la radiación incidente en corriente eléctrica y un amplificador para finalmente obtener una señal de salida en un rango de voltaje, permitiendo que la lectura del sensor sea más fácil.

Cuentan con una cubierta exterior que protege el cuerpo del sensor de la radiación térmica y proporciona un camino de flujo de aire para el enfriamiento por convección del cuerpo, minimizando el calentamiento del interior del sensor.



Figura 24 Piranómetro.

Fuente: (Sensovant, 2015)

- b) *Anemómetro*: Instrumento utilizado para medir la velocidad del viento. Existe gran diversidad de anemómetros, entre ellos el más utilizado el de rotación, compuestos por hélices o cazoletas unidas a un eje central, que gira de manera proporcional a la velocidad del viento. Los anemómetros magnéticos activan un generador eléctrico por cada giro. Entre otros tipos tenemos: anemómetro de compresión.



Figura 25 Anemómetro.

Fuente: (Pceinstrument, 2015)

- c) *Sensor de temperatura*: Es un sensor tipo one wire es decir que requiere solamente una línea de datos (y tierra) para la comunicación con un microprocesador central. Tiene un rango de temperatura de funcionamiento de -55°C a $+125^{\circ}\text{C}$ y tiene una precisión de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$



Figura 26 Dallas temperature sensor ds18b20.

Fuente: (Dallas Industries, 2015)

2.5.6 Alimentación Eléctrica

- a) *Panel Solar Fotovoltaico*: Modulo formado por células o celdas que transforman la energía solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, el cual consiste en la producción de cargas negativas y positivas en semiconductores principalmente el silicio o arsenurio de galio, lo que permite dar lugar a un campo eléctrico.



Figura 27 Paneles Solares Fotovoltaicos.

Fuente: (Trina Solar, 2015)

b) *Batería*: Es un dispositivo capaz de convertir energía química almacenada en electricidad. Sirve para acumular energía proveniente de diferentes fuentes. La batería permite al sistema acular energía proveniente de diferentes fuentes, en este caso la energía obtenida del panel solar, para así poder mantener activo los elementos eléctricos incluso en condiciones de baja generación como en la noche. También es importante el uso de una batería para enviar un voltaje constante de alimentación para el microcontrolador (con su respectivo acondicionamiento) y las bombas en el sistema. Los parámetros importantes a considerar en la elección de una batería son:

- Tensión: parámetro más importante a considerar al adquirir una batería, es la tensión que entrega la batería, debe ser el mismo que del panel solar y la requerida por la carga.
- Intensidad de corriente: baterías estacionarias deben suministrar corriente mediante períodos prologados de tiempo y las de arranque deben suministrar grandes intensidades en poco tiempo. Para aplicaciones de generación se necesitan baterías estacionarias por sus largos períodos de uso.
- Capacidad de carga: Es la cantidad de energía que la batería puede abastecer a la carga sin que se produzcan daños en la misma, se mide en amperios hora (Ah).



Figura 28 Baterías.

Fuente: (Sirkom, 2015)

- c) *Regulador de Carga*: Dispositivo que se encarga del control de carga y descarga de la batería mediante la regulación del voltaje y la corriente que provienen del panel solar hacia la misma. Principalmente se los utiliza para evitar daños en la batería debido a sobrecargas. Su funcionamiento consiste en que una vez que la batería se encuentre completamente cargada, el regulador suspende el paso de corriente de carga proveniente del panel solar y de esta manera alargar su vida útil. El regulador también es importante para prevenir que las baterías carguen al panel solar durante las noches.

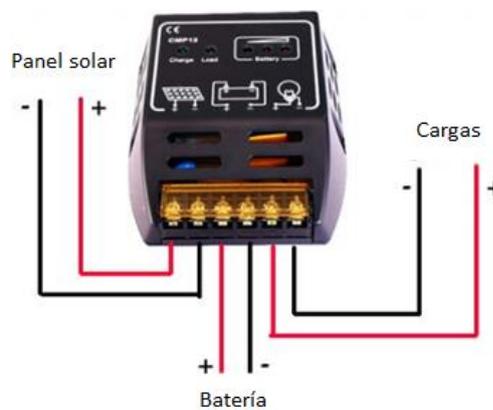


Figura 29 Regulador de carga CMP12.

Fuente: (Solar CMP, 2014)

2.5.7 Estructura de apoyo

La estructura de apoyo constituye una parte muy importante, pues sirve tanto para el sostén de los colectores solares como para la adecuada orientación de los mismos, por lo cual debe tener un anclaje y sujeción seguros, coste bajo y montaje rápido.

El diseño de los soportes debe garantizar la resistencia hacia todo tipo de esfuerzo debido a las cargas que se hayan considerado, además se debe dotar a toda la estructura de una protección contra la corrosión.

2.6 Sistema solar térmico para calefacción del ambiente

La energía solar es muy usada para calentamiento de agua, sin embargo la calefacción de aire tiene un gran potencial muy poco explotado y sus aplicaciones pueden generar un ahorro significativo en viviendas y edificios con este tipo de instalación, su desventaja radica en que precisamente es en los periodos donde existe menor cantidad de radiación cuando se necesita de mayor calefacción. Existen dos maneras de implementar sistemas de calefacción de aire, los primeros utilizan colectores de agua y los segundos colectores de aire.

2.6.1 Comparación entre colectores solares de aire y de agua

La principal diferencia entre colectores solares de aire en comparación con los de agua radica en las propiedades del fluido caloportador. La densidad del agua es mayor a la del aire, siendo esta de $0,99829 \text{ g/cm}^3$ en comparación con la del aire que es de $0,00125 \text{ g/cm}^3$ a una temperatura de 20°C y 1 atmósfera de presión, por lo cual sería necesario un volumen mucho más grande de aire que de agua para transportar la misma cantidad de calor a esta temperatura y presión; además el calor específico del agua es de 1 cal/g mientras que la del aire es de $0,24 \text{ cal/gal}$, por lo cual el agua puede transportar 4,17 veces más calor que el aire.

La ventaja representativa del aire respecto al agua radica en que al trabajar en sistemas abiertos no hay presencia de fugas, además no existen problemas por congelamiento o ebullición como sucede con el agua al alcanzar ciertas condiciones climatológicas.

2.6.2 Elementos de un sistema solar para calefacción de aire

Las instalaciones con colectores de aire son mucho más sencillas que las de agua, siendo necesario el colector solar, conductos de ventilación y aerocirculador,

adicionalmente se ha incorporado al sistema una estructura de apoyo y un sistema de regulación y control de flujo del aire. En la figura 30 se muestra un esquema del sistema de calefacción de ambiente mediante colector de aire.

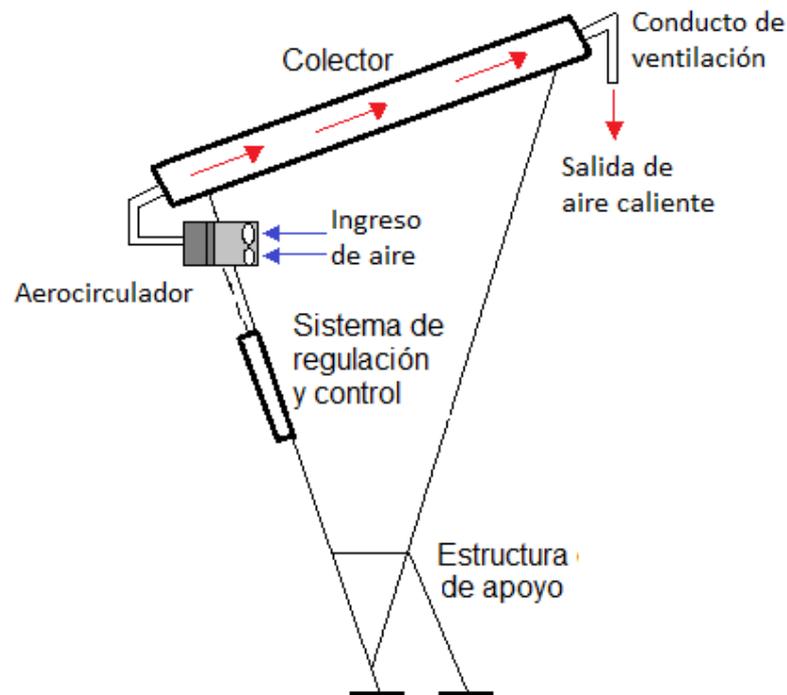


Figura 30 Esquema de un sistema de calefacción de ambiente con colector de aire.

- Colector Solar

Los colectores solares de aire y de agua debido a la naturaleza de ambos fluidos presentan variaciones en su construcción, el aire por lo general circula libremente por la placa absorbadora del colector, recogiendo todo el calor que esta recibe y los ductos tienen mayores dimensiones que los ductos en instalaciones de agua. El proceso de circulación de aire a través del colector solar se realiza por los siguientes modelos de instalación:

- a) *Instalación por termosifón:* Este tipo de instalación se realiza mediante una diferencia de densidad del aire, la cual al calentarse disminuye su densidad, permitiendo de esta manera que el aire caliente ascienda desplazando al aire frío en la parte inferior. Este tipo de instalaciones se realizan de manera vertical, el ducto de ventilación que ingresa al edificio se ubica en la parte superior de manera

que el aire caliente ingrese por el ducto y el espacio dejado por este se reemplace con aire frío. Las instalaciones de este tipo se realizan con orientación hacia el ecuador para evitar proyección de sombras.

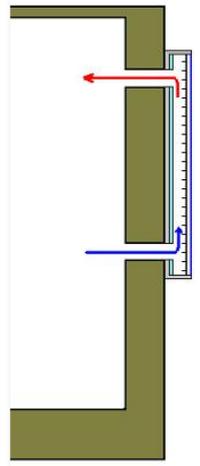


Figura 31 Instalación de calefacción de aire por termosifón.

Fuente: (SitioSolar, 2013)

- b) *Instalación con ventilación forzada:* La instalación y condiciones son las mismas que en termosifón, pero emplea un ventilador para extraer el aire caliente y tener una mejor circulación del aire.

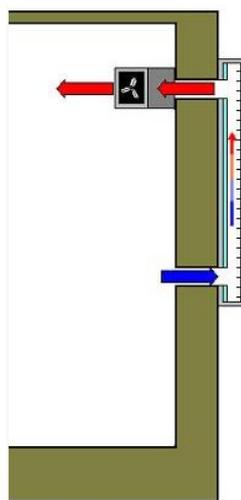


Figura 32 Instalación de calefacción de aire con ventilación forzada.

Fuente:(SitioSolar, 2013)

- c) *Colectores independientes y circulación forzada*: Los colectores se ubican en lugares diferentes al muro, con condiciones favorables como el suelo o el techo y un aerocirculador se encarga de enviar el aire hacia el interior de la instalación.

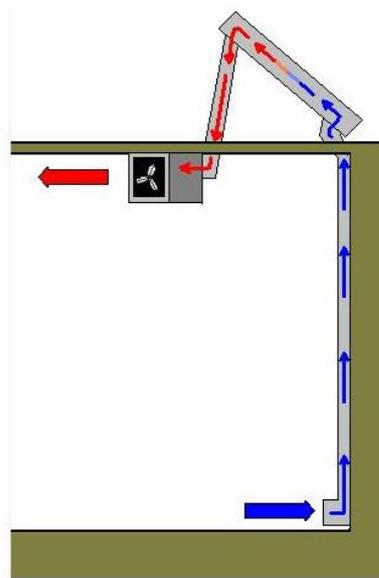


Figura 33 Instalación de calefacción de aire con ventilación forzada y colector independiente.

Fuente: (SitioSolar, 2013)

- Aerocirculador

Es el dispositivo encargado desplazar el aire desde un lugar hacia otro, su rendimiento se determina por la forma y colocación de las aspas. Se clasifican en:

- a) *Centrífugo*: Se utilizan en aplicaciones donde se requiere alto caudal y baja presión, en este tipo de aerocirculador, el flujo del aire sale en dirección radial a su eje.



Figura 34 Soplador Ts400 centrífugo.

Fuente: (T7 DESIGN, 2015)

- b) *Axial*: Tienen una rueda con un soplador que funciona como turbina, donde el flujo del aire circula en forma paralela a su eje, sirven para aplicaciones donde se requiera mover un gran flujo de aire a baja presión. Los motores de este tipo de circulador son eléctricos y proporcionan la potencia mecánica para girar el eje.



Figura 35 Soplador ATT WOOD Turbo 3000.

Fuente: (ATT WOOD, 2015)

- c) *Desplazamiento positivo*: Se utilizan para aplicaciones donde se requiera presiones altas de descarga, tienen capacidad de presión variable, tienen un elemento rotatorio que desplaza un volumen por cada revolución; producen mucho ruido.

- **Sistema de regulación y control**

Es la parte de la instalación encargada de permitir o no la circulación de aire a través del sistema, con la finalidad de evitar un uso indebido del mismo cuando exista un nivel muy bajo de radiación solar y permite al usuario encender o apagar la ventilación cuando se requiera. Los elementos electrónicos empleados y las funciones del sistema están especificadas en el apartado 2.5.5.

- **Conductos de aire**

Son los elementos encargados de la circulación del aire por todo el sistema, son determinantes en la calidad de la instalación, el aprovechamiento energético y comportamiento acústico.

2.7 Policarbonato

El policarbonato es un tipo de termoplástico muy utilizado para la fabricación de cubiertas plásticas y techos de policarbonato por sus excelentes cualidades en durabilidad, resistencia y economía. Presenta claras ventajas comparado con otros materiales tradicionales de mayor costo como el vidrio y el acero inoxidable.

El policarbonato es un material que poseen una resistencia a los impactos de hasta 300 veces mayor a la del vidrio y 30 veces más que el acrílico, es muy flexible y liviano dado que pesa una tercera parte que el acrílico y 16 veces menos que el vidrio, es de alta durabilidad capaz de soportar diferentes cambios climáticos, tales como el sol, viento, lluvia, granizo y rayos UV. Es resistente a altas temperaturas y a la deformación térmica. Puede conservar sus propiedades físicas y químicas en un rango de temperatura entre -40°C a 120°C .

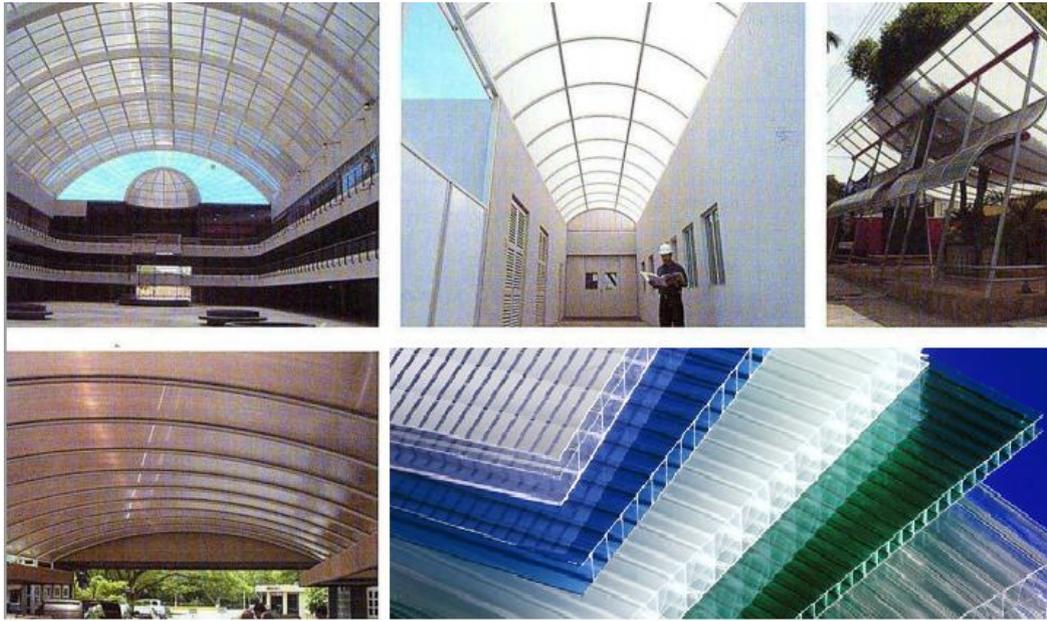


Figura 36 Policarbonato y aplicaciones.

Fuente: (Pintulac, 2015)

CAPÍTULO 3

DISEÑO MECATRÓNICO

El calentador solar con policarbonato está dividido en tres subsistemas, que son: Calentador de agua con policarbonato bronce, calentador de agua con policarbonato pintado de negro mate y calefactor de ambiente con policarbonato bronce. Los subsistemas para calentamiento de agua son iguales, dada la necesidad de comparar ambos bajo las mismas condiciones y características, la única diferencia es que la placa absorbadora en el primer caso es de color bronce y la segunda está pintada de negro mate; adicionalmente consta de un sistema de alimentación eléctrica y un sistema de control y adquisición de datos.

Los colectores solares se han diseñado de tal manera que se puedan comparar con otros tipos de calentadores solares, por lo cual se ha optado por un área de captación estándar de 2 metros cuadrados; adicionalmente, dada la condición del sistema de encontrarse prácticamente sobre la línea ecuatorial, la inclinación óptima es mínima, por motivos de limpieza se decidió una inclinación de los módulos de 20°.

3.1 Subsistema de calentamiento de agua

El subsistema consta de cuatro componentes principales que son: estructura de apoyo, que es la encargada de soportar a los colectores y cumple la función de cubierta solar, colector solar de policarbonato plano sin cubierta, acumulador de agua caliente, circulador que se encarga de proveer y recircular agua desde y hacia el colector a través del circuito hidráulico.

3.1.1 Colector solar

Para el diseño del calentador de agua se construyó un primer prototipo, con una placa absorbadora de policarbonato de dimensiones (largo: 500 mm, ancho: 300 mm, espesor: 8 mm), con la finalidad de optar por un sistema de acoplamiento del colector a las tuberías de entrada y salida de agua y debido a que el calentador propuesto es un proyecto de desarrollo fue necesario realizar pruebas de pegado de la placa absorbadora para garantizar la resistencia del policarbonato y la goma utilizada a presiones de funcionamiento del sistema. En la figura 37 se puede apreciar el primer diseño del colector realizado.

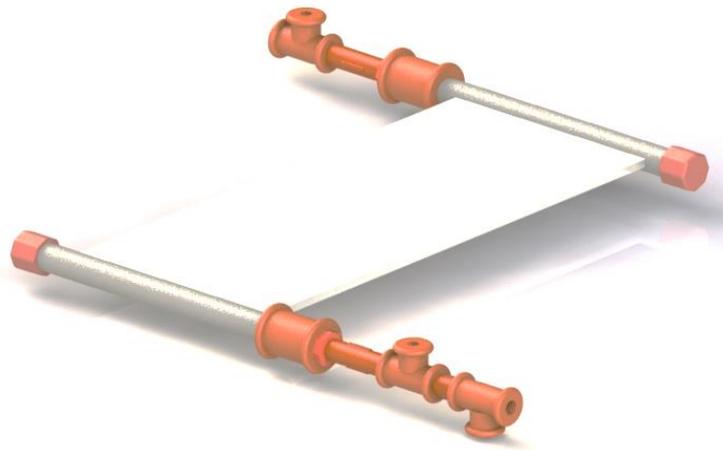


Figura 37 Diseño del primer prototipo.

3.1.1.1 Selección del pegamento

Para la selección del pegamento se realizaron pruebas de funcionamiento preliminares, luego de las cuales se realizó una matriz de criterios ponderados para la toma de decisión de la siguiente manera:

- Alternativa 1: Pegamento Llama Roja (Pegamento de poliuretano para pegar PVC). Volumen por envase: 190 ml



Figura 38 Pegamento Llama Roja.

- Alternativa 2: Sintaco Maxiflex 40 (Sellador para juntas flexibles y adhesivo multipropósito de poliuretano). Volumen por envase: 300 ml.



Figura 39 Sintaco Maxiflex 40.

- Alternativa 3: ABRO Super Glue: Cianocrilato (Pegamento de adherencia instantánea para uniones resistentes, varios tipos de plásticos). Cantidad por envase: 8g.

Tabla 12
Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del pegamento.

Criterio	Costo	Resistencia a presión	Tiempo de secado	Presencia de fugas	Agrietamiento	Reacción química con el policarbonato	Penetración del pegamento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	0	1	0	0	0	0	2	8%
Resistencia a presión	1	-	1	0,5	0,5	0,5	1	4,5	18%
Tiempo de secado	0	0	-	0	0	0	0	1	4%
Presencia de fugas	1	0,5	1	-	0,5	0	1	4	16%
Agrietamiento	1	0,5	1	0,5	-	0,5	1	4,5	18%
Reacción química con el policarbonato	1	1	1	1	0,5	-	1	5,5	22%
Penetración del pegamento	1	0	1	0	0	0	-	3	12%
Total								24,5	100%

Tabla 13
Tabla de conclusiones de selección del pegamento.

CONCLUSIONES	Costo	Resistencia a presión	Tiempo de secado	Presencia de fugas	Agrietamiento	Reacción química con el policarbonato	Penetración del pegamento	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,024	0,037	0,008	0,033	0,037	0,022	0,037	19,80%	3
Alternativa 2	0,033	0,064	0,012	0,065	0,064	0,079	0,024	34,18%	1
Alternativa 3	0,016	0,064	0,016	0,049	0,064	0,079	0,049	33,78%	2
Alternativa 4	0,008	0,018	0,004	0,016	0,018	0,045	0,012	12,24%	4
Total								100,00%	

En la tabla 12 se puede apreciar que el criterio más importante tomado en cuenta para la selección del pegamento, es la reacción química con el policarbonato con una ponderación del 22%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 5. La tabla 13 muestra un resumen sobre la selección del pegamento en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 12; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 2 (Sintaco Maxiflex 40) con un 34,18%, seguido por la alternativa 3 (ABRO Super Glue) con un 33,78%. Debido a que la alternativa 3 muestra una mayor penetración, una buena reacción química y tiempo de secado corto, se decidió colocarla como primera junta de unión entre los tubos y la plancha de policarbonato y como pase superficial se colocó la alternativa 2 que es la que se encuentra expuesta a la intemperie, presenta gran flexibilidad y es ideal para sellar grietas.

3.1.1.2 Selección de los tubos de entrada y salida del colector

Para la toma de decisión para la selección del tipo de tubería a utilizar se realizó una matriz de criterios ponderados, tomando en cuenta que el tipo de conexiones son roscadas por facilidad de instalación y debido a los actuadores y sensores utilizados. Se tomaron en cuenta los siguientes criterios y alternativas:

- Alternativa 1: Tubería de Policloruro de Vinilo (PVC).



Figura 42 Tubería roscable de PVC Plastigama.

- Alternativa 2: Tubería de Policloruro de Vinilo Clorado (CPVC).



Figura 43 Tubería roscable de CPVC Plastigama.

- Alternativa 3: Tubería de Polipropileno.



Figura 44 Tubería de polipropileno roscable Polimex.

- Criterios evaluados: costo, facilidad de maquinado y adherencia al pegamento seleccionado.

Tabla 14
Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del tipo de tubería.

Criterio	Costo	Facilidad de maquinado	Adherencia al pegamento	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	0	0	1	17%
Facilidad de maquinado	1	-	0	2	33%
Adherencia al pegamento	1	1	-	3	50%
			Total	6	100%

Tabla 15
Tabla de conclusiones de selección del tipo de tubería.

CONCLUSIONES	Costo	Facilidad de maquinado	Adherencia al pegamento	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,056	0,139	0,167	36%	1
Alternativa 2	0,028	0,139	0,167	33%	2
Alternativa 3	0,083	0,056	0,167	31%	3
			Total	100%	

En la tabla 14 se aprecia que el criterio más importante es la adherencia al pegamento con una ponderación del 50%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 6. La tabla 15 muestra un resumen sobre la selección del tipo de tubería en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 14; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 1 (Tubería de PVC) con un 36%.

3.1.1.3 Cálculo de la resistencia del pegamento

Para calcular la resistencia del pegamento ABRO Super Glue se tomó en cuenta la presión interna debido a la columna de agua que debe soportar el colector solar. La figura 45 ilustra la vista frontal y lateral del colector, cuyas dimensiones se encuentran en centímetros.

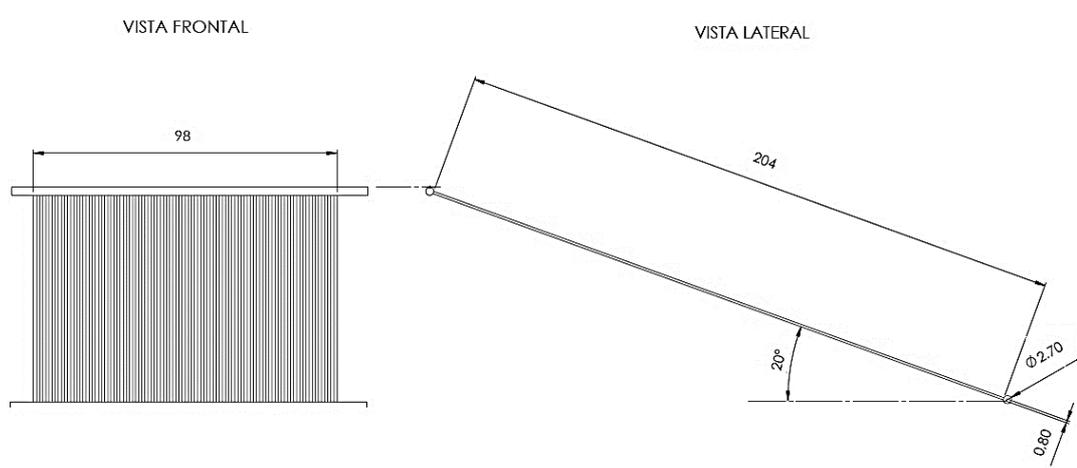


Figura 45 Vista frontal y lateral del colector solar (medidas en cm).

La presión interna por la columna de agua viene dada por la siguiente ecuación:

$$P = \frac{F (\sin 20^\circ)}{A} \quad (3)$$

$$F = m * a \quad (4)$$

$$m = \rho * V \quad (5)$$

Donde:

P= Presión interna de la columna de agua.

F= Fuerza

A= área

m= Masa del líquido.

a= Aceleración, en este caso es el valor de la gravedad. (9,81 m/s²)

ρ = Densidad del agua (999,97 $\frac{Kg}{m^3}$)

V= Volumen (A*h)

$h = \text{altura (2 m)}$.

Reemplazando la ecuación 4 y la ecuación 5 en la ecuación 3 se obtiene lo siguiente:

$$P = \rho * g * h * (\sin 20^\circ)$$

$$P = 999,97 * 9,81 * 2 * (\sin 20^\circ)$$

$$P = 6710,23 \text{ [Pa]}$$

$$\mathbf{P = 6,71 \text{ [KPa]}}$$

Esta es la presión debido a la columna de agua que actúa dentro del colector solar.

Para calcular la resistencia de la unión pegada se calculó la fuerza máxima que soporta el tubo inferior.

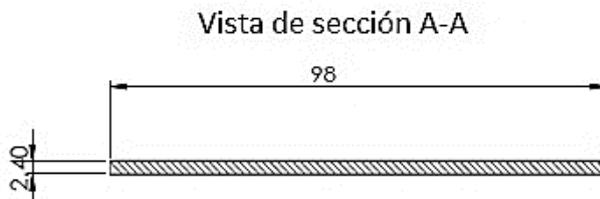


Figura 46 Vista de sección A-A del colector solar (medidas en cm).

La figura 46 muestra el corte de sección del tubo del colector solar, sobre el cual incide la fuerza debido a la presión de la columna de agua, dicha fuerza se calcula:

$$F = P * A$$

$$F = 6710,23 * (0,024 * 0,98)$$

$$\mathbf{F = 157,82 \text{ [N]}}$$

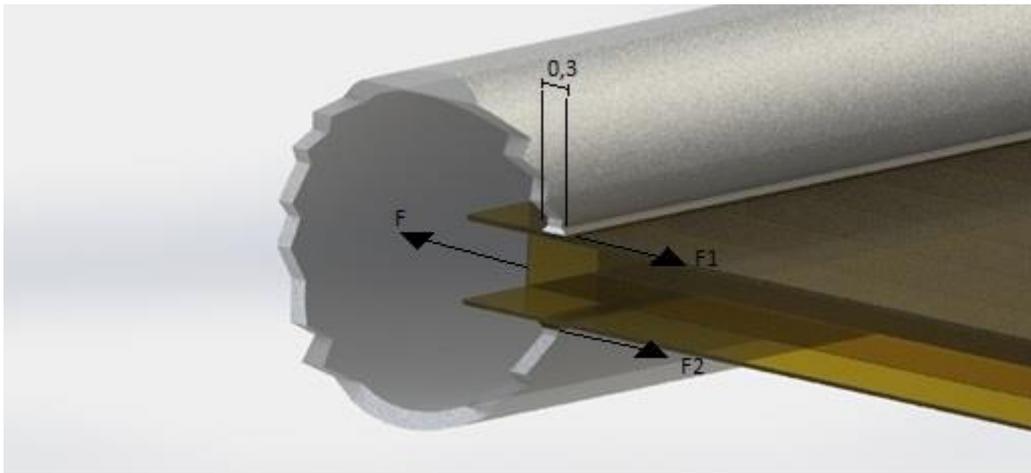


Figura 47 Corte lateral del colector solar y fuerzas de reacción (medidas en cm).

Esta fuerza es la encargada de fracturar al pegamento y separar al tubo de la plancha de policarbonato, por lo cual la resistencia del pegamento escogido debe ser mayor al esfuerzo ejercido por la columna de agua, este esfuerzo se calcula:

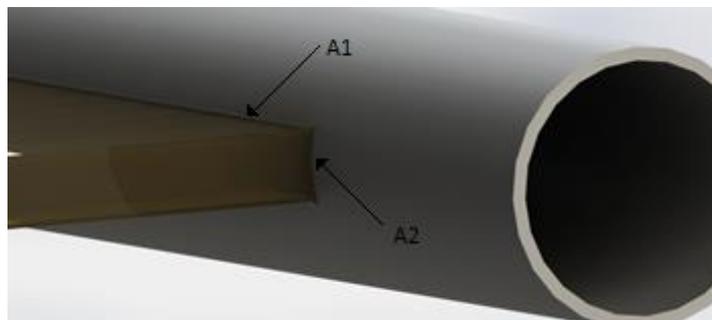


Figura 48 Vista de las secciones A1 y A2 pegadas con ABRO Super Glue.

$$\sigma = \frac{F}{A_T} \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{F}{2A_1 + 2A_2}$$

$$\sigma = \frac{157,82}{2 (0,98 * 0,003) + 2 (0,003 * 0,01)}$$

$$\sigma = 26569,02 [Pa]$$

$$\sigma = 26,57[\text{KPa}]$$

La resistencia del pegamento ABRO Super Glue a la tensión es de 20 MPa, al compararla con el esfuerzo ejercido, se tiene un factor de seguridad de:

$$\frac{\sigma_{max}}{\sigma} = n \quad (7)$$

$$\frac{20}{0,02657} = 752,73$$

$$n = 752,73$$

Por lo tanto el pegamento no fallará debido a la presión del agua de ser colocada correctamente, ya que tiene un factor de seguridad muy alto debido a que el esfuerzo ejercido por la columna de agua es bajo en comparación a la resistencia del pegamento.

3.1.2 Estructura de apoyo

La estructura de apoyo cumple la función de soporte para los colectores, así como de cubierta solar para protección de los rayos ultravioleta, para la cual se realizó un diseño que permite soportar cargas muertas, estáticas y de viento.

El diseño de la estructura fue realizado en software de simulación estructural, se tomaron como punto de partida las medidas seleccionadas de la cubierta solar; dado que la cubierta consta de tres techos (colectores solares) cuyas medidas son: para el colector de agua (0,98x2,04m) y para el colector de aire (1x2m), incluyendo las medidas de los accesorios de tuberías y uniones de policarbonato, se decidió un ancho de 3,2 m. La altura en el punto más bajo se escogió de 1,80 m y en el punto más alto debido a la inclinación de los colectores de 2,48 m, tiene un ancho de 1,88 m que es la componente horizontal del colector de aire que tiene 2m de largo con inclinación de 20°.

a) *Definición de parámetros para la simulación*

Para la simulación se realizó una estructura con cuatro empotramientos (RA, RB, RC y RD), los cuales se muestran de color verde (ver Figura 49).

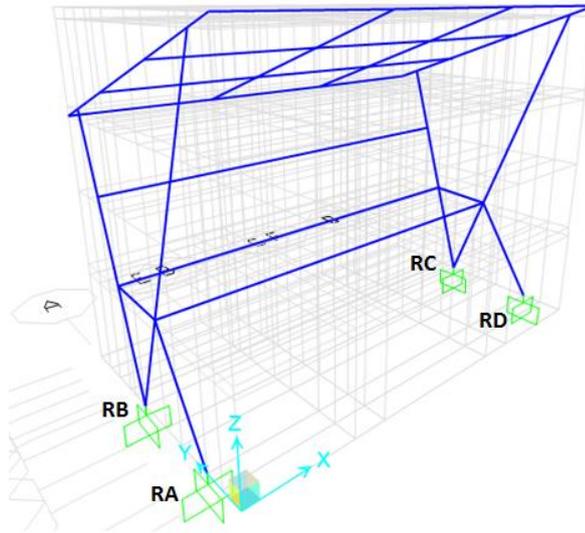


Figura 49 Modelo de simulación para el diseño de la estructura.

Se consideraron tubos de acero A36 rectangulares de 80x40x2 mm (color azul) en toda la estructura para la realización de la simulación, excepto en los tubos pequeños del techo, donde se consideraron tubos de 40x20x1,5 mm (color fucsia) con el fin de evitar tener un techo muy pesado debido a la carga muerta del mismo (ver Figura 50).

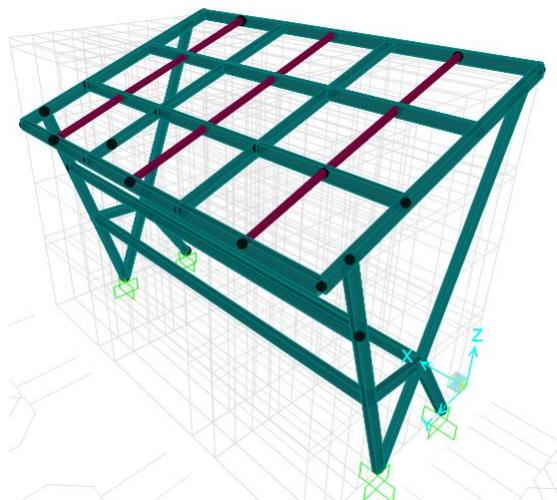


Figura 50 Asignación de tubos de la estructura.

b) Definición y estimación de las cargas estructurales

Las cargas tomadas en cuenta para el diseño se especifican a continuación:

- *Carga debida al agua (carga viva) (L)*

La carga debida al agua toma en cuenta el peso total del agua que pasa por los alveolos de la plancha de policarbonato que a su vez se atornilla al techo de la estructura. El peso total del agua por colector se calculó como:

$$P_A = m_A * g$$

$$P_A = V_A * \rho_A * g$$

$$P_A = (V_P + 2 V_T) * \rho_A * g$$

Donde:

V_P = Volumen de la plancha de policarbonato

V_T = Volumen de la tubería de PVC pegada a la plancha

$$V_P = 204 * 198 * 0,8$$

$$V_P = 32313,6 [cm^3]$$

$$V_T = \pi * \frac{2,4^2}{4} * 108$$

$$V_T = 488,58 [cm^3]$$

$$P_A = \left(\frac{32313,6}{100^3} + 2 \frac{488,58}{100^3} \right) * 999,97 * 9,81$$

$$P_A = 326,57 [N]$$

Ya que cada plancha se encuentra atornillada en 8 puntos distintos y asumiendo un factor de seguridad de 2, entonces la fuerza en cada nodo es de:

$$L_A = \frac{326,57}{8} * 2$$

$$L_A = 81,64 [N]$$

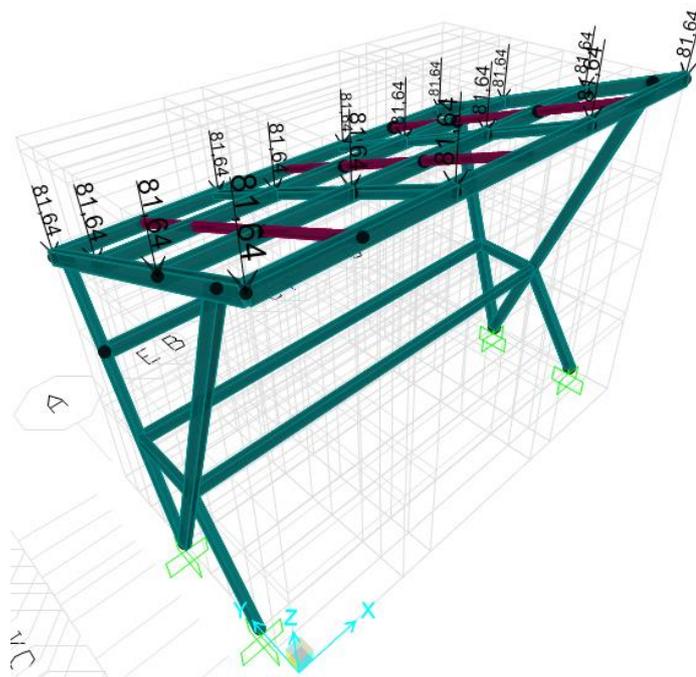


Figura 51 Cargas puntuales debido al peso del agua.

- *Cargas varias (carga viva) (L)*

Son fuerzas consideradas para personas de peso promedio de 70 kg que se puedan colgar eventualmente del techo de la estructura o se arriman a la misma con un factor de seguridad de 2.

$$L_p = 70 * 9,81 * 2$$

$$L_p = 1373,4 [N]$$

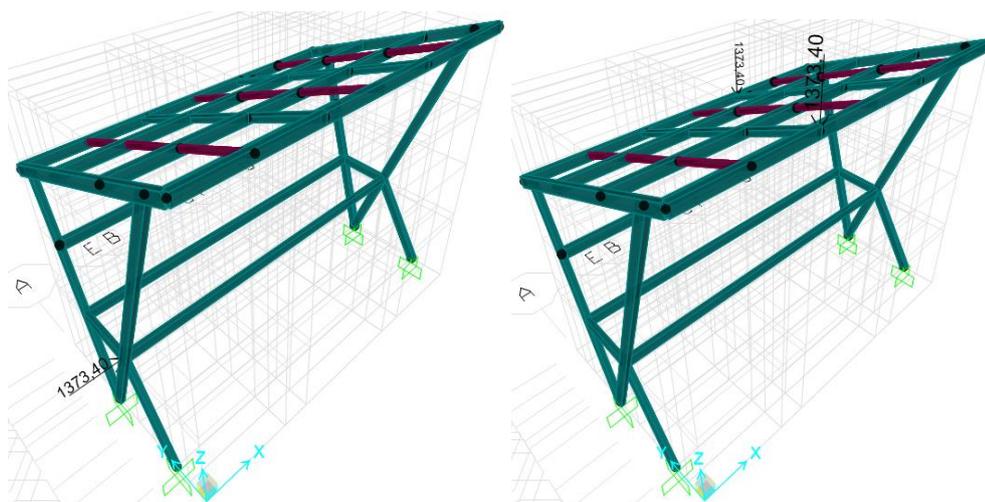


Figura 52 Cargas puntuales debido al peso de personas.

- Asiento (carga viva) (L)

Considera una carga distribuida de cuatro personas sentadas de 70 Kg cada una.

$$L_{AS} = \frac{70 * 9,81 * 4}{3,2}$$

$$L_{AS} = 858,38 \text{ [N/m]}$$

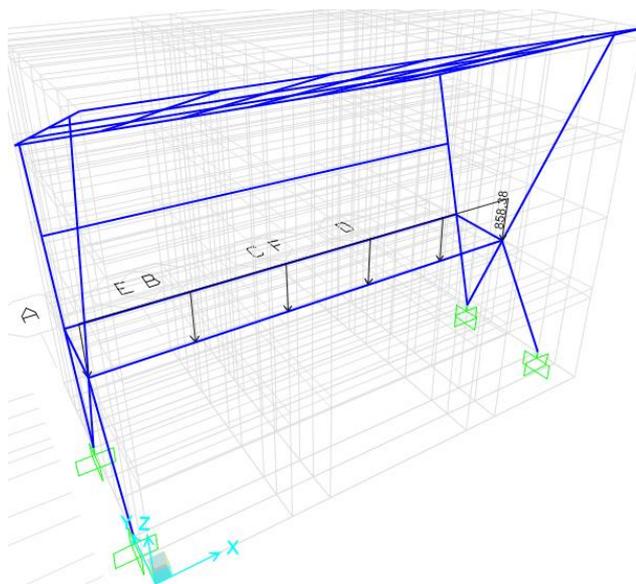


Figura 53 Carga distribuida debido al peso de personas sentadas.

- Carga debida al viento (W)

Para estimar la carga debida al viento, es necesario conocer la presión que ejerce este sobre una superficie plana, para ello se utilizó la ecuación 8 utilizada en aerodinámica (González, 2009).

$$P = \frac{(Cd * Ro * V^2)}{2} \quad (8)$$

Donde:

P = Presión del viento $\left(\frac{N}{m^2}\right)$

Ro= Densidad del aire seco $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

V= Velocidad del viento $\left(\frac{m}{s}\right)$

Cd= Coeficiente aerodinámico de resistencia al avance (Cd=1,17 para superficie plana)

La densidad del aire seco en Sangolquí se calculó mediante la siguiente ecuación (Picard, 2008):

$$Ro = 0,4644 * \frac{P}{T} \quad (9)$$

Donde P es la presión atmosférica en mm Hg y T es temperatura en °K, la aplicación de la ecuación 9 para una temperatura de 20° y presión de 549 mm Hg en Sangolquí da como resultado:

$$Ro = 0,4644 * \frac{549}{273 + 20} = 0,87 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$$

La velocidad del viento considerada es de 21 m/s, ya que es la velocidad de diseño mínima recomendada por la NEC 2015 (Norma Ecuatoriana de Construcción) en su apartado de cargas no sísmicas.

$$P = \frac{(Cd * Ro * V^2)}{2}$$

$$P = \frac{(1,17 * 0,87 * 21^2)}{2}$$

$$P = 224,47 \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Con la presión del aire obtenida se procedió a calcular la fuerza ejercida sobre las superficies laterales de la estructura.

La fuerza distribuida ejercida por el viento, tomando en cuenta que el ancho de cada tubo es de 80 mm, se calcula como:

$$W_{AI} = 224,47 * 0,08$$

$$W_{AI} = 35,92 \left[\frac{N}{m} \right]$$

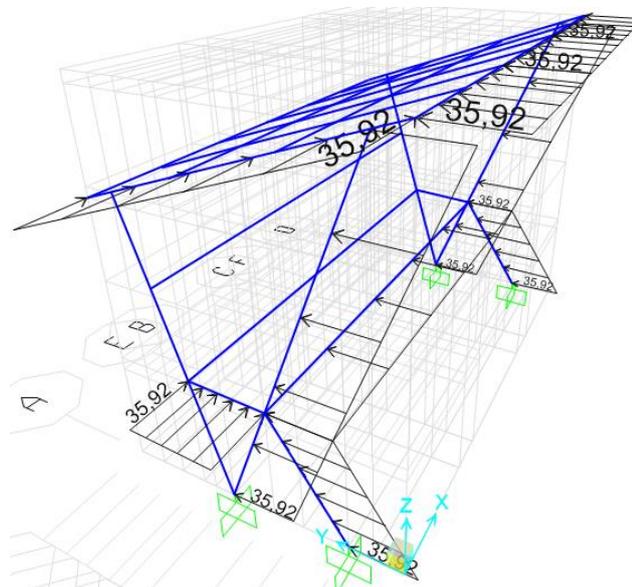


Figura 54 Carga distribuida debido a la acción del viento.

- Peso de la estructura (carga permanente) (D)

Tomando en cuenta el peso del tubo de acero por unidad de longitud como se muestra en la tabla 16, se tiene:

$$T1: \text{Tubo } 80 \times 40 \times 2: D_1 = 3,56 \left[\frac{Kg}{m} \right] = 34,924 \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$T2: \text{Tubo } 40 \times 20 \times 1,5: D_2 = 1,37 \left[\frac{Kg}{m} \right] = 13,440 \left[\frac{N}{m} \right]$$

En el techo de la estructura, para colocar cargas puntuales debido a la carga permanente del acero se consideró la longitud total de tubo rectangular existente:

$$\text{Longitud } T1 = 3,2 * 4 + 2 * 4 = 20,8 \text{ m}$$

La carga puntual para el tubo T1, tomando en cuenta 16 nodos es de:

$$D_{T1} = \frac{34,924 * 20,8}{16} = 45,40$$

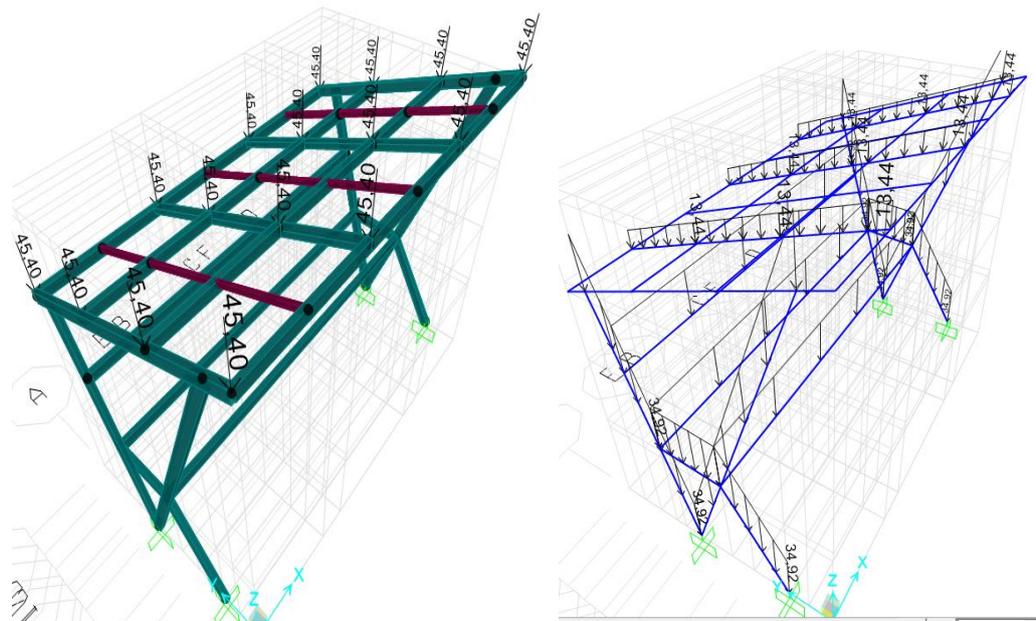


Figura 55 Carga puntual y distribuida debido a la carga permanente del acero.

Tabla 16
Catálogo de tubería estructural rectangular (Formac, 2015).

DESIGNACION			DIMENSIONES		AREA	EJE X-X			EJE Y-Y			
FORMAC	REC	H [mm]	Peso [kg/m]	B [mm]	e [mm]	A [cm ²]	I _x [cm ⁴]	W _x [cm ³]	r _x [cm]	I _y [cm ⁴]	W _y [cm ³]	r _y [cm]
REC	10x20x1,00	20	0,42	10	1,00	0,53	0,08	0,17	0,40	0,25	0,25	0,69
REC	10x20x1,50	20	0,59	10	1,50	0,75	0,11	0,21	0,37	0,33	0,33	0,66
REC	15x25x1,00	25	0,58	15	1,00	0,73	0,27	0,36	0,60	0,60	0,48	0,90
REC	15x25x1,50	25	0,83	15	1,50	1,05	0,36	0,48	0,58	0,80	0,64	0,87
REC	15x25x2,00	25	1,05	15	2,00	1,34	0,42	0,56	0,56	0,95	0,76	0,84
REC	15x35x1,00	35	0,73	15	1,00	0,93	0,37	0,49	0,63	1,39	0,79	1,22
REC	15x35x1,50	35	1,06	15	1,50	1,35	0,49	0,66	0,60	1,91	1,09	1,19
REC	15x35x2,00	35	1,36	15	2,00	1,74	0,59	0,78	0,58	2,33	1,33	1,16
REC	20x30x1,00	30	0,73	20	1,00	0,93	0,61	0,61	0,81	1,15	0,77	1,11
REC	20x30x1,20	30	0,87	20	1,20	1,11	0,71	0,71	0,80	1,10	0,89	1,10
REC	20x30x1,50	30	1,06	20	1,50	1,35	0,84	0,84	0,79	1,59	1,06	1,08
REC	20x30x2,00	30	1,36	20	2,00	1,74	1,02	1,02	0,77	1,94	1,29	1,06
REC	20x40x1,00	40	0,89	20	1,00	1,13	0,80	0,80	0,84	2,33	1,17	1,43
REC	20x40x1,50	40	1,30	20	1,50	1,65	1,10	1,10	0,81	3,27	1,63	1,41
REC	20x40x2,00	40	1,68	20	2,00	2,14	1,34	1,34	0,79	4,05	2,02	1,38
REC	30x40x1,00	40	1,05	30	1,00	1,33	1,99	1,33	1,22	3,10	1,55	1,52
REC	30x40x1,50	40	1,53	30	1,50	1,95	2,81	1,87	1,20	4,38	2,19	1,50
REC	30x40x2,00	40	1,99	30	2,00	2,54	3,51	2,34	1,18	5,49	2,75	1,47
REC	30x50x1,00	50	1,20	30	1,00	1,53	2,41	1,61	1,25	5,29	2,11	1,86
REC	30x50x1,50	50	1,77	30	1,50	2,25	3,42	2,28	1,23	7,54	3,01	1,83
REC	30x50x2,00	50	2,31	30	2,00	2,94	4,29	2,86	1,21	9,54	3,81	1,80
REC	30x50x3,00	50	3,30	30	3,00	4,21	5,70	3,80	1,16	12,83	5,13	1,75
REC	30x70x1,50	70	2,24	30	1,50	2,85	4,63	3,09	1,27	17,38	4,97	2,47
REC	30x70x2,00	70	2,93	30	2,00	3,74	5,86	3,91	1,25	22,22	6,35	2,44
REC	30x70x3,00	70	4,25	30	3,00	5,41	7,90	5,26	1,21	30,57	8,74	2,38
REC	40x60x1,50	60	2,24	40	1,50	2,85	7,71	3,86	1,64	14,39	4,80	2,25
REC	40x60x2,00	60	2,93	40	2,00	3,74	9,83	4,92	1,62	18,41	6,14	2,22
REC	40x60x3,00	60	4,25	40	3,00	5,41	13,44	6,72	1,58	25,38	8,46	2,17
REC	40x80x1,50	80	2,71	40	1,50	3,45	9,94	4,97	1,70	28,99	7,25	2,90
REC	40x80x2,00	80	3,56	40	2,00	4,54	12,72	6,36	1,67	37,36	9,34	2,87
REC	40x80x3,00	80	5,19	40	3,00	6,61	17,56	8,78	1,63	52,25	13,06	2,81
REC	50x100x1,50	100	3,42	50	1,50	4,35	19,89	7,96	2,14	57,77	11,55	3,64
REC	50x100x2,00	100	4,50	50	2,00	5,74	25,67	10,27	2,12	74,98	15,00	3,62
REC	50x100x3,00	100	6,60	50	3,00	8,41	36,06	14,42	2,07	106,46	21,29	3,56

- Combinaciones de cargas

Las combinaciones básicas tomadas en cuenta según establece la NEC-SE-CG 2015 fueron las siguientes;

Combinación 1: 1,4 D

Combinación 2: 1,2D + 1,6L

Combinación 3: 1,2D + L + W

Combinación 4: 0,9D + W

De estas combinaciones se toma la combinación de cargas más crítica.

c) *Resultados de la simulación*

La simulación del diseño de la estructura entregó los resultados mostrados en la figura 56.

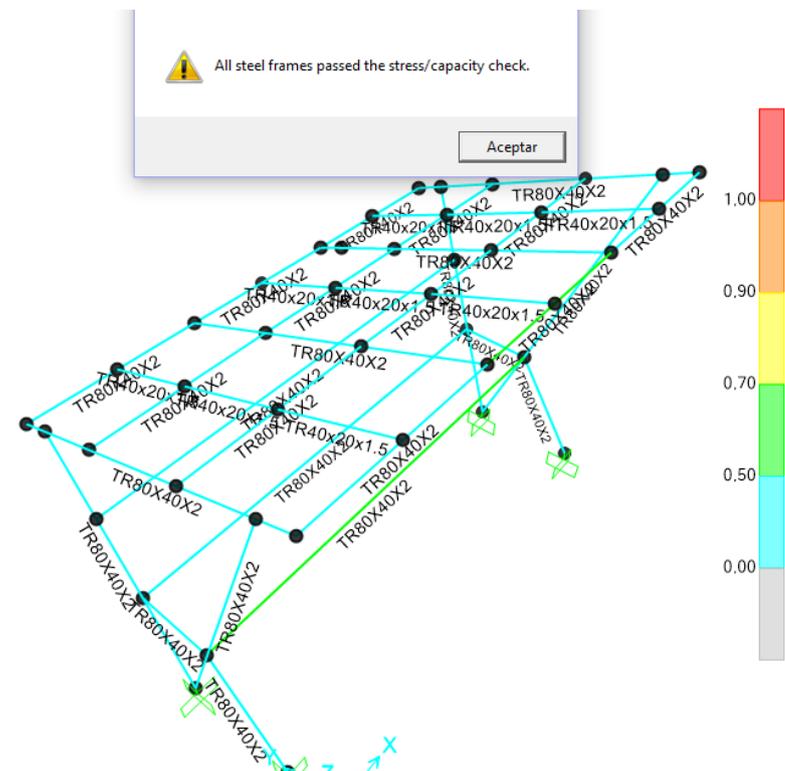


Figura 56 Resultados del análisis estructural.

La figura 56 evidencia un uso máximo de la capacidad de la estructura de 0,7 ubicado en el asiento, el techo y la columna mostrados de color verde; los resultados de la simulación se aceptan ya que no exceden la capacidad de la estructura.

d) *Fuerzas de reacción en los empotramientos*

En la tabla 17 se muestra un resumen de los resultados en la obtención de las fuerzas de reacción de cada empotramiento.

Tabla 17
Resumen de las fuerzas de reacción en los empotramientos.

Combinación		1	2	3	4
RA [N]	X	44,1	194,9	116,8	9,6
	Y	183,8	1721,2	883,4	-133,3
	Z	386,2	2905	1555,4	-136
	Magnitud	430,0	3382,2	1792,6	190,7
RB [N]	X	87,4	70,7	45,4	29,4
	Y	-183,8	-1677,2	-1090,3	-101,2
	Z	1806,3	4177,2	3537,9	1507,7
	Magnitud	1817,7	4501,9	3702,4	1511,4
RC [N]	X	-87,44	-1542,4	-1040,3	-104,4
	Y	183,8	-676,6	-449	-85,2
	Z	1806,3	6407,1	5046,9	1623
	Magnitud	1817,7	6624,8	5172,5	1628,6
RD [N]	X	-44,1	-920	-586	-25,2
	Y	183,8	632,6	179,1	-157,2
	Z	386,2	1080,3	375,2	-175,9
	Magnitud	430,0	1553,6	718,5	237,3
Prioridad		3	1	2	4

En la tabla 17 se puede apreciar que la combinación de cargas más crítica es la combinación 2, con la cual se obtiene una fuerza de reacción en RC de magnitud igual a 6624,8 [N].

3.1.3 Acumulador de agua caliente

El acumulador solar consta de un tanque de almacenamiento aislado térmicamente y sin sistema de redistribución de agua, el cual consta de una línea de suministro de agua fría de la red, una salida de agua caliente para consumo y dos líneas correspondientes a la entrada y salida del colector. Se ha escogido una disposición vertical del depósito y material de plástico debido al bajo costo del mismo. En la figura 57 se especifican las dimensiones del tanque de plástico considerado.

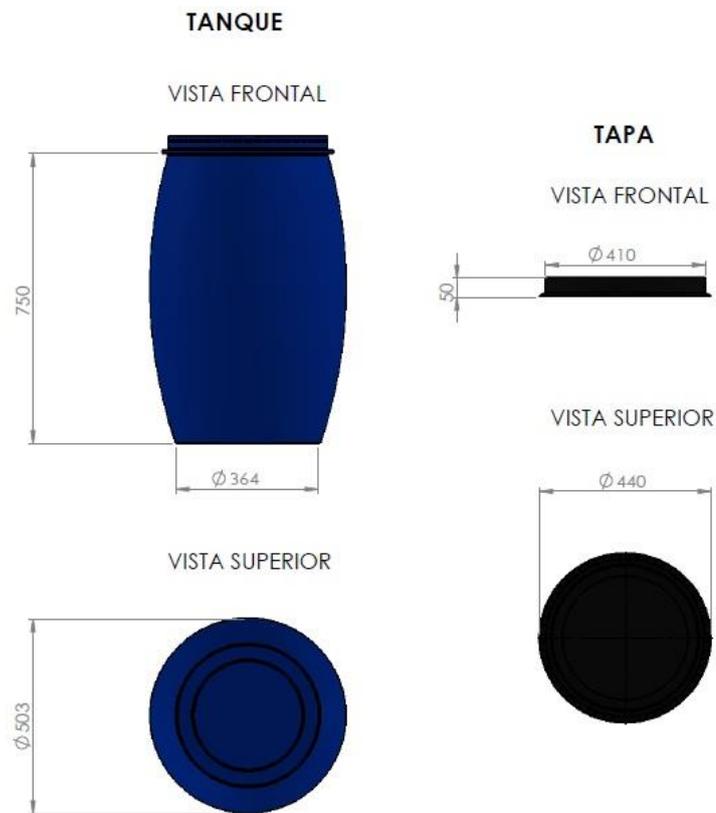


Figura 57 Vista superior y frontal del tanque y la tapa (dimensiones en mm).

- Selección del volumen de acumulación

El volumen de acumulación se escogió respecto a la tabla 8, tomando en cuenta que el consumo de agua tiene un desfase entre el periodo de captación y consumo menor a 24 horas, se escogió 50 litros por metro cuadrado y dado que el captador solar tiene un área de 2 metros cuadrados, la capacidad del tanque es de 100 litros.

- Aislamiento térmico

Como material aislante se tomaron en cuenta la lana de vidrio y la espuma de poliuretano, sin embargo se escogió la lana de vidrio debido a la facilidad para el montaje y desmontaje de accesorios en el tanque y su coeficiente de conductividad térmica es menor al mínimo de 0,10 W/m²K especificado en la norma NEC-11 Capítulo 13- Eficiencia energética en la construcción en el Ecuador.

Tabla 18
Especificaciones de un rollo de lana de vidrio sin papel.

Lana de vidrio – Rollo sin papel

Características	
Formato	0,60 x 1,20 m
Espesor	50 mm
Densidad	14 Kg/m ³
Conductividad Térmica	0,033 – 0,045 [W/m °K] a 20 °C
Usos	Aislamiento térmico y acústico de pequeñas y grandes superficies
Ventajas	Permite disminuir la pérdida de calor, menor pérdida de material. Menor costo de instalación. Material flexible. Se adapta a la superficie sin dejar espacios de aire libre. Incombustible.



Tabla 19
Especificaciones Ductoroll LV.

Lana de vidrio – Ductoroll LV

Características	
Formato	0,60 x 1,20 m
Espesor	50 mm
Densidad	14 Kg/m ³
Conductividad térmica	0,033 – 0,045 [W/m °K] a 20 °C
Usos	Aislamiento térmico y acústico de ductos y contenedores, aislación en cielos y muros laterales de galpones
Ventajas	Fácil instalación. Se adapta a la superficie. Buena estética. Disminuye pérdida de calor y material. Menor costo de instalación. Incombustible



En la tabla 18 y 19 se pueden ver las principales características de los dos tipos de lana de vidrio empleados para el aislante térmico.

La norma NEC-11 Capítulo 13 especifica la siguiente ecuación para el cálculo del espesor del material aislante para elementos de superficie circular:

$$d = \frac{D}{2} \left\{ \exp \left[\frac{k}{k_{ref}} \ln \left(\frac{D + 2d_{ref}}{D} \right) \right] - 1 \right\} \quad (10)$$

Donde:

d : espesor del material aislante en mm.

k : Coeficiente de conductividad térmica del material, en [W/m°K].

k_{ref} : Conductividad térmica de referencia, igual a 0,04 [W/m°K] a 10°C.

d_{ref} : Espesor mínimo de referencia en mm.

D : Diámetro interior del material aislante en mm.

Tabla 20
Espesor de referencia mínimo en aparatos y depósitos (RITE, 2011).

Espesor de aparatos y depósitos

Superficie (m ²)	Espesor (mm)
≤ 2	30
> 2	50

Conforme a la tabla 20, la superficie más significativa del tanque de almacenamiento se puede ver en la vista superior del tanque en la figura 57 y es igual a:

$$S = \pi \left(\frac{0,503^2}{4} \right)$$

$$S = 0,199 \text{ [m}^2\text{]}$$

Ya que la superficie del acumulador es menor a 2m², se toma como referencia un espesor de 30 mm y se añaden 10 mm debido a que la instalación es exterior, no interior. La aplicación de la ecuación 10 tomando en cuenta un $D = 503$ mm y $k = 0,045$ [W/m °K] que es el mayor valor de conductividad térmica de la lana de vidrio:

$$d = \frac{503}{2} \left\{ \exp \left[\frac{0,045}{0,04} \ln \left(\frac{503 + 2 * 40}{503} \right) \right] - 1 \right\}$$

$$d = 45,4 \text{ mm}$$

Por seguridad se procede a escoger un valor de 50 mm de espesor de aislamiento.

Adicionalmente el aislamiento tiene un recubrimiento dado por un tanque de acero cuyo diámetro interior es ligeramente mayor al diámetro del tanque de plástico y el espesor del aislante térmico, en la figura 58 se aprecia el corte lateral del tanque con su aislamiento.

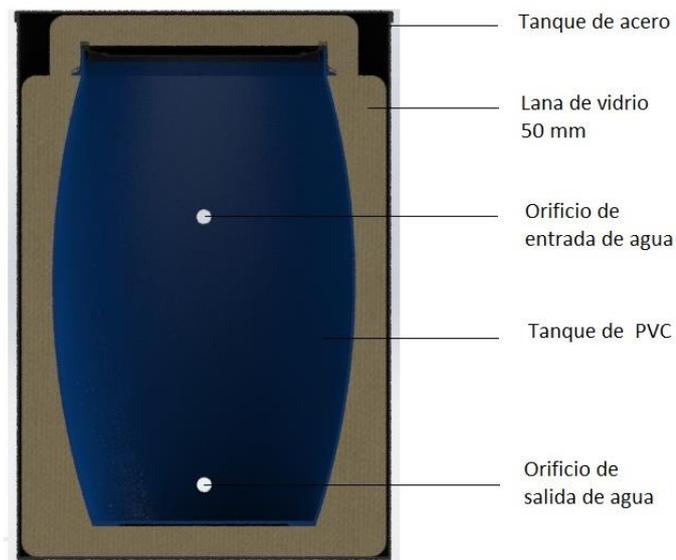


Figura 58 Corte lateral del tanque con aislamiento.

3.1.4 Circuito hidráulico

El diseño del circuito hidráulico garantiza el suministro constante de agua limpia en la red de agua del sistema y consta de dos circuitos principales:

- Circuito hidráulico de alimentación de agua proveniente de la red hacia el depósito acumulador.
- Circuito hidráulico de distribución de agua proveniente del depósito acumulador desde y hacia el colector solar.

El agua utilizada por el sistema es de consumo doméstico y se alimenta con agua de la red de agua potable del Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.

3.1.4.1 Circuito hidráulico de alimentación

El circuito hidráulico de alimentación tiene la función de abastecer de agua limpia al depósito acumulador una vez que los sensores de nivel alto y bajo ubicados dentro del tanque se hayan desactivado, lo cual indica que el agua caliente dentro del tanque se ha utilizado en su totalidad (la explicación detallada del funcionamiento de la válvula de alimentación en función de los niveles alto y bajo del tanque se explica más adelante). Los elementos que componen a este circuito se describen en la tabla 21.

Tabla 21
Componentes del circuito hidráulico de alimentación.

Componente	Componentes del circuito hidráulico de alimentación Características	Ilustración
Válvula de bola	<p>Accionamiento: Manual con un mango que gira $\frac{1}{4}$ de vuelta.</p> <p>Aplicación: Alimentación y regulación manual del agua proveniente de la red.</p> <p>Material: Plástico.</p>	
Electroválvula	<p>Material: Plástico y metal.</p> <p>Accionamiento: Solenoide y retorno por muelle.</p> <p>Voltaje nominal: 12 VDC</p> <p>Corriente nominal: 320 mA.</p> <p>Tipo de válvula: Diafragma</p> <p>Normalmente cerrado</p> <p>Dimensiones: 85*60*42 mm</p> <p>Presión: 1-116 PSI</p> <p>Temperatura del fluido: 1-100 °C</p> <p>Tipo de fluido: Agua</p> <p>Tipo de conexión: roscada</p> <p>Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$"</p>	
Accesorios de polipropileno	<p>Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$"</p> <p>Tipo de conexión: Roscada.</p> <p>Accesorios: Tee, codo 90°, unión universal.</p>	

La tubería seleccionada para el circuito de alimentación fue de $\frac{1}{2}$ " para agua fría ya que las conexiones de agua de la red en el laboratorio de energías renovables son todas de $\frac{1}{2}$ ".

3.1.4.2 Circuito hidráulico de distribución

El circuito hidráulico de distribución cumple la función de llevar agua desde el tanque acumulador hacia el colector solar y permitir su recirculación. El circuito hidráulico consta de un componente activo (bomba), mangueras, tuberías y accesorios. En la figura 59 se aprecia un esquema del circuito hidráulico que se tomó en cuenta para el dimensionamiento y selección de la bomba. El dimensionamiento del circuito hidráulico se describe a continuación.

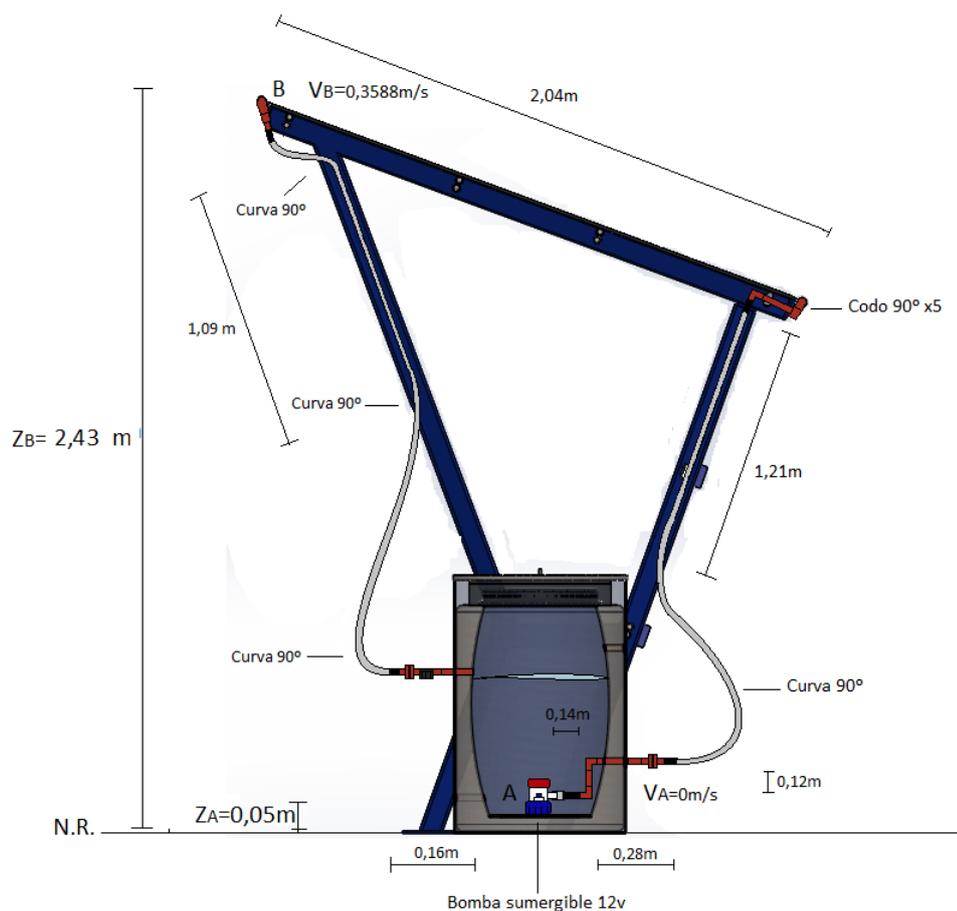


Figura 59 Circuito hidráulico de distribución.

Tabla 22
Componentes del circuito hidráulico de distribución.

Componentes del circuito hidráulico de alimentación			
Componente	Características	Ilustración	
Válvula de bola	Accionamiento: Manual con un mango que gira $\frac{1}{4}$ de vuelta.		
	Aplicación: Descarga y consumo de agua de la red.		
	Material: Plástico.		
Manguera PVC $\frac{1}{2}$ "	Material: PVC		
	Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$ "		
Accesorios de polipropileno	Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$ "		
	Tipo de conexión: Roscada.		
	Accesorio		Cant.
	Tee		2
	codo 90°		5
	Unión universal.		2
	Adaptador tubería manguera		4
Neplo	2		
Unión hembra	2		
Reductor 1" – $\frac{1}{2}$ "	2		
Caudalímetro	Tipo de conexión: roscada		
	Diámetro nominal: $\frac{1}{2}$ "		

a) *Estimación de caudal y velocidad dentro del circuito hidráulico*

Para estimar el caudal de operación se obtuvo un promedio según valores recomendados por varios fabricantes de calentadores solares, los cuales se muestran en la tabla 23 tomando en cuenta una superficie de absorción de 2m².

Tabla 23
Caudales recomendados por fabricantes de colectores solares.

Fabricante	Modelo	Caudal recomendado [l/h]
CSP	58 – 1800	360
LUMELCO	ST3500	121,2
ECOTOP	VF – HF	250

$$Q_{est} = \frac{360 + 121,2 + 250}{3}$$

$$Q_{est} = 243,73 \left[\frac{l}{h} \right]$$

Sin embargo este valor se lo tomó como un valor de caudal medio, ya que debido a que el colector solar de policarbonato es un colector en desarrollo fue necesario ajustar el caudal máximo y mínimo dependiendo de la absorción de calor que se pudo apreciar durante pruebas iniciales, por lo cual el caudal máximo se tomó de 300 l/h y caudal mínimo de 200 l/h.

Para calcular la velocidad en cada sección, el caudal es constante por lo cual:

$$A1 * V1 = A2 * V2 \quad (11)$$

La velocidad de la primera sección se obtuvo mediante la ecuación:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (12)$$

Las velocidades de cada sección se aprecian en la tabla 24.

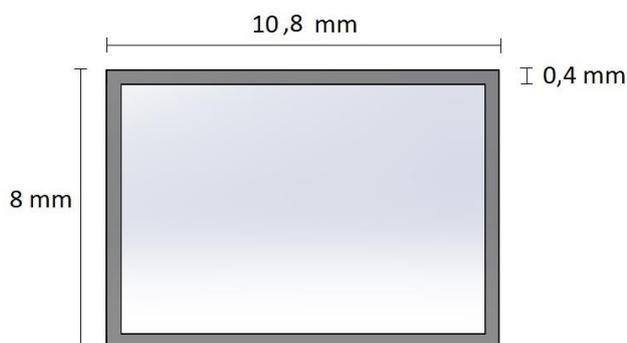


Figura 60 Corte de sección de un alveolo de policarbonato.

El área de cada alveolo se calculó con las dimensiones de la figura 60 y para el cálculo de la velocidad se tomó en cuenta un total de 89 alveolos.

$$A_{\text{alveolo}} = (0,0108 - 0,0004 * 2) * (0,008 - 0,0004 * 2)$$

$$A_{\text{alveolo}} = 0,000072 \text{ [m}^2\text{]}$$

Considerando que los accesorios rectos de polipropileno tienen un diámetro interior en neplós y uniones macho de 13 mm y en uniones hembra de 18 mm, se estimó un promedio para los cálculos de 15,5 mm.

Tabla 24
Velocidades en cada sección del sistema hidráulico.

Elemento del circuito	Diámetro [m]	Área [m ²]	Velocidad [m/s]
Manguera PVC 1/2"	0,012	0,000113	0,59862
Tubo PVC 1"	0,0238	0,000445	0,15218
Alveolo	-	0,000072	0,01057
Colector solar	-	-	0,01057
Tubo polipropileno 1/2"	0,0155	0,000188692	0,35880

b) Pérdidas de carga por fricción en el circuito

Se calculó el número de Reynolds (Re) del fluido para saber si es laminar o turbulento en cada sección mediante la ecuación 13, para lo cual se tomó en cuenta una temperatura del fluido de 20°C como ejemplo de cálculo, que es la temperatura del agua de la red. Si $Re < 2300$ entonces el flujo es laminar, si $2300 < Re < 4000$ el flujo se encuentra en transición a flujo turbulento, mientras que si $Re > 4000$, el flujo es turbulento (Cengel, Y. 2006).

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (13)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido, en el agua a 20°C es igual a $998,2 \frac{Kg}{m^3}$

v: Velocidad media del fluido, depende de la sección.

D: Diámetro de la tubería

μ : Viscosidad dinámica del fluido, en el agua es igual a $0,001002 \frac{Kg}{ms}$

Para sección rectangular que es el caso de los alveolos del colector solar se calculó un diámetro equivalente o diámetro hidráulico mediante la ecuación 14 con el fin de calcular el número de Reynolds en esta sección.

$$Deq = \frac{4A}{P} \quad (14)$$

Donde:

A: Área de la sección

P: Perímetro de la sección

- Alveolo

$$Deq = \frac{4 (0,0108 - 0,0004 * 2)(0,008 - 0,0004 * 2)}{2 * (0,0108 + 0,008 - 2 * 0,0004)}$$

$$Deq \text{ alveolo} = 0,008 \text{ [m]}$$

$$Re = \frac{998,2 * 0,01057 * 0,008}{0,001002}$$

Re = 84,24 < 2300, por lo tanto el flujo es laminar

- Manguera PVC ½"

$$Re = \frac{998,2 * 0,012 * 0,59862}{0,001002}$$

Re = 7156,20 > 2300, por lo tanto el flujo es turbulento

- Tubería polipropileno ½”

$$Re = \frac{998,2 * 0,0155 * 0,3588}{0,001002}$$

Re = 5540,31 > 2300, por lo tanto el flujo es turbulento

- Tubo PVC 1”

$$Re = \frac{998,2 * 0,0238 * 0,15218}{0,001002}$$

Re = 3608,15 > 2300, pero es menor a 4000, por lo tanto el flujo se encuentra en transición

Posteriormente se procedió a calcular las pérdidas por fricción dentro de cada sección del circuito con la fórmula de Darcy-Weisbach. Para los alveolos del colector solar, el flujo es laminar, con lo cual el factor de fricción se obtiene de la ecuación 15 (Shames, 2004).

$$h_f = f \frac{Lv^2}{2gD} \quad (15)$$

Donde:

h_f : Pérdida de carga por fricción [m]

f: Factor de fricción

L: Longitud de tubería

D: Diámetro de tubería

v: velocidad media del fluido

g: aceleración de la gravedad

$$f = \frac{64}{Re} \quad (16)$$

La ecuación 16 es válida únicamente para flujos laminares, para flujo turbulento se utilizó la ecuación 17 de Colebrook-White.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 * \left(\log \left(\frac{\omega}{3,71 * D} \right) + \frac{2,51}{Re * \sqrt{f}} \right) \quad (17)$$

Donde:

f: factor de fricción

ω : Rugosidad absoluta de la tubería [m]

D: diámetro de la tubería [m]

Re: número de Reynolds

- Alveolo

$$f = \frac{64}{84,24} = \mathbf{0,7597}$$

$$h_f = 0,7597 * \frac{2,04 * 0,01057^2}{2 * 9,81 * 0,008}$$

$$h_{fa} = 0,0011 \text{ [m]}$$

Si se considera un total de 89 alveolos:

$$h_{fa} = 89 * 0,0011$$

$$\mathbf{h_{fa} = 0,0979 \text{ [m]}}$$

- Manguera PVC ½"

Datos:

ω : 0,0000015 [m], D: 0,012 [m].

Re: 7156,20

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \left(\log \left(\frac{0,0000015}{3,71 * 0,012} \right) + \frac{2,51}{7156,20 * \sqrt{f}} \right)$$

La resolución de esta ecuación mediante software de cálculo otorgó el siguiente resultado:

$$f = 0,01252$$

$$h_f = 0,01252 * \frac{2,30 * 0,59862^2}{2 * 9,81 * 0,012}$$

$$h_f = 0,04383 \text{ [m]}$$

- Tubería de polipropileno ½”

$$\omega: 0,0000015 \text{ [m]}$$

$$D: 0,0155 \text{ [m]}$$

$$Re: 5540,31$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \left(\log \left(\frac{0,0000015}{3,71 * 0,0155} \right) + \frac{2,51}{5540,31 * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0,01192$$

$$h_f = 0,01192 * \frac{0,70 * 0,3588^2}{2 * 9,81 * 0,0155}$$

$$h_f = 0,00353 \text{ [m]}$$

- Tubo de PVC 1”

$$\omega: 0,0000015 \text{ [m]}$$

$$D: 0,0238 \text{ [m]}$$

$$Re: 3608,15$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \left(\log \left(\frac{0,0000015}{3,71 * 0,0238} \right) + \frac{2,51}{3608,15 * \sqrt{f}} \right)$$

$$f = 0,01102$$

$$h_f = 0,01102 * \frac{(0,98 * 2) * 0,15218^2}{2 * 9,81 * 0,0238}$$

$$h_f = 0,00107 \text{ [m]}$$

c) *Pérdidas de carga por accesorios*

Los accesorios utilizados para realizar las conexiones hidráulicas causan pérdidas de altura que son consideradas además de las pérdidas por fricción. La ecuación 18 relaciona las pérdidas por los accesorios mediante un coeficiente K y la velocidad media del sistema.

$$h_a = K \frac{V^2}{2g} \quad (18)$$

Donde:

K: Coeficiente dimensional para los accesorios comerciales.

V: Velocidad media del agua

En la tabla 25 se especifican los accesorios utilizados y el coeficiente K para cada uno.

Tabla 25
Accesorios utilizados en el circuito hidráulico (KSB, 2010).

Accesorio	Diámetro nominal	Cantidad	K
Codo 90°	½"	5	0,9
Curva manguera 90°	½"	3	0,4
Medidor de caudal	½"	1	2,5

$$h_a = (0,9 * 5) \frac{0,3588^2}{2 * 9,81} + (0,4 * 3) \frac{0,59862^2}{2 * 9,81} + (2,5) \frac{0,3588^2}{2 * 9,81}$$

$$h_a = 0,06785 [m]$$

d) *Pérdidas de carga por ensanchamiento y contracción*

El circuito hidráulico sufre dos ensanchamientos y dos contracciones, los ensanchamientos se dan por la unión entre el tubo de ½” y la tubería de 1” del colector y por la salida de los alveolos del colector hacia el tubo de 1” y las contracciones se deben a la reducción de área de la tubería de salida de 1” hacia la tubería de ½” que se dirige hacia el tanque y desde el tubo de 1” de entrada al colector hacia los alveolos que conforman el panel solar. Para el cálculo de las pérdidas de carga se utilizó la ecuación 18 y el factor K se obtuvo mediante la ecuación 19 para ensanchamiento y ecuación 20 para contracción.

$$K = \left(1 - \frac{d1^2}{d2^2}\right)^2 \quad (19)$$

$$K = 0,5 \left(1 - \frac{d1^2}{d2^2}\right)^2 \quad (20)$$

Donde:

d1: diámetro menor

d2: diámetro mayor

- Ensanchamiento (Tubo ½” → Tubo 1”)

$$K = \left(1 - \frac{0,5^2}{1^2}\right)^2$$

$$K = 0,56$$

- Contracción (Tubo 1" → Tubo ½")

$$K = 0,5 \left(1 - \frac{0,5^2}{1^2} \right)^2$$

$$K = 0,28125$$

- Contracción (Tubo 1" → alveolo 0,008m)

$$K = 0,5 \left(1 - \frac{0,008^2}{0,0254^2} \right)^2$$

$$K = 0,406$$

$$K = \left(1 - \frac{0,008^2}{0,0254^2} \right)^2$$

$$K = 0,811$$

La pérdida total de carga por ensanchamiento y contracción se calcula tomando en cuenta la velocidad en el tubo de menor diámetro y que existe un total de 89 alveolos:

$$h_t = (0,56 + 0,28125) \frac{0,3588^2}{2 * 9,81} + (89 * 0,406 + 89 * 0,811) \frac{0,01057^2}{2 * 9,81}$$

$$h_t = \mathbf{0,0061 [m]}$$

e) *Coefficiente total de pérdida de carga*

$$h_l = h_f + h_a + h_t$$

$$h_l = (0,0979 + 0,04383 + 0,00353 + 0,00107) + 0,06785 + 0,0061$$

$$h_l = \mathbf{0,22028 [m]}$$

f) *Balace de energía mecánica del sistema*

Para realizar el balance de energía mecánica del sistema se utilizó la ecuación de Bernoulli, descrita como ecuación 21 entre el punto de entrada y el punto más desfavorable del sistema, que es el punto más alto de salida del colector solar.

$$\frac{V_A^2}{2g} + \frac{P_A}{\rho g} + z_A + ADT = \frac{V_B^2}{2g} + \frac{P_B}{\rho g} + z_B + h_l \quad (21)$$

Donde:

ADT: Altura dinámica total

V_A, V_B : Velocidad del fluido en el punto A y B respectivamente.

P_A, P_B : Presión del sistema en el punto A y B respectivamente.

z_A, z_B : Altura medida desde el nivel de referencia

El sistema no se encuentra presurizado, por esta razón la presión en el punto B es igual a la presión atmosférica, al igual que la presión en el punto A.

$$P_B = P_{atm}$$

$$P_A = P_{atm}$$

Las alturas en cada punto son:

$$z_A = 0,05 [m]$$

$$z_B = 2,48 [m]$$

La velocidad en el punto A, dado que el agua se encuentra en reposo es nula, mientras que en el punto B es igual a la velocidad de salida de la manguera de PVC de 1/2", esta velocidad es de 0,59862 m/s.

La aplicación de la ecuación 21 para el circuito hidráulico se calcula como:

$$z_A + ADT = \frac{V_B^2}{2g} + z_B + h_l$$

$$ADT = \frac{V_B^2}{2g} + z_B - z_A + h_l$$

$$ADT = \frac{0,59862^2}{2 * 9,81} + 2,43 - 0,05 + 0,22028$$

$$\mathbf{ADT = 2,619 [m]}$$

En la tabla 26 se muestra un resumen de la altura total dinámica de bombeo requerida para distintos caudales y temperaturas del fluido alcanzadas dentro del colector solar.

Tabla 26
Altura dinámica total de bombeo para distinta temperatura de fluido y caudal.

Hora	Caudal promedio [l/h]	Temperatura promedio del fluido [°C]	Densidad del agua [Kg/m ³]	Viscosidad dinámica [Kg/ms]	Elemento del circuito	Velocidad [m/s]	Diámetro hidráulico [m]	Longitud de tubería [m]	Re	Coefficiente total de pérdidas [m]	Altura dinámica total [m]
11:00 - 11:30	243,73	20,0	996,31	0,000833	Manguera 1/2"	0,59863	0,0120	2,30	8591,88	0,20415	2,602
					Tubo PVC 1"	0,15218	0,0238	1,96	4332,04		
					Alveolo	0,01057	0,0080	2,04	101,09		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,35880	0,0155	0,70	6651,78		
11:31 - 12:00	276,56	31,5	995,09	0,000765	Manguera 1/2"	0,67925	0,0120	2,30	10602,65	0,24281	2,646
					Tubo PVC 1"	0,17268	0,0238	1,96	5345,87		
					Alveolo	0,01199	0,0080	2,04	124,75		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,40713	0,0155	0,70	8208,50		
12:01 - 12:30	277,81	34,4	994,43	0,000734	Manguera 1/2"	0,68234	0,0120	2,30	11093,21	0,24125	2,645
					Tubo PVC 1"	0,17346	0,0238	1,96	5593,22		
					Alveolo	0,01204	0,0080	2,04	130,53		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,40898	0,0155	0,70	8588,29		
12:31 - 13:00	280,87	37,0	993,37	0,000692	Manguera 1/2"	0,68986	0,0120	2,30	11883,57	0,24100	2,645
					Tubo PVC 1"	0,17538	0,0238	1,96	5991,71		
					Alveolo	0,01218	0,0080	2,04	139,83		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,41348	0,0155	0,70	9200,18		

Tabla 27 (continuación)

Altura dinámica total de bombeo para distinta temperatura de fluido y caudal.

Hora	Caudal promedio [l/h]	Temperatura promedio del fluido [°C]	Densidad del agua [Kg/m ³]	Viscosidad dinámica [Kg/ms]	Elemento del circuito	Velocidad [m/s]	Diámetro hidráulico [m]	Longitud de tubería [m]	Re	Coefficiente total de pérdidas [m]	Altura dinámica total [m]
13:01 - 13:30	282,66	40,6	992,25	0,000641	Manguera 1/2"	0,69425	0,0120	2,30	12896,15	0,23784	2,642
					Tubo PVC 1"	0,17649	0,0238	1,96	6502,26		
					Alveolo	0,01225	0,0080	2,04	151,74		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,41612	0,0155	0,70	9984,12		
13:31 - 14:00	284,75	42,4	991,46	0,000629	Manguera 1/2"	0,69937	0,0120	2,30	13228,54	0,23949	2,644
					Tubo PVC 1"	0,17779	0,0238	1,96	6669,85		
					Alveolo	0,01234	0,0080	2,04	155,65		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,41918	0,0155	0,70	10241,45		
14:01 - 14:30	281,71	44,4	990,64	0,000607	Manguera 1/2"	0,69190	0,0120	2,30	13550,46	0,23272	2,637
					Tubo PVC 1"	0,17590	0,0238	1,96	6832,17		
					Alveolo	0,01221	0,0080	2,04	159,44		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,41471	0,0155	0,70	10490,68		
14:31 - 15:00	289,49	45,7	989,80	0,000586	Manguera 1/2"	0,71103	0,0120	2,30	14411,83	0,24139	2,647
					Tubo PVC 1"	0,18076	0,0238	1,96	7266,47		
					Alveolo	0,01255	0,0080	2,04	169,57		
					Tubo polipropileno 1/2"	0,42617	0,0155	0,70	11157,54		

g) *Selección de bomba adecuada para el sistema*

Para la selección de la bomba de circulación adecuada se ha aplicado una matriz de criterios ponderados, tomando en cuenta que donde se evaluaron los siguientes criterios y alternativas:

- Alternativa 1:

Bomba sumergible Sahara 500

Voltaje nominal	12 VDC	
Potencia nominal	18 W	
Altura máxima de bombeo	2,74 m	
Caudal máximo	2158 l/h	
Vida útil estimada	1000 h	
Tipo de fluido	Agua	
Costo	\$44	

- Alternativa 2:

Bomba sumergible Tsunami T500

Voltaje nominal	12 VDC	
Potencia nominal	22 W	
Altura máxima de bombeo	2,74 m	
Caudal máximo	2082 l/h	
Vida útil	800 h	
Tipo de fluido	Agua	
Costo	\$19,96	

- Alternativa 3:

Bomba RULE 25D

Voltaje nominal	12 VDC
Potencia nominal	22 W
Altura máxima de bombeo	3,7 m
Caudal máximo	1817 l/h
Vida útil	1500 h
Tipo de fluido	Agua
Costo	\$26



- Criterios evaluados: Caudal máximo, altura máxima de bombeo, costo, vida útil y consumo energético.

Tabla 28

Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección de la bomba sumergible.

Criterio	Caudal máximo	Altura máxima de bombeo	Vida útil	Consumo energético	Costo	$\Sigma+1$	Ponderación
Caudal máximo	-	0	0	0	0	1	7%
Altura máxima de bombeo	1	-	0	0	1	3	20%
Vida útil	1	1	-	0,5	1	4,5	30%
Consumo energético	1	1	0,5	-	1	4,5	30%
Costo	1	0	0	0	-	2	13%
					Total	15	100%

Tabla 29

Tabla de conclusiones de selección de la bomba.

Conclusiones	Caudal máximo	Altura máxima de bombeo	Vida útil	Consumo energético	Costo	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,033	0,050	0,100	0,150	0,022	36%	2
Alternativa 2	0,022	0,050	0,050	0,075	0,067	26%	3
Alternativa 3	0,011	0,100	0,150	0,075	0,044	38%	1
					Total	100%	

En la tabla 28 se aprecia que los criterios más importantes son el consumo energético y la vida útil de la bomba con una ponderación del 30%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 7. La tabla 29 muestra un resumen sobre la selección de la bomba en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 28; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 3 (Bomba RULE 25D) con un 38%.

La bomba seleccionada tiene la curva de rendimiento que se observa en la figura 61, sin embargo esta curva es para un voltaje de 13,6VDC, con 12VDC se tienen los caudales obtenidos en la tabla 30 y el gráfico de rendimiento para voltaje de 12VDC se aprecia en la figura 62.

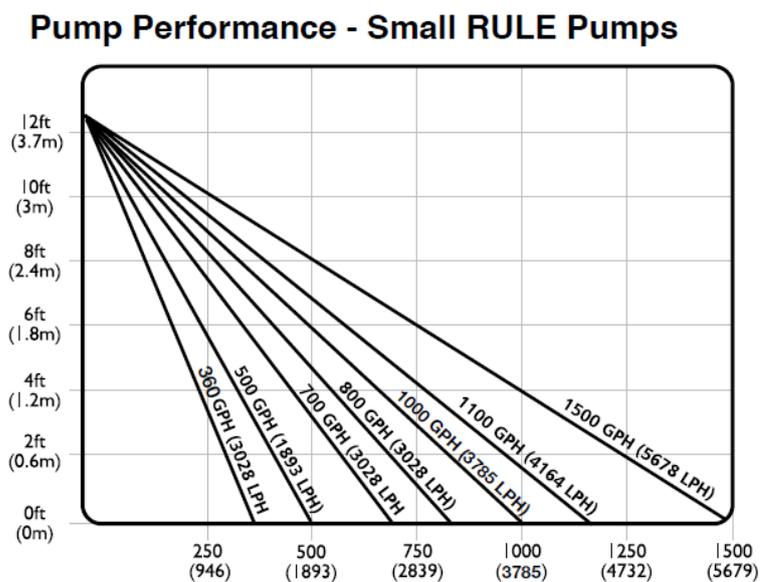


Figura 61 Curva de rendimiento de la bomba RULE 25D 500 GPH.

Tabla 30
Relación entre Altura Dinámica Total de la bomba y Caudal a voltajes de 13,6 VDC y 12 VDC (ITT Industries, 2013).

Altura	GPH (13,6v)	GPH (12v)	LPH (13,6v)	LPH (12v)
0,0	500,00	480,00	1892,71	1817,00
1,0	360,00	310,00	1362,75	1173,48
2,0	250,00	180,00	946,35	681,37
2,56	175,13	89,48	662,92	338,72
3,0	120,00	23,33	454,25	88,31

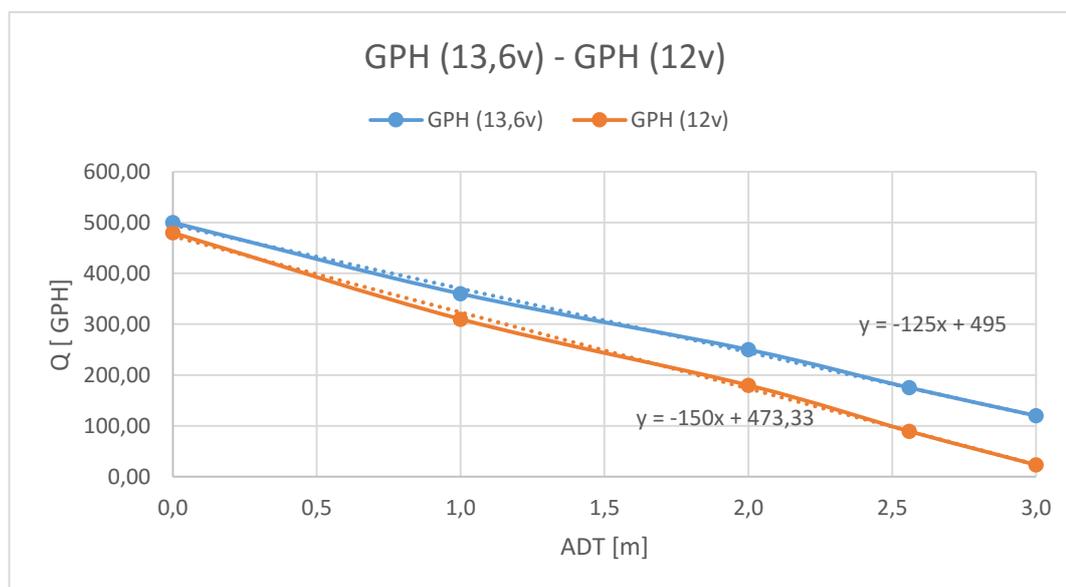


Figura 62 Comparación gráfica entre ADT y Q con 13,6 VDC y 12 VDC.

Como se puede apreciar en la figura 62 y la tabla 30 con un voltaje de alimentación de 12 VDC a una altura de 2,647 m se obtiene un caudal de 76,28 GPH o 288,75 l/h.

3.2 Subsistema de calefacción de ambiente

El subsistema consta de tres componentes principales que son: estructura de apoyo, colector solar de policarbonato plano sin cubierta y aerocirculador que se encarga de impulsar aire proveniente del exterior hacia el colector solar.

Debido a que la estructura y los colectores solares fueron diseñados tomando en cuenta situaciones críticas que incluyen las mayores cargas a soportar, el diseño de estas partes se ha omitido para la calefacción y se puede verificar en el apartado 3.1.

3.2.1 Selección del aerocirculador

Para la selección del soplador se estableció que el valor de CFM (cubic feet minute) debe ser mayor o igual a 120, el cual es suficiente para circular aire a una velocidad adecuada. Para la selección se ha aplicado una matriz de criterios ponderados, donde se evaluaron los siguientes criterios y alternativas:

- Alternativa 1:

Attwood Turbo 3000

Voltaje nominal	12 VDC	
Potencia nominal	31,2 W	
Corriente nominal	2,6 A	
CFM	120	
Costo	\$25	

- Alternativa 2:

Detmar 754 Blower

Voltaje nominal	12 VDC	
Potencia nominal	42 W	
Corriente nominal	3,5 A	
CFM	158	
Costo	\$44	

- Alternativa 3:

Birge Air Blower	
Voltaje nominal	12 VDC
Potencia nominal	28 W
Corriente nominal	2,4 A
CFM	90
Costo	\$20



- Criterios evaluados: Consumo energético, CFM y costo.

Tabla 31
Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del soplador.

Criterio	Costo	Consumo Energético	CFM	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo	-	0	0	1	17%
Consumo Energético	1	-	0	2	33%
CFM	1	1	-	3	50%
			Total	6	100%

Tabla 32
Tabla de conclusiones de selección del soplador.

CONCLUSIONES	Costo	Consumo Energético	CFM	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,056	0,111	0,208	38%	1
Alternativa 2	0,028	0,056	0,208	29%	2
Alternativa 3	0,083	0,167	0,083	33%	3
			Total	100%	

En la tabla 31 se aprecia que el criterio más importante son los CFM del soplador con una ponderación del 50%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 8. La tabla 32 muestra un resumen sobre la selección del

soplador en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 31; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 1 (Attwood Turbo 3000) con un 38%.

3.3 Alimentación eléctrica del sistema

3.3.1 Cálculo de la potencia requerida por el sistema

Antes de elegir el panel solar fotovoltaico es importante conocer el consumo eléctrico que tendrá el sistema en general, por lo tanto se realizó el cálculo de la potencia requerida por las bombas, soplador, electroválvulas, microcontrolador y demás sensores.

- **Bomba:**

De las especificaciones técnicas de la bomba Rule 25D se obtiene que:

Corriente (I): 1,9 Amperios.

Voltaje (V): 12 Voltios.

Potencia (W)= 1,9*12 = 22,8 Watts

El sistema consta de dos calentadores de agua, con policarbonato bronce y con policarbonato pintado de negro mate, por lo tanto la potencia total requerida por las dos bombas (una por cada subsistema respectivamente) es: **45,6 Watts**

- **Soplador**

De las especificaciones técnicas del soplador Attwood Turbo 3000 se obtiene que:

Corriente (I): 2,6 Amperios.

Voltaje (V): 12 Voltios.

Potencia (W)= 2,6*12 = 31,2 Watts

- *Electroválvulas*

De las especificaciones técnicas de la electroválvula se obtiene que:

Corriente (I): 320 mA

Voltaje (V): 12 V

Potencia (W)= 0,320*12 = 3,84 Watts

El sistema está conformado por dos electroválvulas, una para cada uno de los subsistemas de calentamiento de agua, por lo tanto la potencia total requerida por las electroválvulas es: **7,68 Watts**.

La potencia requerida por los sensores se presenta en la tabla 33.

Tabla 33
Potencia requerida por los sensores.

Sensor	Modelo	Cantidad	Corriente [mA]	Voltaje [V]	Potencia por unidad [W]	Potencia Total [W]
Sensor de Temperatura	Dallas DS18B20	9	1,5	5	0,0075	0,0675
Sensor de flujo de agua	YF-S201	2	15	5	0,075	0,15
Piranómetro	6450	1	1	3.3	0,0033	0,0033
Anemómetro	80422	1	15	5	0,075	0,075
Sensor de Humedad	HTU21D	1	0,5	5	0,0025	0,0025
Arduino	Mega 2560	1	400	9	3,6	3,6
					Total	3,8983

Por lo tanto la potencia total requerida para el sistema es:

$$PT = 45,6 + 31,2 + 7,68 + 3,8983$$

$$PT = 88,38 [W]$$

Para el análisis térmico del calentador de policarbonato se estableció que el sistema trabajaría por un lapso de 5 horas que constan desde las 10am a 3pm, debido a que son las horas donde hay mayor radiación.

3.3.2 Selección del panel solar fotovoltaico

Al momento de elegir un panel solar fotovoltaico es importante conocer las características técnicas y los requerimientos que el sistema diseñado exige. Las alternativas y criterios tomados en cuenta para la selección del panel son:

- Alternativa 1:

Modelo	PX 1206
Potencia Máxima	120 W
Tolerancia	± 5 %
Corriente Nominal	7,25 A
Voltaje Nominal	16,5 V
Corriente en cortocircuito	7,8 A
Voltaje en circuito abierto	21 V
Eficiencia	19%
Dimensiones	660 mm * 1480 mm
Costo	USD 200

- Alternativa 2:

Modelo	SM636
Potencia Máxima	120 W
Tolerancia	± 2 %
Corriente Nominal	7,14 A
Voltaje Nominal	17,7 V
Corriente en cortocircuito	7,57 A
Voltaje en circuito abierto	21,7 V
Dimensiones	670 mm * 1482 mm
Costo	USD 190

- Alternativa 3:

Modelo	SM536
Potencia Máxima	100 W
Tolerancia	± 3 %
Corriente Nominal	5,85 A
Voltaje Nominal	18 V
Corriente en cortocircuito	6,3 A
Voltaje en circuito abierto	21,98 V
Dimensiones	674 mm * 1093 mm
Costo	USD 200

- Criterios evaluados: costo, tensión de trabajo, potencia máxima, tolerancia, tamaño y disponibilidad.

Tabla 34**Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del panel solar fotovoltaico.**

Criterio	Costo	Tensión de Trabajo	Potencia Máxima	Tolerancia	Tamaño	Disponibilidad	Σ+1	Ponderación
Costo	-	0	0	1	1	0,5	3,5	17%
Tensión de Trabajo	1	-	0,5	1	1	1	5,5	26%
Potencia Máxima	1	0,5	-	1	1	1	5,5	26%
Tolerancia	0	0	0	-	0,5	0	1,5	7%
Tamaño	0	0	0	0,5	-	0	1,5	7%
Disponibilidad	0,5	0	0	1	1	-	3,5	17%
							21	100%

Tabla 35**Tabla de conclusiones de selección del panel solar fotovoltaico.**

Conclusiones	Costo	Tensión de Trabajo	Potencia Máxima	Tolerancia	Tamaño	Disponibilidad	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,042	0,131	0,109	0,036	0,024	0,069	41,07%	1
Alternativa 2	0,083	0,065	0,109	0,012	0,024	0,069	36,31%	2
Alternativa 3	0,042	0,065	0,044	0,024	0,024	0,028	22,62%	3
							100,00%	

En la tabla 34 se puede apreciar que los criterios más importantes tomados en cuenta para la selección del panel solar fotovoltaico, son la tensión de trabajo y potencia máxima con una ponderación del 26%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 9. La tabla 35 muestra un resumen sobre la selección del panel solar fotovoltaico en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 34; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 1 (PX 1206) con un 41,07%. Como se puede observar la alternativa 1 le permite al sistema obtener una adecuada tensión de trabajo y potencia máxima necesaria para el correcto funcionamiento de sus elementos eléctrico y evitar daños en los mismos, también es una buena opción ya que es fácil de conseguir, posee un nivel de tolerancia mayor a las demás alternativas y su precio es moderado.

3.3.3 Selección del regulador

El regulador es un elemento muy importante ya que se encarga de administrar la energía del panel solar y la batería y permitir la alimentación eléctrica del sistema, por esta razón su elección debe ser adecuada para los elementos mencionados. Las alternativas que se han tomado en cuenta son las siguientes:

- Alternativa 1:

Modelo	SunSaver-10
Corriente Nominal de carga	10 A
Tensión del Sistema	12V
Desconexión de la Carga	11,5
Reconexión de la Carga	12,6
Temperatura de operación	-40°C a 85°C
Dimensiones	152x55 mm
Peso	0,23 kg
Costo	\$ 100

- Alternativa 2:

Modelo	PROSTAR-15
Corriente Nominal de carga	15 ^a
Tensión del Sistema	12V
Desconexión de la Carga	11,4
Reconexión de la Carga	12,6
Temperatura de operación	-40°C a 60°C
Dimensiones	153x105 mm
Peso	0,34 kg
Costo	\$ 150

- Alternativa 3:

Modelo	CMP12
Corriente Nominal de carga	10 ^a
Tensión del sistema	12V
Desconexión de la Carga	10,8
Reconexión de la Carga	12,6
Temperatura de operación	-10°C a 60°C
Dimensiones	102x95 mm
Peso	0,14 kg
Costo	\$ 25

Criterios evaluados: voltaje nominal, corriente máxima, tamaño, costo y protección de sobrecarga y sobredescarga.

Tabla 36
Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección del regulador solar.

Criterio	Volataje Nominal	Corriente Nominal	Costo	Tamaño	Protección sobrecarga	Protección sobredescarga	$\Sigma+1$	Ponderación
Volataje Nominal	-	0,5	0,5	1	1	1	5	24%
Corriente Nominal	0,5	-	0,5	1	1	1	5	24%
Costo	0,5	0,5	-	1	0,5	0,5	4	19%
Tamaño	0	0	0	-	0	0	1	5%
Protección sobrecarga	0	0	0,5	1	-	0,5	3	14%
Protección sobredescarga	0	0	0,5	1	0,5	-	3	14%
Total							21	100%

Tabla 37
Tabla de conclusiones de selección del regulador solar.

Conclusiones	Volataje Nominal	Corriente Nominal	Costo	Tamaño	Protección sobrecarga	Protección sobredescarga	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,079	0,060	0,063	0,012	0,048	0,048	30,95%	1
Alternativa 2	0,079	0,119	0,032	0,012	0,048	0,048	33,73%	2
Alternativa 3	0,079	0,060	0,095	0,024	0,048	0,048	35,32%	3
Total							100,00%	

En la tabla 36 se puede apreciar que los criterios más importantes tomados en cuenta para la selección del regulador solar, son el voltaje nominal y la corriente nominal con una ponderación del 24%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 10. La tabla 37 muestra un resumen sobre la selección del regulador solar en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la Tabla 36; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 3 (CMP12) con un 35,32%. En general las alternativas seleccionadas cumplen con los requerimientos técnicos y eléctricos del sistema, sin embargo como se puede observar la alternativa 3 es mucho más económica que las demás, lo cual la convierte en la mejor opción para adquirir.



Figura 63 Regulador Solar CMP12.

Funciones del regulador CMP12:

- Mantiene cargada la batería.
- Protege a la batería de una sobrecarga.
- Protege a la batería de una sobredescarga.
- Protección de cortocircuito.
- Previene la corriente invertida por las noches de la batería hacia los paneles.
- Indica mediante leds el estado de las baterías.

3.3.4 Selección de la batería

La selección de la batería debe cumplir con las siguientes especificaciones mínimas para garantizar el continuo abastecimiento del sistema:

- Corriente máxima total del sistema es: 7,47 A.
- Horas de funcionamiento del sistema: 6 h.
- El sistema necesita una batería que tenga una capacidad mínima de 45Ah para un día de autonomía.

Las alternativas tomadas en cuenta para la selección fueron las siguientes:

- Alternativa 1:

Modelo	31DC115 Millenium
Voltaje Nominal	12 V
Capacidad 10Ah	115 Ah
Temperatura de trabajo	25°C
Tamaño	330x170x245 mm
Peso	36 kg
Costo	\$ 285

- Alternativa 2:

Modelo	RA12-100
Voltaje Nominal	12 V
Capacidad 10h	100 Ah
Temperatura de trabajo	25°C ± 5°C
Tamaño	328x172x222 mm
Peso	30 kg
Costo	\$280

- Alternativa 3:

Modelo	BAT412101080
Voltaje Nominal	12 V
Capacidad 10Ah	110 Ah
Temperatura de trabajo	25°C
Tamaño	330x171x220 mm
Peso	36 kg
Costo	\$320

- Criterios evaluados: capacidad, voltaje nominal, costo, tamaño, durabilidad y disponibilidad. Para los cual se planteó tres diferentes alternativas.

Tabla 38
Evaluación del peso específico de cada criterio para la selección de la batería.

Criterio	Capacidad	Volataje Nominal	Costo	Tamaño	Durabilidad	Disponibilidad	$\Sigma+1$	Ponderación
Capacidad	-	0,5	1	1	1	0,5	5	24%
Voltaje nominal	0,5	-	0,5	1	1	0,5	4,5	21%
Costo	0	0,5	-	1	1	0	3,5	17%
Tamaño	0	0	0	-	0	0	1	5%
Durabilidad	0	0	0	1	-	0	2	10%
Disponibilidad	0,5	0,5	1	1	1	-	5	24%
						Total	21	100%

Tabla 39
Tabla de conclusiones de selección de la batería.

Conclusiones	Capacidad	Voltaje Nominal	Costo	Tamaño	Durabilidad	Disponibilidad	Sumatoria	Prioridad
Alternativa 1	0,119	0,071	0,069	0,020	0,032	0,119	43,06%	1
Alternativa 2	0,060	0,071	0,069	0,020	0,032	0,060	31,15%	2
Alternativa 3	0,060	0,071	0,028	0,008	0,032	0,060	25,79%	3
						Total	100,00%	

En la tabla 38 se puede apreciar que los criterios más importantes tomados en cuenta para la selección de la batería, son la capacidad y la disponibilidad con una ponderación del 24%.

La evaluación del peso específico de cada criterio respecto a las alternativas existentes se encuentra en el Anexo 11. La tabla 39 muestra un resumen sobre la selección de la batería en función de los criterios que se han tomado en cuenta en la tabla 38; la alternativa con mayor prioridad es la alternativa 1 (31DC115 Millennium) con un 43,06%. En general las tres baterías cumplen con los requisitos técnicos y eléctricos para abastecer de energía al sistema, junto con el panel solar y el regulador. Sin embargo la alternativa 1 es más fácil de adquirir y más económica.

La batería Millennium 31-DC-115 es una batería libre de mantenimiento, de ciclo profundo con electrolito líquido diseñada específicamente para sistemas de almacenamiento y respaldo de energía. Los ciclos de vida de la batería dependen de los parámetros de carga a la cual ésta sea sometida.

3.3.5 Cableado y protección

Para la selección del tipo de cable se consideraron las líneas principales y la corriente máxima en cada sección:

- 1 y 2 - Panel Solar: 8A.
- 3 y 4 - Batería: 10A.
- 5 y 6 - Carga: 7,5A.

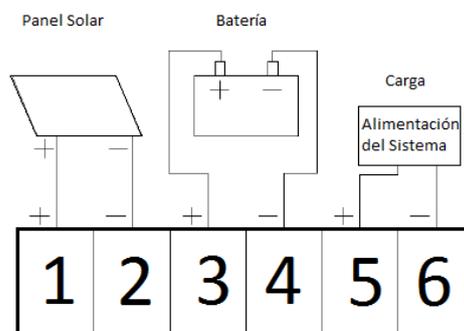


Figura 64 Conexión eléctrica.

Tabla 40
Especificaciones técnicas para selección de cable (DISENSA, 2015).

Calibre AWG ó MCM	Sección mm ²	FORMACION	ESPEJOR AISLAMIENTO mm	DIAMETRO EXTERIOR mm	PESO TOTAL Kg/Km	Cap. de Corriente	TIPO CABLE	Altern. de embal.
		No. de Hilos por diámetro en mm.				Para 1 conductor Al aire libre Amp .		
24	0.205	7 x 0,20	0.51	1.63	5.14	---	FXT	A,E
22	0.324	11 x 0,20	0.51	1.78	7.62	---	FXT	A,E
20	0.519	17 x 0,20	0.76	2.47	9.98	5	FXT	A,E
18	0.823	12 x 0,30	0.76	2.72	13.43	7	TFF	A,E
16	1.310	19 x 0,30	0.76	3.02	18.93	10	TFF	A,B
14	2.08	30 x 0,30	1.14	4.17	32.30	25	TW-F	A,B
12	3.31	27 x 0,40	1.14	4.67	46.50	30	TW-F	A,C
10	5.26	42 x 0,40	1.14	5.26	67.90	40	TW-F	A,D

Se seleccionó el cable flexible de cobre AWG16 para las tres secciones ya que tiene una capacidad de corriente de 10Amp., además es adecuado para trabajar en lugares abiertos con climas secos o húmedos, presenta gran flexibilidad que facilita la instalación.

Para la protección de los elementos eléctricos se utilizó la recomendada por sus fabricantes:

Bomba 12V: Fusible de 3A

Soplador 12V: Fusible de 5A

Panel Solar: Fusible de 10^a

3.4 Sistema de control y adquisición de datos

3.4.1 Sensores

Para la medición de las variables que intervienen en el análisis térmico del sistema, se procedió a seleccionar sensores adecuados para cada una de ellas.

- Radiación Solar en KW/m² - Piranómetro

Equipo	Solar Radiation Sensor Davis 6450
Temperatura de Operación	-40°C a 65°C
Voltaje de alimentación	+3 VDC ± 10% ; 1 mA
Señal de salida	(0 a +3 VDC); 1.67 mA por W/m ²
Rango	0 a 1800 W/m ²
Precisión	± 5%
Resolución	1 W/m ²
Medidas	51 mm x 70 mm x 57 mm
Peso	0.5 lb.
Costo	\$ 150



Para determinar la Radiación en KW/m² en base a la variación de voltaje se utilizó la siguiente fórmula:

$$R = \frac{V_A * 1800}{613,8} \quad (22)$$

Donde:

R= Radiación en KW/m².

V_A= Valor analógico enviado por el sensor.

- Velocidad del viento en m/s – Anemómetro

Equipo	Cup-Type Anemometer 80422
Frecuencia	1 HZ es 1.492 MPH (2.4 km/h)
Voltaje de alimentación	+5 VDC
Señal de salida	Pulsos
Rango	0.5 – 60 m/s
Precisión	± 5%
Tipo de conexión	RJ11
Peso	0.4 lb.
Costo	\$ 125



Para determinar la velocidad del viento en m/s en base al número de pulsos se utilizó la siguiente fórmula:

$$V = \frac{P * 1492}{T} \quad (23)$$

Donde:

V= Velocidad del viento en m/s.

P= Número de pulsos.

T= Tiempo de muestreo.

- Temperatura en °C.

Equipo Sensor de temperatura dallas
DS18B20

Temperatura de Operación -55°C to +125°C

Voltaje de alimentación +3 VDC ± 10% ; 1 mA

Señal de salida One wire

Precisión 1%

Resolución ±0.5°C

Medidas Diámetro: 6 mm, tubo de acero inoxidable de 35 mm de largo

Peso -

Costo \$6



- Caudal en L/H. – Caudalímetro

Equipo **YF-S201**

Temperatura de Operación -25 a +80°C

Flujo de operación 1 a 30 L/m.

Voltaje de alimentación 5 a 18V DC

Señal de salida Pulsos

Precisión ±10%

Frecuencia 450 L/m.

Medidas 2.5" x 1.4" x 1.4" / salida 1/2"

Durabilidad 300.000 ciclos

Costo \$ 20



Para determinar el caudal en L/H en base al número de pulsos se utilizó la siguiente fórmula:

$$C = \frac{P c * 7,5 * 60}{T} \quad (24)$$

Donde:

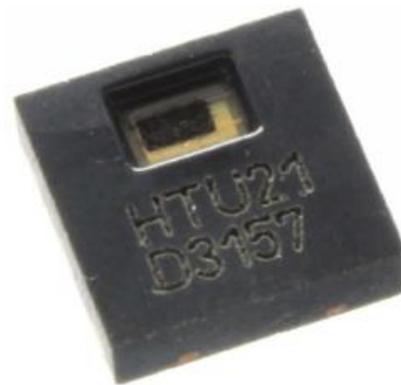
C= Caudal en L/H.

Pc= Número de pulsos.

T= Tiempo de muestreo.

- Humedad en %.

Equipo	HTU21D
Temperatura de Operación	-25 a +80°C
Rango de operación	0 a 100 % RH
Voltaje de alimentación	3.8 V.
Comunicación	I2C
Precisión	±10%
Medidas	3 x 3 mm.
Costo	\$12



3.4.2 Circuito de control y potencia

a) Circuito de control

Para el circuito de control se incluyeron los siguientes módulos.

- Almacenamiento de datos – módulo SD

Para el almacenamiento de datos se seleccionó un módulo lector de micro SD, el cual permite tener un registro continuo de las variables del sistema. Una tarjeta micro SD de 2 GB es capaz de almacenar datos por más de un año, lo cual es suficiente para los requerimientos del sistema.



Figura 65 Módulo SD.

En el caso del módulo LC STUDIO MICRO SD CARD es necesario hacer las siguientes conexiones:

Tabla 41
Pines de conexión del módulo LC STUDIO MICRO SD CARD.

MÓDULO PIN	PIN ARDUINO MEGA
MOSI	51
MISO	50
CLK	52
CS	53
5V	5V
GND	GND

- Reloj en tiempo real – módulo RTC

Para almacenar los datos en tiempo real se seleccionó el módulo RTC, el cual permitió que el sistema registre los datos con la fecha y hora actual, también cumplió la función de temporizador, ya que fue una parte vital para el control del sistema permitiendo que este funcione durante un lapso específico de tiempo.

El módulo funciona de manera independiente del microcontrolador gracias a la batería que integra, es decir en caso de que el sistema se apagara el módulo RTC mantiene los datos de hora y fecha constantemente.

Este módulo utiliza comunicación I2C, y se conecta como se muestra en la tabla 42.

Tabla 42
Pines de conexión del módulo RTC.

MÓDULO PIN	PIN ARDUINO MEGA
SDA	20
SCL	21
5V	5V
GND	GND

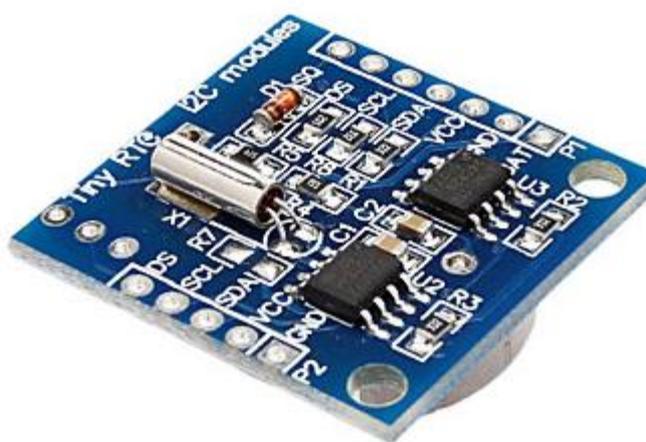


Figura 66 Módulo RTC.

- Visualización – LCD 16x2

Para la visualización de las variables del sistema se seleccionó una pantalla LCD de 16x2, la cual permite observar valores de temperatura, radiación, fecha y hora.

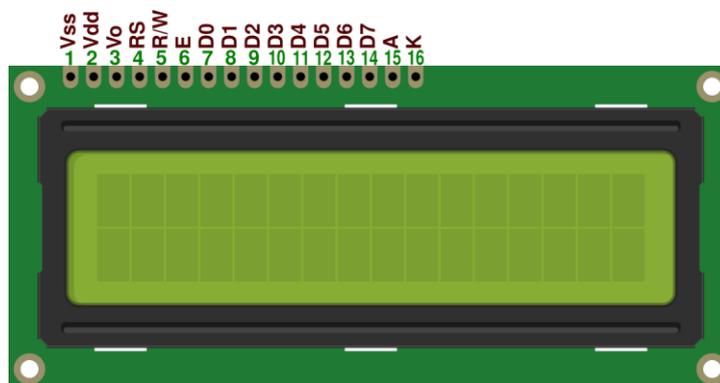


Figura 67 LCD 16x2.

Los pines de conexión se muestran en la tabla 43

Tabla 43
Pines de conexión del LCD 16x2.

LCD PIN	PIN ARDUINO MEGA
Vss	GND
Vdd	5V
RS	41
RW	GND
E	39
D4	37
D5	35
D6	33
D7	31

- Medidor de Nivel

Para controlar el llenado del tanque se instalaron dos sensores de nivel de agua por tanque. Su funcionamiento es como el de un switch, el cual envía un 1 lógico cuando el nivel está en alto y un 0 lógico cuando el nivel está en bajo.

Tabla 44
Características técnicas del sensor flotador.

Modelo	Switch Flotador
Voltaje máximo de conmutación	100 Vdc
Corriente máxima de conmutación	0,5 A
Tipo de material	Plástico
Dimensiones	68x20 mm rosca de ½"
Temperatura de Operación	-10°C a 85°C



b) Circuito de potencia

El circuito de Potencia consta de dos etapas:

- La primera etapa está conformada por tres reguladores de voltaje. El regulador de 9 V sirve para alimentar al Arduino, el regulador de 5 V sirve para alimentar

algunos sensores y módulos, y el regulador de 3,3 V se utilizó para alimentar al sensor de radiación solar.

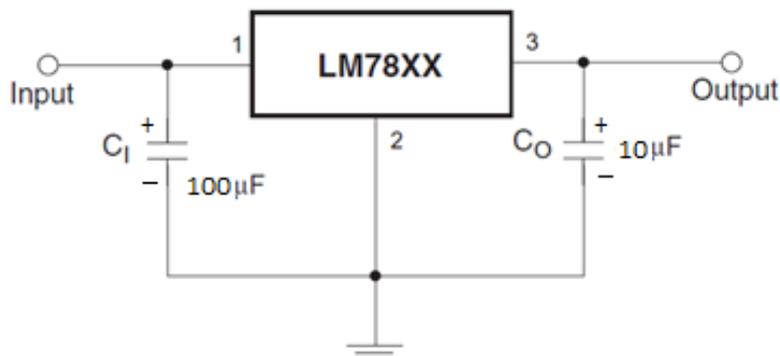


Figura 68 Conexión regulador de voltaje.

La segunda etapa consiste en el control de las bombas, el soplador y las electroválvulas. El Arduino entrega un voltaje de salida entre 2.2 y 5 V y una corriente máxima de 0,4 mA, por lo tanto fue necesario amplificar el voltaje y la corriente con una fuente externa (estación solar), para el funcionamiento de los actuadores. Se seleccionó el transistor de potencia TIP 120 capaz de soportar hasta 5 A y 60 V y un diodo rectificador.

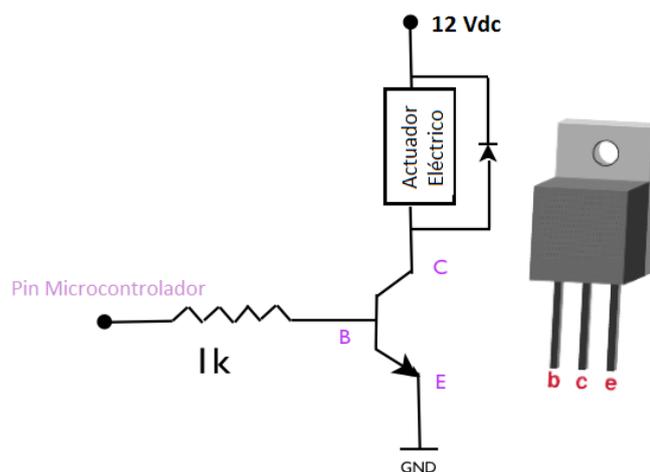


Figura 69 Conexión a Fuente externa.

3.4.3 Diseño de placas PCB

- Cálculo del ancho de pista

Para determinar el ancho de pista fue necesario conocer la corriente máxima que la placa debe soportar, la variación máxima de temperatura admisible debida a la disipación por el paso de la corriente y el espesor de cobre de la placa.

Para realizar el cálculo se tomaron en cuenta los gráficos publicados en el IPC2152 “Standard for Determining Current Carry Capacity in Printed Board Design” en 2009. La figura 70 consta de 3 entradas, las curvas corresponden a incrementos de temperatura desde 10°C a 100°C. En el eje de las ordenadas se grafica la corriente máxima en Amperios y en el de abscisas la sección de la pista en milésimas de pulgada cuadrada. La figura 71 consta de 3 entradas, las curvas corresponden al espesor del cobre, siendo los valores típicos de fabricación desde 0.5 hasta 3 Oz/Ft² en el eje de las abscisas, la sección de la pista en milésimas de pulgada cuadrada y en el eje de las ordenadas el ancho de pista en pulgadas.

I máx: 3 A ΔV : 10°C Espesor: 1 Oz/Ft².

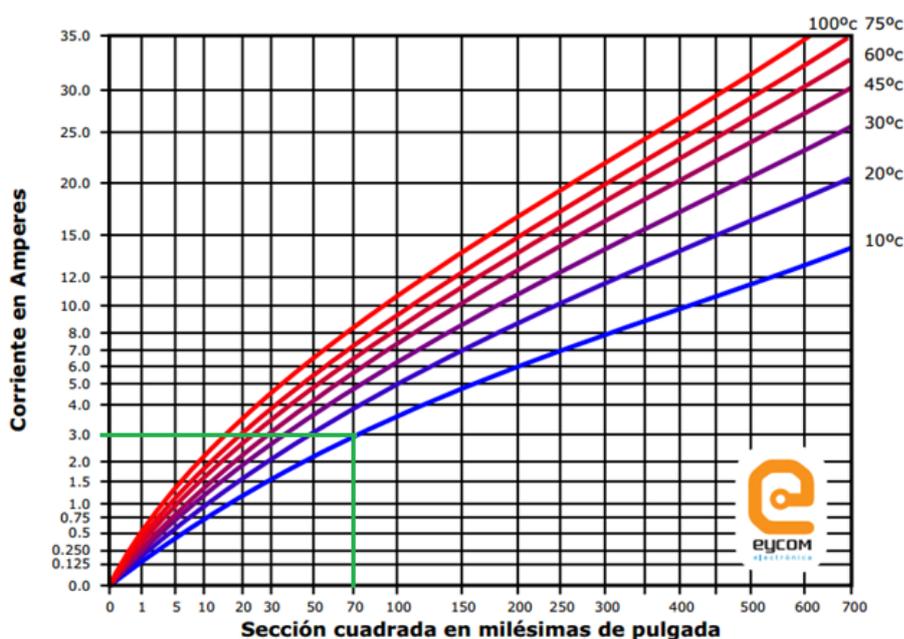


Figura 70 Selección de ancho de pista 1.

Fuente: (IPC 2221, 2009)

En la figura 70 se puede observar que la sección cuadrada es de 70 milésimas de pulgada, según los datos de entrada.

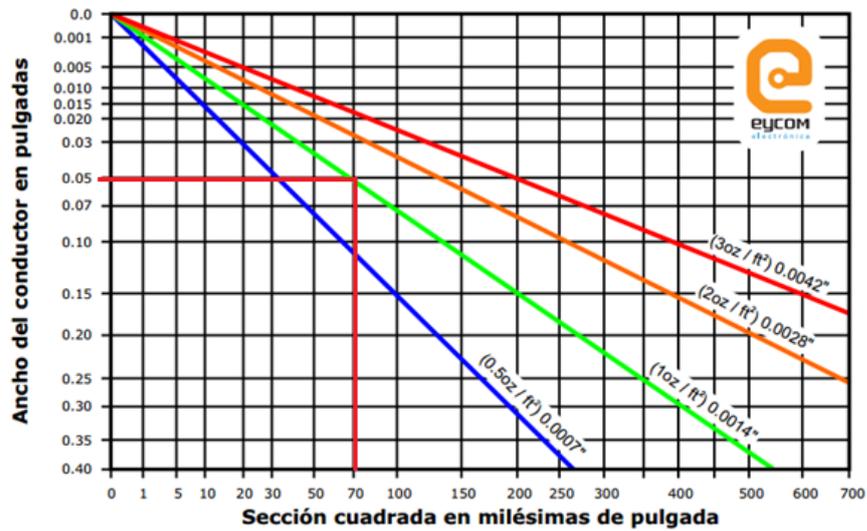


Figura 71 Selección de ancho de pista 2.

Fuente: (IPC 2221, 2009)

De la figura 71 se puede observar que el ancho del conductor es de 50 milésimas de pulgada.

- *Diseño de las placas en software de diseño de placas PCB*

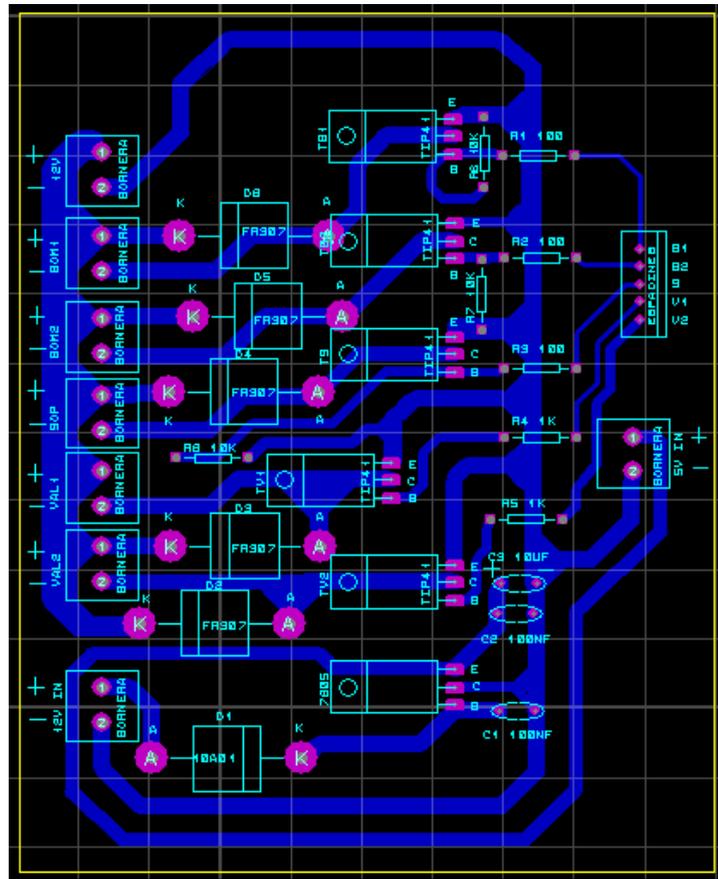


Figura 72 Placa Circuito de potencia.

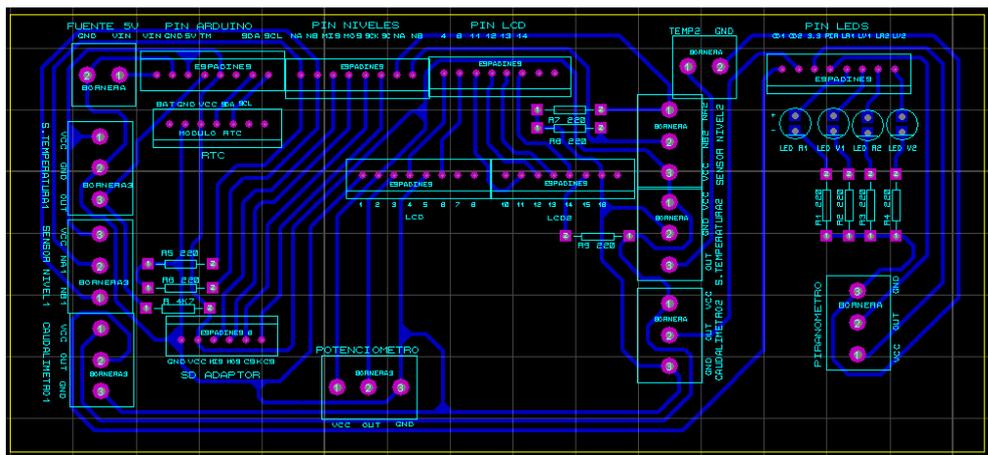


Figura 73 Placa Circuito de control.

3.4.4 Diseño del controlador

El controlador es un Arduino Mega, que es el responsable de recibir todas las variables físicas recibidas desde los sensores, tomar decisiones de control que se envían hacia los actuadores y almacenar variables de importancia para realizar un constante monitoreo. El algoritmo de programación se realizó en software libre Arduino y se basa en los diagramas de flujo que se muestran a continuación.

- Diagrama de Flujo del programa de control de nivel para llenado de tanques

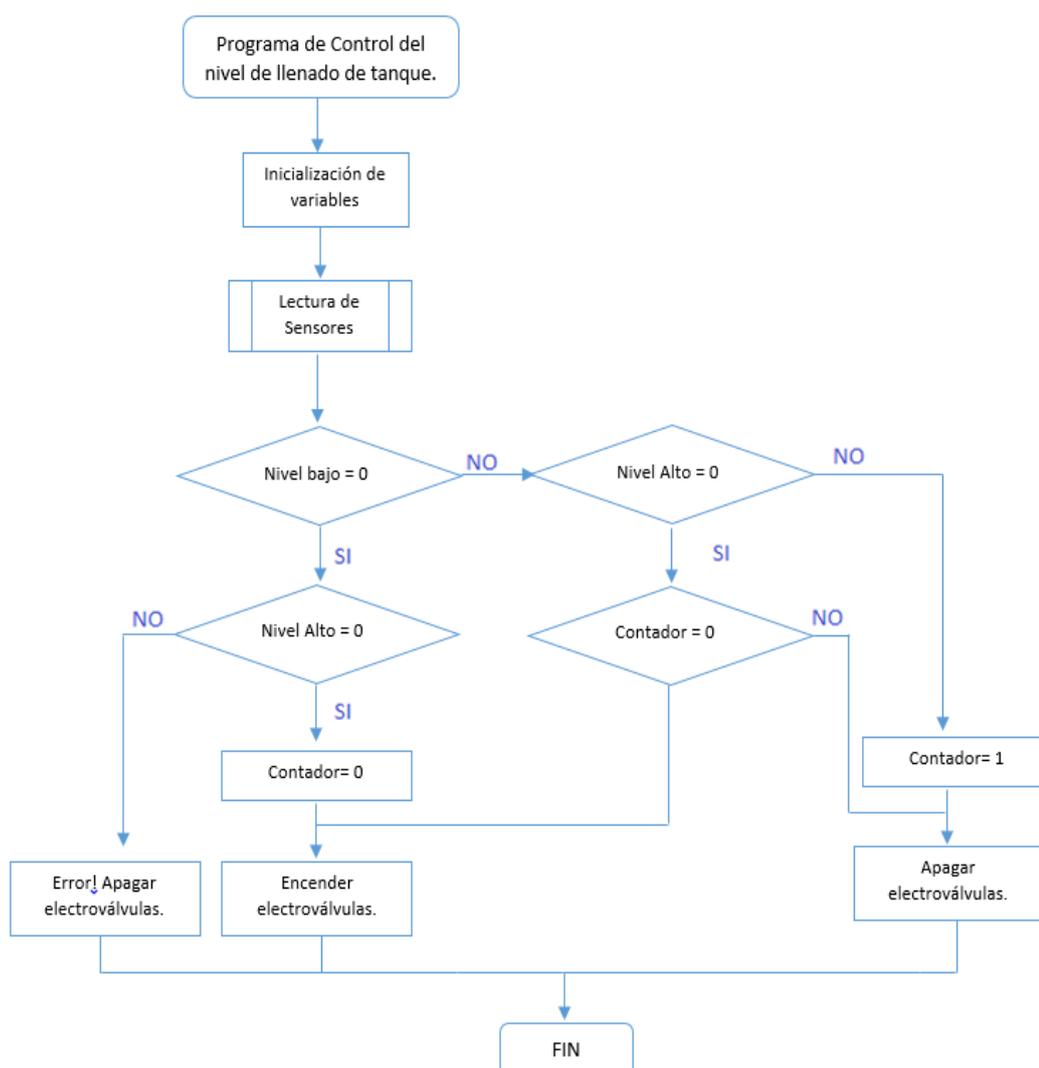


Figura 74 Diagrama de flujo para el llenado de tanques.

- Diagrama de flujo del programa de control

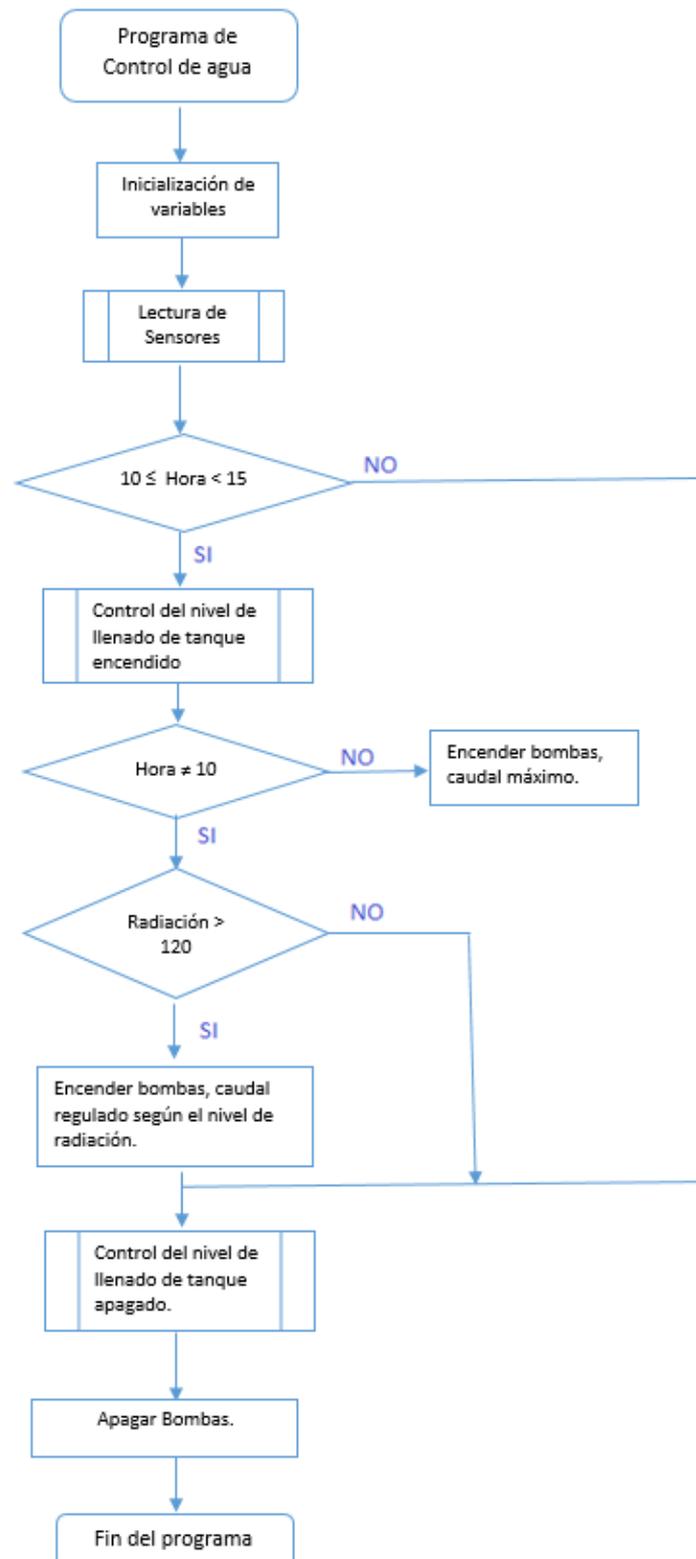


Figura 75 Diagrama de flujo de control de bombas

- Diagrama de flujo control del soplador

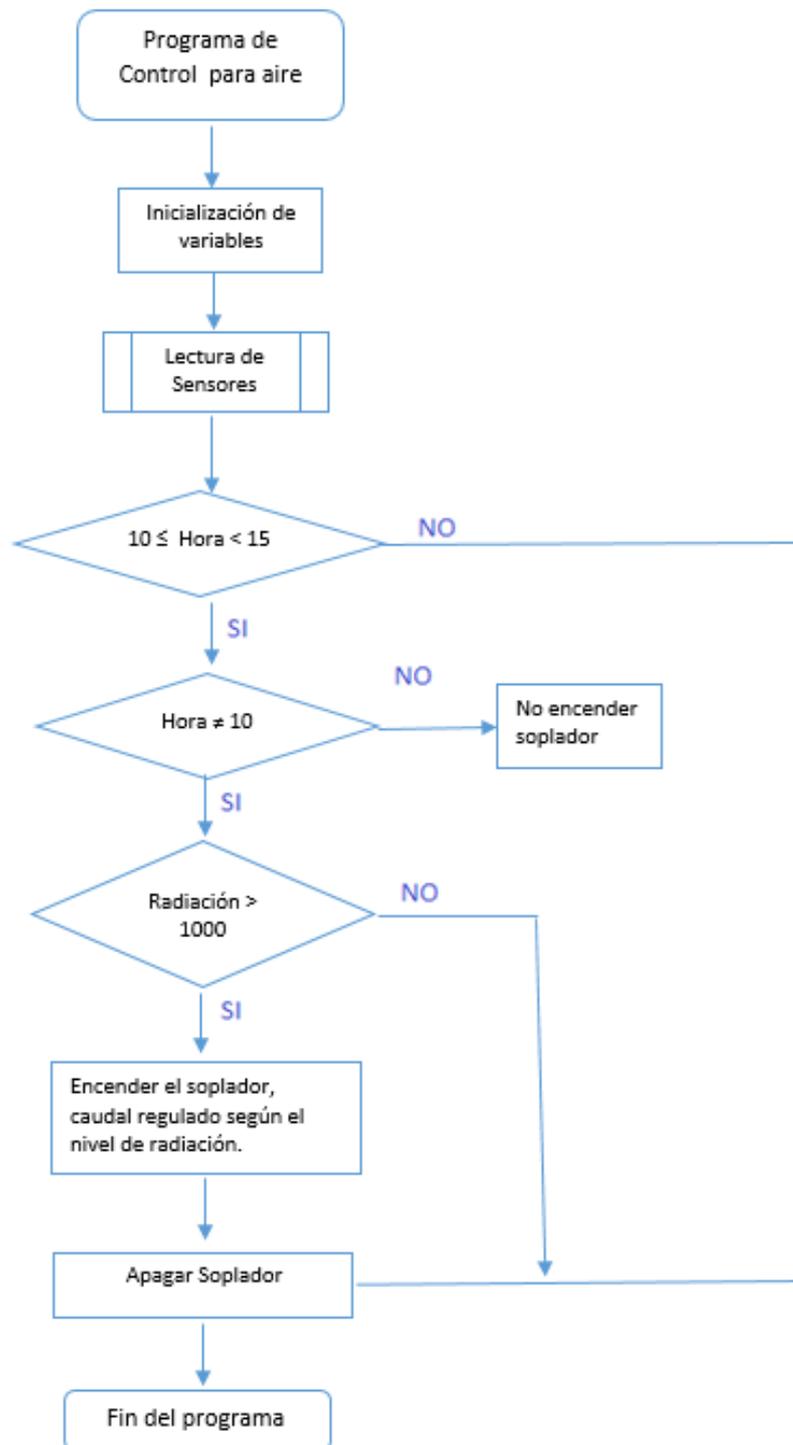


Figura 76 Diagrama de flujo de control del soplador

- Diagrama de Flujo para visualización de variables

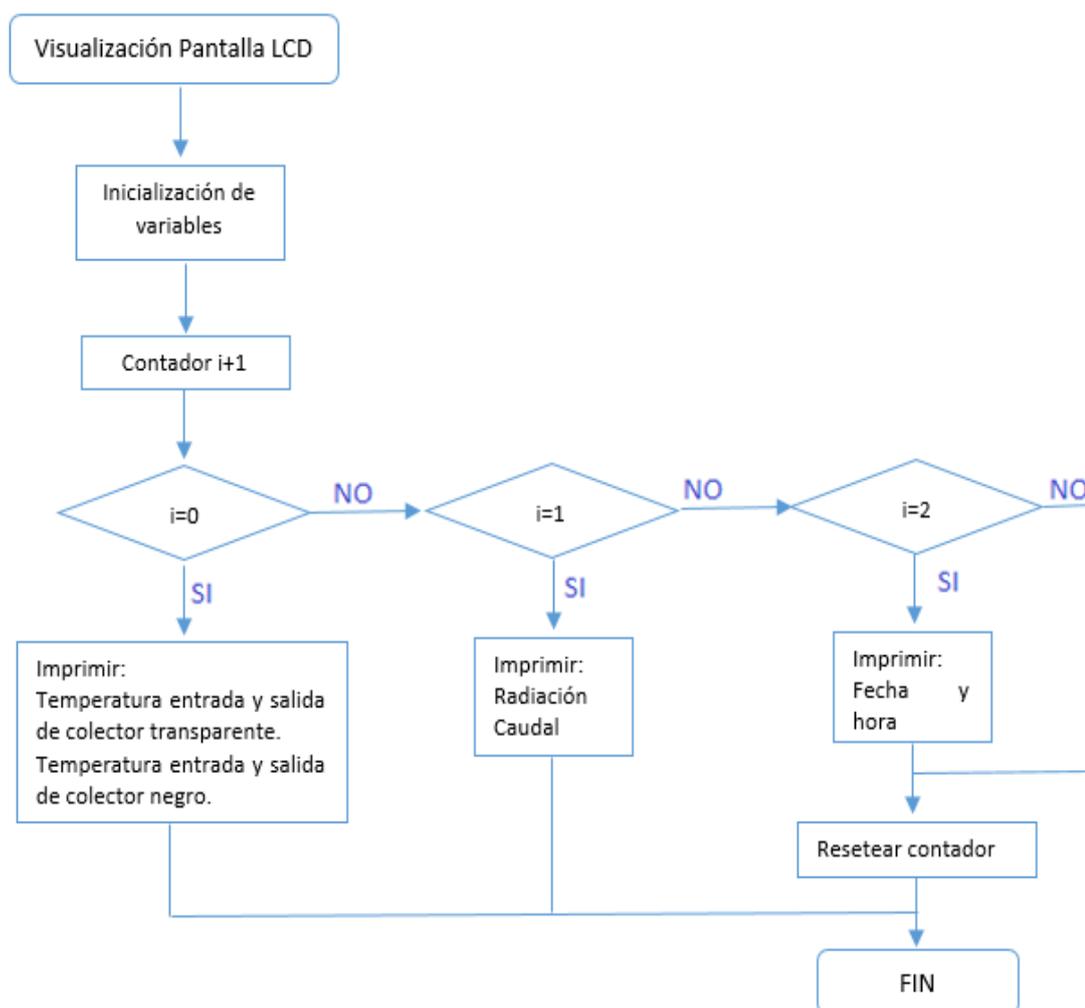


Figura 77 Diagrama de flujo para visualización de variables

- Diagrama de flujo para almacenamiento de datos

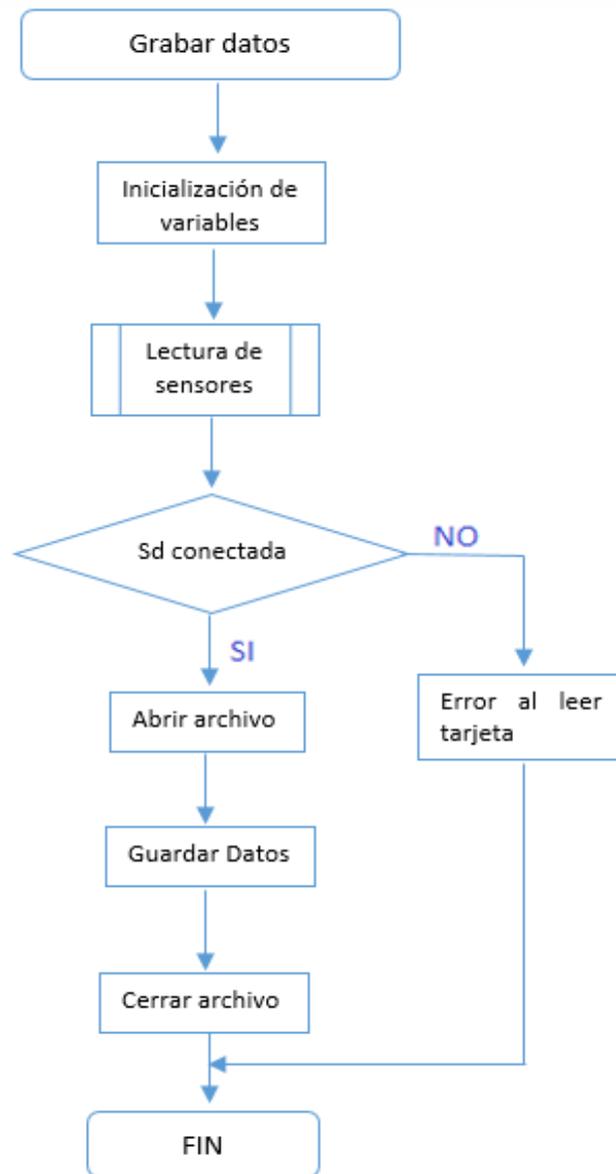


Figura 78 Diagrama de flujo para almacenamiento de datos

3.5 Balance de energía en el colector solar de policarbonato

El balance de energías permite determinar el calor útil transmitido hacia el fluido para hallar la eficiencia del colector solar. El balance de energías establece que el calor útil que recoge el fluido, es igual a la diferencia entre el calor absorbido por el colector y el calor disipado al ambiente.

$$Q_u = Q_{Abs} - Q_P \quad (25)$$

Donde:

Q_U : Calor útil.

Q_{Abs} : Calor Absorbido.

Q_P : Calor perdido al ambiente.

El calor absorbido por el colector solar está dado por el producto de la radiación incidente, por el área del colector, definiéndose el calor útil (Q_u) con la ecuación de BLISS-HOTEL-WHILLER de la siguiente manera:

$$Q_U = A_C * F_R [I_T * (\tau\alpha) * k - U_L(T_m - T_a)] \quad (26)$$

Donde:

A_C = Área del colector en m^2 .

F_R = Factor de eficiencia del colector solar.

I_T = Irradiancia solar para cielo isótropo, en w/m^2 .

α = coeficiente de absorción del policarbonato.

τ = Transmitancia de la cubierta transparente.

k = Factor de suciedad y sombra.

U_L = Coeficiente global de pérdidas, en $w/m^2 \text{ } ^\circ C$.

T_m = Temperatura media del fluido, en °C.

T_a = Temperatura ambiente, en °C.

Cálculo del coeficiente global de pérdidas

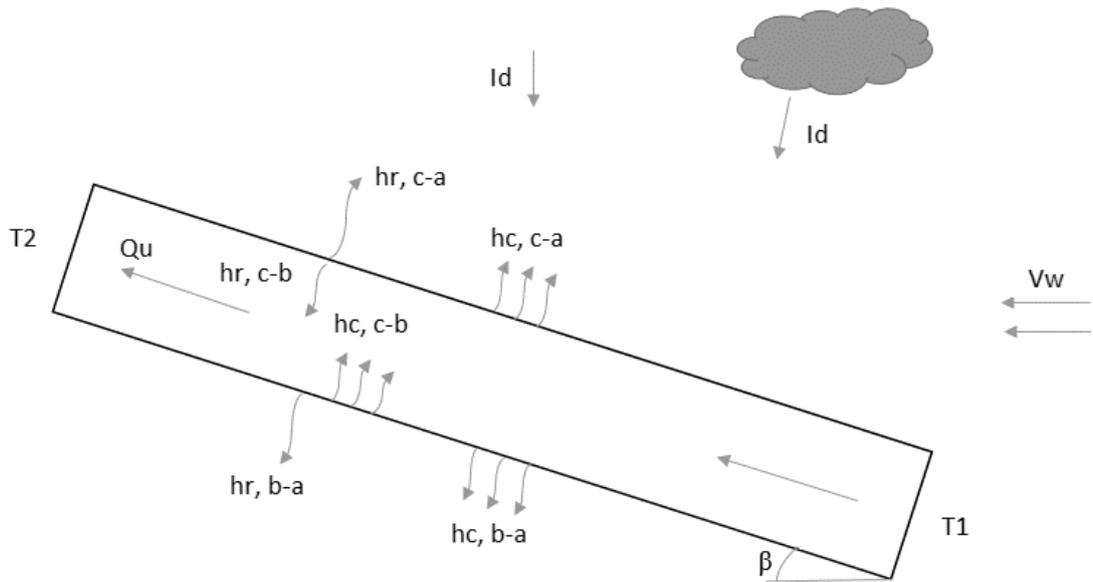


Figura 79 Esquema térmico del colector solar.

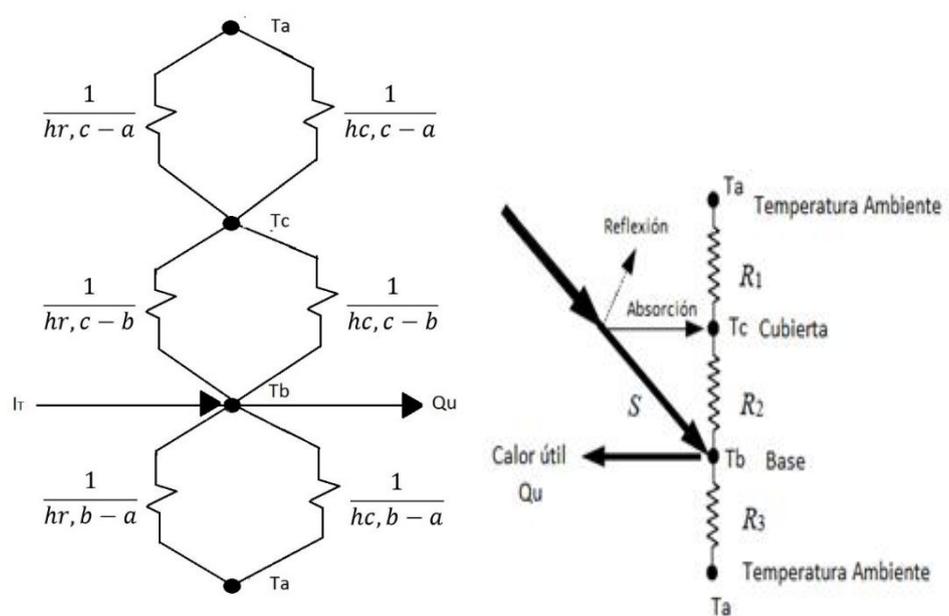


Figura 80 Esquema eléctrico equivalente del colector (Guevara, 2007).

El coeficiente global de pérdidas del colector está dado por la siguiente relación:

$$U_L = U_t + U_b \quad (27)$$

Donde:

U_t = coeficiente global de pérdida por la parte superior.

U_b = coeficiente global de pérdida por la parte inferior.

Coeficiente global de pérdida por la parte superior: El calor se transfiere entre la cubierta y la base por convección y radiación en forma paralela, también ocurre disipación de calor por parte de la cubierta hacia el ambiente.

$$U_t = \frac{1}{R1 + R2} \quad (28)$$

Coeficiente global de pérdida por la parte inferior: R2 está dado por el coeficiente de convección y radiación de transferencia de calor entre la base y el ambiente.

$$U_b = \frac{1}{R3} \quad (29)$$

Las resistencias térmicas son las siguientes:

$$R1 = \frac{1}{h_{r,s-a} + h_{c,s-a}} \quad (30)$$

Donde:

$h_{r,s-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie y el ambiente

$h_{c,s-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y el ambiente.

$$R2 = \frac{1}{h_{r,s-b} + h_{c,s-b}} \quad (31)$$

Donde:

$h_{r,s-b}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie y la base.

$h_{c,s-b}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y la base.

$$R3 = \frac{1}{h_{r,b-a} + h_{c,b-a}} \quad (32)$$

Donde:

$h_{r,b-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente.

$h_{c,b-a}$ = Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente.

Cálculo de coeficientes de transferencia de calor

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie y el ambiente:

$$h_{r,s-a} = 4\sigma T_{m,s-a}^3 \varepsilon_s \quad (33)$$

Donde:

σ = Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$).

$T_{m,s-a}$ = Temperatura media entre la superficie y el ambiente, en °K.

ε_s = Emisividad del material de la superficie.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y el ambiente:

$$h_{c,s-a} = 2,8 + 3V_w \quad (34)$$

Donde:

V_w = Velocidad del viento en m/s.

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la superficie y la base:

$$h_{r,s-b} = \frac{4\sigma T_{m,s-b}^3}{\frac{1}{\varepsilon_s} + \frac{1}{\varepsilon_b} - 1} \quad (35)$$

Donde:

$T_{m,s-b}$ = Temperatura media entre la superficie y la base, en K.

ε_b = Emisividad del material de la base.

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la superficie y la base:

$$h_{c,s-b} = \frac{Nu * k}{DH} \quad (36)$$

Donde:

Nu = Número de Nusselt.

k = Conductividad térmica del fluido caloportador.

DH = Diámetro hidráulico del colector, en m.

- El número de Nusselt está dado por la ecuación de Hollands:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cdot \cos\beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos\beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cdot \cos\beta}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \quad (37)$$

Donde:

Ra : Número de Rayleigh.

β = Ángulo de inclinación del colector, en radianes.

En esta ecuación, los términos entre paréntesis que contienen el signo positivo indican que si los valores internos son negativos, entonces se toman como cero.

- Número de Rayleigh

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_b)L_{s-b}^3}{\nu * \alpha} \quad (38)$$

Donde:

g = aceleración de la gravedad (9,81 m/s²).

β = coeficiente de expansión volumétrica del fluido, en K⁻¹.

L_{s-b} = Distancia entre las placas, en m.

ν = Viscosidad cinemática del fluido a una temperatura de referencia, en m²/s.

α = Difusividad térmica del fluido, en m²/s.

$$\beta_{agua} = \frac{\rho_{T_{\infty}} \left(\frac{1}{\rho_{T_{ref}}} - \frac{1}{\rho_{T_{\infty}}} \right)}{T_{ref} - T_{\infty}} \quad (39)$$

Donde:

T_{ref} = Temperatura de referencia, en K.

T_{∞} = Temperatura media volumétrica, en K.

$\rho_{T_{\infty}}$ = Densidad de agua a temperatura media volumétrica, en kg/m³.

$\rho_{T_{ref}}$ = Densidad de agua a temperatura de referencia, en kg/m³.

$$\beta_{aire} = \frac{1}{T_{ref}} \quad (40)$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente:

$$h_{r,b-a} = 4\sigma T_{m,b-a}^3 \varepsilon_b \quad (41)$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente:

$$h_{r,b-a} = 2,8 + 3V_w \quad (42)$$

- Temperatura media cubierta-ambiente

$$T_{m,c-a} = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (43)$$

Donde:

T_s =Temperatura de la superficie, en K.

T_a =Temperatura del ambiente., en K.

- Temperatura media cubierta-base

$$T_{m,c-b} = \frac{T_s + T_b}{2} \quad (44)$$

Donde:

T_b =Temperatura de la base, en K.

- Temperatura de referencia

$$T_{ref} = T_s + 0,38(T_\infty - T_s) \quad (45)$$

Donde:

T_∞ =Temperatura media volumétrica, en °F.

T_s = en °F.

- Temperatura media volumétrica del fluido.

$$T_{\infty} = \frac{T_1 + T_2}{2} \quad (46)$$

Donde:

T_1 =Temperatura de entrada del fluido, en K.

T_2 =Temperatura de salida del fluido, en K.

Para realizar los cálculos del colector solar es necesario conocer las propiedades ópticas del policarbonato alveolar de color bronce de 8mm y de la pintura negra mate (ver tabla 45). Para los cálculos demostrativos se tomó los promedios de los datos del día 2 de noviembre de 2015 (ver tabla 46).

Tabla 45
Propiedades ópticas del policarbonato alveolar de 8mm color bronce y pintura negra mate. (Danpalon, 2015).

Propiedad	Policarbonato	Pintura negra mate
Transmitancia	37,12%	-
Reflectancia	4,72%	4%
Absortancia	58,24%	96%
Emisividad	73%	96%

Tabla 46
Promedio de los datos obtenidos del sistema en funcionamiento.

Día	2 de noviembre de 2015
Irradiancia a 20°	850,97 W/ m ²
Velocidad de Viento	1,59 m/s
Temperatura Ambiente	25,28 °C
Temperatura Entrada Policarbonato pintado Negro mate	33,36 °C
Temperatura Salida Policarbonato pintado Negro mate	35,22 °C
Temperatura Base Promedio Policarbonato pintado Negro mate	36,46 °C
Temperatura Superficie Promedio Policarbonato pintado Negro mate	37,66 °C
Temperatura Entrada Policarbonato Bronce	31,35 °C
Temperatura Salida Policarbonato Bronce	32,98 °C
Temperatura Base Promedio Policarbonato Bronce	32,54 °C
Temperatura Cubierta Promedio Policarbonato Bronce	33,74 °C
Caudal	273,78 L/H

Cálculo de coeficientes de transferencia de calor para policarbonato pintado negro mate para calentamiento de agua.

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el ambiente (ecuación 33):

A partir de la ecuación 43 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y el ambiente:

$$T_{m,c-a} = \frac{(37,66 + 273) + (25,28 + 273)}{2} = 304,47 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$h_{r,c-a} = 4 * (5,67 * 10^{-8}) * (304,47)^3 * 0,96 = 6,15 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente (ecuación 34):

$$h_{c,c-a} = 2,8 + 3 * 1,59 = 7,56 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y la base (ecuación 35):

A partir de la ecuación 44 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y la base:

$$T_{m,c-b} = \frac{(37,66 + 273) + (36,46 + 273)}{2} = 310,06 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,c-b} = \frac{4 * (5,67 * 10^{-8}) * (310,06)^3}{\frac{1}{0,96} + \frac{1}{0,96} - 1} = 6,24 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y la base (ecuación 36):

A partir de la ecuación 46 se procedió a calcular la temperatura media volumétrica del agua:

$$T_{\infty} = \frac{(33,36 + 273) + (35,22 + 273)}{2} = 307,29 \text{ } ^\circ K$$

A partir de la ecuación 45 se procedió a calcular la temperatura de referencia:

$$T_{ref} = ((37,66 * 1,8) + 32) + 0,38 \left((((307,29 - 273) * 1,8) + 32) - ((37,66 * 1,8) + 32) \right)$$

$$T_{ref} = 97,49 \text{ } ^\circ F$$

Tabla 47
Propiedades físicas del agua a diferentes temperaturas (Miliarium, 2013).

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGUA							
Temperatura (°C)	Peso específico (kN/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Módulo de elasticidad (kN/m ²)	Viscosidad dinámica (N·s/m ²)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Tensión superficial (N/m)	Presión de vapor (kN/m ²)
0	9,805	999,8	1,98 · 10 ⁶	1,781 · 10 ⁻³	1,785 · 10 ⁻⁶	0,0765	0,61
5	9,807	1000,0	2,05 · 10 ⁶	1,518 · 10 ⁻³	1,519 · 10 ⁻⁶	0,0749	0,87
10	9,804	999,7	2,10 · 10 ⁶	1,307 · 10 ⁻³	1,306 · 10 ⁻⁶	0,0742	1,23
15	9,798	999,1	2,15 · 10 ⁶	1,139 · 10 ⁻³	1,139 · 10 ⁻⁶	0,0735	1,70
20	9,789	998,2	2,17 · 10 ⁶	1,102 · 10 ⁻³	1,003 · 10 ⁻⁶	0,0728	2,34
25	9,777	997,0	2,22 · 10 ⁶	0,890 · 10 ⁻³	0,893 · 10 ⁻⁶	0,0720	3,17
30	9,764	995,7	2,25 · 10 ⁶	0,708 · 10 ⁻³	0,800 · 10 ⁻⁶	0,0712	4,24
40	9,730	992,2	2,28 · 10 ⁶	0,653 · 10 ⁻³	0,658 · 10 ⁻⁶	0,0696	7,38
50	9,689	988,0	2,29 · 10 ⁶	0,547 · 10 ⁻³	0,553 · 10 ⁻⁶	0,0679	12,33
60	9,642	983,2	2,28 · 10 ⁶	0,466 · 10 ⁻³	0,474 · 10 ⁻⁶	0,0662	19,92
70	9,589	977,8	2,25 · 10 ⁶	0,404 · 10 ⁻³	0,413 · 10 ⁻⁶	0,0644	31,16
80	9,530	971,8	2,20 · 10 ⁶	0,354 · 10 ⁻³	0,364 · 10 ⁻⁶	0,0626	47,34
90	9,466	965,3	2,14 · 10 ⁶	0,315 · 10 ⁻³	0,326 · 10 ⁻⁶	0,0608	70,10
100	9,399	958,4	2,07 · 10 ⁶	0,282 · 10 ⁻³	0,294 · 10 ⁻⁶	0,0589	101,33

Tabla 48
Densidad del agua a diferentes temperaturas (Fullquímica, 2012).

Temperatura °C	Densidad kg / m ³	Temperatura °C	Densidad kg / m ³	Temperatura °C	Densidad kg / m ³
0 (hielo)	917,00	33	994,76	67	979,34
0	999,82	34	994,43	68	978,78
1	999,89	35	994,08	69	978,21
2	999,94	36	993,73	70	977,63
3	999,98	37	993,37	71	977,05
4	1000,00	38	993,00	72	976,47
5	1000,00	39	992,63	73	975,88
6	999,99	40	992,25	74	975,28
7	999,96	41	991,86	75	974,68
8	999,91	42	991,46	76	974,08
9	999,85	43	991,05	77	973,46
10	999,77	44	990,64	78	972,85
11	999,68	45	990,22	79	972,23
12	999,58	46	989,80	80	971,60
13	999,46	47	989,36	81	970,97
14	999,33	48	988,92	82	970,33
15	999,19	49	988,47	83	969,69
16	999,03	50	988,02	84	969,04
17	998,86	51	987,56	85	968,39
18	998,68	52	987,09	86	967,73
19	998,49	53	986,62	87	967,07
20	998,29	54	986,14	88	966,41
21	998,08	55	985,65	89	965,74
22	997,86	56	985,16	90	965,06
23	997,62	57	984,66	91	964,38
24	997,38	58	984,16	92	963,70
25	997,13	59	983,64	93	963,01
26	996,86	60	983,13	94	962,31
27	996,59	61	982,60	95	961,62
28	996,31	62	982,07	96	960,91
29	996,02	63	981,54	97	960,20
30	995,71	64	981,00	98	959,49
31	995,41	65	980,45	99	958,78
32	995,09	66	979,90	100	958,05

Tabla 49
Tabla de propiedades de materiales (Miliarium, 2012).

PROPIEDADES TÉRMICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN Y AISLANTES				
Material	Densidad (kg/m ³)	Calor específico (J/(kg·K))	Conductividad térmica (W/(m·K))	Difusividad térmica (m ² /s) (x10 ⁻⁶)
Acero	7850	460	47-58	13,01-16,06
Agua	1000	4186	0,58	0,139
Aire	1,2	1000	0,026	21,67
Alpaca	8,72	398	29,1	8384,8
Aluminio	2700	909	209-232	85,16-94,53

Por lo tanto la viscosidad cinemática del agua a la temperatura de referencia es de $0,7148 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] (ver Tabla 47). La densidad de agua a temperatura media volumétrica es de 994,43 [kg/m³] (ver Tabla 48). La densidad del agua a temperatura de referencia es de 993,71 [kg/m³] (ver Tabla 48). La difusividad térmica del agua es de $0,139 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] y la conductividad térmica de 0,58 (W/mK) (ver tabla 49).

A partir de la ecuación 39 se procedió a calcular el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = \frac{994,43 \left(\frac{1}{993,71} - \frac{1}{994,43} \right)}{309,38 - 307,29} = 3,44 \cdot 10^{-4} K^{-1}$$

A partir de la ecuación 38 se procedió a calcular el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 3,44 \cdot 10^{-4} (310,66 - 309,46) \cdot (0,008)^3}{(0,7148 \cdot 10^{-6}) \cdot (0,139 \cdot 10^{-6})} = 20872,468$$

A partir de la ecuación 37 se calculó el número de Nusselt:

$$\begin{aligned} Nu &= 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8(20))^{1,6}}{(20872,468) \cdot \cos(20)} \right] \left[1 - \frac{1708}{(20872,468) \cdot \cos(20)} \right]^+ \\ &\quad + \left[\left(\frac{(20872,468) \cdot \cos(20)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \\ &= 1 + [1,44 \cdot (0,963) \cdot (+0,913)] + (+0,498) = 2,764 \end{aligned}$$

$$h_{c,c-b} = \frac{Nu * k_{agua}}{DH} = \frac{2,764 * 0,63}{0,008 * 89} = 2,25 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente (ecuación 41):

$$T_{m,b-a} = \frac{(36,46 + 273) + (25,28 + 273)}{2} = 303,87 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,b-a} = 4 * (5,67 * 10^{-8}) * (303,87)^3 * 0,96 = 6,11 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente (ecuación 42):

$$h_{c,b-a} = 2,8 + 3 * 1,59 = 7,56 \frac{W}{m^2K}$$

Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor para policarbonato pintado negro mate para calentamiento de agua.

$$R1 = \frac{1}{6,15 + 7,56} = 0,073$$

$$R2 = \frac{1}{6,24 + 2,25} = 0,118$$

$$R3 = \frac{1}{6,11 + 7,56} = 0,073$$

$$U_t = \frac{1}{0,073 + 0,118} = 5,24 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_b = \frac{1}{0,073} = 13,67 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_L = 5,24 + 13,67 = 18,91 \frac{W}{m^2K}$$

Tabla 50
Parámetros característicos de los distintos tipos de colectores solares.
(CENSOLAR, 2013).

Tipo de Colector	Factor de Conversión (η_0)	Factor de Pérdidas Térmicas $U_L(W/m^2 \text{ } ^\circ C)$	Rango de Temperatura ($^\circ C$)
Sin Cubierta	0.9	15-25	10 - 40
Cubierta Simple	0.8	7	10 - 60
Cubierta Doble	0.65	5	10 - 80
Superficie Selectiva	0.8	5	10 - 80
Tubos de Vacío	0.7	2	10 -130

Cálculo del calor útil para policarbonato pintado negro mate para calentamiento de agua.

$F_R \tau \alpha$ Se consideró un valor entre 0,85 – 0,9 para colectores sin cubierta.

El sistema no tiene cubierta por lo tanto la transmitancia es 1.

$$F_R = \frac{0,9}{\tau \alpha} = \frac{0,9}{1 * 0,96} = 0,9375$$

$$Q_U = 2 * [850,97 * (0,9) * 0,9 - 0,9375 * 18,91 * (9,01)] = 1059,25 [W]$$

Cálculo del rendimiento del colector solar con policarbonato pintado negro mate para calentamiento de agua.

$$n = \frac{Q_U}{A_c * I} = \frac{1059,25}{2 * 850,97} = 0,62 = 62\%$$

Cálculo de coeficientes de transferencia de calor para policarbonato bronce para calentamiento de agua.

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el ambiente (ecuación 33):

A partir de la ecuación 43 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y el ambiente:

$$T_{m,c-a} = \frac{(33,74 + 273) + (25,28 + 273)}{2} = 302,51 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,c-a} = 4 * (5,67 * 10^{-8}) * (302,51)^3 * 0,73 = 4,58 \frac{W}{m^2 K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente (ecuación 34):

$$h_{c,c-a} = 2,8 + 3 * 1,59 = 7,56 \frac{W}{m^2 K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y la base (ecuación 35):

A partir de la ecuación 44 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y la base:

$$T_{m,c-b} = \frac{(33,74 + 273) + (32,54 + 273)}{2} = 306,14 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,c-b} = \frac{4 * (5,67 * 10^{-8}) * (306,14)^3}{\frac{1}{0,73} + \frac{1}{0,73} - 1} = 3,74 \frac{W}{m^2 K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y la base (ecuación 36):

A partir de la ecuación 46 se procedió a calcular la temperatura media volumétrica del agua:

$$T_{\infty} = \frac{(31,35 + 273) + (32,98 + 273)}{2} = 305,17 \text{ } ^\circ K$$

A partir de la ecuación 45 se procedió a calcular la temperatura de referencia:

$$T_{ref} = ((33,74 * 1,8) + 32) + 0,38 \left((((305,17 - 273) * 1,8) + 32) - ((33,74 * 1,8) + 32) \right)$$

$$T_{ref} = 91,65 \text{ } ^\circ F$$

La viscosidad cinemática del agua a la temperatura de referencia es de $0,757 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] (ver Tabla 47). La densidad de agua a temperatura media volumétrica es de 995,11 [kg/m³] (ver tabla 48). La densidad del agua a temperatura de referencia es de 994,8 [kg/m³] (ver Tabla 48). La difusividad térmica es de $0,139 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] y la conductividad térmica es de 0,58 [W/mK] (ver Tabla 49).

A partir de la ecuación 39 se procedió a calcular el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = \frac{995,11 \left(\frac{1}{994,8} - \frac{1}{995,11} \right)}{306,14 - 305,17} = 3,187 \cdot 10^{-4} K^{-1}$$

A partir de la ecuación 38 se procedió a calcular el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 3,19 \cdot 10^{-4} (310,66 - 309,46) \cdot (0,008)^3}{(0,757 \cdot 10^{-6}) \cdot (0,139 \cdot 10^{-6})} = 18226,894$$

A partir de la ecuación 37 se procedió a calcular el número de Nusselt:

$$\begin{aligned} Nu &= 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8(20))^{1,6}}{(18226,894) \cdot \cos(20)} \right] \left[1 - \frac{1708}{(18226,894) \cdot \cos(20)} \right]^+ \\ &\quad + \left[\left(\frac{(18226,894) \cdot \cos(20)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \\ &= 1 + [1,44 \cdot (0,957) \cdot (+0,9)] + (+0,432) = 2,673 \end{aligned}$$

$$h_{c,c-b} = \frac{Nu \cdot k_{agua}}{DH} = \frac{2,673 \cdot 0,63}{0,008 \cdot 89} = 2,178 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente (ecuación 41):

$$T_{m,b-a} = \frac{(32,54 + 273) + (25,28 + 273)}{2} = 301,91 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,b-a} = 4 \cdot (5,67 \cdot 10^{-8}) \cdot (301,91)^3 \cdot 0,73 = 4,56 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente (ecuación 42):

$$h_{c,b-a} = 2,8 + 3 * 1,59 = 7,56 \frac{W}{m^2 \circ K}$$

Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor para policarbonato bronce para calentamiento de agua.

$$R1 = \frac{1}{4,58 + 7,56} = 0,082$$

$$R2 = \frac{1}{3,74 + 2,18} = 0,169$$

$$R3 = \frac{1}{4,56 + 7,56} = 0,083$$

$$U_t = \frac{1}{0,082 + 0,169} = 3,98 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_b = \frac{1}{0,083} = 12,11 \frac{W}{m^2 K}$$

$$U_L = 3,98 + 12,11 = 16,09 \frac{W}{m^2 K}$$

Cálculo del calor útil para policarbonato bronce para calentamiento de agua.

$F_R \tau \alpha$ Se consideró un valor entre 0,85 – 0,9 para colectores sin cubierta

El sistema no tiene cubierta por lo tanto la transmitancia es 1.

$$F_R = \frac{0,85}{\tau \alpha} = \frac{0,85}{1 * 0,58} = 1,459$$

$$Q_U = 2 * [850,97 * (0,85) * 0,9 - 1,459 * 16,09 * (6,89)] = 978,78 [W]$$

Cálculo del rendimiento del colector solar con policarbonato bronce para calentamiento de agua.

$$n = \frac{Q_U}{A_c * I} = \frac{978,78}{2 * 850,97} = 0,58 = \mathbf{58\%}$$

Cálculo de coeficientes de transferencia de calor para policarbonato bronce para calefacción de aire.

Tabla 51
Promedio de los datos obtenidos del sistema en funcionamiento.

Día	5 de noviembre de 2015
Irradiancia a 20°	1118,32 W/ m ²
Velocidad de Viento	1,64 m/s
Temperatura Ambiente	23,71 °C
Temperatura Entrada Policarbonato Bronce	21,04 °C
Temperatura Salida Policarbonato Bronce	36,17 °C
Temperatura Base Promedio Policarbonato Bronce	35,68 °C
Temperatura Cubierta Promedio Policarbonato	36,90 °C
Bronce	
Caudal	250,03 L/H

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y el ambiente (ecuación 33):

A partir de la ecuación 43 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y el ambiente:

$$T_{m,c-a} = \frac{(36,9 + 273) + (23,71 + 273)}{2} = \mathbf{303,31 \text{ } ^\circ K}$$

$$h_{r,c-a} = 4 * (5,67 * 10^{-8}) * (303,31)^3 * 0,73 = \mathbf{4,62 \frac{W}{m^2 K}}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y el ambiente (Ec 3.33):

$$h_{c,c-a} = 2,8 + 3 * 1,64 = 7,72 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la cubierta y la base (ecuación 35):

A partir de la ecuación 44 se procedió a calcular la temperatura media entre la cubierta y la base:

$$T_{m,s-b} = \frac{(36,9 + 273) + (35,68 + 273)}{2} = 309,29 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,c-b} = \frac{4 * (5,67 * 10^{-8}) * (309,29)^3}{\frac{1}{0,73} + \frac{1}{0,73} - 1} = 3,8 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la cubierta y la base (ecuación 36):

A partir de la ecuación 46 se procedió a calcular la temperatura media volumétrica del agua:

$$T_{\infty} = \frac{(21,04 + 273) + (36,17 + 273)}{2} = 301,61 \text{ } ^\circ K$$

A partir de la ecuación 45 se procedió a calcular la temperatura de referencia:

$$T_{ref} = 92,75 \text{ } ^\circ F$$

Tabla 52
Propiedades físicas del aire a diferentes temperaturas (DULHOSTE, 2013).

Unidades SI				
Temperatura (°C)	Densidad ρ (kg/m ³)	Viscosidad μ (N - s/m ²)	Viscosidad cinemática ν (m ² /s)	Velocidad del sonido c (m/s)
-50	1.582	1.46 x 10 ⁻⁵	0.921 x 10 ⁻⁵	299
-30	1.452	1.56	1.08 x 10 ⁻⁵	312
-20	1.394	1.61	1.16	319
-10	1.342	1.67	1.24	325
0	1.292	1.72	1.33	331
10	1.247	1.76	1.42	337
20	1.204	1.81	1.51	343
30	1.164	1.86	1.60	349
40	1.127	1.91	1.69	355
50	1.092	1.95	1.79	360
60	1.060	2.00	1.89	366
70	1.030	2.05	1.99	371

La viscosidad cinemática del aire a la temperatura de referencia es de $1,627 \cdot 10^{-5}$ [m²/s (ver tabla 52)]. La difusividad térmica es $21,67 \cdot 10^{-6}$ [m²/s] y la conductividad térmica es de 0,026 [W/mK] (ver Tabla 49).

A partir de la ecuación 40 se procedió a calcular el coeficiente de expansión volumétrica:

$$\beta = \frac{1}{307,04} = 3,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

A partir de la ecuación 38 se procedió a calcular el número de Rayleigh:

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 3,26 \cdot 10^{-3} (309,9 - 308,68) \cdot (0,008)^3}{(1,627 \cdot 10^{-5}) \cdot (21,67 \cdot 10^{-6})} = 56,7$$

A partir de la ecuación 37 se procedió a calcular el número de Nusselt:

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708(\text{sen}1,8(20))^{1,6}}{(56,7) \cdot \cos(20)} \right] \left[1 - \frac{1708}{(56,7) \cdot \cos(20)} \right]^+ \\ + \left[\left(\frac{(56,7) \cdot \cos(20)}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right]^+ \\ = 1 + [1,44 \cdot -12,66 \cdot (-30,913)] + (-0,798) = 1$$

$$h_{c,c-b} = \frac{Nu * k_{agua}}{DH} = \frac{1 * 0,63}{0,008 * 89} = 0,8146 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por radiación entre la base y el ambiente (ecuación 41):

$$T_{m,b-a} = \frac{(35,68 + 273) + (23,71 + 273)}{2} = 302,69 \text{ } ^\circ K$$

$$h_{r,b-a} = 4 * (5,67 * 10^{-8}) * (302,69)^3 * 0,73 = 4,59 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente (ecuación 42):

$$h_{c,b-a} = 2,8 + 3 * 1,64 = 7,72 \frac{W}{m^2K}$$

- Coeficiente de transferencia de calor por convección entre la base y el ambiente (ecuación 42):

Cálculo del coeficiente global de pérdidas de calor para policarbonato bronce para calefacción de aire.

$$R1 = \frac{1}{4,62 + 7,72} = 0,081$$

$$R2 = \frac{1}{3,86 + 0,81} = 0,214$$

$$R3 = \frac{1}{4,59 + 7,72} = 0,081$$

$$U_t = \frac{1}{0,081 + 0,214} = 3,39 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_b = \frac{1}{0,081} = 12,31 \frac{W}{m^2K}$$

$$U_L = 5,24 + 13,67 = 15,7 \frac{W}{m^2K}$$

Cálculo del calor útil para policarbonato bronce para calentamiento de agua.

$F_R \tau \alpha$ Se consideró un valor entre 0,85 – 0,9 para colectores sin cubierta

El sistema no tiene cubierta por lo tanto la transmitancia es 1.

$$F_R = \frac{0,85}{\tau \alpha} = \frac{0,85}{1 * 0,58} = 1,45$$

$$Q_U = 2 * [1118,32 * (0,9) * 0,85 - 1,45 * 15,7 * (4,9)] = 1486,7 [W]$$

Cálculo del rendimiento del colector solar con policarbonato bronce para calentamiento de agua.

$$n = \frac{Q_U}{Ac * I} = \frac{1486,7}{2 * 1118,32} = 0,66 = 66\%$$

CAPÍTULO 4

CONSTRUCCIÓN E IMPLEMENTACIÓN

La construcción e implementación del prototipo se realizó en el Laboratorio de Radiación Solar que pertenece al Departamento de Energías Renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE. La construcción e implementación constó de tres partes importantes:

- Construcción e implementación del calentador de agua y calefactor de ambiente.
- Construcción e implementación del sistema de alimentación solar fotovoltaico.
- Puesta en marcha del equipo.

4.1 Calentador de agua y calefactor de ambiente.

En esta sección se detalla la construcción e implementación de los colectores solares, la estructura de apoyo, el acumulador, el circuito hidráulico, cableado, montaje de sensores e implementación de la caja de control.



Figura 81 Calentador de agua y calefactor de ambiente con colector de policarbonato alveolar 8mm.

4.1.1 Construcción de los colectores solares

Los tres colectores solares implementados fueron construidos de la misma manera, poniendo especial énfasis al colector de agua que es el que debe soportar la presión de la columna de agua cuando comienza el llenado del colector. La construcción se realizó de la siguiente manera:

- Corte de la plancha de policarbonato

La plancha debe tener una longitud de 2,04m de largo en dirección de los alveolos, 0,98m de ancho de la sección a introducir en la tubería y 2,04m de ancho total. Todo el proceso de instalación del policarbonato se realizó siguiendo el manual de instalación de cubiertas de policarbonato Crystalite, el cual recomienda una instalación (Ver figura 82).

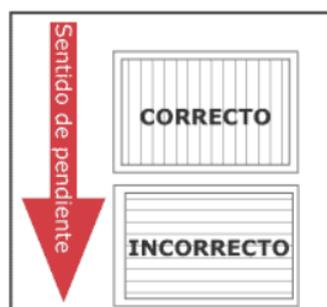


Figura 82 Instalación del policarbonato celular en sentido de la pendiente.

Para cortar la plancha en sentido transversal a los alveolos se utilizó un estilete con punta afilada, realizando una incisión continua por tres veces y aplicando presión sobre un extremo de la plancha, una vez separada, se cortaron los espacios sobrantes que quedan unidos, verificando que los alveolos no pierdan su forma recta (Ver figura 83).

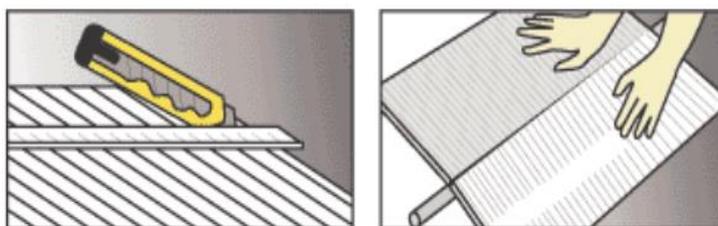


Figura 83 Procedimiento de corte de la plancha de policarbonato alveolar.

Se recortaron en los extremos 3 alveolos por lado, una longitud de 30mm para ajustar la medida de 0,98m que se pega en el tubo.



Figura 84 Corte de la plancha de policarbonato alveolar con estilete afilado.

- Corte de los tubos a una longitud de 2,05 m

El corte debe ser recto y perpendicular a la longitud del tubo para evitar que exista espacio entre el tubo y el tapón que de apertura a la presencia de fugas, se debe limar la superficie para eliminar rebabas.

- Roscado de tubos con terraja de 1”.

El roscado del tubo se realizó con tarraja, siguiendo el proceso de instalación recomendado por Plastigama, el cual tiene las siguientes recomendaciones:

- Colocar el tubo en una mordaza sin exagerar el ajuste.
- Utilizar el dado para rosca BSPT con el dado correspondiente al diámetro del tubo, girar en sentido horario una vuelta, regresar $\frac{1}{4}$ de vuelta en sentido antihorario y retirar virutas, continuar hasta conseguir la longitud requerida acorde a 11 hilos por pulgada de longitud de roscado.
- Aplicar sobre los hilos cinta de teflón en sentido horario comenzando desde el extremo del tubo hasta cubrir todos los hilos.
- Ajustar manualmente el accesorio hasta ya no poder hacerlo, posteriormente utilizar una llave girando $\frac{1}{4}$ de vuelta.

- Ranurado de 8mm de cada tubo

El ranurado es un proceso de maquinado muy importante en los tubos del colector, ya que la correcta realización de la ranura permite un ajuste adecuado entre la plancha de policarbonato alveolar de 8mm y los tubos, la longitud de la ranura es de 98mm que es el ancho de cada plancha de policarbonato.

El proceso de arranque de viruta se realizó en una fresadora manual con una fresa de 8mm, y se necesitó ajustar las medidas con una lima de sección rectangular.



Figura 85 Ranurado de 8mm x 98mm.



Figura 86 Limado de la ranura de 8mm.

- Colocación y pegado de la plancha a los tubos

Es importante tener especial cuidado al colocar la plancha en los tubos, ya que el policarbonato puede fisurarse, dando lugar a la presencia de fugas; una vez colocada la plancha en los tubos se debe verificar por dentro del tubo que la plancha se encuentre perpendicular al mismo.

Antes de aplicar pegamento, se limpia tanto la superficie del tubo como la del policarbonato. Como primera pasada como se ha indicado en el capítulo de diseño se colocó pegamento ABRO super glue, el cual se ha verificado que tiene un rendimiento de 8g por metro de cordón, dado que cada envase contiene 8g, se necesitó de un total de 2 unidades de ABRO Super Glue por tubo. Se dejó secar por el lapso de 1 hora por seguridad.

Una vez se haya secado el cordón, se utiliza un aplicador en el cual se coloca el pegamento Sintaco Maxiflex 40 y se aplica el pegamento verificando un cordón uniforme.

Después se procedió a tapar un extremo de un tubo, inclinar el módulo 20° y llenar con agua por el otro extremo hasta que alcanza la presión de columna de agua que debe soportar el sistema por un lapso de 10 minutos. Posteriormente se descargó el agua, se dio la vuelta al colector y se procedió a llenar desde el otro extremo hasta alcanzar la presión de columna de agua por un lapso de 10 minutos.



Figura 87 Pegado de un colector solar.

4.1.2 Construcción de la estructura de apoyo

La estructura de apoyo se diseñó para soportar las cargas que se consideraron en el capítulo de diseño, ser soporte de los sensores de viento y radiación y mantener la inclinación que requieren las planchas de policarbonato. El techo no debe tener sombra y estar orientado hacia el norte debido a que su ubicación es en el hemisferio sur, adicionalmente se consideró necesario debido a que el proceso de fabricación de la misma no fue en el lugar de instalación que la estructura fuera modular, por esta razón cuenta con 5 módulos que se fijan entre sí mediante conexiones apernadas. La construcción de los 5 módulos se realizó en base a planos de construcción que se pueden revisar en los Anexos 12, 13, 14 y 15.

La construcción incluyó los procesos de corte, soldadura y taladrado.

La soldadura escogida fue por proceso SMAW con electrodo 6011, debido a su buena penetración, bajo costo y aplicación para estructuras ligeras.

El corte se realizó con amoladora con disco para acero de diámetro 300mm que es mayor al espesor del tubo de 2mm según se recomienda en la tabla 53.

Tabla 53
Diámetro del disco de corte según la longitud de la sección transversal a cortar (Klingspor, 2015).

Diámetro del Disco de Corte [mm]	Longitud Máxima de la Sección Transversal a Cortar [mm]
115	10
180	17
230	25
300	40
400	60
500	85
600	105

Para el taladrado se utilizó broca de ½” para acero, en total se realizaron 8 huecos en el techo, 6 huecos para cada larguero y 4 huecos para los tubos horizontales.

Las placas base de la estructura se cubrieron con Chova Alumbrand para evitar la proliferación de agua a través de los huecos realizados con el taladro.



Figura 88 Colocación de chova en las placas.

- Módulo 1: Techo

El techo consta de dos tipos de tubería de acero estructural ASTM A36: tubo rectangular 80x40x2mm y 40x20x1,5 mm. La construcción del techo se realizó tomando en cuenta el manual de Crystalite que indica que la separación entre apoyos como se indica en la figura 89 debe realizarse de acuerdo a la tabla 54.

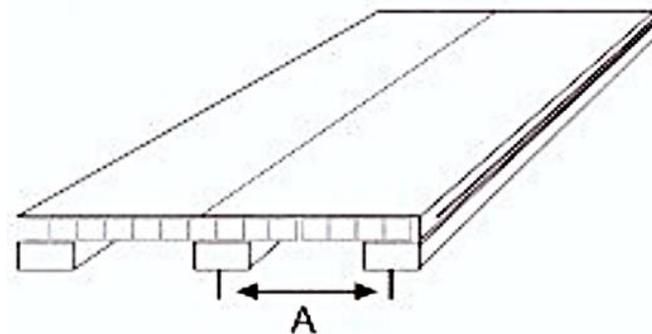


Figura 89 Distancia entre apoyos para instalación del policarbonato.

Fuente: (Crystalite, 2014)

Tabla 54
Distancia entre apoyos mínima según el espesor de la plancha (Crystalite, 2014).

Espesor del policarbonato	A
4 mm	<52 cm
6 mm	<70 cm
8 mm	<90 cm
10 mm	<105 cm

Se ha escogido una distancia entre apoyos de 48 cm para los colectores de agua y de 50 cm para el colector de aire para asegurar que el peso debido al agua no afecte ni fleje al policarbonato, además esta medida es mucho menor a la recomendada de 90 cm.

La longitud de las planchas de policarbonato es de 2,04 m más el diámetro de los tubos de PVC, en base a esto se seleccionó una longitud de 2 m para el techo con el fin de conservar un pequeño voladizo que evita que la caja de control ubicada en el espaldar de la estructura se moje. Las dimensiones del techo son de 2 x 3,12 m. Las conexiones apernadas en el techo permiten que este se una con los largueros.



Figura 90 Techo de la estructura.

- Módulo 2 y 3: Largueros

Los largueros cumplen la función de soporte del techo y de dar la inclinación requerida en los colectores solares. Los tubos escogidos son rectangulares 80x40x2mm.

Los largueros tienen además cuatro placas soldadas, las cuales permiten que estos se conecten tanto con el techo como con los tubos horizontales de la estructura.

Los largueros deben tener un empotramiento en el piso, lo cual se llevó a cabo mediante 4 placas de 200mm x 200mm. Para anclar las placas al piso de hormigón, fue necesario taladrar el piso de la terraza del laboratorio con un taladro con broca para hormigón de ½” y 4 pernos expansión de la misma medida por placa.



Figura 91 Larguero de la estructura.



Figura 92 Taladrado de las placas base.

- Módulo 4 y 5: Tubos horizontales

Los tubos horizontales sirven para dar estabilidad a la estructura y servir como soporte de la caja de control. Los tubos escogidos fueron rectangulares de 80x40x2mm. Estos tubos se conectan con los largueros por medio de placas soldadas al tubo y pernos de ½”



Figura 93 Conexión apernada de un tubo horizontal con el larguero.

4.1.3 Construcción del tanque acumulador

El tanque acumulador debe estar correctamente aislado con un espesor de por lo menos 50 mm como se ha especificado en el capítulo 3.

Los tanques utilizados debido a su disponibilidad y bajo costo fueron tanques de PVC de 120 litros para transportar jabón líquido.

Como material aislante se utilizaron dos recubrimientos de lana de vidrio, el primer recubrimiento sin papel y el segundo recubrimiento del tipo ductoroll que permite un mejor manejo y manipulación del tanque además de tener un mejor acabado estético de color metálico.

Previamente se realizaron 6 huecos en el tanque:

- 2 huecos para la ubicación de los sensores de nivel
- 4 huecos de entrada, salida y recirculación del agua.

Se ubicaron conexiones en el tanque para poder conectar y desconectar el circuito hidráulico con facilidad.

Para proteger el acumulador de la intemperie se lo ubicó dentro de un tanque de metal usado, debido a su disponibilidad, bajo costo y fácil adecuación al sistema, al cual se le cortó la tapa y se colocó una nueva que permitiera el montaje y desmontaje, además se le realizaron huecos que permiten la conexión y desconexión del acumulador al circuito hidráulico y el paso de cables de los sensores de nivel y la electroválvula.



Figura 94 Tanque de almacenamiento y aislamiento.

4.1.4 Montaje del prototipo

- Montaje de la estructura

El montaje del prototipo comenzó con la conexión mediante pernos de $\frac{1}{2}$ " , arandelas de presión, arandelas planas y tuercas al techo de la estructura con los dos largueros, se prosiguió por parar la estructura y trazar los puntos donde se realizarían orificios para anclar las placas del larguero al piso de la terraza teniendo especial cuidado en la orientación del techo; una vez trazados los puntos, se procedió a taladrar el piso con una broca para concreto de $\frac{1}{2}$ " y colocar pernos de expansión en cada hueco; se procedió entonces a apernar a las placas en el piso y asegurarlas con roscas y arandelas de presión. Después se colocaron los tubos horizontales que se conectan a los largueros con pernos de $\frac{1}{2}$ " , arandelas de presión, arandelas planas y roscas.



Figura 95 Taladrado y colocación de pernos de expansión en el piso.



Figura 96 Apernado de las placas.

Cada componente de la estructura se pintó previamente con pintura antioxidante metálica, una vez levantada la estructura se procedió a pintar con soplete y pintura esmalte color azul eléctrico.



Figura 97 Pintado de la estructura con soplete.

- Montaje de los colectores solares

El montaje de los colectores solares se realizó con tornillos autoroscantes de $\frac{1}{4}$ " , los cuales se colocan con un capuchón y un sello, perfiles de unión de plástico para conectar las tres planchas con la ayuda de un taladro y un acople para tornillo siguiendo el siguiente procedimiento:

- Medición del espacio de instalación
- Atornillar las uniones macho de policarbonato al techo de la estructura con separación de 50 cm según recomienda su fabricante.

- Atornillar un extremo de ambas planchas a la estructura con separación de 50 cm. Verificar que el tornillo no quede demasiado ajustado para permitir la expansión térmica del material.
- Colocar las uniones hembra de policarbonato con la ayuda de un mazo de goma, dando golpes hasta conseguir que ambas uniones se ajusten entre sí.



Figura 98 Instalación de las planchas de policarbonato con uniones.

- Instalación del acumulador, circulador y circuito hidráulico

Una vez acordado el espacio de ubicación del tanque, se procedió a medir la cantidad de tubería necesaria para la entrada de agua de la red, tomando en cuenta que las tomas de agua tienen un diámetro de $\frac{1}{2}$ " , se seleccionaron accesorios y tubería de $\frac{1}{2}$ " también. Se midió la cantidad de manguera flexible necesaria y los accesorios que se mencionaron en el capítulo de diseño y se las ajustó a la estructura.



Figura 99 Instalación del circuito de alimentación de agua.



Figura 100 Instalación de la manguera flexible de PVC

Se acopló la bomba sumergible a la tubería por medio de adaptadores y manguera, que se ajustó mediante una abrazadera de $\frac{5}{8}$ "', se usaron neoprenos para permitir que la base de la bomba quedara pegada al fondo del tanque.

Se acoplaron todos los accesorios de las tuberías con ayuda de una llave y teflón para evitar la presencia de fugas en las conexiones.



Figura 101 Instalación de accesorios del circuito de distribución.

4.1.5 Instalación del aerocirculador y sistema de ventilación

Se decidió colocar el soplador cubierto por las planchas de policarbonato bajo la estructura para protegerlo de la lluvia. Se colocaron dos soportes atornillados a la estructura que sirven como base para el soplador.

Se colocaron conductos de ventilación a la salida del soplador para acoplarlo con el colector solar.

A la salida del colector solar se colocaron accesorios de polipropileno para adaptar la salida a un medidor de caudal de ½”.

Se procedió a asegurar las conexiones con cemento para PVC.



Figura 102 Vista frontal del soplador.



Figura 103 Vista lateral del soplador.



Figura 104 Conducto de salida de la instalación para ventilación.

4.1.6 Instalación de sensores y cableado

Una vez que la planta se instaló de forma correcta, se procedió a seleccionar los lugares de interés donde se colocarían los sensores para obtener datos precisos y reales de las variables físicas y meteorológicas consideradas para el desarrollo del proyecto.

- Instalación del piranómetro

El piranómetro se atornilló a un lado de la estructura donde no reciba sombra y ajustado en posición horizontal con ayuda del nivel que viene incorporado en el sensor para obtener datos reales de radiación a 0°.



Figura 105 Instalación del piranómetro.

- Instalación del anemómetro

El anemómetro se ajustó al otro costado de la estructura junto con una veleta mediante ajustadores metálicos, para obtener la velocidad y dirección del viento que incide directamente sobre los colectores solares.



Figura 106 Instalación de anemómetro y veleta.

- Instalación de sensores de temperatura

Los sensores DS18B20 para medición de la temperatura del agua se colocaron dentro de tapones que se conectaron a una Tee a la entrada y salida del circuito hidráulico. El sensor para medición de la temperatura del aire de entrada se colocó dentro de un codo para conducto de ventilación y para el aire de salida se colocó dentro de un tapón y una Tee.

Los sensores para medición de temperatura superficial de las placas absorbedoras se colocaron en la parte inferior de cada colector, dos sensores por cada colector pegados mediante Pegamento ABRO Super Glue en contacto directo con la placa.



Figura 107 Instalación de sensores de temperatura superficial de la placa.

- Instalación de caudalímetros

Se colocó un caudalímetro a la entrada de la tubería que lleva agua desde el colector hacia el tanque, teniendo cuidado en que la dirección del fluido sea igual a la dirección del sensor. El otro caudalímetro se colocó a la salida del colector de aire, teniendo la misma consideración de la dirección del fluido.



Figura 108 Instalación de caudalímetros.

- Instalación de los sensores de nivel

Fue necesario realizar orificios en el tanque para la colocación de los sensores en el tanque, los cuales permiten su ajuste mediante una rosca y un sello para evitar fugas.



Figura 109 Instalación de sensores de nivel.

- Cableado

El cableado de los sensores se realizó con la finalidad de conectar todos los sensores de la planta a la caja de control, esto se realizó mediante cable de timbre flexible y canaletas ubicadas en distintos sectores de la estructuras para evitar visibilidad de los cables y mejorar la estética de la instalación.

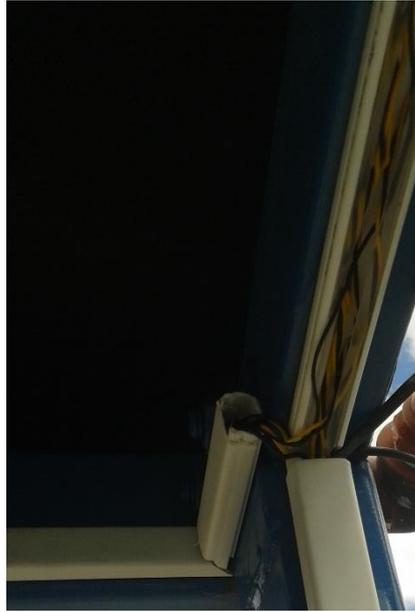


Figura 110 Cableado y colocación de canaletas en la estructura.

4.1.7 Instalación y construcción del sistema de regulación y control

El sistema de regulación y control consta de tres placas y un microcontrolador Arduino Mega, la primera placa se encarga del módulo de control y adquisición de datos, la segunda del módulo de potencia y la tercera del módulo de alimentación. Se procedió a quemar las placas y soldar los elementos que las conforman (Ver figuras 111, 112 y 113).



Figura 111 Placa electrónica del módulo de potencia.



Figura 112 Placa electrónica del módulo de alimentación.



Figura 113 Placa electrónica del módulo de control y adquisición de datos.

Las placas y el controlador se instalaron dentro de una caja de control, la cual está atornillada a un tubo horizontal de la estructura y se encuentra protegida de la lluvia. La caja de control consta de un interruptor de energización del sistema, un interruptor de encendido del microcontrolador y un interruptor de encendido y apagado del soplador. Además consta de tres portafusibles para las bombas sumergibles y el soplador.



Figura 114 Vista frontal de la caja de control.

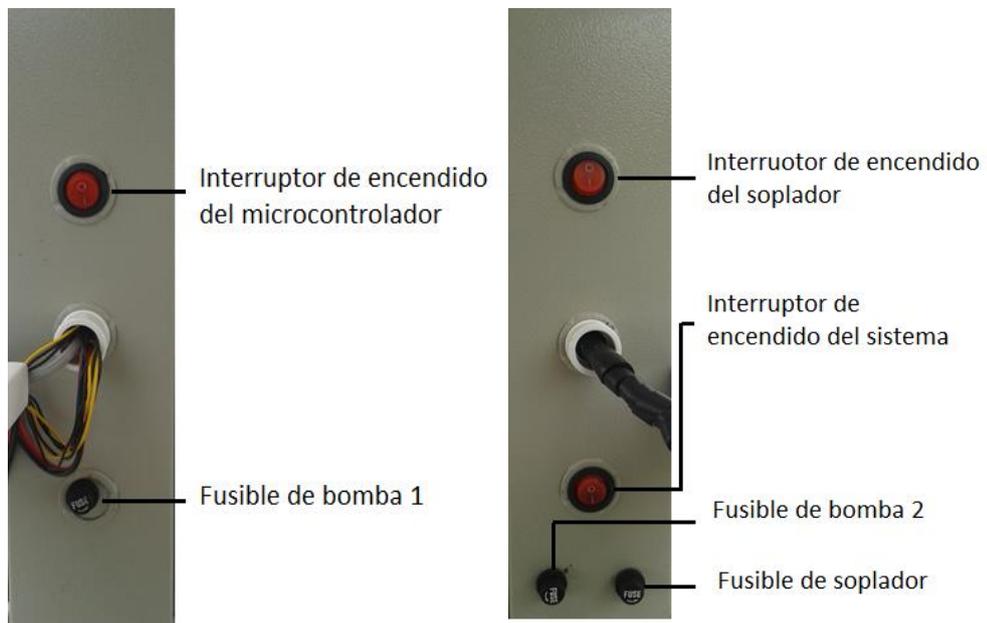


Figura 115 Vista lateral izquierda y derecha de la caja de control.

Posteriormente se procedió a conectar cada elemento a las borneras de las placas electrónicas.

4.2 Sistema de alimentación solar fotovoltaico.

En esta sección se detalla la instalación del sistema de alimentación, el cual consta de una estructura de soporte para el panel, una batería solar, un regulador de carga, un compartimiento para la batería y regulador y cableado.



Figura 116 Sistema de alimentación solar fotovoltaico.

- Compartimiento para la batería y regulador

El compartimiento protege de la intemperie y la lluvia a la batería y al regulador de carga para evitar su deterioramiento y averías, está situado bajo el panel solar para evitar una exposición directa a la lluvia y minimizar la cantidad de cable requerido, tiene un hueco en la parte inferior que permite el ingreso de los cables hacia el regulador de carga, además tiene una tapa en la parte superior que permite un fácil acceso para monitoreo, montaje y mantenimiento de los equipos.



Figura 117 Ubicación y conexión de la batería y el regulador dentro de la caja.

La batería debe estar completamente protegida de la intemperie, estar situada cerca del panel solar para evitar caídas de tensión debido a la longitud del cable.

El regulador de carga está colocado de forma vertical, lo cual permite una mejor conexión de los terminales a la batería, el panel y el sistema de control y monitoreo. Es importante verificar la correcta polarización de todos los equipos antes de conectarlos al regulador.

- Estructura de apoyo para el panel

La estructura de apoyo del panel solar fotovoltaico tiene una inclinación de 20° para evitar la acumulación de polvo y suciedad en la superficie, está anclada al piso mediante tornillos y tacos de $\frac{1}{4}$ " para evitar que el panel se caiga debido a la acción del viento sobre la estructura y se asegura al panel solar mediante pernos de $\frac{1}{4}$ ". Está situada a una distancia de 2,50 metros de la estructura de soporte del prototipo para evitar sombras.

- Cableado y conexión

La batería, el panel fotovoltaico y el sistema de regulación y monitoreo se encuentran conectados al regulador de carga, el cual cumple la función de regular el voltaje que alimenta al circuito de regulación y control, además se encarga de cargar la batería simultáneamente hasta alcanzar un nivel de carga máxima.

4.3 Puesta en marcha

Para la puesta en marcha del sistema fue necesario conectar primeramente la batería al regulador solar, después los paneles solares y verificar el nivel de carga de la batería mediante los indicadores LED del regulador, una vez verificado el voltaje de la batería, se conectan los bornes de la carga e 12V. Se activa el interruptor de encendido del sistema, posteriormente se activa el interruptor de encendido del microcontrolador. En la pantalla LCD se verifican las temperaturas de entrada y salida de los colectores, el nivel de irradiancia solar actual y la fecha y hora. Se enciende el interruptor de climatización de ambiente, tomando en cuenta que este solo se enciende cuando la irradiancia es igual o mayor a 1000 Wh/m^2 . Se debe abrir la válvula de paso para el llenado de los tanques y verificar el llenado de los mismos mediante los LEDs de color verde en la caja de control, una vez llenados los tanques las bombas deben encenderse con caudal máximo y los LEDs de color verde deben apagarse. Después de una hora de operación se realiza el control de ancho de pulso para regular el voltaje de las mismas. El equipo funciona durante un periodo de 5 horas, iniciando a las 10 am y terminando a las 3 pm y guarda los datos actuales del sistema cada 5 segundos. Al culminar el periodo de operación del día, verificar que toda el agua haya descendido a través de los colectores hacia el tanque.



Figura 118 Indicadores de carga del regulador.

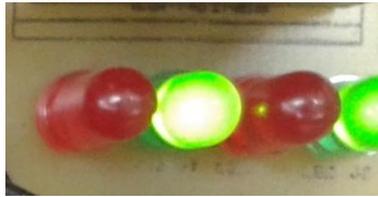


Figura 119 LEDs indicadores de llenado del tanque.

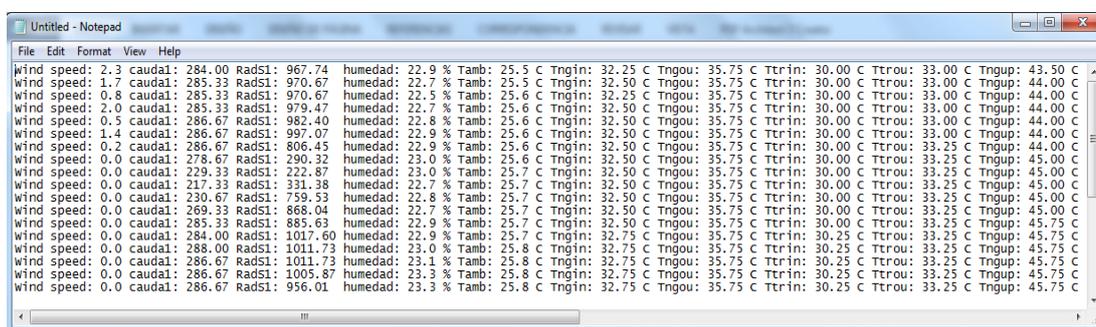


Figura 120 LCD indicador de las variables del sistema.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas se realizaron periódicamente durante un lapso de 15 días en el mes de noviembre de 2015 para los calentadores de agua y en un lapso de 5 días para los colectores solares de aire. Tomando en cuenta que el funcionamiento del proyecto tiene una duración diaria de 5 horas, se han tomado las variables que se muestran en la tabla 55 para el análisis de los resultados. El sistema de adquisición adquiere todas las variables mostradas en la tabla 55 cada 5 segundos y de esta información se obtuvo un promedio cada 30 minutos. El sistema transfiere datos a una tarjeta micro SD y dentro de la tarjeta se crea un archivo de texto, cuyos valores se trasladaron posteriormente a una hoja de cálculo de Excel (Ver Figuras 121 y 122).

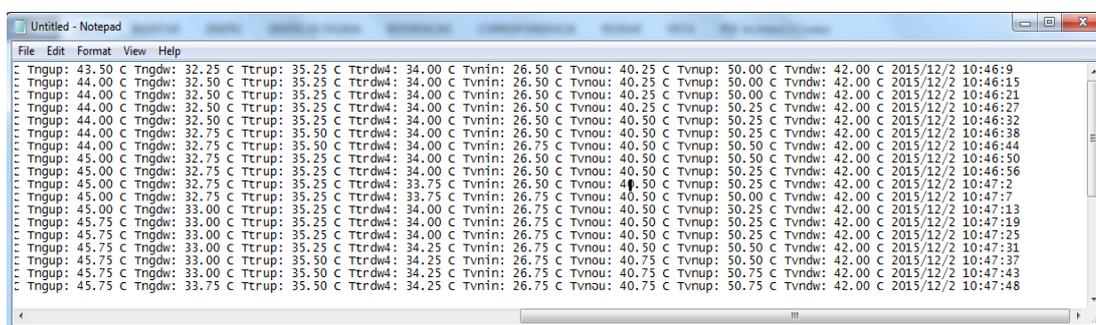


```

Untitled - Notepad
File Edit Format View Help
wind speed: 2.3 caudal: 284.00 Rads1: 967.74 humedad: 22.9 % Tamb: 25.5 C Tngin: 32.25 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 43.50 C
wind speed: 1.7 caudal: 285.33 Rads1: 970.67 humedad: 22.7 % Tamb: 25.5 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 0.8 caudal: 285.33 Rads1: 970.67 humedad: 22.5 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.25 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 2.0 caudal: 285.33 Rads1: 979.47 humedad: 22.7 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 0.5 caudal: 286.67 Rads1: 982.40 humedad: 22.8 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 1.4 caudal: 286.67 Rads1: 997.07 humedad: 22.9 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.00 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 0.2 caudal: 286.67 Rads1: 806.45 humedad: 22.9 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 44.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 278.67 Rads1: 290.32 humedad: 23.0 % Tamb: 25.6 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 229.33 Rads1: 222.87 humedad: 23.0 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 217.33 Rads1: 331.38 humedad: 22.7 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 230.67 Rads1: 759.53 humedad: 22.8 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 269.33 Rads1: 866.04 humedad: 22.7 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.00 C
wind speed: 0.0 caudal: 285.33 Rads1: 885.63 humedad: 22.9 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.50 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.00 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C
wind speed: 0.0 caudal: 284.00 Rads1: 1017.60 humedad: 22.9 % Tamb: 25.7 C Tngin: 32.75 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.25 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C
wind speed: 0.0 caudal: 288.00 Rads1: 1011.73 humedad: 23.0 % Tamb: 25.8 C Tngin: 32.75 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.25 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C
wind speed: 0.0 caudal: 286.67 Rads1: 1011.73 humedad: 23.1 % Tamb: 25.8 C Tngin: 32.75 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.25 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C
wind speed: 0.0 caudal: 286.67 Rads1: 1005.87 humedad: 23.3 % Tamb: 25.8 C Tngin: 32.75 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.25 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C
wind speed: 0.0 caudal: 286.67 Rads1: 956.01 humedad: 23.3 % Tamb: 25.8 C Tngin: 32.75 C Tngou: 35.75 C Ttrin: 30.25 C Ttrou: 33.25 C Tngup: 45.75 C

```

Figura 121 Datos obtenidos del sistema en tarjeta SD parte 1.



```

Untitled - Notepad
File Edit Format View Help
Tngup: 43.50 C Tngdw: 32.25 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.25 C Tvnu: 50.00 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:9
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.50 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.25 C Tvnu: 50.00 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:15
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.50 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.25 C Tvnu: 50.00 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:21
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.50 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.25 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:27
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:32
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:38
Tngup: 44.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.50 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:44
Tngup: 45.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.50 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:50
Tngup: 45.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:46:56
Tngup: 45.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 33.75 C Tvmn: 26.50 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:2
Tngup: 45.00 C Tngdw: 32.75 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 33.75 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.00 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:7
Tngup: 45.00 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:13
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:19
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.00 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.25 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:25
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.25 C Ttrdw4: 34.25 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.50 C Tvnu: 50.50 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:31
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.25 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.75 C Tvnu: 50.50 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:37
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.00 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.25 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.75 C Tvnu: 50.75 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:43
Tngup: 45.75 C Tngdw: 33.75 C Ttrup: 35.50 C Ttrdw4: 34.25 C Tvmn: 26.75 C Tvnu: 40.75 C Tvnu: 50.75 C Tvndw: 42.00 C 2015/12/2 10:47:48

```

Figura 122 Datos obtenidos del sistema en tarjeta SD parte 2.

Tabla 55
Datos y unidades adquiridos por el sistema.

Variable	Unidad
Temperatura de entrada de agua del colector transparente	°C
Temperatura de salida de agua del colector transparente	°C
Temperatura de entrada de agua del colector negro	°C
Temperatura de salida de agua del colector negro	°C
Temperatura de entrada de aire del colector de ventilación	°C
Temperatura de salida de aire del colector de ventilación	°C
Temperatura de placa superior del colector transparente	°C
Temperatura de placa inferior del colector transparente	°C
Temperatura de placa superior del colector negro	°C
Temperatura de placa inferior del colector negro	°C
Temperatura de placa superior del colector de ventilación	°C
Temperatura de placa inferior del colector de ventilación	°C
Velocidad del viento	m/s
Irradiancia (0°)	W/m ²
Humedad	%HR
Temperatura ambiente	°C
Caudal de agua	l/h
Caudal de aire	ft ³ /min

5.1 Irradiación diaria útil recibida por cada colector solar

El análisis de las variables comenzó por la estimación de la energía recibida por el colector proveniente del sol, ya que el piranómetro utilizado necesita ser instalado de forma horizontal, fue necesario calcular por el método de ISF la irradiación con el ángulo de inclinación de la instalación, para esto se aplicó la ecuación 2.

La constante A es igual a 0,982 y la constante B para el mes de noviembre es igual a 0,0174. Para calcular la irradiación incidente se consideró un promedio diario de irradiación con ángulo de 0° dentro del lapso de tiempo que se especificó. Un ejemplo de cálculo se presenta a continuación para el día lunes 2 de noviembre en el lapso de 10:01 a 10:30 am, donde la irradiancia global media es de 579,77 [Wh/m²]:

$$G(20^\circ) = (0,982 * 0,57977 + 0,0069 * (0,57977)^2) * 0,5$$

$$G(20^\circ) = 0,29 \left[\frac{Kwh}{m^2} \right]$$

En la tabla 56 se resume la estimación de la irradiación global media para superficie inclinada 20° del día 2 de noviembre de 2015.

Tabla 56
Estimación de la irradiación global media para superficie inclinada 20° incidente sobre el colector solar del día 2 de noviembre de 2015.

Hora	Irradiación directa y difusa (0°) [KWh/m ²]	Irradiación de Albedo [KWh/m ²]	Irradiación global (0°) [KWh/m ²]	Irradiación global (20°) [KWh/m ²]
10:01 - 10:30	0,26	0,03	0,29	0,29
10:31 - 11:00	0,31	0,03	0,34	0,34
11:01 - 11:30	0,40	0,04	0,44	0,43
11:31 - 12:00	0,40	0,04	0,45	0,44
12:01 - 12:30	0,45	0,05	0,49	0,49
12:31 - 13:00	0,29	0,03	0,32	0,32
13:01 - 13:30	0,36	0,04	0,40	0,39
13:31 - 14:00	0,51	0,05	0,56	0,56
14:01 - 14:30	0,48	0,05	0,54	0,53
14:31 - 15:00	0,40	0,04	0,44	0,43
Total	3,85	0,41	4,27	4,51

En la tabla 57 se resume el cálculo de la irradiación global media para 15 días del mes de noviembre con inclinación de 20°.

Tabla 57
Irradiación global útil para superficie inclinada 20° incidente sobre el colector solar durante el mes de noviembre de 2015.

Fecha	Irradiación global útil (20°) [Kwh/m ²]
02/11/2015	4,51
03/11/2015	3,64
04/11/2015	3,73
05/11/2015	4,87
10/11/2015	4,10
11/11/2015	3,96
12/11/2015	4,80
13/11/2015	4,44
17/11/2015	4,76
18/11/2015	1,51
19/11/2015	2,01
23/11/2015	5,17
24/11/2015	4,51
25/11/2015	3,60
26/11/2015	3,49
Promedio	3,94

En la tabla 57 se aprecia que la irradiación media mensual recibida por el colector solar durante su funcionamiento es de 3,94 Kwh/m², lo cual es menor a los valores teóricos obtenidos en la tabla 7 por el método ISF de 4,58, Kwh/m², por el método de Armstrong Paige de 4,64 Kwh/m² y por el método de la NASA de 4,54 Kwh/m², esto se debe a que en la tabla 57 únicamente se estima la irradiación mientras el agua se encuentra en circulación a través del sistema por un periodo de 5 horas diarias, mientras que en la tabla 7 se han considerado valores de irradiación durante todo el día.

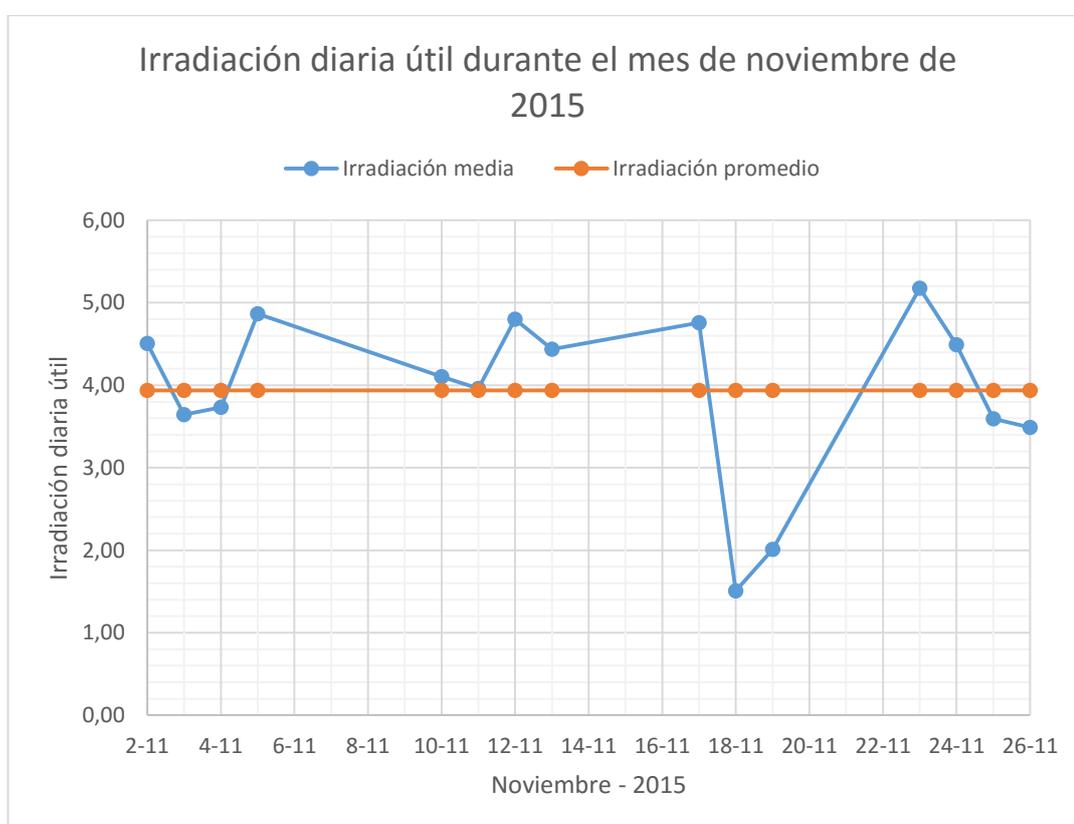


Figura 123 Irradiación diaria útil durante el mes de noviembre de 2015.

En la figura 123 se puede apreciar una curva de irradiación útil para el mes de noviembre donde la media es de 3,94 Kwh/m², tiene un pico máximo de 5,17 Kwh/m² y un mínimo de 1,51 Kwh/m².

La irradiación estimada es muy importante para conocer la energía solar disponible para las superficies de captación, ya que de esta depende la temperatura máxima que se puede obtener diariamente en los fluidos de cada colector.

5.2 Análisis comparativo de los colectores de agua

La elaboración del proyecto buscó establecer las diferencias entre un colector solar de policarbonato bronce y uno pintado de negro mate, por esta razón es indispensable caracterizar y diferenciar ambos sistemas bajo las mismas circunstancias.

5.2.1 Análisis de caudal-irradiancia del sistema

Ambos sistemas funcionan con el mismo caudal dada la característica del controlador y que ambas bombas y accesorios son idénticos. En la figura 124 se aprecia una curva de caudal en función de la radiación para el día 10 de diciembre de 2015.

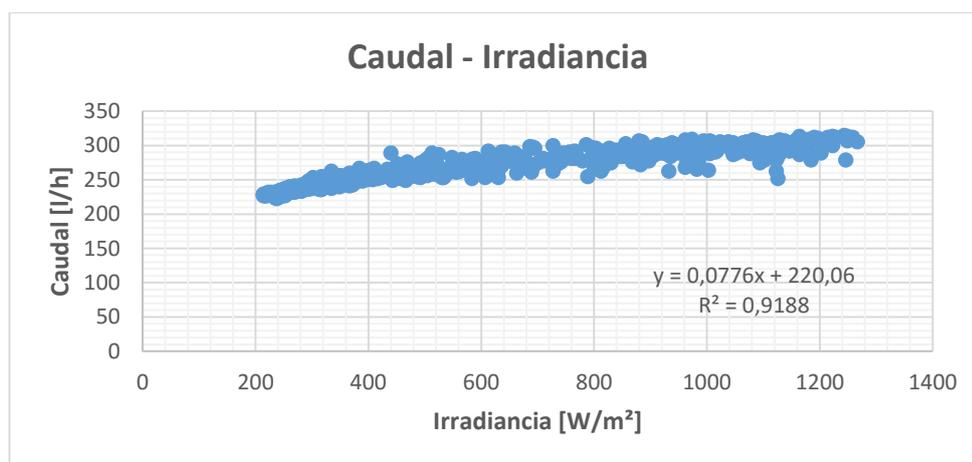


Figura 124 Gráfica de caudal – irradiancia del día 10 de diciembre de 2015.

En la figura 124 se puede observar que la recta $y = 0,0776x + 220,06$ con $R^2=0,9188$ relaciona el caudal en función de la irradiancia de manera lineal, ya que R^2 es cercano a 1, además es posible determinar en la ecuación que con una irradiancia mínima de $100 \text{ [W/m}^2\text{]}$, se obtiene un caudal de $227,82 \text{ [l/h]}$.

En la tabla 58 se realizó una regresión lineal de la relación entre caudal e irradiancia para 14 días distintos, con el fin de obtener la ecuación de la recta mediante los promedios de la pendiente y ordenada en el origen que permita describir con precisión el comportamiento de estas variables.

Tabla 58
Valores de pendiente y ordenada para la relación caudal – irradiancia.

Fecha	10/11/2015		12/11/2015		13/11/2015		17/11/2015		18/11/2015		23/11/2015		24/11/2015	
Parámetros de regresión lineal	pend.	ord.												
	0,089	215,502	0,086	217,488	0,081	215,433	0,083	211,655	0,084	216,384	0,076	220,186	0,078	219,551
	r ²	0,965	r ²	0,999	r ²	0,994	r ²	0,938	r ²	0,942	r ²	0,964	r ²	0,943
Variable	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]
Promedio	708,30	278,38	804,33	286,68	753,59	276,50	839,50	280,96	289,50	240,61	903,43	288,44	737,94	277,11
11:01 - 11:30	736,08	282,24	794,76	286,30	916,12	290,40	772,63	273,81	204,29	233,16	836,07	280,04	652,55	269,83
11:31 - 12:00	594,54	268,02	874,70	292,59	936,17	291,11	772,30	276,56	329,09	246,30	623,31	268,29	394,48	249,76
12:01 - 12:30	772,60	282,99	1157,75	317,41	789,67	279,54	800,14	277,81	424,79	250,06	903,47	289,68	310,92	241,85
12:31 - 13:00	730,83	280,92	1056,64	307,77	575,78	261,79	819,20	280,87	380,75	249,16	959,74	295,94	835,80	286,86
13:01 - 13:30	736,97	280,65	775,07	284,21	577,30	262,69	860,02	282,66	225,60	233,40	853,20	284,40	893,56	297,42
13:31 - 14:00	718,49	278,18	654,26	274,61	416,22	248,55	885,93	284,75	244,25	239,01	1048,79	299,85	834,33	289,42
14:01 - 14:30	708,34	279,40	523,95	262,69	859,31	287,32	871,33	281,71	281,11	238,83	1033,52	297,65	993,68	292,53
14:31 - 15:00	668,52	274,62	597,47	267,84	958,16	290,61	934,45	289,49	226,15	235,00	969,37	291,64	988,17	289,17

Tabla 58 (Continuación)

Valores de pendiente y ordenada para la relación caudal – irradiancia.

Fecha	07/12/2015		09/12/2015		10/12/2015		11/12/2015		12/12/2015		13/12/2015		15/12/2015	
Parámetros de regresión lineal	pend.	ord.												
	0,079	222,257	0,067	222,394	0,072	221,266	0,073	219,293	0,083	223,909	0,093	223,075	0,077	222,084
	r ²	0,958	r ²	0,933	r ²	0,928	r ²	0,979	r ²	0,967	r ²	0,958	r ²	0,990
Variable	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]	Irrad. directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cuadal [l/h]
Promedio	437,51	256,73	703,90	269,23	726,03	273,23	770,48	275,91	738,60	285,41	756,17	293,67	620,70	269,91
11:01 - 11:30	321,49	247,55	773,06	270,91	987,58	286,19	896,89	285,68	902,96	295,57	895,18	311,76	432,74	255,10
11:31 - 12:00	369,49	251,67	823,16	277,21	946,71	282,56	921,91	286,62	968,32	300,52	952,07	315,66	608,63	267,03
12:01 - 12:30	505,75	262,71	696,00	269,61	745,45	273,43	643,67	267,27	908,24	297,82	682,93	292,98	695,07	276,45
12:31 - 13:00	473,57	258,12	711,55	271,78	420,38	252,86	809,58	277,02	266,18	246,46	736,39	290,99	690,13	274,54
13:01 - 13:30	382,38	253,63	696,47	272,02	576,12	266,55	626,94	263,83	370,42	251,50	1162,53	325,48	562,53	263,49
13:31 - 14:00	491,51	260,42	421,02	249,16	304,18	238,77	812,18	280,13	873,32	296,75	620,33	276,41	919,74	292,92
14:01 - 14:30	439,05	255,17	765,46	270,71	933,35	292,76	759,02	275,02	769,36	295,10	498,31	268,34	785,44	285,04
14:31 - 15:00	516,81	264,60	744,45	272,43	894,46	292,73	693,69	271,73	850,03	299,57	501,62	267,76	271,28	244,70

En la tabla 58 se puede observar que el valor mínimo de r^2 (coeficiente de correlación) es de 0,928 para el día 10 de diciembre, lo cual muestra una fuerte correlación entre las variables, lo cual se debe a que el control realizado para el caudal depende únicamente de la irradiancia.

La ecuación de esta relación elaborada con un promedio de las pendientes y ordenadas en el origen es:

$$Q = 0,08 * G + 219,32 \quad (47)$$

Donde:

Q: Caudal [l/h]

G: Irradiancia directa y difusa [W/m^2]

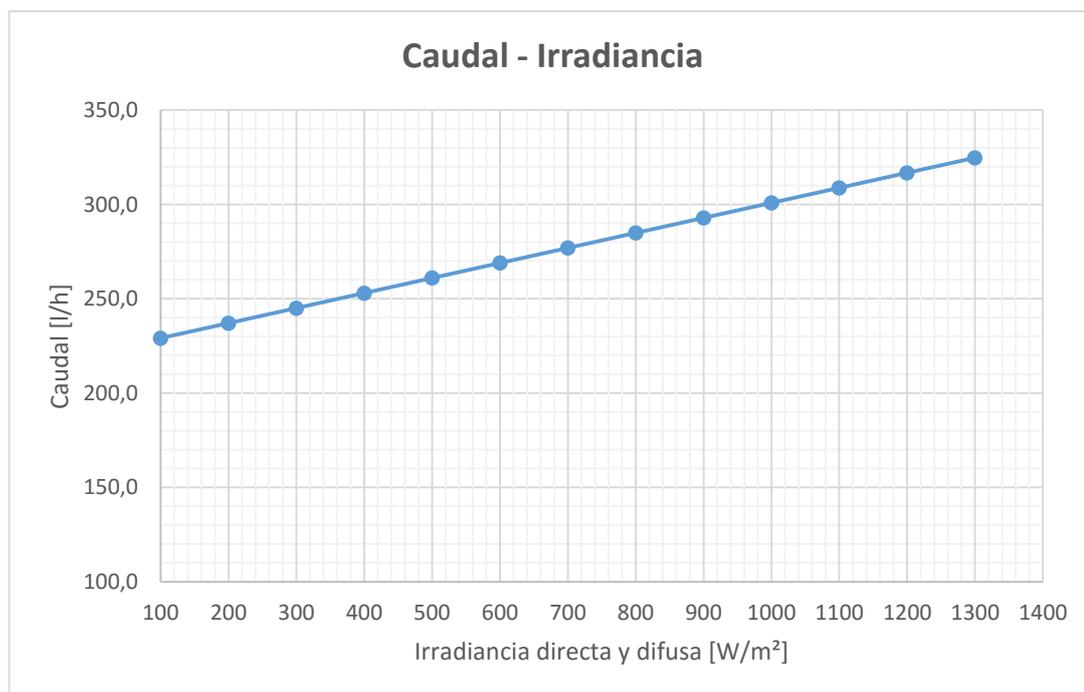


Figura 125 Curva de caudal – radiación.

En la figura 125 se puede observar la relación entre caudal e irradiancia obtenida anteriormente, tomando en cuenta que el sistema trabaja con una irradiancia mínima de 100 [W/m^2].

5.2.2 Análisis de rendimiento

Con los datos obtenidos se procedió a obtener el rendimiento de los colectores instalados mediante el procedimiento de cálculo especificado en el capítulo de diseño. El cálculo de todas las variables y coeficientes se encuentran en el Anexo 16.

Tabla 59
Valores de rendimiento de los colectores para distintos días.

Colector	Negro		Transparente	
Fecha	$(T_m - T_a)/I$	N	$(T_m - T_a)/I$	N
02/11/2015	0,0106	60%	0,0081	55%
03/11/2015	0,0145	51%	0,0108	46%
04/11/2015	0,0126	52%	0,0091	48%
05/11/2015	0,0095	61%	0,0081	53%
10/11/2015	0,0123	53%	0,0091	49%
11/11/2015	0,0146	53%	0,0112	48%
12/11/2015	0,0113	56%	0,0095	48%
13/11/2015	0,0086	62%	0,0076	54%
17/11/2015	0,0111	56%	0,0079	52%
18/11/2015	0,0077	67%	0,0042	65%
19/11/2015	0,0082	61%	0,0062	56%
23/11/2015	0,0121	53%	0,0098	45%
24/11/2015	0,0131	54%	0,0105	48%
25/11/2015	0,0121	55%	0,0111	44%
26/11/2015	0,0113	59%	0,0088	54%

En la tabla 59 se puede apreciar valores de rendimiento (N) del colector pintado de negro mate y el colector transparente de policarbonato bronce para distintos días de toma de datos, dicho rendimiento se encuentra en función de la relación $(T_m - T_a)/I$, donde T_m es la temperatura media del fluido, T_a es la temperatura ambiente e I es el valor de irradiancia promedio. Estos valores se utilizaron para obtener mediante regresión lineal la pendiente y ordenada al origen de la ecuación de rendimiento de cada colector.

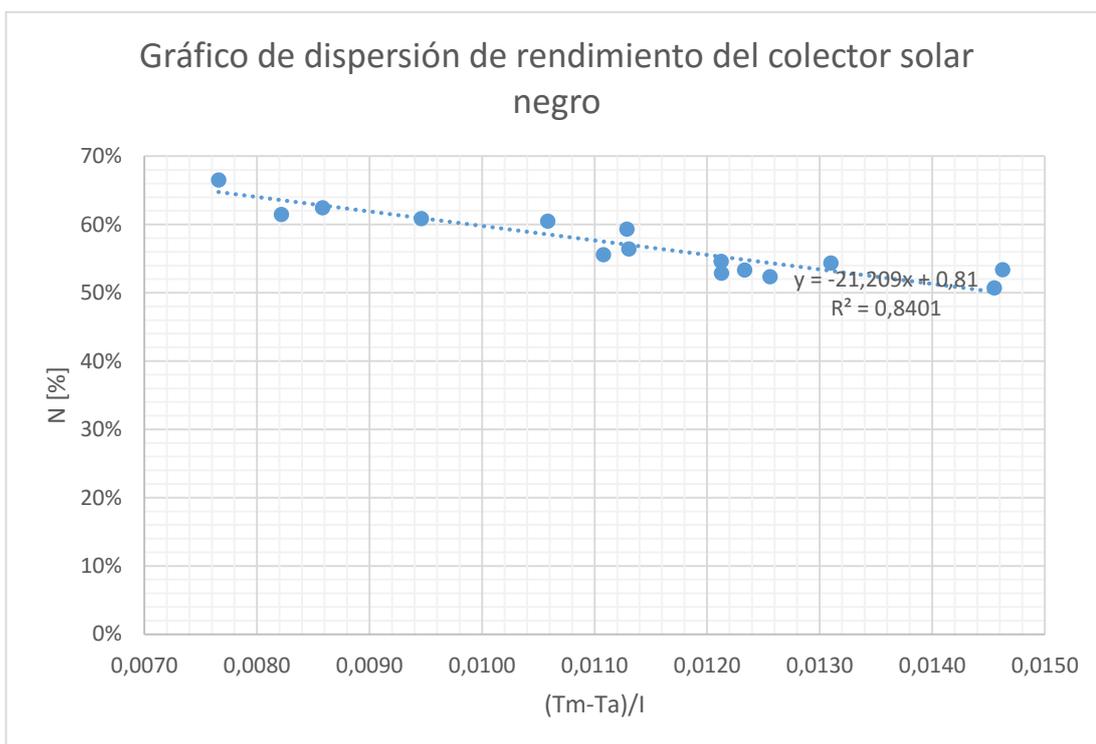


Figura 126 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector solar negro.

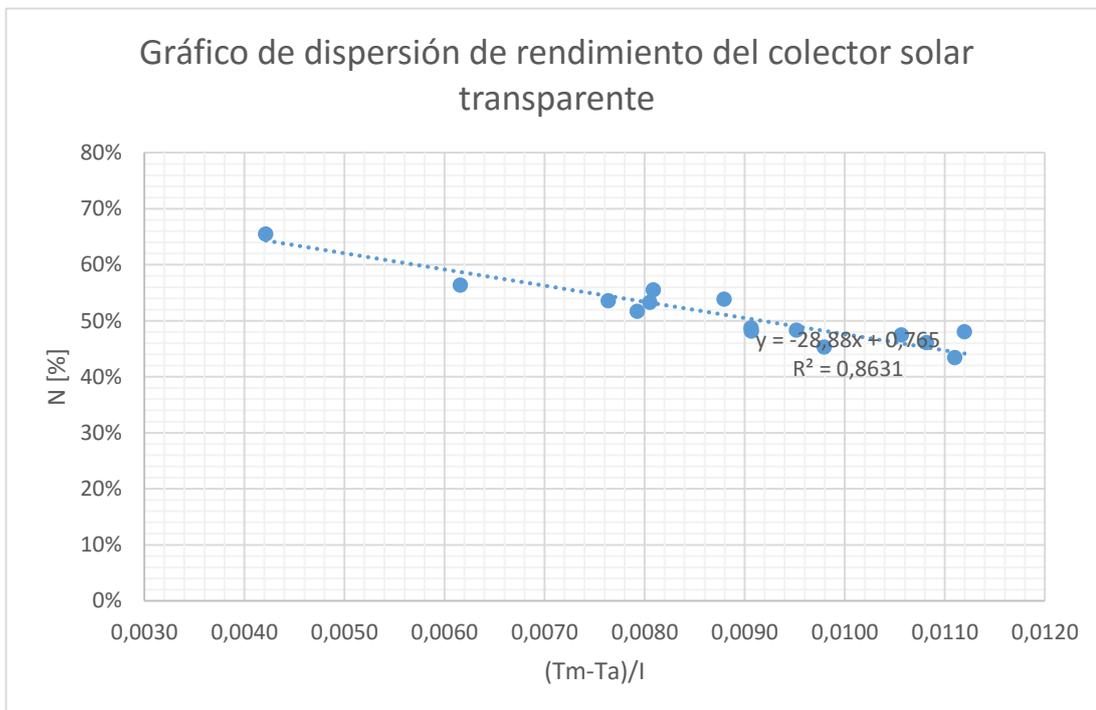


Figura 127 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector solar transparente.

En las figuras 126 y 127 se ha realizado un ajuste para los puntos de rendimiento obtenidos en la tabla 59, donde la pendiente de la recta corresponde al valor de $Fr \cdot U_L$ y representa el coeficiente de pérdidas térmicas del colector, tomando en cuenta que a un mayor valor de esta pendiente, mayor pérdida calórica del colector hacia el exterior y a medida que la temperatura se incrementa se presentará un menor rendimiento. El otro valor importante es la ordenada al origen de la recta que corresponde al valor de $K \cdot Fr \cdot \tau \cdot \alpha$, donde $Fr \cdot \tau \cdot \alpha$ representa la eficiencia óptica del colector o el valor máximo de rendimiento, tomando en cuenta que mientras más se acerque a 1 este valor tendrá una mayor capacidad de absorber el calor proveniente del sol, K es una constante debido a la suciedad en el colector que disminuye su capacidad de captación y es igual a 0,9.

En el caso del colector negro, en la figura 126 se tiene la siguiente ecuación:

$$N = -21,209 \left(\frac{T_m - T_a}{I} \right) + 0,81 \quad (48)$$

Con un coeficiente de correlación de 0,8392, lo cual indica que hay una buena correlación entre las variables.

Para el colector transparente, en la figura 127 se tiene la siguiente ecuación:

$$N = -28,88 \left(\frac{T_m - T_a}{I} \right) + 0,765 \quad (49)$$

Con un coeficiente de correlación de 0,8621, lo cual indica que hay una buena correlación entre las variables.

Tabla 60
Errores del coeficiente de pérdida térmica de los colectores.

Fecha	FR UL					
	Colector negro			Colector transparente		
	Valor real	Valor estimado	error %	Valor real	Valor estimado	error %
02/11/2015	19,37697449	21,033	8,55%	25,98463691	28,747	10,63%
03/11/2015	20,80861044		1,08%	28,11605223		2,24%
04/11/2015	22,83198443		7,88%	31,26903035		8,07%
05/11/2015	21,2775587		1,15%	28,82201856		0,26%
10/11/2015	22,44792851		6,30%	30,65054616		6,21%
11/11/2015	18,879658		11,41%	25,42799985		13,05%
12/11/2015	21,75777892		3,33%	29,62110038		2,95%
13/11/2015	21,59843264		2,62%	30,04020837		4,30%
17/11/2015	22,97230469		8,44%	31,27783197		8,09%
18/11/2015	18,91152428		11,22%	26,13051235		10,01%
19/11/2015	23,80667126		11,65%	32,71585657		12,13%
23/11/2015	23,22133965		9,42%	31,82628909		9,68%
24/11/2015	20,35125924		3,35%	27,44303511		4,75%
25/11/2015	21,78368491		3,45%	29,7833225		3,48%
26/11/2015	19,22866647		9,38%	25,7398322		11,68%
Promedio	21,28362511		1,18%	28,98988484		0,84%

En la tabla 60 se puede ver que el valor estimado de FR*UL para el colector negro es de 21,033, el error promedio respecto al valor estimado es de 1,18% que es un valor aceptable, además se puede apreciar que existe un error máximo de 11% correspondiente a los días 11, 18 y 19 de noviembre, lo cual se debe a una lectura incorrecta del anemómetro en estos días. El valor estimado de FR*UL para el colector transparente es de 28,747, el error promedio respecto al valor estimado es de 0,84% que es un valor aceptable, además se puede apreciar que existe un error máximo de 13,05% correspondiente al día 11 de noviembre, lo cual se debe a una lectura incorrecta del anemómetro en este día.

Finalmente en las figuras 128 y 129 se pueden apreciar los gráficos de rendimiento para el colector solar negro y transparente respectivamente.

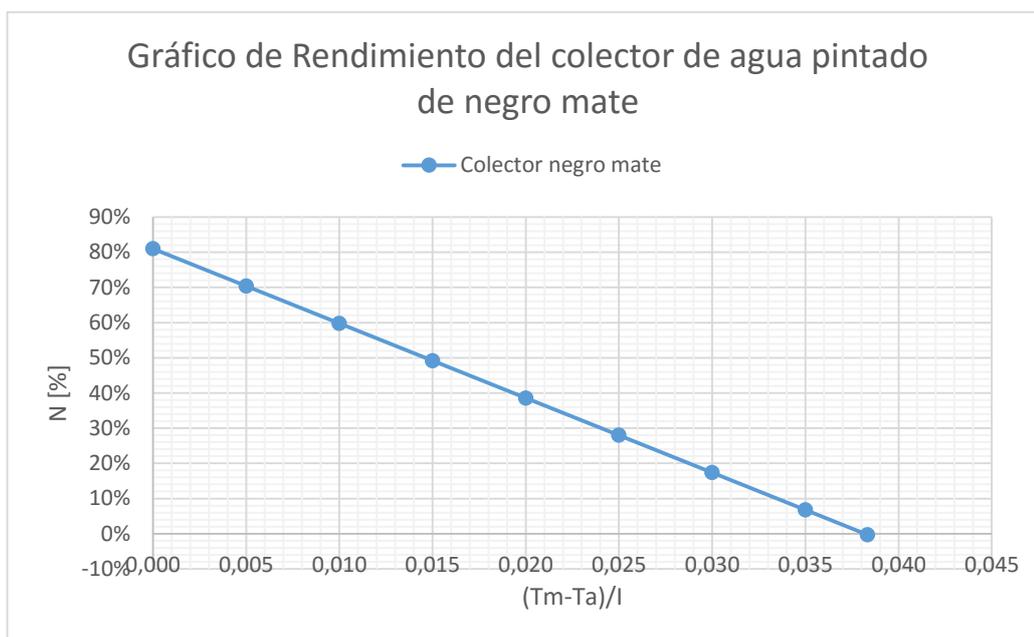


Figura 128 Rendimiento del colector solar de policarbonato pintado de negro mate.

En la figura 128 se puede apreciar un rendimiento máximo de 81% cuando la diferencia entre la temperatura media del agua y la temperatura ambiente es igual a cero y un rendimiento de 0% cuando la relación $(T_m - T_a)/I$ es igual a 0,038.

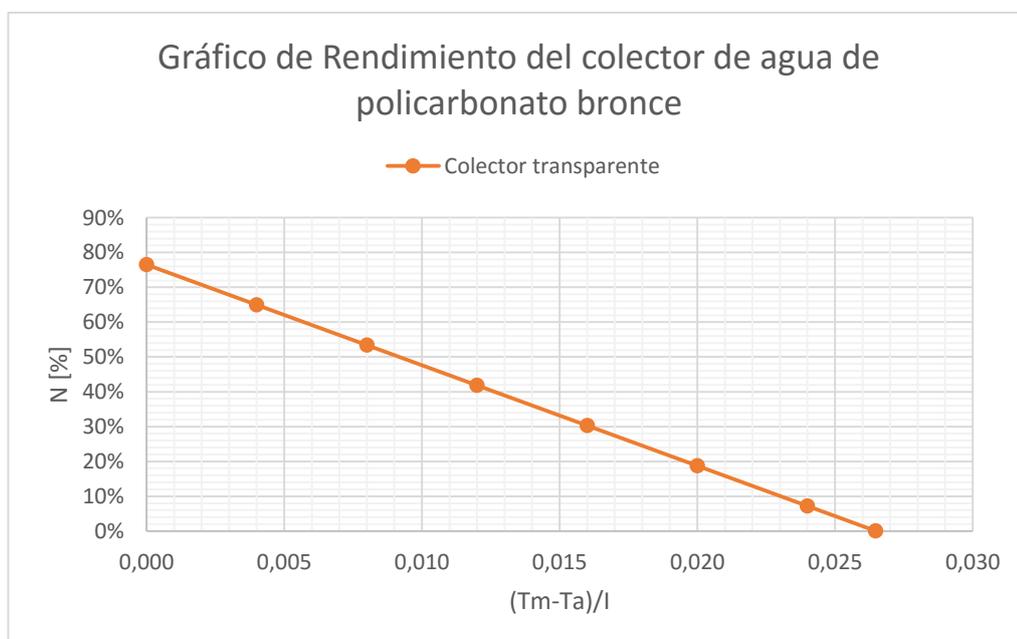


Figura 129 Rendimiento del colector solar de policarbonato bronce.

En la figura 129 se puede apreciar un rendimiento máximo de 76,5% cuando la diferencia entre la temperatura media del agua y la temperatura ambiente es igual a cero y un rendimiento de 0% cuando la relación $(T_m - T_a)/I$ es igual a 0,027.

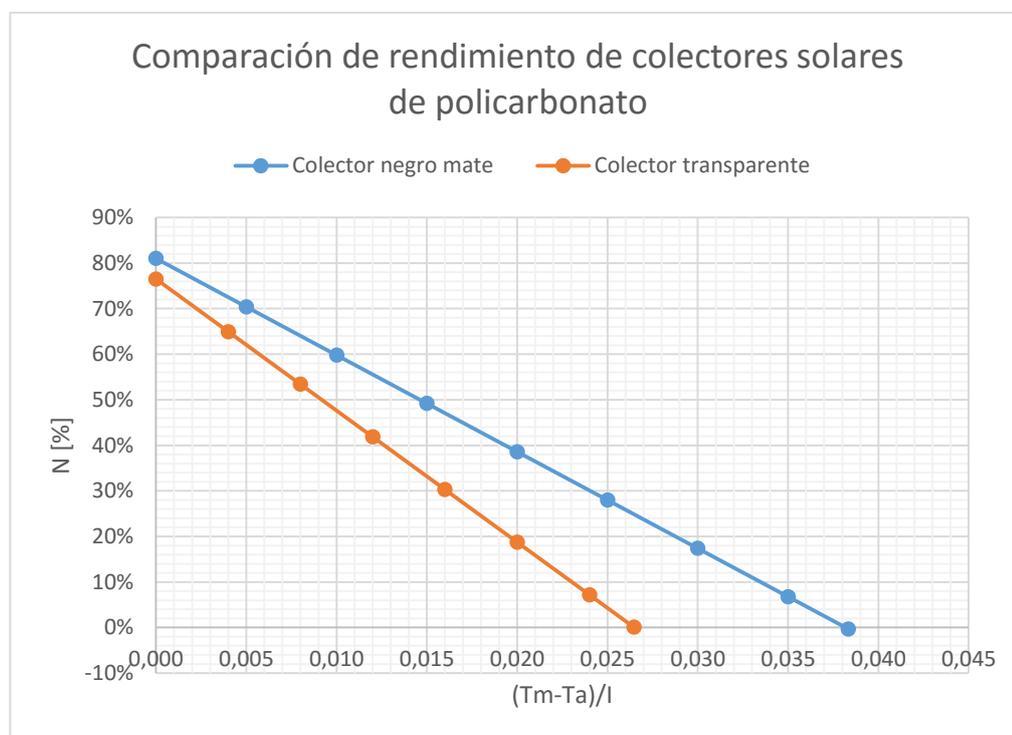


Figura 130 Gráfico comparativo Colector solar negro – Colector solar transparente.

La figura 130 muestra un mayor rendimiento del colector solar de policarbonato pintado de negro mate, ya que su pendiente es menor con un valor de 21,209 comparada a la del colector solar de policarbonato bronce que es de 28,880 y el valor máximo de rendimiento es de 81% comparado con un 76,5% del policarbonato bronce. Esto se debe a las propiedades ópticas del material y una mayor capacidad de absorber calor por parte del cuerpo negro.

La tabla 61 muestra los valores máximos de temperatura del fluido alcanzados durante el mes de noviembre para distintos valores de irradiación diaria.

Tabla 61
Temperatura máxima del fluido durante el mes de noviembre de 2015.

Fecha	Irradiación útil diaria (20°) [Kwh/m ²]	Temperatura máxima del fluido - colector negro [°C]	Temperatura máxima del fluido - Colector transparente [°C]
02/11/2015	4,51	43,95	41,50
03/11/2015	3,64	43,43	39,92
04/11/2015	3,73	43,13	39,51
05/11/2015	4,87	44,18	42,25
10/11/2015	4,10	41,52	40,07
11/11/2015	3,96	41,05	39,70
12/11/2015	4,80	43,11	42,97
13/11/2015	4,44	42,84	41,52
17/11/2015	4,76	46,03	43,61
18/11/2015	1,51	27,82	26,05
19/11/2015	2,01	33,06	31,16
23/11/2015	5,17	46,72	44,40
24/11/2015	4,50	44,92	42,00
25/11/2015	3,61	42,84	39,72
26/11/2015	3,49	42,74	40,07

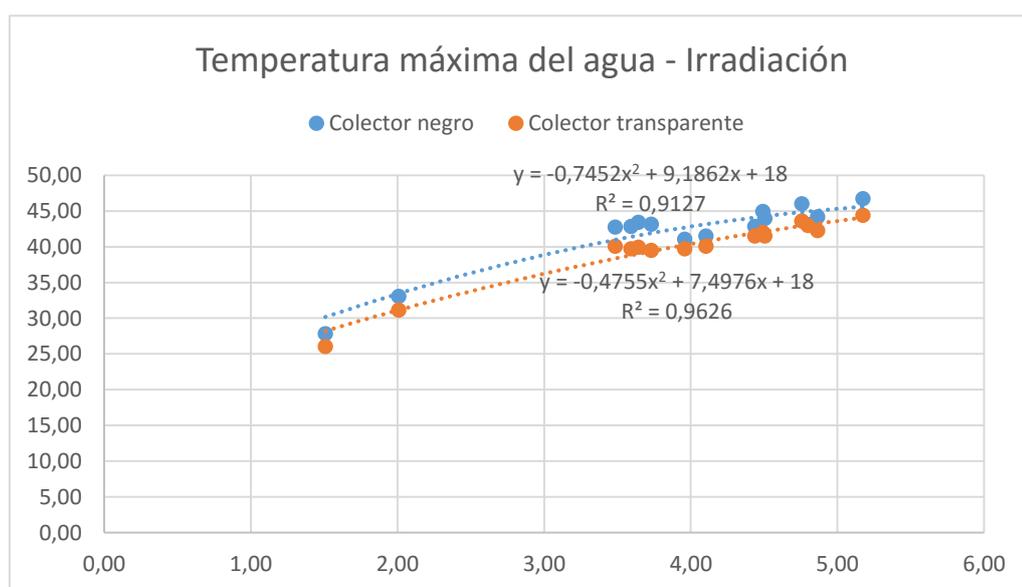


Figura 131 Gráfico de temperatura máxima del fluido – Irradiación para el mes de noviembre de 2015.

La figura 131 evidencia un comportamiento cuadrático de la relación entre irradiación diaria y temperatura máxima del fluido, con un coeficiente de correlación de 0,9629. Tiene un valor pico de 46,72°C para el colector negro y de 44,4 °C para el colector transparente con una irradiación diaria de 5,17 Kwh/m². Tiene un valor mínimo de 27,82°C para el colector negro y de 26,05 °C para el colector transparente con una irradiación diaria de 1,51 Kwh/m².

5.2.3 Análisis comparativo con colectores comerciales

Es importante poder comparar el rendimiento de los calentadores solares implementados con otros tipos de calentadores solares comerciales para poder conocer las diferencias, ventajas y desventajas del desarrollo de este tipo de colector solar.

A continuación se muestran las características de algunos calentadores solares, entre ellos de cubierta simple, sin cubierta, tubos al vacío.

CAPTADOR DE PLACA PLANA SILVASOL

TIPO DE CALENTADOR	Cubierta simple	
ÁREA DE CAPTACIÓN	1,94 m ²	
CAPACIDAD	1,55 litros	
CAUDAL RECOMENDADO	50-120 l/h/m ²	
ECUACIÓN DE RENDIMIENTO	$n = 0,68 - 4,5 \frac{T_m - T_a}{I}$	

FUJISOL FUJI-IS 120

TIPO DE CALENTADOR	Tubos de vacío	
ÁREA DE CAPTACIÓN	1,92 m ²	
CAPACIDAD	120 litros	
CAUDAL RECOMENDADO	60-140 l/h/m ²	
ECUACIÓN DE RENDIMIENTO	$n = 0,8 - 2,5 \frac{T_m - T_a}{I}$	

CAPTADOR SOLAR ECOSUN SIN CUBIERTA

TIPO DE CALENTADOR	Sin cubierta	
ÁREA DE CAPTACIÓN	3,25 m ²	
TEMPERATURA MÁXIMA	34°C	
CAUDAL RECOMENDADO	300-400 l/h/m ²	
ECUACIÓN DE RENDIMIENTO	$n = 0,82 - 39,04 \frac{T_m - T_a}{I}$	
MATERIAL	Polipropileno	

En la figura 132 se aprecia un gráfico comparativo del rendimiento de los colectores solares indicados en comparación con los colectores solares de policarbonato implementados.

En el gráfico 132 se puede observar que el captador con mayor rendimiento es el colector de tubos de vacío que tiene un coeficiente de pérdidas de 2,5, mientras que el de peor rendimiento es el captador ECOSUN con un coeficiente de pérdidas de 39,04.

Además, es importante recalcar que el calentador ECOSUN de polipropileno tiene un menor rendimiento que los colectores solares de policarbonato alveolar implementados y ambos tipos de calentadores no poseen cubierta, además tiene un mayor coeficiente de pérdida y su eficiencia óptica es apenas superior, por lo cual se puede concluir que bajo este punto de vista, es conveniente optar por un calentador solar de policarbonato sobre el calentador ECOSUN.

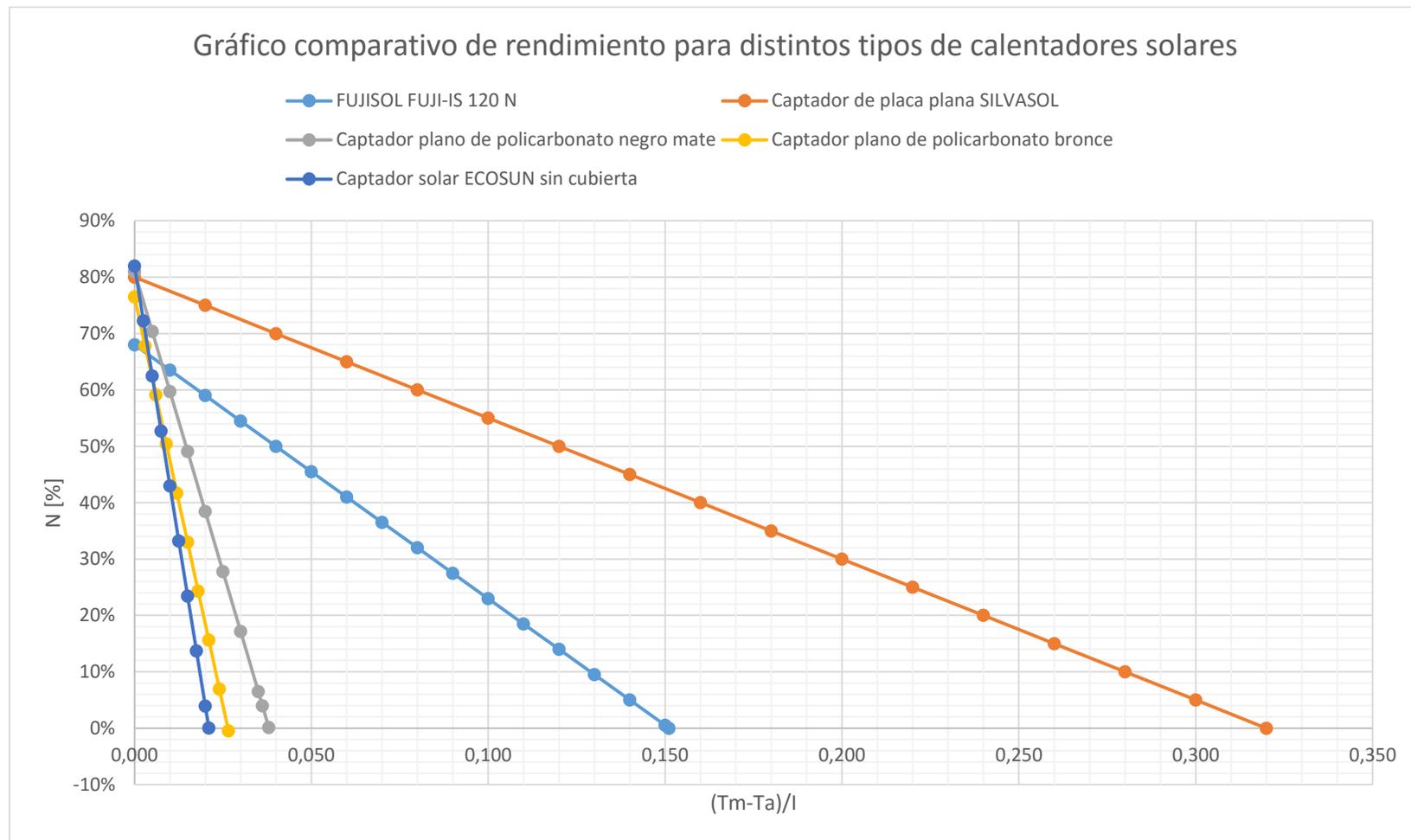


Figura 132 Gráfico comparativo de rendimiento de varios tipos de colectores solares con los colectores de policarbonato desarrollados.

5.3 Análisis del colector para calefacción de aire

Para el caso del colector de aire, se procedió a un análisis análogo a los colectores de agua, para lo cual se tomaron en cuenta 5 días del mes de noviembre de 2015 durante un periodo de tiempo de 10 minutos.

Tabla 62
Valores de rendimiento del colector para distintos días

Fecha	$(T_m - T_a)/I$	N [%]
05/11/2015	0,0044	66%
09/11/2015	0,0057	62%
12/11/2015	0,0055	63%
13/11/2015	0,0049	65%
18/11/2015	0,0058	62%

En la tabla 62 se aprecian los valores de rendimiento del colector solar en función de la relación $(T_m - T_a)/I$, los cuales se utilizaron para obtener la recta de eficiencia del colector mediante una regresión lineal que se muestra en la figura 133.

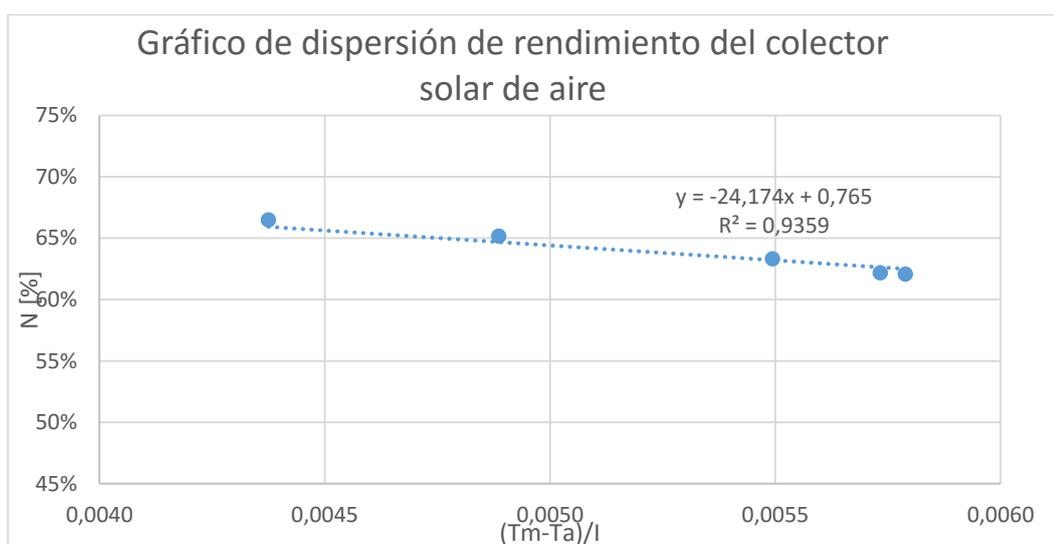


Figura 133 Gráfico de dispersión de rendimiento del colector de aire.

En la figura 133 se ha realizado un ajuste para los puntos de rendimiento obtenidos en la tabla 62, donde se tiene la siguiente ecuación:

$$N = -24,174 \left(\frac{T_m - T_a}{I} \right) + 0,765 \quad (50)$$

Con un coeficiente de correlación de 0,9359, lo cual indica que hay una muy buena correlación entre las variables.

Tabla 63

Errores del coeficiente de pérdida térmica del colector de aire.

Fecha	FR*UL		
	Valor real	Valor estimado	error %
05/11/2015	22,90872548		5,52%
09/11/2015	24,99403048		3,28%
12/11/2015	24,00834255		0,69%
13/11/2015	23,19908566	24,174	4,20%
18/11/2015	24,93571033		3,05%
Promedio	24,0091789		0,69%

En la tabla 63 se puede observar que el error promedio entre el valor estimado y real de FR*UL es de 0,69%, lo cual es un valor aceptable, además el error máximo es de 5,52% en el día 5 de noviembre.

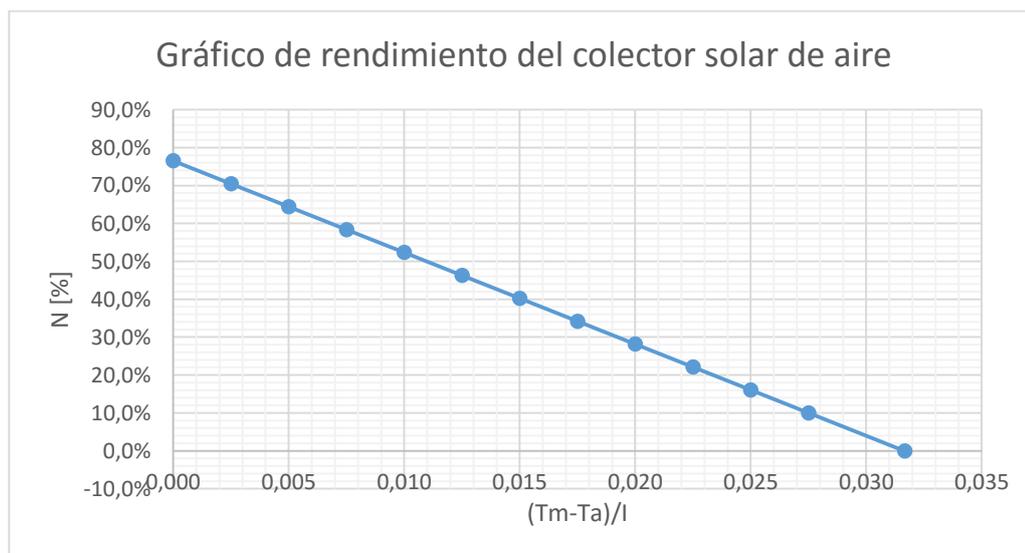


Figura 134 Gráfico de rendimiento del colector solar de aire.

La tabla 64 muestra los valores máximos de temperatura del fluido alcanzados durante el mes de noviembre para distintos valores de irradiación.

Tabla 64
Temperatura máxima del fluido durante el mes de noviembre de 2015.

Fecha	Irradiación	Temperatura de salida [°C]
05/11/2015	183,374	36,17
09/11/2015	182,080	35,30
12/11/2015	186,494	38,18
13/11/2015	182,901	36,42
18/11/2015	182,007	35,88

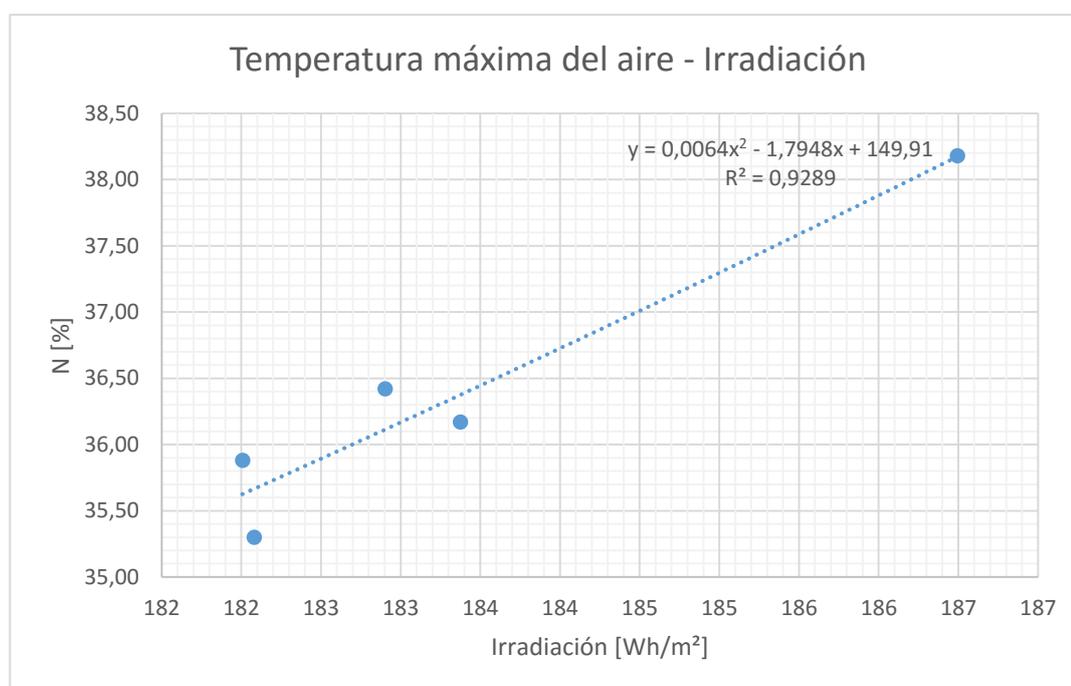


Figura 135 Gráfico de temperatura máxima del aire – Irradiación para el mes de noviembre de 2015.

La figura 135 evidencia un comportamiento cuadrático de la relación entre irradiación diaria y temperatura máxima del fluido, con un coeficiente de correlación de 0,9289. Tiene un valor pico de 38,18°C con una irradiación de 186,494 Kwh/m² y un valor mínimo de 35,30°C una irradiación de 182,080 Kwh/m².

En la tabla 65 se realizó una regresión lineal de la relación entre caudal e irradiancia para 5 días distintos, con el fin de obtener la ecuación de la recta con la pendiente y ordenada en el origen que permita describir con precisión el comportamiento de estas variables para el colector de aire.

Tabla 65
Valores de pendiente y ordenada para la relación caudal – irradiancia del colector solar de aire.

Variable	Irradiancia directa y difusa (0°) [W/m ²]	Cudal [ft ³ /min]
05/11/2015	1118,32	0,147
09/11/2015	1110,31	0,145
12/11/2015	1137,67	0,152
13/11/2015	1115,40	0,146
18/11/2015	1109,86	0,144
Parámetros de regresión lineal	pend.	ord.
	0,0002734	-0,15891
	r²	0,970

La tabla 65 muestra que con los valores obtenidos para el colector de aire se obtiene la siguiente ecuación:

$$Q = 0,0002734 * G - 0,15891 \quad (51)$$

Donde:

Q: Cudal [ft³/min]

G: Irradiancia directa y difusa [W/m²]

Con un valor de R² de 0,97 lo cual indica una fuerte correlación entre las variables.

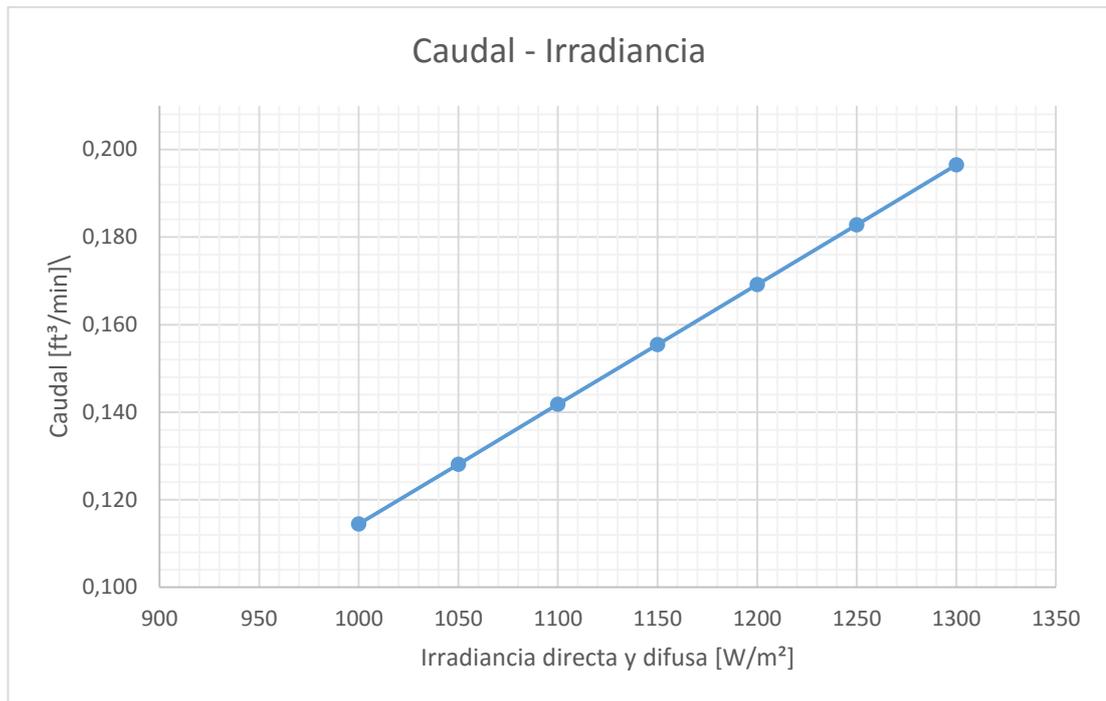


Figura 136 Gráfico de caudal – irradiancia para el colector solar de aire.

En la figura 136 se puede apreciar que el valor mínimo de irradiancia para el funcionamiento del sistema es de 1000 W/m², con lo cual se obtiene un caudal de 0,114 ft³/min y con un valor máximo de 1300 W/m² se obtiene 0,196 ft³/min.

CAPÍTULO 6

ANÁLISIS DE COSTOS

6.1 Costo de implementación

6.1.1 Construcción e implementación de la cubierta para calentamiento de agua y aire con policarbonato alveolar de 8mm.

Tabla 66
Costos de construcción de la cubierta.

N°	Rubro Global	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD
Sistema de Captación				
1	Colector Solar	3	\$ 80,00	\$ 240,00
	Estructura de apoyo	1	\$ 280,00	\$ 280,00
Sistema de acumulación				
2	Tanque de almacenamiento	2	\$ 60,00	\$ 120,00
	Aislamiento Térmico	2	\$ 30,00	\$ 60,00
Circuito hidráulico y Neumático				
3	Tubería PVC y accesorios	1	\$ 100,00	\$ 100,00
	Bomba	2	\$ 30,00	\$ 60,00
	Soplador	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Total				\$ 890,00

Donde:

- El sistema de captación consiste en la implementación de 3 colectores solares con policarbonato alveolar de 8mm, sus respectivos ductos de conducción de fluido y su estructura de apoyo.

- El sistema de acumulación consiste en la implementación de un tanque acumulador de agua para cada colector, con su respectivo aislamiento térmico y conductos para la entrada y salida de fluido
- Sistema hidráulico y neumático consiste en la implementación de bombas que permitan la recirculación de agua, un soplador para el funcionamiento de colector de calentador de aire, también consta de los tubos y accesorios de PVC que permiten el paso del fluido por los colectores.

6.1.2 Implementación del sistema de alimentación eléctrica.

Tabla 67
Costos del sistema de alimentación eléctrica.

N°	Rubro Global	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD
Sistema de Alimentación				
1	Panel Solar Fotovoltaico	1	\$ 320,00	\$ 320,00
	Batería	1	\$ 300,00	\$ 300,00
	Regulador de carga	1	\$ 30,00	\$ 30,00
	Total			\$ 650,00

Donde:

- Sistema de alimentación eléctrica consiste en la implementación de un panel solar fotovoltaico que abastece de energía al sistema, también está conformado por una batería de almacenamiento y un regulador de carga.

6.1.3 Implementación del sistema eléctrico de control y adquisición de datos.

Tabla 68
Costos del sistema eléctrico.

N°	Rubro Global	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD
Sistema de Control y adquisición de datos				
1	Microcontrolador	1	\$ 30,00	\$ 30,00
	Tarjetas PCB	2	\$ 10,00	\$ 20,00
Sensores				
2	Estación Meteorológica	1	\$ 260,00	\$ 260,00
	Piranómetro	1	\$ 80,00	\$ 80,00
	Caudalímetro	2	\$ 17,00	\$ 34,00
	S. Temperatura	12	\$ 6,00	\$ 72,00
	S. Nivel	4	\$ 10,00	\$ 40,00
Total				\$ 536,00

Donde:

- Sistema de control y adquisición de datos consiste en la implementación de un microcontrolador que se encarga de la lectura y el almacenamiento de datos provenientes de los diversos sensores instalados.

6.2 Costos Varios

Tabla 69
Costos varios.

N°	Rubro Global	Cantidad	Valor Unitario USD	Valor Total USD
1	Transporte estructura y colectores	Global	\$ 60,00	\$ 60,00
2	Movilización	Global	\$ 200,00	\$ 200,00
3	Materiales de oficina	Global	\$ 150,00	\$ 150,00
Total			\$ 410,00	

En la tabla 70 se presenta la totalidad de los costos directos inmersos en la investigación.

Tabla 70
Totalidad de costos de la investigación.

N°	Rubro	Valor Total USD
1	Subtotal 1	\$ 890,00
2	Subtotal 2	\$ 650,00
3	Subtotal 3	\$ 536,00
4	Subtotal 4	\$ 410,00
Total		\$ 2.486,00

Por lo tanto el costo total de investigación del proyecto de titulación “ANÁLISIS Y DESARROLLO DE UN PROTOTIPO UTILIZANDO POLICARBONATO ALVEOLAR DE 8 mm PARA CALENTAMIENTO DE AGUA Y CALEFACCIÓN DE AMBIENTE”, es de USD \$ 2.486,00 (dos mil cuatrocientos ochenta y seis con 00/100 dólares).

6.3 Rentabilidad del proyecto

6.3.1 Costos de implementación doméstica de un colector solar con policarbonato alveolar.

Para una instalación doméstica los costos variarían según los requerimientos del cliente, siendo básicamente los siguientes:

Tabla 71
Costos para una instalación doméstica.

Implementación de un calentador Solar de agua con Policarbonato Alveolar

Material	Cantidad	Costo Unitario USD	Costo total USD
Plancha de policarbonato 2m ²	1	\$ 45,00	\$ 45,00
Tubería y accesorios PVC	1	\$ 50,00	\$ 50,00
Tanque de almacenamiento con aislamiento térmico	1	\$ 90,00	\$ 90,00
Bomba	1	\$ 30,00	\$ 30,00
Estructura de apoyo (opcional)	1	\$ 100,00	\$ 100,00
Mano de obra	1	\$ 100,00	\$ 100,00
		Total Con estructura	\$ 415,00
		Total Sin estructura	\$ 315,00

6.3.2 Comparación con otros sistemas de calentamiento

Tabla 72
Características técnicas de una ducha eléctrica.

Ducha Eléctrica	
Modelo	Fame – Evidence
Potencia	5400 Watts
Costo	USD 50
Consumo diario en horas	0,5 horas
Consumo eléctrico mensual	81 KWh
Costo mensual de planilla eléctrica	USD 7,56



Tabla 73
Características técnicas del calefón a gas.

Calefón a Gas	
Modelo	Yang tw 083
Funcionamiento	Automático (utiliza pilas)
Costo	USD 600
Consumo diario en horas	0,5 horas
Consumo de gas mensual	1 cilindro
Costo del cilindro de gas	USD 4,00 (subsidiado)



Tabla 74
Características técnicas del colector solar con policarbonato.

Colector Solar con policarbonato

Funcionamiento	Recirculación forzada	
Costo	USD 315,00	
Potencia de la bomba	30 Watts	
Consumo diario en horas	0,5 horas	
Consumo eléctrico mensual	0,45 KWh	
Costo mensual de planilla eléctrica	USD 0,04	

Tabla 75
Tabla comparativa entre distintos sistemas de calentamiento de agua.

	Calefón a Gas	Ducha Eléctrica	Colector solar con policarbonato
Inversión Inicial	USD 600	USD 50	USD 315
Peligro	SI	NO	NO
Amigables con el medio ambiente	NO	SI	SI
Tiempo de vida útil	6 años	4 años	6 años
Consumo mensual	USD 4 (subsidiado)	USD 7,56	USD 0,04

Tabla 76
Proyección de costos a futuro de los distintos sistemas de calentamiento de agua.

Año	Calefón a Gas	Ducha eléctrica	Colector Solar con Policarbonato
0	\$ 600,00	\$ 50,00	\$ 315,00
1	\$ 648,00	\$ 143,60	\$ 315,48
2	\$ 696,00	\$ 237,20	\$ 315,96
3	\$ 744,00	\$ 330,80	\$ 316,44
4	\$ 792,00	\$ 424,40	\$ 316,92
5	\$ 840,00	\$ 568,00	\$ 317,40
6	\$ 888,00	\$ 661,60	\$ 317,88

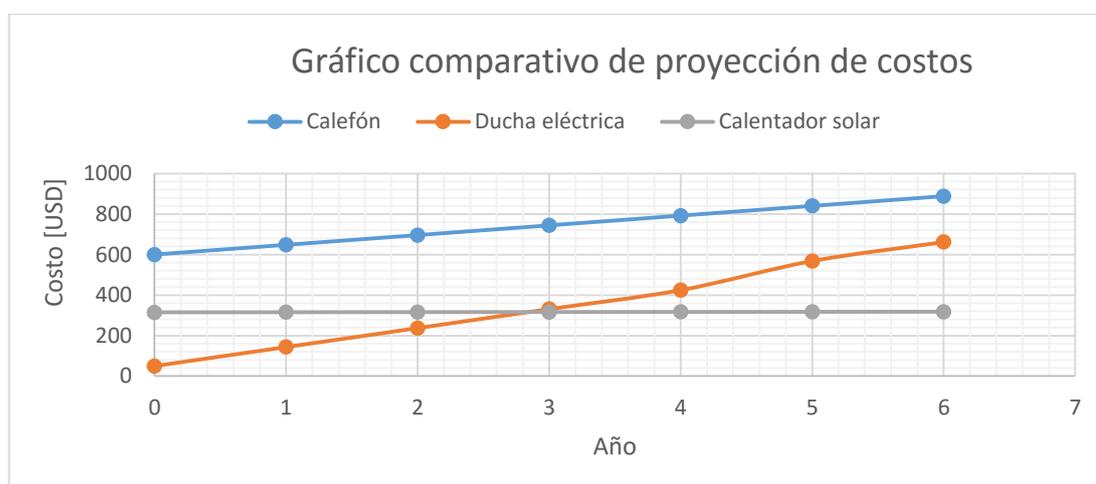


Figura 137 Gráfico comparativo de la proyección de costos de los sistemas de calentamiento.

Como podemos observar en la tabla 76, el calefón a gas tiene una mayor inversión inicial, es peligroso ya que al usar gas tóxico puede ser mortal para las personas. Al momento un cilindro de gas cuesta alrededor de 4 dólares, pero dentro del plan de gobierno se consideró quitar el subsidio del gas, por lo tanto un cilindro podría llegar a costar 30 dólares, lo cual representaría el mayor consumo mensual de los 3 sistemas.

La ducha eléctrica si bien en cierto tiene la menor inversión inicial de las 3 opciones, no tiene peligros y es amigable con el medio ambiente, tiene un consumo mensual elevado ya que este artefacto consume una alta capacidad de energía eléctrica.

Finalmente los colectores solares para calentamiento con policarbonato, tienen una inversión inicial media, son amigables con el medio ambiente y no son peligrosos, el consumo mensual eléctrico es mínimo ya que únicamente consta de una pequeña bomba.

En la figura 137 se observa que en 3 años el sistema de calentamiento con policarbonato igualaría el valor de la ducha eléctrica, a partir de este tiempo el sistema de calentamiento solar tiene una mínima pendiente de crecimiento, mientras que los otros dos sistemas aumentan a mayor escala.

El sistema de calentamiento solar de agua con policarbonato alveolar, comparado con otros tipos de colectores de la misma capacidad (120 Lt.), es mucho más económico, por ejemplo un calentador de agua solar con tubos al vacío de la marca Cotesa puede llegar a valer 1000 dólares.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

- La realización del presente proyecto de investigación ha proporcionado una alternativa a los sistemas solares de calentamiento de agua de baja temperatura, además cumplen con una doble funcionalidad al poder ser utilizados como techos o cubiertas, lo cual reduce el espacio necesario para la instalación.
- Cada colector solar es capaz de calentar 100 litros de agua por día según las pruebas realizadas con un área de captación de 2 m² a través de un sistema de circulación forzada con una bomba sumergible cuyo consumo eléctrico diario es de 22,8 W.
- El sistema de adquisición de datos implementado cumplió con la función de almacenar trece variables de temperatura, dos de caudal, una de humedad, una de velocidad de viento y una de irradiancia de forma satisfactoria y cuya información fue útil para realizar el posterior análisis de cada colector solar.
- El costo total del proyecto es de USD \$2486 debido a la cantidad de sensores y elementos de apoyo para el sistema, sin embargo el costo de implementación de USD \$315 del calentador solar lo hace muy rentable en el mercado con respecto a otros calentadores.
- El análisis comparativo determinó que el colector solar de policarbonato pintado de negro mate tiene un rendimiento mayor al colector de policarbonato bronce como se pudo apreciar en el capítulo de análisis y el fluido caloportador

alcanza una temperatura máxima en el colector negro de 46,72°C que supera a la temperatura máxima del colector bronce de 44,40°C.

- El calentador solar de policarbonato presentó un menor rendimiento que los calentadores solares de tubos de vacío y de cubierta simple, sin embargo comparado con un colector sin cubierta y sin aislamiento de polipropileno presenta un mayor rendimiento.
- El colector solar para calefacción de aire alcanzó una temperatura máxima de 38,18°C, sin embargo el costo y complejidad en el almacenamiento del calor de este tipo de instalaciones hacen que su aplicabilidad sea menor a una instalación para calentamiento de agua, por esta razón el sistema no sería eficaz en su aplicación.

7.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda el desarrollo de calentadores solares de policarbonato con cubierta simple o doble y aislamiento, para mejorar su rendimiento y comparar con otros colectores solares de este tipo.
- En días de muy baja radiación el incremento de temperatura en el colector es mínimo, por lo cual se recomienda la adaptación a un sistema auxiliar de apoyo en instalaciones para calentamiento de agua.
- La temperatura máxima alcanzada por los colectores solares lo hacen ideal en aplicaciones para calentamiento de agua de baja temperatura, por lo cual se recomienda su aplicación en climatización de piscinas y calentamiento de agua sanitaria en hogares, lo cual disminuiría considerablemente el costo debido a la utilización de gas y electricidad a corto y mediano plazo.

- Se recomienda realizar un monitoreo constante del prototipo, ya que al ser un colector en desarrollo es importante conocer el tiempo de vida útil del mismo y acciones de mantenimiento y reparación que sean necesarias con el paso del tiempo.
- La implementación de un sistema auxiliar fotovoltaico ayuda a disminuir el consumo eléctrico del sistema, sin embargo debido a que la bomba es de baja potencia, se recomienda prescindir de él, pues el costo del consumo eléctrico del sistema es muy bajo.
- Después de realizar pruebas de funcionamiento de la bomba y comparar con los resultados de los colectores solares, se recomienda un caudal de operación entre 200 y 300 l/h para obtener un rendimiento adecuado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cejudo, J. (2003). *Modelado térmico del captador solar plano*. Andalucía: IAER.
- Cengel, Y. (2006). *Macánica de Fluidos Fundamentos y aplicaciones*. México D.F.: McGraw-Hill.
- CONELEC. (2008). *Atlas Solar del Ecuador con Fines de Generación Eléctrica*. Quito: CIE.
- Fujisol S.L. (s.f.). *FujisolSolar*. Obtenido de <http://www.fujisol.com/mini/10.pdf>
- García, M. (1999). *Energía Solar Fotovoltaica y cooperación al desarrollo*. Madrid: IEPALA.
- Guevara, S. (2008). *Teoría para el diseño de calentadores de agua*. Lima: CEPIS.
- Instituto Tecnológico de Canarias. (2012). *Guía didáctica de Energía Solar*. Canarias: SPES.
- KSB. (2010). *Manual de entrenamiento: Selección y aplicación de bombas centrífugas*. Buenos Aires: KSB Compañía sudamericana de Bombas S.A.
- NEC. (2016). *Norma Ecuatoriana de la construcción (NEC)*. Obtenido de [http://www.normaconstruccion.ec/capitulos_nec_2015/NEC_SE_CG_\(cargas_no_sismicas\).pdf](http://www.normaconstruccion.ec/capitulos_nec_2015/NEC_SE_CG_(cargas_no_sismicas).pdf)
- Retscreen International. (2004). *retscreen.net*. Obtenido de <https://www.cityofboston.gov/climate/pdfs/Komhard%20-%20Solar%20water%20heating%20project%20analysis.pdf>
- Rule Industries. (2008). *Rule Pump Supply*. Obtenido de <http://store.waterpumpsupply.com/runo12vodcbi.html>

- Silvasol. (2013). *Helioconfort*. Obtenido de <http://www.helioconfort.com/catalogos/CATALOGO%20TERMICO.pdf>
- Sistemas hidroneumáticos c.a. (2014). *Sishica*. Obtenido de <http://www.sishica.com/sishica/download/Manual.pdf>
- SOLTEC. (2016). *SOLTEC Energía solar - Mecánica de precisión*. Obtenido de <http://www.soltececuador.com/productos/sistema-para-piscinas/>
- SPolytech. (2015). *Grupo Viceva*. Obtenido de http://www.grupoviceva.com/descargas/INSTALACION_CORRECTA_DE_POLICARBONATO.pdf
- Stackhouse, P. (2015). *NASA Atmospheric Science Data Center*. Obtenido de <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov>
- Tobajas, C. (2012). *Energía Solar Térmica para Instaladores*. Madrid: Ceysa.