

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE
PRUEBAS CON SISTEMA DE MONITOREO PARA
PRÁCTICA DE LABORATORIO EN UN COLECTOR
SOLAR PLANO

PRESENTADO POR:

FRANCISCO GABRIEL GRANADOS RIVAS
JOSÉ ALFREDO RECINOS AMAYA
LUIS ALBERTO SANDOVAL QUINTANILLA

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2018

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.Sc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

M.Sc. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DIRECTOR:

ING. RIGOBERTO VELÁSQUEZ PAZ

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

INGENIERO MECÁNICO

Título:

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE
PRUEBAS CON SISTEMA DE MONITOREO PARA
PRÁCTICA DE LABORATORIO EN UN COLECTOR
SOLAR PLANO**

Presentado por:

**FRANCISCO GABRIEL GRANADOS RIVAS
JOSÉ ALFREDO RECINOS AMAYA
LUIS ALBERTO SANDOVAL QUINTANILLA**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RIOS LAZO

SAN SALVADOR, JUNIO DE 2018

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

M.Sc. ING. GUSTAVO SALOMÓN TORRES RIOS LAZO

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios Padre, por haberme ayudado a alcanzar este logro. Sin Él nada de esto habría sido posible.

A mi madre María Luisa Quintanilla, porque ha sido amiga y apoyo incondicional para mí. No fue fácil pero su ayuda y su amor fueron los elementos fundamentales durante todo este camino, y porque la enseñanza que no se imparte en la universidad, y los valores que lo hacen crecer a uno como persona, se la debo a ella. A mi tía Ada porque ha sido una segunda mamá que me ha querido, cuidado y aconsejado. A mi padre Alberto Arturo Sandoval, porque a pesar de todo siempre me dio ánimos y me motivó siempre a encomendarme y rezarle a Dios Padre.

A mi novia Alieth López, porque ha estado siempre a mi lado, ayudándome a levantar el espíritu en los momentos difíciles, a celebrar los logros alcanzados, y a creer siempre en mí. Así como a sus padres Rafael López y Lorena de López, una parte de este logro se los debo a ellos, por su apoyo en los momentos difíciles.

Al Ingeniero Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo, por sus enseñanzas a lo largo de mi formación académica, por sus consejos y toda su ayuda brindada a mi persona. Porque además de ser un docente y asesor del trabajo de graduación, demostró ser un amigo.

A TODOS los compañeros y amigos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, por la camaradería y por los buenos momentos compartidos. En especial a Manuel Arévalo, Leif Alfaro, Fermín Orellana, Guillermo Rivas, Armando Beltrán y Vladimir Espinoza. Porque en algún punto de la carrera, nos reunimos en la Big

House a estudiar en equipo y de esa manera colaboraron con mi persona a salir adelante con la carrera.

A todos los miembros a lo largo de las diferentes generaciones de la Big House, una casa en la que compartimos bonitos momentos. A Andrés Merino, (Q.E.P.D.) un gran guía y amigo, y un ejemplo de Ingeniero Mecánico. Al Cheboy, Bobby, Peter, Chivazo, Lalo, Bolaños, Arriola, Manu y Jonathan Huevo, gracias amigos.

Con especial mención a Luis Salalá por ser un excelente docente y amigo, que siempre tuvo la paciencia de explicar y aclarar dudas en distintas materias, y a todas las personas que en algún momento vivieron en la casa, muchas gracias.

A todas aquellas personas que directa o indirectamente, dentro y fuera de la Universidad de El Salvador que han influido en mi formación como ingeniero mecánico, muchas gracias.

Por último, con mucha alegría y cariño, a mis compañeros de tesis Francisco Granados y Alfredo Amaya, tigres... ¡Lo logramos!

Luis Alberto Sandoval Quintanilla

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer primero a Dios padre, por darme la fortaleza y confianza de continuar con mis estudios en el transcurso de estos años, a mi madre María de los Ángeles Rivas, a mis abuelos que estuvieron conmigo desde el comienzo de mis estudios, especialmente en aquellos momentos más difíciles de mi vida.

A todos aquellos compañeros, maestros, instructores que me ayudaron a forjarme en este camino, por regalarme sus consejos y alentarme para darme fuerza en los momentos difíciles. Agradecer a mi esposa Sandra Beatriz por apoyarme en estos últimos años, a mis hijos Gabriel y Alessia que fueron la fuente de energía para la culminación de esta meta.

Agradecer a mis compañeros de tesis, Luis Alberto Sandoval, José Alfredo Amaya, más que unos compañeros somos amigos, que luchamos por conseguir nuestra meta y que cada materia que cursamos era un reto más de cada ciclo por salir victoriosos, y de manera muy especial a nuestro asesor ingeniero Salomón Torres Ríos Lazo, que fue el encargado de instruirlos en nuestro trabajo de graduación, por sus consejos en las diferentes materias que impartió y que tuve la oportunidad de cursarlas.

Quiero agradecer a Vladimir Espinoza, un compañero un amigo de estudio que estuvo presente en los momentos difíciles del proyecto, también al Ing. Salalá por la ayuda y consejos en nuestro trabajo de graduación.

También quiero manifestar de manera muy especial el siguiente agradecimiento al Lic. Oscar Rene Álvarez, la persona que siempre creyó que algún día alcanzaría la culminación de esta carrera, el padre, el guía, el consejero que tuve la oportunidad de tenerlo en todos estos años, en los momentos difíciles fue el

pilar para continuar con mis estudios, desde bachiller hasta la finalización de mi carrera. Este logro no sería posible sin su ayuda, a su esposa Rosy de Álvarez la que ha desempeñado en estos años como mi madre, por la paciencia, consejos y sus correcciones cuando fueron necesarias, a mi tía Summer por sus consejos y ayuda incondicional en todos estos años.

Francisco Gabriel Granados Rivas

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradecer a mi papá, Justo Recinos por su confianza y apoyo incondicional, a mi mamá Lucia Amaya por sus consejos durante estos años de formación profesional, así como de formación personal ya que en la casa es que empieza la primera educación y todo lo que soy se lo debo a ella. Este logro está dedicado especialmente para ustedes ya que ustedes fueron mi fuente de energía para no rendirme en el camino.

Agradecer de forma muy especial a mis hermanos por creer en mí, apoyarme siempre que lo necesito, a mi tía Sofía que ha sido mi segunda madre, a mi primo Nelson que ha sido un hermano y amigo, mis primas Maite y Mary, a quienes les agradezco por su apoyo y consejos.

A la Universidad de El Salvador, a los docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica y en especial al Ingeniero Gustavo Salomón Torres Ríos Lazo por sus consejos y apoyo brindado en mi formación profesional.

Agradecer a todos los compañeros y amigos con los cuales tuve el gusto de compartir tantos años, Leif, Julio, Esmeralda, Armando Beltrán, Welf, Vladimir Espinoza y a todos los compañeros con los que conviví en la ASEIM.

A la Big House, la casa en la que pasé y compartí muy buenos momentos y en la que hice muy buenos amigos, Manu, Salalá, Peter, Arriola, Jona, Bobby, Bolaños, Suria y a todos con los que conviví durante mi estadía.

A mis compañeros de tesis, Luis Alberto Sandoval Quintanilla y Francisco Gabriel Granados Rivas, los cuales considero mis amigos.

José Alfredo Recinos Amaya

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE GRÁFICAS	xii
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xiv
NOMENCLATURA	xvi
INTRODUCCIÓN	xix
OBJETIVOS	xx
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.1.1 Antecedentes generales de la energía solar	1
1.1.2. Antecedentes de la energía solar en El Salvador	7
1.2. Fundamentos de la transferencia de calor.....	10
1.2.1. Conducción	10
1.2.1.1. Ley de Fourier.....	10
1.2.2. Convección.	11
1.2.2.1. Ley de Enfriamiento de Newton.....	12
1.2.3. Radiación.	13
1.2.3.1. Ley de Stefan Boltzmann.....	13

1.2.4.	Absortividad, reflectividad y transmisividad.....	15
1.3.	Características energéticas del Sol	17
1.3.1.	Energía solar.....	17
1.3.2.	Radiación solar.....	19
1.3.3.	Variaciones de la radiación solar.....	22
1.3.4.	Movimientos relativos entre la Tierra y el Sol.....	23
1.3.4.1.	Declinación solar (δ).....	24
1.3.5.	Coordenadas Celestes.....	26
1.3.6.	Irradiación en El Salvador.	27
1.4.	Aplicaciones generales de los sistemas de energía solar térmica.....	29
1.5.	Ventajas y desventajas del uso de colectores solares planos	32
CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN A LOS COLECTORES SOLARES.....		34
2.1.	Colectores solares térmicos.....	34
2.2.	Tipos de colectores.....	36
2.2.1.	Colectores solares planos.	36
2.2.1.1.	Tipos de colectores solares planos.....	38
2.2.1.2.	Efecto termosifón.....	39
2.2.2.	Colector solar de tubos de vacío.....	40
2.3.	Conexión de los colectores solares térmicos.....	42
2.3.1.	Conexión en serie.	42
2.3.2.	Conexión en paralelo.	43
2.3.3.	Conexión mixta de colectores.	44

2.4. Componentes básicos de un colector solar	45
2.4.1. Convertidor.....	45
2.4.2. Circuito de fluido térmico.....	46
2.4.3. Aislamiento térmico.....	47
2.4.4. Caja.....	48
2.4.5. Cubierta.....	48
2.5. Eficiencia de los colectores.....	49
CAPÍTULO III: ETAPA DE DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR.....	51
3.1. Determinación del prototipo a diseñar	51
3.2. Análisis térmico del colector	53
3.3. Análisis del colector y del tanque acumulador como un solo sistema .	61
3.4. Análisis de la presión en el tanque.....	72
3.5. Comportamiento del colector solar	74
CAPÍTULO IV: MONITOREO Y PRESUPUESTO.....	78
4.1. Componentes del sistema de monitoreo.....	78
4.1.1. Sensor de presión.....	79
4.1.2. Sensor de temperatura.....	81
4.1.3. Sensor de irradiancia.....	84
4.1.4. Arduino MEGA ADK.....	86
4.1.4.1. Sistema para la programación de las variables SW Arduino. .	88
4.2. Presupuesto.....	90
4.2.1. Estructura de soporte del tanque.....	91

4.2.2. Tanque acumulador	92
4.2.3. Colector solar plano	95
4.2.4. Otras partes para el funcionamiento del equipo	97
4.3. Presupuesto general.....	99
CAPÍTULO V: CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	101
5.1. Construcción de las bases tanque y colector.....	101
5.2. Construcción del tanque acumulador	102
5.3. Construcción del colector solar.....	106
5.4. Protección del sistema de monitoreo y ensamble general.....	110
CAPÍTULO VI: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	111
6.1. Pruebas del sistema tanque-colector.....	111
6.1.1. Pruebas en el colector con condiciones normales de operación. 112	
6.1.1.1. Resumen de resultados de pruebas del colector en condiciones normales.	118
6.1.1.2. Análisis de resultado para la prueba normal del colector.	119
6.1.2. Pruebas en el colector sin la cubierta de vidrio.	120
6.1.2.1. Análisis del colector sin cubierta.....	122
6.1.3. Pruebas en el colector con cubierta alternativa (plástico transparente)	122
6.1.3.1. Análisis del colector con cubierta alternativa	124
6.1.4. Pruebas en el colector en vacío (sin líquido en su interior).	124
6.1.4.1. Análisis de pruebas de colector solar en vacío.....	125

6.1.5. Pruebas en el colector de factores que afectan al equipo, tanto de sombra como suciedad en el vidrio	125
6.1.5.1. Resumen de resultados de pruebas en condiciones normales del colector.	128
6.1.5.2. Análisis de resultado para la prueba en el colector con suciedad y sombra.	129
6.1.6. Pruebas en el equipo, simulando un uso cotidiano (cuando se quita y se agrega fluido)	130
6.1.6.1. Análisis de resultado para la prueba en el colector simulando el uso cotidiano	132
6.2. Desviación entre datos calculados y reales.	134
CONCLUSIONES	135
RECOMENDACIONES.....	137
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	138
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
ANEXOS.....	142
A1: código del microcontrolador	142
A2: manual de instalación del equipo	145
A3: guías de laboratorio	155
A4: hoja de control para recolección de datos.....	200
A5: escala de volumen para visualizar el nivel del tanque	201
A6: planos	202

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Máquina solar de Abel Pifre, impulsando una pequeña imprenta.	3
Figura 2. Colector cilindro-parabólico.	4
Figura 3. Horno solar (de gran tamaño) construido por el Padre Himalaya.	4
Figura 4. Actinógrafo tipo Robitzch (izquierda). Heliógrafo tipo Campbel Stokes (derecha).	8
Figura 5. Conducción de calor a través de una pared plana grande, de espesor Δx y área A. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	10
Figura 6. Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	12
Figura 7. Perfil de velocidad y temperatura en una superficie en convección. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	12
Figura 8. La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	14
Figura 9. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	14
Figura 10. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.	15
Figura 11. Diferentes formas de radiación solar.	22
Figura 12. Ángulos que forma la Tierra con respecto al plano de la Eclíptica. .	24
Figura 13. Posición relativa del plano del Ecuador y de la eclíptica que define la declinación solar obtenida de Prontuario Solar de México.	25
Figura 14. Representación gráfica de las coordenadas celestes.	26
Figura 15. Mapa del promedio de la radiación solar anual en El Salvador.	28

Figura 16. Mapa del promedio anual de brillo solar en El Salvador. Proyecto de Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar. (SWERA por sus siglas en inglés).	29
Figura 17. Colector solar plano con cubierta.	36
Figura 18. A) Colector plano sin cubierta. B) Colector planos con cubierta.	38
Figura 19. Efecto termosifón que ocurre en un sistema de los colectores solares planos.	39
Figura 20. Colector solar plano de tubos de vacío, (Modelo: Vitosol 200-T SP2, marca VIESSMANN).....	40
Figura 21. Representación interna de un tubo de vacío.	41
Figura 22. Conexión en serie de un grupo de 3 colectores.....	42
Figura 23. Conexiones de un grupo de 4 colectores en paralelo.	43
Figura 24. Conexión de colectores serie - paralelo.....	44
Figura 25. Esquema del colector solar.....	45
Figura 26. Colector a diseñar.....	51
Figura 27. Esquema del colector completo, con sus respectivas entradas y salidas de calor.	53
Figura 28. Esquema del colector, con el calor de entrada y los de salida.	55
Figura 29. Circuito térmico de Q_1	57
Figura 30. Circuito térmico de Q_2	59
Figura 31. Esquema del sistema colector-tanque.	61
Figura 32. Esquema del tanque acumulador con las pérdidas en forma de calor correspondiente.	63
Figura 33. Esquema del tanque acumulador, con los elementos que lo rodean.	64
Figura 34. Circuito térmico de las resistencias del tanque acumulador.	65

Figura 35. Esquema y circuito térmico de la parte lateral del tanque acumulador.	68
Figura 36. Circuito térmico del tanque completo.....	70
Figura 37. Esquema para la ubicación de los sensores en el equipo.	78
Figura 38. Sensor de presión.....	81
Figura 39. Representación del efecto termoeléctrico.....	83
Figura 40. Sensores de temperatura.	84
Figura 41. Sensor de irradiancia.....	86
Figura 42. Arduino MEGA ADK.....	87
Figura 43. Vista de la interfaz de Arduino.	88
Figura 44. Programación en Arduino.	89
Figura 45. Estructura de soporte del tanque acumulador.	91
Figura 46. Tanque acumulador, envoltura de aislante y lámina protectora.....	93
Figura 47. Estructura de soporte del colector solar.....	94
Figura 48. Desglose de los elementos que constituyen el colector solar.....	96
Figura 49. Soporte del colector y de tanque acumulador.....	102
Figura 50. Formando el cilindro para el tanque acumulador.....	103
Figura 51. Lámina de cilindro rolada, tapaderas fabricadas y niples para accesorios adaptados.	103
Figura 52. Soldadura de tanque acumulador.....	104
Figura 53. Limpieza de rebabas de soldadura.....	104
Figura 54. Proceso de insulación del tanque acumulador.	105
Figura 55. Tanque acumulador finalizado.....	105
Figura 56. Caja de lámina galvanizada.....	106
Figura 57. Fabricación de placa absorbente.....	107
Figura 58. Fabricación de serpentín.	108

Figura 59. Uniendo con soldadura placa absorbente al serpentín.....	108
Figura 60. Instalación de aislante al cajón del colector.....	109
Figura 61. Representación del estado de nubosidad en el cielo. Tomada de “la meteorología del siglo XXI”	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Variables de diseño.....	52
Tabla 2 Descripción de los sensores del esquema del equipo.	79
Tabla 3. Materiales e insumos de la estructura del tanque acumulador.	92
Tabla 4. Materiales e insumos del tanque acumulador.....	93
Tabla 5. Materiales e insumos de la estructura del colector.	95
Tabla 6. Materiales e insumos para la construcción del colector solar.	96
Tabla 7. Materiales e insumos necesarios para la instalación del sistema de control.....	98
Tabla 8. Costos por etapa y costo total del proyecto.	100
Tabla 9. Tiempo de construcción por etapa y total de todo el proyecto.....	100
Tabla 10. Registro de datos en el primer día de pruebas en condiciones normales de operación.	113
Tabla 11. Registro de datos en el segundo día de pruebas en condiciones normales de operación.	114
Tabla 12. Registro de datos en día 3 de pruebas en condiciones normales de operación.....	116
Tabla 13. Resumen de temperaturas a la entrada del colector.	118
Tabla 14. Resumen de temperaturas a la salida del colector.	119
Tabla 15. Resumen de temperaturas en la placa absorbente del colector.	119
Tabla 16. Resumen de temperaturas en el tanque acumulador.	119
Tabla 17. Registro de datos de día de prueba del colector sin cubierta de vidrio.	121
Tabla 18. Registro de datos de día de pruebas con cubierta alternativa en colector.	123
Tabla 19. Registro de datos de día de pruebas con el colector vacío.....	124

Tabla 20. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 1. ...	125
Tabla 21. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 2. ...	126
Tabla 22. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 3. ...	126
Tabla 23. Resumen de temperaturas a la entrada del colector con suciedad y sombra.....	128
Tabla 24. Resumen de temperaturas a la salida del colector con suciedad y sombra.....	128
Tabla 25. Resumen de temperaturas en la placa absorbente del colector con suciedad y sombra.....	129
Tabla 26. Resumen de temperaturas en el tanque acumulador con suciedad y sombra.....	129
Tabla 27. Pruebas simulando uso cotidiano, día 1.	130
Tabla 28. Pruebas simulando uso cotidiano, día 2.	130

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 1. Espectro de radiación solar, curva estándar, con constante solar de 1,353 W/m ² comparado con la radiación de cuerpo negro.	20
Gráfico 2. Trayectoria solar en un día, para los meses de junio a diciembre del 2017, en la Universidad de El Salvador.	21
Gráfico 3. Comparativa de eficiencia entre colectores planos y colectores de tubo de vacío.	50
Gráfico 4. Temperatura del colector durante un día de operación.	74
Gráfico 5. Ritmo de cambio de la temperatura del colector en función de las horas del día.	75
Gráfico 6. Representación de la pérdida de temperatura que se da en el tanque, en función del tiempo.	76
Gráfico 7. Eficiencia del colector solar.	77
Gráfico 8. Irradiancia para el primer día de operación.	113
Gráfico 9. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el primer día.	114
Gráfico 10. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el segundo día.	115
Gráfico 11. Irradiancia para el segundo día de operación.	116
Gráfico 12. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el tercer día.	117
Gráfico 13. Irradiancia para el segundo día de operación.	118
Gráfico 14. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el día de pruebas sin la cubierta de vidrio.	121
Gráfico 15. Irradiancia en el colector durante el día de pruebas sin cubierta de vidrio.	122

Gráfico 16. Temperaturas en el sistema, con cubierta alternativa.	123
Gráfico 17. Irradiancia en el transcurso de las pruebas en el colector con cubierta alternativa.	124
Gráfico 18. Comportamiento de las diferentes temperaturas monitoreadas en el sistema durante el último día de pruebas en el equipo, bajo los factores que afectan al equipo.....	127
Gráfico 19. Irradiancia en el transcurso de las pruebas en el colector, bajo factores que lo afectan.....	127
Gráfico 20. Temperaturas en el sistema simulando un uso cotidiano.	131
Gráfico 21. Irradiancia en el sistema simulando un uso cotidiano.	131
Gráfico 22. Comparación de las diferentes temperaturas monitoreadas cuando se contaba con cubierta alternativa y la cubierta de vidrio.....	133
Gráfico 23. Comparación de las irradiancias correspondientes al momento de las pruebas.	133

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Conducción de calor, regida bajo la Ley de Fourier para el caso de transferencia de calor unidireccional.....	11
Ecuación 2. Convección de calor, regida bajo la Ley de enfriamiento de Newton.	13
Ecuación 3. Radiación de calor, regida bajo la Ley de Stefan Boltzmann de un cuerpo negro de radiación térmica hemisférica.	13
Ecuación 4. Radiación de calor, regida bajo la Ley de Stefan Boltzmann que describe la potencia emisiva superficial de una superficie real.....	14
Ecuación 5. Son las fracciones de radiación absorbidas, reflejadas y transmitidas.	16
Ecuación 6. Propiedades ópticas de los materiales.....	16
Ecuación 7. Para superficies opacas para superficies opacas $\tau=0$	16
Ecuación 8. Para los gases la reflectancia está ausente, $\rho=0$	17
Ecuación 9. Balance de energía realizado a la placa.	55
Ecuación 10. Calor útil del colector.....	55
Ecuación 11. Eficiencia general del colector.....	55
Ecuación 12. Ecuación general para colectores planos.....	56
Ecuación 13. Resistencia equivalente para la pérdida de calor Q_1 en el colector.	57
Ecuación 14. Número de Nusselt.....	57
Ecuación 15. Número de Rayleigh.....	58
Ecuación 16. Resistencia equivalente para la pérdida de calor Q_2 en el colector.	59
Ecuación 17. Balance de energía entre el colector y el tanque.	61
Ecuación 18. Calor perdido en el tanque.	61

Ecuación 19. Expresa la relación del calor útil con el calor perdido en el tanque.	62
Ecuación 20. Resistencia equivalente del tanque almacenamiento.....	63
Ecuación 21. Resistencia equivalente para la pérdida de calor Q_2 en la parte transversal del tanque acumulador Req_1	65
Ecuación 22. Resistencia equivalente para la parte lateral izquierda del tanque acumulador.	68
Ecuación 23. Resistencia equivalente para la parte lateral derecha del tanque acumulador.	69
Ecuación 24. Sumatoria de las resistencias equivalentes totales.	70

NOMENCLATURA

A : Área.

A_S : Área superficial

A_T : Área transversal.

a_1 : Coeficiente de pérdidas lineal.

a_2 : Coeficiente de pérdidas por radiación.

α : Absortividad.

β : Coeficiente de expansión volumétrica.

ΔT : Diferencia de temperatura.

Δx : Diferencia de espesor.

e : Espesor.

\dot{E} : Energía.

ε : Emisividad.

G : Irradiancia.

g : Aceleración gravitacional.

G_{abs} : Radiación absorbida.

G_{tr} : Radiación transmitida.

G_{ref} : Radiación reflejada.

Gr : Numero de Grashof.

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección.

I_{sc} : Constante solar.

k : Coeficiente de conductividad térmica.

L : Longitud

l_c : Longitud característica.

η : Eficiencia.

η_0 : Eficiencia óptica.

Nu : Número de Nusselt.

Pr : Número de Prandtl.

Ra : Número de Rayleigh.

R_{eq} : Resistencia equivalente.

ρ : Reflectividad.

r : Radio

T : Temperatura.

T_s : Temperatura de la superficie.

α : ángulo cenital

T_{cap} : Temperatura de la placa absorbente.

T_{amb} : Temperatura del ambiente.

τ : Transmisividad.

ν : Viscosidad cinemática del fluido.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann.

INTRODUCCIÓN

En la rama de la industria, comercio e incluso en el hogar, siempre ha sido necesario el calentamiento del agua para uso personal o para ser utilizada dentro de un proceso industrial.

Por suerte, se cuenta con la energía en forma de calor proveniente del Sol, a través de la radiación. Aprovechándola a través de dispositivos denominados “colectores solares”, que para el caso del presente proyecto es un colector solar plano (más adelante se detalla en que consiste).

A continuación, se realiza un recorrido desde los métodos de transferencia de calor, hasta el detalle del prototipo determinado para su construcción. Se ha elaborado una propuesta de un banco de pruebas en un colector solar plano, para la asignatura de “Energía Solar Térmica” de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador.

El prototipo determinado, es un colector solar plano, con cubierta de vidrio, con tubería de cobre tipo serpiente, con una placa absorbente de cobre, adaptada en el contorno de la tubería para mejorar la conducción de calor. Se han realizado los cálculos pertinentes para el correcto dimensionamiento del colector solar, así como el del tanque acumulador. Posteriormente se han realizado diversas pruebas al equipo, para comprobar que este funcione correctamente y no presente dificultades al momento de realizar los laboratorios.

OBJETIVOS

Objetivo general:

- Diseñar y construir un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano, con fines didácticos para la cátedra de Energía Solar Térmica.

Objetivos específicos:

- Implementar en el diseño del colector solar un sistema de monitoreo que permita medir, presión en tanque y temperatura en distintos puntos del sistema.
- Adecuar el diseño del banco del colector solar de tal manera que el equipo no sea fijo (que sea montable y desmontable).
- Elaborar las guías de laboratorio para las prácticas asociadas a la asignatura Energía Solar Térmica.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

1.1.1 Antecedentes generales de la energía solar

Los primeros usos de la energía solar se pierden en la lejanía de los tiempos. No obstante, por algunas tablillas de arcilla halladas en Mesopotamia, se sabe que hacia el año 2000 AC, las sacerdotisas encendían el fuego sagrado de los altares mediante espejos curvados de oro pulido.

La utilización de energía solar es de larga data como se ha hecho mención y es que también los griegos son conocidos en la historia por cómo Arquímedes destruyó la flota romana que sitiaba a Siracusa mediante el uso de espejos que concentran la radiación solar. Luego los romanos y griegos supieron utilizar la radiación solar para disminuir cargas térmicas en sus casas. Además, el conocimiento les sirvió para diseñar ciudades, gran parte de este conocimiento quedó en los trabajos del arquitecto romano Vitruvio.

Antes del Siglo XIX se hicieron interesantes experimentos en la construcción de fuentes y artefactos que aprovechaban el calor solar. Hubo gran interés por espejos concentradores en los siglos XVII y XVIII. El caso más notable fueron los trabajos de Antoine-Laurent de Lavoisier. En el siglo XVIII Lavoisier hizo importantes trabajos en física utilizando hornos solares como fuente de calor. En particular, demostró el principio de conservación de la masa o materia, también demostró que el diamante estaba hecho de carbón y pudo fundir platino a través de un horno formado por dos láminas curvadas de vidrio, las cuales estaban montadas en una lente biconvexa, relleno el espacio entre láminas con alcohol, la lente constaba de un diámetro de 130 cm, y experimentó reduciendo

la distancia focal del mismo, hasta llegar al grado de alcanzar los 1,760 °C, (punto de fusión del platino).

Otro aporte a la energía solar lo proporcionó George Louis Leclerc (1707-1788) quién fabricó un horno solar compuesto por 360 espejos con un foco común e hizo una demostración en los jardines del Palacio de Versalles (Francia), encendiendo una pila de leña a 60 m.

Pero el primer colector solar plano fue fabricado por el suizo Nicholas de Saussure (1740-1799), y estaba compuesto por una cubierta de vidrio y una placa metálica negra encerrada en una caja con su correspondiente aislamiento térmico. Este colector solar se utilizó para cocinar alimentos que se introducían en su interior.

En el siglo XIX Augustin Mouchot hizo numerosos experimentos para convertir la energía solar en otras formas de energía, más específicamente en la generación de vapor. Mouchot fue pionero en este campo, fabricando varias máquinas de vapor impulsadas por energía solar, llegó a crear una máquina que producía hasta 1.5 kW (bajo rendimiento ya que utilizaba menos del 3% del calor que recibía). Pero, estos inicios de la energía solar en el siglo XIX ya la presentaban como una potencial alternativa de fuente de energía, comparada a la del carbón. Especialmente en lugares con alta radiación, Mouchot apuntó a trabajar con espejos cónicos. Su máquina de mayor tamaño la construyó en Tours, Francia.

En 1874 se instaló en Las Salinas (Chile) un destilador solar pasivo, consistente en 4,700 m² de superficie acristalada que producían 23,000 litros de agua dulce al día. Este destilador funcionó durante 40 años hasta que fue traída el agua mediante una tubería desde Antofagasta.

Abel Pifre, fue un contemporáneo de Mouchot, y construyó también motores solares, y utilizó la exposición de París del año 1878, para presentar sus proyectos. El más representativo fue una máquina solar haciendo funcionar una imprenta como la que se ve en la figura a continuación:

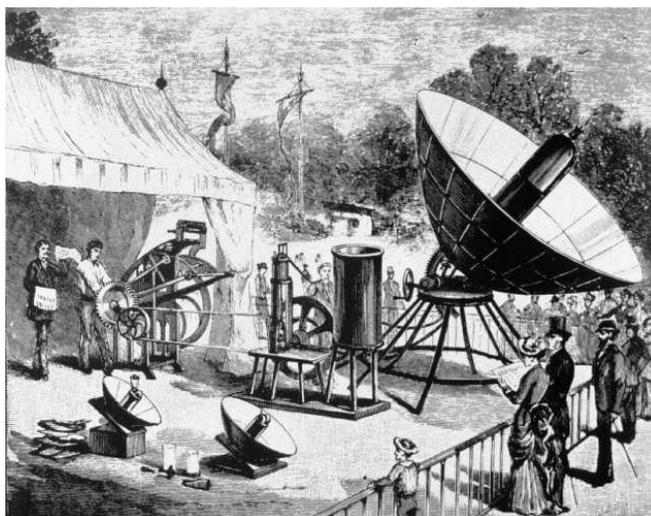


Figura 1. Máquina solar de Abel Pifre, impulsando una pequeña imprenta.

Además, como dato, el primer colector cilíndrico-parabólico fue ideado por el norteamericano John Ericsson en 1883. Este utilizaba una superficie reflectora cilíndrica con forma parabólica. El positivo pivotar alrededor de un eje vertical para seguir el Sol. Según Ericsson, su invento producía 0.7 kW por cada 9.3 m² de superficie reflectora, como la que se muestra a continuación:

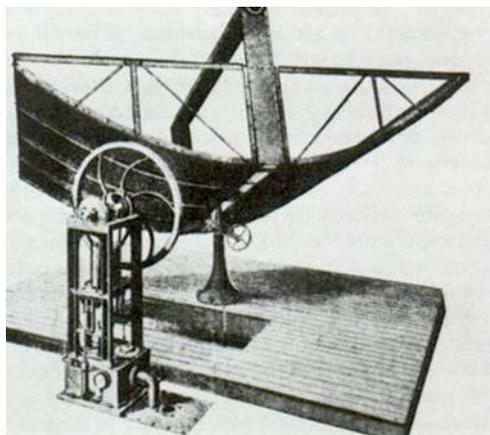


Figura 2. Colector cilindro-parabólico.

El sacerdote católico, científico e inventor portugués Manuel Antonio Gomes mejor conocido como “El Padre Himalaya”, construyó un gran horno solar, con una estructura de aspecto moderno. Constaba con un gran colector en forma de trompa parabólica de alrededor de 13 metros de alto, cubierto con pequeños espejos planos de 5 cm x 10 cm, con el objetivo de llegar a fundir metales, el principal problema de este equipo era su gran tamaño, como se observa a continuación¹:

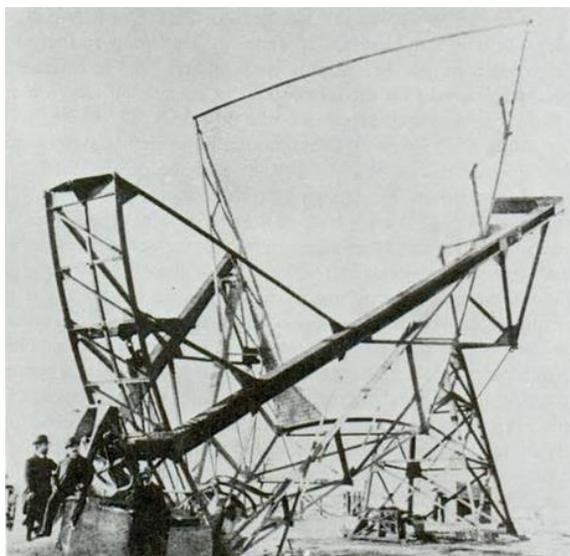


Figura 3. Horno solar (de gran tamaño) construido por el Padre Himalaya.

¹ Figuras 1, 2. Meinel, Aden B. (1982). Aplicaciones de la energía solar.

En 1906 Frank Shuman, trabajó sobre un concepto de máquina solar, que utilizaba colectores de placas planas, para 1907 había completado su primera máquina la cual llegaba a desarrollar 2.6 kW contando con un área de colector de 110 m². Este sistema calentaba agua, la cual a su vez vaporizada éter.

Posteriormente Schuman añadió a sus colectores planos, un espejo plano a lo largo de los bordes de su colector, con el objetivo de reflejar luz adicional sobre la superficie absorbente, esto le permitió duplicar la producción de energía. El proyecto fue tan prometedor, que fue el inicio de la Sun Power Company.

En la década de los años 30 en el siglo pasado se popularizaron en Japón equipos de circulación natural para obtener agua caliente sanitaria con una capacidad de almacenamiento de 100 a 200 litros.

Después de la II Guerra Mundial este tipo de sistemas se extendió también en Israel, pero debido al bajo precio de los combustibles convencionales, el uso de la energía solar quedó relegado a un segundo plano.

El resurgimiento de la energía solar como una disciplina científica se produce en 1953, cuando Farrington Daniels organiza en la Universidad de Wisconsin una reunión Internacional sobre la utilización de la Energía Solar, auspiciado por la "National Science Foundation" de Estados Unidos. Dos años más tarde, en Tucson (Arizona), se celebró otra reunión y se formó la Asociación para la Aplicación de la Energía Solar.

Como consecuencia de estas reuniones se creó la revista "Solar Energy", de muy alto nivel científico, que edita la Sociedad internacional de la Energía Solar con sede en Australia, entidad que precedió a la asociación para la aplicación de la energía solar.

En esta misma época (1954) se descubrió la fopopila de silicio en los laboratorios de la “Bell Telephone”, los cuales recibieron por ello un fuerte impulso debido a las inminentes necesidades de fopopilas para actividades espaciales.

En la década de los años 60, el excesivo abaratamiento de los combustibles convencionales hizo que se dedicase poca atención al tema de la energía solar, si bien en esta época se construyó el horno solar de Font Romeu (Francia).

Fue en 1973, como consecuencia de la cuarta guerra árabe-israelí, la Organización de Países Exportadores de Petróleo (OPEP), decidió elevar enormemente los precios del petróleo y se produjo un fuerte resurgimiento mundial de la energía solar, al poder ser ya competitiva con los nuevos y altos precios del petróleo y de los productos energéticos en general.

Todos estos pioneros, anteriormente mencionados, percibieron al Sol como una fuente limpia e inagotable de energía. Además, es perfectamente competitivo frente al carbón y a otros combustibles que en el día de hoy se utilizan. A pesar que el petróleo atrasó la energía solar, esta opción se encuentra nuevamente abierta debido a la gran incertidumbre sobre lo que ocurrirá con el petróleo, debido a ser un recurso limitado.

La energía limpia antes descrita, que es proporcionada por el Sol, es de amplio saber que domina el sistema planetario que incluye a la Tierra, y es gracias a la radiación que aporta su energía electromagnética la que mantiene la vida en la Tierra, porque todo el alimento y el combustible procede en última instancia de las plantas que utilizan la energía de la luz del Sol.

La energía radiante producida en el Sol es el resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados

fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestres. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera (si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol) se llama constante solar, y su valor medio es 1.73×10^{14} kW o 1.353 kW/m^2 . La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

La intensidad de la energía solar disponible en un punto determinado de la Tierra depende (de forma complicada pero predecible) del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía solar que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor, así como de la eficiencia del mismo.

1.1.2. Antecedentes de la energía solar en El Salvador

El Salvador tiene un alto potencial de energía solar aprovechable, como lo refleja el Consejo Nacional de Energía (CNE), a través del proyecto “Solar and Wind Energy Resource Assessment” (SWERA). Cuenta con una irradiancia promedio de 5.3 kWh/m^2 por día, la cual comprueba que el recurso es de gran abundancia en el país comparando a otras regiones.

Uno de los principales proyectos de energía solar en El Salvador, data de 1986 a 1987, y fue publicado en septiembre de 1989. Dicho proyecto conocido como “Solarimetría”, fue realizado por el departamento de Física, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, de la Universidad de El Salvador (UES), con el financiamiento de la Organización de Estados Americanos (OEA). El proyecto finalizó con la creación de tablas de irradiancia y de brillo solar.

Para la medición de la irradiancia, utilizaron actinógrafos tipo Robitzch, o también conocido como piranógrafo bimetálico tipo Robitzsch, cuyos años de registros corresponden al período de 1969 a 1983. Para las mediciones de brillo solar, utilizaron heliógrafos tipo Campbell Stokes, cuyos años de registros corresponden al período de 1957-1984. Como los que se observan a continuación²:



Figura 4. Actinógrafo tipo Robitzch (izquierda). Heliógrafo tipo Campbel Stokes (derecha).

Otro proyecto de relevancia (como recién se mencionó) ha sido el proyecto de: “Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar”, o SWERA (por sus siglas en inglés). El objetivo principal de dicho proyecto, fue el de la determinación del potencial solar y eólico del país, apoyándose en los datos registrados por la división de meteorología del Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET). Debido a que, en aquellos años, (2000-2005) no existía una base de datos actualizada, el proyecto se enfocó en actualizar la base de datos, no solo de la radiación y brillo solar, sino también de datos del viento (velocidad, dirección y ráfaga).

El proyecto concluyó presentando un mapa actualizado en la irradiancia, el brillo solar y el potencial eólico a nivel de El Salvador (Cerro Verde, Montecristo y La

² Figura 4. Estación Meteorológica Hipólito Unánue, Perú

Galera)³. Además de actualizar los recursos informáticos disponibles para futuras investigaciones.

Además de esas investigaciones mencionadas anteriormente, las cuales representan un gran aporte en la temática de la energía solar, existen registros de proyectos con el enfoque del aprovechamiento de dicho recurso. En mayo de 2013 se anunció la inversión de 12 millones de dólares por parte de la empresa Alba Petróleos, para la construcción de una fábrica para producir celdas solares⁴. Y de esa forma han existido diferentes iniciativas apostándole al desarrollo de la energía solar en el país.

En mayo de 2017 se inauguró la planta solar más grande de El Salvador, con una capacidad de 101 MW de potencia, ubicada en el municipio de El Rosario, La Paz. Dicha planta ha sido la apuesta más reciente por la energía solar en El Salvador, a la espera de poder aportar energía eléctrica al país de una forma más amigable al ambiente.

También existen empresas dedicadas a la implementación de esta energía renovable en El Salvador como la empresa TECNOSOLAR, que está introduciendo colectores solares en hoteles, hospitales y algunas industrias con el fin de bajar sus costos, otras empresas dedicadas son Del Sol Energy y Prevé-Tecno.

³ Ayala, Mauricio. Sánchez, Ismael. Escalante, Arturo. Marroquín, William. (2005). Proyecto SWERA

⁴ Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Centroamérica. <http://www.energias4e.com/noticia.php?id=4257>

1.2. Fundamentos de la transferencia de calor

La transferencia de calor es el intercambio de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura mediante los mecanismos que a continuación se describen.

1.2.1. Conducción

La conducción es la energía calorífica que se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o partes de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas más calientes, con mayor energía térmica y otras en las zonas más frías, con menor energía térmica), aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas. Este proceso es de gran importancia en sólidos, pero de menor importancia en líquidos y gases, donde normalmente aparece combinado con la convección y es prácticamente enmascarado por ésta.

1.2.1.1. Ley de Fourier.

Establece que la razón de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, es decir:

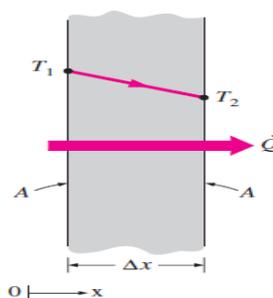


Figura 5. Conducción de calor a través de una pared plana grande, de espesor Δx y área A . Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

La conducción de calor se define en la ecuación siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Ecuación 1. Conducción de calor, regida bajo la Ley de Fourier para el caso de transferencia de calor unidireccional.

Donde la constante de proporcionalidad k es la conducción térmica del material, y hace referencia a la capacidad para conducir calor. ΔT Es el gradiente de temperatura y Δx es el espesor de la placa. (A. Cengel & A. Boles, 2012, pp. 17-18).

1.2.2. Convección.

La convección es la energía calorífica que se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa.

Este proceso tiene gran importancia en fluidos y también es denominado conducción superficial, ya que el flujo de calor entre la superficie de un material y un fluido está relacionado con la conducción, a través de una fina capa del fluido que se encuentra junto a la superficie. Además, es este proceso de conducción superficial el que provoca en un fluido (inicialmente en reposo y en contacto con una superficie a distinta temperatura) una diferencia de temperaturas en el fluido. Originándose diferencias de densidad en el mismo y que producirán a su vez un desplazamiento físico de materia a distintas temperaturas de unas zonas a otras, teniéndose convección (en este caso natural).

La transferencia de calor por convección puede ser forzada cuando está ayudada por el movimiento de las superficies en contacto con el fluido, o libre (llamada también natural) cuando se produce únicamente en virtud de una diferencia de densidades causada por una diferencia de temperaturas. También puede venir

acompañada de un cambio de fase, como ocurre durante la condensación o la ebullición, con unos intercambios de calor muy intensos.

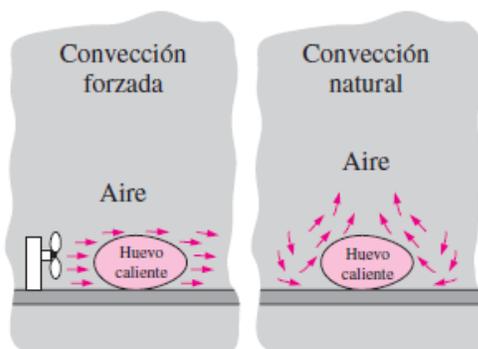


Figura 6. Enfriamiento de un huevo cocido por convección forzada y convección natural. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

1.2.2.1. Ley de Enfriamiento de Newton.

Establece que el calor transferido por un cuerpo (hacia el medio que lo rodea) a través de una superficie A_s , es proporcional a la diferencia de temperatura entre dicha superficie y el medio circundante. A su vez, es proporcional al coeficiente convectivo, el cual depende de: la geometría del cuerpo (disposición de la superficie), la velocidad del fluido del medio (en caso de que exista) y tipo de fluido que lo rodea.

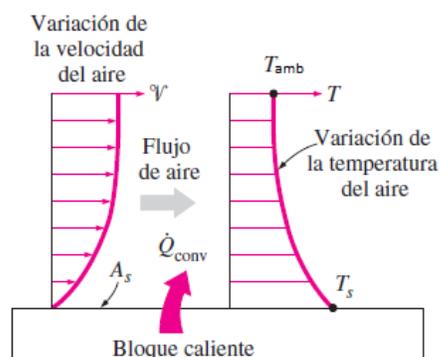


Figura 7. Perfil de velocidad y temperatura en una superficie en convección. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

La convección se encuentra definida en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{amb})$$

Ecuación 2. Convección de calor, regida bajo la Ley de enfriamiento de Newton.

Dónde: h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A_s el área de la superficie en contacto con el fluido, T_s es la temperatura de la superficie y T_{amb} es la temperatura ambiente alrededor de la misma.

1.2.3. Radiación.

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado en los cambios de las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no depende de un medio. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. Esta es la manera en que la energía del Sol llega a la Tierra.

Todos los cuerpos arriba del cero absoluto, emiten radiación térmica.

1.2.3.1. Ley de Stefan Boltzmann.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura, como se define en la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s(T_s^4)$$

Ecuación 3. Radiación de calor, regida bajo la Ley de Stefan Boltzmann de un cuerpo negro de radiación térmica hemisférica.

Dónde: T_s es la temperatura absoluta de la superficie. A_s Es el área superficial y σ es la Constante de Stefan-Boltzmann, con un valor de $5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.

Es decir, para una temperatura superficial de 400 K el calor máximo emitido por radiación sería como se muestra en la siguiente figura:

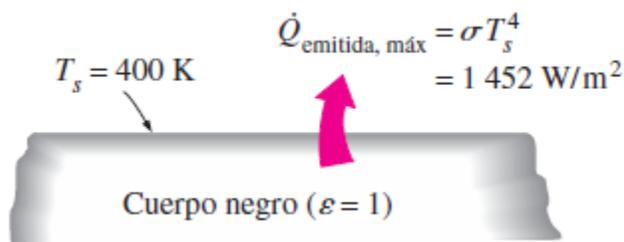


Figura 8. La radiación del cuerpo negro representa la cantidad máxima de radiación que puede ser emitida desde una superficie a una temperatura específica. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

Esta potencia emisiva de un cuerpo negro (o radiador ideal) supone un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos reales.

La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \epsilon \sigma A_s T_s^4$$

Ecuación 4. Radiación de calor, regida bajo la Ley de Stefan Boltzmann que describe la potencia emisiva superficial de una superficie real.

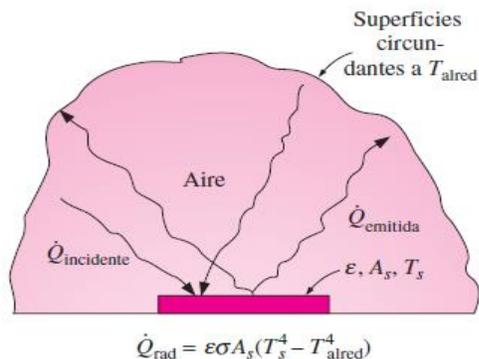


Figura 9. Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que la circundan. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

Dónde: ε es la propiedad radiativa de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie. (A. Cengel & A. Boles, 2012, pp. 27-29).

1.2.4. Absortividad, reflectividad y transmisividad.

Todo lo que se encuentra alrededor emite radiación en forma constante y la emisividad representa las características de emisión de esos cuerpos. Esto significa que todo cuerpo, es constantemente bombardeado por radiación proveniente de todas direcciones a un intervalo de longitudes de onda. Teniendo presente que el flujo de radiación que incide sobre una superficie se llama radiación incidente y se denota por G .

Cuando la radiación choca contra una superficie, parte de ella es absorbida, parte de ella es reflejada y la parte restante, si la hay, es transmitida, como se muestra en la figura siguiente:

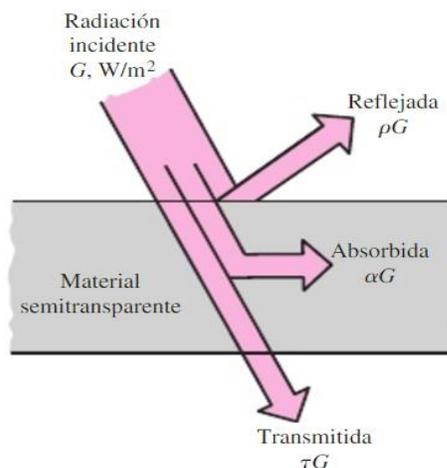


Figura 10. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente. Tomada del libro A. Cengel & A. Boles, 2012.

La fracción de radiación absorbida por la superficie se llama absorptividad (α), la fracción reflejada por la superficie recibe el nombre de reflectividad (ρ), y la fracción transmitida es la transmisividad (τ); es decir:

- Absortividad: $\alpha = \frac{\text{Radiacion absorbida}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{G_{abs}}{G}$, $0 \leq \alpha \leq 1$
- Reflectividad $\rho = \frac{\text{Radiacion reflejada}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{G_{ref}}{G}$, $0 \leq \rho \leq 1$
- Transmisividad $\tau = \frac{\text{Radiacion transmitida}}{\text{Radiacion incidente}} = \frac{G_{tr}}{G}$, $0 \leq \tau \leq 1$

En donde G es la energía de radiación que incide sobre la superficie y G_{abs} , G_{ref} y G_{tr} son las porciones absorbidas, reflejadas y transmitidas de ella, respectivamente. La primera ley de la termodinámica requiere que la suma de energía de radiación absorbida, reflejada y transmitida sea igual al incidente; esto es:

$$G_{abs} + G_{ref} + G_{tr} = G$$

Ecuación 5. Son las fracciones de radiación absorbidas, reflejadas y transmitidas.

Dividiendo cada término de esta relación entre G se obtiene:

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Ecuación 6. Propiedades ópticas de los materiales.

Para superficies opacas donde $\tau = 0$:

$$\alpha + \rho = 1$$

Ecuación 7. Para superficies opacas para superficies opacas $\tau=0$.

En la mayoría de los gases la reflectancia está ausente, $\rho = 0$ y la ecuación 6 se reduce a:

$$\alpha + \tau = 1$$

Ecuación 8. Para los gases la reflectancia está ausente, $\rho=0$.

Las dos ecuaciones anteriores expresan relaciones de propiedad importantes, dado que el conocimiento de una propiedad (α o ρ en la ecuación 7 y α o τ en la ecuación 8) implica el conocimiento de la otra.

Estas definiciones son para propiedades hemisféricas totales, dado que G representa el flujo de radiación que incide sobre la superficie desde todas direcciones sobre el espacio hemisférico y sobre todas las longitudes de onda. Por consiguiente α , ρ y τ son las propiedades promedio para todas las direcciones y todas las longitudes de onda (A. Cengel & A. Boles, 2012, pp. 704-705).

1.3. Características energéticas del Sol

1.3.1. Energía solar

La energía proveniente del Sol, es consecuencia de reacciones nucleares de fusión. Se transmite a la Tierra a través del espacio, en forma de ondas electromagnéticas. Puede utilizarse en diferentes formas de energía por su capacidad para calentar o transformarse en energía eléctrica mediante dispositivos óptimos. Además, es una fuente de energía renovable y limpia, por lo que se trata de una de las alternativas ecológicas más viables en comparación a los hidrocarburos. Estos últimos son recursos mucho más limitados y que a su vez están provocando graves problemas en el medio ambiente como contaminación y calentamiento global.

Definición:

“La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación directa, difusa y albedo (*Figura 11*), recibida por ondas electromagnética procedente del Sol, transformada en diferentes formas de energía para el beneficio de la población y el medio ambiente”.

La energía solar sin transformar calienta e ilumina, pero a su vez necesita sistemas de captación y de almacenamiento. Esta se aprovecha de las siguientes maneras:

- Utilización directa: Mediante la incorporación de acristalamientos y otros elementos arquitectónicos con elevada masa y capacidad de absorción de energía térmica. Es la llamada “energía solar térmica pasiva”, se utiliza para acondicionamiento térmico de un edificio aprovechando la energía solar para disminuir sus necesidades de calefacción.
- Transformación de calor: es la llamada “energía solar térmica activa”. Consiste en el aprovechamiento de la radiación que proviene del Sol para calentar fluidos que circulan por el interior de captadores solares térmicos. Este fluido se puede destinar para el agua caliente sanitaria (ACS), para calentar piscinas, para generación eléctrica, etc.
- Transformación en electricidad: es la llamada “energía solar fotovoltaica” que permite transformar en electricidad la radiación solar por medio de células fotovoltaicas integrantes de módulos solares. Esta electricidad se puede utilizar de manera directa, e incluso se puede introducir en la red de distribución eléctrica.

1.3.2. Radiación solar

La radiación (como ya se definió anteriormente), se transmite energía en forma de ondas electromagnéticas, en línea recta, sin intervención de una materia intermedia y a 2.998×10^8 m/s (valor exacto en vacío, menor si hay un medio presente). La radiación solar está formada por rayos de distinta longitud de onda:

- Los rayos ultravioletas no son visibles y tienen muy pequeña longitud de onda.
- Los rayos luminosos son los únicos visibles; su longitud de onda corresponde al violeta y al rojo, respectivamente, ya que varía entre 0.36 y 0.76 micrómetros.
- Los rayos térmicos o calóricos tampoco son visibles y su longitud de onda es mayor de 0.76 micrómetros. Son los rayos infrarrojos.

La magnitud física que cuantifica la radiación solar, es la irradiancia, la cual se utiliza para medir la potencia incidente por unidad de área, sus unidades son Watt por metro cuadrado (W/m^2).

La intensidad de la energía radiante del Sol a la distancia promedio Sol-Tierra, medida en plano normal a la línea de la distancia fuera de la atmósfera, se llama constante solar, I_{sc} . El valor de I_{sc} se ha estimado en $1,353 W/m^2$ con un nivel de precisión de $\pm 1.5\%$ ⁵. Este valor ha sido obtenido de numerosas medidas de flujos de radiación solar directa hechas a través de la atmósfera para varios ángulos solares cenitales. El porcentaje de variación de 1.5% está confirmado por la NASA, y por la sociedad americana de pruebas y materiales (ASTM por sus siglas en inglés) en 2006.

⁵ "Solar Engineering of Thermal Processes", John A. Duffie, (2013) p. 28.

La radiación extraterrestre es aproximadamente la radiación proveniente del cuerpo negro a 5,523 K. Pero muestra picos y valles en el espectro debido a las propiedades radiactivas de los gases incandescentes del Sol. El espectro del cuerpo negro y de la irradiación se muestra en la figura siguiente:

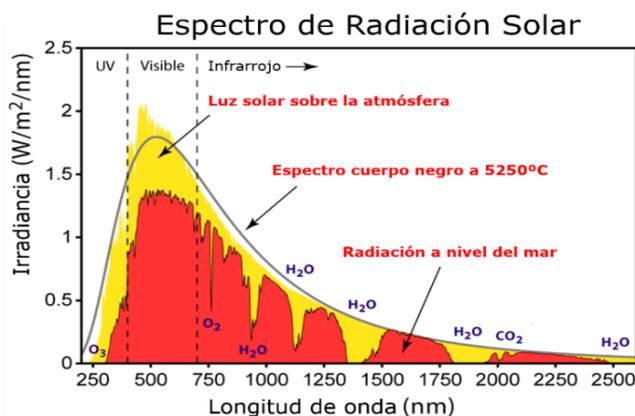


Gráfico 1. Espectro de radiación solar, curva estándar, con constante solar de $1,353 \text{ W/m}^2$ comparado con la radiación de cuerpo negro.

La radiación solar extraterrestre aparente I_0 varía durante el año, así como varía la distancia de la Tierra al Sol en las estaciones.

Un cambio que ocurre en la radiación extraterrestre durante cada estación se debe al aparente cambio en la trayectoria del Sol en el cielo. Estos cambios están asociados a la altitud solar y a los ángulos de azimut relativos al colector solar y el tiempo que el Sol emplea en estar sobre el horizonte, éste cambio cumple un papel importante en la radiación total recibida por un colector solar.

El cambio estacional en la trayectoria solar a través del cielo, se debe a la inclinación del eje de la Tierra de 23.45° con respecto al eje vertical de la Tierra. Debido a esto aquellas zonas cercanas a los polos, reciben más luz durante el verano que en invierno.

La inclinación aparente del eje de rotación de la Tierra entorno al sol con respecto a un cilindro y perpendicular a la órbita de la Tierra es δ , el ángulo de declinación. La declinación varía de -23.45° a $+23.45^\circ$ durante un año.

La trayectoria solar puede ser descrita en coordenadas cartesianas, como se muestra en la figura siguiente, a través de un programa llamado "Sunchart", gracias al laboratorio de monitoreo de radiación solar de la Universidad de Oregón, Estados Unidos.

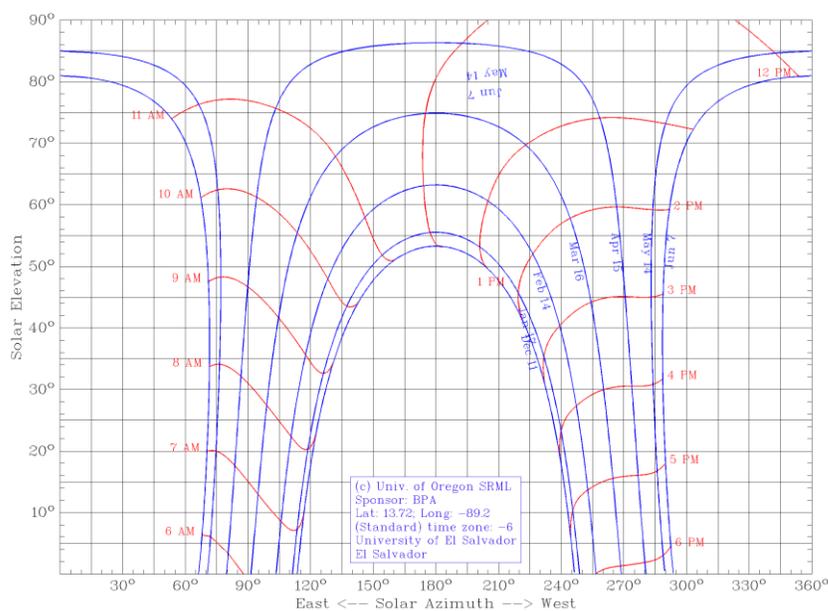


Gráfico 2. Trayectoria solar en un día, para los meses de junio a diciembre del 2017, en la Universidad de El Salvador.

En la cual las líneas azules representan los meses de junio a diciembre, y las líneas rojas las horas del día (hora civil).

En general, la radiación solar que alcanza la superficie terrestre procede básicamente de tres maneras: la radiación directa, la radiación difusa y la radiación reflejada (también llamada albedo). Como se muestra en la siguiente figura:

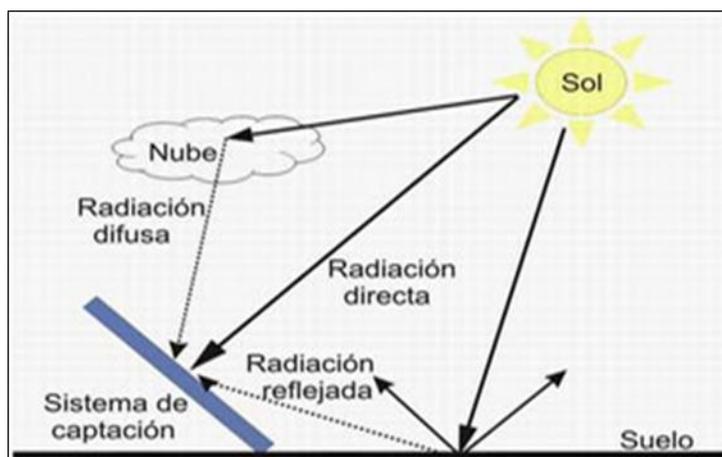


Figura 11. Diferentes formas de radiación solar.

La radiación directa es aquella que llega de manera perpendicular a la superficie, sin haber sufrido cambio en su trayectoria lineal desde el Sol. La radiación difusa, es aquella que proviene de la atmósfera y por dispersión de parte de la radiación solar en ella. No influye que el ambiente se encuentre nublado, siempre se recibe la radiación del Sol sobre la superficie; y la reflejada, es la radiación que se refleja en todas las superficies circundantes al sistema de captación.

1.3.3. Variaciones de la radiación solar.

No toda la radiación solar incidente en la atmósfera llega a la superficie terrestre, esto se debe a que la capa gaseosa actúa sobre ella produciendo distintos fenómenos:

- **Absorción:** el flujo de radiación penetra en la atmósfera y transformada en energía térmica, aumenta su temperatura y la hace irradiar calor hacia la Tierra y el espacio interplanetario.

Las radiaciones térmicas de la atmósfera que alcanzan la superficie terrestre atenúan el enfriamiento de la misma, especialmente durante la noche; este fenómeno se conoce como amparo térmico de la atmósfera.

- Reflexión: se produce cuando parte de la radiación solar al incidir sobre un cuerpo es desviada o devuelta, sin modificar sus caracteres. La atmósfera refleja la radiación que incide sobre gases y partículas sólidas en suspensión; la que llega a la superficie de la Tierra en parte se absorbe y en parte se refleja.
- Dispersión: fenómeno similar a la reflexión, pero la radiación modifica sus caracteres al ser devuelta o desviada. En la alta atmósfera la radiación solar es dispersada por las moléculas de los gases del aire: los rayos luminosos de onda más corta (violeta y azul) son más fácilmente dispersados, dando el color azulado al cielo. Los demás, (rojo, anaranjado, amarillo), llegan casi directamente al suelo, sin dispersarse, se dispersan cuando atraviesan capas atmosféricas de espesor considerable, como ocurre en los crepúsculos. En estos casos el cielo presenta un color que va del amarillo al rojo intenso.

1.3.4. Movimientos relativos entre la Tierra y el Sol.

Además de describir la radiación solar, se debe conocer también el movimiento al que está sometido el planeta (relativo al sol), dicho planeta que no está inmóvil con respecto al Sol, en la cual la Tierra tiene un movimiento de rotación en torno a un eje y otro de traslación de forma eclíptica alrededor del Sol. El primero de estos movimientos hace que un punto sobre ella, se vea iluminado de forma periódica por el Sol, originando el día y la noche. El segundo movimiento hace que los tiempos de exposición al Sol sean variables, originando las estaciones.

Esta variación en los tiempos de exposición es debido a que el eje de rotación de la Tierra permanece prácticamente siempre paralelo a sí mismo con un ángulo de $66^{\circ} 33'$, respecto al plano de la eclíptica (plano que contiene a la trayectoria

de la Tierra). Todos los planetas contenidos en el sistema solar están en un plano llamado plano de la eclíptica. En la siguiente imagen se presenta los ángulos que forma la Tierra en un momento determinado del año.

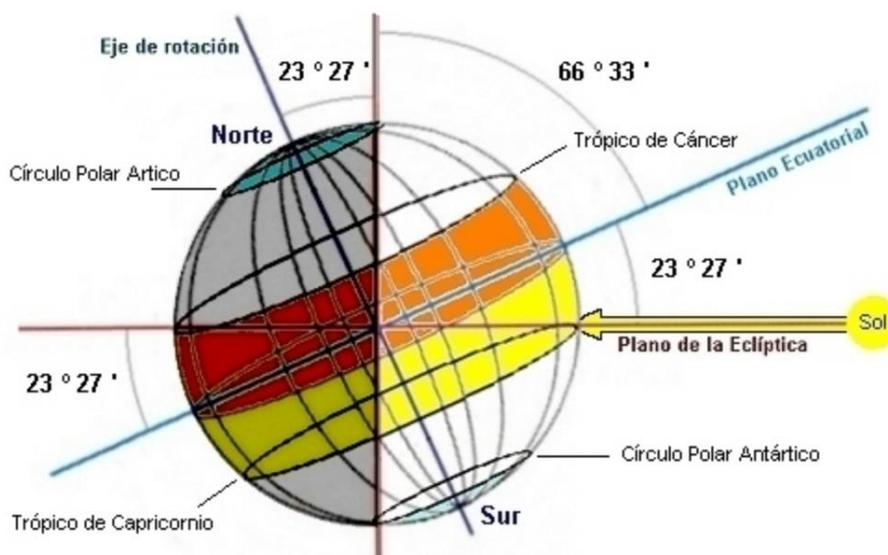


Figura 12. Ángulos que forma la Tierra con respecto al plano de la Eclíptica.

1.3.4.1. Declinación solar (δ)

Es el ángulo formado por el plano que contiene al eje de rotación terrestre y el plano perpendicular a la eclíptica. Si bien la diferencia absoluta entre el eje de rotación y la perpendicular a la eclíptica siempre es de 23.45° , el ángulo que se forma entre los planos que los contienen varía día a día porque dichos planos están siempre frontales al Sol. Los valores extremos de la declinación solar ocurren cuando ambos planos se encuentran uno frente a otro con un ángulo igual a la oblicuidad absoluta. Eso corresponde a las fechas de los solsticios, el de invierno (21 de diciembre) con valor de declinación solar igual a -23.45° , y el de verano (21 de junio) con valor de declinación solar igual a 23.45° . El valor

intermedio ocurre cuando ambos planos ocupan el mismo lugar, por lo que el ángulo entre ellos es igual a 0° .

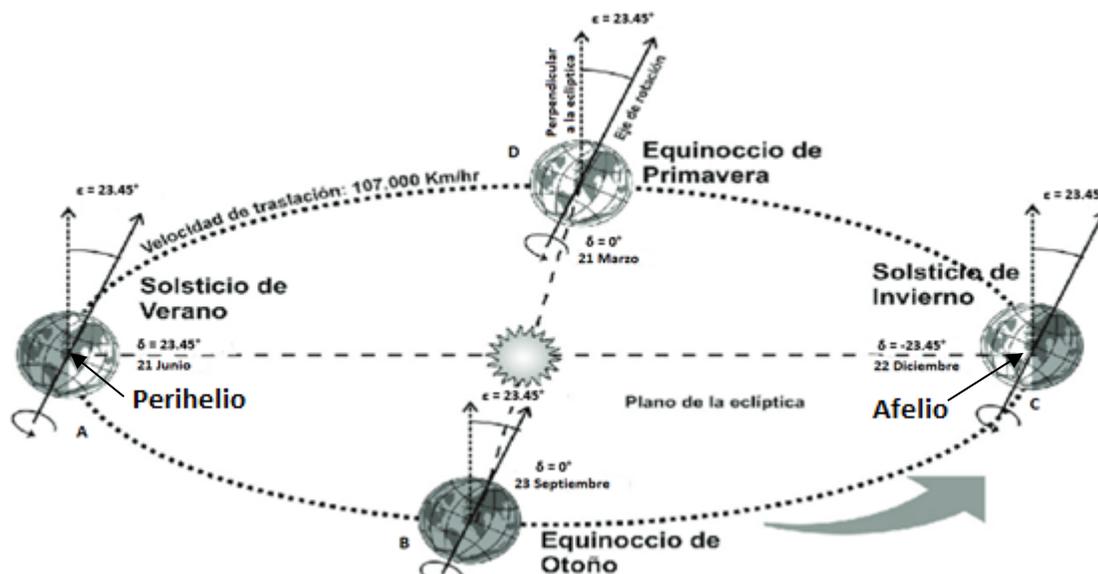


Figura 13. Posición relativa del plano del Ecuador y de la eclíptica que define la declinación solar obtenida de Prontuario Solar de México.

Los equinoccios, son los momentos del año en que el Sol está situado en el plano del Ecuador terrestre. Ese día y para un observador en el Ecuador terrestre, el Sol alcanza el cenit (el punto más alto en el cielo con relación al observador, que se encuentra justo sobre su cabeza). El paralelo de declinación del Sol y el Ecuador celeste entonces coinciden.

Ocurre dos veces por año: el 20 o 21 de marzo y el 22 o 23 de septiembre de cada año, épocas en que los dos polos terrestres se encuentran a una misma distancia del Sol, así la luz se proyecta por igual en ambos hemisferios.

Los solsticios, son los momentos del año en los que el Sol alcanza su menor altura aparente en el cielo, y la duración del día o de la noche son las máximas del año, respectivamente. Astronómicamente, los solsticios son los momentos en los que el Sol alcanza la máxima declinación norte ($+23^\circ 27'$) o sur ($-23^\circ 27'$) con respecto al Ecuador terrestre. En el solsticio de verano del hemisferio norte el Sol

alcanza el cenit al mediodía sobre el trópico de Cáncer y en el solsticio de invierno alcanza el cenit al mediodía sobre el trópico de Capricornio. Ocurre dos veces por año: el 20 o el 21 de junio y el 21 o el 22 de diciembre de cada año.

1.3.5. Coordenadas Celestes.

Para finalizar el estudio de los movimientos del Sol, se considera que el Sol realiza su recorrido por una bóveda celeste, de la cual los seres humanos son el centro. Los puntos singulares de la bóveda o hemisferio celeste serían el punto más alto o Cenit (Nadir sería el punto opuesto), y el plano del horizonte con las orientaciones principales (N, S, E y O), como se describen en la figura 14 a continuación⁶:

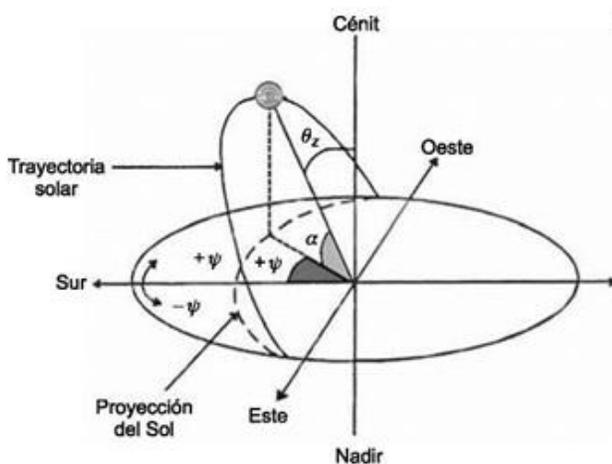


Figura 14. Representación gráfica de las coordenadas celestes.

A continuación, se describen las principales coordenadas.

Ángulo acimutal o acimut (ψ): Es el ángulo formado por la proyección sobre la superficie horizontal del lugar, de la recta Sol-Tierra, con respecto a la recta norte-sur terrestre, este puede ser positivo si se mide del sur hacia el norte, negativo si se mide del sur hacia el este.

⁶ Figura de energyprofessionalsymposium.com

El ángulo de altura solar (α): mide la altura del Sol, respecto a un plano horizontal. Si se une el Sol con la posición del observador mediante una línea y esta se proyecta en el plano horizontal, la altura solar es el ángulo formado por esas dos líneas. El ángulo cenital es el complementario a éste.

1.3.6. Irradiación en El Salvador.

En El Salvador se cuenta con un gran potencial energético en lo que a irradiancia se refiere, siendo la zona costera del país desde el municipio de La Libertad, departamento de La Libertad hasta la playa El Tamarindo, las que reciben un potencial energético elevado según el mapa de irradiación de este país, pero aún la zona con mayor energía recibida por día y por unidad de área es la zona comprendida entre Soyapango e Ilopango. (Véase *Figura 15*)

En la región central del área metropolitana de El Salvador la irradiación solar es alta alcanzando 5.4 kWh/m² en un día, en comparación con la de otros países como Alemania o Tokio, en los cuales la irradiancia alcanza los 3.3 kWh/m² por día. Y para la ubicación de la Universidad de El Salvador se tiene de 4.93 kWh/m² a 5.15 kWh/m² por día en un año. En el siguiente mapa se muestra el promedio de radiación solar durante un año en El Salvador⁷:

⁷ Mapa tomado de la página del Consejo Nacional de Energía (CNE), y elaborado por el proyecto de "Solar and Wind Energy Resource Assessment" (SWERA, octubre de 2005).

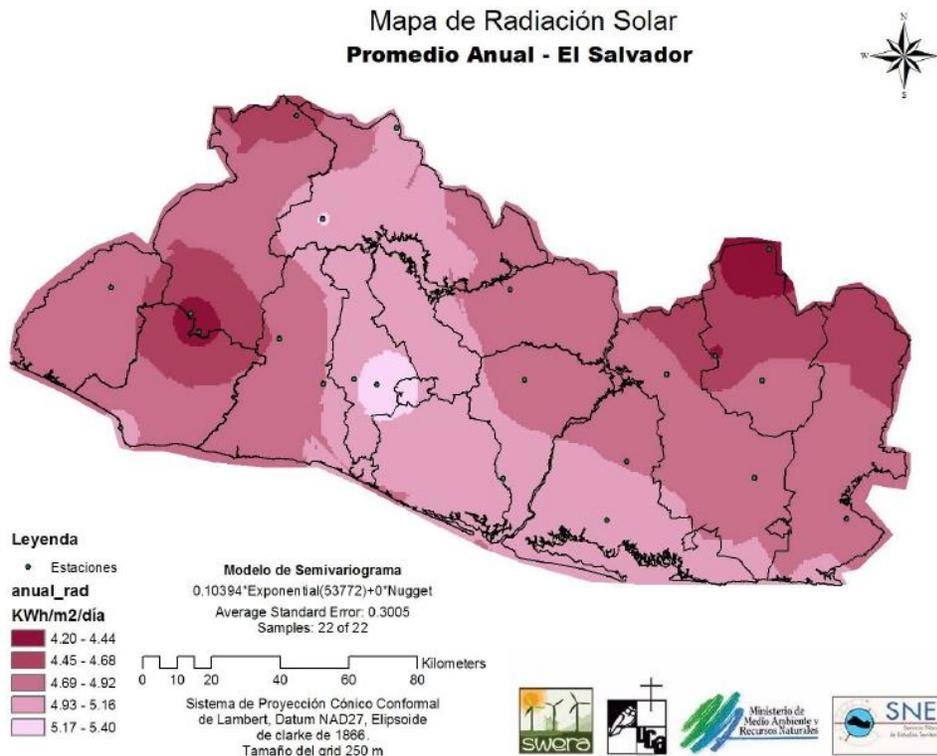


Figura 15. Mapa del promedio de la radiación solar anual en El Salvador.

A continuación, se muestra además un mapa referente al brillo solar en El Salvador. La duración del brillo solar o heliofanía en horas, representa el tiempo total durante el cual incide luz solar directa sobre alguna localidad, entre el alba y el atardecer. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad⁸:

⁸ Mapa tomado de la página del Consejo Nacional de Energía (CNE), y elaborado por el proyecto de “Solar and Wind Energy Resource Assessment” (SWERA, octubre de 2005).

Mapa de Brillo Solar Promedio Anual - El Salvador

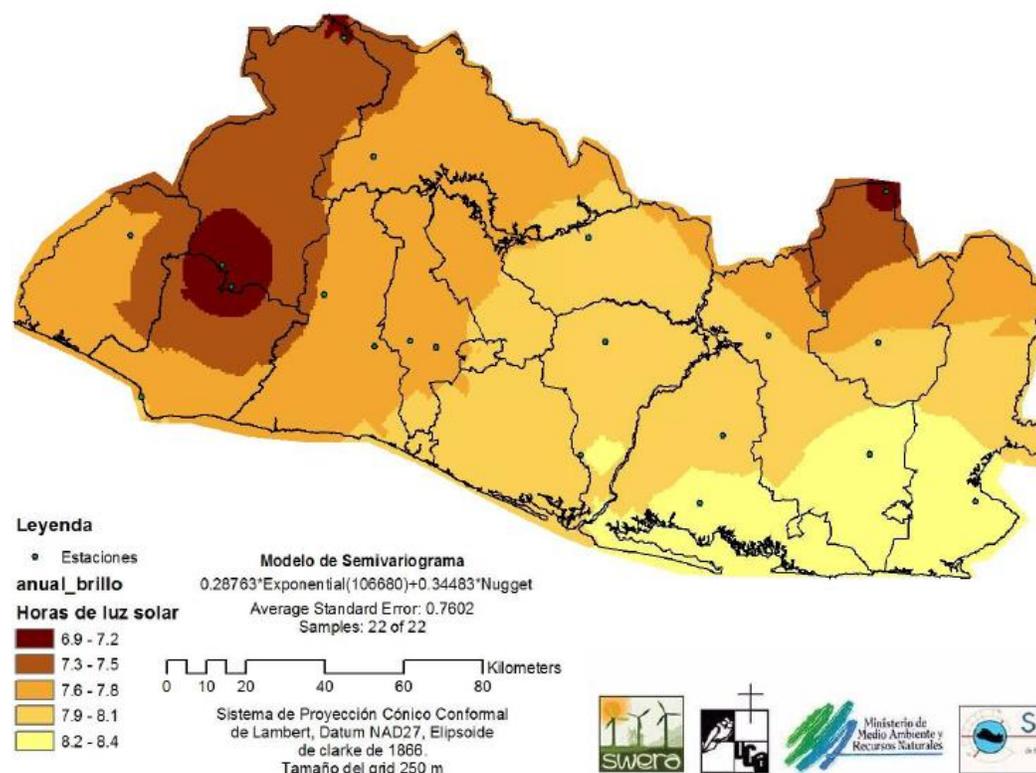


Figura 16. Mapa del promedio anual de brillo solar en El Salvador. Proyecto de Evaluación del Potencial de Energía Eólica y Solar. (SWERA por sus siglas en inglés).

1.4. Aplicaciones generales de los sistemas de energía solar térmica

La energía solar térmica tiene un enorme potencial que está siendo muy poco empleado en la actualidad. La energía solar térmica es capaz de proveer de forma natural y económica el calor que la industria necesita, para sus procesos internos de una planta.

La energía solar térmica es cada vez más utilizada a nivel doméstico para la obtención de ACS y como apoyo a la calefacción.

En la actualidad, las empresas industriales tratan de ser más eficientes en concepto de ahorro energético, y que se vea reflejado en la disminución del pago

de la factura al final de cada mes, por el cual algunas de ellas han tomado la decisión de cambiar algunas funciones que utilizan energía eléctrica por energías alternativas como el aprovechamiento de la radiación proveniente del Sol captada por colectores solares.

Algunas ventajas de la aplicación de la energía solar térmica en la industria que se pueden mencionar son:

- Económicas. El beneficio económico que se obtiene se deriva del uso que se hace de la luz del sol para obtener el calor necesario, evitándose, en un porcentaje variable, la compra de combustibles, lo que implica claramente un ahorro.
- Mejora competitividad. El disponer de una fuente de energía gratuita permite reducir los costos de producción. Esta baja de costos repercute en una baja del precio final del producto sin reducir su calidad. Esto supone una clara ventaja competitiva frente a industrias competidoras que no emplean esta fuente energética.
- Medioambientales. La quema de combustibles fósiles provoca la emisión a la atmósfera de contaminantes tales como el CO₂, el dióxido de azufre y otros. El uso de la energía solar térmica está exento de estos problemas, por lo que las fábricas que la empleen reducirán de manera significativa la emisión de estos contaminantes a la atmósfera.

Algunas aplicaciones que utilizan esta energía alternativa son:

- Calentamiento de agua sanitaria a nivel industrial. Los grandes sistemas solares térmicos para el calentamiento de agua pueden ser muy rentables para la industria turística. En hoteles, balnearios, spas, se puede obtener

agua caliente a temperaturas de entre 25°C - 30°C para piscinas y los 45°C - 60°C para el resto de aplicaciones de forma sencilla. En estos casos se obtiene además un gran rendimiento, ahorro económico y una pronta rentabilización del sistema.

- Lavanderías de ropa. El lavado de ropa de forma industrial requiere para algunos tipos de prendas agua a temperaturas de entre 40°C y 60°C. Este rango de temperaturas es muy apropiado para que los sistemas solares térmicos trabajen con un alto rendimiento y consigan fracciones del aporte solar muy altos.
- Lavado de automóviles. Algo similar ocurre en los túneles de lavados de automóviles. En estos la temperatura óptima para el lavado es de 60°C. Esta temperatura es la más adecuada para lograr una buena limpieza sin dañar el esmalte de los vehículos.
- Lavado industrial (almacenes, botellas, piezas de automóviles). En el lavado industrial de botellas, de piezas de automóviles, o en la limpieza de almacenes se puede requerir de agua caliente a bajas temperaturas fácilmente suministrable por sistemas solares térmicos.
- Deshidratadores de vegetales con energía solar. La energía solar térmica puede emplearse para deshidratar productos agrícolas tales como frutas, verduras, flores o granos. Este sistema funciona como cualquier otro sistema de deshidratación convencional, solo que empleando la energía del Sol como elemento para calentar el aire que se hará circular entre el producto a deshidratar.
- Sistemas de calefacción. La energía solar se puede emplear también para acondicionar espacios en los que se requieren temperaturas relativamente

elevadas para muy distintos propósitos; desde invernaderos hasta cámaras de crianza de aves o cerdos.

- Procesado de alimentos. También es posible emplear el calor solar obtenido para el procesado de alimentos industriales o para cocinas. Se puede emplear para elaborar, conservar o para cocer alimentos (los alimentos comienzan a cocinarse a partir de los 60°C).
- Acuicultura. Muchas especies acuáticas criadas en las piscifactorías requieren de temperaturas del agua de entre 18°C y 30°C. Por ello muchas piscifactorías recurren a sistemas de calentamiento artificial para poder desarrollar la cría fuera de temporada. En estos casos resulta especialmente viable el uso de sistemas solares térmicos. Al ser las temperaturas de trabajo muy bajas, un colector solar podrá ofrecer un rendimiento excepcionalmente alto.

1.5. Ventajas y desventajas del uso de colectores solares planos

Cuando se habla de la energía solar, parece que este tipo de energía se ofrece día tras día con la salida del Sol, y en efecto así es. Pero, hay algunos lugares más favorecidos que otros en lo que respecta al recurso. El Salvador es uno de los que se encuentra con abundante recurso solar, y ello le permite recibir la energía solar a través de la radiación proveniente de él y transformarla en energía en forma de calor por medio de un colector solar térmico.

A continuación, se hace mención de algunas de las ventajas identificadas sobre el uso de los colectores solares:

- Contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- Reducen la dependencia energética con el exterior.

- Generan un mayor valor para los inmuebles que la incorporan.
- Generan puestos calificados de trabajo directos en la producción, instalación y mantenimiento de los sistemas solares.
- Al tratarse de una energía renovable permiten sustituir una parte del consumo de combustibles fósiles y de electricidad.
- No emiten gases perjudiciales para la salud
- En general, la energía solar es una fuente inagotable, limpia y confiable.
- El costo de operación y mantenimiento es bajo, en tanto el costo de los equipos dependientes de combustibles fósiles aumenta con el paso del tiempo, y éstos son a su vez más escasos.

Pero además de las ventajas se han identificado las siguientes desventajas:

- La inversión inicial puede resultar elevada, lo cual no resulta una opción atractiva para el cambio de energía de eléctrica a energía térmica.
- Existe un límite máximo de temperatura que puede llegar a alcanzarse en estos sistemas.
- En días con baja radiación toma más tiempo calentar el agua y esto influye directamente en el volumen disponible para su uso.
- Dependiendo del lugar y la demanda, es necesario instalar un sistema auxiliar, que ayude al calentamiento del agua cuando a través de la radiación solar no se llegue a la temperatura adecuada, estas pueden ser resistencias eléctricas.

CAPÍTULO II: INTRODUCCIÓN A LOS COLECTORES SOLARES

En el presente capítulo se comienza un recorrido por algunos de los tipos de colectores solares que existen en la actualidad. Su funcionamiento, los elementos que los componen, sus configuraciones y arreglos, y hasta el fenómeno principal que influye en el desplazamiento del fluido.

2.1. Colectores solares térmicos

Los colectores solares son dispositivos diseñados para captar la radiación solar, transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido.

Esto facilita, calentar agua para su posterior aprovechamiento a nivel doméstico, comercial o industrial. Hay muchas formas de aprovechar la energía solar. La más conocida y usada es captar el calor del Sol pasando agua por tubos de cobre con una capa negra bien aislados que absorben la radiación. Frecuentemente se conocen como colectores solares planos o paneles solares térmicos.

El funcionamiento de un colector es muy básico. De hecho, cualquier cuerpo expuesto al Sol recibe un flujo energético que lo calienta. Por lo tanto, hace que aumente su temperatura.

Un cuerpo a una temperatura dada emite energía en forma de calor a su alrededor, y esta depende directamente de la diferencia de temperatura del cuerpo y su ambiente.

Si al colector se le hace pasar un fluido por su interior, éste se aprovecha del calor, con lo que se consigue que una parte de la energía captada se transmite hacia este fluido como energía útil. El resto de energía se sigue perdiendo en forma de radiación y conducción, desde el colector hacia el ambiente exterior. En

este caso, la temperatura de trabajo es siempre diferente a la temperatura de equilibrio estático (o térmico).

Si se desea obtener un buen rendimiento, hay que trabajar los colectores a la temperatura más baja posible, siempre que sea suficiente para el uso que se quiera dar.

El tipo de utilización condiciona el colector empleado; por ejemplo, si se requiere calentar una piscina hasta una temperatura de 25°C a 28°C, se necesita un colector simple (colector plano sin cubierta), ya que fácilmente la temperatura ambiente será de este orden o incluso superior. Si se requiere calentar agua para uso doméstico donde se busca un aumento de temperatura de 25°C a los 75°C, lo recomendable es usar un colector solar plano con cubierta. Por otra parte, si se necesita obtener temperaturas por arriba de los 100°C lo recomendable es la utilización de colectores de tubos de vacío.

Los colectores solares se pueden clasificar en base a varios parámetros. El primero de ellos es en función del fluido que se utiliza como medio de transporte de calor, éste puede ser líquido o gas. Los líquidos utilizados con mayor frecuencia son el agua, una disolución anticongelante o un aceite térmico. El gas que se suele utilizar como fluido térmico es el aire.

Otra clasificación es por el rango de temperatura de trabajo, que va íntimamente relacionado con los componentes básicos que componen el colector. Así pues, los colectores se pueden organizar de la siguiente manera:

- Colectores de baja temperatura. Proveen calor útil a temperaturas menores de 100°C.

- Colectores de temperatura media. Son los dispositivos que concentran la radiación solar para entregar calor útil a mayor temperatura, mayores o iguales a 100°C y menores o iguales a 400°C.
- Colectores de alta temperatura. Trabajan a temperaturas superiores a los 400°C. Se usan para la generación de energía eléctrica.

El equipo de banco de pruebas de un colector solar plano para uso didáctico, se ha realizado, orientado como un equipo para baja temperatura. De ahora en adelante cuando se mencione el equipo, se debe de tener presente dicha afirmación.

2.2. Tipos de colectores

A continuación, se presentan los diferentes tipos de colector solares que se encuentran en el rango de baja temperatura.

2.2.1. Colectores solares planos.

El colector solar de placa plana tiene una buena relación costo/efectividad en climas tropicales, y se adapta correctamente a un gran número de aplicaciones. (El calentamiento de agua sanitaria, la climatización de piscinas, precalentamiento de fluidos industriales, etc.)



Figura 17. Colector solar plano con cubierta.

Cuando un colector solar está sin líquido en su interior, la temperatura de absorción irá creciendo continuamente; también las pérdidas por conducción, convección y radiación, ya que se incrementan con la temperatura. Llegará el momento en que dichas pérdidas son iguales a la energía que el absorbente recibe del Sol, y su temperatura se estabiliza, llegando a la temperatura de equilibrio estática (o térmica), también llamada "temperatura de estancamiento".

La temperatura de equilibrio estática será más baja en cuanto más frío sea el ambiente. Por ello lo más importante, no es la temperatura de equilibrio del absorbente, sino la diferencia entre esta y la temperatura exterior, es decir con respecto a los alrededores del colector.

La velocidad del viento es otro factor que hay que tener en cuenta, ya que cuanto mayor sea, mayor serán las pérdidas de calor por convección, y por lo tanto habrá una menor temperatura en el absorbente. Si se deja circular el líquido calo portador (fluido de trabajo) por el interior del colector, (entrando por un orificio y saliendo por otro), al contactar con la parte inferior del absorbente, absorbe calor del mismo y aumenta su temperatura.

Si se mantiene la circulación del líquido bajo condiciones estacionarias o constantes en el tiempo, habrá un momento en que se volverá a obtener la temperatura de equilibrio dinámica (más baja que la temperatura de equilibrio estática) y que se mantendrá mientras no varíen las condiciones de radiación y el resto de factores influyentes (velocidad de circulación del líquido, viento, temperatura ambiental).

La temperatura que puede llegar a conseguir el líquido será menor que la del absorbente, a causa de las características físicas propias del fenómeno de la

conducción del calor, que es la forma en la que este se transmite, entre el absorbente y el líquido.

La máxima temperatura que un colector es capaz de obtener será igual a la temperatura de equilibrio estática o temperatura de estancamiento. Esta siempre será mayor a la temperatura de equilibrio dinámico, la cual se obtiene cuando el calor incidente sobre el colector es igual a las pérdidas. Esto se da en condiciones estacionarias, es decir, que el fluido en el interior del colector-tanque no está siendo reemplazado con agua a temperatura ambiente.

2.2.1.1. Tipos de colectores solares planos

Los hay con o sin cubierta. Los con cubierta básicamente se han descrito en el apartado anterior.

Los colectores sin cubierta constan básicamente del elemento absorbente, formado generalmente por un conjunto de tubos de material plástico, fabricados de etileno propileno dieno (EPDM), caucho o polipropileno. La siguiente figura muestra un colector solar plano sin cubierta y uno con cubierta:

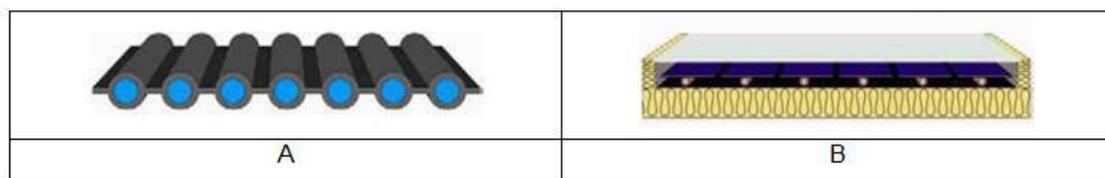


Figura 18. A) Colector plano sin cubierta. B) Colector planos con cubierta.

Este tipo de colectores solares planos (los sin cubierta) son muy económicos y fáciles de instalar ya que habitualmente presentan configuraciones flexibles que permiten colocarlos sobre cualquier superficie. Además, son resistentes a la corrosión y permiten configuraciones de calentamiento directo como en el caso del calentamiento de piscinas.

Los colectores sin cubierta con absorbente sintético, suelen tener curvas de rendimiento muy inclinadas, ya que al no tener cubierta tienen muy buen comportamiento óptico; en cambio, pierden rápidamente su rendimiento cuando la temperatura ambiente está por debajo de la temperatura de trabajo o con una velocidad de viento elevada.

Por ello, este tipo de colectores se recomiendan en aplicaciones a baja temperatura. Es decir, cuando la temperatura de trabajo esté próxima a la temperatura ambiente. Por ejemplo, en piscinas descubiertas, ubicadas en zonas frías.

2.2.1.2. Efecto termosifón

El efecto termosifón es un movimiento de circulación producido por las variaciones de densidades en diferentes partes del mismo fluido (agua en el caso de este proyecto), ocasionadas por diferencia de temperatura en el mismo. Entre mayor sea la diferencia de temperatura entre el agua que hay en el colector y el agua almacenada en el tanque, más rápido fluirá el agua a través del circuito. Al observar la siguiente figura se puede comprender de mejor manera el efecto antes mencionado:

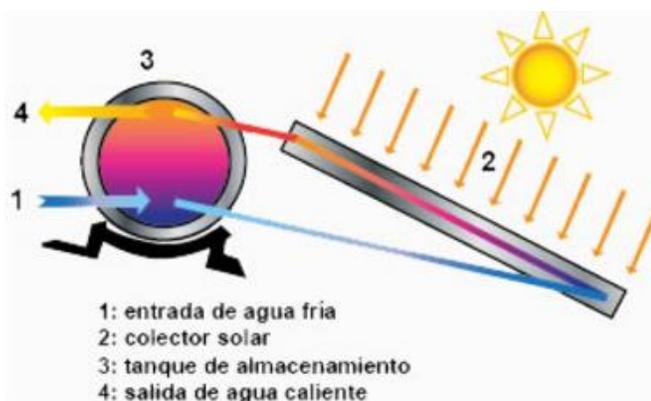


Figura 19. Efecto termosifón que ocurre en un sistema de los colectores solares planos.

2.2.2. Colector solar de tubos de vacío.

Este colector consta de un conjunto de tubos cilíndricos, formados por un absorbente selectivo, situado sobre un asentamiento reflector y rodeado de un cilindro de vidrio transparente.



Figura 20. Colector solar plano de tubos de vacío, (Modelo: Vitosol 200-T SP2, marca VIESSMANN).

Entre el tubo exterior transparente y el absorbente interior se ha hecho el vacío. Con ello, se evita las pérdidas por conducción y por convección desde la superficie absorbente y este hecho permite alcanzar temperaturas de más de 100°C y aprovechar mucho más la radiación solar.

Actualmente, hay dos tipos de estos colectores con técnicas bastante diferenciadas en cuanto a la transmisión del calor desde el tubo de vacío hasta el circuito primario.

Por una parte, los colectores de vacío con fluido directo disponen de un captador principal del circuito primario en la parte superior del colector; cada tubo se conecta con este captador mediante un circuito de ida y otro de regreso. Por este

circuito se hace circular el fluido del circuito primario que se calentará durante el recorrido.

La otra tendencia de transmisión de calor en los tubos de vacío se llama “heat pipe”. La cual se describe en la figura siguiente:

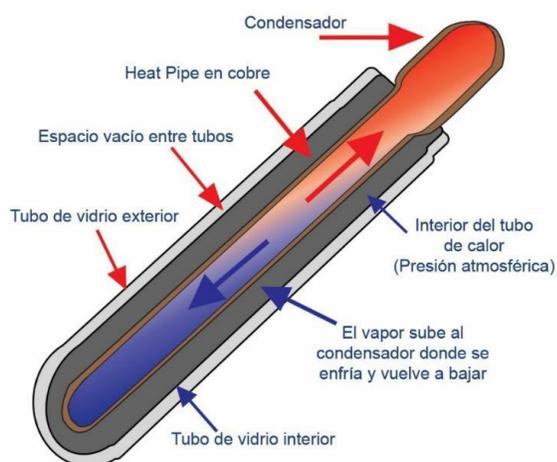


Figura 21. Representación interna de un tubo de vacío.

En este sistema, como en el caso anterior, los colectores disponen de un captador principal del circuito primario en la parte superior. Pero para este caso, el tubo de vacío dispone de un tubo de cobre central sellado y lleno de una mezcla alcohólica.

Se conecta este tubo en el absorbente del colector solar mediante una pipeta condensadora, que hará la función de elemento transmisor del calor hacia el circuito primario. La radiación solar hace calentar el absorbente y evapora la mezcla alcohólica de su interior, que sube hasta el condensador situado en el colector. En este punto, cederá el calor en el circuito primario y se condensa la mezcla alcohólica que volverá a la parte inferior del colector por su propio peso.

Una de las características específicas de este tipo de colectores es la posibilidad de inclinarse individualmente cada tubo. Esta característica es muy útil en las ubicaciones que, por condiciones del edificio, sea necesario montar los colectores desorientados del sur.

2.3. Conexión de los colectores solares térmicos

A la hora de definir y montar el campo solar (conjunto de colectores), hay que tener en cuenta que se debe hacer una distribución de los colectores en grupos. Estas agrupaciones de colectores deberían estar siempre formadas por unidades del mismo modelo y con una distribución lo más uniforme posible. Hay dos opciones o tipologías básicas para agrupar dos o más colectores:

De tipo serie o paralelo. Además, se puede configurar un campo de captación combinando las dos agrupaciones, que es lo que llamamos agrupaciones o circuitos mixtos. A continuación, se presentan las diferentes conexiones de los colectores.

2.3.1. Conexión en serie.

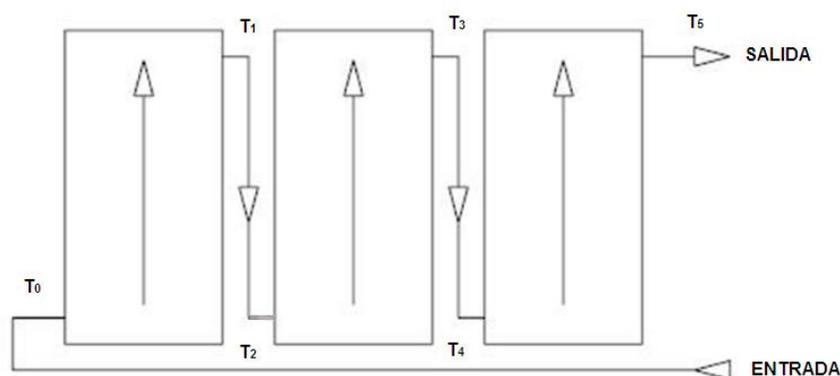


Figura 22. Conexión en serie de un grupo de 3 colectores.

$$T_0 < T_1 < T_3 < T_5$$

$$T_1 \approx T_2; T_3 \approx T_4$$

En la conexión en serie, la salida del primer colector se conecta directamente con la entrada del siguiente, y así consecutivamente. La temperatura del fluido de entrada a cada colector es superior a la del colector precedente, por lo que a la salida de un grupo de colector se puede obtener temperaturas más altas que si trabajaran con el salto térmico de un solo colector. Este tipo de conexión tiene el inconveniente de que el rendimiento de los colectores va disminuyendo proporcionalmente con el aumento de la temperatura de trabajo; por tanto, esta tipología de conexión, únicamente se utiliza en aplicaciones muy particulares, y con un máximo de 6 m² a 10 m² de colectores conectados en serie, según la zona climática.

En cuanto al comportamiento del fluido de esta configuración, el caudal total del grupo de colectores será el equivalente al caudal de un solo colector y, por el contrario, la pérdida de carga provocada por el grupo será el equivalente a la suma de la pérdida de carga de todos los colectores.

2.3.2. Conexión en paralelo.

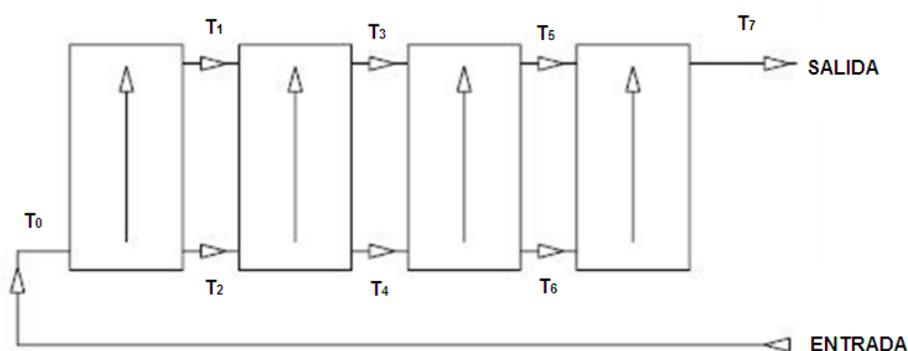


Figura 23. Conexiones de un grupo de 4 colectores en paralelo.

$$T_0 < T_1; T_1 > T_2; T_0 \approx T_6; T_0 < T_7$$

En la conexión en paralelo, tanto la salida como la entrada de los colectores están conectadas a puntos de entrada y salida comunes al resto de colectores.

Con esta configuración, la temperatura del fluido de entrada es la misma en todos los colectores y pasa lo mismo con las temperaturas de salida, de forma que a la salida del conjunto o grupo de colectores se obtiene la temperatura como si se trabajara con el salto térmico de un solo colector.

Por lo tanto, todos los colectores trabajan en el mismo punto de la curva de rendimiento. Esta conexión es la más habitual en las instalaciones solares térmicas de baja temperatura.

Esta configuración presenta el caudal total del grupo, que equivale a la suma de los caudales parciales de cada colector, mientras que la pérdida de carga del grupo, será el equivalente a la de un solo colector.

2.3.3. Conexión mixta de colectores.

Conexión serie - paralelo:

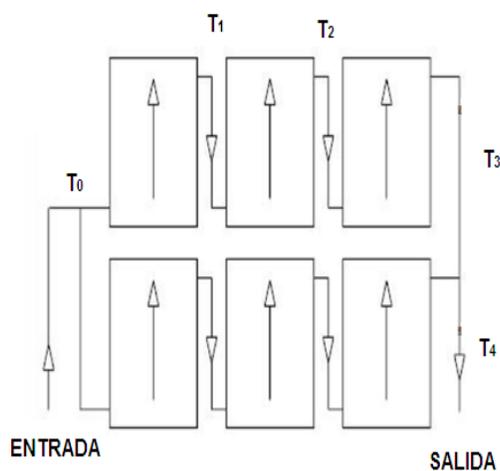


Figura 24. Conexión de colectores serie - paralelo.

$$T_0 < T_1 < T_2 < T_3; T_3 \approx T_4$$

Presenta las ventajas de ambas configuraciones.

En algunas ocasiones, el volumen de los colectores y la necesidad de temperaturas más elevadas dan como resultado instalaciones que combinan la disposición en serie y en paralelo. A esta configuración se denomina mixta.

2.4. Componentes básicos de un colector solar

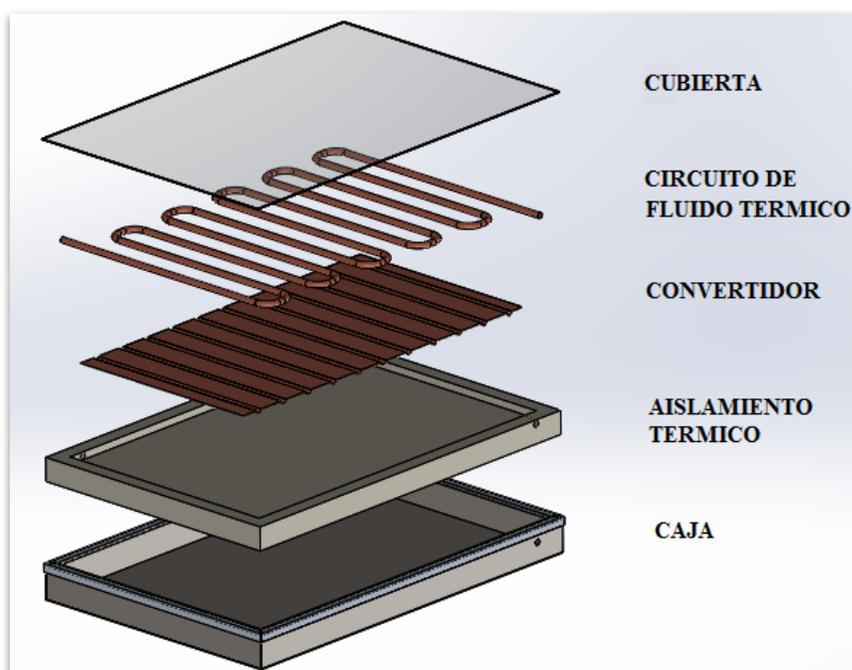


Figura 25. Esquema del colector solar.

2.4.1. Convertidor.

El convertidor está constituido por una placa plana en la que se han insertado una red de conductos por las que circula el fluido térmico. Al incidir la radiación con la placa se transforma en calor. Este calor se transfiere después al fluido térmico que circula por los conductos. Los materiales más usados para construir la placa y sus conductos son el cobre y el acero inoxidable. En los colectores de aire no es necesario insertar conductos porque el fluido térmico circula por el espacio comprendido entre la placa plana y la cubierta.

Si el fluido circula por una única tubería que lo distribuye por toda la placa se denomina en serie (como un serpentín). Si existen dos conductos, uno de entrada y otro de salida que se conectan con unos cuantos tubos que circulan por la placa, se denomina en paralelo.

La radiación interceptada por la cubierta se transmite y alcanza la placa absorbente del convertidor, transformándose en calor. Como es sabido, el cuerpo que absorbe más radiación es el cuerpo negro. Por lo tanto, es conveniente que la cubierta tienda a comportarse como un cuerpo negro para así aumentar su capacidad de absorción de la radiación. Esto se tiene en cuenta al elegir el tipo de recubrimiento del convertidor para que su coeficiente de absorción sea del orden de 0.9-0.95. Debido a que la placa del convertidor alcanza temperaturas ligeramente altas, se convierte en emisora de radiación que es energía perdida. Para minimizar estas pérdidas y para aumentar la absorción de radiación, se usan los denominados recubrimientos selectivos que suelen estar formados por una capa delgada de óxido metálico, de color negro, con baja emisividad de radiación térmica y gran coeficiente de absorción. La superficie selectiva con mejores resultados se ha desarrollado depositando una capa de níquel sobre el absorbente y sobre ésta una capa de óxido de cromo extremadamente fina. El coeficiente de absorción de las superficies selectivas ronda el 0.95 y emisividad de 0.1.

2.4.2. Circuito de fluido térmico

El fluido circulante ha de estar directamente en contacto con el absorbente, de forma que la transferencia de calor desde la placa al fluido se realice en las mejores condiciones. El circuito que sigue el calor hasta llegar al fluido térmico debe ser lo más corto posible y debe encontrar la menor resistencia posible. La

radiación se convierte en calor al ser interceptada por la superficie captadora y la temperatura del convertidor aumenta hasta hacerse mayor que la temperatura del fluido. El calor se propaga siguiendo el gradiente de temperaturas: primero, a través de la placa del convertidor hasta alcanzar la zona de unión entre la placa y la tubería que conduce al fluido. La unión entre la tubería y la placa debe tener continuidad metálica (normalmente por soldadura), si no la transferencia de calor puede verse perjudicada y podría ser con convección en vez de conducción ya que se genera una resistencia térmica mayor y se dificulta la transferencia de calor desde la placa al tubo.

2.4.3. Aislamiento térmico.

Al encontrarse el convertidor a una temperatura superior a la del ambiente, se transfiere de forma espontánea calor a la atmósfera. La emisión de calor por la cara que recibe la radiación es mitigada (atenuada o disminuida) por el efecto invernadero. Para reducir la emisión de calor por la cara posterior se instala una lámina de aislamiento térmico, de 4 cm o 5 cm de espesor, entre la cara posterior y la caja (5 cm es el caso del colector del proyecto). El aislamiento cumple la función de disminuir las pérdidas de calor desde el convertidor hasta el ambiente que lo rodea.

La capacidad para impedir que el calor se fugue depende de las propiedades físicas del aislante. Las principales son: conductividad térmica, densidad aparente, comportamiento ante la humedad, estabilidad térmica, etc. Un aislante muy utilizado es la fibra de vidrio, que aguanta bien las altas temperaturas y es económico, pero no tiene buena resistencia en ambientes húmedos.

2.4.4. Caja

La caja aloja el conjunto de componentes que constituyen el colector. Su función principal es asegurar la estanqueidad del colector ya que si no podría originar pérdidas por fugas de calor y también impedir que entre humedad si hay componentes que se dañen con ella. Además, se evita el contacto con contaminantes que puedan corroer al entrar en contacto con el convertidor.

Si hay humedad dentro, puede empañar la cubierta, haciendo disminuir la transmitancia de la misma y reduciendo el flujo de radiación, disminuyendo con ello el rendimiento del colector.

La caja tiene que soportar las condiciones corrosivas a las que es sometido por parte de la atmósfera. Debe de ser duradera y soportar el paso del tiempo con el mínimo deterioro posible. Suele ser de acero galvanizado con tratamiento de anodizado.

2.4.5. Cubierta

La cubierta del colector es transparente y cumple una doble misión. La primera, atenuar las pérdidas de calor del convertidor impidiendo, en lo posible, el paso de la radiación que éste emite.

La segunda, evitar que el aire exterior esté en contacto con el convertidor y provoque pérdidas por convección.

La atenuación de las pérdidas de calor por radiación desde la superficie del adsorbente puede lograrse aprovechando el efecto invernadero (Como se mencionó antes). Este efecto se consigue al crear dos ambientes: uno interior, cerrado por la superficie transparente de vidrio, (también puede utilizarse el plástico), y otro exterior. La radiación solar que llega del exterior se transmite a

través de la superficie transparente y se propaga hasta el recinto interior, donde es interceptada en la superficie del convertidor. Al chocar la radiación se transforma en calor y la placa eleva su temperatura. Al aumentar su temperatura la placa absorbente emite radiación en una longitud de onda mayor, con menor energía, y esta radiación interior no se transmite al exterior a través de la cubierta transparente. En consecuencia, queda atrapada entre la placa y la cubierta, efecto pretendido que facilita la transmisión de la radiación solar pero no permite la transmisión de la radiación de origen térmico desde la placa hacia el exterior.

Las cubiertas pueden ser de vidrio o de plástico, aunque este último material tiene el inconveniente de perder sus propiedades ante los rayos ultravioleta y de ser blando que permite su fácil rayado. Las ventajas son que es más barato y ligero. La distancia aconsejable entre el absorbente y la cubierta es de 25 mm a 40 mm. El problema del vidrio es su fragilidad, pero las cubiertas actuales son de vidrio templado que solventan en parte este problema.

Un vidrio transparente utilizado en ventanas, para un ángulo de incidencia perpendicular, refleja un 10% de la radiación. Un típico cristal de 3mm de espesor absorbe entre un 1% y un 5%, siendo el 2% el valor medio. La transmitancia normal para esta cubierta es de un 88%, es decir, que deja pasar un 88% de la energía solar incidente.

2.5. Eficiencia de los colectores

La eficiencia de los colectores depende en parte de la calidad de los materiales que lo componen, de la radiación solar y otros factores, esencialmente de la diferencia de la temperatura entre el ambiente y el agua en los colectores.

El diagrama esquemático a continuación (Gráfico 3) ilustra las eficiencias de: colector al vacío (rojo), colectores solares plano con cubierta (verde) y colector solar plano sin cubierta (celeste), usado para la obtención de ACS. El área gris representa el rango normal del agua caliente para la ducha, lavar o la cocina.

La eficiencia de los tubos al vacío es mayor a la de los demás colectores cuando la diferencia de las temperaturas es alta, pero también muestra que en sistemas con diferencias de temperaturas menores, los colectores sin cubierta o de simple absorción (en el caso de piscinas) funcionan mejor. En la mayoría de los casos, los colectores planos son la mejor opción en términos de eficiencia y precio para aplicaciones a baja temperatura⁹.

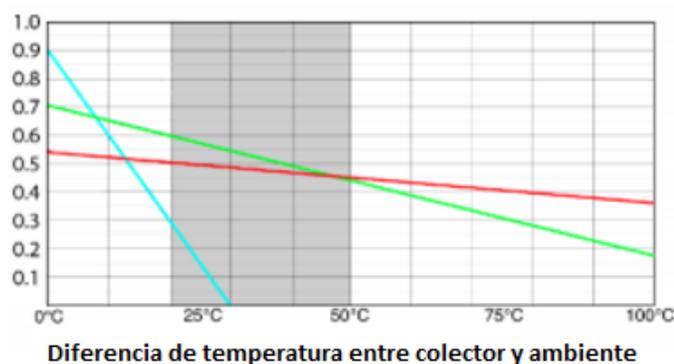


Gráfico 3. Comparativa de eficiencia entre colectores planos y colectores de tubo de vacío.

⁹ Eficiencias de colectores al vacío, planos y de absorción (origen: Tom Lane. Solar Hot Water Systems: Lessons Learned).

CAPÍTULO III: ETAPA DE DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR

Anteriormente se ha descrito la transferencia de calor que fundamenta el funcionamiento del equipo, desde las características energéticas del Sol y la teoría de la transferencia de calor, hasta las diferentes configuraciones de colectores que se realizan y los tipos que existen.

A continuación, se describe la etapa de cálculos de diseño del colector, el dimensionamiento del mismo y los componentes que lo constituyen.

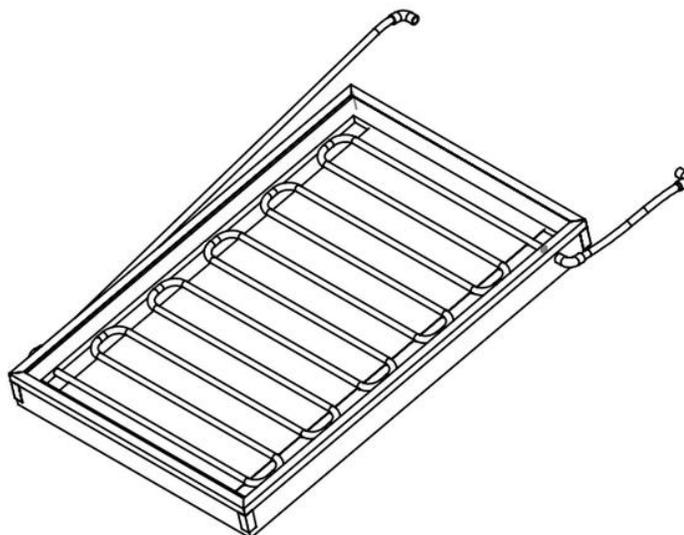


Figura 26. Colector a diseñar.

3.1. Determinación del prototipo a diseñar

El análisis de los colectores solares implica problemas particulares de flujos de energía, bajos y variables, así como una gran relevancia de los fenómenos de radiación. En los colectores de placa plana, la superficie que absorbe la radiación solar es igual a la superficie que la capta. Se pueden diseñar colectores de placa plana para trabajar con temperaturas de placa absorbente comprendidas entre 40°C y 130°C. Estos colectores utilizan tanto la radiación solar directa como la difusa, no requieren de sistemas de seguimiento solar y prácticamente no

precisan de mantenimiento. Sus aplicaciones van enfocadas a sistemas de calentamiento de agua, calefacción de edificios, etc.

La gama de longitudes de onda que se aprovecha, está comprendida entre 0.3 μm y 3.0 μm , que es una franja de radiación considerablemente más pequeña que la de la radiación emitida por la mayoría de las superficies que absorben energía.

El prototipo determinado, es un colector solar plano, con cubierta, con tubería de cobre tipo serpentín, con conexiones a un tanque de almacenamiento horizontal, aprovechando el efecto de termosifón, para la recirculación del agua caliente.

Los datos de irradiancia utilizados en los cálculos, se han tomado del programa System Advisor Model (SAM) de NREL de EEUU para la estación meteorológica de la Ciudad de Ilopango.

A continuación, se presenta en la tabla 1, la descripción de los parámetros a utilizar:

Tabla 1. Variables de diseño.

No.	Descripción de parámetros	Valor
1	Longitud del colector	$L=1.2$ m
2	Ancho del colector	$a=0.8$ m
3	Altura del colector	$h=0.09$ m
4	Inclinación del colector	$\theta=13.1^\circ$
5	Espesor de la lámina protectora	$e=0.09$ cm
6	Distancia entre los tubos	$W=10$ cm
7	Diámetro interior del tubo	$Di = 5/8$ plg (1.59 cm)
8	Distancia entre el absorbente y el vidrio	$C=0.033$ m
9	Espesor del vidrio	$e_v = 5$ mm
10	Transmisividad del vidrio	$\tau=0.88$
11	Emisividad del absorbente	$\varepsilon=0.64$
12	Absortividad de la placa absorbente	$\alpha=0.64$
13	Conductividad térmica del vidrio	$k=0.80$ W/m K
14	Conductividad térmica del absorbente	$k=392$ W/m K

15	Conductividad térmica del acero inoxidable	$k=15.6 \text{ W/m K}$
16	Conductividad térmica del tubo	$k=392 \text{ W/m K}$
17	Conductividad térmica del aislante	$k=0.05 \text{ W/m K}$
18	Conductividad térmica del aire	$k=0.02551 \text{ W/m K}$
19	Conductividad térmica lámina galvanizada	$k=52.5 \text{ W/m K}$
20	Espesor del aislante	$e_a = 0.05\text{m}$
21	Temperatura ambiente máxima	$T_\infty = 25^\circ\text{C} = 298 \text{ K}$
22	Velocidad del viento	$v = 3 \text{ m/s}$
23	Valor de la constante Stefan-Boltzmann	$\sigma = 5.6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
24	Espesor de lámina de tanque	$e_l = 1.5 \text{ mm}$

3.2. Análisis térmico del colector

A continuación, se realiza el análisis de transferencia de calor, en todo el colector, partiendo del balance de energía siguiente:

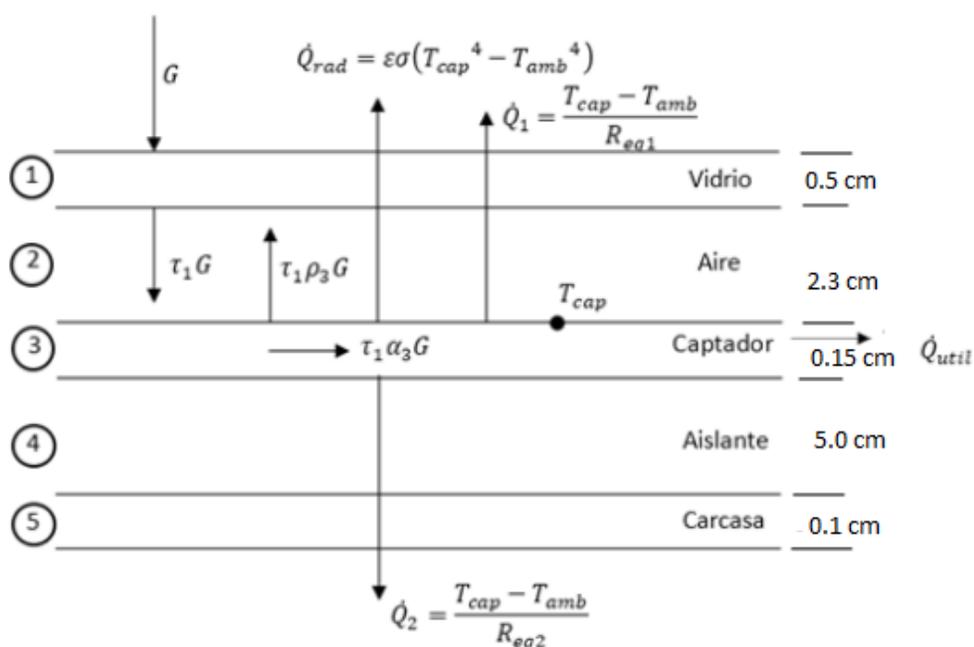


Figura 27. Esquema del colector completo, con sus respectivas entradas y salidas de calor.

Dónde:

- G : Irradiancia en W/m^2 .
- τ_1 : Representa la transmisividad de la placa colectora.

- ρ_3 : Representa la reflectividad de la placa colectora.
- α_3 : Representa la absorptividad de la placa colectora.
- T_{cap} : Temperatura de la placa colectora.
- T_{amb} : Temperatura del ambiente.
- R_{eq1} : Resistencia equivalente que involucra resistencias conductivas como convectivas, desde la placa hacia la parte superior del colector.
- R_{eq2} : Resistencia equivalente que involucra resistencias conductivas como convectivas, desde la placa hacia la parte inferior del colector.
- \dot{Q}_{rad} : Calor de salida por radiación.
- \dot{Q}_1 : Calor de salida 1, en forma de conducción y convección hacia la parte superior del colector.
- \dot{Q}_{util} : Calor útil, aprovechable hacia el fluido.
- \dot{Q}_2 : Calor de salida 2, en forma de conducción y convección hacia la parte inferior del colector.

De la figura anterior, se ha extraído únicamente el elemento de la placa absorbente, y se ha aplicado un balance en base a la primera Ley de la termodinámica, como se muestra a continuación. En la figura siguiente se han establecido las pérdidas de calor que sufre la placa colectora, así como de la entrada de calor que posee:

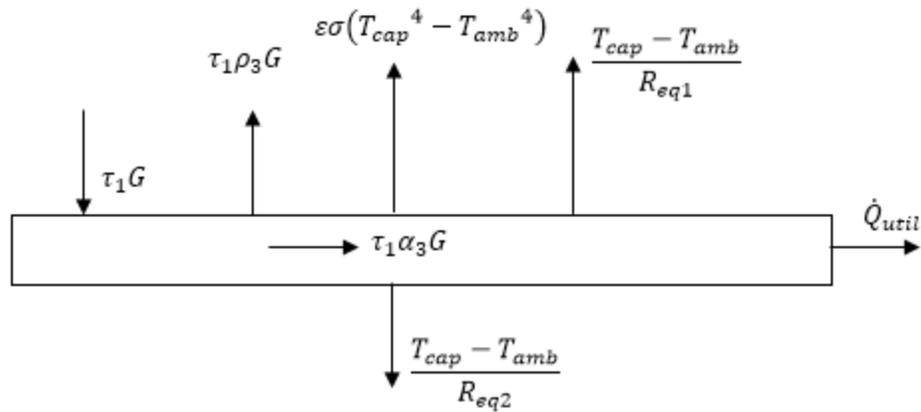


Figura 28. Esquema del colector, con el calor de entrada y los de salida.

A continuación, se presenta el balance de energía realizado a la placa:

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sal}$$

Ecuación 9. Balance de energía realizado a la placa.

$$\tau_1 GA = \rho_3 \tau_1 GA + A \epsilon \sigma (T_{cap}^4 - T_{amb}^4) + A \left(\frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{eq1}} \right) + A \left(\frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{eq2}} \right) + \dot{Q}_{util}$$

Despejando para el calor útil:

$$\dot{Q}_{util} = \tau_1 GA(1 - \rho_3) - A \epsilon \sigma (T_{cap}^4 - T_{amb}^4) - A \left(\frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{eq1}} \right) - A \left(\frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{eq2}} \right)$$

Sustituyendo Ec. 7 para materiales opacos; $\tau = 0$, entonces $(1 - \rho_3) = \alpha_3$:

$$\dot{Q}_{util} = GA \tau_1 \alpha_3 - A \epsilon \sigma (T_{cap}^4 - T_{amb}^4) - A (T_{cap} - T_{amb}) \left(\frac{1}{R_{eq1}} + \frac{1}{R_{eq2}} \right)$$

$$\dot{Q}_{util} = GA \tau_1 \alpha_3 - A \epsilon \sigma (T_{cap}^4 - T_{amb}^4) - A (T_{cap} - T_{amb}) \left(\frac{R_{eq1} + R_{eq2}}{R_{eq1} R_{eq2}} \right)$$

Ecuación 10. Calor útil del colector.

La eficiencia general del colector viene dada por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{AG}$$

Ecuación 11. Eficiencia general del colector.

Sustituyendo Ec. 10 en Ec. 11

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{AG} = \frac{GA\tau_1\alpha_3 - A\varepsilon\sigma(T_{\text{cap}}^4 - T_{\text{amb}}^4) - A(T_{\text{cap}} - T_{\text{amb}})\left(\frac{R_{eq1} + R_{eq2}}{R_{eq2}R_{eq1}}\right)}{AG}$$

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{AG} = \tau_1\alpha_3 - \left(\frac{R_{eq1} + R_{eq2}}{R_{eq2}R_{eq1}}\right)\frac{(T_{\text{cap}} - T_{\text{amb}})}{G} - \frac{\varepsilon\sigma}{G}(T_{\text{cap}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

Reescribiendo la ecuación anterior, se obtiene la ecuación general para colectores planos:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{AG} = \eta_0 - a_1\frac{(T_{\text{cap}} - T_{\text{amb}})}{G} - a_2\frac{(T_{\text{cap}}^4 - T_{\text{amb}}^4)}{G}$$

Ecuación 12. Ecuación general para colectores planos.

Dónde:

- $\eta_0 = \tau_1\alpha_3$, representa la eficiencia óptica o máxima del colector.
- $a_1 = \left(\frac{R_{eq1} + R_{eq2}}{R_{eq2}R_{eq1}}\right)$, representa un coeficiente de pérdidas lineales.
- $a_2 = \varepsilon\sigma$, representa un coeficiente de pérdidas por radiación.

Cálculo de resistencias térmicas R_{eq1} y R_{eq2} del colector.

Como se muestra en la Figura 27, \dot{Q}_1 y \dot{Q}_2 son respectivamente los flujos de calor que se pierden por conducción hacia la parte superior del colector y hacia la parte interior respectivamente. Para determinar dichos valores de calor es preciso calcular las resistencias equivalentes involucradas. A continuación, se muestra el cálculo de la resistencia equivalente 1:

$$R_{eq1} = R_{cond2} + R_{cond1} + R_{conv1}$$

Ecuación 13. Resistencia equivalente para la pérdida de calor \dot{Q}_1 en el colector.

Dónde:

- R_{cond2} , es la resistencia conductiva del aire
- R_{cond1} , es la resistencia conductiva del vidrio
- R_{conv1} , es la resistencia convectiva del aire

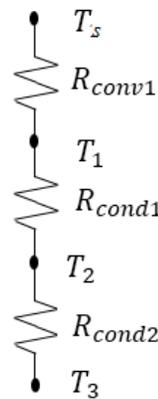


Figura 29. Circuito térmico de \dot{Q}_1 .

$$R_{eq1} = + \frac{L_2}{kA} + \frac{L_1}{kA} + \frac{1}{h_1A}$$

Para el cálculo de la resistencia equivalente es preciso encontrar el valor del coeficiente convectivo del aire.

Calculando el coeficiente convectivo, para placa con superficie caliente hacia arriba: Nu , está expresado de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{hl_c}{k}$$

Ecuación 14. Número de Nusselt.

Dónde:

h , es el coeficiente convectivo de la superficie a calcular.

l_c , es la longitud característica de la superficie.

$$l_c = A_s/P = (0.8 \times 1.2)/2(0.8 + 1.2) = 6/25.$$

k , coeficiente de conductividad térmica del aire.

Y el número de Rayleigh (Ra), está expresado de la siguiente manera:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_{amb})l_c^3}{\nu^2} Pr$$

Ecuación 15. Número de Rayleigh.

Dónde:

- g = aceleración gravitacional.
- T_s = temperatura de la superficie del vidrio 343 K.
- β = coeficiente de expansión volumétrica ($\frac{1}{T}$ para gases ideales).
- ν = viscosidad cinemática del fluido.
- $Pr = 0.7$ para aire.

$$Ra = \frac{9.81 \left(\frac{1}{298}\right) (343 - 298) (6/25)^3}{(1.562 \times 10^{-5})^2} * 0.7 = 58.7536 \times 10^6$$

El número de Nusselt es el siguiente:

$$Nu = 0.15 Ra^{1/3}$$

Por lo tanto, el valor de Nusselt queda de la siguiente forma:

$$Nu = 0.15 (58.7536 \times 10^6)^{1/3} = 58.31$$

Despejando el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{Nuk}{A_s/P} = \frac{58.32 * 0.02551}{\frac{(0.8 \times 1.2)}{2(0.8 + 1.2)}} = 6.2 \frac{W}{m^2K}$$

Sustituyendo datos en Ec. 13:

$$R_{eq1} = \frac{0.033}{0.02551(0.8 \times 1.2)} + \frac{0.05}{0.8(0.8 \times 1.2)} + \frac{1}{6.2(0.8 \times 1.2)} = 1.58 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Calculando la resistencia equivalente 2, para caracterizar \dot{Q}_2 :

$$R_{eq2} = R_{cond4} + R_{cond5} + R_{conv5}$$

Ecuación 16. Resistencia equivalente para la pérdida de calor \dot{Q}_2 en el colector.

Dónde:

- R_{cond4} , es la resistencia conductiva del aislante.
- R_{cond5} , es la resistencia conductiva de la chapa protectora.
- R_{conv5} , es la resistencia convectiva del aire.

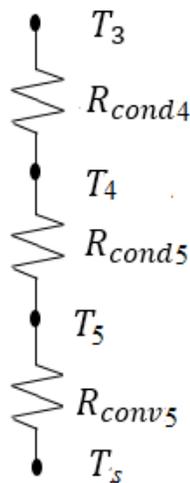


Figura 30. Circuito térmico de \dot{Q}_2

$$R_{eq2} = \frac{L_4}{kA} + \frac{5}{kA} + \frac{1}{h_5A}$$

Calculando el coeficiente convectivo para placa con superficie caliente hacia abajo:

Nu , utilizando la *Ec. 14* de la siguiente manera:

$$Nu = \frac{hl_c}{k}$$

Utilizando *Ec. 15* y sustituyendo valores para Ra :

Asumiendo temperatura de superficie de 308 K:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_a)l_c^3}{\nu^2} Pr$$

$$Ra = \frac{9.81\left(\frac{1}{298}\right)(308 - 298)(6/25^3)}{(1.562 \times 10^{-5})^2} * 0.7 = 13.05 \times 10^6$$

El número de Nusselt es el siguiente:

$$Nu = 0.27Ra^{1/4}$$

Por lo tanto, el valor de Nusselt queda de la siguiente forma:

$$Nu = 0.27(13.05 \times 10^6)^{1/4} = 16.23$$

Despejando el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{Nuk}{A_s/P} = \frac{16.23 * 0.02551}{\frac{(0.8 \times 1.2)}{2(0.8 + 1.2)}} = 1.725 \frac{W}{m^2K}$$

Sustituyendo datos en la *Ec. 16* los valores antes calculados:

$$R_{eq2} = \frac{0.05}{0.05(0.8 \times 1.2)} + \frac{0.001}{52.5(0.8 \times 1.2)} + \frac{1}{1.725(0.8 \times 1.2)} = 1.645 \frac{K}{W}$$

3.3. Análisis del colector y del tanque acumulador como un solo sistema

En el esquema siguiente se ha establecido un balance de energía, tomando el colector y el tanque acumulador como un solo sistema, asumiendo que la energía que se recibe en el colector, solo se pierde en el tanque acumulador:

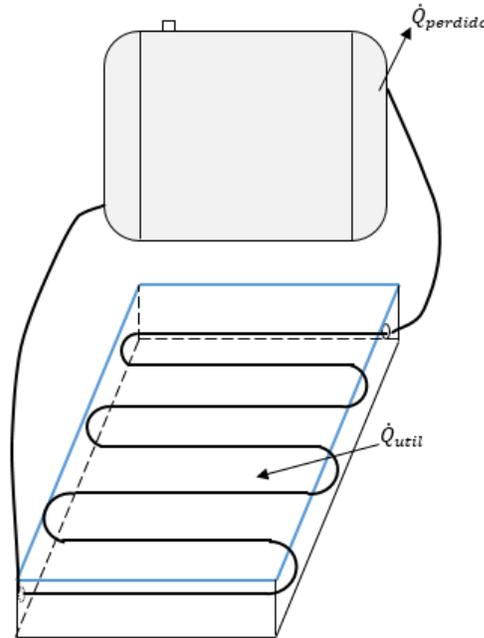


Figura 31. Esquema del sistema colector-tanque.

Dónde el calor útil es el que se transfiere al fluido, por lo tanto, el balance de energía es igual a:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \dot{Q}_{\text{perdido}}$$

Ecuación 17. Balance de energía entre el colector y el tanque.

Dónde:

$$\dot{Q}_{\text{perdido}} = \frac{T_{\text{interna del tanque}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{Total del tanque}}}$$

Ecuación 18. Calor perdido en el tanque.

Y el calor útil se despeja de la ecuación *Ec. 11*, la cual queda de la siguiente manera:

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \eta GA$$

Sustituyendo *Ec. 11* y *Ec. 18*, en *Ec. 17*, se obtiene la siguiente ecuación:

$$\eta GA = \frac{T_{\text{interna del tanque}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{Total del tanque}}}$$

Ecuación 19. Expresa la relación del calor útil con el calor perdido en el tanque.

Dónde del $\dot{Q}_{\text{útil}}$:

- η : es la eficiencia total.
- G : la irradiancia.
- A : es el área del colector.

Y la $T_{\text{interna del tanque}}$ del tanque corresponde a la temperatura del agua en el tanque colector, o T_{agua} , como se le llamará más adelante.

A continuación, se muestra el balance en el tanque acumulador. Retomando un procedimiento similar en el balance de energía anterior se plantea el calor por pérdidas en el tanque acumulador, siendo en este caso:

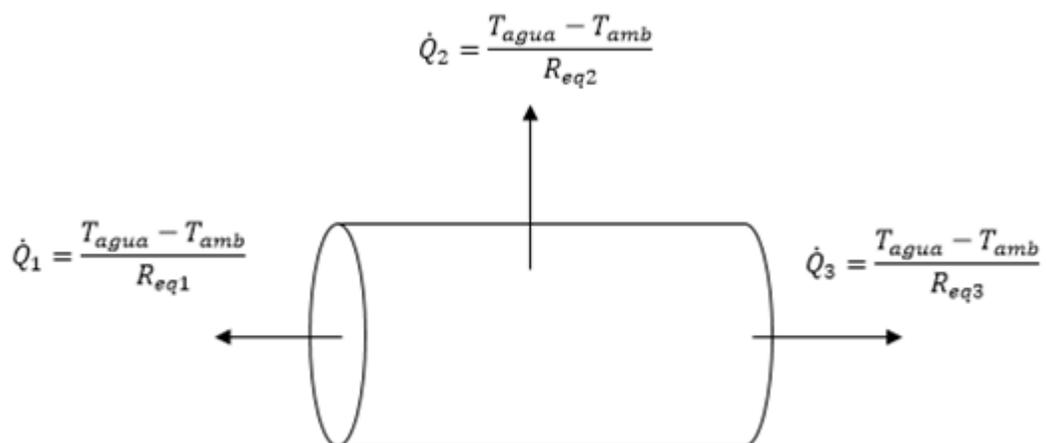


Figura 32. Esquema del tanque acumulador con las pérdidas en forma de calor correspondiente.

El calor por pérdidas o perdido (como se llamará en adelante), estará representado por los tres calores que se muestran en la figura anterior.

Dónde, de la ecuación de las pérdidas, la T_{agua} , es la correspondiente a la temperatura de equilibrio dinámico, es decir, la temperatura máxima que puede alcanzar el fluido en condiciones estacionarias, y la $R_{Total\ del\ tanque}$, representa la resistencia equivalente, obtenida del circuito térmico del tanque acumulador completo.

$$R_{Total\ del\ tanque} = R_{eq1} + R_{eq2} + R_{eq3}$$

Ecuación 20. Resistencia equivalente del tanque almacenamiento.

Cálculo de resistencias R_{eq1} , R_{eq2} y R_{eq3} para el tanque de almacenamiento:

A continuación, se muestra el esquema del tanque acumulador, con los elementos que lo componen, para obtener la resistencia equivalente 2, (R_{eq2}):

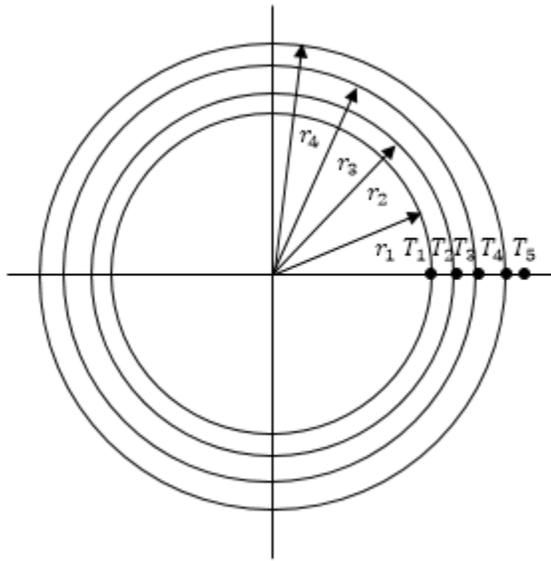


Figura 33. Esquema del tanque acumulador, con los elementos que lo rodean.

Dónde:

- $r_1 = 0.16\text{m}$
- $r_2 = 0.163\text{m}$
- $r_3 = 0.213\text{m}$
- $r_4 = 0.215\text{m}$

Dónde T_1 y T_2 , corresponden a las temperaturas dentro y fuera del tanque acumulador, mientras que la T_3 corresponde a la temperatura que se encuentra en el límite del material aislante, la T_4 en el límite de la cubierta protectora, y la T_5 a la temperatura ambiente.

A continuación, se presenta el circuito térmico correspondiente a la transferencia de calor que se da hacia los extremos del tanque acumulador:

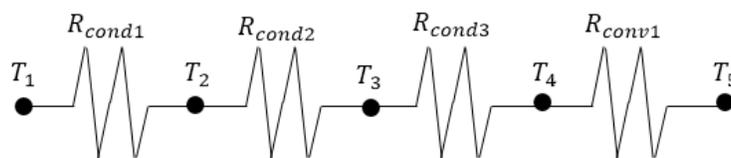


Figura 34. Circuito térmico de las resistencias del tanque acumulador.

$$R_{eq2} = R_{cond1} + R_{cond2} + R_{cond3} + R_{conv1}$$

Ecuación 21. Resistencia equivalente para la pérdida de calor \dot{Q}_2 en la parte transversal del tanque acumulador R_{eq1} .

Dónde:

- R_{cond1} , corresponde a la resistencia proporcionada por la pared del tanque acumulador.
- R_{cond2} , es la resistencia que corresponde a la capa del material aislante.
- R_{cond3} , representa la pared de la cubierta protectora.
- R_{conv1} , es la resistencia convectiva en las afueras del tanque acumulador.
- $Lt=$ es la longitud interna del tanque.
- $Lc=$ e la longitud externa del tanque.

El cálculo de las resistencias se presenta a continuación:

$$R_{cond1} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi LK} = \frac{\ln\left(\frac{0.1630}{0.160}\right)}{2\pi * 0.7 * 15.6} = 0.271 \times 10^{-3} \frac{K}{W}$$

$$R_{cond2} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi LK} = \frac{\ln\left(\frac{0.2130}{0.163}\right)}{2\pi * 0.8 * 0.05} = 1.064 \frac{K}{W}$$

$$R_{cond3} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2\pi LK} = \frac{\ln\left(\frac{0.2150}{0.213}\right)}{2\pi * 0.8 * 52.5} = 3.541 \times 10^{-5} \frac{K}{W}$$

El coeficiente convectivo h para el cálculo de R_{conv1} , se ha calculado de la siguiente manera:

Con la *Ec. 14* se calcula Nu , está expresado:

$$Nu = \frac{hl_c}{k}$$

Dónde:

- h , es el coeficiente convectivo de la superficie a calcular.
- l_c , es la longitud característica de la superficie (diámetro del cilindro).
- k , coeficiente de conductividad térmica del aire.

Con la *Ec. 15*, se calcula el número de Rayleigh, como se muestra a continuación:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_a)l_c^3}{\nu^2} Pr$$

Dónde:

- g = aceleración gravitacional.
- T_s = temperatura de la superficie del tanque 308 K.
- β = coeficiente de expansión volumétrica.
- ν = viscosidad cinemática del fluido.
- Pr = Prandtl de 0.7 para aire.

Luego sustituyendo valores:

$$Ra = \frac{9.81 \left(\frac{1}{298}\right) (308 - 298) (0.5^3)}{(1.562 \times 10^{-5})^2} * 0.7 = 118 \times 10^6$$

Por lo tanto, el valor de Nusselt queda de la siguiente forma:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387(Ra)^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387(118 \times 10^6)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.7)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 = 59.4$$

Despejando el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{Nuk}{D} = \frac{59.4 * 0.02551}{0.5} = 3.03 \frac{W}{m^2K}$$

Con el coeficiente convectivo calculado, la resistencia convectiva es la siguiente:

$$R_{conv1} = \frac{1}{2\pi r_4 L h} = \frac{1}{2\pi * 0.253 * 0.8 * 3.03} = 0.126 \frac{K}{W}$$

$$R_{conv1} = 0.126 \frac{K}{W}$$

De donde la resistencia equivalente de todo el circuito es la siguiente:

$$R_{eq2} = 3.27 \times 10^{-5} + 1.22 + 1.30 \times 10^{-5} + 0.126 = 1.346 \frac{K}{W}$$

$$R_{eq2} = 1.346 \frac{K}{W}$$

A continuación, se realiza el cálculo de la resistencia equivalente Req1:

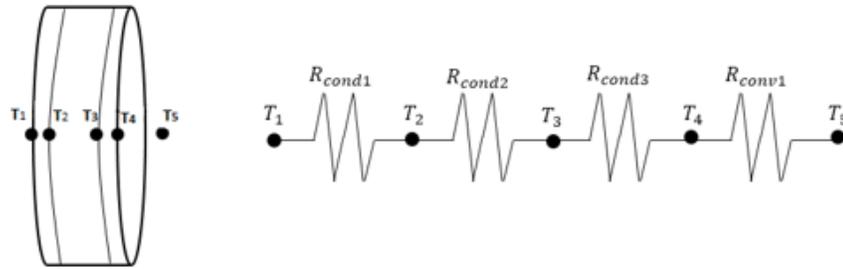


Figura 35. Esquema y circuito térmico de la parte lateral del tanque acumulador.

La resistencia equivalente queda establecida de la siguiente manera:

$$R_{eq1} = R_{cond1} + R_{cond2} + R_{cond3} + R_{conv1}$$

Ecuación 22. Resistencia equivalente para la parte lateral izquierda del tanque acumulador.

$$R_{eq1} = \frac{L_1}{kA} + \frac{L_2}{kA} + \frac{L_3}{kA} + \frac{1}{hA}$$

El cálculo del coeficiente convectivo se muestra a continuación.

Calculando el coeficiente convectivo, para placa vertical:

Utilizando la Ec 14: se puede calcular Nu :

$$Nu = \frac{hl_c}{k}$$

Y el número de Rayleigh, se termina con la Ec 15 y queda expresado así:

$$Ra = \frac{g\beta(T_s - T_a)l_c^3}{\nu^2} Pr$$

Asumiendo temperatura de superficie de 308 K:

$$Ra = \frac{9.81\left(\frac{1}{298}\right)(308 - 298)(0.4^3)}{(1.562 \times 10^{-5})^2} * 0.7 = 58.3 \times 10^6$$

El número de Nusselt es el siguiente:

$$Nu = 0.59Ra^{1/4}$$

Por lo tanto, el valor de Nusselt queda de la siguiente forma:

$$Nu = 0.59(58.3 \times 10^6)^{1/4} = 51.55$$

Despejando el coeficiente convectivo:

$$h = \frac{Nuk}{l} = \frac{51.55 * 0.02551}{0.4} = 3.29 \frac{W}{m^2K}$$

Sustituyendo en Ec. 22

$$R_{eq1} = \frac{0.0015}{15.6(\frac{\pi}{25})} + \frac{0.05}{0.05(\frac{\pi}{25})} + \frac{0.001}{62.5(\frac{\pi}{25})} + \frac{1}{3.29(\frac{\pi}{25})} = 10.38 \frac{K}{W}$$

Para el cálculo de Req3, se utiliza el mismo procedimiento para Req1, por lo tanto:

$$R_{eq3} = R_{eq1}$$

Ecuación 23. Resistencia equivalente para la parte lateral derecha del tanque acumulador.

$$R_{eq3} = R_{eq1} = 10.38 \text{ K/W}$$

Calculando a continuación la resistencia total correspondiente a la sumatoria de las tres resistencias equivalentes, las cuales se muestran en el circuito térmico siguiente:

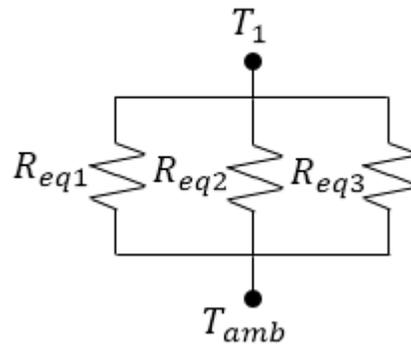


Figura 36. Circuito térmico del tanque completo.

$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{R_{eq1}} + \frac{1}{R_{eq2}} + \frac{1}{R_{eq3}}$$

Ecuación 24. Sumatoria de las resistencias equivalentes totales.

Sustituyendo:

$$\frac{1}{R_{Total}} = \frac{1}{10.38} + \frac{1}{1.346} + \frac{1}{10.38}$$

Despejando para R_{Total} :

$$R_{Total} = 1.07 \frac{K}{W}$$

Ahora que ya se cuenta con la resistencia total en el tanque acumulador, se puede determinar la temperatura máxima que puede alcanzar la placa colectora, asumiendo que se alcance el equilibrio dinámico entre el agua y la placa colectora se encuentra la temperatura máxima que puede obtener en el agua del tanque, siguiendo la metodología que se presentó anteriormente asumiendo y una radiación promedio de 450 W/m^2 , se tiene:

Sustituyendo la *Ec. 12* en *Ec. 19*, queda de la siguiente manera:

$$(\eta_0 - a_1 \frac{(T_{cap} - T_{amb})}{G} - a_2 \frac{(T_{cap}^4 - T_{amb}^4)}{G})GA = \frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{TOTAL}}$$

$$(\tau_1 \alpha_3 - (\frac{R_{eq1} + R_{eq2}}{R_{eq2} R_{eq1}}) \frac{(T_{cap} - T_{amb})}{G} - \frac{\epsilon \sigma}{G} (T_{cap}^4 - T_{amb}^4))GA = \frac{T_{cap} - T_{amb}}{R_{TOTAL}}$$

Despejando para T_{cap} :

$$(0.88 * 0.64 - (\frac{1.58 + 1.645}{1.58 * 1.645}) \frac{(T_{cap} - 298)}{450} - \frac{0.64 * 5.67 * 10^{-8}}{450} (T_{cap}^4 - 298^4))450(1.2 * 0.8) = \frac{T_{cap} - 298}{1.07}$$

$$(0.88 * 0.64 - (1.58 + 1.645/1.58 * 1.645) (T_{cap} - 298)/450 - 0.64 * 5.67 * 10^{-8} / 450 (T_{cap}^4 - 298^4)) 450(1.2 * 0.8) = T_{cap} - 298/1.07$$

Resolviendo para T_{cap} :

$$T_{cap} = 340.27 \text{ K} \equiv 67.12 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Con este valor, se encuentra la temperatura de la superficie externa protectora del tanque de almacenamiento y se calculan nuevamente todos los valores de los coeficientes convectivos. Con lo cual se llega a la conclusión de que no varían significativamente. Por lo tanto, la temperatura máxima que alcanzará el sistema tanque-colector en condiciones dinámicas es aproximadamente de 67.12 °C.

3.4. Análisis de la presión en el tanque.

A continuación, se realizará un análisis al recipiente donde se encontrará almacenado el agua caliente.

Se describe el análisis de forma breve y concisa de un recipiente de pared delgada.

Datos del recipiente:

$r = 0.16$ m.

Fabricado de Acero Inoxidable.

Con esfuerzo máximo a tensión 241 Mpa.

Con esfuerzo máximo a compresión 601 Mpa.

Espesor de 1.5 mm.

Primero se debe de verificar si el tanque es de pared delgada con la siguiente ecuación.

$t < 1/10$ radio del recipiente, al realizar el análisis se verifica que se trata de pared delgada.

Luego se debe de verificar el esfuerzo tangencial con la siguiente ecuación.

$$\sigma_t = \frac{P_i r_i}{t}$$

Donde

- P_i es la presión interna del recipiente,
- r_i = radio del recipiente.
- t = espesor del tanque.

Luego se verifica la fuerza máxima sometido a un esfuerzo longitudinales distribuida en la periferia del cilindro, con la siguiente ecuación.

$$F = p_i \pi \sigma_1^2$$

Esa fuerza distribuida en el área periférica del cilindro determina los esfuerzos longitudinales con la siguiente ecuación:

$$\sigma_L = \frac{F}{A_p} = \frac{P_i r_i}{2t}$$

Luego se utiliza la Teoría de Columb Mort.

$$\frac{\sigma_1}{s_{ut}} - \frac{\sigma_2}{s_{uc}} = \frac{1}{n}$$

Donde

- $\sigma_1 =$ *esfuerzo a tension*
- $\sigma_2 =$ *esfuerzo a compresion*
- $s_{ut} =$ *esfuerzo ultimo a tension*
- $s_{uc} =$ *esfuerzo ultimo a compresion*
- $n =$ *factor de seguridad*

Sustituyendo todos los valores nos queda de incógnita la presión interna utilizando un factor de seguridad critico de 1.

La presión máxima que soporta la lámina es de 433 psi.

El recipiente soportara una presión máxima de 30 psi ya que tiene una válvula de seguridad con lo cual se garantiza el buen funcionamiento del elemento sin llegar a los esfuerzos máximos de la lámina de acero inoxidable.

3.5 Comportamiento del colector solar

A continuación, se presentan una serie de gráficos, los cuales son producto de una simulación en Microsoft Excel que corresponden al comportamiento del colector solar para el primer día de operación con un volumen de agua de 35L, dicho comportamiento se ha estimado, de acuerdo a los parámetros calculados anteriormente.

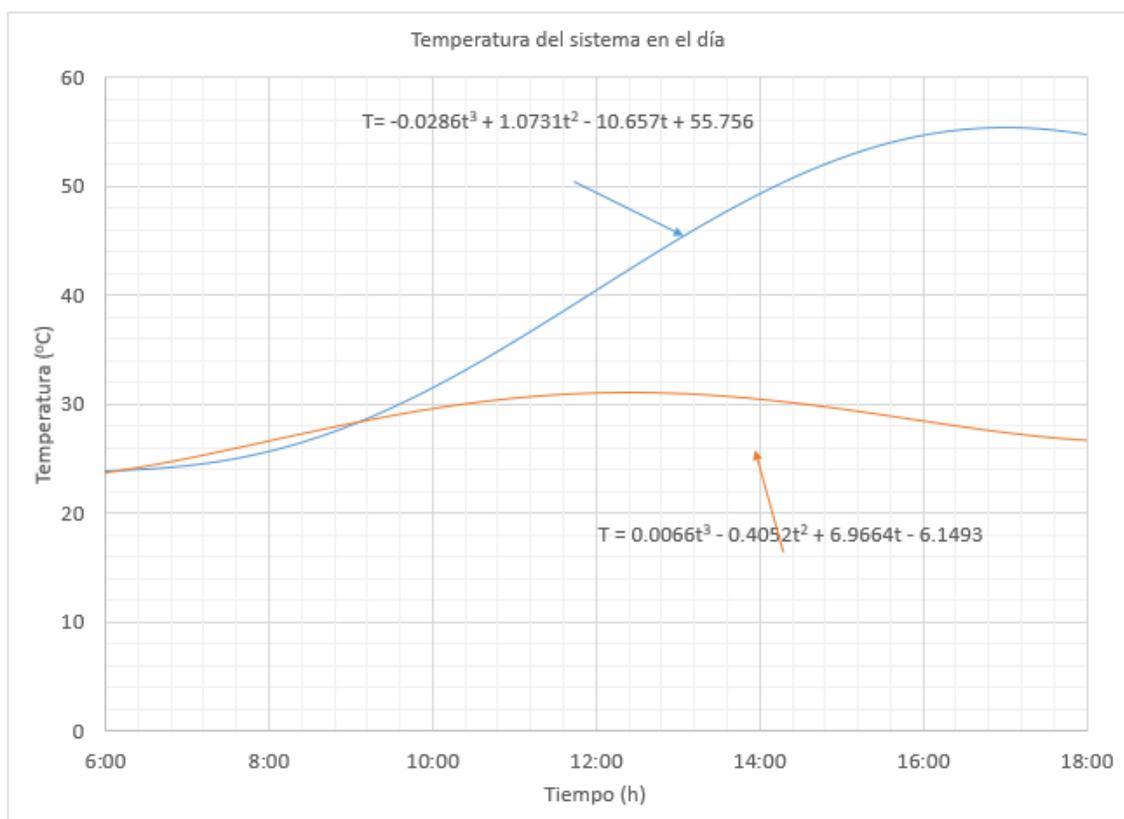


Gráfico 4. Temperatura del colector durante un día de operación.

En el gráfico anterior se puede observar el comportamiento del colector solar (color azul) durante un día de operación, y la temperatura ambiente (color rojo). (Iniciando a las 6:00 AM y terminando a las 6:00 PM), alcanzando el sistema una temperatura que rondará los 55 °C, esto para un primer día de operación.

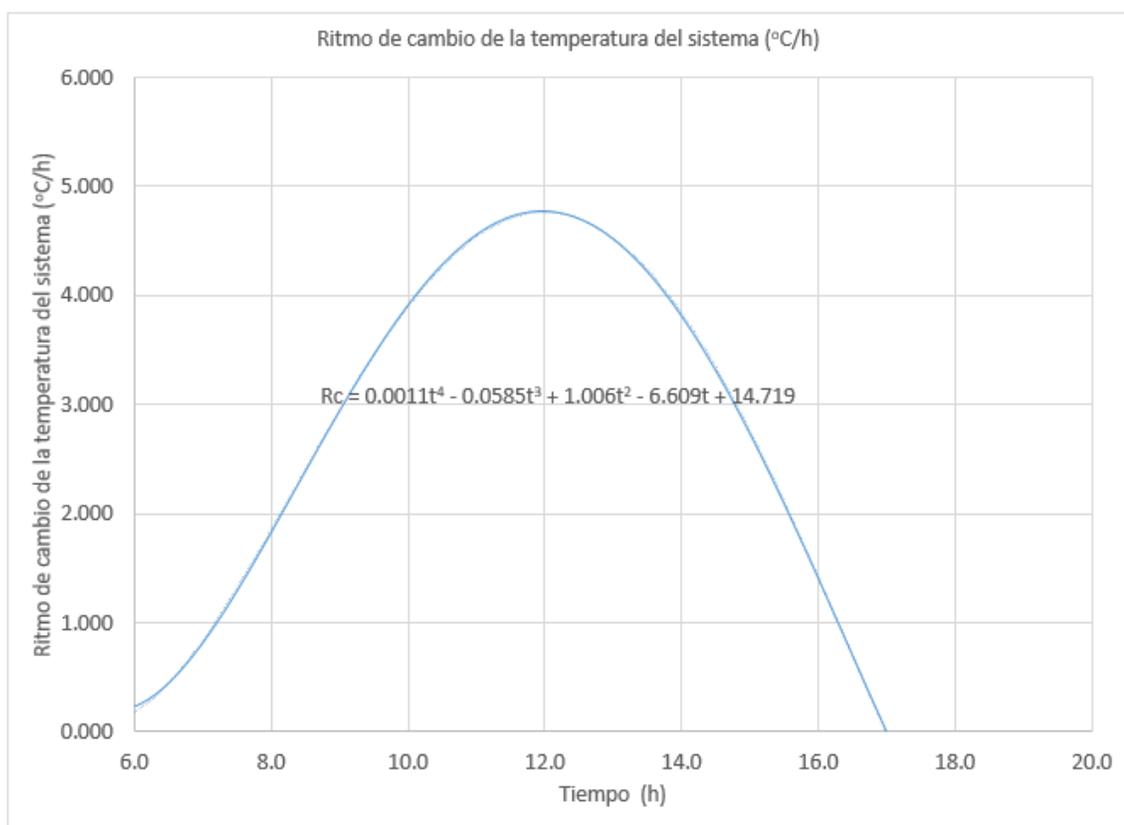


Gráfico 5. Ritmo de cambio de la temperatura del colector en función de las horas del día.

En el gráfico anterior se puede observar el comportamiento del colector en función de las horas del día (iniciando a las 6:00 AM y terminando a las 6:00 PM), es decir, conforme el tiempo en el día avanza, el ritmo de cambio de la temperatura es menor por la mañana y por la tarde, teniendo su máximo en horas de medio día donde tenemos el máximo ritmo de cambio en el cual llega cercano a los 4.5°C/h.

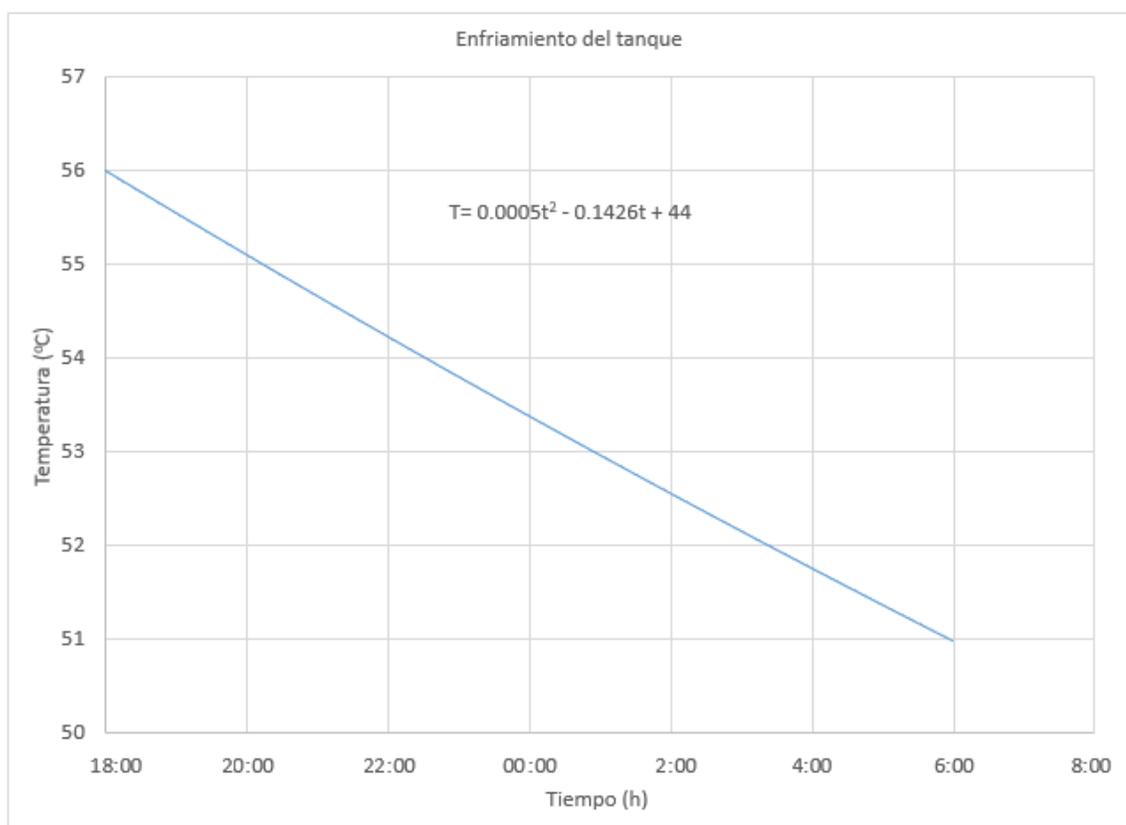


Gráfico 6. Representación de la pérdida de temperatura que se da en el tanque, en función del tiempo.

En la Gráfico 6 tenemos el comportamiento del colector solar durante el periodo en el cual no le incide radiación solar (noche). La temperatura del agua en el colector en un día de operación aumenta y el cual por estar a una temperatura mayor a la del ambiente existe un flujo de calor hacia este y la temperatura del agua en el colector disminuye.

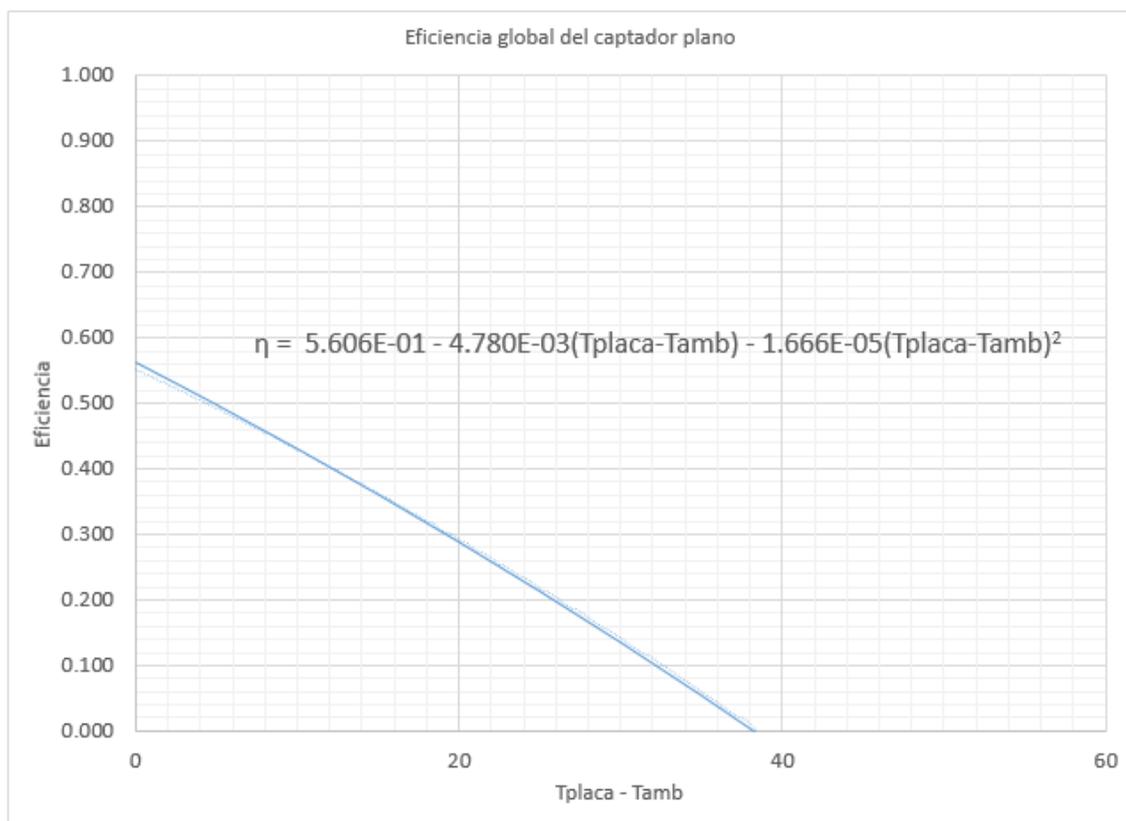


Gráfico 7. Eficiencia del colector solar.

En el gráfico anterior se muestra el comportamiento de la eficiencia global del colector solar, donde se ha resaltado la ecuación de la curva que representa dicha eficiencia. Se observa que cuando la diferencia de temperaturas es igual a cero es cuando tenemos la máxima eficiencia que el colector puede alcanzar.

CAPÍTULO IV: MONITOREO Y PRESUPUESTO

4.1. Componentes del sistema de monitoreo

En el presente capítulo se realiza la descripción de los diferentes componentes electrónicos que están incorporados en todo el sistema del colector solar. Especialmente los sensores que lleva en puntos de interés para tomar la lectura en tiempo real y así monitorear las variables involucradas. Además del sistema encargado de recolectar la información y mostrarla de manera comprensible y fácil de interpretar.

Se describe el funcionamiento de cada sensor para poder mostrar las variables, siendo monitoreadas por una plataforma de código abierto, basada en hardware y software flexible y fácil de usar.

A continuación, la ubicación de los sensores del equipo:

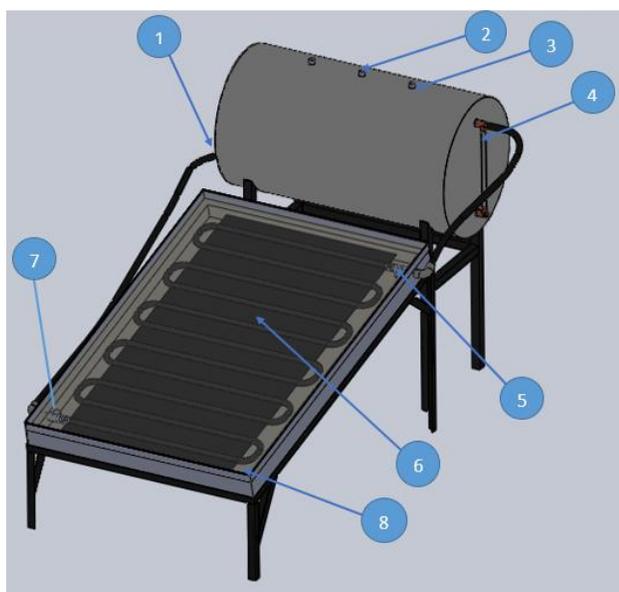


Figura 37. Esquema para la ubicación de los sensores en el equipo.

De la figura anterior se describen los sensores de la siguiente manera:

Tabla 2 Descripción de los sensores del esquema del equipo.

Número	Elemento	Descripción
1	Sensor de temperatura #1	Sensor para conocer la temperatura del agua en el tanque.
2	Válvula de alivio	Libera la presión del tanque acumulador cuando se alcanza la presión de 30 PSI
3	Sensor de presión	Sensor de presión con el objetivo de conocer la presión interna del tanque.
4	Visor de nivel	Muestra de forma visible el nivel en el tanque.
5	Sensor de temperatura #2	Sensor para conocer la temperatura del agua a la salida de la placa absorbente.
6	Sensor de temperatura #3	Sensor para conocer la temperatura de la placa absorbente.
7	Sensor de temperatura #4	Sensor para conocer la temperatura del agua a la entrada de la placa absorbente.
8	Sensor de irradiancia	Sensor para conocer la irradiancia que recibe el colector

4.1.1. Sensor de presión.

Antes de mencionar el sensor de presión a utilizar en el tanque colector, se describen algunos conceptos importantes, para contribuir con la comprensión del funcionamiento de dicho sensor, tales como: presión, tipos de sensores y el funcionamiento.

La presión es una fuerza por unidad de superficie generalmente medida en pascales (Pa) según el Sistema Internacional, o en libras sobre pulgada cuadrada (PSI), según el Sistema Inglés.

Existen dos formas de clasificar los medidores de presión, por la naturaleza de la medida y según el principio de funcionamiento.

Según su naturaleza:

- Presión Atmosférica, que para su medida se utiliza un barómetro. La presión atmosférica es el peso por unidad de superficie ejercida por la atmósfera.
- Presión Relativa, el instrumento que se utiliza es un manómetro. Es la presión superior a la atmosférica. El manómetro mide la diferencia entre a presión absoluta y la presión atmosférica.
- Presión de Vacío, se utiliza un vacuómetro para su medida, y es la presión menor a la presión atmosférica, su valor está comprendido entre el cero absoluto ($0 K$) y el valor de presión atmosférica.
- Presión Absoluta, para obtener la medida, solo se debe de sumar las presiones, atmosférica y la relativa.

Según el principio de funcionamiento:

- Gravitacionales, son los que utilizan una columna de líquido.
- Elásticos, son los que operan por una deformación de un material.
- Transductores, estos operan por la conversión de señales eléctricas.

En el tanque de almacenamiento se utiliza un sensor de tipo electrónico, su funcionamiento se basa en un transductor térmico que utiliza el principio de la proporcionalidad. Entre la energía disipada de la superficie de un filamento calentado por una corriente constante y la presión del gas. Como es un transductor térmico de termopar que contiene un filamento en V que lleva incorporado un pequeño termopar, al pasar una corriente constante a través del filamento, su temperatura es inversamente proporcional a la presión absoluta del gas.

El sensor seleccionado (como se muestra en la figura siguiente), permite monitorear la presión al interior del tanque acumulador, es compatible con el Arduino seleccionado y posee una capacidad de hasta 150 psi. Operando a un voltaje de 5V, funciona para aceite, combustible, Diesel, gas, agua y presión de aire. Es roscable, con un diámetro de $\frac{1}{8}$ ", de rosca ordinaria y puede operar a una temperatura máxima de 120°C.



Figura 38. Sensor de presión.

4.1.2. Sensor de temperatura.

Ahora se describen algunos conceptos importantes para comprender de mejor manera el funcionamiento de los sensores de temperatura incluidos en el sistema. No sin antes recordar de manera básica el concepto de temperatura.

La temperatura es una propiedad que fija el sentido del flujo de calor, ya que éste pasa siempre de una temperatura más alta a una más baja. Cualitativamente, un cuerpo caliente tiene más temperatura que uno frío; cuantitativamente, se suele medir la temperatura aprovechando el hecho de que la mayoría de los cuerpos se dilatan al calentarse.

La temperatura convencionalmente se mide con un termómetro, el cual se basa del volumen de una masa fija de fluido, que suele ser mercurio o alcohol. Estos en el equilibrio térmico se dilatan o contraen y su volumen se marca en una escala graduada cuando la temperatura disminuye o aumenta, respectivamente.

Comúnmente se expresa en grados Celsius, y en el SI en Kelvin y ésta es conocida como escala de temperatura absoluta. El término temperatura absoluta significa que el cero en la escala Kelvin, denotado como 0 K, es la temperatura teórica más baja que puede obtenerse.

Se utiliza una gran variedad de transductores para medir temperatura. Algunos de ellos la convierten directamente en una señal eléctrica, y otros emplean la combinación con un transductor. Los sensores de temperatura transforman los cambios en señales eléctricas que son procesados por el equipo electrónico.

Hay varios tipos de sensores de temperatura en el mercado y los más utilizados a nivel comercial son los siguientes:

- Bandas Bimetálicas.
- Termopares.
- Detectores de temperatura resistivos (RTD).
- Termistores.
- Sensores de semiconductor.
- Pirómetros de radiación.

En el sistema del colector solar se utilizarán sensores de temperatura tipo termopar, también llamado termocupla y que recibe este nombre por estar formado por dos metales.

Los metales puros tienen un coeficiente de resistencia de temperatura positivo bastante constante, por lo tanto, el factor de proporcionalidad entre la resistencia y la temperatura es una línea recta. Al usar un alambre de metal puro para la medición de temperatura, se le refiere como detector resistivo de temperatura, o RTD (Resistive Temperature Detector).

El RTD, es un instrumento de medida cuyo principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico como se muestra en la siguiente figura:

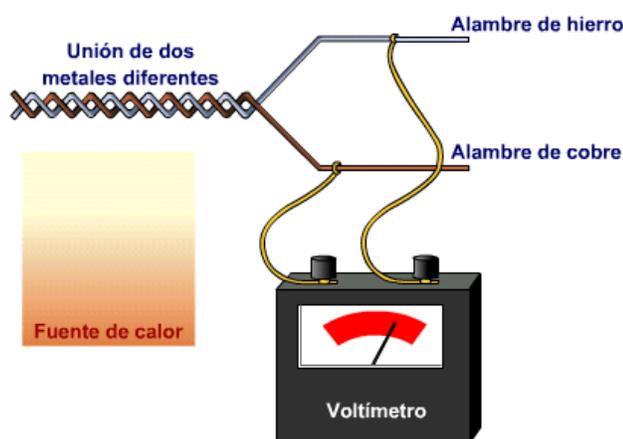


Figura 39. Representación del efecto termoeléctrico

Un material termoeléctrico permite transformar directamente el calor en electricidad, o bien generar frío cuando se le aplica una corriente eléctrica.

El termopar genera una tensión que está en función de la temperatura que se está aplicando al sensor. Midiendo con un voltímetro la tensión generada, se conocerá la temperatura.

A continuación, se describe el tipo de sensor a utilizar en el colector solar.

El sensor de temperatura a utilizar consta de un termopar (como se mencionó anteriormente), el tubo que encapsula al transductor, es de acero inoxidable, resistente al agua, y permite operar en el rango de voltaje de 5V, al igual que el Arduino. El rango de operación de temperatura es desde -55°C hasta 135°C , con un nivel tolerancia de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$.

En la siguiente figura se muestran como son físicamente dichos sensores, el cable rojo es el que transmite el voltaje, el amarillo la información, y el negro es el correspondiente a la Tierra. Poseen una longitud total de 1 metro.



Figura 40. Sensores de temperatura.

4.1.3. Sensor de irradiancia.

Existen varios sensores de irradiancia en el mercado, tanto en calidad como precio, y todo depende de los materiales de los cuales se encuentra fabricado, así también de su procedencia de fabricación. También es importante mencionar la aplicación a la cual estará sujeta este tipo de sensor, y así será determinada la precisión en su lectura, derivada de la calidad del mismo.

Anteriormente cuando se habló del sensor de presión y de temperatura, se hizo una pequeña recopilación de la información más básica de los mismos, de igual forma, a continuación, se describe de manera sencilla en qué consiste el sensor de irradiancia.

El sensor de irradiancia, conocido como piranómetro (también llamado polarímetro y actinómetro) es un instrumento meteorológico utilizado para medir de manera muy precisa la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra. Se trata de un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar (Watt por metro cuadrado).

Para las medidas de radiación difusa y albedo, la radiación directa se suprime utilizando un disco parasol. El principio físico utilizado generalmente en la medida es un termopar sobre el que incide la radiación a través de dos cúpulas semiesféricas de vidrio. Las medidas se expresan en W/m^2 .

Los tipos de piranómetros más conocidos son:

- Piranómetro Térmico.
- Piranómetro Fotovoltaico.

El piranómetro térmico se constituye por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos semiesferas de cristal. La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generando una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.

El piranómetro fotovoltaico tiene como fundamento el efecto fotoeléctrico. La radiación incide sobre un fotodiodo que es capaz de diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación.

Luego de describir algunos conceptos básicos, se mencionan las características importantes del sensor de irradiancia a utilizar:

El sensor de irradiancia a utilizar, tiene como espectro de respuesta desde 500 nm a 900 nm. El rango de operación de temperatura es de 0°C hasta 70°C, y sus dimensiones son 40 mm de diámetro del sensor, con un diámetro de base de 70mm y una altura total del dispositivo de 38 mm.



Figura 41. Sensor de irradiancia.

4.1.4. Arduino MEGA ADK

Arduino MEGA ADK, es una plataforma que posee varios elementos electrónicos, tanto mediadores como circuitos integrados. Dispone de un puerto USB host interface para conectarlo con dispositivos basados en el chip MAX3421e. Dispone de 54 pines I/O (14 de los cuales con PWM), 16 entradas analógicas, 4

puertos UARTs (por hardware), un cristal de 16MHz, un conector USB, un conector de alimentación Jack, pines para ICSP y un botón de RESET.

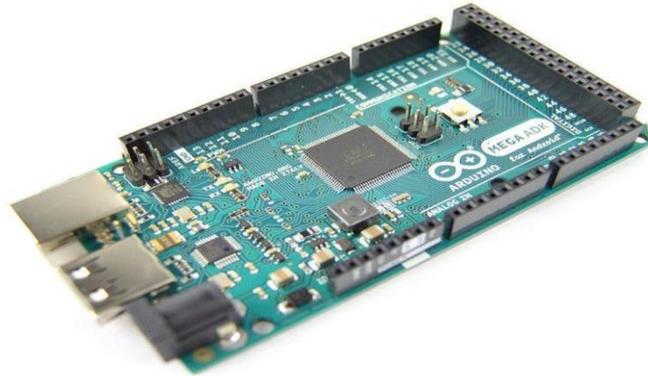


Figura 42. Arduino MEGA ADK.

Como se utiliza:

Cada uno de los 54 pines de entrada y salida puede ser operado a 5 V y puede recibir o entregar un máximo de 20 mA.

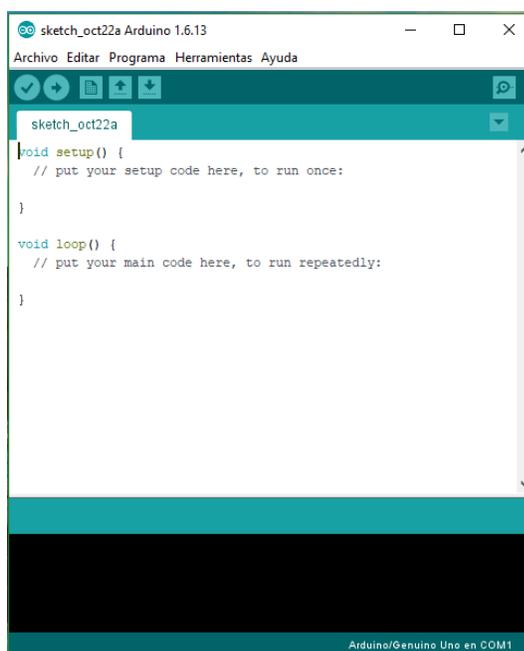
Algunos pines poseen funciones especiales, los pines del 1 al 19 actúan como receptores o transmisores de señal TTL (transistor-transistor).

El pin 13 posee conexión con un Led, el cual indica cuando dicho pin se encuentra energizado o desenergizado. El funcionamiento del microcontrolador se basa en la conexión de diferentes elementos electrónicos a sus entradas y salidas y programando mediante el entorno de desarrollo IDE.

4.1.4.1. Sistema para la programación de las variables SW Arduino.

El software de Arduino es un entorno de desarrollo integrado o IDE (Integrated Development Environment por siglas en inglés). Es un programa informático compuesto por un conjunto de herramientas de programación.

El IDE de Arduino es un entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación; es decir, consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica (GUI). Además, incorpora las herramientas para cargar el programa ya compilado en la memoria flash del hardware, se muestra una vista de cómo se observa el programa.



```
sketch_oct22a
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
}

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
}
```

Arduino/Genuino Uno en COM1

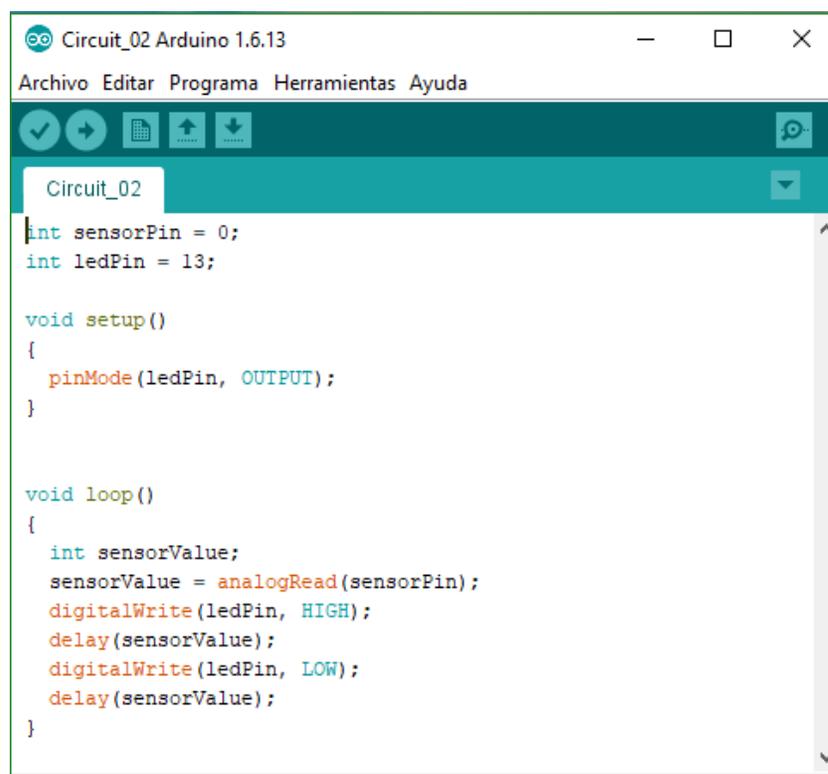
Figura 43. Vista de la interfaz de Arduino.

La estructura básica de programación de Arduino es bastante simple y divide la ejecución en dos partes:

- Setup.
- Loop.

Setup() constituye la preparación del programa y loop() es la ejecución.

- En la función Setup() se incluye la declaración de variables y se trata de la primera función que se ejecuta en el programa. Esta función se ejecuta una única vez y es empleada para configurar el pinMode (si un determinado pin digital es de entrada o salida) e inicializar la comunicación serie. Al mismo tiempo se utiliza para declarar pines encargados de servomotores y las funciones correspondientes a pantallas LCD.
- La función loop() incluye el código a ser ejecutado continuamente (leyendo las entradas de la placa, salidas, etc.)¹⁰



```
Circuit_02 Arduino 1.6.13
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
Circuit_02
int sensorPin = 0;
int ledPin = 13;

void setup()
{
  pinMode(ledPin, OUTPUT);
}

void loop()
{
  int sensorValue;
  sensorValue = analogRead(sensorPin);
  digitalWrite(ledPin, HIGH);
  delay(sensorValue);
  digitalWrite(ledPin, LOW);
  delay(sensorValue);
}
```

Figura 44. Programación en Arduino.

¹⁰ Información sobre Arduino MEGA ADK, obtenida de LINARES C. C. & TURCIOS A. O. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE CLIMATIZADOR EVAPORATIVO AUTOMATIZADO PARA FINES DIDÁCTICOS (tesis de pregrado). Universidad de El Salvador, San Salvador, El Salvador

4.2. Presupuesto

En los apartados anteriores se han descrito los diferentes componentes que estarán en todo el sistema tanque-colector, describiendo su ubicación y funcionamiento, pero hasta el momento no se ha planteado la forma de construcción del equipo y el presupuesto para la ejecución de cada etapa.

A continuación, se describe el presupuesto individual de cada parte del sistema tanque-colector, y luego se da un resumen del presupuesto general. Todo con el fin de tener una idea más clara de los costos que serán empleados en el proyecto.

Para llevar a cabo la construcción del colector solar plano, es necesario dividir los costos en dos etapas: La inversión requerida para el inicio del proyecto y los requeridos para la etapa de funcionamiento.

Los recursos necesarios para la construcción e instalación del colector solar plano, constituyen la inversión fija o inmovilizada del proyecto. Los que se requieren para el funcionamiento o pruebas, constituyen la otra etapa de la inversión.

Para determinar el presupuesto preliminar, se opta por descomponer en partes más simples el sistema tanque-colector para obtener un presupuesto individualizado de sus costos unitarios y tener más claro cuál será la inversión necesaria por cada parte del sistema.

Las partes más importantes en las que se puede dividir el sistema tanque-colector, son las siguientes: la estructura de soporte del tanque, la estructura del colector, el tanque acumulador, la parte de control y el colector en sí. Después de definir cada subconjunto se han considerado lo siguiente:

- Costos en material.

- Costo de insumo.
- Costo de mano de obra.
- Tiempo de fabricación.

A continuación, se presenta el desglose de las partes del tanque-colector, para obtener sus costos.

4.2.1. Estructura de soporte del tanque.

Es el encargado de soportar el peso del tanque, la cual será construida de la forma siguiente:



Figura 45. Estructura de soporte del tanque acumulador.

A continuación, se presentan los costos de materiales e insumos necesarios para la elaboración del soporte del tanque:

Tabla 3. Materiales e insumos de la estructura del tanque acumulador.

Cantidad	Unidad	Material	Insumo	Precio unitario (\$)	Total (\$)
6	m	Tubo cuadrado de 1" chapa 16		8.75	8.75
5	lb		Electrodo AWS 6010 de 3/32"	1.50	7.50
6	m	Platina de acero estructural de 3/32"x1"		0.72	4.30
1			Pintura spray negro en color	2.35	2.35
				Total	22.90

Otras consideraciones dentro del costo de la estructura:

- Costo de la mano de obra \$ 15.10 dólares.
- Tiempo estimado de fabricación: 8 horas.

Por lo tanto: Costo total de la estructura del colector= costo de materiales e insumos + costo de la mano de obra.

Costo total de la estructura: \$22.90 + \$15.10= \$ 38.00

4.2.2. Tanque acumulador.

Es donde se almacena el agua, después de ser calentada en el colector.

Se visualizan tres piezas principales: el tanque, el aislante térmico, la capa protectora. También cuenta con una válvula de alivio con sus niples y camisas, como se muestra en la siguiente figura:

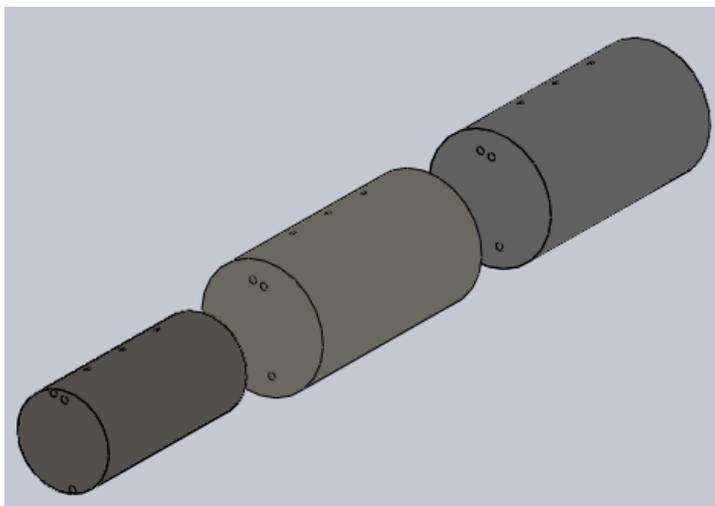


Figura 46. Tanque acumulador, envoltura de aislante y lámina protectora.

A continuación, se presenta una tabla con los costos de materiales e insumos necesarios para la elaboración del tanque acumulador:

Tabla 4. Materiales e insumos del tanque acumulador.

Cantidad	Unidad	Material.	Insumo	Precio unitario (\$)	Total (\$)
1		Lámina lisa de acero inoxidable de 2m x 1m de 1/16" de espesor		135.00	135.00
1		Lámina lisa galvanizada de 2m x 1m de 1/16" de espesor		12.30	12.30
2	lb	Electrodo de tungsteno con torio de 1.6 mm de diámetro		3.50	7.00
4	m	Aislante de fibra de cerámica de 1.22 m de ancho		4.63	18.52
40		Remache pop 3/16" XA 1/4"		0.017	0.60
1			Visor nivelar de agua	62.00	62.00

9			niples con sus respectivas camisas de acero inoxidable de ½"	6.11	55.00
1			Juego de válvula de alivio de 30 psi	68.00	68.00
				Total	357.82

Otras consideraciones dentro del costo total del tanque acumulador:

- Costo de la mano de obra \$ 122.18 dólares.
- Tiempo estimado de fabricación: 30 horas.

Por lo tanto: Costo total de la estructura del colector= costo de materiales e insumo + costo de la mano de obra.

Costo total del tanque acumulado: $\$357.82 + \$122.18 = \$480.00$

Estructura del colector.

Soporta la caja colectora, y está constituido de la siguiente manera:

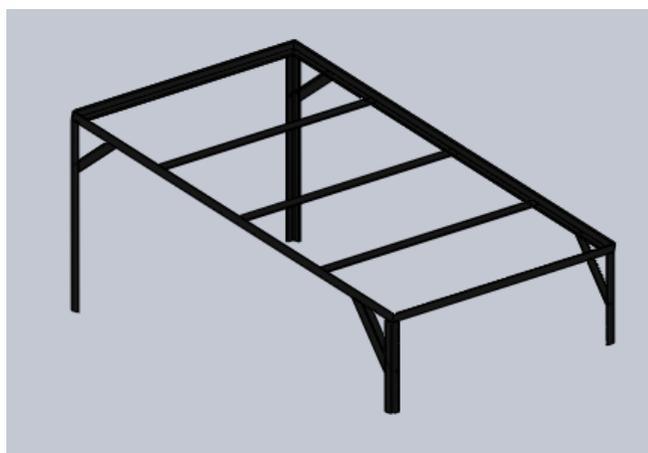


Figura 47. Estructura de soporte del colector solar.

A continuación, se presenta una tabla con los costos de materiales e insumos necesarios para la elaboración de la estructura de soporte del colector solar:

Tabla 5. Materiales e insumos de la estructura del colector.

Cantidad	Unidad	Material.	Insumo	Precio unitario (\$)	Total (\$)
6	m	Ángulo de acero estructural de 1/8" x1"x1"		0.76	4.56
2	lb		Electrodo AWS 6010 de 3/32"	1.50	3.00
1			Pintura en Spray color gris	2.35	2.35
				Total	9.91

Otras consideraciones dentro del costo total de la estructura del colector:

- Costo de la mano de obra: \$30.09
- Tiempo estimado de fabricación: 8 horas

Por lo tanto: Costo total de la estructura del colector= costo de materiales e insumos costo de la mano de obra

Costo total de la estructura del colector: \$9.91+ \$30.09 = \$ 40.00

4.2.3. Colector solar plano

Es la parte del sistema donde se transforma la energía solar en energía térmica y estará compuesto de varias piezas importantes, tales como: caja o cubierta, aislante, placa absorbente, placa de vidrio, partes metálicas para dar rigidez a la caja, empaque, tubería de cobre, codos, mangueras, como se muestra a continuación:

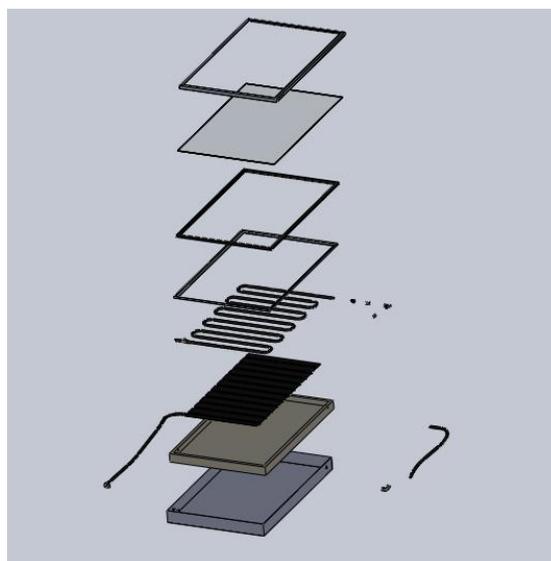


Figura 48. Desglose de los elementos que constituyen el colector solar.

A continuación, se presenta una tabla con los costos de materiales e insumos necesarios para la elaboración del colector solar:

Tabla 6. Materiales e insumos para la construcción del colector solar.

Cantidad	Unidad	Material.	Insumo	Precio unitario (\$)	Total (\$)
1		Lámina lisa galvanizada de 1mx2m de 1/16" de espesor		12.30	12.30
1	m	Aislante de fibra cerámica de 1.22 m de ancho		19.48	19.48
2		acoples rápidos de cobre de 5/8"		5.25	10.50
0.96	m ²	Vidrio transparente de 5mm de espesor más soporte		38 .00	38 .00
0.86	m ²	tubo de cobre 1.5" de diámetro de 1/16" de espesor		159.00	159.00

35	ft	Tubería de cobre de $\frac{5}{8}$ "		2.25	72
3	m	Tubería de neopreno de $\frac{5}{8}$ "		5	15
6	m	Ángulo estructural de aluminio de $\frac{3}{16}$ "x1"x1"		1.38	8.28
2			Silicon	3.50	7.00
2			Pintura spray, negro mate	2.35	6.70
60		Remache pop de $\frac{3}{16}$ XA $\frac{1}{4}$ "		0.07	4.20
2			Acoples para sensores	18.00	38.00
2			Codos de $\frac{1}{2}$ "	1.50	3.00
2		Mangueras con acoples		50	50.00
				Total	406.46

Otras consideraciones dentro del costo total de la estructura del colector:

Costo de la mano de obra \$ 365.00

Tiempo estimado de fabricación: 80 horas.

Por lo tanto: Costo total del colector solar= costo de materiales e insumo + costo de la mano de obra

Costo total del colector solar: \$406.46 + \$365 = \$ 771.46

4.2.4. Otras partes para el funcionamiento del equipo

Son indispensables para el buen funcionamiento de todo el sistema como válvulas, tuberías auxiliares, y sensores los cuales son los encargados de controlar las diferentes variables dentro de todo el sistema colector-tanque y están colocados en diferentes puntos del sistema:

A continuación, se presenta una tabla con los costos de materiales e insumos necesarios para el funcionamiento del sistema de monitoreo:

Tabla 7. Materiales e insumos necesarios para la instalación del sistema de control.

Cantidad	Unidad	Material.	Insumo	Precio unitario (\$)	Total (\$)
4			Sensores de temperatura	7.00	28.00
1			Sensor de presión	15.00	15.00
1			Sensor de irradiancia	109	109
1			Arduino modelo MEGA ADK 2560	12.00	12.00
1			pantalla LCD SainSmart Mega2560 R3 de 7" 480x800 TFT	80.00	80.00
2			Válvula check de 1/2"	5.75	11.50
3			rosca para acoplar de los sensores	4.00	12.00
1			Válvula de alivio	70	70.00
1		Llave manguera ECO grival 1/2"		3.20	3.20
6	m	Tubo de PVC de 1/2"		1	6.00
10	m	Cable de corriente THHN calibre # 12		0.48	4.80
1			Silicón	4.73	4.73
8	m	Cables para la conexión de los sensores		1.10	8.80
20	m	Manguera plástica de cristal 1/2", con acoples		0.40	8.00

1		elementos electrónicos para el control de monitoreo		25	25.00
1		Convertidor		8	8
				Total	406.03

Otras consideraciones dentro del costo total de la estructura del colector:

- Costo de la mano de obra \$85.
- Tiempo estimado de instalación: 30 horas.

Por lo tanto: Costo de otras partes del colector= costo de materiales e insumo + costo de la mano de obra.

Costo total de otras partes del colector: $\$406.03 + \$85 = \$ 491.03$

Algunos insumos tendrán un costo extra, ya que serán importados al país lo cual se refleja como costo de transporte de mercadería con un valor de \$90.00 dólares.

4.3. Presupuesto general

Anteriormente se explicó con detalle los costos individualizado de las partes del sistema tanque-colector, mostrando una proyección de los costos al momento de construir el colector solar plano.

Para llevar a cabo el presupuesto general para el proyecto se tiene que sumar todos los subtotales de cada apartado para tener el costo total del proyecto, como se describe a continuación.

No sin antes aclarar que se han incluido un total de \$ 200 dólares al presupuesto general, en concepto de costo, para realizar las pruebas con el equipo. Al

principio del capítulo se mencionó que estos serían los costos requeridos para el funcionamiento. Esta partida es necesaria para cubrir imprevistos de algunas piezas o sensores que puedan tener un desperfecto al momento de realizar las pruebas en el equipo, con el objetivo de evitar la sorpresa de un gasto no contemplado.

Tabla 8. Costos por etapa y costo total del proyecto.

Etapas de construcción del sistema	Costos por etapa (\$)
Estructura del tanque	38
Tanque acumulador	480
Estructura del colector	40
Colector solar	771.46
Otras partes del colector	491.03
Importación de mercadería	90.00
Costos requeridos para el funcionamiento	200
TOTAL	1,693.69

A continuación, se presenta el tiempo aproximado de construcción de todo el sistema:

Tabla 9. Tiempo de construcción por etapa y total de todo el proyecto.

Etapas de construcción del sistema	Tiempo por etapa (h)
Estructura del tanque	8
Tanque acumulador	30
Estructura del colector	8
Colector solar	80
Otras partes del colector	30
TOTAL	156

CAPÍTULO V: CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO

En el capítulo anterior se detalló el costo unitario de cada parte del colector y la forma preliminar para su construcción. En este apartado se describen los principales requerimientos de diseño, entendiéndose por esto, como la cantidad de material a utilizar, el tiempo necesario para construcción del mismo y las características de funcionamiento con las que debe de cumplir cada parte.

En el presente se hace un detallado recorrido a lo largo del proceso realizado para la culminación satisfactoria de la construcción del equipo.

5.1. Construcción de las bases tanque y colector

Pasos importantes seguidos:

1. Se midieron y cortaron los tramos correspondientes a cada una de las bases.

Para el soporte del colector:

De un ángulo de acero estructural de 1/8" x1"x1":

- Tramos de 1.20 m
- Tramos de 0.80 m
- 2 tramos de 0.52 m
- 2 tramos de 0.25 m
- 2 tramos de 0.17 m
- 2 tramos de 0.22 m

También fueron necesarias tres platinas de acero AISI 1020 de 1/2" x 1/8" de una longitud de 0.76 m.

Para la base del tanque acumulador:

De un perfil cuadrado de 1 pulgada, y con los siguientes tramos:

- 4 tramos de 0.62 m.
- 2 tramos de 0.60 m.
- 2 tramos de 0.30 m.

También fueron necesarias dos platinas de acero 1020 de $\frac{1}{2}$ " x $\frac{1}{16}$ "

2. Se colocaron en la posición adecuada cada tramo y se realizó la soldadura correspondiente con soldadura eléctrica utilizando electrodo AWS 6010.
3. Se quitaron los excesos de rebaba provocadas por la soldadura eléctrica, se limpió bien la superficie, para poder aplicar pintura sobre cada soporte, de esta manera se dio un acabado visiblemente atractivo en cada pieza.



Figura 49. Soporte del colector y de tanque acumulador.

5.2. Construcción del tanque acumulador

Pasos seguidos para la construcción del tanque:

1. Se midieron y cortaron con la longitud necesaria cada extremo del tanque y se perforaron los agujeros correspondientes, para los diferentes sensores.

- Se midió a una longitud de 0.70 m de ancho por 1.0 m de largo para así formar una circunferencia de 0.32 m.
- Se cortaron dos piezas circulares de 0.32 m de diámetro.

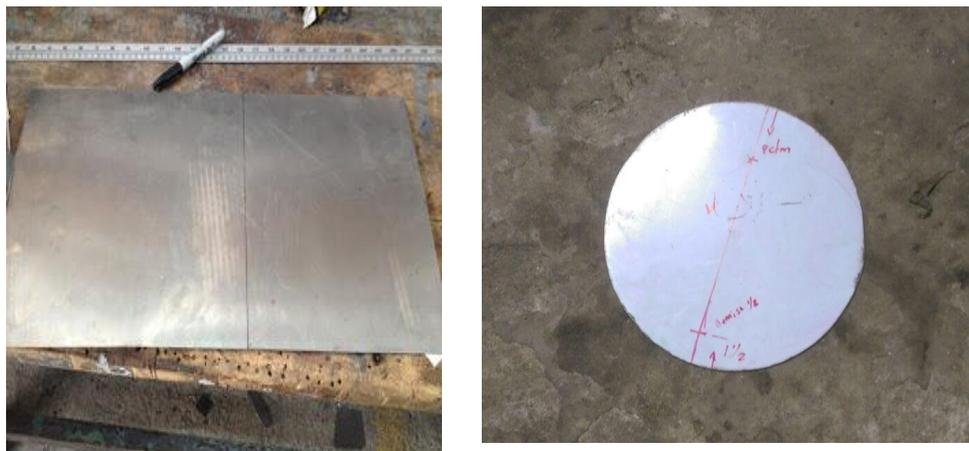


Figura 50. Formando el cilindro para el tanque acumulador.

Con la lámina de 0.70x1.0 m se formó un cilindro aplicando puntos de soldadura, y luego se procedió a perforar los agujeros, donde se soldaron los niples para los accesorios de monitoreo, de igual manera los agujeros para las respectivas salidas y entradas de agua.

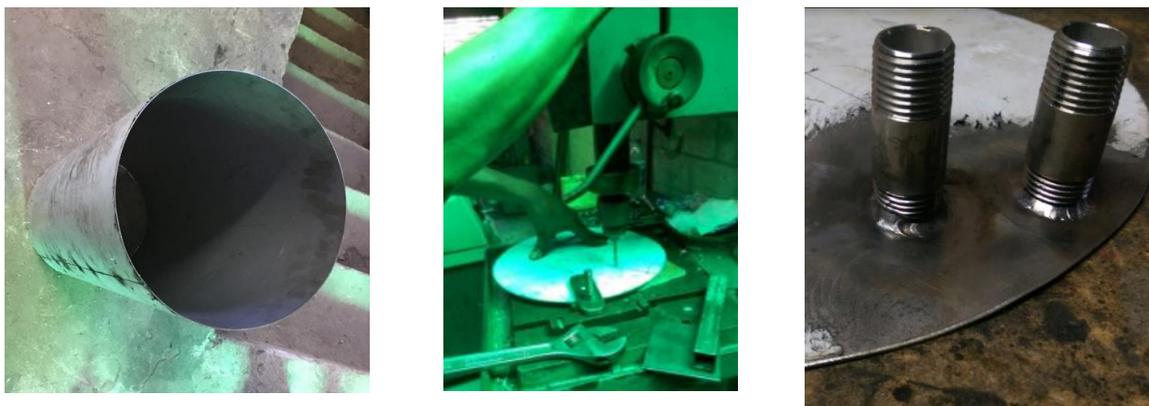


Figura 51. Lámina de cilindro rolada, tapaderas fabricadas y niples para accesorios adaptados.

Después de haber realizado el procedimiento anterior, se procedió a la unión de las piezas para así formar el tanque de almacenamiento. Se aplicaron puntos de soldadura para colocar los extremos y luego se aplicaron cordones de soldadura para hermetizar el tanque, la soldadura se aplicó de manera intermitente para evitar la deformación de las piezas por el exceso de calor.



Figura 52. Soldadura de tanque acumulador.

Se removieron los excesos de rebaba provocadas por la soldadura y se inspeccionaron los cordones para asegurarse de la hermeticidad del tanque.



Figura 53. Limpieza de rebabas de soldadura.

Utilizando un compresor de aire, se le aplicó una presión constante de 35 PSI durante 30 minutos para verificar las posibles fugas, comprobando de esta manera se asegura hermeticidad del tanque.

Una vez que el cilindro de acero inoxidable se encontraba sellado, se procedió a colocar un aislante térmico de 5 cm de espesor, tanto en las partes laterales como en la parte cilíndrica del mismo.



Figura 54. Proceso de insulación del tanque acumulador.

Para finalizar con la construcción del tanque, se procedió a cortar una lámina galvanizada de 1/16" de espesor. Con el objetivo de proteger el aislamiento y no permitir que la humedad favoreciera el desprendimiento del material aislante.



Figura 55. Tanque acumulador finalizado.

5.3. Construcción del colector solar

Para realizar de forma exitosa la construcción del colector solar, contando con la base del mismo terminada, se procedió a realizar los siguientes pasos:

Se midieron y cortaron a la longitud correspondiente de una lámina galvanizada, dándole forma de caja, para que funcionara de carcasa protectora en el colector.



Figura 56. Caja de lámina galvanizada.

Para la construcción de la placa absorbente de 0.60 m de ancho por 1.10 m de largo:

- Se comenzó de un tubo de cobre de 1 ½" se cortaron 10 tramos de 0.60 m y luego se procedió a cortar el tubo, abriéndolo para darle la forma de placa.
- Teniendo las placas se les realizó un doblez con el diámetro de 5/8" correspondiente al diámetro de la tubería de cobre que se iba a utilizar para la circulación de agua.
- Luego se procedió a soldar las partes, teniendo cuidado de no deformarlas por el exceso de calor.



Figura 57. Fabricación de placa absorbente.

Teniendo la placa colectora de cobre, se procedió a doblar el tubo para darle forma de serpentín con una separación de 10 cm entre cada doblez. Para colocar los sensores realizaron perforaciones en los extremos del serpentín, un sensor de entrada y uno de salida, para conocer las temperaturas del agua.



Figura 58. Fabricación de serpentín.

Teniendo el serpentín que servirá como el conducto de fluido térmico, se procedió a soldar sobre la placa absorbente.



Figura 59. Uniendo con soldadura placa absorbente al serpentín.

Se procedió a colocar el aislante sobre la carcasa protectora para que no existan pérdidas de calor hacia la parte inferior del colector.



Figura 60. Instalación de aislante al cajón del colector.

Colocación de los sensores en las partes correspondientes:

Para la colocación de los sensores de temperatura en la placa, se empleó mucho cuidado en la manipulación de los mismos por su fragilidad. Se hicieron uso de los siguientes accesorios.

- T de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- 6 niples de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- Camisas de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- 2 adaptadores de $\frac{1}{2}$ " para los sensores (hechos a la medida).

Se verificó que no existieran fugas en las soldaduras de los tubos. Y se instaló el vidrio de forma adecuada.

5.4. Protección del sistema de monitoreo y ensamble general

Para la protección de la pantalla, el Arduino y todas las conexiones se han instalado al interior de una caja de acrílico, la cual los protege y almacena de manera segura.

Anteriormente se describió de forma parcial de la construcción de las partes más importantes del colector solar, en este apartado el ensamblaje que fue necesario para operar el equipo se describe en el apartado de manual de instalación del equipo, en el capítulo VII.

Para la protección de la estructura, el serpentín de cobre y la placa colectora, se ha aplicado una capa de pintura anticorrosiva color negro mate.

CAPÍTULO VI: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se encuentran las pruebas realizadas con el colector solar, con el objetivo de evidenciar el buen funcionamiento del equipo y de sus accesorios.

El período de prueba se realizó en los meses de marzo, abril y mayo. Se registraron valores de temperatura en intervalos de 1 hora, desde las 7 a.m. hasta las 4 p.m.

Los parámetros considerados, las fechas de las pruebas y la evaluación del equipo a diferentes condiciones de operación, se describen en el apartado siguiente.

6.1. Pruebas del sistema tanque-colector

Las pruebas realizadas con el equipo se detallan a continuación:

- Pruebas en el colector con condiciones normales de operación.
- Pruebas en el colector sin la cubierta de vidrio (colector solar plano sin cubierta).
- Pruebas en el colector con cubierta alternativa (plástico transparente).
- Pruebas en el colector en vacío (sin líquido en su interior).

En las pruebas se registran temperatura de tanque (T_{tanq}), temperatura a la entrada del colector (T_{ent}), temperatura a la salida del colector (T_{sal}) y temperatura de la placa colectora (T_{plac}).

Además, se registró la nubosidad del día, la cual se midió en apoyo con la siguiente imagen:



Figura 61. Representación del estado de nubosidad en el cielo. Tomada de “la meteorología del siglo XXI”¹¹

Por lo tanto, se expresa en octas, es decir octavos, refiriéndose a la imagen anterior, donde 0 octas es un cielo completamente despejado, y 8 octas es un cielo cubierto.

Y en la última columna se registró el valor de irradiancia a la que se encontraba expuesto el equipo en esa hora.

6.1.1. Pruebas en el colector con condiciones normales de operación.

Por “condiciones normales”, se refiere a que el equipo ha sido puesto a prueba con la cubierta de vidrio y sin sombra.

El volumen del tanque fue de 35 litros.

¹¹ La meteorología del siglo XXI, <http://www.canaltiempo21.com/las-nubes-y-su-clasificacion/>

Día 1: martes 6 de marzo de 2018

Tabla 10. Registro de datos en el primer día de pruebas en condiciones normales de operación.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
7:00	25.31	17.31	18.38	17.25	2/8	201
8:00	25.56	31.94	26.38	44.31	1/8	400
9:00	26.00	51.63	43.50	77.88	1/8	630
10:00	26.56	39.88	96.75	102.30	1/8	851
11:00	30.06	41.06	100.10	104.00	1/8	1007
12:00	34.75	45.25	101.60	105.70	1/8	1044
12:30	36.75	47.00	102.00	105.80	1/8	1027
1:00	40.06	48.25	98.13	102.50	1/8	990
1:30	43.63	51.13	98.94	102.70	1/8	931
2:00	46.50	53.38	99.31	101.10	1/8	859
3:00	48.00	56.56	85.00	95.75	1/8	707
4:00	47.75	48.25	68.50	81.69	1/8	488
Promedio	35.91	44.30	78.21	86.75		761.25

A continuación, el comportamiento de la irradiancia para el primer día de operación:

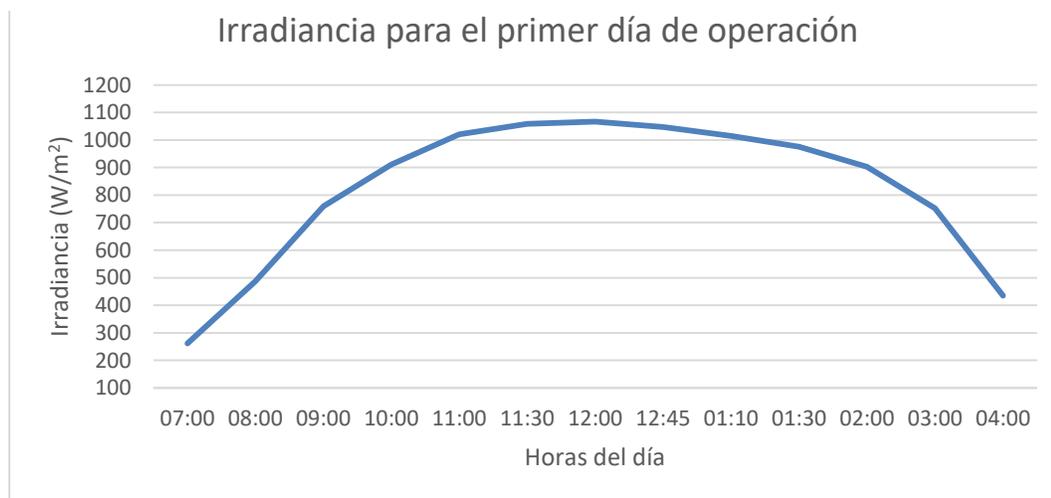


Gráfico 8. Irradiancia para el primer día de operación.

El comportamiento de las temperaturas para el primer día fue el siguiente:

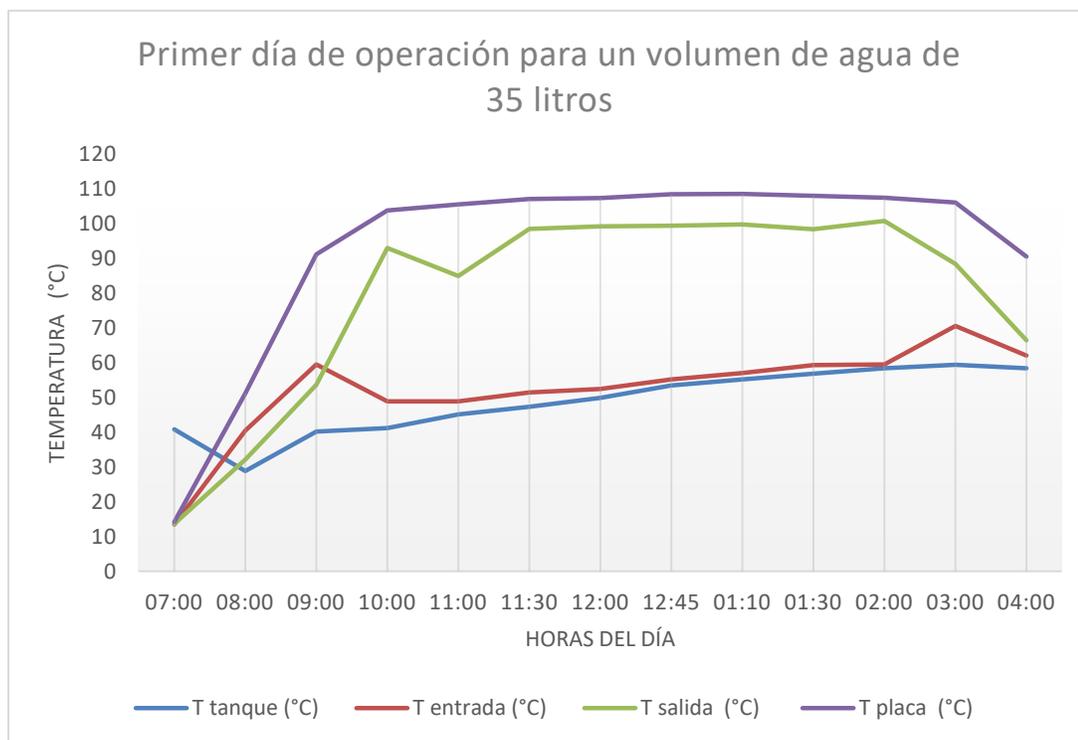


Gráfico 9. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el primer día.

Día 2: miércoles 7 de marzo de 2018

Tabla 11. Registro de datos en el segundo día de pruebas en condiciones normales de operación.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
7:00	36.88	19.25	19.56	22.13	5/8	91
8:00	36.50	33.19	50.14	65.00	2/8	445
9:00	36.38	53.88	50.56	83.00	1/8	690
10:00	36.75	45.31	95.51	104.00	1/8	879
11:00	40.13	47.38	96.88	105.60	1/8	995
11:30	43.06	48.13	97.25	106.30	1/8	1045
12:00	45.75	50.25	98.75	107.70	1/8	1065
12:30	48.69	52.31	98.38	107.60	1/8	1036

1:00	50.69	54.44	98.06	108.40	1/8	1012
1:30	53.00	51.76	98.44	106.90	1/8	942
2:00	54.31	58.00	98.00	106.50	1/8	872
3:00	55.06	56.75	74.69	102.10	1/8	636
4:00	54.31	57.63	57.75	85.70	1/8	416
Promedio	45.50	48.33	79.54	93.15		778.77

Para el segundo día de operación se muestran de forma gráfica las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos del sistema, así como la irradiancia en el transcurso del día.

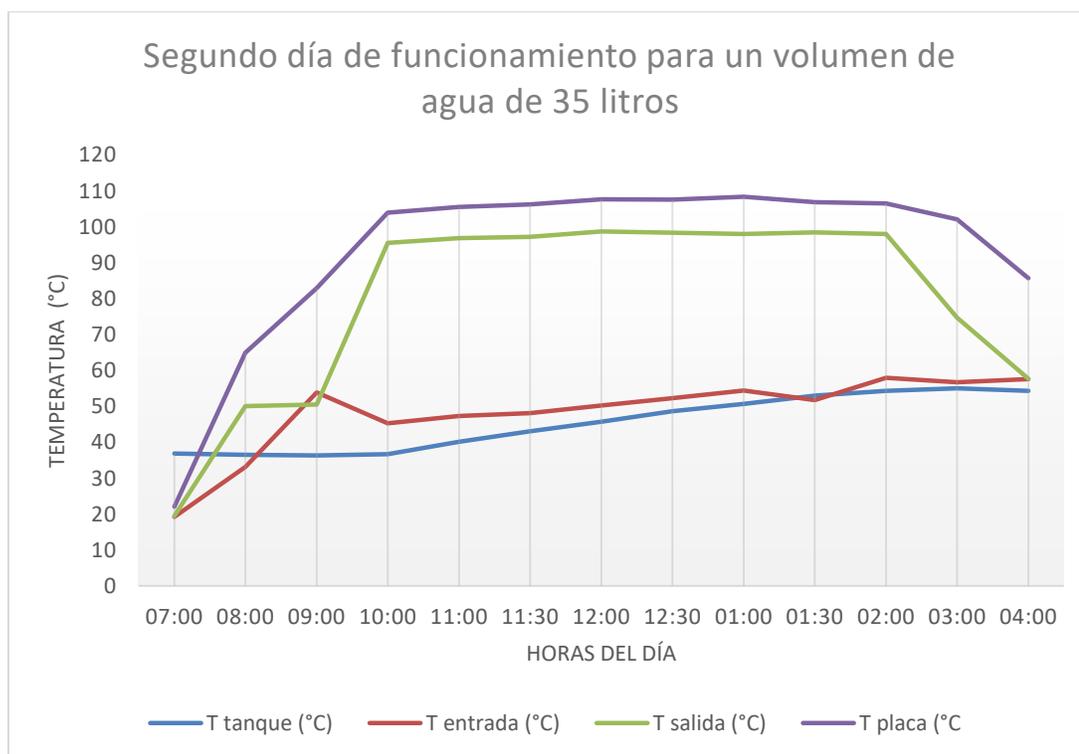


Gráfico 10. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el segundo día.

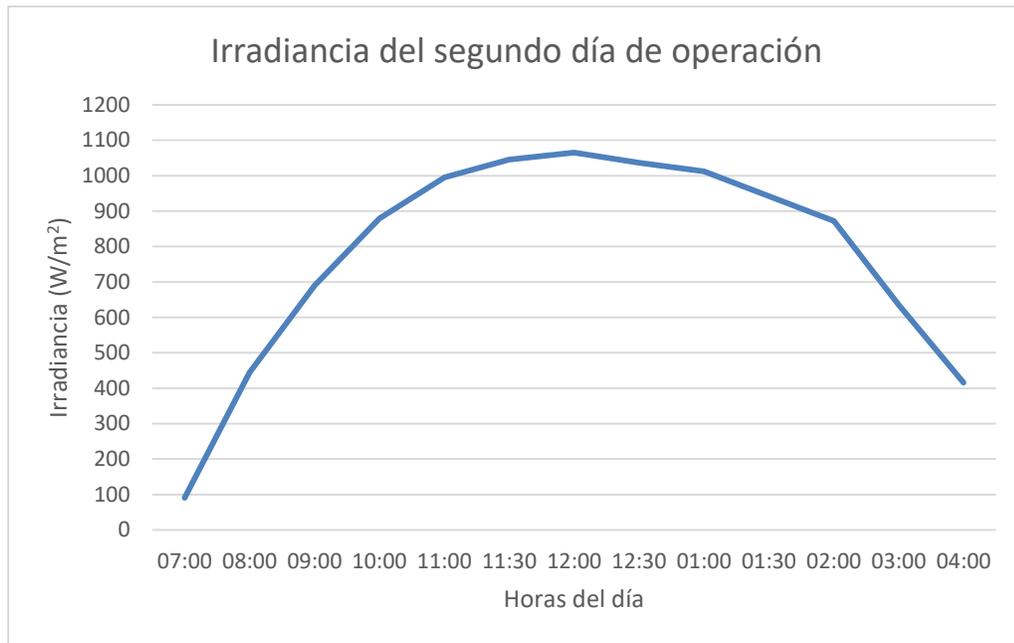


Gráfico 11. Irradiancia para el segundo día de operación.

Día 3: jueves 8 de marzo de 2018

Tabla 12. Registro de datos en día 3 de pruebas en condiciones normales de operación

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
7:00	40.88	13.44	13.69	14.19	1/8	261
8:00	28.81	40.50	32.13	51.19	1/8	487
9:00	40.19	59.50	53.63	91.25	1/8	759
10:00	41.25	48.94	93.00	103.80	1/8	911
11:00	45.13	48.88	85.00	105.60	1/8	1020
11:30	47.38	51.50	98.56	107.1	1/8	1059
12:00	49.88	52.44	99.25	107.4	1/8	1067
12:45	53.44	55.19	99.44	108.5	1/8	1047
1:10	55.25	57.06	99.81	108.60	1/8	1015
1:30	56.88	59.31	98.44	108.10	1/8	976
2:00	58.44	59.50	100.80	107.50	1/8	903
3:00	59.44	70.58	88.44	106.10	1/8	753

4:00	58.44	62.06	66.50	90.56	1/8	435
Promedio	48.88	52.22	79.13	93.10		822.53

Para el tercer día de operación se muestran de forma gráfica las temperaturas alcanzadas en los diferentes puntos del sistema, así como la irradiancia en el transcurso del día.

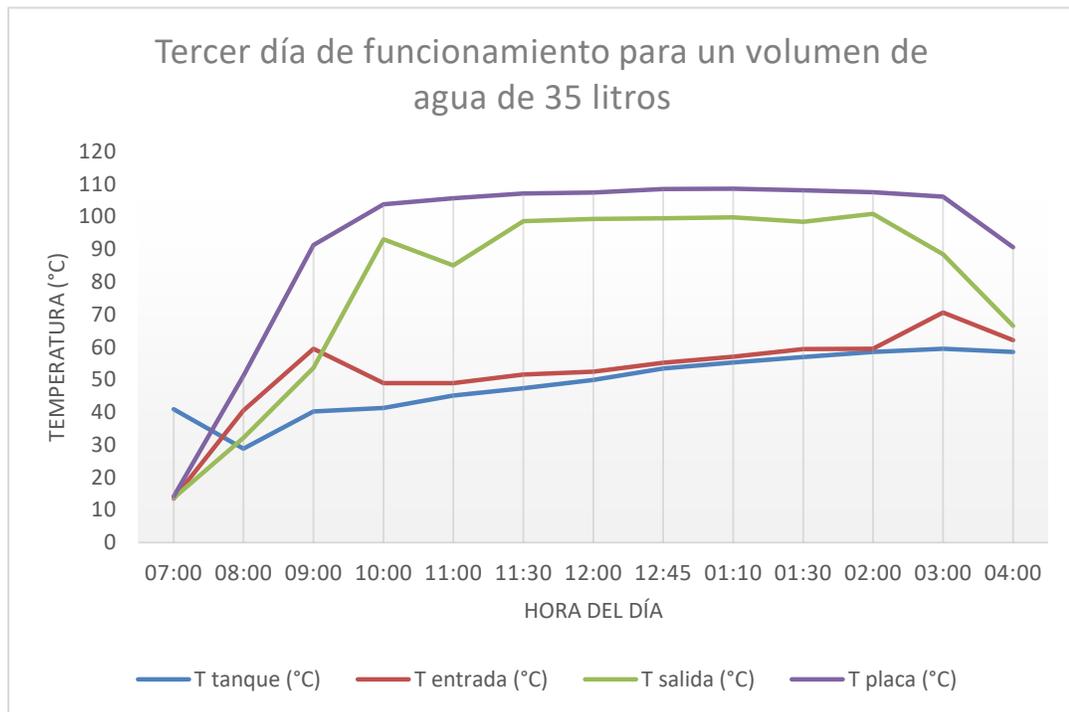


Gráfico 12. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el tercer día.

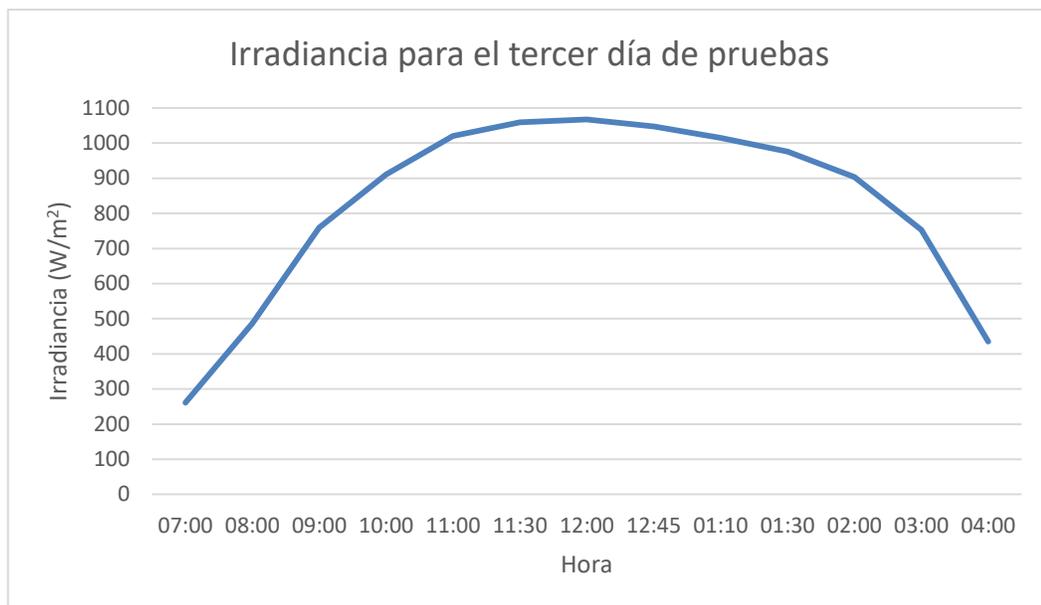


Gráfico 13. Irradiancia para el segundo día de operación.

6.1.1.1. Resumen de resultados de pruebas del colector en condiciones normales.

- Temperaturas en la entrada del colector:

Tabla 13. Resumen de temperaturas a la entrada del colector.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	17.31	19.25	13.44
Máxima °C	56.56	58.00	70.58

- Temperaturas a la salida del colector

Tabla 14. Resumen de temperaturas a la salida del colector.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	18.38	19.56	13.69
Máxima °C	102.00	98.75	100.80

- Temperaturas en la placa absorbente.

Tabla 15. Resumen de temperaturas en la placa absorbente del colector.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	17.25	22.13	14.19
Máxima °C	105.80	108.40	108.60

- Temperatura en el tanque

Tabla 16. Resumen de temperaturas en el tanque acumulador.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	25.31	36.88	40.88
Máxima °C	48.00	55.06	59.44

6.1.1.2. Análisis de resultado para la prueba normal del colector.

Con el resumen de los datos de las pruebas de cada uno de los sensores se procede a realizar el análisis correspondiente.

Las temperaturas alcanzadas en la placa colectora en los diferentes días de prueba muestran temperaturas máximas similares, que se dan entre las 11:00

A.M. y las 2:00 P.M. esto se debe a que existe una irradiancia constante durante las pruebas realizadas. Dando como resultado la temperatura máxima dinámica de la placa de 108.60°C. Las temperaturas mínimas que se registran en la placa absorbente varían con respecto a las condiciones climáticas.

El salto térmico que se da en la entrada y salida de la placa colectora es el responsable del efecto termosifón, ya que este ocurre por la diferencia de densidad. Cuando se da dicho efecto, el líquido empieza a circular en el colector, esto provoca que las temperaturas a la entrada y salida de la placa se mantengan en un rango máximo y mínimo constante durante los días de operación; ya que el fluido se está renovando constantemente.

La temperatura máxima alcanzada en el tanque durante los primeros días de operación es de 59.44°C.

En el día, el flujo de irradiancia se tiene desde la salida del Sol hasta el ocaso. Los resultados arrojados por las pruebas muestran que el aumento de temperatura en el tanque se da desde las 10:00 A.M. hasta las 3:00 P.M. mientras se da el efecto termosifón. Esto limita la temperatura máxima real que se puede alcanzar en el equipo en comparación con la simulación que se muestra en los anexos y la que se obtuvo, producto de los cálculos.

En condiciones críticas de temperatura ambiente (cuando se tiene un promedio de 19 °C como máximo durante el día y de 11°C como mínima durante la noche), resulta que la eficiencia del colector aumenta debido a la diferencia de temperatura alcanzada en el tanque y el ambiente. Por otro lado, el máximo de temperatura que se puede lograr en el fluido térmico es menor y las pérdidas que se dan durante la noche son mayores.

6.1.2. Pruebas en el colector sin la cubierta de vidrio.

Viernes 9 de marzo de 2018

Tabla 17. Registro de datos de día de prueba del colector sin cubierta de vidrio.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
7:30	24.56	25.13	19.88	30.31	1/8	377
8:00	24.38	28.81	22.50	37.38	1/8	480
9:00	24.88	42.94	34.44	56.00	1/8	718
10:00	25.50	58.13	49.25	74.13	1/8	976
11:00	25.69	61.31	53.56	78.31	1/8	1025
12:00	26.38	64.14	59.13	80.50	1/8	1052
1:00	26.94	63.13	61.69	81.88	1/8	1009
2:00	27.56	63.13	60.75	78.13	1/8	870
3:00	28.31	57.66	57.13	67.63	1/8	617
4:00	28.69	51.19	52.25	56.63	1/8	396
4:30	28.65	40.25	40.81	37.50	1/8	54
Promedio	26.50	50.53	46.49	61.67		688.54

Se presentan dos gráficas donde se puede visualizar las variaciones de temperatura y de irradiancia que se dieron en el transcurso del día de pruebas:

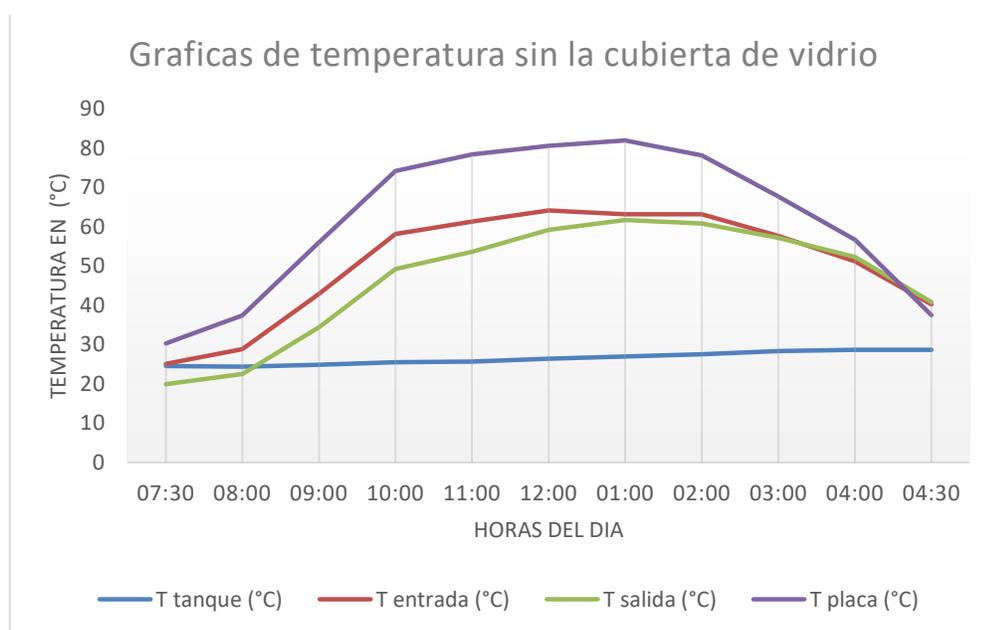


Gráfico 14. Temperaturas registradas en todo el sistema durante el día de pruebas sin la cubierta de vidrio.

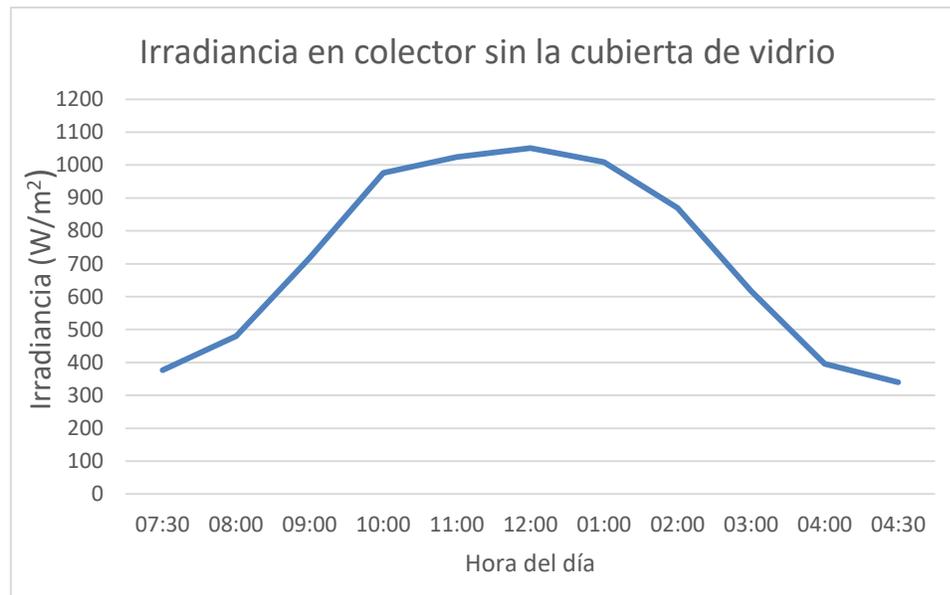


Gráfico 15. Irradiancia en el colector durante el día de pruebas sin cubierta de vidrio.

6.1.2.1. Análisis del colector sin cubierta

Las pruebas realizadas en el colector sin la cubierta de vidrio, no muestran un aumento significativo en la temperatura del tanque. Este resultado concuerda con lo que se sabe sobre este tipo de colectores. No alcanzan temperaturas altas debido a las pérdidas que se dan en la placa colectora producto de la convección y la falta del efecto invernadero, el cual genera una atmósfera que limita las pérdidas.

La temperatura máxima alcanzada por la placa absorbente es de 81.88°C provocando que no exista mayor transferencia de calor entre la placa y el fluido térmico.

6.1.3. Pruebas en el colector con cubierta alternativa (plástico transparente)

Día Lunes 12 de marzo de 2018

Tabla 18. Registro de datos de día de pruebas con cubierta alternativa en colector.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
7:00	24.81	18.75	18.94	19.69	1/8	91
8:00	25.38	36.44	31.75	49.81	1/8	462
9:00	25.98	54.31	48.63	77.94	1/8	469
10:00	26.94	39.75	97.13	101.10	1/8	886
11:00	30.94	41.81	99.19	101.60	1/8	975
11:30	33.94	41-25	100.00	102.90	1/8	1027
12:00	36.88	42.31	100.40	103.50	3/8	976
12:30	39.75	47.19	101.10	102.90	3/8	969
1:00	42.25	49.69	101.80	104.60	2/8	1008
1:30	45.06	52.75	102.30	104.20	2/8	901
2:00	46.31	51.75	102.30	104.00	2/8	832
3:00	48.06	61.31	76.56	92.69	4/8	767
4:00	47.63	59.00	58.75	81.50	3/8	442
Promedio	36.45	46.25	79.91	88.19		754.23

A continuación las temperaturas en el sistema, usando una cubierta alternativa:

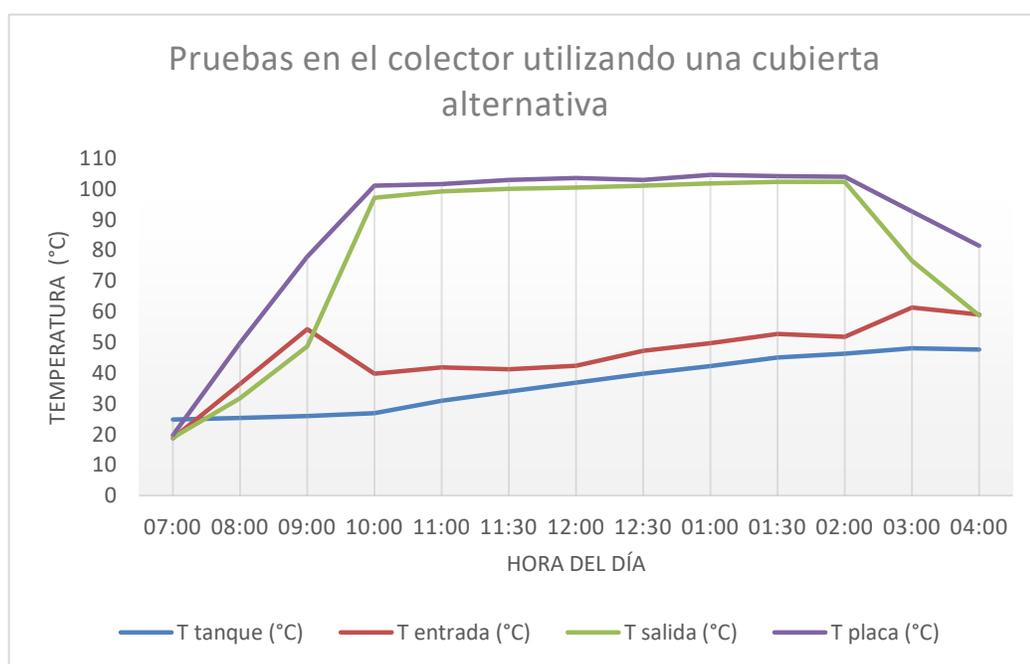


Gráfico 16. Temperaturas en el sistema, con cubierta alternativa.

A continuación el gráfico de irradiancia para ese día:

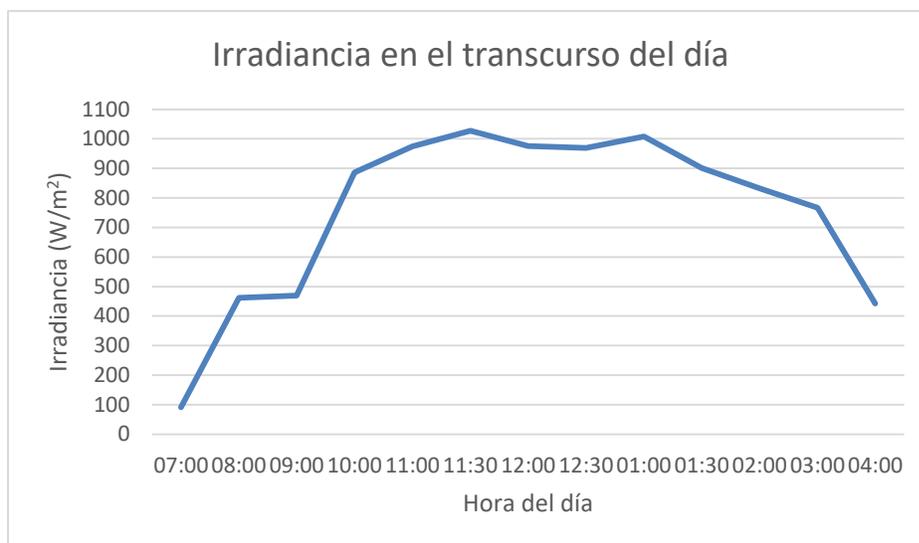


Gráfico 17. Irradiancia en el transcurso de las pruebas en el colector con cubierta alternativa.

6.1.3.1. Análisis del colector con cubierta alternativa

Las temperaturas alcanzadas en los diferentes sensores del sistema son muy similares a las temperaturas registradas por una cubierta normal (cubierta de vidrio), por ello, la cubierta alternativa (cubierta de plástico) es una opción viable y económica; aunque a elevadas temperaturas, comienza a dilatarse y se vuelve muy frágil.

6.1.4. Pruebas en el colector en vacío (sin líquido en su interior).

Día Jueves 15 de marzo de 2018

Tabla 19. Registro de datos de día de pruebas con el colector vacío.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)
9:00	26.69	46.50	38.75	65.69	1/8	579
10:00	31.06	69.56	64.75	110.40	1/8	804
11:00	35.06	84.94	62.81	127.70	3/8	1008
12:00	38.88	90.50	93.06	127.90	2/8	1030

1:00	44.69	86.69	91.00	127.90	3/8	1023
2:00	47.38	86.00	91.63	127.90	2/8	925
3:00	49.31	80.06	87.50	114.70	3/8	624
4:00	42.38	62.75	58.50	79.88	3/8	436
Promedio	39.43	75.87	73.50	110.26		803.62

6.1.4.1. Análisis de pruebas de colector solar en vacío.

Al no contar con líquido en su interior, el colector solar alcanzó en la placa absorbente el valor máximo de 127.90 °C, que corresponde a la temperatura de equilibrio estático. Al no existir intercambio de calor con un fluido térmico la temperatura de la placa absorbente alcanzó el equilibrio a las 12.00 P.M. y durante las siguientes tres horas, hasta que la radiación solar disminuyó, así también los valores de temperatura en la placa.

6.1.5. Pruebas en el colector de factores que afectan al equipo, tanto de sombra como suciedad en el vidrio

DIA 1: miércoles 18 de abril de 2018

Tabla 20. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 1.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
07:00	25.00	28.00	30.00	35.00	2/8	380.00	1.5
08:00	25.90	29.00	33.00	55.00	1/8	480.00	1.8
09:00	26.15	36.00	47.00	66.00	1/8	740.00	2.5
10:00	27.00	45.00	80.00	85.00	1/8	900.00	2.8
11:00	28.00	66.00	88.00	92.00	1/8	1015.00	2.5
12:00	29.60	45.00	91.00	95.00	1/8	1020.00	1.5
01:00	31.02	47.00	91.00	95.00	1/8	1111.00	1.8
02:00	31.60	46.80	80.00	89.00	1/8	970.00	1.8
03:00	32.08	47.70	79.00	87.00	1/8	970.00	2.5
04:00	32.02	52.70	78.00	85.00	1/8	670.00	1.5
Promedio	29.26	46.13	74.11	83.22		875.11	2.07

DIA 2: jueves 19 de abril de 2018

Tabla 21. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 2.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
07:00	28.70	35.09	41.8	30.9	4/8	340.00	1.6
08:00	28.90	38.75	45.00	37.38	6/8	380.00	1.8
09:00	29,22	64.75	67.90	56.00	8/8	360.00	2.5
10:00	30.70	68.00	68.00	75.00	6/8	580.00	3.0
11:00	31.89	48.00	80.00	76.00	7/8	570.00	2.5
12:00	32.70	45.00	83.00	80.00	3/8	700.00	2.3
01:00	33.00	46.70	84.00	82.00	2/8	870.00	1.8
02:00	32.90	47.80	78.00	83.00	5/8	649.00	3.5
03:00	32.20	49.70	70.00	81.00	3/8	670.00	2.5
04:00	32.00	48.89	76.00	75.00	6/8	435.00	4.5
Promedio	31.79	50.84	72.43	78.86		591.33	2.71

DIA 3: viernes 20 de abril de 2018

Tabla 22. Factores que afectan al equipo como sombra o suciedad, día 3.

Hora	T_{tanq} (°C)	T_{ent} (°C)	T_{sal} (°C)	T_{plac} (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)	Velocidad viento (m/s)
7.00	28.46	22.00	25.00	34.07	1/8	400.00	1.6
08:00	28.50	22.80	26.90	37.38	1/8	488.00	1.8
09:00	29.80	42.30	48.00	56.00	2/8	650.00	2.5
10:00	30.00	55.90	69.00	78.00	1/8	940.00	3.0
11:00	31.80	61.00	46.70	80.00	4/8	533.00	2.5
12:00	33.10	62.80	47.67	89.00	3/8	677.00	2.3
01:00	34.20	63..15	48.90	97.00	1/8	987.00	1.8
02:00	34.60	63.40	50.67	91.00	5/8	567.00	3.5
03:00	34.89	58.90	48.56	89.00	4/8	578.00	2.5
04:00	34.89	52.70	46.54	88.00	2/8	689.00	4.5
Promedio	32.42	52.48	48.10	83.50		678.78	2.71

A continuación, se presentan las gráficas de temperatura para el último día de pruebas con suciedad en la placa de vidrio, para visualizar los cambios de temperatura en el sistema, así como la gráfica de irradiancia:

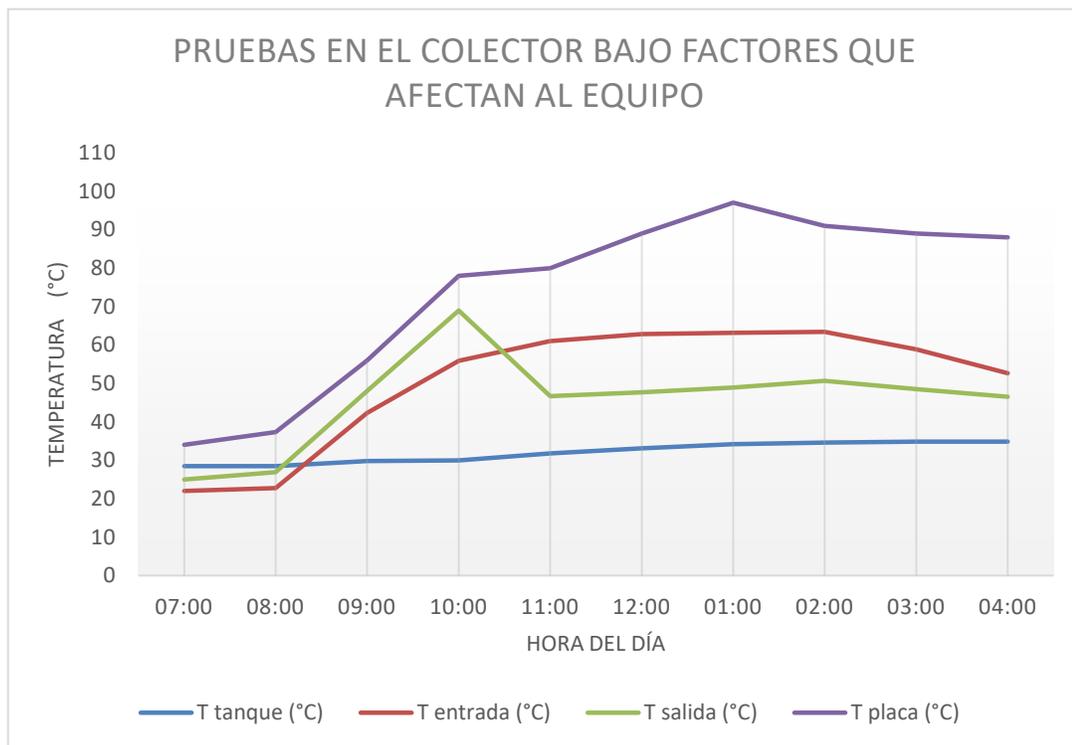


Gráfico 18. Comportamiento de las diferentes temperaturas monitoreadas en el sistema durante el último día de pruebas en el equipo, bajo los factores que afectan al equipo.



Gráfico 19. Irradiancia en el transcurso de las pruebas en el colector, bajo factores que lo afectan.

6.1.5.1. Resumen de resultados de pruebas en condiciones normales del colector.

- Temperaturas en la entrada del colector:

Tabla 23. Resumen de temperaturas a la entrada del colector con suciedad y sombra.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	28.00	35.09	22.00
Máxima °C	66.00	68.00	63.40

- Temperaturas a la salida del colector

Tabla 24. Resumen de temperaturas a la salida del colector con suciedad y sombra.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	30.00	41.8	25.00
Máxima °C	91.00	84.00	69.00

- Temperaturas en la placa absorbente.

Tabla 25. Resumen de temperaturas en la placa absorbente del colector con suciedad y sombra.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	55.00	37.38	37.38
Máxima °C	95.00	83.00	97.00

- Temperatura en el tanque

Tabla 26. Resumen de temperaturas en el tanque acumulador con suciedad y sombra.

Temperatura	Día 1	Día 2	Día 3
Mínima °C	25.90	28.90	28.50
Máxima °C	32.08	32.90	34.89

6.1.5.2. Análisis de resultado para la prueba en el colector con suciedad y sombra.

Teniendo el resumen de los datos de las pruebas de cada uno de los sensores se procede a realizar el análisis correspondiente.

La temperatura máxima alcanzada en la placa fue de 97.00 °C, la temperatura máxima en la entrada y salida del colector fueron 68.00 °C y 91.00 °C respectivamente, la temperatura máxima que se alcanzó en el tanque durante los tres días de operación fue de 34.89 °C.

El efecto directo de la suciedad en el vidrio y de la sombra es inversamente proporcional al calentamiento de la placa absorbente, por ello las temperaturas

alcanzadas en los diferentes puntos del sistema son menores. De igual manera la nubosidad tuvo un efecto negativo en el equipo ya que cuando se realizaron las pruebas el cielo se encontraba mayormente nublado.

6.1.6. Pruebas en el equipo, simulando un uso cotidiano (cuando se quita y se agrega fluido)

DIA 1: miércoles 2 de mayo de 2018

Tabla 27. Pruebas simulando uso cotidiano, día 1.

Hora	Ttanq (°C)	Tent (°C)	Tsal (°C)	Tplac (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)	Velocidad Viento (m/s)
08:00	25.34	29.50	26.38	55.00	5/8	480.00	1.8
09:00	25.90	51.63	70,99	64.00	4/8	460.00	1.5
10:00	27.90	44.89	88.90	97.00	3/8	820.00	3.0
11:00	29.90	45.00	99.00	102.00	1/8	890.00	1.8
12:00	33.88	40.00	100.00	104.00	2/8	999.00	1.9
01:00	37.59	45.88	99.00	103.00	1/8	970.00	2.5
02:00	38.90	50.00	100.00	103.00	2/8	780.00	1.6
03:00	39.70	47.88	99.00	100.00	3/8	657.00	2.0
04:00	40.02	46.00	96.00	99.00	1/8	450.00	2.0
Promedio	33.24	44.53	88.54	91.89		722.89	2.01

DIA 2: Jueves 3 de mayo de 2018

Tabla 28. Pruebas simulando uso cotidiano, día 2.

Hora	Ttanq (°C)	Tent (°C)	Tsal (°C)	Tplac (°C)	Nubosidad (octas)	Irradiancia (W/m ²)	Vel. Viento (m/s)
08:00	32.34	29.50	44.00	56.00	5/8	480.00	1.8
09:00	33.00	51.63	74.66	67.00	4/8	460.00	1.5
10:00	34.90	45.89	88.00	98.00	3/8	820.00	3.0
11:00	37.90	47.80	99.00	103.00	1/8	890.00	1.8
SE LE RETIRAN 10 LITROS DE AGUA Y SE LE AGREGAN 10 LITROS A TEMPERATURA AMBIENTE							
11:05	30.40	43.89	97.00	102.00	2/8	920.00	1.8

12:00	32.78	44.70	99.00	104.00	1/8	930.00	1.9
01:00	35.60	47.80	101.00	106.00	1/8	950.00	2.5
02:00	36.10	50.00	91.00	94.00	4/8	650.00	3.0
03:00	36.30	47.88	90.00	94.00	3/8	720.00	2.0
04:00	36.40	46.00	92.00	93.00	2/8	450.00	2.0
Promedio	34.57	45.51	87.57	91.70		727.00	2.2

A continuación, se presentan las gráficas de temperatura para el último día de pruebas con el equipo simulando un uso cotidiano:

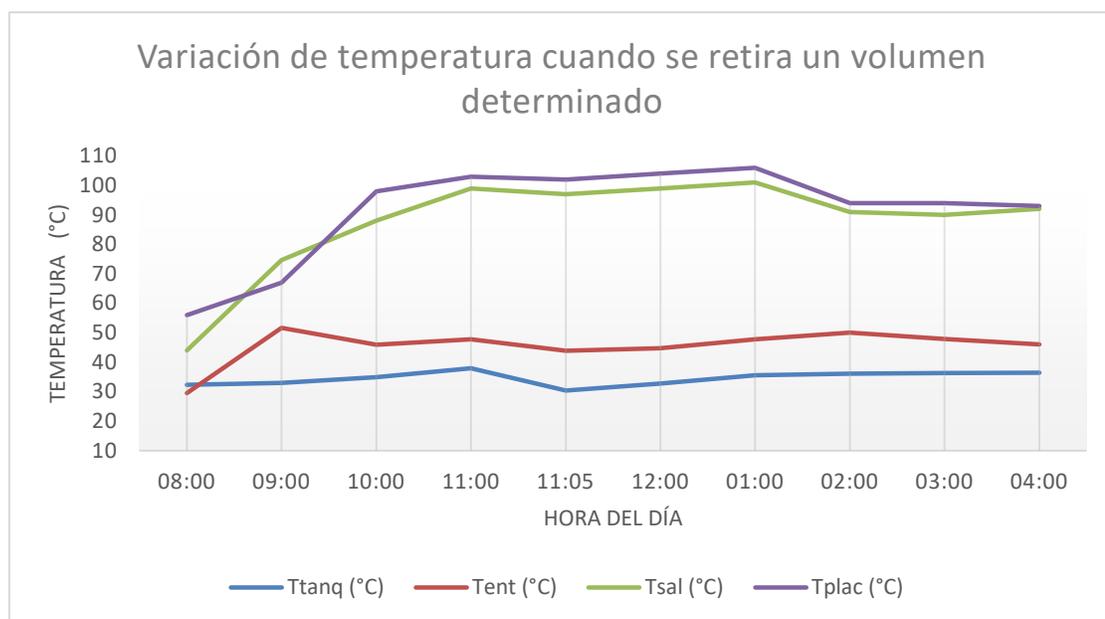


Gráfico 20. Temperaturas en el sistema simulando un uso cotidiano.

Así como la gráfica de irradiancia:

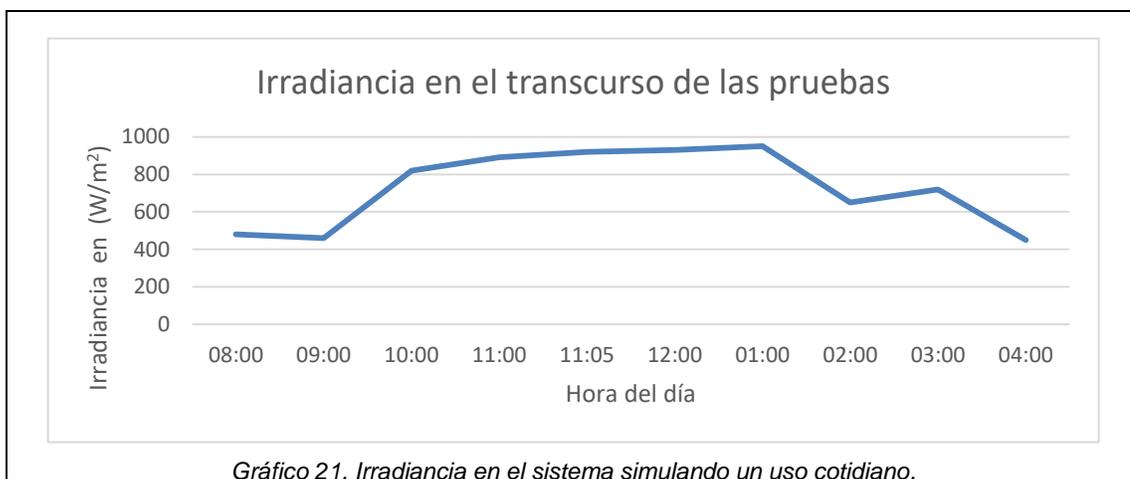


Gráfico 21. Irradiancia en el sistema simulando un uso cotidiano.

6.1.6.1. Análisis de resultado para la prueba en el colector simulando el uso cotidiano

Teniendo el resumen de los datos de las pruebas de cada uno de los sensores se procede a realizar el análisis correspondiente.

Durante el primer día de funcionamiento del equipo operó en condiciones óptimas, alcanzando un delta de temperatura aproximadamente de 15 °C. Llegando a los 40.02 °C en el tanque acumulador y perdiendo aproximadamente 8 °C durante la noche.

En el segundo día de operación se alcanzó 37.90 °C a las 11:00 de la mañana, se retiraron 10L y posteriormente se le agregaron otros 10L a temperatura ambiente, bajando la temperatura de la mezcla a 30.40 °C. Al finalizar el día de funcionamiento, el agua en el tanque acumulador no llegó a superar la temperatura de los 40 °C.

A continuación, se muestra una comparación de las temperaturas e irradiancia en el colector cuando tiene la placa de vidrio y una placa alternativa, con el fin de comparar los diferentes resultados en cada uno de los puntos monitoreados en el sistema. (Para corroborar que es una opción viable cuando la placa de vidrio no cumpla con la función de provocar el efecto termosifón dentro del colector)

Se muestra la comparación de las temperaturas en el equipo cuando se utiliza la cubierta de vidrio, y cuando se hace uso de una cubierta alternativa, así como la comparativa de las irradiancias correspondientes:

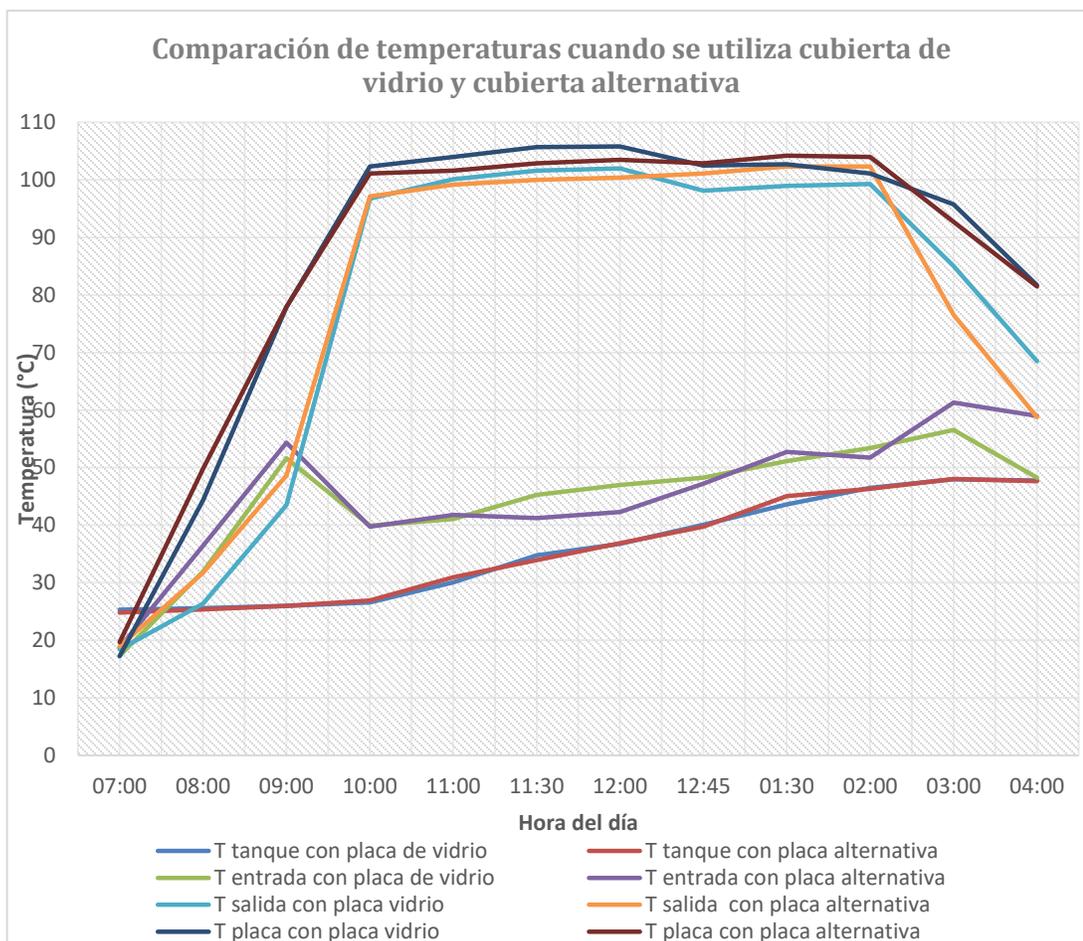


Gráfico 22. Comparación de las diferentes temperaturas monitoreadas cuando se contaba con cubierta alternativa y la cubierta de vidrio.

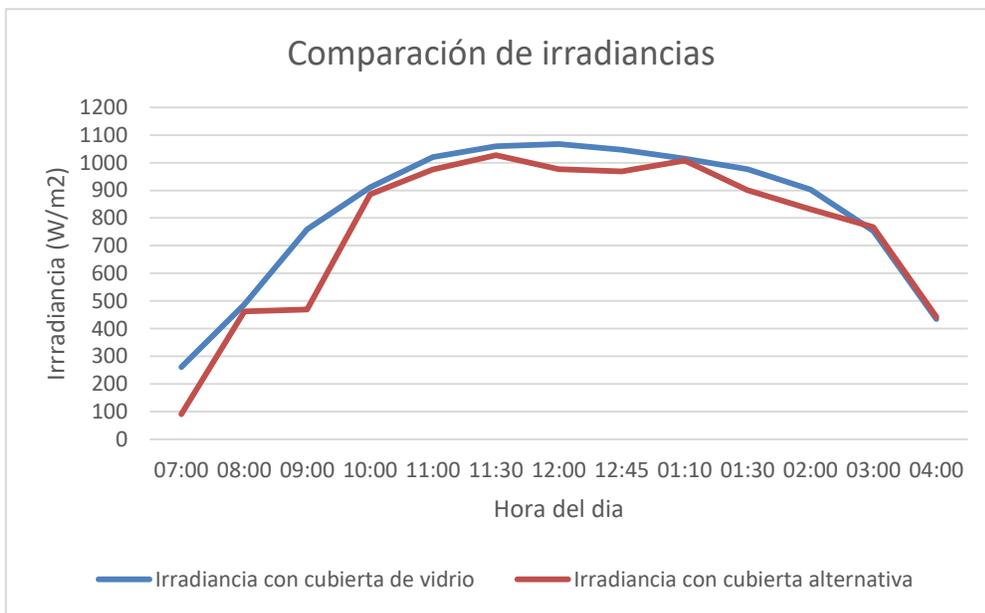


Gráfico 23. Comparación de las irradiancias correspondientes al momento de las pruebas.

6.2. Desviación entre datos calculados y reales.

Los valores obtenidos por métodos numéricos de la temperatura máxima del agua que se puede alcanzar en el sistema es $67.12\text{ }^{\circ}\text{C}$, asumiendo una irradiancia promedio de 450 W/m^2 .

Los valores máximos obtenidos en los días de pruebas por los sensores, realizando distintos laboratorios son los siguientes:

La temperatura máxima alcanzada en la placa con pruebas normales es de $108.60\text{ }^{\circ}\text{C}$, esto da una gran diferencia con los datos obtenidos por los cálculos matemáticos ya que se tomó una irradiancia promedio de 450 W/m^2 , pero la temperatura alcanzada en la placa fue obtenida con una irradiancia instantánea superior a los $1,000\text{ W/m}^2$.

Por otra parte, la temperatura máxima que se alcanzó en el tanque en tres días de operación fue de 59.44°C , ya que existe una diversidad de factores por los cuales no se puede obtener la temperatura de la placa colectora deseada.

- La recirculación del agua en el circuito de fluido térmico está condicionado a la presencia del efecto termosifón y este no se da durante toda la incidencia de radiación el colector.
- Los factores climáticos tales como: el viento y nubosidad.
- Pérdidas de calor en todo el circuito, especialmente cuando desciende la temperatura ambiente.

CONCLUSIONES

A raíz de la finalización del proyecto se concluye lo siguiente:

- Los parámetros establecidos en la determinación del prototipo a diseñar, permitieron presidir los cálculos correspondientes para encontrar la temperatura de operación del colector, bajo la condición de una irradiancia promedio relativamente baja como lo es 450 W/m^2 . Con ello se determinó que el proyecto será funcional, con una temperatura de operación del fluido de hasta alrededor de los 68°C .
- El diseño realizado del tanque acumulador, permite mantener una temperatura del fluido de operación bajo un nivel de pérdida de temperatura de no más de 10°C a 13°C , con lo cual se comprueba que el diseño del tanque acumulador opera aceptablemente.
- La eficiencia (evidentemente) se encuentra sujeta a los cambios en las variables de diseño, pero considerando la placa absorbente y la cubierta del vidrio, se determina que estos dos elementos son los primordiales en la afección de la eficiencia del colector y, por ende, de la temperatura del fluido.
- El presupuesto refleja una inversión total de \$1,693.69 y un tiempo estimado de 156 horas de construcción. Dichas etapas se han realizado en base a cotizaciones actualizadas.
- Se realizaron varias pruebas al sistema tanto con vidrio y sin vidrio, cual demostró que el efecto invernadero es necesario para alcanzar elevadas temperaturas en la placa absorbente.
- Cuando se cambia una cubierta de vidrio, por una cubierta alternativa (plástico), las temperaturas alcanzadas en la placa absorbente son

similares, esto supone que el efecto invernadero se da, y que sería una alternativa viable de bajo costo.

- La recirculación del agua en el colector se da gracias al efecto termosifón y este se da por diferencias de temperaturas que rondan entre los 40°C y 55°C.
- La recirculación del fluido térmico comienza aproximadamente a las 10 AM y después de las 3 PM, ya no se da el movimiento del fluido.
- La temperatura calculada por los métodos matemáticos en la placa absorbente varía con los datos reales, esto se debe a que existen una diversidad de factores que implican que estas temperaturas no se lleguen a lograr.
- El aprovechamiento de la radiación solar incidente sobre la placa colectora, se ve favorecido ya que se ha aplicado un recubrimiento (sobre el serpentín y la placa colectora) de pintura negro mate.

RECOMENDACIONES

- Las pérdidas durante la noche aumentan considerablemente en días donde la temperatura ambiente es baja, y cuando se tiene elevadas temperatura en el tanque, con lo cual se puede atenuar esta situación. Implementando un mayor aislamiento interno del tanque.
- La placa absorbente del colector puede almacenar más energía mejorando el recubrimiento de la misma con lo cual ayudaría a que no refleje la energía ganada en forma de radiación.
- Cuando no se cuente con la cubierta de vidrio por algún inconveniente se puede optar por usar una cubierta de plástico transparente.
- Utilizar agua proveniente de ANDA, para que la sedimentación en la tubería del sistema sea mínima.
- Implementar sensores de flujo en el sistema, especialmente a la salida del colector podría dar un indicio de la velocidad en que se desarrolla el efecto termosifón.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Azimut. Ángulo que con el meridiano forma el círculo vertical que pasa por un punto de la esfera celeste o del globo terráqueo.

Agua caliente sanitaria (ACS). Agua destinada a consumo humano (potable) que ha sido calentada. Se utiliza para usos sanitarios (baños, duchas, etc.) y para otros usos de limpieza (fregado de platos, lavadora, lavavajillas, fregado de suelos). Normalmente el agua procede de la instalación de agua del edificio.

Arduino. Es una plataforma de prototipos electrónica de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar.

AWS. Sociedad Americana de Soldadura, (American Welding Society). Profesionales de la soldadura voluntarios bajo la autoridad de la American National Standards Institute o Instituto Nacional de Normalización Estadounidense (ANSI, por sus siglas en inglés), para ofrecer más de 200 normas de soldadura que se utilizan en todo el mundo a nivel industrial.

Caloportador. Es el fluido que circula por los circuitos de los paneles solares térmicos.

Cenit. Intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador.

Constante solar. Es la cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del Sol. Los resultados de su medición por satélites arrojan un valor promedio de 1,366 W.

Cuerpo negro. Es un objeto teórico o ideal que absorbe toda la luz y toda la energía radiante que incide sobre él. Nada de la radiación incidente se refleja o pasa a través del cuerpo negro.

Declinación. Es el ángulo comprendido entre el norte magnético local y el norte verdadero (o norte geográfico). En otras palabras, es la diferencia entre el norte geográfico y el indicado por una brújula (el denominado también norte magnético).

Energía renovable. Energía que utiliza los recursos inagotables de la naturaleza, como la biomasa, las radiaciones solares o el viento.

Heliofanía. Representa la cantidad del brillo del sol y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliógrafo, que registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa.

Fotón. Es la partícula portadora de todas las formas de radiación electromagnética, incluyendo a los rayos gamma, los rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, la luz infrarroja, las microondas, y las ondas de radio.

Irradiancia. Es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. Es la potencia incidente. Es el área de la superficie en que incide la onda. En unidades del sistema internacional se mide en W/m^2 .

Radiación. Es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o de un medio material.

Nadir. Punto de la esfera celeste diametralmente opuesto al cenit.

Número de Grashof. Es un número adimensional en mecánica de fluidos que es proporcional al cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actúan en un fluido. Se llama así en honor al ingeniero alemán Franz Grashof.

Número de Nusselt. Es un número adimensional que mide el aumento de la transmisión de calor desde una superficie por la que un fluido discurre (transferencia de calor por convección) comparada con la transferencia de calor si ésta ocurriera solamente por conducción.

Número de Prandtl. Es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad) y la difusividad térmica. Se llama así en honor a Ludwig Prandtl.

Número de Rayleigh. Es un número adimensional asociado con la transferencia de calor en el interior del fluido.

Potencia emisiva. Indica la cantidad de energía radiante por unidad de tiempo y de área. Característica de la radiación, radiación térmica.

Punto de fusión. Es la temperatura a la cual se encuentra el equilibrio de fases sólido-líquido, es decir, la materia pasa de estado sólido a estado líquido, se funde, ésta, además, es una propiedad intensiva.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cengel, Y. (2011). Termodinámica. McGrawHill.
- Çengel, Yunus A. (2007), *“Transferencia de calor y Masa”*, México, McGraw-Hill, 3ra Edición.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., (2006). “Solar engineering of thermal processes”. Editorial Mc Graw-Hill, 3er Edition.
- Skenda, (2003), *“Aplicaciones de colectores solares”*, disponible en <http://www.skenta.com.ar/colectores-solares/aplicaciones>.
- Massipe Hernández, J.R. (2005). *“Colectores solares termo acumulativos: Análisis numérico y experimental en regímenes estacionario y transitorio”*. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. España.
- ARQHYS. 2012, 12. Tipos de colectores solares. Revista ARQHYS.com. Obtenido 03, 2017, de <http://www.arqhys.com/articulos/tipos-colectores-solares.html>.
- SEENERGY MEXICO. Energía solar térmica. Obtenido 03, 2017, de <http://www.seenergymexico.com/energia-solar-termica.php>
- Datos de irradiancia, Obtenidos del programa: System Advisor Model, con datos de estación meteorológica (El salvador SLV Ilopango S_Salvador).
- Datos de velocidad de viento, obtenido de <http://www.snet.gob.sv/>.
- Como realizar alcance y limitaciones, obtenida el 20 de septiembre de 2017 de [http:// sites.google.com/a/nyit.edu/tutoria/alcance-y-limitaciones-de-un-poryecto](http://sites.google.com/a/nyit.edu/tutoria/alcance-y-limitaciones-de-un-poryecto).
- Datos para realizar la planificación de los recursos, obtenida en 24 de septiembre de 2017 de <https://administrativas.wordpress.com/2011/03/09/planificacion-de-recursos/>.

ANEXOS

A1: código del microcontrolador

```

/*Inclusión de librerías de display y sensores de temperatura*/
#include <SPIflash.h> //Librería para controlar memoria flash de la pantalla
#include <UTFT.h> //Librería para controlar la pantalla
#include <UTFT_SPIflash.h> //Librería para controlar el touch
#include <OneWire.h> //Librería para la comunicación de dispositivos de una línea
#include <DallasTemperature.h> //Librería para el sensor de temperatura

//Asignación de nombres a los pines para identificar a los sensores
#define sensor_1 10
#define sensor_2 11
#define sensor_3 12
#define sensor_4 13

#define pinPressure 0 //Pin para capturar el valor medido de presión

//Declaración de variables para almacenar el valor medido de temperatura y presión en los sensores
float temp1;

float temp2;
float temp3;
float temp4;
float ADCreadPressure;
float pressure;
float error;

//Creación de los objetos sensor de temperatura de la clase oneWire
OneWire oneWire_sensor_1 (sensor_1);
OneWire oneWire_sensor_2 (sensor_2);
OneWire oneWire_sensor_3 (sensor_3);
OneWire oneWire_sensor_4 (sensor_4);

//Creación de objetos sensor de temperatura de la clase DallasTemperature
DallasTemperature temp_sensor_1(&oneWire_sensor_1);
DallasTemperature temp_sensor_2(&oneWire_sensor_2);
DallasTemperature temp_sensor_3(&oneWire_sensor_3);
DallasTemperature temp_sensor_4(&oneWire_sensor_4);

//Declaración del objeto GLCD de la clase UTFT
UTFT LCD(CTE70, 38, 39, 40, 41);

//Declaración de objeto flash de la clase SPIflash
SPIflash flash(45); //45 Es el pin correspondiente al pin SS de la interfaz SPI

//Declaración del objeto archivos de la clase UTFT_SPIflash
UTFT_SPIflash files(&LCD, &flash);

//Declaración de tamaño de la letra
extern uint8_t franklingothic_normal[];

```

```

void setup() {

    analogReference(INTERNAL1V1);
    LCD.InitLCD();           //Inicialización del display
    LCD.clrScr();           //Limpia el display
    LCD.setFont(frakingothic_normal); //Selección del tamaño de fuente
    flash.begin();         //Inicia el sistema de lectura de la memoria flash de la pantalla
    drawHome();           //Dibuja la pantalla con la información del proyecto
    delay(20000);         //Retardo de 20s para visualizar la información del proyecto
    LCD.clrScr();         //Limpia la pantalla
    drawGUI();           //Dibuja la interfaz gráfica de usuario

}

void loop() {

    Read_Write_temp();     //Función para medir y presentar los valores de temperatura
    Read_Write_pressure();
    delay(2000);
}

void drawHome(){
    LCD.print("Universidad de El Salvador", CENTER, 0);
    LCD.print("Facultad de ingenieria y arquitectura",CENTER, 30);
    LCD.print("Escuela de ingenieria mecanica", CENTER, 60);
    LCD.print("Trabajo de graduacion", CENTER, 90);
    LCD.print("Diseno y contruccion de un banco de pruebas", CENTER, 150);
    LCD.print("con sistema de monitoreo para practicas", CENTER, 180);
    LCD.print("de laboratorio en un colector solar plano", CENTER, 210);
    LCD.print("Francisco Gabriel Granados Rivas", CENTER, 270);
    LCD.print("Jose Alfredo Recinos Amaya", CENTER, 300);
    LCD.print("Luis Alberto Sandoval Quintanilla", CENTER, 330);
    LCD.print("MsC.Ing. Gustavo Salomon Torres Rios Lazo", CENTER, 360);
    LCD.print("Marzo 2018", CENTER, 390);
}

void drawGUI(){

    //Dibujado de colector solar
    LCD.setColor(255, 255, 255); //Color blanco para el texto
    LCD.print("Variables de funcionamiento de colector solar", CENTER,0);
    files.loadBitmap(0, 180, 125); //Carga la imagen del colector solar almacenada en la memoria

    LCD.print("Placa", 50,200);
    LCD.drawLine(170, 218, 275, 230);

    LCD.print("Salida", 150,70);
}

```

```

LCD.drawLine(265, 90, 340, 140);

LCD.print("Entrada", 300, 425);
LCD.drawLine(200, 380, 299, 422);

LCD.print("Tanque", 650,170);
LCD.drawLine(645, 200, 542, 200);
}

void Read_Write_temp(){

//Petición a los sensores para capturar el valor medido de temperatura
temp_sensor_1.requestTemperatures();
temp_sensor_2.requestTemperatures();
temp_sensor_3.requestTemperatures();
temp_sensor_4.requestTemperatures();

//Almacenado de valores medidos por los sensores de temperatura
temp1=temp_sensor_1.getTempCByIndex(0);
temp2=temp_sensor_2.getTempCByIndex(0);
temp3=temp_sensor_3.getTempCByIndex(0);
temp4=temp_sensor_4.getTempCByIndex(0);

//Dibujado de temperaturas en la interfaz de usuario
LCD.printNumF(temp2, 2, 50, 217); //Temperatura de placa
LCD.print("`C", 128, 217);
LCD.printNumF(temp4, 2, 150, 87); //Temperatura a la salida del colector
LCD.print("`C", 228, 87);
LCD.printNumF(temp3, 2, 300, 442); //Temperatura en el tanque
LCD.print("`C", 378, 442);
LCD.printNumF(temp1, 2, 650, 187); //Temperatura a la entrada del colector
LCD.print("`C", 728, 187);
}

void Read_Write_pressure(){

//Captura del valor medido de presión
ADCreadPressure = analogRead(pinPressure);
//Conversión del valor obtenido del ADC a presión en psi
pressure = (5/124)*ADCreadPressure-18.75;
LCD.printNumF(pressure, 2, 650, 204);

LCD.print(" psi", 728,204);
}

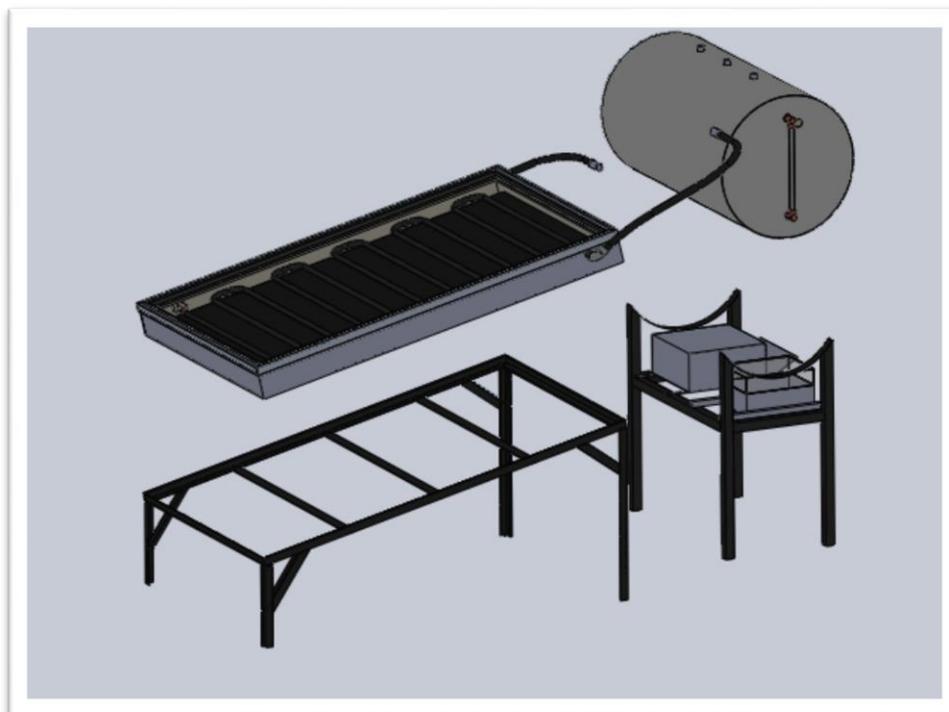
```

A2: manual de instalación del equipo

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ASIGNATURA: ENERGÍA SOLAR TÉRMICA



MANUAL DE INSTALACIÓN DEL COLECTOR SOLAR PLANO



PRESENTADO POR:

JOSÉ ALFREDO RECINOS AMAYA
FRANCISCO GABRIEL GRANADOS RIVAS
LUIS ALBERTO SANDOVAL QUINTANILLA

CIUDAD UNIVERSITARIA, JUNIO DE 2018

El manual de instalación nos facilita la manipulación del equipo. Con lo cual se pretende que, al momento de ensamblarse, no encuentren dificultades y no puedan dañar las piezas ni las herramientas a utilizar. Siguiendo los pasos correctamente para la buena instalación.

Paso 1.

Colocar el soporte del Colector en un piso plano, sin inclinación.

El soporte del colector debe de estar un terreno lo más plano posible; orientado hacia al sur la parte más baja del mismo, para obtener la inclinación de diseño. Lo anterior se observa en la siguiente imagen. (La base del colector está fabricada de acero AISI 1020)

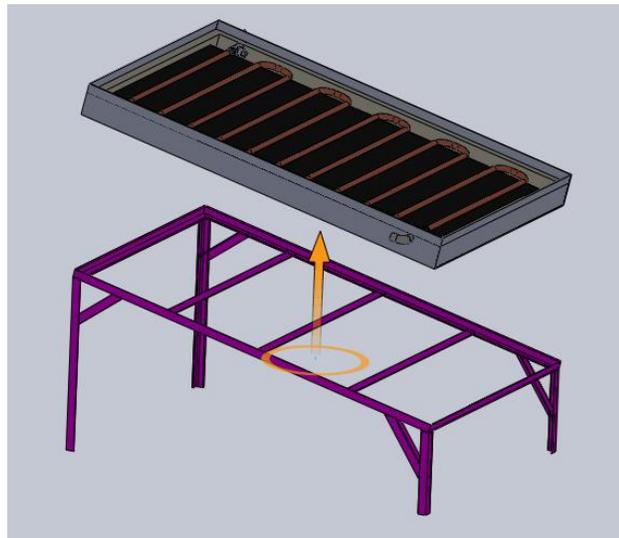


Estructura de soporte para el colector.

Paso 2.

Colocar el colector solar sobre el banco del mismo.

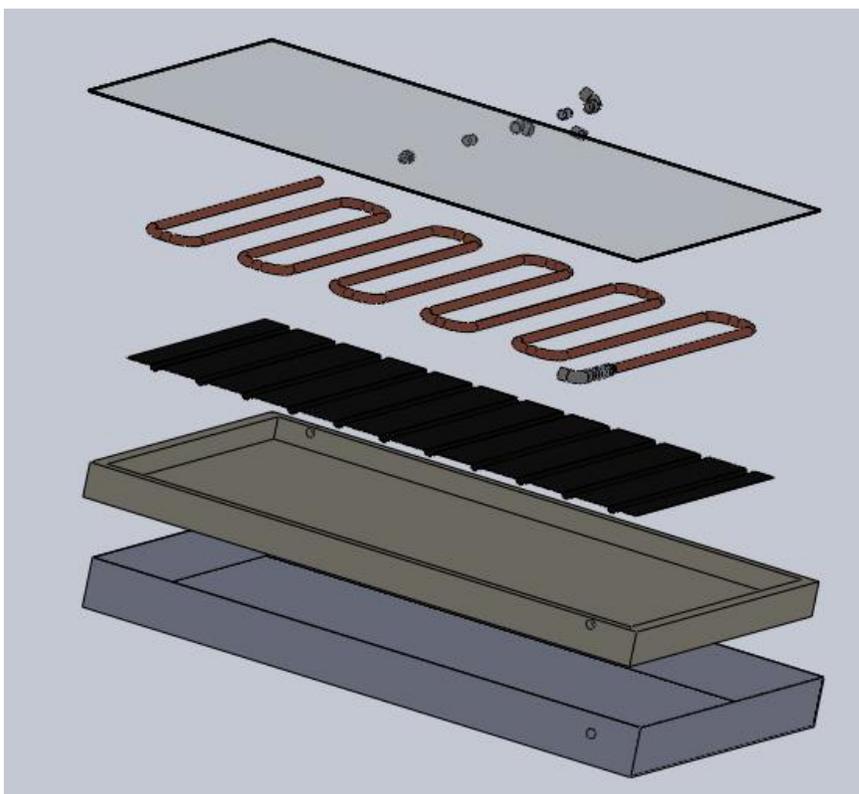
Teniendo la base del colector bien orientado, se procede a colocar el colector que está formado por varias piezas como se muestra en la siguiente imagen, teniendo mucho cuidado al momento de ensamblarlo.



Forma correcta de colocar el colector en la estructura de soporte.

Para una idea más clara de los componentes internos del colector, se presenta la siguiente imagen, teniendo en cuenta que todos los componentes del colector no serán manipulados durante el ensamble. El colector solar está formado por:

- Placa de vidrio con un espesor de 5mm.
- Codo de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- Acople de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- Accesorio tipo T de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ ".
- Adaptador para el sensor de temperatura.
- Cambio de sección de $\frac{5}{8}$ " a $\frac{1}{2}$ ".
- Circuito de fluido térmico de cobre tipo serpentín de $\frac{5}{8}$ " de diámetro.
- Placa absorbente de cobre.
- Aislante de fibra cerámica.
- Cubierta protectora del colector de lámina galvanizada.



Vista explosionada del colector, donde se muestran sus partes y accesorios.

Paso 3.

Colocación de las mangueras flexibles en el colector solar.

Teniendo el colector en su soporte, procede la instalación de las mangueras flexibles en el colector (como se muestra en la siguiente imagen). Sin olvidar aplicar la cinta teflón alrededor de la conexión macho, y en sentido opuesto a la rotación de acople, con la ayuda la herramienta adecuada para evitar fugas de agua.

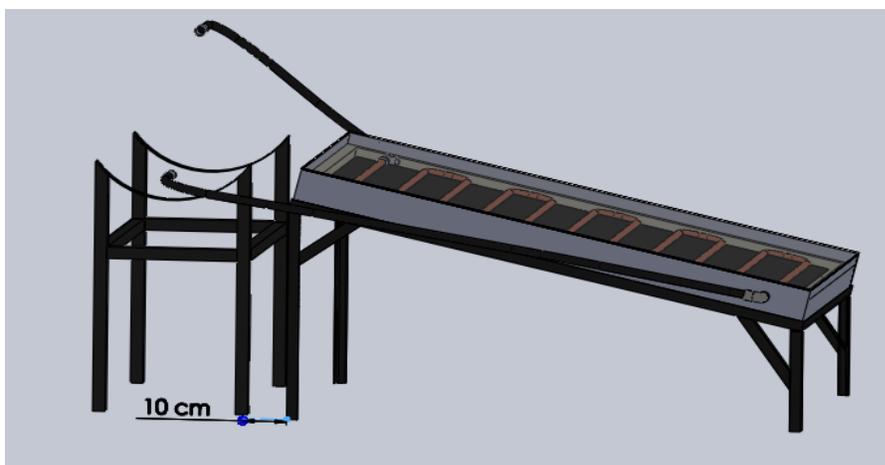


Vista del colector y de cómo deben de ir instaladas las mangueras.

Paso 4.

Instalación del tanque acumulador.

Para instalar el tanque, se debe de colocar el soporte de el, continuo al colector. A una distancia máxima de 10 cm de separación, como se muestra en la siguiente imagen:

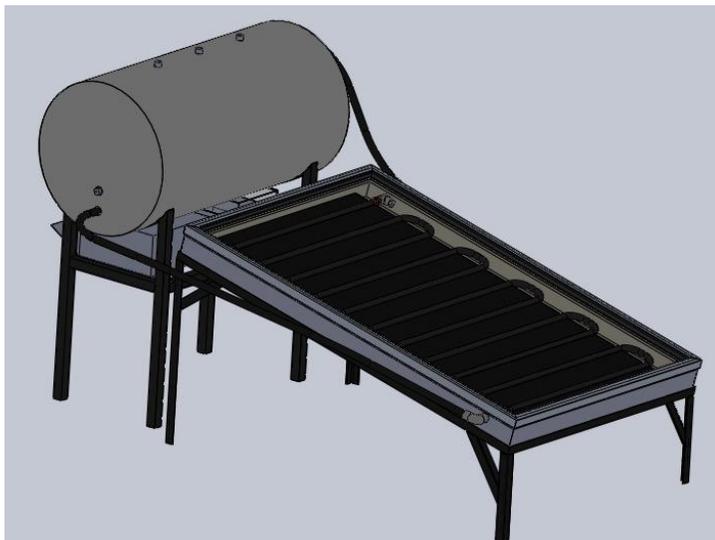


Separación entre la estructura de soporte del tanque y estructura de soporte del colector.

Paso 5.

Colocar el tanque con el acople inferior orientado al lado del acople inferior del colector (lado izquierdo del colector). Y con la válvula de alivio del tanque, orientada en sentido superior.

Las mangueras flexibles deben de colocarse en el tanque como se muestra en la siguiente imagen. Sin olvidar aplicar la cinta teflón alrededor de la conexión macho, y en sentido opuesto a la rotación de ensamble.



Forma deseada del colector y de cómo se debe de instalar el tanque en su base metálica.

Paso 6.

Conecte el sistema de monitoreo de la siguiente manera:

Ubique los conectores de 3.5mm en el lado derecho de la caja que contiene al colector. Como se muestra a continuación:



Conectores de sensores de temperatura en la caja colectora.

Ubique los cables proporcionados para conectar los tres sensores de temperatura de la caja colectora, los cuales se muestran a continuación:



Cables conectores para los tres sensores de temperatura ubicados en la caja colectora.

Ubique el sensor de irradiancia, el de presión y el de temperatura ambiente, los cuales se muestran a continuación:



Sensor de irradiancia, presión y temperatura ambiente.

Ahora con los sensores ubicados, conéctelos a la caja de monitoreo la cual se muestra a continuación:



Caja de monitoreo de sensores.

El sensor de temperatura del tanque, ya se encuentra ubicado al interior de él, solo tiene que ser conectado a la caja de monitoreo de sensores.

Con los sensores conectados, conecte la caja a 110 V, y ésta comenzará el monitoreo de los sensores, 20 segundos después de mostrar la pantalla de bienvenida.

A3: guías de laboratorio

GUÍA DE LABORATORIO 1

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

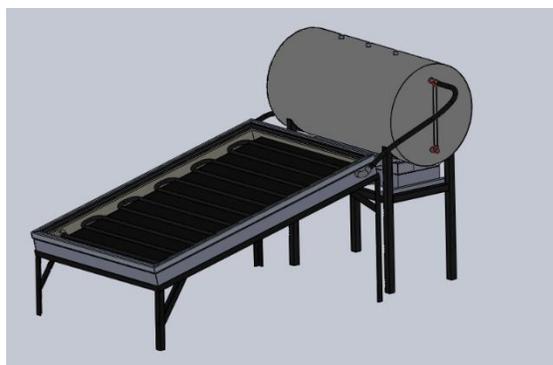
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 1: Introdutivo a la manipulación del colector solar plano.

N° DE CARNET	APELLIDOS	NOMBRES	FIRMA



Esquema del colector

Indicaciones Generales:

Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario de equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.

ASIGNACIONES.

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica de laboratorio, los cuales son los siguientes:

- Constantes de conductividad térmica en materiales metálicos y conductividad térmica en materiales de aislamiento.
- ¿Cómo funciona el sistema Arduino y cuáles son sus funciones principales?
- ¿Cuál es el radio crítico de aislamiento térmico?
- ¿Cuáles son las diferentes formas de conexión que existen en los colectores solares planos?
- ¿Cuáles son los diferentes métodos que existen para medir temperatura?
- ¿Cuáles son los diferentes métodos que existen para medir la presión en un sistema?
- ¿En qué consiste el efecto invernadero?
- Investigar la orientación y la inclinación que debe tener el colector solar para la ubicación geográfica del país, para aprovechar de mejor manera la irradiancia.

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda al estudiante leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por su cuenta los temas que se recomiendan en el transcurso de estas guías.

Antecedentes.

La utilización de energía solar es de larga data, los griegos son conocidos en la historia por cómo Arquímedes destruyó la flota romana que sitiaba a Siracusa mediante el uso de espejos que concentran la radiación solar. Luego los romanos y griegos supieron utilizar ganancia solar para disminuir cargas térmicas en sus casas. En la década de los años 30 en el siglo pasado se popularizaron en Japón equipos de circulación natural para obtener agua caliente sanitaria con una capacidad de almacenamiento de 100-200 litros.

La energía limpia que se ha mencionado (que es proporcionada por el Sol), es de amplio saber que domina el sistema planetario que incluye a la Tierra, y es gracias a la radiación, que aportando su energía electromagnética mantiene la vida en la Tierra, porque todo el alimento y el combustible procede en última instancia de las plantas que utilizan la energía proveniente del Sol.

La energía radiante producida en el Sol es el resultado de reacciones nucleares de fusión. Llega a la Tierra a través del espacio en cuantos de energía llamados fotones, que interactúan con la atmósfera y la superficie terrestre. La intensidad de la radiación solar en el borde exterior de la atmósfera (si se considera que la Tierra está a su distancia promedio del Sol) se llama constante solar, y su valor medio es 1.73×10^{14} kW o 1.353 kW/m^2 , cuyo valor fluctúa un $\pm 3\%$ por la variación misma que hay en la distancia entre el Sol y la Tierra. La intensidad de energía real disponible en la superficie terrestre es menor que la constante solar debido a la absorción y a la dispersión de la radiación que origina la interacción de los fotones con la atmósfera.

El calentamiento del agua utilizando la energía del Sol por medio de colectores solares, se ha presentado ante todo el mundo, como una alternativa al ahorro energético que pueda tener un hogar o una industria. Son una alternativa para el calentamiento del agua; de bajo costo, fácil de manipular y libre de mantenimiento, solo con algunos cuidados básicos para obtener la mayor absorción de energía proveniente del Sol en la placa colectora.

Antes de mencionar los diferentes tipos de colectores planos, es necesario dar un repaso a los principios o fundamentos de la transferencia de calor.

Fundamentos de la transferencia de calor

La transferencia de calor es el intercambio de energía térmica desde un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura, mediante los mecanismos siguientes: conducción, convección y radiación, los cuales tratan de la diferencia de temperatura que existen entre los cuerpos expuestos de mayor temperatura al cuerpo de menor temperatura.

- La conducción:

Es la energía calorífica que se transmite durante el contacto directo entre cuerpos (o partes de los mismos) a distintas temperaturas y tiene lugar mediante choques o acoplamientos entre las moléculas del sistema (unas en zonas más calientes, con mayor energía térmica y otras en las zonas más frías, con menor energía térmica), aunque no haya un movimiento macroscópico de las moléculas. La conducción se encuentra regida en base a la siguiente ley:

- Ley de Fourier.

Establece que la razón de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de esta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, es decir:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad Ec. 1$$

El término $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ se denomina “gradiente de temperatura” y tiene un signo negativo, si se supuso una temperatura mayor en la cara de la pared en donde $x = 0$ y menor en la cara donde $x = x$. En otras palabras, la cantidad instantánea de

transferencia de calor es proporcional al área y a la diferencia de temperatura ΔT que impulsa el calor a través de la pared de espesor x . Donde la constante de proporcionalidad k es la conducción térmica del material, que es el parámetro establecido para medir la capacidad de un material para conducir calor.

- Convección.

La convección es la energía calorífica que se transmite por el movimiento físico de moléculas “calientes” de las zonas de alta temperatura a las zonas de baja temperatura y viceversa. Este proceso tiene gran importancia en fluidos y también es denominado conducción superficial, ya que el flujo de calor entre la superficie de un material y un fluido está relacionado con la conducción, a través de una fina capa del fluido que se encuentra junto a la superficie.

La transferencia de calor por convección puede ser forzada cuando está ayudada por el movimiento de las superficies en contacto con el fluido, o libre (llamada también natural) cuando se produce únicamente en virtud de una diferencia de densidades causada por una diferencia de temperaturas. También puede venir acompañada de un cambio de fase, como ocurre durante la condensación o la ebullición, con unos intercambios de calor muy intensos. La convección se encuentra regida en base a la siguiente ley:

- Ley de Enfriamiento de Newton.

Establece que el calor transferido por un cuerpo hacia el medio que lo rodea, a través de una superficie A_s , es proporcional a la diferencia de temperatura entre dicha superficie y el medio circundante, como también es proporcional al coeficiente convectivo, que este a su vez, depende de la geometría del cuerpo (disposición de la superficie), velocidad del fluido del medio (en caso de que tenga) y tipo de fluido que lo rodea.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_{amb}) \quad Ec. 2$$

Dónde: h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, T_s = temperatura de la superficie, T_{amb} = temperatura ambiente. A_s = área superficial.

- Radiación.

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones), como resultado en los cambios de las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío. Esta es la manera en que la energía del Sol llega a la Tierra. Todos los cuerpos arriba del cero absoluto, emiten radiación térmica. La radiación se encuentra regida en base a la siguiente ley:

- Ley de Stefan Boltzmann.

La ley de Stefan-Boltzmann establece que un cuerpo negro emite radiación térmica con una potencia emisiva hemisférica total (W/m^2) proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

$$\dot{Q}_{emitida,max} = \sigma A_s (T_s^4) \quad Ec 3$$

Dónde:

T_s = temperatura absoluta de la superficie.

Constante de Stefan-Boltzmann: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$

A_s = área superficial.

Esta potencia emisiva de un cuerpo negro, supone un límite superior para la potencia emitida por los cuerpos reales. La potencia emisiva superficial de una superficie real es menor que el de un cuerpo negro a la misma temperatura y está dada por:

$$\dot{Q}_{emitida} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad Ec. 4$$

Dónde:

ε : es una propiedad radiactiva de la superficie denominada emisividad. Con valores en el rango $0 \leq \varepsilon \leq 1$, esta propiedad es la relación entre la radiación emitida por una superficie real y la emitida por el cuerpo negro a la misma temperatura. Esto depende marcadamente del material de la superficie y de su acabado, de la longitud de onda, y de la temperatura de la superficie.

- Colectores solares térmicos

Los colectores solares son dispositivos diseñados para captar la radiación solar, transformarla en energía térmica y así elevar la temperatura de un fluido. Esto nos facilita, calentar agua para su posterior aprovechamiento a nivel doméstico o comercial. Hay muchas formas de aprovechar la energía solar. La más conocida y usada es captar el calor del Sol pasando agua por tubos de cobre con una capa negra bien aislada que absorba la radiación.

Su funcionamiento puede ser de dos tipos:

- Colectores solares de régimen forzado. La principal característica de las instalaciones en régimen forzado es que incluyen al menos una bomba para hacer circular el fluido de trabajo por el colector solar.
- Colector solar termosifónico. Estos equipos no necesitan de una bomba para la recirculación del fluido, ya que esta se da por la diferencia de densidades del fluido caliente y frío.

Tipos de colectores solares planos.

Colectores solares planos con cubierta.

El colector solar de placa plana tiene una buena relación costo/efectividad en climas moderados, y se adapta correctamente a un gran número de aplicaciones. (El calentamiento de agua sanitaria, la climatización de piscinas, precalentamiento de fluidos industriales, etc.), disponiendo de un colector solar sin líquido en su interior. La temperatura de absorción irá creciendo continuamente, y también las pérdidas por conducción, convección y radiación, ya que se incrementan con la temperatura. Llegará el momento en que dichas pérdidas son iguales a la energía que el absorbente recibe del Sol, y su temperatura se estabiliza, llegando a la temperatura de equilibrio estática, también llamada “temperatura de estancamiento”.

Colectores solares planos sin cubierta.

Tal como su nombre indica, los captadores sin cubierta constan básicamente del elemento absorbente, formado generalmente por un conjunto de tubos de material plástico. El caucho de etileno-propileno-dieno (EPDM), y caucho o polipropileno, son los materiales más comunes en este tipo de colectores solares. Son muy económicos y fáciles de instalar ya que habitualmente presentan configuraciones flexibles que permiten colocarlos sobre cualquier superficie. Además, son resistentes a la corrosión y permiten configuraciones de calentamiento directo como en el caso del calentamiento de piscinas.

Colectores solares planos de tubos de vacío.

Este tipo de colector consta de un conjunto de tubos cilíndricos, formados por un absorbente selectivo, y situado sobre un asentamiento reflector, rodeado de un cilindro de vidrio transparente. Entre el tubo exterior transparente y el absorbente interior se mantiene el vacío. Con ello, se evitan las pérdidas por conducción y por convección desde la superficie absorbente. Este hecho permite alcanzar temperaturas de más de 100°C y aprovechar mucho más la radiación solar.

Actualmente, hay dos tipos de estos colectores, con técnicas bastante diferenciadas en cuanto a la transmisión del calor desde el tubo de vacío hasta el circuito primario:

- Colector de vacío con fluido directo. Disponen de un captador principal del circuito primario en la parte superior del captador; cada tubo se conecta con este captador mediante un circuito de ida y otro de regreso. Por este circuito se hace circular el fluido del circuito primario que se calentará durante el recorrido.
- La otra tendencia de transmisión de calor en los tubos de vacío se llama "heat pipe", en este sistema (como en el caso anterior) los colectores disponen de un captador principal del circuito primario en la parte superior, pero para este caso, el tubo de vacío dispone de un tubo de cobre central sellado y lleno de una mezcla alcohólica, que favorecerá la transferencia de calor.

A continuación, se presenta la Ecuación General para colectores planos.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{util}}{AG} = \eta_0 - a_1 \frac{(T_{cap} - T_{amb})}{G} - a_2 \frac{(T_{cap}^4 - T_{amb}^4)}{G} \quad Ec. 5$$

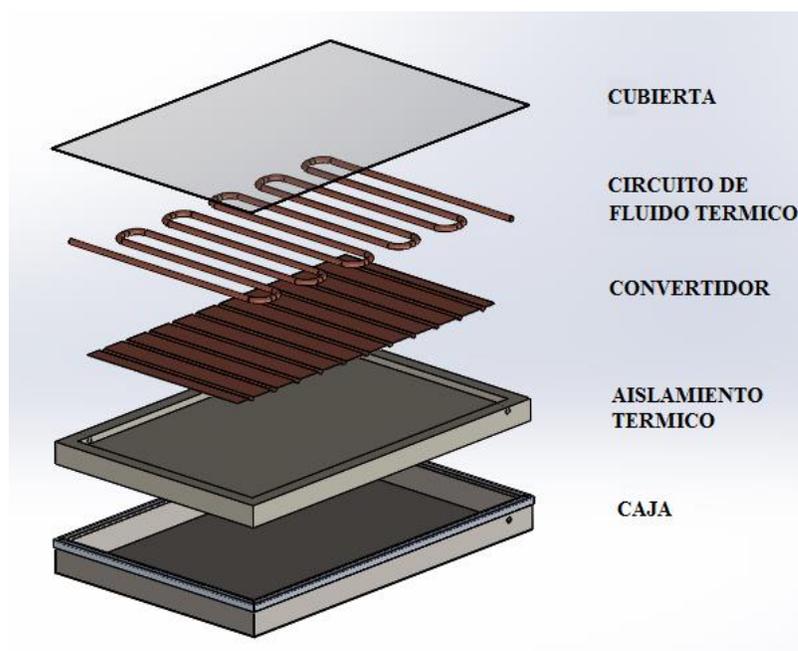
De donde:

- η_0 ; Eficiencia óptica o máxima del captador.
- a_1 ; Coeficiente de pérdidas lineales.
- a_2 , Coeficiente de pérdidas por radiación.

Constante	Valor
n_0	0.5632
a_1	1.241
a_2	5.499×10^{-8}

Componentes básicos de un colector solar

Los componentes básicos se muestran en la ilustración siguiente:



Vista explosionada de los elementos más importantes del colector

Objetivos.

- Estudiar la teoría que fundamenta al colector solar plano.
- Conocer el equipo, sus componentes principales y sus respectivos accesorios.
- Manipular el equipo, y familiarizarse con la interfaz de monitoreo de los sensores.

Tiempo requerido.

100 minutos.

Instrumentos a utilizar.

- Equipo de seguridad:
- Gabachas manga larga.
- Zapatos adecuados.

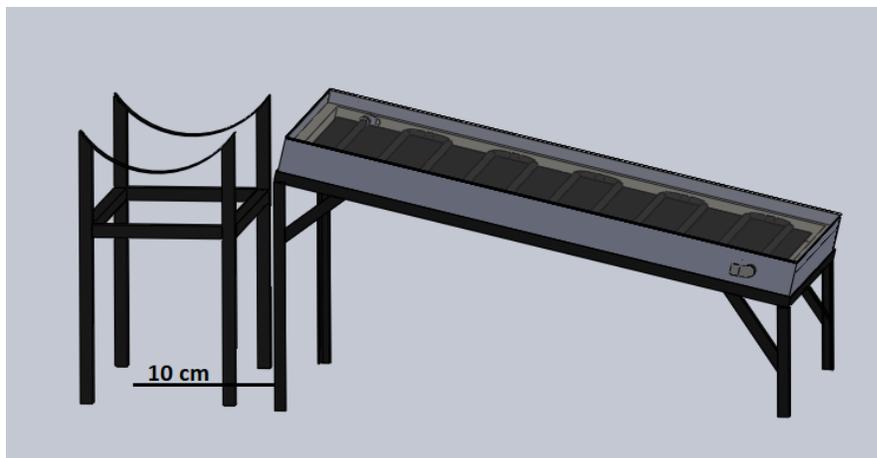
Equipo de Trabajo.

- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Silicón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Lápiz.

Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalarlo con sus componentes.

2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio. Colocararlo sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en la figura.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

4. Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente imagen.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar

5. Verificar que la pantalla encienda y muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
6. Llenar el tanque acumulador visualizando el volumen en el indicador de vidrio que se encuentra a un costado.
7. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
8. Al terminar el laboratorio desconectar y guardar el equipo de forma adecuada.

Análisis.

En esta práctica de laboratorio el estudiante debe familiarizarse con el equipo, principalmente con el funcionamiento de los sensores y su visualización en la pantalla, para leer de forma correcta los datos proporcionados, y sin tener alguna confusión al momento de tabularlos.

Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prenti.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.

GUÍA DE LABORATORIO 2
 UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
 ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 2: Toma de datos para un volumen determinado.

N° DE CARNET	APELLIDOS	NOMBRES	FIRMA

Indicaciones Generales:

- Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario del equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.
- Se recomienda trabajar con un volumen de entre 20-50 litros, el volumen a trabajar será a criterio del docente encargado.
- Investigar las condiciones climáticas antes de realizar la práctica de laboratorio. Factores como la nubosidad, la lluvia o vientos fríos, podrían influir considerablemente en el rendimiento del equipo.
- Se recomienda que la práctica de laboratorio de inicio a las 7:00 A.M. para la toma y tabulación de datos.

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por su cuenta propia los temas que se recomiendan en el transcurso de esta guía.

Asignación:

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica del laboratorio, los cuales son los siguientes:

- ¿Qué es la bóveda celeste?
- ¿A qué se le llama ángulo de Azimut?
- ¿Cuáles son los parámetros que se utilizan para evaluar la nubosidad?
- ¿Qué es el efecto termosifón?

Antecedentes:

Se utilizará el marco teórico de la guía del laboratorio # 1

Objetivos.

- Caracterizar un determinado volumen, con las condiciones óptimas del equipo.
- Adquirir experiencia en la toma de datos y la operación con el sistema de monitoreo del equipo.
- Realizar una evaluación adecuada de los valores obtenidos con el equipo.

Tiempo requerido.

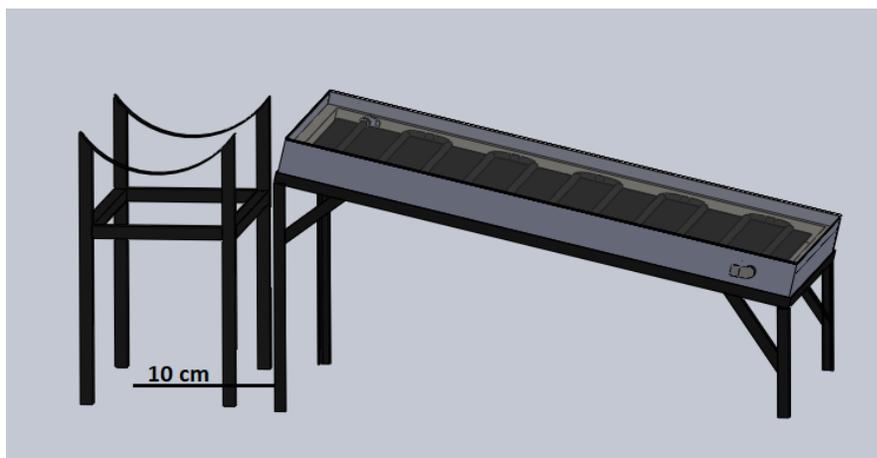
La práctica consta de 4 días de pruebas para toma de valores de temperatura y presión.

Instrumentos a utilizar.

- Equipo de seguridad industrial.
- Gabacha. (De preferencia manga larga para protegerse de la radiación del sol)
- Zapatos adecuados.
- Gorra.
- Equipo de trabajo.
- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Lápiz.

Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalar el equipo y sus componentes.
2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio, colocar el colector sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en la siguiente figura.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

4. Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y en el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente imagen.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar.

5. Verificar que la pantalla encienda y que muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
6. Llenar el tanque acumulador con la cantidad de volumen para realizar la primera parte del laboratorio visualizándolo en el tubo de vidrio que se encuentra a un costado.
7. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
8. Tabular los datos obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema, cada 30 minutos durante los próximos 4 días
9. Al terminar el laboratorio se debe de drenar toda el agua que contiene el tanque acumulador.

Análisis.

Teniendo tabulados las lecturas de las temperaturas y la presión, (obtenidas por los diferentes sensores en el sistema), se debe de realizar un análisis comparativo entre las temperaturas alcanzadas en los sensores en cada día, las cuales son las siguientes:

- Describa el proceso y momento en que se da el efecto termosifón por primera vez en el sistema.
- Comparar la temperatura alcanzada en la placa colectora.
- Comparar la temperatura a la entrada y salida del colector solar.
- Comparar la temperatura del tanque acumulador.
- Comparar las pérdidas de temperatura que se dan en el fluido durante la noche.
- Comparar la presión en el tanque acumulador.
- Redactar conclusiones en cada caso.
- Graficar la curva de calentamiento del fluido
- Realizar el cálculo de la eficiencia apoyándose de las lecturas de los sensores. (Para tres diferentes momentos del día)

- A las 9:30 A.M.
- A las 12:30 P.M.
- A las 3:30 P.M.

Observaciones.

Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prentice Hall.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- System Advisor Model (con datos de estación meteorológica de Ilopango)

GUÍA DE LABORATORIO 3

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 3: Evaluación de factores que afectan al equipo, tanto de sombra como suciedad en el vidrio.

<i>N° DE CARNET</i>	<i>APELLIDOS</i>	<i>NOMBRES</i>	<i>FIRMA</i>

Indicaciones Generales:

- Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario de equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.
- Se recomienda trabajar con volumen de entre 20-50 litros, el volumen a trabajar será a criterio del docente encargado.
- Se realizará la prueba de laboratorio con un volumen determinados, con factores que afectan el rendimiento óptimo del equipo, tales como sombra o suciedad en el vidrio, para comparar y caracterizar cada prueba.

- Para esta práctica, deberá incidir la radiación de manera parcial, esto se logrará cubriendo la mitad del colector con sombra, para evaluar el comportamiento.
- Investigar las condiciones climáticas antes de realizar la práctica de laboratorio. Factores como la nubosidad, la lluvia o vientos fríos, podrían influir considerablemente.
- Se recomienda que la práctica del laboratorio de inicio a las 7:00 A.M. para la tabulación de los datos

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por su cuenta propia los temas que se recomiendan en el transcurso de esta guía.

Asignación:

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica del laboratorio, los cuales son los siguientes:

- ¿Qué es el brillo solar?, ¿Con qué instrumento se mide y en qué unidades se expresa?
- ¿Cuál es la irradiancia promedio del sol que llega a la Tierra?
- ¿Qué son los Solsticios y Equinoccios?
- ¿Cuáles son las diferentes formas en que llega la radiación a la Tierra?, ¿Y cuáles son los que aprovecha el colector?
- ¿Cuál es la gama de longitud de onda que se aprovecha con el colector?

Antecedentes.

Se utilizará el marco teórico de la guía del laboratorio # 1.

Objetivos.

- Evaluar los factores que afectan la irradiancia que recibe la placa colectora, para transferir la energía al fluido.
- Comparar los factores de suciedad y sombra en el vidrio que afectan el calentamiento de la placa colectora.

Tiempo requerido.

La práctica consta de 3 días de pruebas para toma de valores de temperatura y presión.

Instrumentos a utilizar.

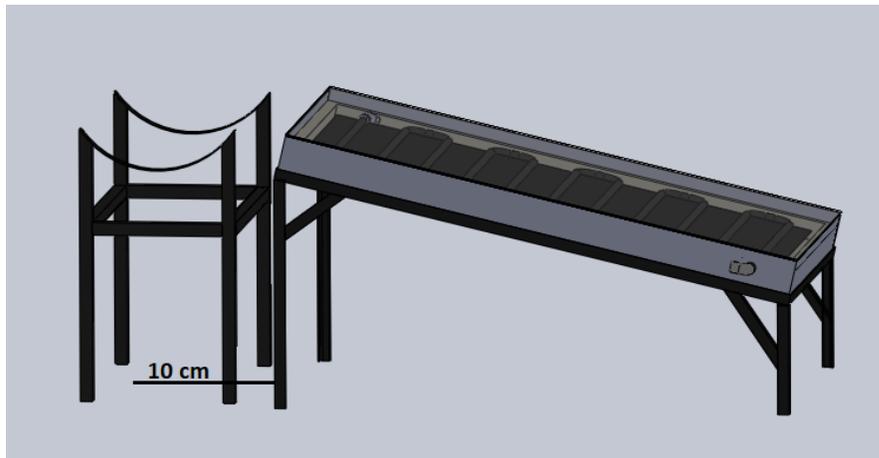
- Equipo de seguridad industrial.
- Gabacha. (De preferencia manga larga para protegerse de la radiación del sol).
- Zapatos adecuados.
- Gorra.

Equipo de trabajo.

- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Paraguas.
- Lápiz.
- Hojas o polvo para efectuar la suciedad en el vidrio.

6. Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalar el equipo y sus componentes.
2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio, colocar el colector sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en la siguiente imagen.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

4. Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y en el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente figura.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar.

5. Verificar que la pantalla encienda y que muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
6. Llenar el tanque acumulador con la cantidad de volumen para realizar la primera parte del laboratorio visualizándolo en el tubo de vidrio que se encuentra a un costado.
7. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
8. Tabular los datos obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema, cada 30 minutos durante el primer día.
9. En el segundo día, se debe tomar datos en los sensores cuando el colector se encuentre incidido por sombra, de manera parcial.
10. En el caso de no lograr incidencia de sombra sobre el colector por la ubicación del mismo, auxiliarse del paraguas para provocarle sombra al colector en un 25%.
11. En el tercer día tabular los datos obtenidos de los sensores para una sombra parcial en el colector de un 50%.

12. Al terminar la práctica de laboratorio drenar completamente el tanque, desacoplar el equipo y guardar el mismo.

Análisis.

Teniendo tabulados las lecturas de las temperaturas y la presión, (obtenidas por los diferentes sensores en el sistema), se debe de realizar un análisis comparativo entre las temperaturas alcanzadas en los sensores en cada día, las cuales son las siguientes:

- Comparar la temperatura alcanzada en la placa colectora.
- Comparar la temperatura a la entrada y salida del colector solar.
- Comparar la temperatura del tanque acumulador.
- Comparar la presión en el tanque acumulador.
- Redactar conclusiones en cada caso anterior.
- Realizar el cálculo de la eficiencia apoyándose de las lecturas de los sensores. (Para tres diferentes momentos del día).
 - A las 9:30 A.M.
 - A las 12:30 P.M.
 - A las 3:30 P.M.
- Observaciones.

Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prentice Hall.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- System Advisor Model (con datos de estación meteorológica de Ilopingo)

GUÍA DE LABORATORIO 4

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 4: Evaluar las condiciones del equipo simulando un uso cotidiano (cuando se le sustrae y agrega fluido).

N° DE CARNET	APELLIDOS	NOMBRES	FIRMA

Indicaciones Generales:

- Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario de equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.
- Se recomienda trabajar con un volumen de entre 20-50 litros, el volumen a trabajar será a criterio del docente encargado.
- Se realizará la prueba de laboratorio con un volumen determinado, sustrayendo y agregándole fluido, hasta alcanzar el volumen inicial.

- Investigar las condiciones climáticas antes de realizar la práctica de laboratorio. Factores como la nubosidad, la lluvia o vientos fríos, podrían influir considerablemente.
- Se recomienda que la práctica del laboratorio de inicio a las 7.00 A.M. para la tabulación de los datos.

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por su cuenta propia los temas que se recomiendan en el transcurso de esta guía.

Asignación:

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica del laboratorio, los cuales son los siguientes:

- ¿Cuál es la transmitancia en la placa de vidrio, para un espesor de 5mm?
- ¿Qué es un actinómetro y para qué sirve?
- ¿De qué clase son los sensores de temperatura utilizados en el laboratorio?, ¿son de bandas bimetálicas?, ¿termopares?, ¿detectores de temperatura resistivos (RTD? o ¿termistores?

Antecedentes:

Se utilizará el marco teórico de la guía del laboratorio # 1.

Objetivos.

- Evaluar las condiciones de operación del colector para uso doméstico.
- Evaluar la recuperación de temperatura del agua del tanque al retirar y agregar un nuevo líquido a temperatura ambiente.

Tiempo requerido.

La práctica consta de 3 días de pruebas para toma de valores de temperatura y presión.

Instrumentación a utilizar.

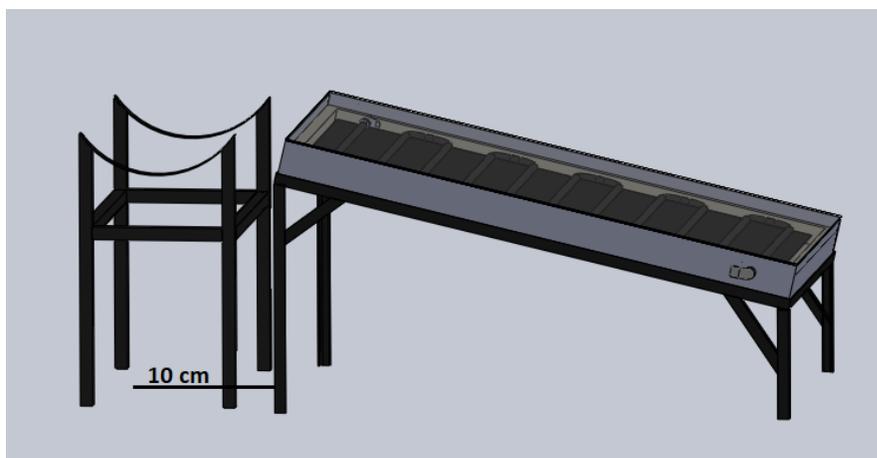
- Equipo de seguridad industrial.
- Gabacha. (De preferencia manga larga para protegerse de la radiación del sol)
- Zapatos adecuados.
- Gorra.

Equipo de trabajo.

- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Paraguas.
- Lápiz.

Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalar el equipo y sus componentes.
2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio, colocar el colector sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en siguiente imagen.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

4. Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente figura.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar.

5. Verificar que la pantalla encienda y que muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
6. Llenar el tanque acumulador con la cantidad de volumen para realizar la primera parte del laboratorio visualizándolo en el tubo de vidrio que se encuentra a un costado.
7. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
8. Tabular los datos obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema, cada 30 minutos durante el primer día.
9. En el segundo día de la práctica, a las 12:00 P.M. del día, retirar el 25% del volumen del tanque y reemplazar el mismo con agua de la red.
10. Realizar para el tercer día la misma indicación del numeral 9, reemplazando solamente un 50% del volumen del tanque.
11. Al terminar la práctica de laboratorio drenar completamente el tanque, desacoplar el equipo y guardar el mismo.

Análisis.

Teniendo tabulados las lecturas de las temperaturas y la presión, (obtenidas por los diferentes sensores en el sistema), se debe de realizar un análisis comparativo entre las temperaturas alcanzadas en los sensores en cada día, las cuales son las siguientes:

- Graficar el comportamiento que tiene el fluido al calentarse, Gráfica de Tiempo vs Temperatura para el segundo y tercer día.
- Comparar la temperatura del tanque acumulador al final de cada día de la práctica.
- Redactar conclusiones en cada caso.

Observaciones.

Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prenti.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- System Advisor Model (con datos de estación meteorológica de Ilopango)

GUÍA DE LABORATORIO 5
 UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
 ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 5: Evaluación del colector solar plano sin cubierta de vidrio.

N° DE CARNET	APELLIDOS	NOMBRES	FIRMA

Indicaciones Generales:

- Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario de equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.
- Se recomienda trabajar con un volumen de entre 20-50 litros, el volumen a trabajar será a criterio del docente encargado.
- Se recomienda tener cuidado al momento de retirar y manipular la cubierta de vidrio, debido a la fragilidad de la misma.
- Investigar las condiciones climáticas antes de realizar la práctica de laboratorio. Factores como la nubosidad, la lluvia o vientos fríos, podrían influir considerablemente.

- Se recomienda que la práctica del laboratorio de inicio a las 7:00 A.M. para la tabulación de los datos.

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por su cuenta propia los temas que se recomiendan en el transcurso de esta guía.

Asignación:

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica del laboratorio, los cuales son los siguientes:

- Investigar sobre los cuerpos negros.
- ¿Cuáles son las aplicaciones más comunes, que utilizan colectores solares planos sin cubierta?
- ¿Cuál es la radiación absorbida por la placa colectora sin la placa de vidrio?
- ¿Cuál es la diferencia que existe en el colector, de utilizar y no utilizar una placa de vidrio?

Antecedentes:

Se utilizará el marco teórico de la guía del laboratorio # 1.

Objetivos.

- Evaluar las condiciones de operación de un colector solar plano sin cubierta.
- Evaluar la importancia que representa, la falta de utilización de la cubierta de vidrio en el equipo.
- Analizar los efectos que provoca la velocidad del viento en la placa colectora y el circuito de fluido térmico.

Tiempo requerido.

La práctica consta de 1 día de pruebas para toma de valores de temperatura y presión.

Instrumentación a utilizar.

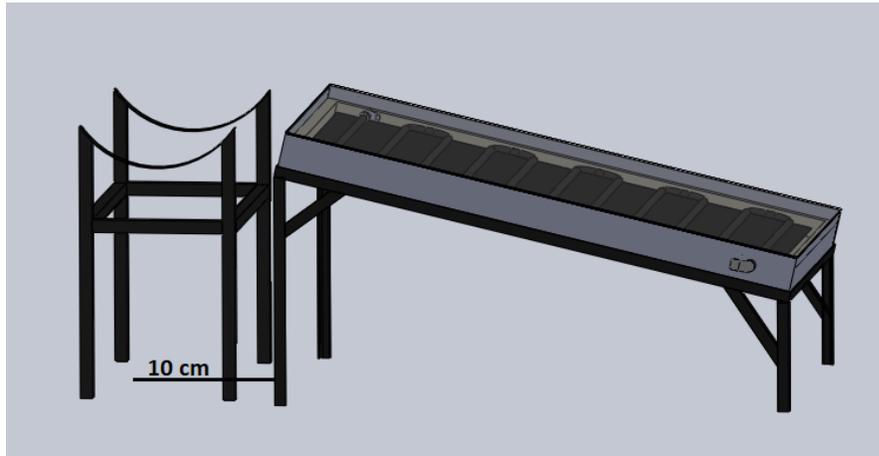
- Equipo de seguridad industrial.
- Gabacha. (De preferencia manga larga para protegerse de la radiación del sol)
- Zapatos adecuados.
- Gorra.

Equipo de trabajo.

- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Lápiz.

Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalar el equipo y sus componentes.
2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio, colocar el colector sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Retirar la cubierta de vidrio, teniendo cuidado en la manipulación del mismo.
4. Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en la siguiente imagen.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

5. Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y en el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente figura.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar.

6. Verificar que la pantalla encienda y que muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
7. Llenar el tanque acumulador, auxiliándose en el tubo de vidrio que se encuentra a un costado. (Llenar el tanque con el mismo volumen que se empleó en el laboratorio #2)
8. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
9. Tabular los datos obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema, cada 30 minutos durante el día.
10. Tener precaución de no tocar la placa colectora con las manos desnudas, para evitar quemaduras.
11. Al terminar la práctica de laboratorio drenar completamente el tanque, desacoplar el equipo y guardar el mismo.

Análisis.

Teniendo tabulados las lecturas de las temperaturas y la presión, (obtenidas por los diferentes sensores en el sistema) durante el día de operación, hacer una comparación de los resultados obtenidos, tomando de referencia el primer día de operación del laboratorio #2.

- Comparar la temperatura alcanzada en la placa colectora.
- Comparar la temperatura a la entrada y salida del colector solar.
- Comparar la temperatura del tanque acumulador.
- Comparar la presión en el tanque acumulador.

¿Cuáles fueron las máximas temperaturas registradas en los sensores en el transcurso del día sin la placa de vidrio?

¿Cuáles son los factores que interfieren en la ausencia del aumento de la temperatura en la placa colectora?

¿Con respecto al análisis que se efectuó en el laboratorio, cómo evalúa el desempeño del colector solar?

Observaciones.

Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prenti.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- System Advisor Model (con datos de estación meteorológica de Ilopango)

GUÍA DE LABORATORIO 6
 UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
 ASIGNATURA: SOLAR TÉRMICA



Práctica de laboratorio # 6: Evaluación del colector solar plano con cubierta alternativa.

N° DE CARNET	APELLIDOS	NOMBRES	FIRMA

Indicaciones Generales:

- Se exige puntualidad para realizar la práctica de laboratorio y haber leído con anterioridad el manual de usuario de equipo. Esta guía de laboratorio debe leerse antes de realizar la práctica, ya que algunos conceptos requieren su previo estudio.
- Se recomienda trabajar con un volumen de entre 20-50 litros, el volumen a trabajar será a criterio del docente encargado.
- Se recomienda tener cuidado al momento de retirar y manipular la cubierta de vidrio, debido a la fragilidad de la misma.
- Se debe de colocar una cubierta transparente de plástico sobre el colector, simulando una placa protectora, dándole la forma hermética para que se de el efecto invernadero dentro del colector solar.

- Investigar las condiciones climáticas antes de realizar la práctica de laboratorio. Factores como la nubosidad, la lluvia o vientos fríos, podrían influir considerablemente.
- Se recomienda que la práctica del laboratorio de inicio a las 7:00 A.M. para la lectura y tabulación de los datos.

A continuación, se presenta una teoría introductoria, la cual se recomienda leer detenidamente para estar en sintonía con las prácticas que se pueden desarrollar con el equipo. Además, investigar por cuenta propia los temas que se recomiendan en el transcurso de esta guía.

Asignación:

Para comprender de forma adecuada el fenómeno del calentamiento del agua en un colector solar plano, se debe de investigar con anterioridad algunos conceptos importantes para interpretar y asimilar la práctica del laboratorio, los cuales son los siguientes:

- Investigar sobre la Transmisividad, Absortividad y Reflectividad de un plástico transparente.
- ¿En qué manera beneficia el Efecto Invernadero al colector solar plano?
- Investigar sobre propuestas alternativas para placas colectoras y para el circuito de fluido térmico.

Antecedentes:

Se utilizará el marco teórico de la guía del laboratorio # 1.

Objetivos.

- Evaluar las condiciones de operación de un colector solar plano con una cubierta alternativa.
- Identificar si la cubierta alternativa, es una opción viable para reemplazar el uso de una cubierta de vidrio.

Tiempo requerido.

La práctica consta de 1 día de pruebas para toma de valores de temperatura y presión.

Instrumentación a utilizar.

- Equipo de seguridad industrial.
- Gabacha. (De preferencia manga larga para protegerse de la radiación del sol)
- Zapatos adecuados.
- Gorra.

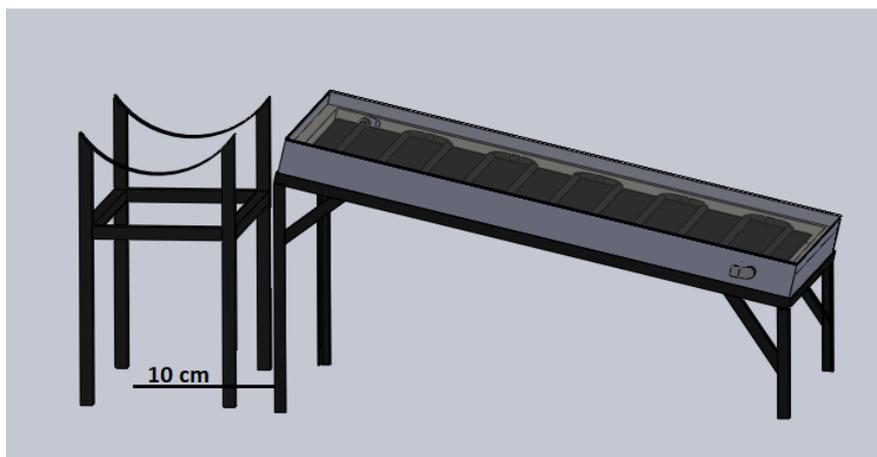
Equipo de trabajo:

- Sistema colector-tanque acumulador con sus accesorios.
- Tenaza.
- Llave stilson.
- Llave Inglesa (cangreja).
- Cinta teflón.
- Brújula y nivel (se puede utilizar una aplicación en el celular).
- Libreta.
- Lápiz.
- Un rollo de cinta adhesiva.
- Dos yardas de plástico.

Procedimiento.

1. Trasladar el equipo a un lugar indicado por el encargado de los laboratorios para poder instalarlo con sus componentes.
2. Teniendo todas las partes del colector en el sitio, colocar el colector sobre su soporte metálico, orientándose hacia el sur.
3. Retirar la cubierta de vidrio, teniendo cuidado en la manipulación del mismo.

- Colocar el plástico sobre el colector, fijándolo con la cinta adhesiva.
- Colocar el tanque acumulador a una distancia de 10cm del colector como se muestra en la siguiente figura.



Distancia correcta de alejamiento de la base del tanque a la base del colector.

- Conectar las mangueras flexibles del tanque al colector. La manguera más larga debe ser acoplada en la parte inferior del colector y en el otro extremo a la parte inferior del tanque. La manguera más corta debe de conectarse en la parte superior del colector, hacia la conexión superior del tanque como se muestra en la siguiente figura.



Posición correcta de las instalaciones de las mangueras en el colector solar.

7. Verificar que la pantalla encienda y que muestre las lecturas de los sensores (para detalles de cómo conectar los sensores, revise el manual de usuario).
8. Llenar el tanque acumulador, auxiliándose en el tubo de vidrio que se encuentra a un costado. (Llenar el tanque con el mismo volumen que se empleó en el laboratorio #2)
9. Verificar que no existan fugas de agua en los diferentes acoples.
10. Tabular los datos obtenidos de los diferentes sensores que se encuentran en el sistema, cada 30 minutos durante el primer y segundo día.
11. Al terminar la práctica de laboratorio drenar completamente el tanque, desacoplar el equipo y guardar el mismo.

Análisis.

Teniendo tabulados las lecturas de las temperaturas y la presión, (obtenidas por los diferentes sensores en el sistema) en el primer día de operación, hacer una comparación de los resultados, tomando de referencia los dos primeros días de operación del laboratorio #2 y #5.

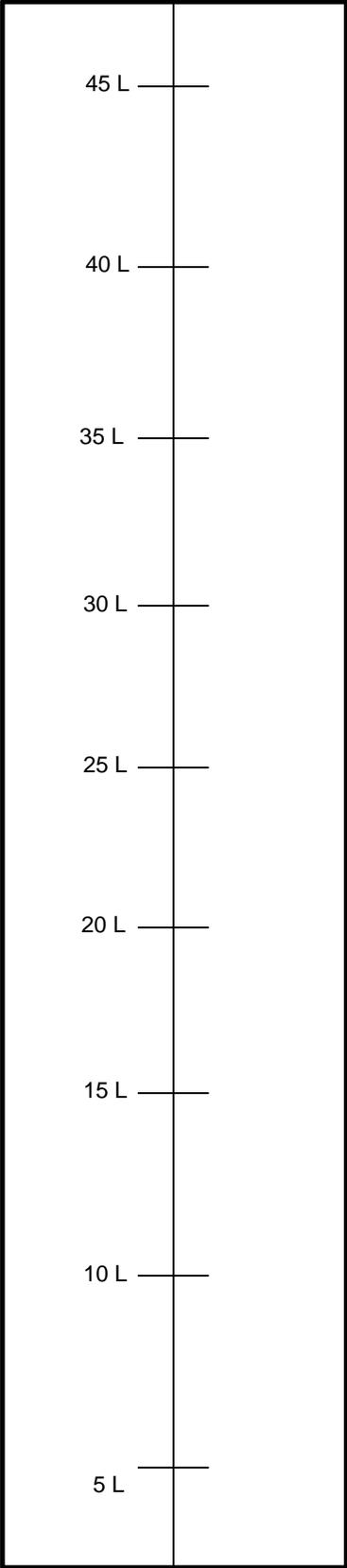
- Comparar la temperatura alcanzada en la placa colectora.
- Comparar la temperatura a la entrada y salida del colector solar.
- Comparar la temperatura del tanque acumulador.
- Comparar la presión en el tanque acumulador.
- Redactar conclusiones en cada caso.
- ¿Recomienda el uso de una cubierta de plástico, como una propuesta alternativa al uso del vidrio?, explique.

Observaciones.

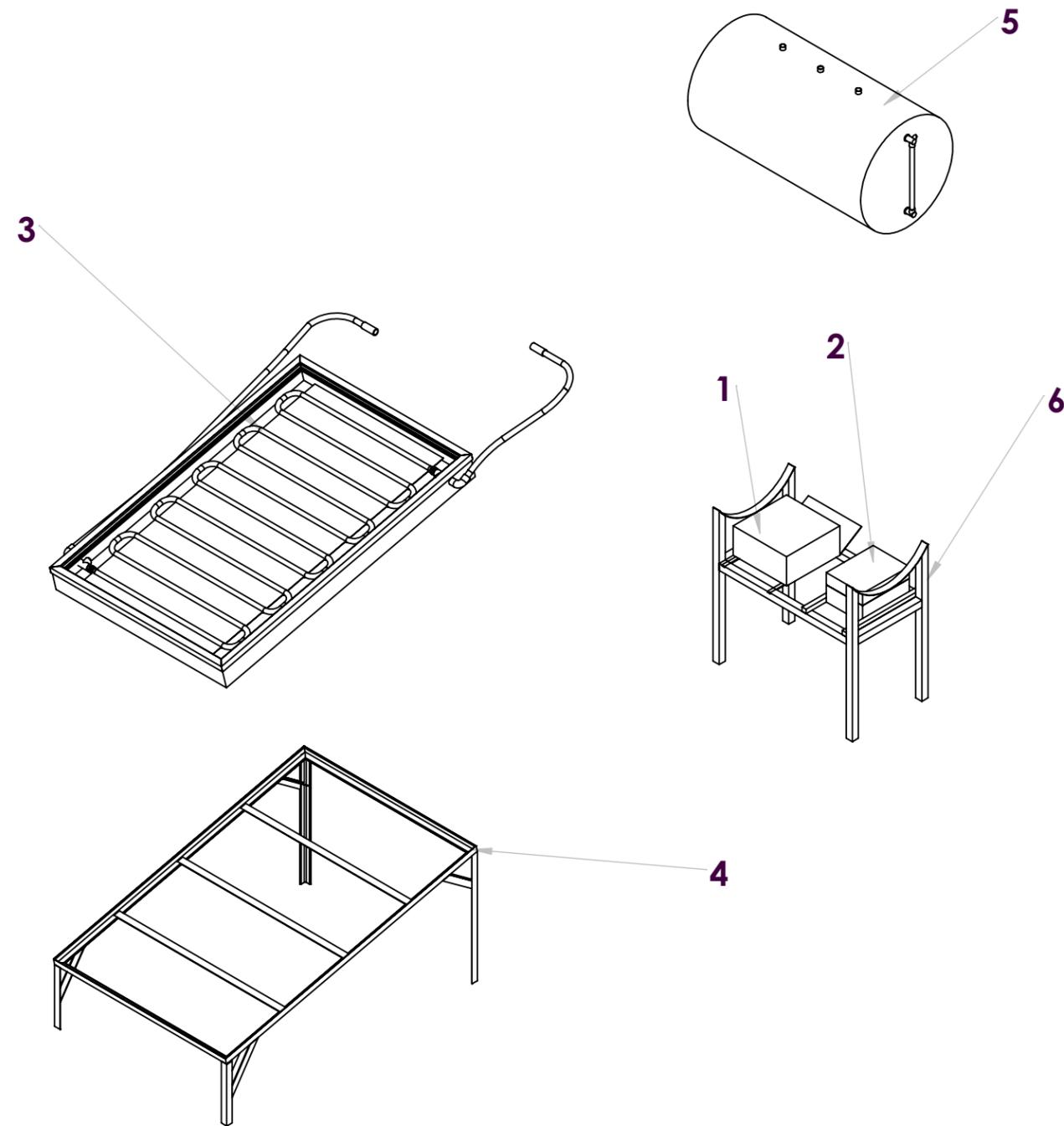
Bibliografía.

- Incropera, F. P. (1999). Fundamentos de Transferencia de Calor (cuarta edición). México: Prenti.
- A., C. Y. (2004). Transferencia de Calor y Masa. México: Mc Graw Hill Interamericana.
- System Advisor Model (con datos de estación meteorológica de Ilopango)

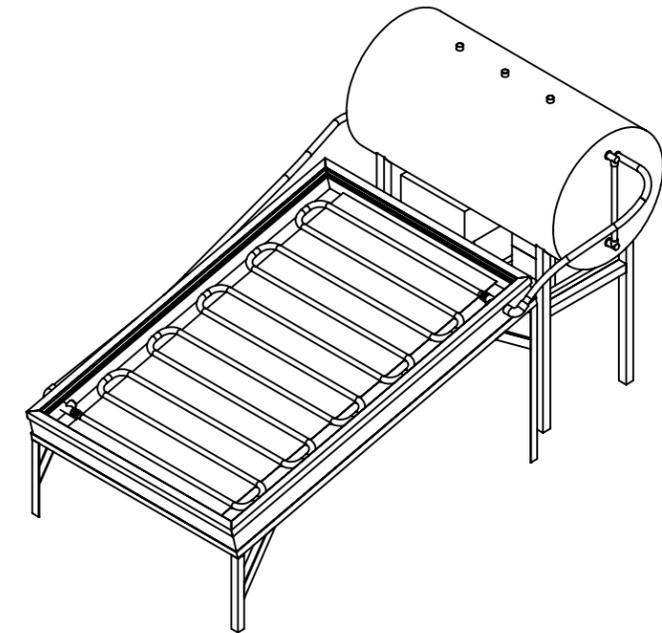
A5: escala de volumen para visualizar el nivel del tanque



A6: planos



VISTA EXPLOSIONADA



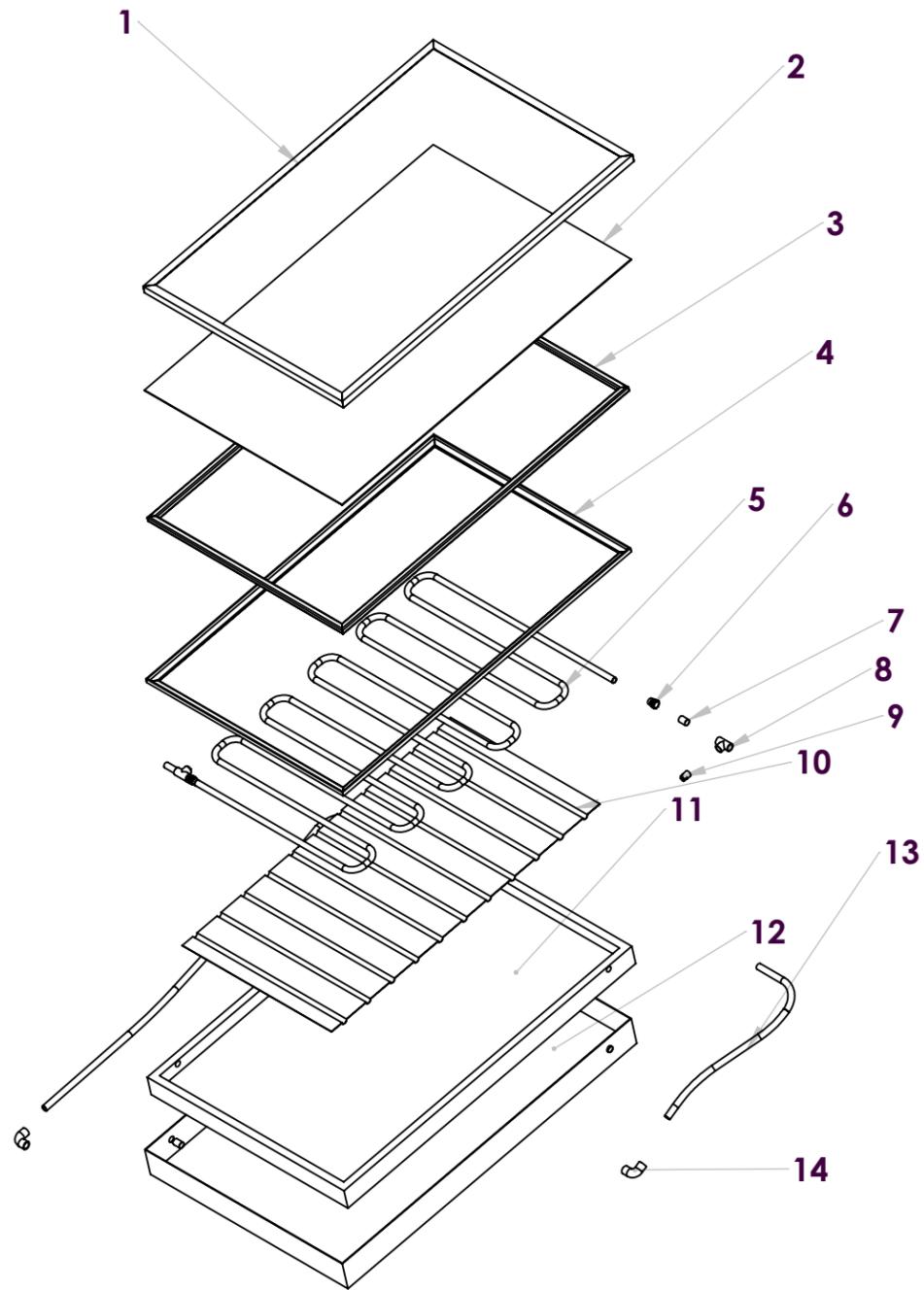
ISOMETRICO

ID	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	CAJA DE ALMACENAMIENTO DE CABLES DE (25x25x14) cm	1	AISI 1010
2	CAJA PROTECTORA DE PANTALLA DE MONITOREO DE (22x17x12)cm	1	ACRILICO
3	COLECTOR	1	
4	ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA EL COLECTOR	1	AISI 1045
5	TANQUE DE ALMACENAMIENTO	1	
6	ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA EL TANQUE	1	AISI 1045
ESCALA	Br. Granados Rivas Francisco Gabriel		
1:50	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	05/04/2018
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	
	REVISÓ:	Ing. Gustavo Salomon Torres Rios Lazo	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN:	Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano	
Cuando no se especifique	NOMBRE	MATERIAL:	
Unidades: mm	COLECTOR SOLAR VISTA EXPLOSIONADA	CANTIDAD: 1	

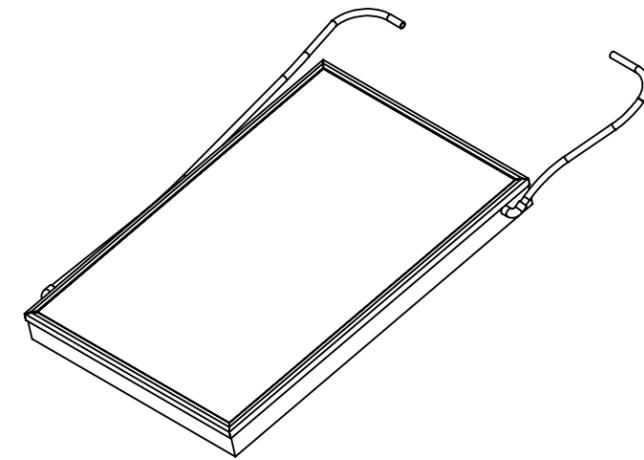


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

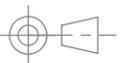
Autopista Norte y Final Avenida Heroes y
 Mártires del 30 de Julio,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



VISTA EXPLOSIONADA

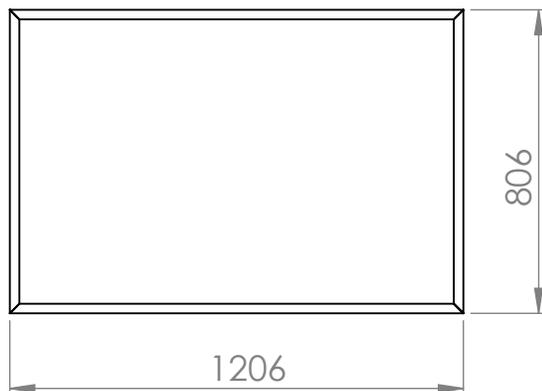


ISOMETRICO

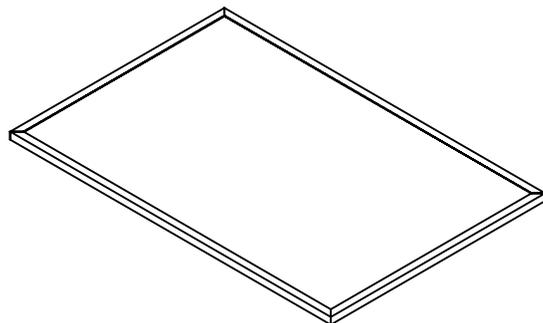


ID	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	SOPORTE PARA EL VIDRIO	1	ALUMINIO
2	VIDRIO TRANSPARENTE DE 5mm DE ESPESOR DE(0.8x1.2)m	1	
3	EMPAQUE	1	
4	SOPORTE PARA EL EMPAQUE	1	ALUMINIO
5	SERPENTIN	1	COBRE
6	CAMBIO DE 5/8" A 1/2"	2	COBRE
7	NIPLE DE ACERO INOXIDABLE DE 1/2"	4	ACERO INOXIDABLE
8	T DE 1/2" DE ACERO INOXIDABLE	2	ACERO INOXIDABLE
9	ADAPTADOR PARA SENSOR DE TEMPERATURA	3	NYLON
10	PLACA ABSORBEDORA DE 1mm DE ESPESOR	1	COBRE
11	AISLANTE	1	FIBRA CERAMICA
12	CAJA DE SOPORTE PARA EL COLECTOR	1	LAMINA GALVANIZADA
13	TUBERIA FLEXIBLE DE 5/8"	2	NEOPRENO
14	CODOS DE 5/8"	2	ACERO INOXIDABLE

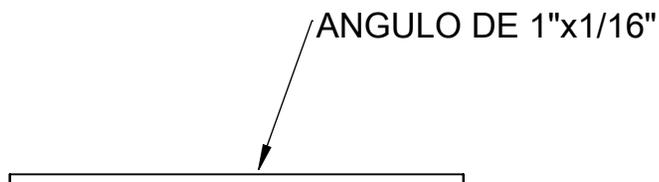
ESCALA	Br. Granados Rivas Francisco Gabriel		05/04/2018	 UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA Autopista Norte y Final Avenida Heroes y Mártires del 30 de Julio, Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador	HOJA 2/13
1:20	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	07/05/2018		
	REVISÓ:	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto			
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano			A3	
Quando no se especifica Unidades: mm	NOMBRE	COLECTOR VISTA EXPLOSIONADA	MATERIAL	CANTIDAD: 1	



VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMETRICA



VISTA FRONTAL

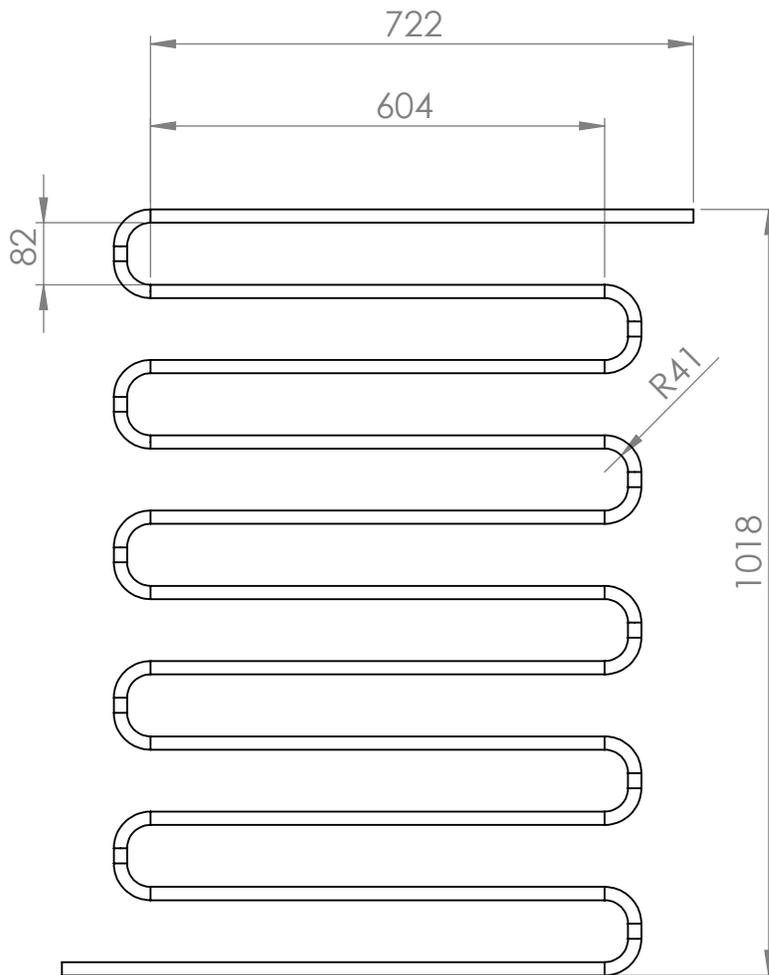


ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:20	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
		Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	
Unidades: mm	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique	NOMBRE	SOPORTE PARA EL VIDRIO	MATERIAL ALUMINIO CANTIDAD: 1

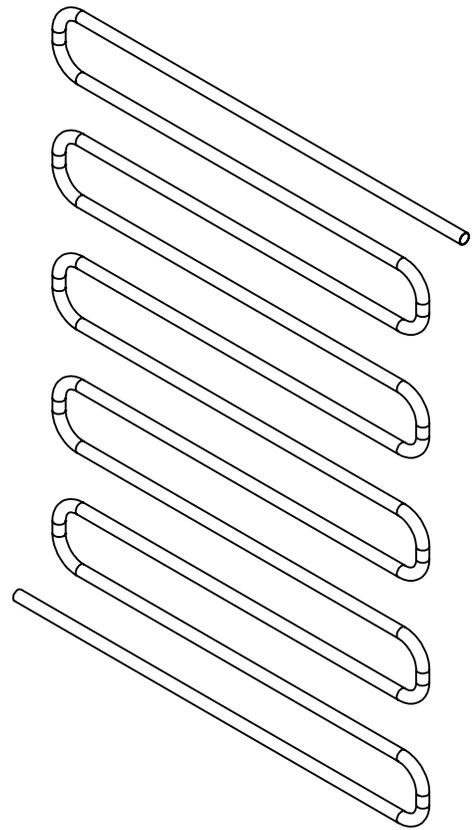


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

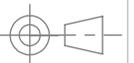
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



VISTA FRONTAL



VISTA ISOMETRICA



ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:10	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
	REVISÓ	Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	SERPENTIN	MATERIAL COBRE
			CANTIDAD: 1

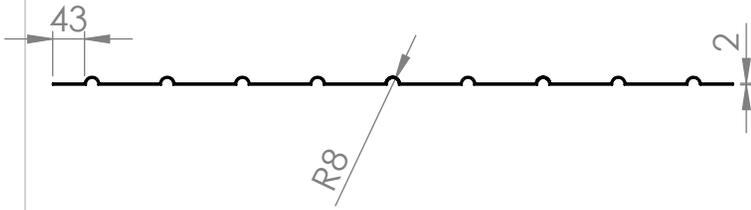


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

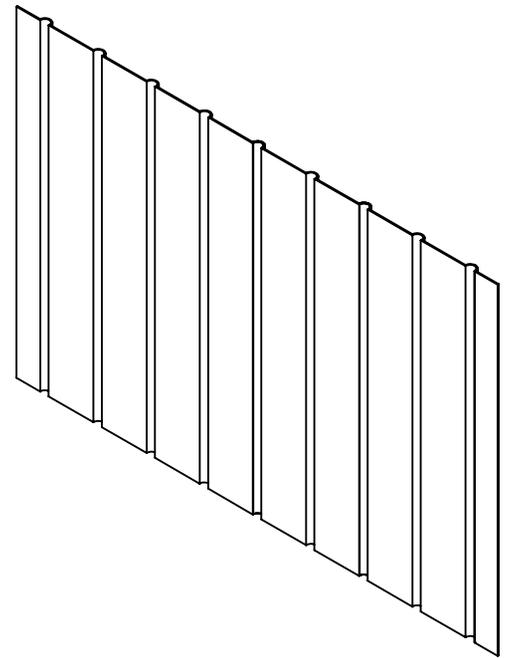
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 4/13

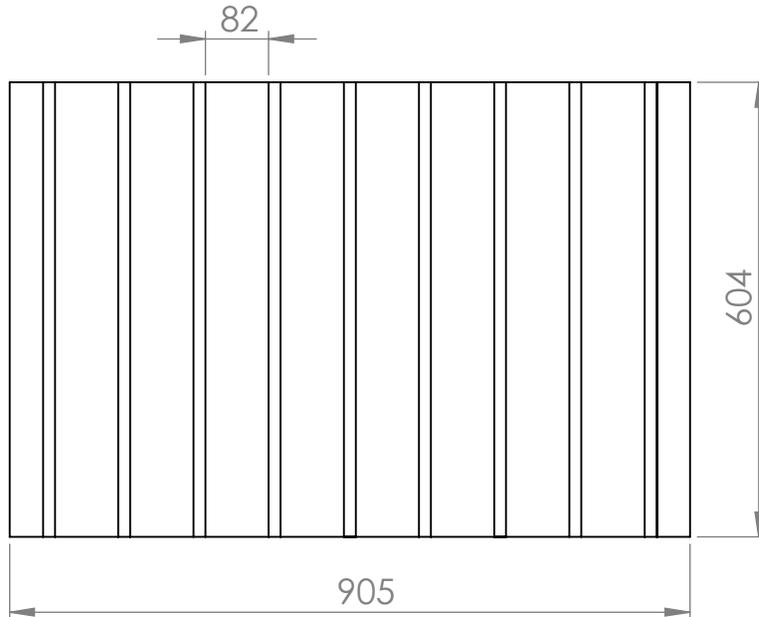
A4



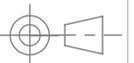
VISTA SUPERIOR



VISTA ISOMETRICA



VISTA FRONTAL



ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:10	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	
	REVISÓ	Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	08705/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	PLACA ABSORBENTE	MATERIAL COBRE
			CANTIDAD: 1

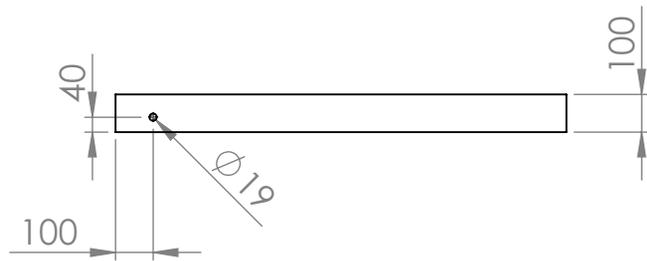


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MECÁNICA

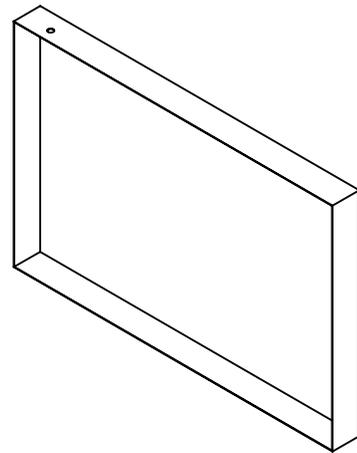
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 5/13

A4



VISTA SUPERIOR



ISOMETRICO



VISTA FRONTAL

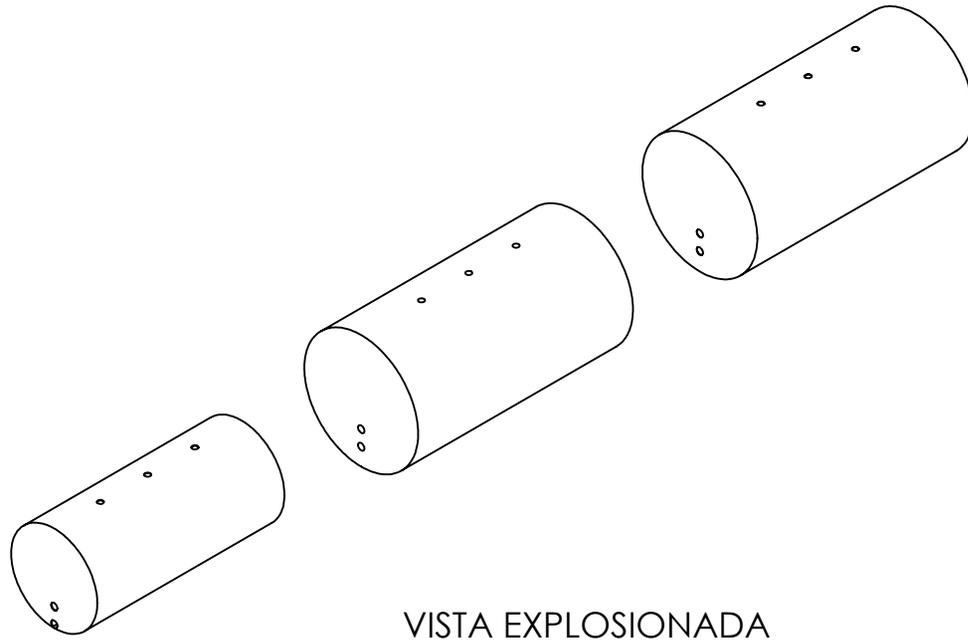


ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:20	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
		Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	CAJA DE SOPORTE METALICA	MATERIAL LAMINA GALVANIZADA CANTIDAD: 1

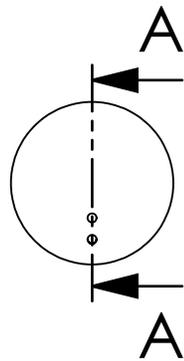


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

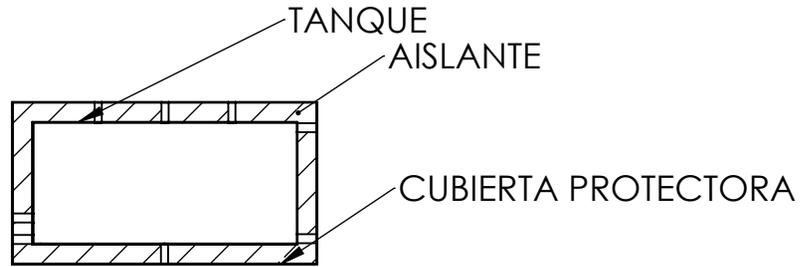
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



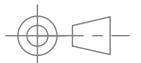
VISTA EXPLOSIONADA



VISTA FRONTAL



SECCIÓN A-A



ID	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	MATERIAL
1	CILINDRO	1	ACERO INOXIDABLE
2	AISLANTE	1	LANA DE VIDRIO
3	CUBIERTA PARA EL CILINDRO	1	LAMINA GALVANIZADA

ESCALA	DISEÑARON:	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel	05/04/2018
		Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	
1:20	REVISÓ	Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN:		
	Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique	NOMBRE	MATERIAL	
Unidades: mm	ENSAMBLE DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO		CANTIDAD: 1

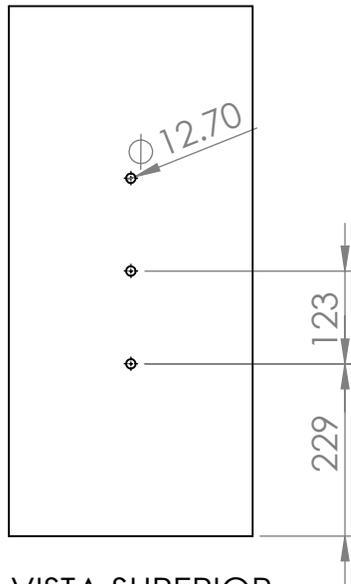


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

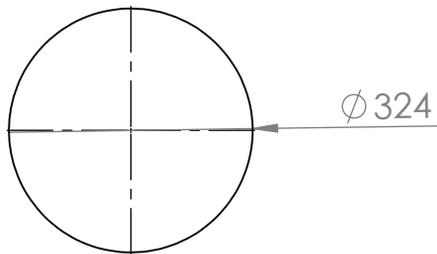
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 7/13

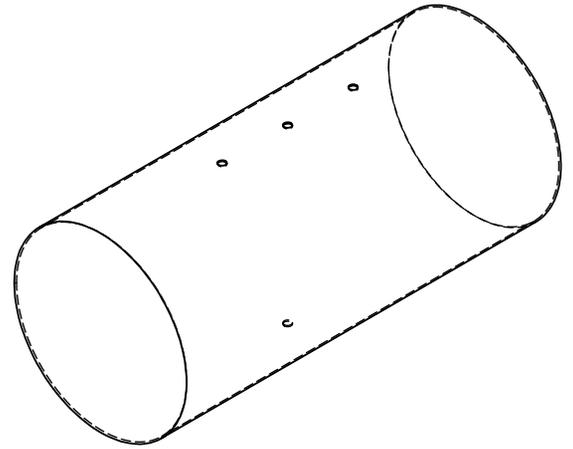
A4



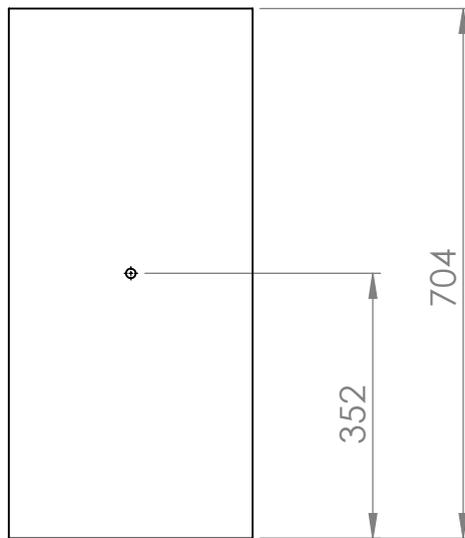
VISTA SUPERIOR



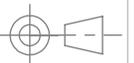
VISTA FRONTAL



VISTA ISOMETRICA



VISTA INFERIOR



ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:10	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	CILINDRO	MATERIAL LAMINA GALVANIZADA CANTIDAD: 1

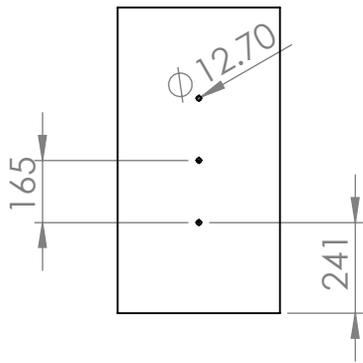


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA
Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA
MECÁNICA

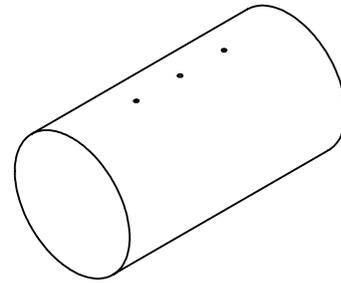
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 8/13

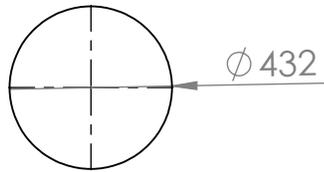
A4



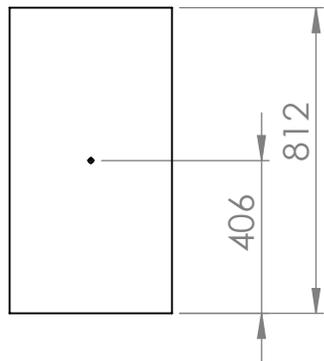
VISTA SUPERIOR



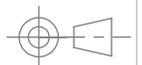
VISTA ISOMETRICA



VISTA FRONTAL



VISTA INFERIOR

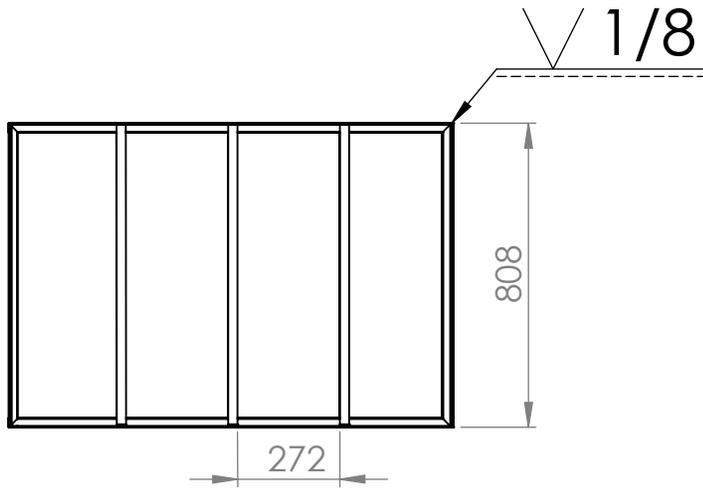


ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:20	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	CUBIERTA METALICA PARA EL CILINDRO	MATERIAL LAMINA GALVANIZADA CANTIDAD: 1

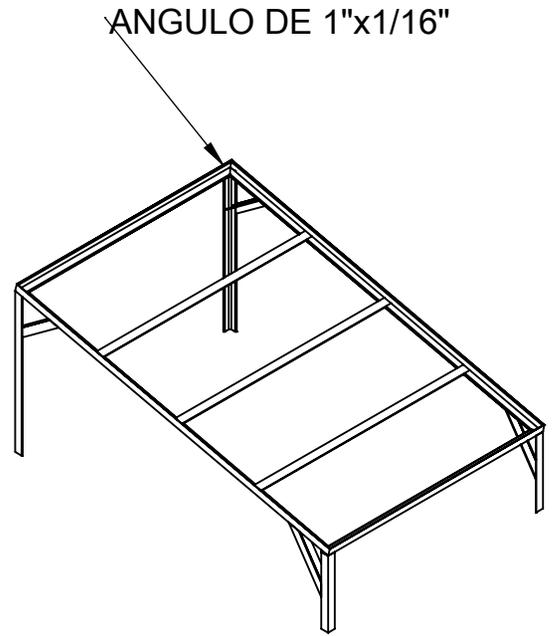


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

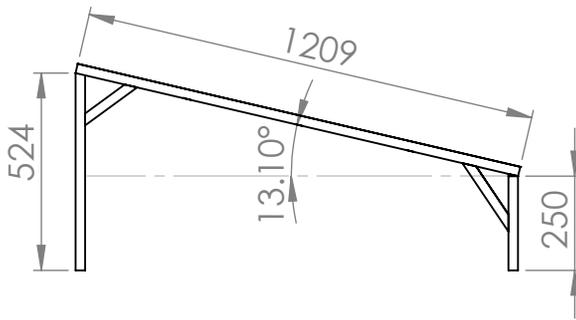
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



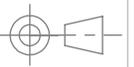
VISTA SUPERIOR



ISOMETRICO



VISTA FRONTAL

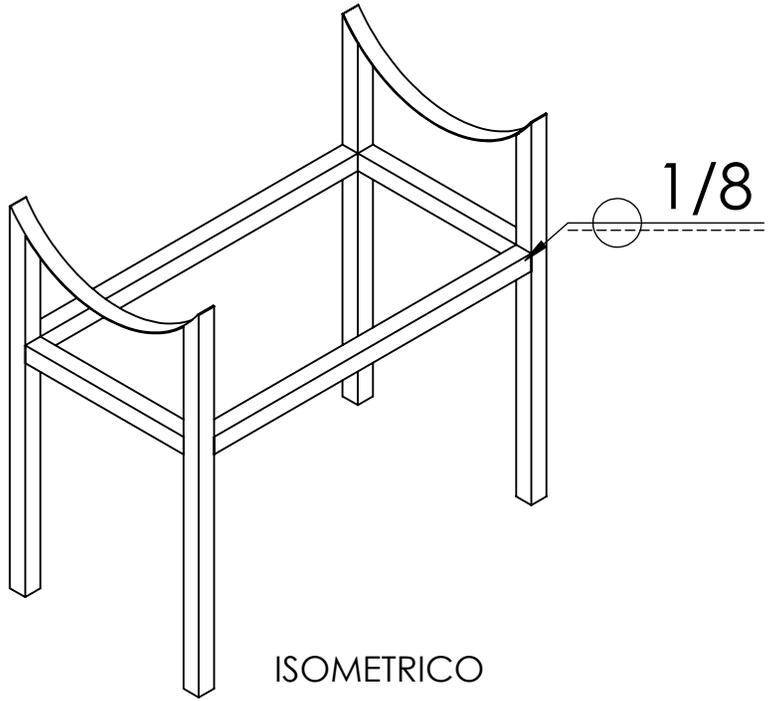


ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:20	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	
	REVISÓ	Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN:		
	Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique	NOMBRE	MATERIAL	
Unidades: mm	SOPORTE PARA EL COLECTOR	AISI 1045	
		CANTIDAD: 1	

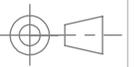
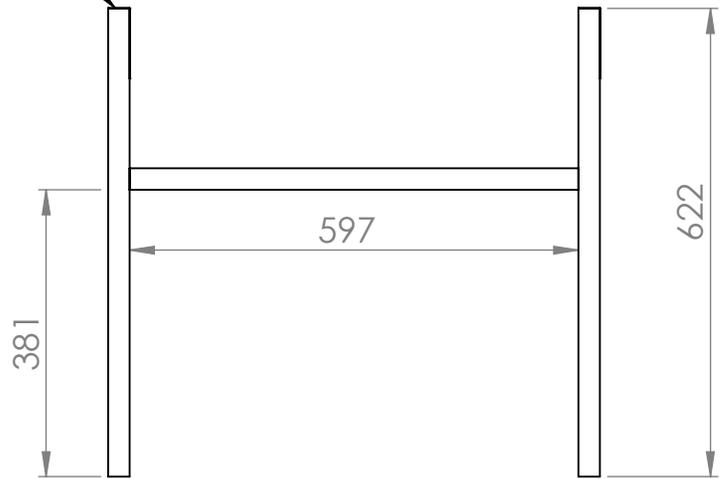
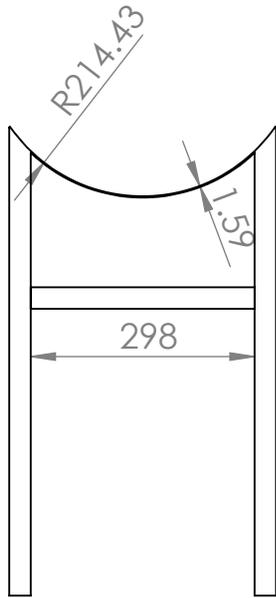


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador



PERFIL CUADRADO DE 1"x1/16"



ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:10	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
		Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	
Unidades: mm	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
	NOMBRE	MATERIAL	
	ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA EL TANQUE	AISI 1045	
		CANTIDAD:	1

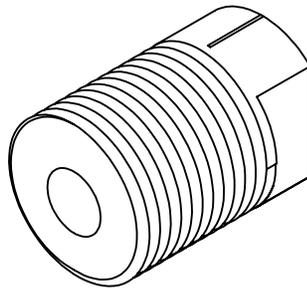


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

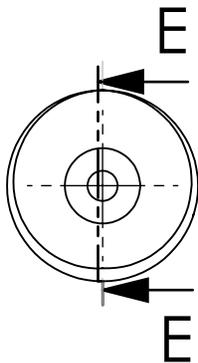
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 11/13

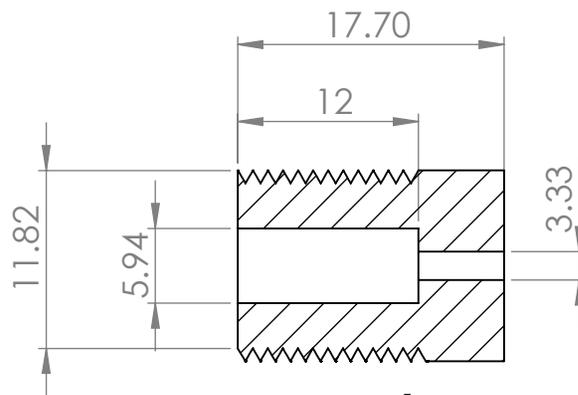
A4



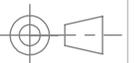
ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



SECCIÓN E-E



ESCALA		Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel	
2:1	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	05/04/2018
		Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	
	REVISÓ	Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	07/05/2018
	TRABAJO DE GRADUACIÓN: Diseño y construcción de un banco de pruebas con sistema de monitoreo para práctica de laboratorio en un colector solar plano		
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE	ACCESORIO PARA SENSOR DE TEMPERATURA	MATERIAL NYLON CANTIDAD: 3

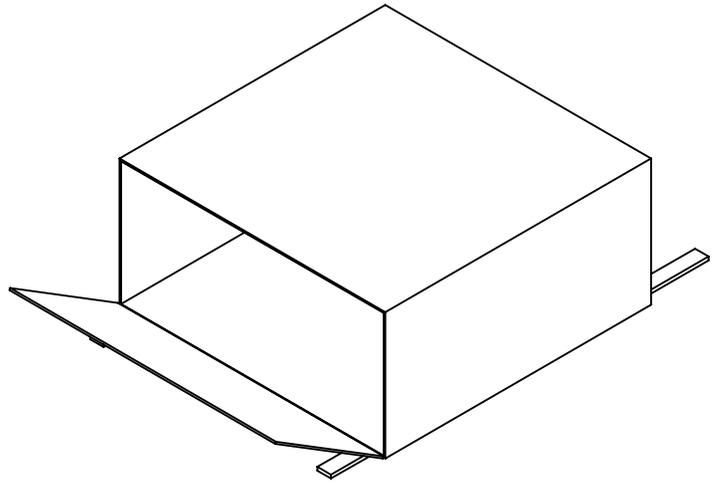


UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Y ARQUITECTURA
 ESCUELA DE INGENIERÍA
 MECÁNICA

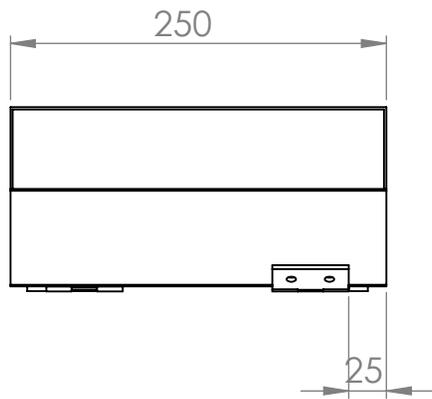
Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
 Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador

HOJA 12/13

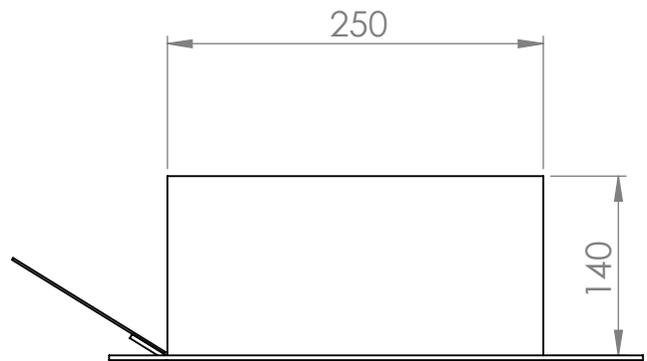
A4



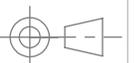
ISOMETRICO



VISTA FRONTAL



VISTA LATERAL



ESCALA	Br. Granados Rivas, Francisco Gabriel		05/04/2018
1:5	DISEÑARON:	Br. Recinos Amaya, Jose Alfredo	
	REVISÓ	Br. Sandoval Quintanilla, Luis Alberto	07/05/2018
		Ing. Gustavo Salmon Torres Rios Lazo	
Cuando no se especifique Unidades: mm	NOMBRE CAJA DE ALMACENAMIENTO DE CABLES		MATERIAL AISI 1010 CANTIDAD: 1



UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA
Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA
MECANICA

Autopista Norte y Final 25 Avenida Norte,
Ciudad Universitaria, San Salvador, El Salvador