



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

**SIMULACIÓN DE REFLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR EN
COLECTORES UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL EN SOLIDWORKS DE LA PLATAFORMA
FLOWSIMULATION**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICO

AUTOR:

JOAQUÍN MATEO BUSTOS BARRAGÁN

Riobamba-Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

**SIMULACIÓN DE REFLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR EN
COLECTORES UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL EN SOLIDWORKS CON LA PLATAFORMA
FLOWSIMULATION**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

FÍSICO

AUTOR: JOAQUÍN MATEO BUSTOS BARRAGÁN

DIRECTOR: Lic. CELSO GUILLERMO RECALDE MORENO

ASESOR: Ing. ROMMEL JOSÉ CALLE

Riobamba-Ecuador

2023

©2023, Joaquín Mateo Bustos Barragán

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Joaquín Mateo Bustos Barragán, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular. El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 1 de marzo de 2023

Joaquín Mateo Bustos Barragán

060457316-2

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FÍSICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **SIMULACIÓN DE REFLECTOR DE RADIACIÓN SOLAR EN COLECTORES UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL EN SOLIDWORKS CON LA PLATAFORMA FLOWSIMULATION**, realizado por el señor: **JOAQUÍN MATEO BUSTOS BARRAGÁN**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Arquímedes Javier Haro Velastegui. PRESIDENTE DEL TRIBUNAL	_____	2023-03-01 _____
Dr. Celso Guillermo Recalde Moreno DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR	_____	2023-03-01 _____
Dr. Richard Willians Pachacama Choca MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	2023-03-01 _____

DEDICATORIA

A mis padres que siempre me han ayudado durante todos estos años, quienes a su vez son importantes en el desarrollo de mi vida personal y académica, y que gracias a ellos puedo ser un profesional.

Joaquín

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por todo el conocimiento impartido a lo largo de estos años. Al Dr. Celso Recalde tutor del presente trabajo de investigación, por su ayuda a lo largo del desarrollo del Trabajo Experimental y al Ing. Rommel Palaguachi, cuyo conocimiento y experiencia hizo posible la elaboración de todo el trabajo

Joaquín

ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
ÍNDICE DE ANEXOS	XVI
RESUMEN.....	XVII
SUMMARY/ABSTRACT	xviii
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

1.1. MARCO TEÓRICO	6
1.1. Calentador solar.....	6
1.1.1. <i>Colectores solares de tubo al vacío</i>	6
1.1.2. <i>Relaciones geométricas de un calentador solar</i>	7
1.2. Variables termodinámicas de los colectores solares de tubos al vacío	7
1.2.1. <i>Modos de transferencia de calor</i>	7
1.2.1.1. <i>Conducción</i>	7
1.2.1.2. <i>Convección</i>	8
1.2.1.3. <i>Radiación</i>	8
1.2.2. <i>Número de Reynolds</i>	8
1.2.3. <i>Energía interna en el interior del tubo</i>	9
1.3. Variables ópticas de los colectores solares de tubos al vacío.....	9
1.3.1. <i>Reflexión</i>	9
1.3.1.1. <i>Reflexión en una superficie plana</i>	9
1.3.1.2. <i>Reflexión en una superficie cilindro-parabólica</i>	10
1.3.1.3. <i>Factor de intercepción</i>	10
1.3.2. <i>Refracción</i>	11
1.3.2.1. <i>Refracción en una superficie plana</i>	11
1.3.2.2. <i>Transmisividad y absorbancia de tubos al vacío</i>	11
1.4. Parámetros y desempeño del calentador solar	15
1.4.1. <i>Coefficiente de convección del viento</i>	15
1.4.2. <i>Coefficiente de transferencia de calor por convección</i>	16
1.4.3. <i>Análisis térmico</i>	16
1.4.3.1. <i>Perdidas de calor</i>	16
1.4.3.2. <i>Coefficiente de pérdida de calor</i>	17
1.4.3.3. <i>Coefficiente de transferencia de calor</i>	17

1.4.3.4.	<i>Rendimiento instantáneo</i>	17
1.4.3.5.	<i>Calor útil</i>	17
1.4.3.6.	<i>Factor de eliminación de calor</i>	18
1.4.3.7.	<i>Factor de flujo del colector</i>	18
1.4.3.8.	<i>Eficiencia del colector</i>	19
1.4.4.	<i>Análisis óptico</i>	19
1.4.4.1.	<i>Radiación absorbida</i>	19
1.4.4.2.	<i>Eficiencia óptica</i>	19
1.4.4.3.	<i>Razón de concentración</i>	20
1.4.5.	<i>Eficiencia del sistema</i>	20
1.4.6.	Eficiencia del colector	20
1.5.	Reflectores	21
1.5.1.	<i>Reflector cilindro-parabólico</i>	21
1.6.	Dirección de los haces de radiación	22
1.6.1.	<i>Latitud</i>	23
1.6.2.	<i>Declinación</i>	23
1.6.3.	<i>Pendiente</i>	23
1.6.4.	<i>Ángulo azimutal superficial</i>	23
1.6.5.	<i>Ángulo horario</i>	23
1.6.6.	<i>Ángulo de incidencia</i>	24
1.6.7.	<i>Ángulo de zenit</i>	24
1.6.8.	<i>Ángulo de altitud solar</i>	24
1.6.9.	<i>Ángulo solar azimutal</i>	24
1.7.	Radiación solar directa sobre superficies inclinadas	25
1.8.	Radiación por hora	26
1.8.1.	<i>Componentes directa y difusa de la radiación por hora</i>	26
1.9.	Días sin sombra	27
1.10.	Modelos de cielos	27
1.10.1.	<i>Cielo isotrópico</i>	27
1.10.1.1.	<i>Modelo isotrópico difuso</i>	27
1.10.2.	<i>Cielo anisotrópico</i>	28
1.10.2.1.	<i>Modelo de Hay y Davies</i>	28
1.10.2.2.	<i>Modelo HDKR</i>	29
1.11.	Bases legales	29

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO	30
2.1. Diseño de la investigación	30
2.1.1. Tipo de investigación	30
2.1.1.1. <i>Documental</i>	30
2.1.1.2. <i>Bibliográfica</i>	30
2.1.1.3. <i>Explicativo</i>	30
2.1.1.4. <i>Transversal</i>	30
2.1.1.5. <i>Cuantitativo</i>	30
2.1.2 Método de investigación	31
2.1.2.1. <i>Experimental</i>	31
2.1.2.3. <i>Instrumentos</i>	31
2.1.3. Procedimientos metodológicos para el desarrollo de la investigación	32
2.1.3.1. <i>Unidad de análisis</i>	32
2.1.3.2. <i>Población y muestra</i>	32
2.1.3.3. <i>Localización</i>	32
2.1.4. Identificación de variables	33
2.1.5. Planteamiento de la hipótesis	33
2.2. Equipos y software	34
2.2.1. Equipos empleados para la toma de datos	34
2.2.1.1. <i>Estación Meteorológica ESPOCH</i>	34
2.2.2. Equipos y software empleados para la manipulación de datos	38
2.2.3. Especificaciones técnicas	38
2.3. Diseño	39
2.3.1. Diseño estructural	39
2.3.1.1. <i>Diseño de tubos de vacío</i>	39
2.3.1.2. <i>Diseño de contenedor</i>	43
2.3.1.3. <i>Diseño de reflector cilindro-parabólico</i>	48
2.3.1.4. <i>Ensamblaje</i>	49
2.3.1.5. <i>Características físicas de los materiales</i>	51
2.3.2. Razón de concentración	51
2.3.3. Cálculo de la radiación total incidente en los tubos inclinados	52
2.3.3.1. <i>5 de enero del 2021</i>	52
2.3.3.2. <i>27 de septiembre del 2021</i>	61
2.3.4. Cálculo del factor de intercepción	65
2.3.5. Cálculo de los ángulos de incidencia	66
2.3.6. Pre-simulación sin reflector	66

2.3.6.1. <i>Introducción de datos en el simulador</i>	67
2.3.6.2. <i>Ángulos de inclinación y alturas del tanque</i>	67
2.3.6.3. <i>Toma de datos del tanque y boca del tubo</i>	69
2.3.6.4. <i>Toma de datos del tubo, del cobertor y absorbedor</i>	69
2.3.7. <i>Pre-simulación con reflector</i>	70
2.4. Simulación	71
2.5. Técnicas para la recolección de datos	71

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	73
3.1. Análisis de resultados	73
3.1.1. <i>Análisis de resultados térmicos del calentador solar sin reflector</i>	73
3.1.1.1. <i>Análisis de resultados obtenidos el 05/01/2021</i>	73
3.1.1.2. <i>Resultados obtenidos el 27/09/2021</i>	78
3.1.1.3. <i>Impacto de la altura en el efecto termosifón</i>	92
3.1.2. <i>Resultados térmicos y ópticos del calentador solar con reflector</i>	95
3.1.2.2. <i>Impacto de la curvatura del reflector</i>	98
3.1.3. <i>Análisis del desempeño del colector solar</i>	100
3.1.3.1. <i>Coefficiente de pérdida</i>	100
3.1.3.2. <i>Calor útil y eficiencia del colector</i>	102
3.1.3.3. <i>Radiación absorbida</i>	103

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2: Latitud y altitud del lugar de estudio	33
Tabla 2-2: Datos de irradiancia global del 5 de enero del 2021.....	34
Tabla 3-2: Datos de irradiancia global del 7 de enero del 2021.....	35
Tabla 4-2: Datos de irradiancia global del 27 de septiembre del 2022	36
Tabla 5-2: Datos de irradiancia global del 14 de noviembre del 2021.	36
Tabla 6-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 05/01/2021.....	37
Tabla 7-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 07/01/2021.....	37
Tabla 8-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 27/09/2021.....	38
Tabla 9-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 14/11/2021.....	38
Tabla 10-2: Equipos y softwares empleados para la manipulación de datos	38
Tabla 11-2: Características físicas de los materiales de los tubos de vacío.....	51
Tabla 12-2: Ángulos horarios iniciales y finales en función de los periodos de tiempo.....	52
Tabla 13-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 05-01-2021.....	55
Tabla 14-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 05-01-2021.....	56
Tabla 15-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 05-01-2021.....	57
Tabla 16-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 05-01-2021.....	58
Tabla 17-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 07-01-2021.....	59
Tabla 18-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 7-01-2021.....	60
Tabla 19-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 7-01-2021.....	61
Tabla 20-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 7-01-2021.....	61
Tabla 21-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 27-09-2021.....	62
Tabla 22-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 27-09-2021.....	63
Tabla 23-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 14-11-2021.....	63
Tabla 24-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 14-11-2021.....	64
Tabla 25-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 14-11-2021.....	65
Tabla 26-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 14-11-2021.....	65
Tabla 27-2: Configuración de ángulos de inclinación y alturas del tanque.....	68
Tabla 28-2: Parámetros y valores de experimentación para el reflector.....	71
Tabla 1-3: Valores del tubo de vacío 05/01/2021.....	77
Tabla 2-3: Valores obtenidos del tanque el 05/01/2021.....	78
Tabla 3-3: Valores del tubo de vacío el 27/09/2021.....	80
Tabla 4-3: Valores del tanque el 27/09/2021.....	81
Tabla 5-3: Valores del tubo de vacío el 7/01/2021.....	85

Tabla 6-3: Valores del tanque el 7/01/2021.	86
Tabla 7-3: Valores del tubo de vacío el 14/11/2021.	90
Tabla 8-3: Valores del tanque el 14/11/2021.	91
Tabla 9-3: Valores del tubo el 14/11/2021.....	93
Tabla 10-3: Valores del tanque el 14/11/2021.	94
Tabla 11-3: Datos obtenidos del tubo de vacío con varias inclinaciones del reflector.	96
Tabla 12-3: Datos obtenidos del tubo de vacío con un reflector de varios arcos el 05/01/2021	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1:	Esquema del calentador solar.....	6
Ilustración 1- 2:	Relaciones geométricas del calentador solar.	7
Ilustración 1-3:	Reflexión en una superficie plana.....	10
Ilustración 1-4:	Refracción en una superficie plana.....	11
Ilustración 1-5:	Corte transversal del tubo al vacío.....	12
Ilustración 1-6:	Valores de transmitancia en función del ángulo de incidencia.	13
Ilustración 1-7:	Producto transmitancia-absorbancia entre un ángulo y la normal vs el ángulo	14
Ilustración 1-8:	Absorbancia y absorbancia normal vs ángulo de incidencia.	15
Ilustración 1-9:	Correcto posicionamiento del reflector cilindro-parabólico	21
Ilustración 1-10:	Razón de concentración geométrica, ángulo de aceptación β y ángulo de apertura ψ	22
Ilustración 1-11:	Ángulo del zenit, pendiente, ángulo azimutal superficial y ángulo solar azimutal para superficie inclinada.....	22
Ilustración 1-13:	Ángulo solar azimutal visto en el plano horizontal.....	25
Ilustración 1-2:	Posición geográfica del lugar de realización de la investigación.....	33
Ilustración 2-2:	Diseño del extremo derecho de los tubos de vacío	40
Ilustración 3-2:	Radio de las curvas internas en el extremo izquierdo del dibujo.....	40
Ilustración 4-2:	Distancia del centro a la línea que conecta los 4 puntos del extremo derecho	41
Ilustración 5-2:	Dibujo del tubo de vacío completo	41
Ilustración 6-2:	Tubos de vacío	42
Ilustración 7-2:	Radio del tubo externo	42
Ilustración 8-2:	Radio del tubo interno.....	43
Ilustración 9-2:	Croquis de la cisterna grande.....	44
Ilustración 10-2:	Chapa cilíndrica grande.	44
Ilustración 11-2:	Cilindro grande desplegado.	45
Ilustración 12-2:	Contenedor con círculos extruidos.....	45
Ilustración 13-2:	Dibujo de la cisterna pequeña.	46
Ilustración 14-2:	Cisterna pequeña con círculos extruidos.....	46
Ilustración 15-2:	Cisterna pequeña terminada.	47
Ilustración 16-2:	Dibujo de la brida base del cobertor.	47
Ilustración 17-2:	Profundidad de la brida base del cobertor.....	48

Ilustración 18-2: Cobertor de la cisterna finalizado.	48
Ilustración 19-2: Bosquejo de la parábola.	49
Ilustración 20-2: Reflector cilindro-parabólico.	49
Ilustración 21-2: Contenedor ensamblado con cobertores.	50
Ilustración 22-2: Ensamblaje de tubos en el contenedor.	50
Ilustración 23-2: Calentador solar construido.	51
Ilustración 24-2: Ángulos de incidencia el 5 de enero del 2021.	66
Ilustración 25-2: Configuraciones generales del proyecto e introducción de datos.	67
Ilustración 26-2: Tubos inclinados a 10° con nueva altura.	68
Ilustración 27-2: Puntos de análisis en el tanque y la boca del tubo	69
Ilustración 28-2: Puntos de análisis del tubo de vacío.	70
Ilustración 29-2: Reflector solar de cara al oeste.	70
Ilustración 1-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 5/01/2021.	74
Ilustración 2-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 5/01/2021.	74
Ilustración 3-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 5/01/2021.	74
Ilustración 4-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 5/01/2021.	75
Ilustración 5-3: Velocidades de salida del agua para distintos ángulos de inclinación el 5/01/2021.	76
Ilustración 6-3: Temperaturas del agua vs con 10° de inclinación el 27/09/2021.	78
Ilustración 7-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 27/09/2021.	79
Ilustración 8-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 27/09/2021.	80
Ilustración 9-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 07/01/2021.	81
Ilustración 10-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 07/01/2021.	82
Ilustración 11-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 07/01/2021.	82
Ilustración 12-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 07/01/2021.	83
Ilustración 13-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 07/01/2021.	84
Ilustración 14-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 14/11/2021.	86
Ilustración 15-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 14/11/2021.	87
Ilustración 16-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 14/11/2021.	87
Ilustración 17-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 14/11/2021.	88
Ilustración 18-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 14/11/2021.	89
Ilustración 19-3: Temperaturas del agua con 10° de inclinación y diferentes alturas el 14/11/2021.	92
Ilustración 20-3: Velocidades de salida del agua para tubos a 10° y mayor altura el 14/11/2021.	93

Ilustración 21-3: Temperaturas del agua con 10° de inclinación y diferentes alturas el 05/01/2021.....	94
Ilustración 22-3: Velocidades de salida del agua para tubos a 10° y mayor altura el 05/01/2021.	95
Ilustración 23-3: Temperatura del agua en el centro del tubo para varias inclinaciones del reflector.	97
Ilustración 24-3: Temperatura del agua en el fondo del tubo para varias inclinaciones del reflector.	97
Ilustración 25-3: Temperatura en el centro del tubo para varios valores del arco del reflector.	99
Ilustración 26-3: Temperatura en el fondo del tubo para varios valores del arco del reflector.	99

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EL 5/01/2021

ANEXO B: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 5/01/2021

ANEXO C: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 45° EL 27/09/2021.

ANEXO D: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EN 0.9 Y 1.8 H EL 14/11/2021.

ANEXO E: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 14/11/2021

ANEXO F: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EL 07/01/2021

ANEXO G: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 07/01/2021

ANEXO H: TEMPERATURAS CON UN REFLECTOR A VARIAS INCLINACIONES

ANEXO I: TEMPERATURAS CON UN REFLECTOR CON DIFERENTES ARCOS.

ANEXO J: TEMPERATURAS DE UN COLECTOR CON REFLECTOR EL 05/01/2021

ANEXO K: TEMPERATURAS CON TUBOS A 10° Y 28 CM DE ALTURA EL 14/11/2021.

ANEXO L: DATOS DE ENTRADA Y DOMINIO COMPUTACIONAL.

ANEXO M: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, AMBIENTALES Y GRAVITACIONALES.

ANEXO N: CONDICIONES INICIALES.

RESUMEN

El objetivo de este Proyecto de Integración Curricular fue encontrar la forma e inclinación adecuada de un reflector solar para latitudes bajas, tal como la ciudad de Riobamba. Mediante la plataforma SolidWorks, se modificó el arco del reflector mediante 3 ángulos diferentes que variaban la forma del dispositivo. Se empleó 4 ángulos de inclinación del reflector diferentes. La simulación del calentador solar con reflector se realizó entre las 9 a.m. y 10 a.m. de un día del mes de enero para obtener diferencias en la distribución de temperatura del agua en los tubos. En el análisis de los tubos solares sin reflector, se empleó cuatro ángulos de inclinación y se insertó en otro colector solar semejante las uniones de los tubos próximas al fondo del tanque. Se tomó datos de radiación relativos a un día cualquiera del mes de enero y se analizó el desempeño del colector solar. Se obtuvo mejores desempeños del colector solar para tubos colocados a ángulos bajos y con uniones cercanas al tanque. En cuanto a los resultados del reflector, se registraron mayores valores de temperatura en el agua para formas cóncavas y con ángulos de inclinación de 25°. El colector solar presentó un desempeño aceptable en el análisis óptico y térmico. La latitud influyó en la dirección de los rayos. En el Ecuador la incidencia es diferente a la de otras zonas, por lo que la configuración de los tubos y reflectores se debió cambiar. El efecto termosifón aumentó debido a que los rayos al mediodía son casi perpendiculares, y las uniones en el fondo del tanque incrementaron la presión hidrodinámica. El reflector mejoró su desempeño con la forma mencionada debido a la dirección de los rayos en esta zona. El análisis térmico y óptico se puede realizar despreciando las pérdidas por convección.

Palabras clave: <COLECTOR SOLAR>, <EFECTO TERMOSIFÓN>, <TUBOS DE VACÍO>, <REFLECTORES SOLARES>, <LATITUD>, <ÁNGULO DE INCLINACIÓN>.

1065-DBRA-UPT-2023

ABSTRACT

The objective of this Curricular Integration Project was to find the appropriate shape and inclination of a solar reflector for low latitudes, such as the city of Riobamba. Using the SolidWorks platform, the arc of the reflector was modified using 3 different angles that varied the shape of the device. Four different reflector tilt angles were used. The simulation of the solar heater with reflector was carried out between 9 a.m. and 10 a.m. on a day in January to obtain differences in the temperature distribution of the water in the tubes. In the analysis of the solar tubes without reflector, four angles of inclination were used and inserted into another solar collector like the tube joints near the bottom of the tank. Radiation data was taken for any given day in January and the performance of the solar collector was analysed. Better performance of the solar collector was obtained for tubes placed at low angles and with joints close to the tank. As for the reflector results, higher water temperature values were recorded for concave shapes and with inclination angles of 25°. The solar collector performed acceptably in the optical and thermal analysis. Latitude influenced the direction of the rays. At the equator the incidence is different from other areas, so the configuration of the tubes and reflectors had to be changed. The thermosyphon effect increased because the rays at noon are almost perpendicular, and the junctions at the bottom of the tank increased the hydrodynamic pressure. The reflector improved its performance with the mentioned shape due to the direction of the rays in this area. Thermal and optical analysis can be performed neglecting convective losses.

Keywords: <SOLAR COLLECTOR>, <THERMOSYPHON EFFECT>, <VACUUM PIPES>, <SOLAR REFLECTORS>, <LATITUDE>, <TILTING ANGLE>.

Dra. Carmita Eulalia Rojas Castro
060289046-9

1065-DBRA-UPT-2023

INTRODUCCIÓN

En el año 1767, la idea detrás de un colector solar era emplear el efecto invernadero para aprovechar la energía proveniente del sol. Horace-Benedict observó que el sol generaba una mayor temperatura si pasaba a través de un vidrio. De este descubrimiento, fabricó una caja rectangular hecha de pino con una superficie oscura en el fondo y tres paneles de vidrio en la parte superior del artefacto, fabricando el primer colector solar en la historia (Battocchio y otros et al., 2021, p.1). No es claro de donde salió el concepto de colectores solares de tubo de vacío pese a que Emmet guardó una patente en Estados Unidos con algunos tipos de colectores solares tubulares en 1911. En tiempos más recientes, Speyer resaltó algunas ideas acerca del uso de tubos de vacío para la recolección de energía solar. Los trabajos en los inicios de 1980 en la universidad de Beijing desarrollaron algo de la tecnología moderna que todavía está en producción a día de hoy para este tipo de colectores (Yan, 2015, p. 340). Los colectores de tubo de vacío son máquinas de gran eficiencia para la producción de energía útil empleando la energía del sol. Los reflectores son instrumentos importantes en este tipo de colectores solares. Esto se debe a que los rayos provenientes del sol, inciden de forma no uniforme en los tubos, desperdiciando la energía proveniente de ellos. Un reflector solar, es un espejo que se encarga de reflejar los rayos en los tubos para aumentar la temperatura del agua dentro de ellos. La geometría del reflector es un factor clave a la hora de fabricar un colector solar de tubo de vacío. En la presente investigación, se evaluó el desempeño de varios diseños, hasta conseguir la forma más adecuada. Tomando en cuenta que se realizó el estudio en la ciudad de Riobamba, se tomó en cuenta los efectos de la latitud y la radiación solar relativa a esta zona. Se modeló el colector solar y el reflector con un software de diseño. Las simulaciones efectuadas sin reflector, entre 11:00 a.m. y 1:00 p.m., nos permitieron observar el efecto del ángulo de inclinación en el efecto termosifón en latitudes bajas. Las simulaciones realizadas con reflector solar entre 9:00 a.m. y 10:00 a.m. fueron efectuadas variando el arco y el ángulo de inclinación del reflector. Con los datos obtenidos, se calculó el calor útil y las pérdidas de calor colector entre las 9:00 a.m. y 10:00 a.m.

ANTECEDENTES

En el año 2015, Bellos, E; et al postularon un artículo llamado “Investigación de la eficiencia óptica y térmica de un colector cilindro-parabólico”. En este estudio, se realizó una simulación de un colector cilindro-parabólico en SolidWorks, en donde se encontró la eficiencia del colector para niveles altos de temperatura en función de los bajos coeficientes de pérdidas de calor, para lo cual se tomó en cuenta los distintos ángulos de incidencia. Se determinó que a partir de 70° , la energía solar que llega al absorbedor es insuficiente para producir energía útil. Otro parámetro investigado fue el flujo de distribución de calor solar del absorbedor, lo cual nos indica la distribución de temperatura en el mismo. Por último, el artículo desarrolla una ecuación para la eficiencia óptica y térmica y una ecuación óptica modificadora que nos permite conocer el desempeño de un colector cilíndrico-parabólico cualquiera bajo diferentes condiciones de operación. En este mismo año, Recalde, C; et al. realizaron una investigación titulada “Influencia de los Ángulos de Inclinación de los Tubos Solares Evacuados sobre la Temperatura del Agua”, en donde se analiza el efecto de los ángulos de inclinación de los tubos de vacío en el efecto termosifón. Para este estudio se tomó en cuenta la latitud de la ciudad de Riobamba. Korres, D; et al. en 2016, realizaron una investigación titulada “Investigación óptica y térmica de un tubo colector de vacío tipo u con un mini componente concentrador parabólico y un absorbedor plano”. En este trabajo, se simuló un tubo colector de vacío tipo U con un mini compuesto concentrador parabólico y un absorbedor plano a través del software SolidWorks. Se calculó el desempeño térmico del colector y los coeficientes de pérdidas de calor para varias condiciones de operación. Por último, se determinó la eficiencia óptica para diferentes ángulos incidentes de radiación solar. En el año 2017, Bellos, E; et al. un artículo científico titulado “Geometría óptima de un colector cilindro-parabólico con criterios ópticos y térmicos”. El objetivo de esta investigación fue investigar el impacto de las dimensiones geométricas de un colector parabólico en la eficiencia óptica, energética y exergética. Se emplea la herramienta SolidWorks para emular el modelo comercial parabólico LS-3 en condiciones estables, en donde varía el ancho del reflector y el diámetro del receptor en un número de pruebas. El rendimiento térmico y exergético son calculados para cada una de estas con ilustraciones. De esto último, la incógnita de la investigación fue: ¿cuál será la geometría óptima del reflector que nos de la mayor eficiencia óptica, energética y exergética? Esta investigación surge debido a la necesidad de optimizar los parámetros de ancho del colector y diámetro del receptor, para obtener un colector parabólico que aproveche de forma eficiente la energía solar. En cuanto a los resultados obtenidos de la optimización exergética y térmica, el estudio demostró que la eficiencia térmica es maximizada para valores específicos del diámetro del receptor para cualquier valor dado del ancho de un colector. Para estos valores del diámetro, se obtuvo también, que la eficiencia exergética es maximizada. En 2017, una investigación titulada “Rendimiento térmico en un tubo de vacío

coaxial de flujo directo” llevada a cabo por Bellos, E; et al. tuvo como objetivo determinar la curva de eficiencia a fin de determinar las pérdidas de eficiencia por diferentes condiciones de operación. El valor medio del coeficiente de pérdidas es influenciado por la temperatura dado que las temperaturas altas conllevan a mayores pérdidas de radiación. Esta investigación calculo la distribución de temperatura en el absorbedor y dentro del tubo gracias a SolidWorks. Para el modelado, se eligió un tubo y un absorbedor de tal forma que reduzcan las pérdidas de calor, y la radiación se eligió perpendicular al plano del absorbedor. Uno de los resultados obtenidos es que la eficiencia no se reduce tanto por el aumento de las entradas de temperatura. En cambio, el coeficiente de pérdidas térmicas cambia mucho con las entradas de temperaturas y esto conlleva a perdidas grandes cuando la entrada de temperatura aumenta. En 2018, Bellos, E; et al. publicaron otro artículo llamado “Análisis térmico y óptico de un reflector lineal de Fresnel operando con petróleo térmico, sal fundida y sodio líquido” en donde se realiza un análisis térmico y óptico mediante SolidWorks. Este trabajo, maximiza el desempeño exergético para una temperatura específica. Otro resultado importante, es el hecho de que evalúa que fluido optimiza el colector tomando en cuenta el coeficiente de transferencia de calor de cada uno de las sustancias llevadas a prueba. En el año 2013, Setiawan y Dewi analizaron el impacto de dos materiales de reflectores planos para diferentes ángulos de inclinación en el rendimiento de un panel solar. El artículo se titula “Impacto de dos tipos de materiales de reflectores solares planos en las características del panel solar. En esta investigación realizada en mayo del 2013, se descubre que para latitudes de -6.36 el ángulo de inclinación apropiado para un reflector plano es de 15° . En el año 2018, Siahaan y Siswono, publicaron un artículo titulado “Análisis del efecto del reflector (espejo plano, espejo convexo, espejo cóncavo) en un panel solar”. En el mismo, se busca determinar qué forma adecuada de reflector aumenta el rendimiento de un panel solar. La experimentación en el artículo se realizó entre 11:00 a.m. y 14:00 p.m. Los resultados obtenidos muestran que es mejor colocar un reflector cóncavo. Por último, en el año 2020, Yedilkhan, A; et al. publicaron un artículo titulado “Justificación matemática de los principales parámetros del efecto termosifón para sistemas de calentamiento solar”. Este estudio muestra resultados en donde la presión hidrodinámica del calentador aumenta casi linealmente en función de la altura de los tubos conectados al tanque

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para calentar el agua en el tubo a temperaturas más altas, es importante considerar la inclinación de los tubos, la geometría e inclinación del reflector. Los calentadores solares se fabrican considerando altitudes lejanas al ecuador. Emplear reflectores solares o inclinar los tubos con disposiciones propias de latitudes altas implica no aprovechar la energía solar recibida. Para latitudes altas, los tubos se inclinan a distintos ángulos a lo largo del año de tal forma que los rayos incidan perpendicularmente en los tubos. Para zonas cercanas al ecuador, los rayos inciden en diferentes direcciones al mediodía, requiriendo disponer de otra forma los tubos y considerar otras geometrías y ángulos de inclinación para los concentradores.

JUSTIFICACIÓN

Justificación teórica

La importancia de este Proyecto de Integración Curricular reside en que existen pocas investigaciones sobre el ángulo de inclinación de los tubos, conexión respecto al tanque, forma e inclinación del reflector apropiados para zonas de baja latitud.

Justificación metodológica

Es importante emplear un programa de diseño y simulación ya que un software avanzado nos permite fabricar, editar parámetros y dimensiones, analizar el comportamiento del colector solar de tubo de vacío de forma virtual sin necesidad de realizar pruebas reales con riesgos de fallo y, por ende, pérdidas económicas. Los cálculos de calor útil nos permitirán conocer con precisión el desempeño del colector solar.

Justificación práctica

El gran problema a la hora de elegir el reflector solar apropiado, es determinar la geometría que se desea. Una forma apropiada del reflector implica aprovechar mejor la energía solar para el calentamiento de agua en los tubos, lo cual es importante para un uso doméstico. En la actualidad, para los colectores solares, se emplean reflectores fabricados en latitudes altas. Para conocer el modelo adecuado para zonas de baja altitud se debe simular su comportamiento en dichas condiciones. Este estudio nos brinda las herramientas necesarias para descubrir qué tipo de reflector y conexión de tubos son las apropiadas para un colector solar de tubo de vacío para bajas latitudes.

OBJETIVOS

General

- Modelar un reflector solar para latitudes bajas utilizando dinámica de fluidos computacional mediante el uso principal de un software de simulación.

Específicos

- Determinar el ángulo de inclinación y ángulo de curvatura apropiado para un reflector solar en latitudes bajas.
- Analizar el impacto del ángulo de inclinación de los tubos de vacío y su altura respecto al tanque en el efecto termosifón.
- Determinar el calor útil obtenido por el calentador solar en una hora determinada.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

Antes de empezar la simulación del reflector y el colector solar, es muy importante conocer algunos principios teóricos que se producen debido a la interacción de los rayos solares con nuestro dispositivo.

1.1. Calentador solar

El calentador solar es un dispositivo cuya función consiste en coleccionar radiación solar directa y difusa para un uso tanto doméstico como industrial (García y otros et al., 2020, p.138).

1.1.1. Colectores solares de tubo al vacío

Los colectores solares de tubos al vacío son una fila de tubos paralelos generalmente de vidrio transparente. Cada uno de estos tubos contiene dentro un tubo absorbedor cuya recubierta tiene una pintura dada. El espacio entre los dos tubos es vaciado de tal forma que no contenga aire (Usón y Bielsa, 2011, p.144). Este tipo de colectores en calentadores solares de agua están relacionados con el aumento de la temperatura del colector respecto a la temperatura ambiente dividido entre la irradiancia solar incidente (García y otros et al., 2020, p.138).

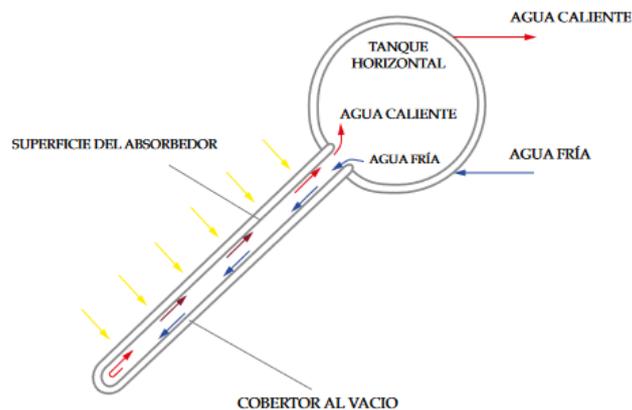


Ilustración 1-1: Esquema del calentador solar.

Fuente: García, V.; Márquez, C.; Recalde, C. 2020

Estos tubos presentan un efecto termosifón o empuje de Arquímedes, en donde el agua de mayor temperatura que colinda con las paredes del tubo interno calentado, sube hasta el reservorio, y el agua fría del centro del tubo desciende debido a la diferencia entre sus densidades (Zobaa y Bansal, 2011, p.280).

1.1.2. Relaciones geométricas de un calentador solar

Las relaciones geométricas del calentador van a estar dadas principalmente por el ángulo de inclinación β y la altura del tanque h , lo cual se esquematiza en la Ilustración 1-2. Donde R es el radio del tanque y x es el segmento desde el centro del tanque hasta los tubos.

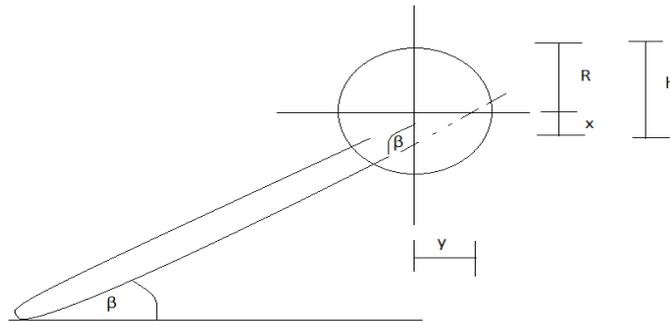


Ilustración 1- 2: Relaciones geométricas del calentador solar.

Realizador por: Bustos, J., 2023.

1.2. Variables termodinámicas de los colectores solares de tubos al vacío

Debido a la interacción solar con el calentador, se experimentan efectos termodinámicos los cuales son importantes para la descripción de su comportamiento y eficiencia

1.2.1. Modos de transferencia de calor

1.2.1.1. Conducción

La conducción es una variable termodinámica la cual depende de la capacidad térmica de los materiales. Esta, es la transferencia de energía de partículas más energéticas de una sustancia hacia otras menos energéticas como consecuencia de su interacción mutua (Rathakrishnan., 2012, p.19).

1.2.1.2. Convección

Es el principal modo por el cual el calor es distribuido a través del agua. El calor se transmite por convección cuando este es transportado de un lugar a otro a través de partículas en movimiento en la materia (Cooley., 1880, p.134). En los colectores solares de tubos al vacío, la transferencia de energía se da por el movimiento del fluido. Cuando fluye el fluido frío junto a un cuerpo caliente la conducción de energía térmica en el fluido produce una expansión volumétrica que da como resultado un gradiente de presión inducido; este fluido dilatado se desplaza transfiriendo energía térmica; el fluido una vez realiza esto pasa a ser frío por la liberación de energía, pudiendo adquirir nuevamente energía térmica de la superficie (García y otros et al., 2020, p.139).

1.2.1.3. Radiación

La radiación es la transferencia de calor a través de ondas electromagnéticas (Barchers, 2015, p.20). Cuando los cuerpos absorben esta energía, estos elevan su temperatura. La tasa de radiación electromagnética por unidad de tiempo se da debido a la diferencia de temperatura, por lo que recibe el nombre de radiación térmica (García y otros et al., 2020, p.139). La Ley de Stefan Boltzmann, nos da la relación entre el intercambio de energía térmico por radiación entre una superficie y un área alrededor (Jiji, 2006, p.8). Existen 2 tipos de radiaciones a resaltar. La primera, la radiación directa, es aquella proveniente del sol, sin haber sido afectada su trayectoria por la atmosfera. La segunda, se conoce como radiación difusa, y es aquella que ha sido esparcida por la atmósfera. La combinación de estas dos nos da la radiación total (Duffie y Beckman, 2013, p.10). La tierra, en su movimiento de traslación, se encontrará en el periodo de un año en dos puntos de máxima y mínima radiación, los cuales son el perihelio y afelio, respectivamente. En el perihelio los valores de radiación incrementarán un 3.4%, mientras que en el afelio disminuirán esta misma cantidad, tomando como distancia media al sol 1 unidad astronómica (Katzoff, 1962, p.2).

1.2.2. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un número adimensional que caracteriza el movimiento de un fluido. Este, relaciona las propiedades físicas del fluido, velocidad, geometría del tubo por el que fluye. Su importancia reside en que nos dice la forma en que fluye el fluido. Cuando un fluido fluye en un tubo a una velocidad baja, el flujo es uniforme, es decir, es laminar. Al aumentar la velocidad, llega a una velocidad crítica a partir de la cual el movimiento es turbulento. La transición de un flujo laminar a turbulento se conoce como régimen de transición (Reynolds citado en Jaramillo., 2020: pp.17-19). El número de Reynolds se expresa como:

$$R_e = \frac{v\rho d}{\mu_f} \quad (1)$$

Donde R_e es el número de Reynolds; d el diámetro del tubo; v la velocidad del líquido; ρ la densidad del líquido; μ_f la viscosidad del líquido. En el caso de calentadores con colectores de tubos al vacío se considera el flujo como laminar ya que la diferencia de temperatura del agua que entra y sale de los tubos al vacío son pequeñas (García y otros et al., 2020, p.140).

1.2.3. Energía interna en el interior del tubo

Según la primera ley de la termodinámica, el incremento de la energía interna en un sistema es igual a la cantidad de calor suministrado menos el trabajo realizado por el sistema (Millar, 1993, p.18). Despreciando la contribución del calor, el aumento en la energía interna del tubo puede ser descrita a través de la tasa del calor útil multiplicado por un intervalo de tiempo (García y otros et al., 2020, p.144). Esta, se expresa mediante la ecuación (2).

$$\Delta E_{sistema} = \dot{Q}_{\acute{u}til} \Delta t \quad (2)$$

Donde la tasa de calor útil está en función del flujo masico, temperaturas final e inicial, y el calor específico a presión constante mediante la expresión (3).

$$\dot{Q}_{\acute{u}til} = \dot{m} c_p (T_2 - T_1) \quad (3)$$

1.3. Variables ópticas de los colectores solares de tubos al vacío

1.3.1. Reflexión

La reflexión es un fenómeno óptico en donde un haz de luz, proveniente de algún medio, llega a otro medio. Al llegar al interfaz de estos dos medios, una parte de la luz incidente se refleja dando lugar al denominado fenómeno de reflexión (Coddington., 1829, p.5)

1.3.1.1. Reflexión en una superficie plana

Cuando la luz incide en una superficie plana con un ángulo de incidencia “ i ”, el ángulo de reflexión “ r ” del rayo reflejado tiene exactamente la misma magnitud que el incidente (Tatum, 2006, p.1).

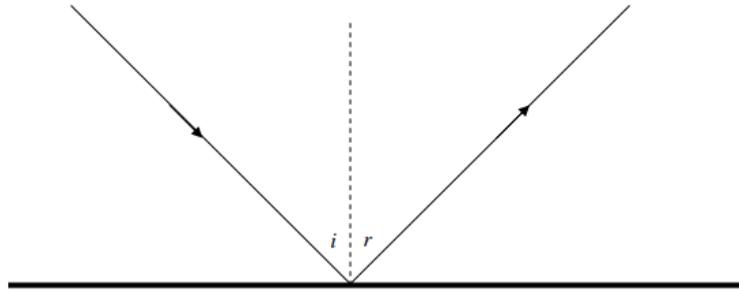


Ilustración 1-3: Reflexión en una superficie plana.

Fuente: Tatum. 2006

1.3.1.2. Reflexión en una superficie cilindro-parabólica

Los espejos cilindro-parabólicos se caracterizan por tener una línea focal en lugar de un punto focal. Esta línea, está compuesta de puntos focales que corresponden a cada sección transversal del cilindro. Las variables principales en este tipo de superficies son: la longitud del cilindro, la longitud focal, la apertura de ancho (distancia entre los bordes del espejo) y el ángulo de borde (ángulo que va desde el eje óptico hasta la línea que conecta el foco y el extremo del reflector) (Karathanasis, 2019, p.93). La reflectividad de un reflector cilindro-parabólico es inferior a la unidad, por ende, solo una porción de la luz solar incidente se refleja hacia los tubos. Sin embargo, son capaces de reflejar más del 88% de la radiación incidente (Amine., 2013, p.22).

1.3.1.3. Factor de intercepción

El factor de intercepción γ , nos dice que la fracción de luz reflejada por el reflector no logra impactar la superficie de los tubos debido a imperfecciones microscópicas de los espejos, fallas en la geometría del concentrador, deformaciones mecánicas, entre otros (Fernández y otros et al., 2010, p.217). Este se define como la razón entre la radiación absorbida por el receptor entre la radiación reflejada por el reflector (Duffie y Beckman, 2013, p.334).

$$\gamma = \frac{\int_A^B I(w)dw}{\int_{-\infty}^{+\infty} I(w)dw} \quad (4)$$

1.3.2. Refracción

La refracción de la luz es un fenómeno óptico en el que los rayos en un medio con un índice de refracción dado cambian su curso al impactar en el interfaz de otro medio con un diferente índice de refracción (Landlot, 1886, p.2).

1.3.2.1. Refracción en una superficie plana

Cuando un haz de luz en un medio con un índice de refracción cualquiera impacta, a través de un plano, en otro medio con un diferente índice de refracción, este se refracta alejándose o acercándose a la normal a la superficie (Read, 1991, p.80).

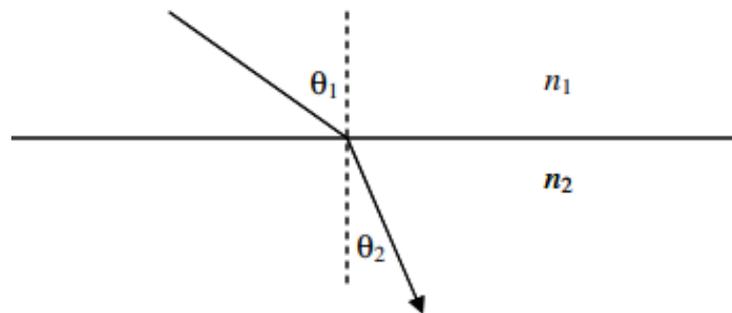


Ilustración 1-4: Refracción en una superficie plana.

Fuente: Tatum. 2006

La ley de refracción para una superficie plana puede expresarse mediante la expresión (5), donde n_1 , n_2 , θ_1 , θ_2 corresponde a los índices de refracción de los medios y los ángulos de incidencia y refracción, respectivamente.

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5)$$

1.3.2.2. Transmisividad y absorbanza de tubos al vacío

Cuando la luz incide sobre el tubo de vidrio cobertor, una parte se refleja, pero la gran mayoría se transmite. Una vez dentro, la mayor parte de la radiación es absorbida por la pintura selectiva, sin embargo, una parte logra reflejarse. El proceso se repite sucesivamente al llegar esta fracción última de luz al tubo externo. La transmitancia del tubo de vidrio cobertor quedará definido mediante τ , mientras que la absorbanza de la pintura del tubo interno estará dada por α (García y otros et al., 2020, p.142).

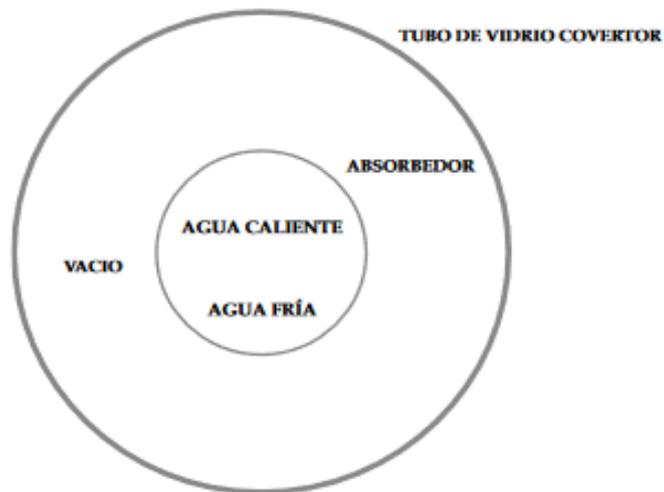


Ilustración 1-5: Corte transversal del tubo al vacío.

Fuente: García, V.; Márquez, C.; Recalde, C. 2020

Una parte de la radiación solar reflejada al tubo de vidrio es incapaz de penetrarlo. La proporción entre la radiación entrante y la radiación total incidente, se conoce como transmisividad (Fernández et al., 2010, p.218). La absorbancia nos dice la cantidad de energía que el tubo interno es capaz de receptor respecto al total de radiación que alcanza el tubo externo (Fernández y otros et al., 2010, p.218). Para obtener el valor de la transmitancia y absorbancia hacemos uso de las ilustraciones 1-6, 1-7 y 1-8.

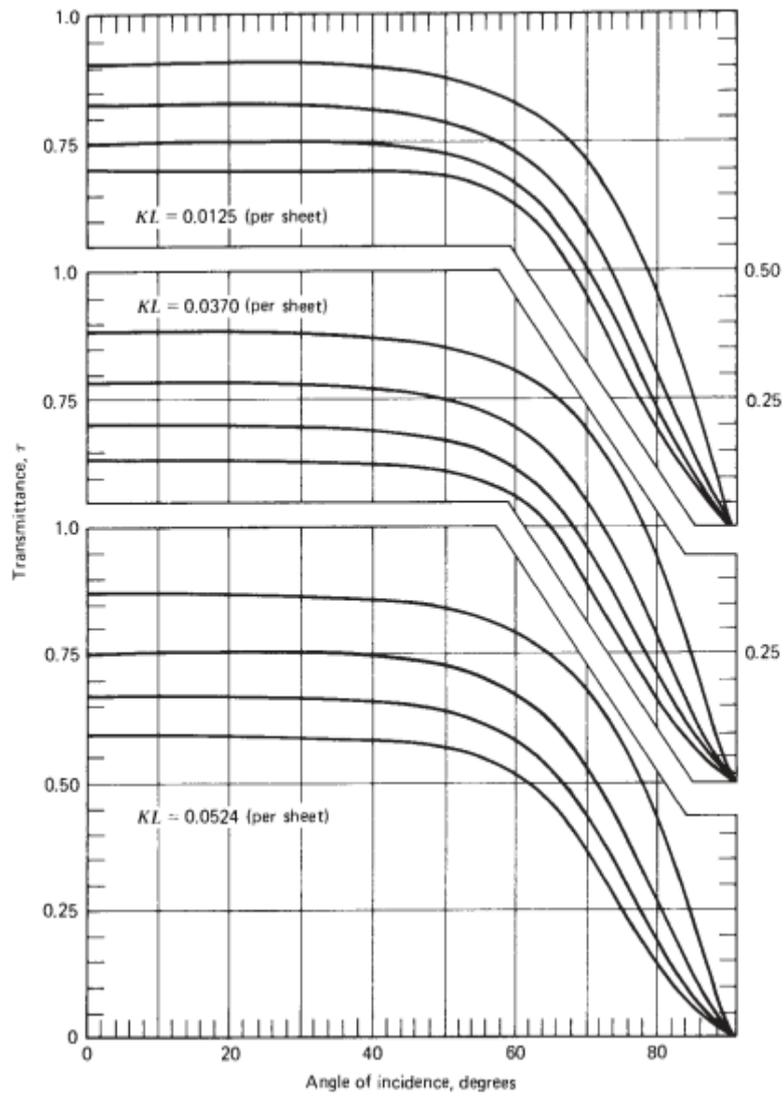


Ilustración 1-6: Valores de transmitancia en función de θ .

Fuente: Duffie, J.; Beckman, W. 2013.

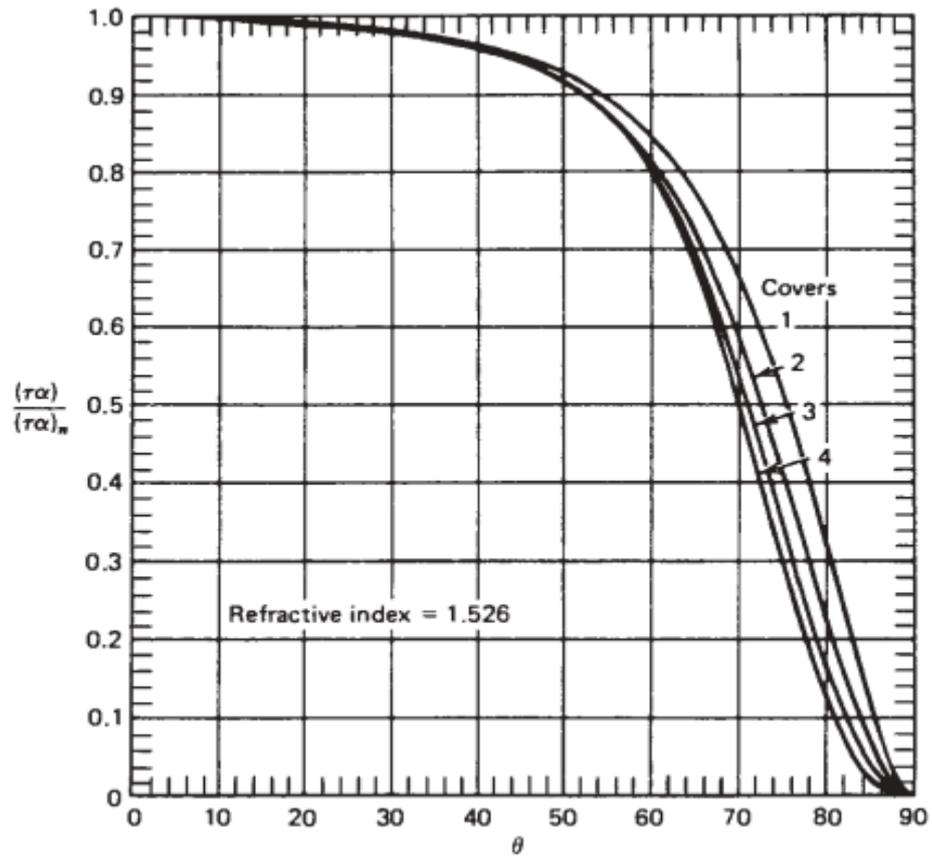


Ilustración 1-7: Producto transmitancia-absorbancia vs θ .

Fuente: Duffie, J.; Beckman, W. 2013.

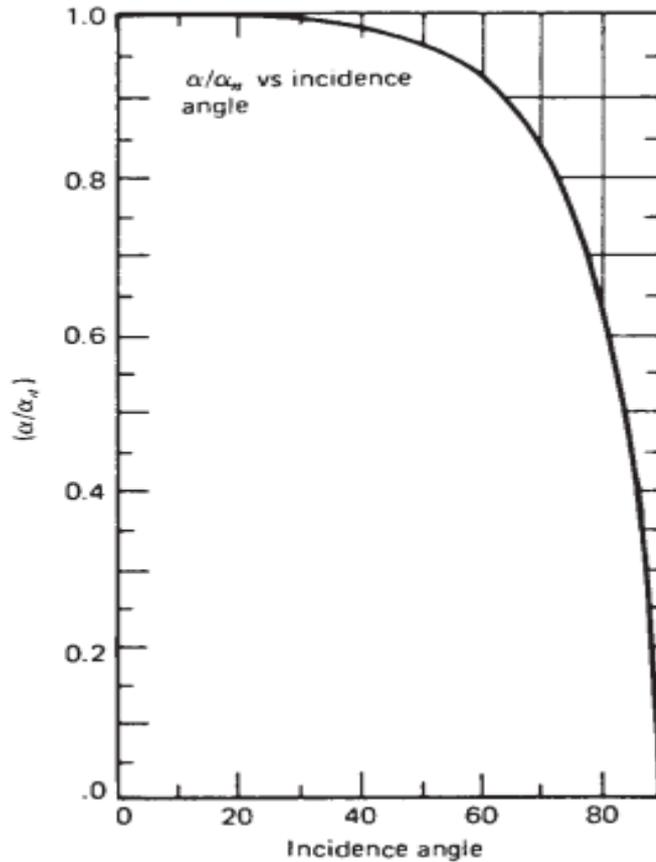


Ilustración 1-8: Absorbancia y absorbancia normal vs θ .

Fuente: Duffie, J.; Beckman, W. 2013.

Otro parámetro importante a considerar es el producto KL , donde K es el coeficiente de extinción que para el vidrio tiene un valor de 0.04, y L es el espesor del tubo (Duffie y Beckman, 2013, p.214). El producto transmitancia-absorbancia queda se puede aproximar a la siguiente relación (6).

$$(\tau\alpha) \cong 1.01\tau\alpha \quad (6)$$

1.4. Parámetros y desempeño del calentador solar

1.4.1. Coeficiente de convección del viento

Los colectores solares con tubos expuestos al viento externo experimentan pérdidas de calor (Duffie y Beckman, 2013, p.163). Para un flujo de aire sobre un tubo, según McAdams (1954) podemos definir el Número de Nusselt Nu en función del número de Reynolds.

$$Nu = \begin{cases} 0.40 + 0.54Re^{0.52}, & 0.1 < Re < 1000 \\ 0.30Re^{0.6}, & 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (7)$$

1.4.2. Coeficiente de transferencia de calor por convección

El coeficiente de transferencia de calor por convección h_w nos dice la cantidad de energía transmitida en función de las características del fluido y del tubo que lo contiene cuando se transmite energía por convección. Este, se puede expresar en función del número de Nusselt Nu , la conductividad térmica k y el diámetro externo del absorbedor D_{co} (Duffie y Beckman, 2013, p.330).

$$h_w = Nu \frac{k}{D_{co}} \quad (8)$$

1.4.3. Análisis térmico

1.4.3.1. Pérdidas de calor

Se puede cuantizar las pérdidas de calor de un colector de longitud L , con una emisividad de vidrio ε_c , un receptor de temperatura T_r , una temperatura dentro del cobertor T_{ci} , una temperatura del cobertor T_{co} , una temperatura de los alrededores T_a y una temperatura del cielo T_{sky} (Duffie y Beckman, 2013, p.329). Esta relación se muestra en la siguiente ecuación.

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \varepsilon_c \pi D_{co} L \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (9)$$

La temperatura dentro del cobertor se puede obtener mediante la siguiente relación, donde k_c es la conductividad térmica del cobertor y D_{ci} es la distancia entre el cobertor y el absorbedor (Duffie y Beckman, 2013, p.329).

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_c L (T_{ci} - T_{co})}{\ln (D_{co}/D_{ci})} \quad (10)$$

Para el caso de un colector solar con concentración lineal sin cobertor, la ecuación de pérdida de calor toma la siguiente forma.

$$Q_{loss} = A_r (h_w + h_r + U_{conda}) (T_r - T_a) \quad (11)$$

$$Q_{loss} = A_r (U_L) (T_r - T_a) \quad (12)$$

Donde h_r es el coeficiente de radiación lineal, U_{cond} las pérdidas por conducción, T_r la temperatura del receptor y T_a la temperatura de la apertura. Para obtener el coeficiente de radiación lineal podemos hacer uso de la siguiente relación.

$$h_r = \frac{\varepsilon\sigma(T_r^4 - T_{sky}^4)}{T_r - T_a} \quad (13)$$

Con T_{sky} como la temperatura ambiente.

1.4.3.2. Coeficiente de pérdida de calor

El coeficiente de pérdida de calor nos dice las pérdidas de energía basado en las pérdidas de calor, el área del receptor, la temperatura del receptor y la temperatura ambiente (Duffie y Beckman, 2013, p.328).

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_r(T_r - T_a)} \quad (14)$$

1.4.3.3. Coeficiente de transferencia de calor

El coeficiente de transferencia de calor U_o , basado en el diámetro externo del receptor, está en función de los alrededores y el fluido (Duffie y Beckman, 2013, p.331).

$$H_f = \frac{fLv^2}{2gd} \quad (15)$$

1.4.3.4. Rendimiento instantáneo

El rendimiento instantáneo, nos da información del rendimiento térmico de los tubos al vacío en un momento específico (García y otros et al., 2020, p.143). Este, está en función de la tasa de energía útil y la energía incidente a través de la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{\tau\alpha G - U_{perd}(T_m - T_s)}{G} \quad (16)$$

1.4.3.5. Calor útil

Para un conjunto de tubos al vacío en régimen estacionario, el balance energético nos da una descripción de la energía térmica colectada útil, la cual consiste en la energía térmica absorbida menos la energía térmica pérdida en el sistema (García y otros et al., 2020, p.144). Este se puede expresar en función del flujo másico, la capacidad calorífica a presión constante, la temperatura final entrante T_{fi} y saliente T_{fo} , a través de la siguiente formula:

$$Q_u = Q_{abs} - Q_{perd} = \dot{m}C_p(T_{fo} - T_{fi}) \quad (17)$$

Donde el calor absorbido queda definido en función de la transmitancia y absorbancia:

$$Q_{abs} = \tau\alpha IA \quad (18)$$

Siendo I la radiación sobre el colector y A el área de incidencia. El calor útil promedio por unidad de área de colector se define de la siguiente manera (Duffie y Beckman, 2013, p.265).

$$q_u = \frac{Q_u}{A_C} \quad (19)$$

1.4.3.6. Factor de eliminación de calor

El factor de eliminación de calor F_R es una variable que se expresa como la relación entre la ganancia útil de energía de un colector Q_u y la ganancia útil si toda la superficie del colector estuviese a la temperatura de entrada del fluido (Duffie y Beckman, 2013, p.332).

$$F_R = \frac{Q_u}{A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right]} \quad (20)$$

Donde A_a es el área sin sombra, A_r el área del receptor, A_C el área del colector, T_i la temperatura del tubo interno, T_a la temperatura ambiente. Este factor también se puede expresar de manera exponencial de la siguiente manera (Duffie y Beckman, 2013, p.332).

$$F_R = \frac{\dot{m}C_p}{A_C U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_C U_L F}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (21)$$

1.4.3.7. Factor de flujo del colector

El factor de flujo del colector es un parámetro que se define como la razón entre el factor de eliminación de calor y la eficiencia del colector (Duffie y Beckman, 2013, p.332).

$$F' = \frac{F_R}{F} = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L F} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_r U_L F}{\dot{m}C_p} \right) \right] \quad (22)$$

1.4.3.8. Eficiencia del colector

La eficiencia del colector se define como la razón entre el calor útil sobre la energía solar incidente durante un periodo de tiempo y el calor disponible. Si los parámetros son constantes durante un intervalo de tiempo se puede definir el desempeño del colector con la siguiente relación (Bellos y otros et al., 2016, p.47).

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_s} \quad (23)$$

1.4.4. Análisis óptico

1.4.4.1. Radiación absorbida

La radiación absorbida por unidad de apertura S está en función de las propiedades geométricas del dispositivo y de su capacidad de absorber o transmitir la luz fluido (Duffie y Beckman, 2013, p.331). Este se puede expresar en función de la efectiva radiación incidente en el plano de apertura I_b , la reflectancia del concentrador ρ , el factor de intercepción γ , la transmitancia τ , la absorbancia α y $K_{\gamma\tau\alpha}$ el modificador de ángulo de incidencia.

$$S = I_b \rho (\gamma \tau \alpha) K_{\gamma\tau\alpha} \quad (24)$$

1.4.4.2. Eficiencia óptica

La eficiencia óptica es el producto de la reflectividad, factor de intercepción, transmisividad del vidrio, absorbancia del tubo interno. Cuando el ángulo de incidencia de la radiación respecto al plano de apertura es cero ($\psi=0$), obtenemos la máxima eficiencia óptica (Fernández y otros et al., 2010, p.218). Esta se expresa como:

$$\eta_{opt,0^\circ} = \tau \alpha \gamma \rho \quad (25)$$

Esta eficiencia, representa la fracción de radiación solar que alcanza el plano de apertura del reflector cilindro-parabólico, la cual es absorbida por el tubo interno, tomando un ángulo de incidencia de cero (Fernández y otros et al., 2010, p.218). En el caso de tener ángulos de incidencia diferentes de cero, afectamos directamente los parámetros ópticos del reflector. Este efecto es definido por el modificador del ángulo de incidencia $K(\psi)$, que contiene las pérdidas geométricas y ópticas de un concentrador cilindro-parabólico (Fernández y otros et al., 2010, p.218). Nuestra nueva eficiencia, entonces, se define como la ecuación (26).

$$\eta_{opt,\psi \neq 0^\circ} = \eta_{opt,0^\circ} K(\psi) \quad (26)$$

1.4.4.3. Razón de concentración

Otra forma de determinar el desempeño óptico del colector es a través de la razón de concentración. Este parámetro, es la razón entre la radiación solar I_{ap} que entra al colector y la radiación I_{ab} en el receptor y nos dice la capacidad del concentrador para almacenar energía solar (Bellos y otros et al., 2016, p.47). Este, se puede expresar en función de la radiación o las áreas respectivas tal como se hace en la ecuación (27)

$$C = \frac{I_{ap}}{I_{ab}} = \frac{A_a}{A_r} \quad (27)$$

Donde A_a es el área de apertura de la luz y A_r el área del receptor.

1.4.5. Eficiencia del sistema

La eficiencia del sistema es una variable que se expresa como la proporción entre la potencia térmica total de salida emitida por el colector, \dot{Q}_{cf} , respecto al flujo incidente de radiación en el plano de apertura del colector \dot{Q}_{sc} (Fernández y otros et al., 2010, p.220). Esto, se expresa mediante la ecuación (28)

$$\eta_{sistema} = \frac{Q_{cf}}{Q_{sc}} \quad (28)$$

1.4.6. Eficiencia del colector

La eficiencia del colector F es la razón entre el coeficiente de pérdidas de calor y el coeficiente de transferencia de calor entre los alrededores y el fluido (Duffie y Beckman, 2013, p.332).

$$F = \frac{U_o}{U_L} \quad (29)$$

1.5. Reflectores

1.5.1. Reflector cilindro-parabólico

Un reflector cilindro-parabólico es un cilindro cuya sección transversal tiene la forma de una parábola. Este, se encarga de concentrar la radiación solar en una superficie o receptor (Karathanasis, 2019, p.93). Este tipo de reflectores, requieren de sistemas de seguimiento del movimiento aparente de sol a lo largo del día para aprovechar lo máximo posible la luz incidente. Debido a esto, cuentan con solo un grado de libertad para generar la rotación. Para tener una buena reflexión de luz, es importante considerar este ángulo de rotación (Fernández y otros et al., 2010, p.215).

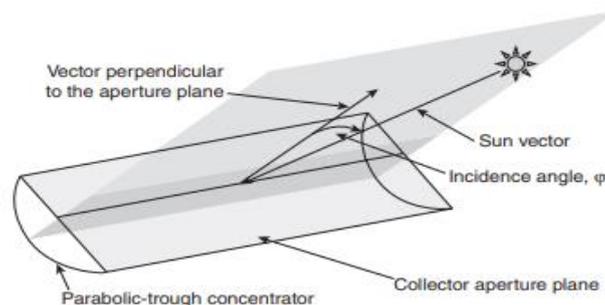


Ilustración 1-9: Correcto posicionamiento del reflector cilindro-parabólico.

Fuente: Fernández, A.; Zarza, E.; Valenzuela, L.; Pérez, M. 2010

La posición del concentrador debe ser tal que el vector de haz solar, la línea focal del reflector y el vector perpendicular al plano de apertura estén dentro de un mismo plano. El ángulo que se forma entre el vector de la luz y el vector perpendicular al plano de apertura se conoce como ángulo de incidencia. Cuanto más pequeño sea este ángulo, más rayos inciden en el concentrador para ser reflejados luego al tubo de vacío (Fernández y otros et al., 2010, p.215).

Este último parámetro no es tan importante dado que la radiación solar es difusa y no tiene una dirección específica. Sin embargo, tenemos otras variables que serán cruciales a la hora de aprovechar la luz solar.

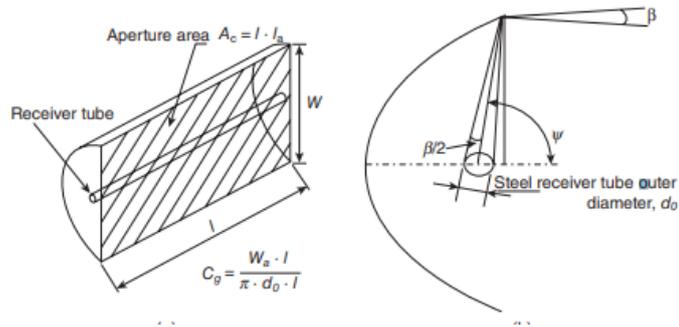


Ilustración 1-10: Razón de concentración geométrica, β y ψ .

Fuente: Fernández, A.; Zarza, E.; Valenzuela, L.; Pérez, M. 2010.

El ángulo de borde, definido por ψ , puede ser interpretado como una función que relaciona la distancia focal de la parábola f y el ancho de apertura W :

$$\tan \psi = \frac{8fW}{W^2 - 16f^2} \quad (30)$$

Generalmente, estos ángulos de borde oscilan entre 70° y 110° (Fernández y otros et al., 2010, p.217).

1.6. Dirección de los haces de radiación

El sol, en su movimiento aparente respecto a un plano cualquiera, puede ser descrito a través de un conjunto de ángulos, ya sea con un plano fijo o móvil (Benford y Bock, 1939; citados en Duffie y Beckman, p.12).

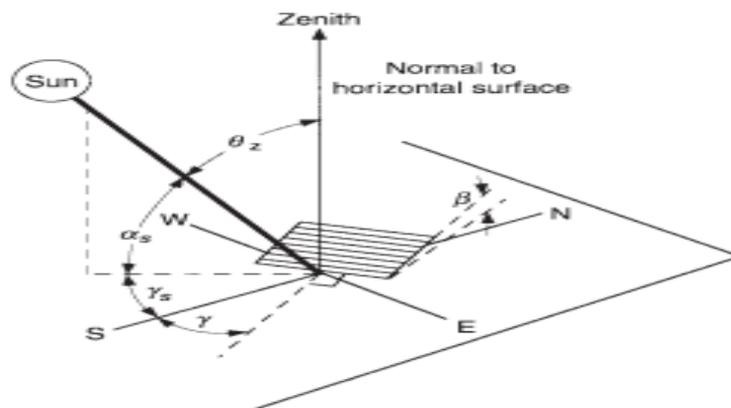


Ilustración 1-11: Ángulo del zenit, pendiente, ángulo azimutal superficial y ángulo solar azimutal para superficie inclinada.

Fuente: Duffie, J.; Beckman, W. 2013.

1.6.1. Latitud

La latitud es la distancia o posición angular de un lugar de la Tierra al ecuador. Esta distancia ϕ oscila entre -90° y 90° (Monreal y Ascaso, 1877, p.14).

1.6.2. Declinación

La declinación es el ángulo entre el plano de la rotación terrestre alrededor del sol y el plano del ecuador (Los Alamos Scientific Laboratory, 1977, p.99). La declinación δ oscila entre -23.45° y 23.45° (Duffie y Beckman, 2013, p.12). La declinación se expresa en función de una magnitud adimensional B.

$$\begin{aligned} \delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) & (0.006918 - 0.399912\text{Cos}(B) + 0.070257\text{Sen}(B) \\ & - 0.006758\text{Cos}(2B) + 0.000907\text{Sen}(2B) \\ & - 0.002697\text{Cos}(3B) + 0.00148\text{Sen}(3B) \end{aligned} \quad (31)$$

La variable B puede hallarse a través de la siguiente relación (32)

$$B = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (32)$$

1.6.3. Pendiente

La pendiente es el ángulo que se forman entre el plano de la superficie y la horizontal. De esta forma, la pendiente, la pendiente β puede tomar valores entre 0° y 180° (Duffie y Beckman, 2013, p.12).

1.6.4. Ángulo azimutal superficial

El ángulo azimutal superficial es la desviación de la proyección en el plano horizontal de la perpendicular a la superficie respecto al meridiano local. Este ángulo γ puede variar entre -180° y 180° (Duffie y Beckman, 2013, p.13).

1.6.5. Ángulo horario

El ángulo horario ω , es el aparente desplazamiento angular del sol desde el este al oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra en su eje (Agrawal y Tiwari, 2010, p.19). En la mañana es negativo y en la tarde positivo, tomando valores de 15 grados por hora (Duffie y Beckman, 2013, p.13).

1.6.6. Ángulo de incidencia

El ángulo de incidencia θ , es aquel que se forma entre el rayo incidente proveniente del sol y la perpendicular a la superficie (Steadman, 1886, p.5). Este ángulo se define con la relación (33).

$$\text{Cos}\theta = (1 - \text{Cos}^2\delta\text{Sen}^2\omega)^{1/2} \quad (33)$$

1.6.7. Ángulo de zenit

El ángulo de zenit θ_z , es el ángulo de incidencia del haz de radiación en una superficie horizontal (Duffie y Beckman, 2013, p.13). Este ángulo puede expresarse con la relación (34).

$$\text{Cos}\theta_z = \text{Cos}\phi\text{Cos}\delta\text{Cos}\omega + \text{Sen}\phi\text{Sen}\delta \quad (34)$$

1.6.8. Ángulo de altitud solar

El ángulo de altitud solar α_s , es aquel que se forma entre la horizontal y la línea que describe el haz de radiación incidente (Duffie y Beckman, 2013, p.13).

1.6.9. Ángulo solar azimutal

El ángulo solar azimutal r_s , es el desplazamiento angular del sur a la proyección de la radiación solar incidente en el plano horizontal (Duffie y Beckman, 2013, p.13).

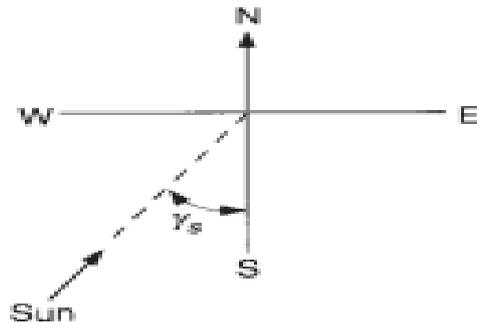


Ilustración 1-12: Ángulo solar azimutal visto en el plano horizontal.

Fuente: Duffie, J.; Beckman, W. 2013.

1.7. Radiación solar directa sobre superficies inclinadas

Para colectores solares con un ángulo de inclinación β respecto a la horizontal, podemos calcular la radiación solar directa que incide sobre los tubos mediante la ecuación siguiente:

$$G_b = G_{on} \cos \theta_z \tau_b \quad (35)$$

El ángulo cenital θ_z , está en función de la declinación, latitud, ángulo de inclinación del colector respecto a la horizontal, orientación respecto al meridiano y el ángulo horario (Duffie y Beckman, 2013; citados en Recalde y otros et al., p.91). Esta relación la expresamos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \cos(\theta_z) = & \text{Sen}(\delta)\text{Sen}(\phi)\text{Cos}(\beta) - \text{Sen}(\delta)\text{Cos}(\phi)\text{Sen}(\beta)\text{Cos}(\gamma) \\ & + \text{Cos}(\delta)\text{Cos}(\phi)\text{Cos}(\beta)\text{Cos}(\omega) \\ & + \text{Cos}(\delta)\text{Sen}(\phi)\text{Sen}(\beta)\text{Cos}(\gamma)\text{Cos}(\omega) \\ & + \text{Cos}(\delta)\text{Sen}(\beta)\text{Sen}(\gamma)\text{Sen}(\omega) \end{aligned} \quad (36)$$

La radiación solar directa incidente sobre la superficie terrestre G_{on} , depende de la hora solar y de la distancia del Sol a la Tierra (Duffie y Beckman, 2013; citados en Recalde y otros et al., p.91). Esta, se define a través de la siguiente relación (37).

$$G_{on} = G_{sc}(1.000110 + 0.034221\cos(B) + 0.001280\sin(B) + 0.000719\cos(2B) + 0.000077\sin(2B)) \quad (37)$$

Donde G_{sc} es la constante solar que posee un valor de 1366.8 W/m^2 y B es una magnitud adimensional que nos da la variación respecto al día del año (Duffie y Beckman, 2013; citados en Recalde y otros et al., p.91).

1.8. Radiación por hora

1.8.1. Componentes directa y difusa de la radiación por hora

La radiación total en una superficie horizontal está en función de sus componentes directa y difusa. La correlación de Erbs relaciona la radiación total en una superficie horizontal y la radiación difusa con el índice de claridad horaria k_T (Duffie y Beckman, 2013, p.89).

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1.0 - 0.09k_T, & k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388k_T^2 \\ -16.638k_T^3 + 12.336k_T^4, & 0.22 < k_T \leq 0.8 \\ 0.165, & k_T > 0.8 \end{cases} \quad (38)$$

El índice de claridad horario se define como la fracción entre la radiación total y extraterrestre en una superficie horizontal (Duffie y Beckman, 2013, p.72). Este índice se define con la relación (39).

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (39)$$

La radiación extraterrestre en una superficie horizontal I_0 mide la radiación para un periodo entre ángulos horarios ω_1 y ω_2 que definen una hora (Duffie y Beckman, 2013, p.40). Este, se define con la relación (40).

$$I_0 = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \times \left[\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (40)$$

Donde n es el día de estudio.

1.9. Días sin sombra

Los días sin sombra, ocurren 2 veces por año en los lugares que están dentro del trópico de cáncer y capricornio, es decir, a latitudes entre $+23.5^\circ$ y -23.5° . En estos días el sol está posicionado en el zenit, por lo que la radiación incidente es prácticamente perpendicular a cualquier superficie receptora, sin ningún ángulo de desviación como ocurre en el resto de días del año (Dendrin, 2022, p.2).

1.10. Modelos de cielos

1.10.1. Cielo isotrópico

En este modelo, asumimos que la radiación difusa del cielo y aquella reflejada por el suelo es isotrópica. Es decir, ambas radiaciones que impactan en la superficie inclinada son iguales sin importar su orientación. Por ende, la radiación total en la superficie inclinada es la suma de la radiación directa y la difusa en una superficie horizontal (Duffie y Beckman, 2013, p.89).

1.10.1.1. Modelo isotrópico difuso

En este modelo, la radiación incidente en la superficie inclinada está compuesta por tres partes: radiación directa, isotrópica difusa, radiación difusa reflejada del suelo (Duffie y Beckman, 2013, p.89). Este modelo se expresa de la siguiente manera:

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (41)$$

Donde $I_b R_b$ corresponde a la radiación directa; I_d la radiación difusa en una superficie horizontal; $(1 + \cos\beta)/2$ es el factor de vista al cielo de la superficie; $(1 - \cos\beta)/2$ el factor de vista al suelo de la superficie inclinada; ρ_g la reflectancia difusa del suelo (Duffie y Beckman, 2013, p.89). Por definición, podemos expresar R como:

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + \rho_g \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad (42)$$

El facto geométrico R_b , es la razón entre la radiación directa en una superficie inclinada y la radiación directa en una superficie horizontal en cualquier tiempo (Duffie y Beckman, 2013, p.23).

Debido a esto, el factor geométrico puede ser expresado en función de los ángulos de incidencia en ambas superficies. Esto se muestra con la relación (45).

$$R_b = \frac{\text{Cos}\theta}{\text{Cos}\theta_z} = \frac{\text{Cos}(\phi - \beta)\text{Cos}\delta\text{Cos}\omega + \text{Sen}(\phi - \beta)\text{Sen}\delta}{\text{Cos}(\phi)\text{Cos}\delta\text{Cos}\omega + \text{Sen}(\phi)\text{Sen}\delta} \quad (43)$$

1.10.2. Cielo anisotrópico

Reindk et al. (1900b) añadieron la componente de radiación del horizonte al modelo de Hay y Davies, que tomaba únicamente la radiación difusa circumsolar junto con la directa (Duffie y Beckman, 2013, p.91).

1.10.2.1. Modelo de Hay y Davies

Este modelo se basa en la asunción de que la radiación difusa está compuesta por una parte isotrópica y otra circumsolar (Duffie y Beckman, 2013, p.91). La radiación difusa, entonces, se expresa con la relación (44).

$$I_{d,T} = I_{T,d,iso} + I_{T,d,cs} \quad (44)$$

Esta última ecuación, también se puede escribir de la siguiente manera.

$$I_{d,T} = I_d \left\{ (1 - A_i) \left(\frac{1 + \text{Cos}\beta}{2} \right) + A_i R_b \right\} \quad (45)$$

Donde A_i , es el índice anisotrópico, el cual está en función de la transmitancia de la atmósfera para la radiación directa. A_i nos dice la porción de radiación horizontal difusa que es tratada como disipación posterior (Duffie y Beckman, 2013, p.92). Este índice está definido de la siguiente manera:

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} \quad (46)$$

De esta manera, bajo un cielo claro y despejado, este índice tomará valores altos, por tanto, la mayor parte de la radiación difusa será disipada posteriormente. Por otra parte, cuando no hay radiación directa, el índice se hace cero, y la radiación difusa se vuelve completamente isotrópica (Duffie y Beckman, 2013, p.92). La radiación total en la superficie inclinada bajo este modelo la expresamos con la relación (47).

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \text{Cos}\beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1 - \text{Cos}\beta}{2} \right) \quad (47)$$

1.10.2.2. Modelo HDKR

En este modelo se considera la radiación del horizonte agregando un factor de corrección a la radiación isotrópica difusa (Al-Hallaj y Kiszynski, 2013, p.17). Podemos expresar la radiación total en la superficie horizontal con la relación (48).

$$I_T = (I_b + I_d A_i) R_b + I_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \text{Cos}\beta}{2} \right) \left\{ 1 + f \text{Sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right\} + I \rho_g \left(\frac{1 - \text{Cos}\beta}{2} \right) \quad (48)$$

El factor modulante f se define como la raíz cuadrada de la radiación directa sobre la radiación global.

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} \quad (49)$$

Por otra parte, la radiación difusa equivale a:

$$I_{T,d} = I_d \left\{ (1 - A_i) \left(\frac{1 + \text{Cos}\beta}{2} \right) \left[1 + f \text{Sen}^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] + A_i R_b \right\} \quad (50)$$

1.11. Bases legales

Este estudio se basa en la política 5.6 del plan nacional del gobierno ecuatoriano, el cual invita a la comunidad académica a “Promover la investigación, la formación, la capacitación, el desarrollo y la transferencia tecnológica, la innovación y el emprendimiento [...]” (SENPLADES, 2017, p. 83).

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Diseño de la investigación

2.1.1. Tipo de investigación

2.1.1.1. Documental

La investigación es documental ya que se empleó modelos físicos de radiación solar anisotrópica para la simulación en SolidWorks apoyándonos de trabajos previos. Esta investigación también es aplicada, pues los conocimientos de termodinámica, óptica, computación, entre otros, se emplearon con la finalidad de modelar el colector, el reflector y calcular la radiación solar total y las eficiencias ópticas y térmicas del calentador.

2.1.1.2. Bibliográfica

La investigación es bibliográfica, esto se debe a que, a través de la revisión bibliográfica de libros, revistas, artículos científicos, se obtuvo la información necesaria para poder afrontar la problemática en cuestión.

2.1.1.3. Explicativo

El estudio es de tipo explicativo ya que se hace uso de un conocimiento profundo de los fenómenos envueltos en la investigación y también debido a que se tiene a disposición datos científicos actuales sobre el tema en cuestión.

2.1.1.4. Transversal

El Proyecto de Integración Curricular es transversal, pues se analizan datos de distintas variables en una muestra específica de una población en un tiempo determinado.

2.1.1.5. Cuantitativo

El enfoque de la investigación es cuantitativo, eso se debe a que se hace uso de variables numéricas.

2.1.2. Método de investigación

2.1.2.1. Experimental

Este Proyecto de Integración Curricular tiene carácter experimental, puesto que se emplean los datos meteorológicos otorgados por la Estación Meteorológica de la ESPOCH, la altura, latitud de Riobamba, y se varían parámetros como el ángulo de inclinación del colector para realizar pruebas de rendimiento y eficiencia.

2.1.2.2. Técnica

Las principales técnicas empleadas en la investigación fueron la experimentación, la observación y fichaje, esto se debe a que se observó el comportamiento del calentador bajo unas condiciones controladas al variar diversos parámetros como por ejemplo la radiación solar incidente o el ángulo de inclinación del colector, para luego tomar la información necesaria y registrarla ordenadamente.

2.1.2.3. Instrumentos

- Ficha de observación

Se empleó una ficha de observación para tabular de manera coherente y cronológica los resultados obtenidos de la experimentación. Esto se debe a que se empleó datos de radiación de diferentes fechas del año 2021 así como también distintas horas a lo largo de un determinado día.

2.1.2.4. Método

El método que se empleó en esta investigación fue el modelado computacional mediante el programa SolidWorks de un calentador y un reflector solar. Se calculó matemáticamente la radiación total en la ciudad de Riobamba para los días 5 y 6 de enero del 2021, 6 y 7 de julio de 2021, 22 de septiembre del 2021, partiendo desde las 9 de la mañana hasta las 5 de la tarde con los datos otorgados por la Estación Meteorológica ESPOCH. Esta información se introdujo junto con otros datos como la latitud de la ciudad y se procedió a simular. Se analizó el comportamiento del calentador sin reflector con ángulos de inclinación de 10°, 20°, 35° y 45°. Luego, con la ayuda del fichaje, se determinó el ángulo que maximiza el efecto termosifón en el calentador. Para el análisis térmico, se realizó el cálculo del calor útil y las pérdidas de calor en colector solar. Para

el análisis óptico, se calculó la radiación absorbida y se analizó el impacto del ángulo de incidencia en el calor útil obtenido. Finalmente, se introdujo el reflector solar en el programa y se determinó la forma e inclinación del mismo para latitudes bajas.

2.1.3. Procedimientos metodológicos para el desarrollo de la investigación

2.1.3.1. Unidad de análisis

Para este estudio, la unidad de análisis son los datos de radiación global obtenidos a través de los piranómetros de la ESPOCH para el año 2021.

2.1.3.2. Población y muestra

- Población

En el desarrollo de esta investigación se tomará como población de estudio a la ciudad de Riobamba en el año 2021, en donde se podrá analizar cada una de las variables independientes.

- Muestra

Para simular un comportamiento meteorológico parecido a la ciudad de Riobamba, se introdujo en SolidWorks, datos propios del 5 de enero del 2021, 7 de enero del 2021, 14 de noviembre del 2021, ya que estas fechas recogen datos del principio y fin del año, lo cual nos ayuda a observar los efectos del ángulo de incidencia del sol en el comportamiento del colector. También se introdujo datos relativos al 27 de septiembre del 2021, día en donde los rayos del sol impactan casi perpendicularmente en el suelo al medio día. En cada uno de estos días, se tomó datos de radiación solar global desde las 11 a.m. hasta las 1 p.m.

2.1.3.3. Localización

El presente Proyecto Integrador se llevó a cabo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, en las aulas de Energías Renovables, donde se realizó todo el trabajo de programación y simulación del calentador solar. El análisis de la radiación total incidente en el colector y los cálculos de eficiencia térmica y óptica, se efectuaron en las mismas instalaciones de la Facultad de Ciencia de manera teórica, antes y después de la simulación, respectivamente. En la Tabla 1-2 se puede apreciar la ubicación del lugar mencionado.

Tabla 1-2: Latitud y altitud del lugar de estudio

PUNTO DE ESTUDIO	LATITUD	ALTITUD
ESPOCH	-1.65621°	2754 msnm

Fuente: Google Maps,

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 1-2 se distingue la ubicación marcada con el cursor rojo con la ayuda del GPS de Google Maps

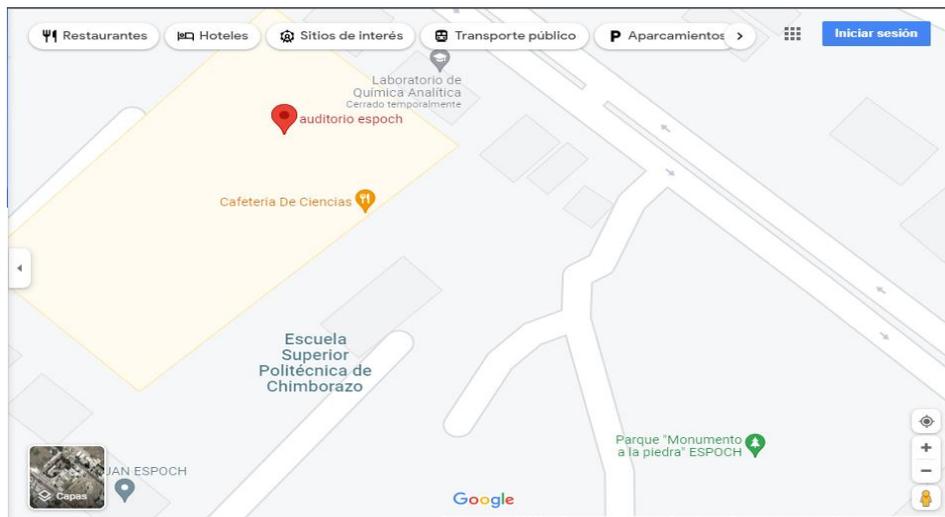


Ilustración 1-2: Posición geográfica del lugar de realización de la investigación.

Fuente: Google Maps.

2.1.4. Identificación de variables

Variable dependiente: radiación solar total incidente sobre superficie inclinada, eficiencia óptica, eficiencia térmica, altura del tanque, temperatura de los tubos y tanque.

Variables independientes: temperatura ambiente, presión, tiempo, latitud, ángulo azimutal, declinación, ángulo de inclinación del colector, radiación solar total incidente sobre superficie horizontal.

2.1.5. Planteamiento de la hipótesis

Las latitudes generan la necesidad de inclinar los colectores a ciertos ángulos para aprovechar la energía de la radiación solar durante el día. Tomando en cuenta la dirección de los rayos solares

al mediodía en latitudes pequeñas, los ángulos bajos aprovecharán mejor la energía solar ya que su incidencia será casi perpendicular. Por otra parte, un reflector cilindro-parabólico en zonas de este tipo, debe tener su respectiva forma y ángulo de inclinación para poder reflejar correctamente los haces de luz. La altura del tanque respecto al extremo de los tubos, que está en función del ángulo de inclinación, afectará al efecto termosifón ya que el principio de Arquímedes postula que cuerpos con mayores alturas experimentan un mayor empuje.

2.2. Equipos y software

2.2.1. Equipos empleados para la toma de datos

2.2.1.1. Estación Meteorológica ESPOCH

Para la recolección de datos de radiación directa se empleó el uso de los piranómetros de la estación meteorológica ESPOCH. Un piranómetro, es un sensor que mide la irradiancia global de una zona (Vargas y Tisalema, 2017: p.1).

Tabla 2-2: Datos de irradiancia global del 5 de enero del 2021.

Fecha	Tiempo (horas)	Promedio radiación	Radiación global	Radiación global	Suma radiación
--------------	-----------------------	---------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------

		global (W/ m²)	máxima (W/m²)	mínima (W/ m²)	global (W/ m²)
01/05/2021	09:00:09 a. m	474.276	474.276	474.276	474.276
01/05/2021	10:00:09 a. m	1072.092	1072.092	1072.092	1072.092
01/05/2021	11:00:09 a. m	642.144	642.144	642.144	642.144
01/05/2021	12:00:09 p. m	373.501	373.501	373.501	373.501
01/05/2021	01:00:10 p. m	298.531	298.531	298.531	298.531
01/05/2021	02:00:10 p. m	404.077	404.077	404.077	404.077
01/05/2021	03:00:10 p. m	145.05	145.05	145.05	145.05

Fuente: Estación Meteorológica ESPOCH.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 3-2: Datos de irradiancia global del 7 de enero del 2021.

Fecha	Tiempo (horas)	Promedio radiación global (W/ m²)	Radiación global máxima (W/m²)	Radiación global mínima (W/ m²)	Suma radiación global (W/ m²)
--------------	---------------------------	---	--	---	---

01/05/2021	11:00:09 a. m	556.111	556.111	556.111	556.111
01/05/2021	12:00:09 p. m	1161.257	1161.257	1161.257	1161.257
01/05/2021	01:00:10 p. m	1222.163	1222.163	1222.163	1222.163

Fuente: Estación Meteorológica ESPOCH.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 4-2: Datos de irradiancia global del 27 de septiembre del 2022

Fecha	Tiempo (horas)	Promedio radiación global (W/m ²)	Radiación global máxima (W/m ²)	Radiación global mínima (W/m ²)	Suma radiación global (W/m ²)
09/27/2021	11:00:15 a. m.	986.605	1070.64	859.453	3551777
09/27/2021	12:00:15 p. m.	842.275	1550.404	200.642	3032191.5
09/27/2021	01:00:15 p. m.	486.588	1530.443	324.751	1751715.5

Fuente: Estación Meteorológica ESPOCH.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 5-2: Datos de irradiancia global del 14 de noviembre del 2021.

Fecha	Tiempo (horas)	Promedio radiación global (W/m ²)	Radiación global máxima (W/m ²)	Radiación global mínima (W/m ²)	Suma radiación global (W/m ²)
09/27/2021	11:00:15 a. m.	945.754	945.754	945.754	945.754

09/27/2021	12:00:15 p. m.	1086.651	1086.651	1086.651	1086.651
09/27/2021	01:00:15 p. m.	1154.923	1154.923	1154.923	1154.923

Fuente: Estación Meteorológica ESPOCH.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.2.1.2. SunCalc

Con la ayuda del software SunCalc, se obtuvo la altitud y el ángulo azimutal de los rayos solares para cada una de las horas y fechas empleadas. También se obtuvo las dimensiones de las sombras generadas por el sol.

Tabla 6-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 05/01/2021.

Fecha	Hora	Altitud (radianes)	Ángulo azimutal (radianes)
1/5/2021	11:00:09 a. m.	1.1491	2.6299
1/5/2021	12:00:09 p. m.	1.2048	3.2413
1/5/2021	1:00:10 p. m.	1.1017	3.8012

Fuente: SunCalc.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 7-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 07/01/2021.

Fecha	Hora	Altitud (radianes)	Ángulo azimutal (radianes)
1/5/2021	11:00:09 a. m.	1.1491	2.6299
1/5/2021	12:00:09 p. m.	1.2048	3.2413
1/5/2021	1:00:10 p. m.	1.1017	3.8012

Fuente: SunCalc.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 8-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 27/09/2021.

Fecha	Hora	Altitud (radianes)	Ángulo azimutal (radianes)
9/22/2021	11:00:09 a. m.	1.4062	1.3907
9/22/2021	12:00:09 p. m.	1.4667	4.9983
9/22/2021	1:00:10 p. m.	1.2079	4.7894

Fuente: SunCalc.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 9-2: Altitud y ángulo azimutal de los rayos solares el 14/11/2021.

Fecha	Hora	Altitud (radianes)	Ángulo azimutal (radianes)
14/11/2021	11:00:09 a. m.	1.184904	2.45340933
14/11/2021	12:00:09 p. m.	1.2786282	3.15625342
14/11/2021	1:00:10 p. m.	1.1787954	3.85351246

Fuente: SunCalc.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.2.2. Equipos y software empleados para la manipulación de datos

Se empleó la computadora para el procesamiento de los datos. En cuanto al Software, se empleó Excel para la manipulación de las variables numéricas y elaboración de tablas. SolidWorks, junto con su complemento FlowSimulation, se utilizó para la programación y simulación bajo unas condiciones específicas, de el calentador y reflector solar.

2.2.3. Especificaciones técnicas

La función y características de cada uno de los equipos y softwares empleados en el presente Trabajo de Integración Curricular se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 10-2: Equipos y softwares empleados para la manipulación de datos

EQUIPO	FUNCIÓN
--------	---------

Computador	Procesar datos y brindar programas para el desarrollo del Trabajo de Integración Curricular
Piranómetros	Otorgar datos de radiación solar directa y difusa
SOTWARE	FUNCIÓN
Excel	Graficar y procesar datos/ análisis de datos
Google Maps	Identificación de la zona de trabajo del Proyecto de Integración Curricular
Software de diseño y simulación	Programa base empleado para el diseño y simulación del calentador y reflector solar
SunCalc	Software empleado para la obtención de la altitud, ángulo azimutal del sol para una fecha y hora determinada

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3. Diseño

El calentador y reflector solar fueron diseñados en un software de diseño empleando datos relativos a Riobamba. También se realizaron diferentes simulaciones para obtener el ángulo de inclinación y conexiones de tubos que mejores el efecto termosifón. Por último, se calculó las pérdidas de calor y el calor útil para una hora fija.

2.3.1. *Diseño estructural*

Para la construcción del calentador solar y el reflector solar se empleó el software SolidWorks. El diseño consta de 20 tubos externos concéntricos con tubos internos llenos de agua. Estos tubos se dispusieron de forma paralela y se conectaron a una cisterna.

2.3.1.1. *Diseño de tubos de vacío*

Cada uno de los 20 tubos se diseñó de manera semejante. Primero, se realizó los dibujos con la herramienta Diseño. Con la ayuda de líneas rectas y curvas se trazó cuatro líneas. En el extremo derecho del dibujo, concretamente en las dos líneas de abajo, se realizó una última curvatura de 20° respecto a la línea que une los cuatro puntos. La distancia entre los dos puntos extremos se fijó en 20 cm y la distancia entre las parejas de puntos se ajustó a 0.2 cm. El radio de la curva externa se ajustó a 40 cm.

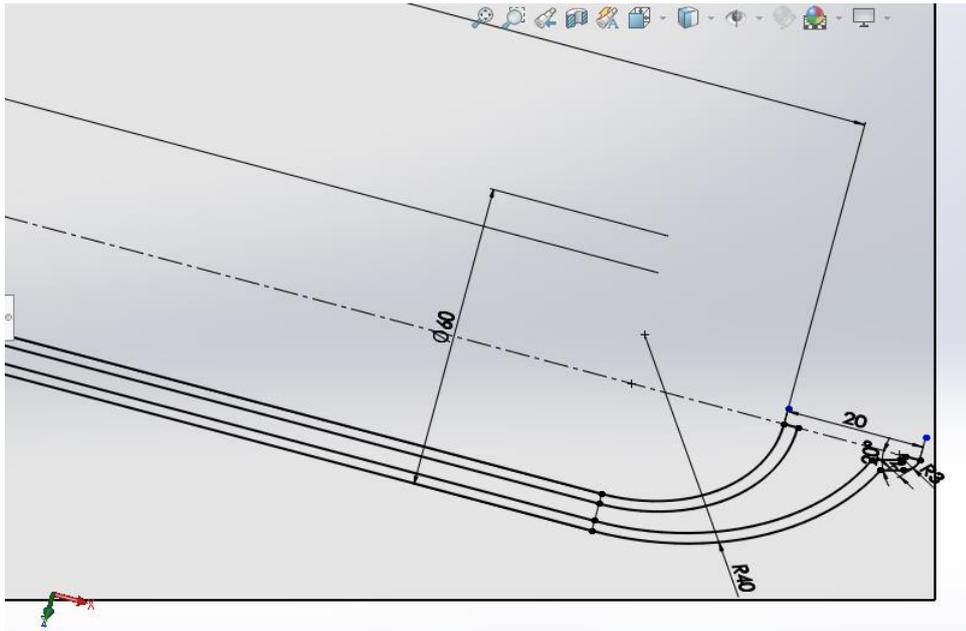


Ilustración 2-2: Diseño del extremo derecho de los tubos de vacío.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la parte izquierda del dibujo, se conectó las líneas mediante curvas. El radio de las líneas internas se fijó a 0.18 cm, mientras que las líneas externas se conectaron con un segmento de recta.

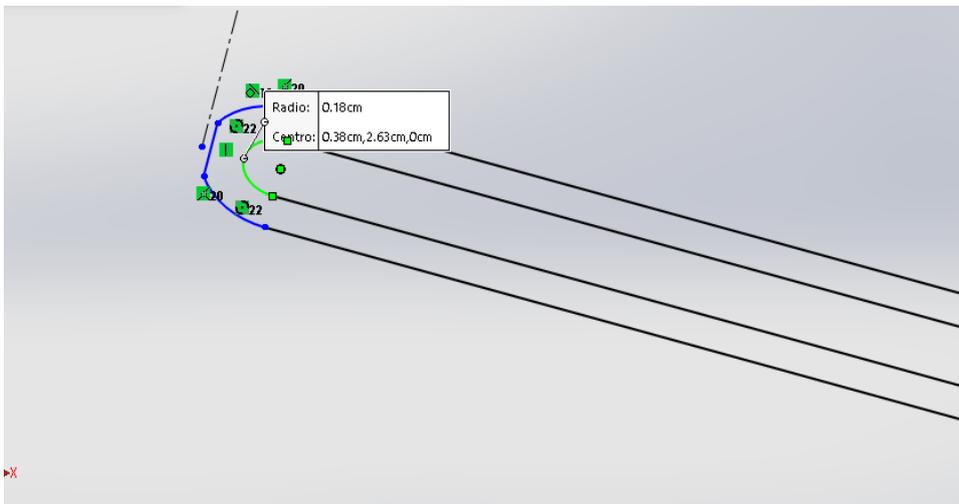


Ilustración 3-2: Radio de las curvas internas en el extremo izquierdo del dibujo.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

La distancia del radio mencionado a la línea que conecta los cuatro puntos en el extremo derecho se colocó en 2.63 cm. La distancia entre el extremo izquierdo y la primera línea del extremo derecho, se ajustó a 1790 cm.

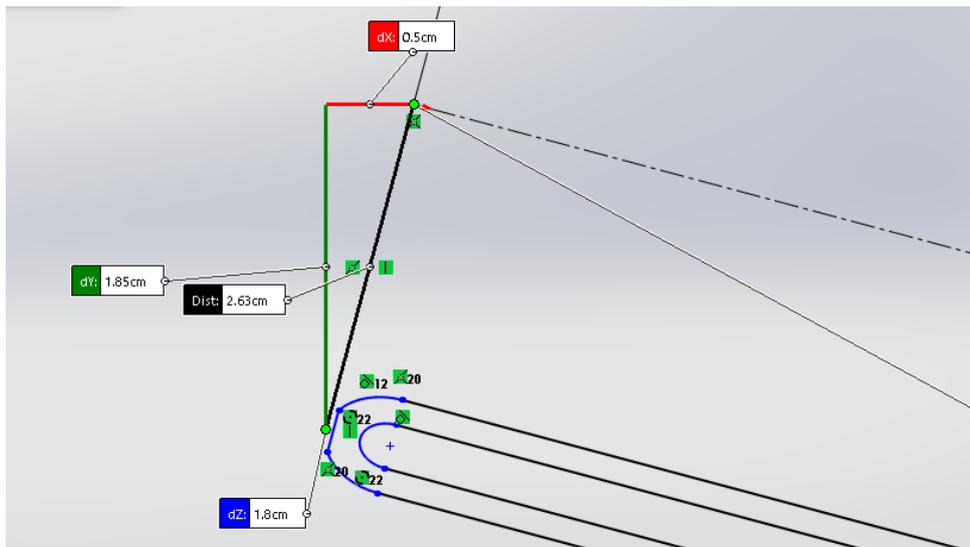


Ilustración 4-2: Distancia del centro a la línea que conecta los 4 puntos del extremo derecho.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

El dibujo completo se muestra en la Ilustración 5-2.

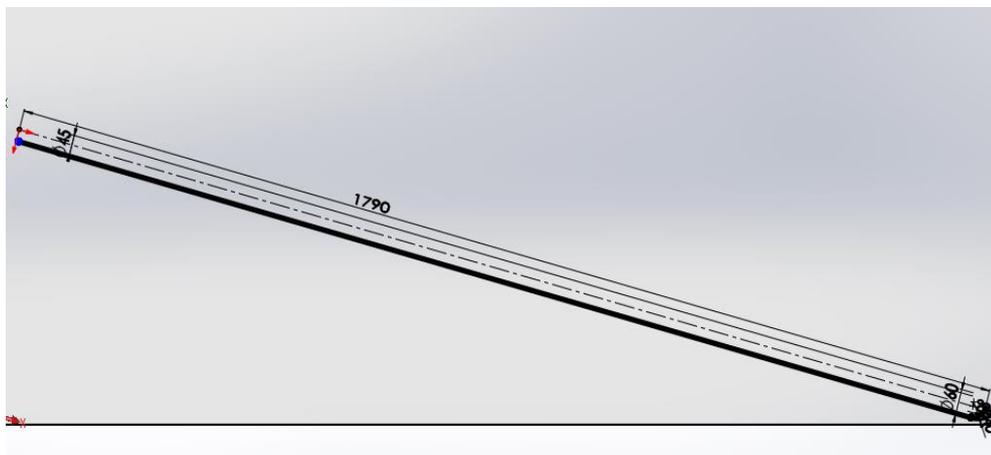


Ilustración 5-2: Dibujo del tubo de vacío completo.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Para obtener el sólido, se usó la herramienta revolución en la línea inter punteada, dándonos el tubo de vacío de borosilicato resultante con una longitud de 176.38 cm.

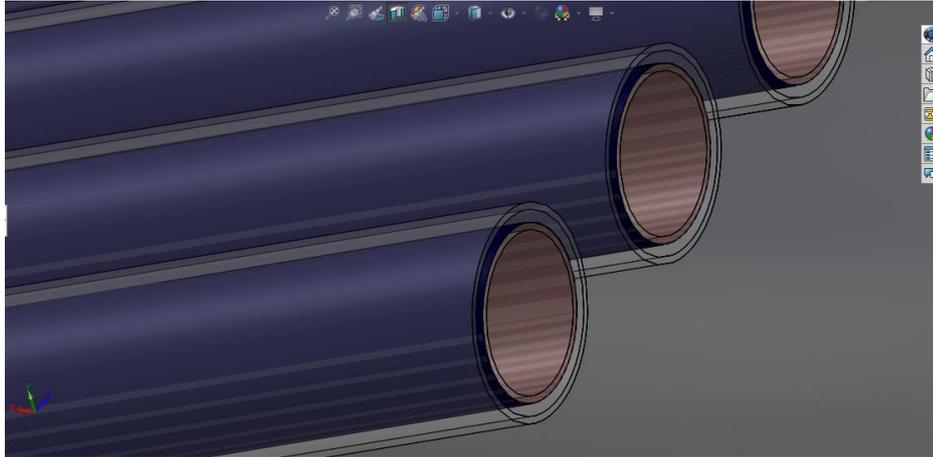


Ilustración 6-2: Tubos de vacío.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Cada una de las mediciones se realizó con la herramienta medir del programa SolidWorks. El tubo externo tiene un espesor de 0.2 cm y un radio externo de 3 cm e interno de 2.8cm.

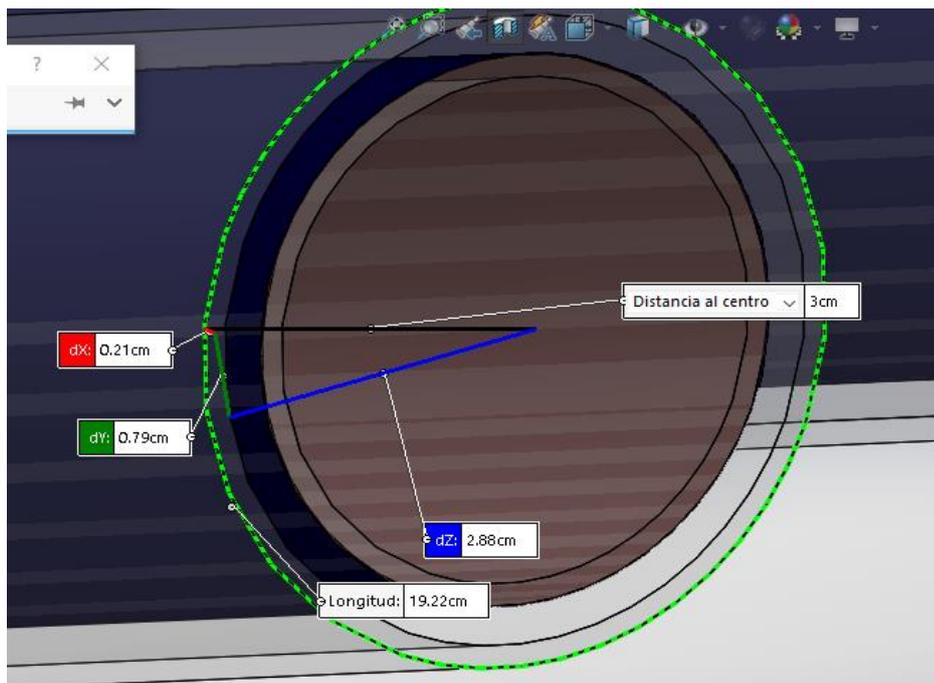


Ilustración 7-2: Radio del tubo externo.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

El tubo interno de nitrato de aluminio se diseñó con un espesor de 0.21 cm y un radio externo de 2.4 cm y uno interno de 2.3 cm.

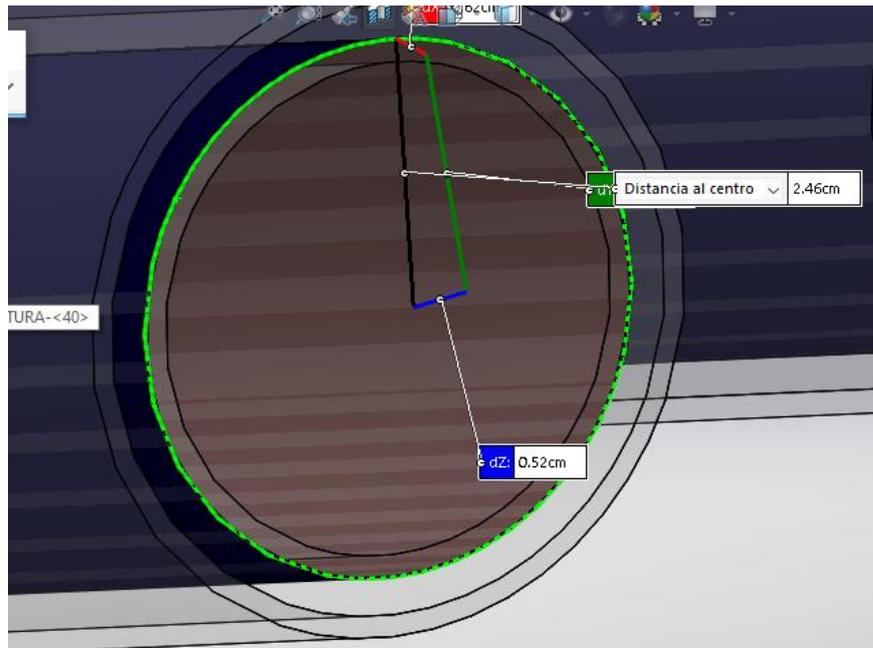


Ilustración 8-2: Radio del tubo interno.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.1.2. Diseño de contenedor

Se diseño en el contenedor dos cisternas concéntricas. Cada una de estas chapas cilíndricas tienen el mismo largo, pero difieren en su radio. El material con el que se fabricó el contenedor fue poliuretano.

- Cisterna grande

Con la ayuda de la herramienta círculo en la pestaña croquis, se trazó en un plano una circunferencia de radio 22.5 cm.

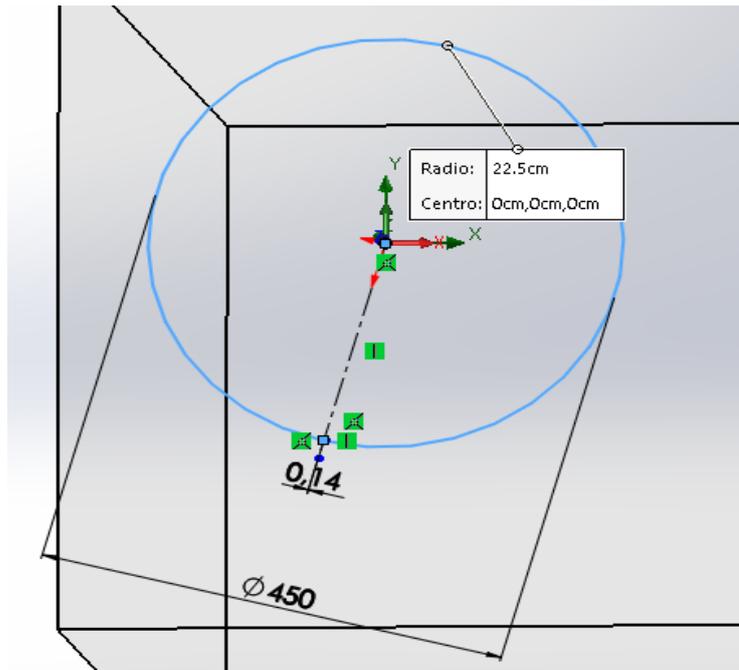


Ilustración 9-2: Croquis de la cisterna grande.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

La brida base se le dio una profundidad de 1665 mm, obteniendo una chapa cilíndrica.

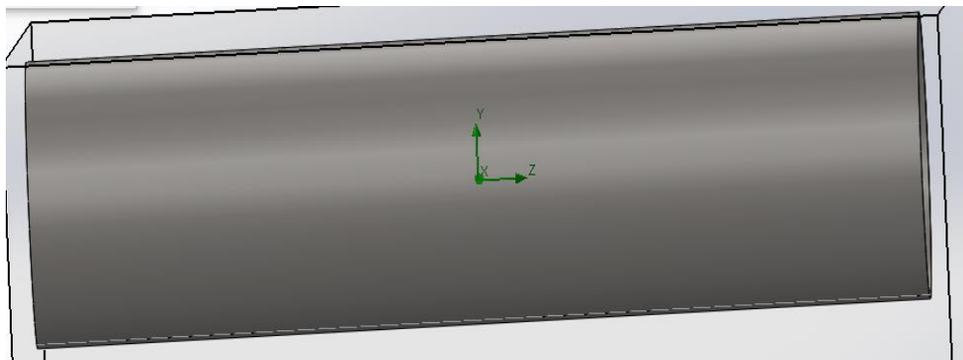


Ilustración 10-2: Chapa cilíndrica grande.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

La chapa se desplegó gracias a la herramienta desplegar a través de un hueco que se dejó en el cilindro.

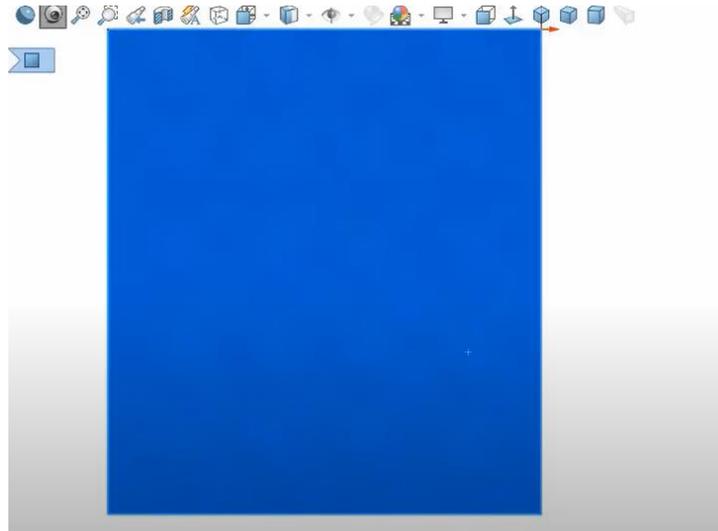


Ilustración 11-2: Cilindro grande desplegado.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Se localizó la mitad de la chapa y con la herramienta círculo se trazó una circunferencia de 3 cm de radio. Con la herramienta matriz lineal, se clonó esta entidad hasta obtener 20 circunferencias idénticas. Luego, se colocó una separación de 1 cm entre círculos, se ajustó de tal forma que la secuencia de círculos coincidiera con la chapa y se le dio a extruir.

Finalmente, se le dio a la herramienta plegar para obtener la estructura original.

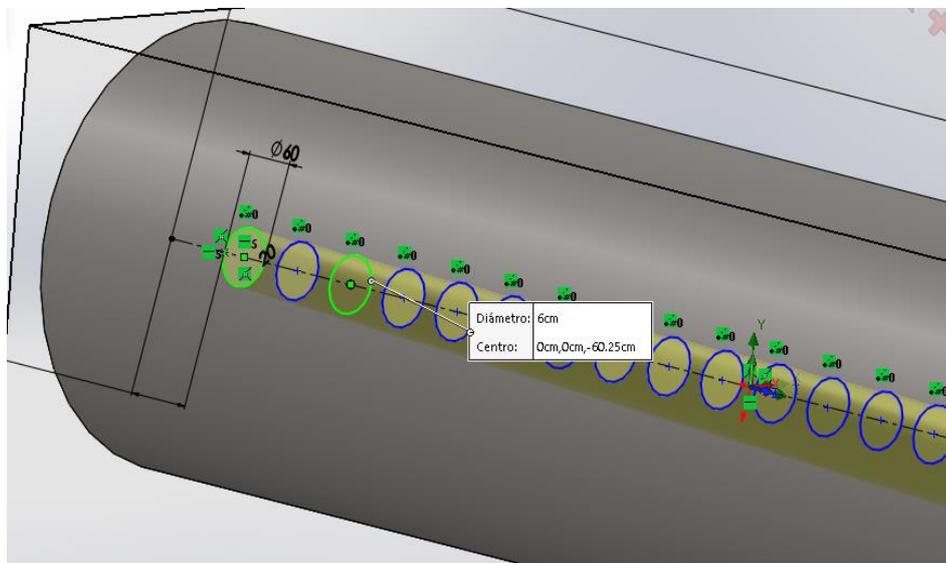


Ilustración 12-2: Contenedor con círculos extruidos.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Con la herramienta cordón de soldadura se rellenó el hueco mencionado anteriormente.

- Cisterna pequeña

Se empleó la misma técnica que se usó para fabricar la cisterna grande. Se trazó una circunferencia de diámetro 37.5 cm y se le dio una profundidad de 1665 mm.

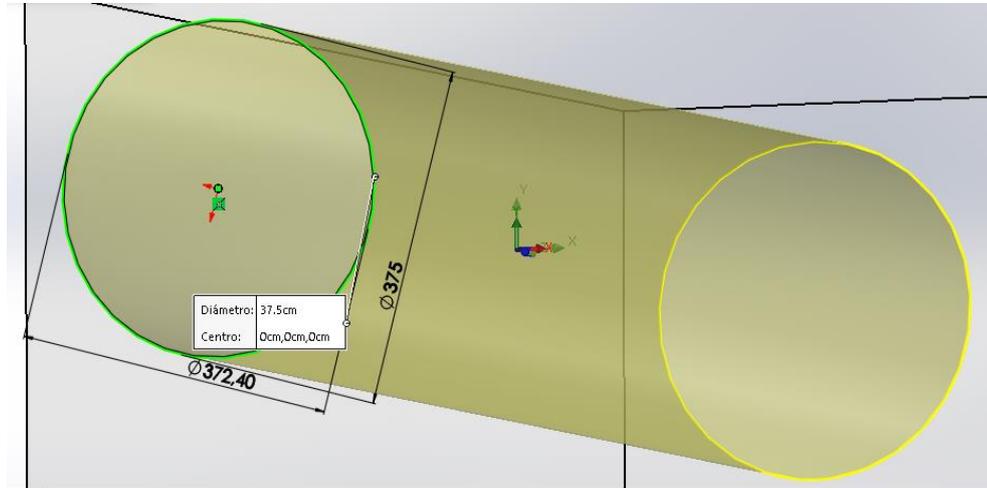


Ilustración 13-2: Dibujo de la cisterna pequeña.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

La chapa se desplegó usando la herramienta desplegar a través de un hueco que se dejó en el cilindro pequeño. En la mitad de la hoja rectangular se trazó los mismos 20 círculos que se habían hecho en la cisterna grande, ajustándolos de tal forma que coincidan en posición y tamaño, pero se le agregó una profundidad de 280 mm.

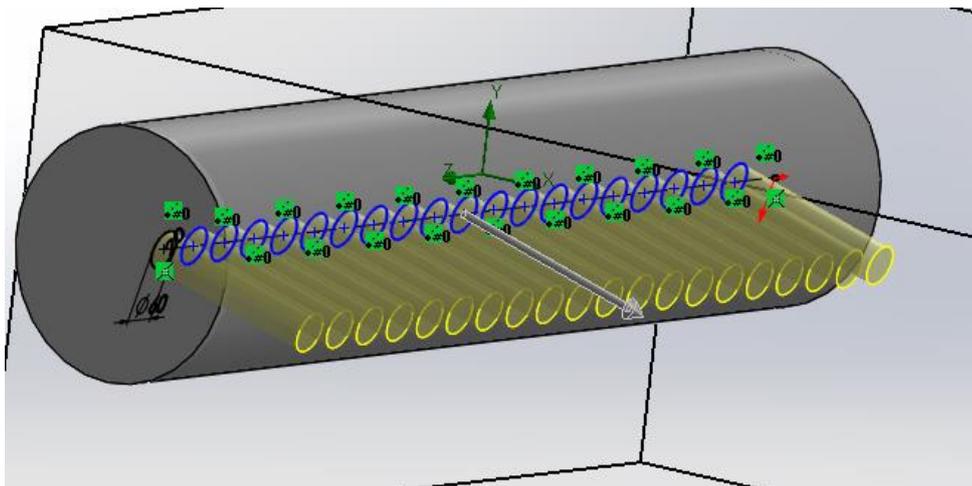


Ilustración 14-2: Cisterna pequeña con círculos extruidos.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Una vez se realizó esto, se extruyó y plegó la estructura para obtener la forma cilíndrica original. Por último, se rellenó el hueco de la misma forma que se hizo en la cisterna grande.

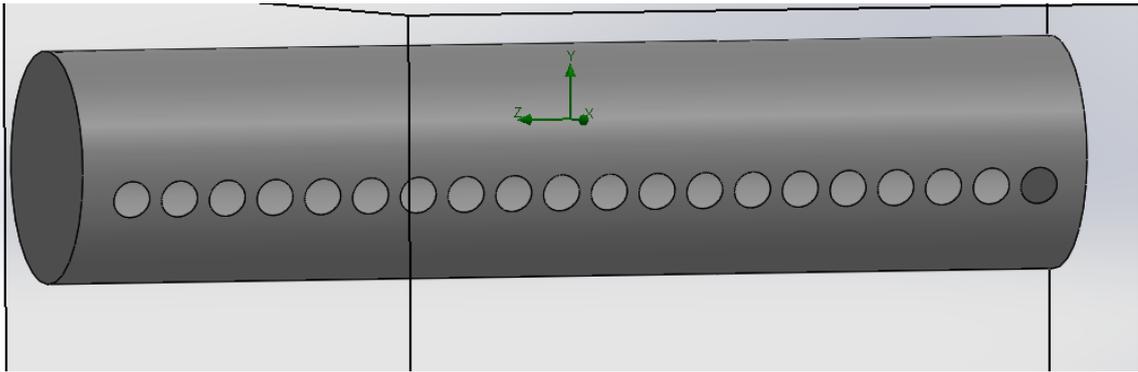


Ilustración 15-2: Cisterna pequeña terminada.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Cobertores de cisternas

En cada uno de los círculos dibujados, se dio una profundidad de 40 mm, tanto en el extremo izquierdo del contenedor como en el derecho. Se empezó con una brida base de 43.5 cm de diámetro y un espesor de 1.2 mm.



Ilustración 16-2: Dibujo de la brida base del cobertor.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En esta brida, se colocó alrededor un pliegue y luego se le dio una profundidad de 40 mm.

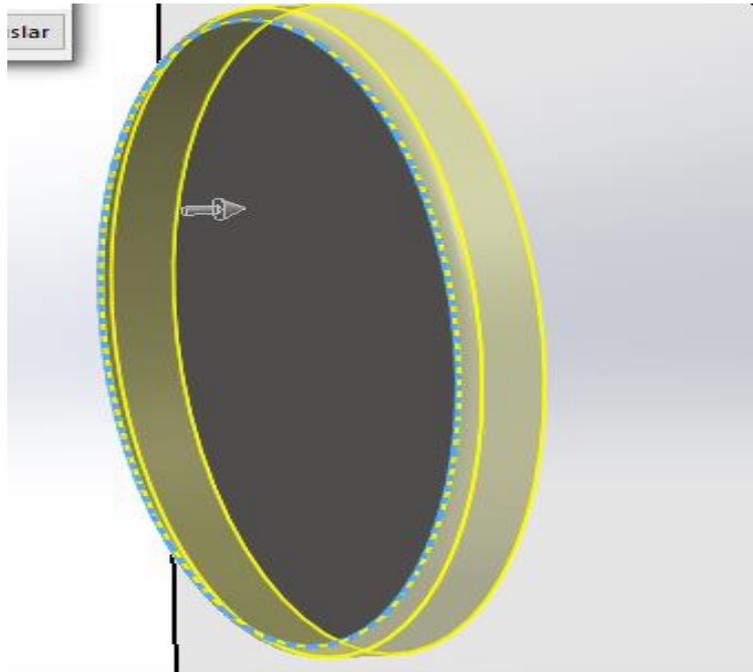


Ilustración 17-2: Profundidad de la brida base del cobertor.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Se replicó el mismo procedimiento para el extremo derecho del contenedor, obteniendo dos cobertores idénticos.

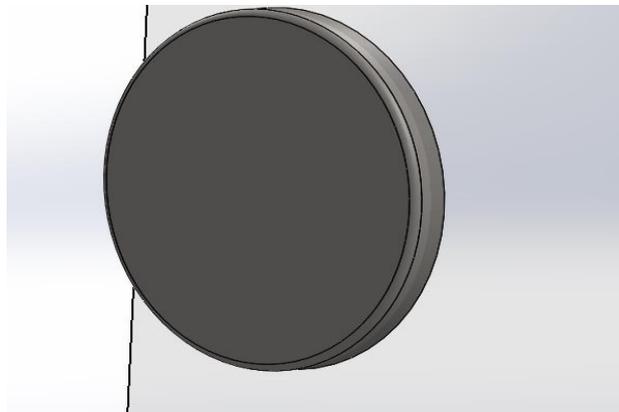


Ilustración 18-2: Cobertor de la cisterna finalizado.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.1.3. Diseño de reflector cilindro-parabólico

Se empezó con la creación de una chapa metálica mediante la creación de una nueva pieza.

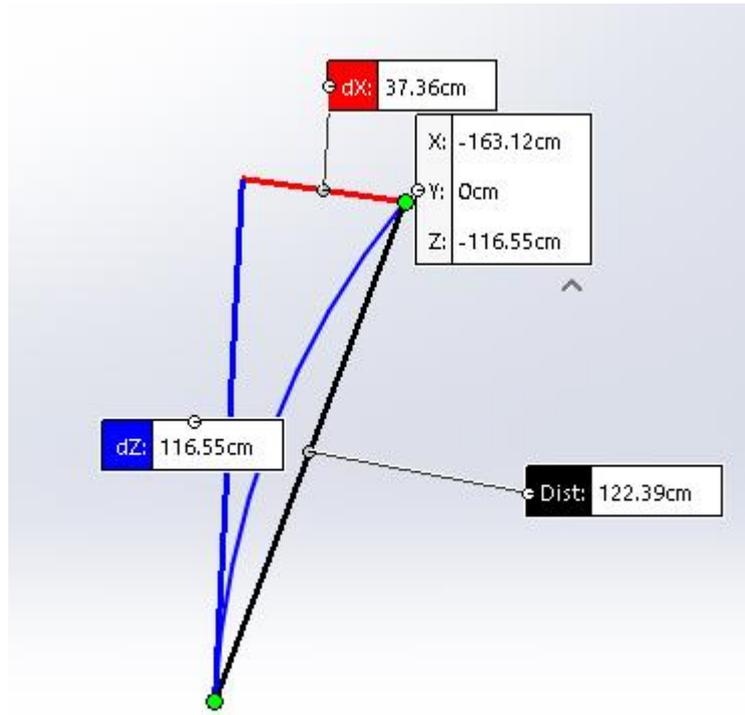


Ilustración 19-2: Bosquejo de la parábola.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Los parámetros iniciales fueron: largo de 1764 cm, radio de 200.47 cm, ángulo de 35.54°; longitud de arco de 124.37 cm; longitud de cuerda o ancho de 122.39 cm. El material elegido fue aluminio pulido.

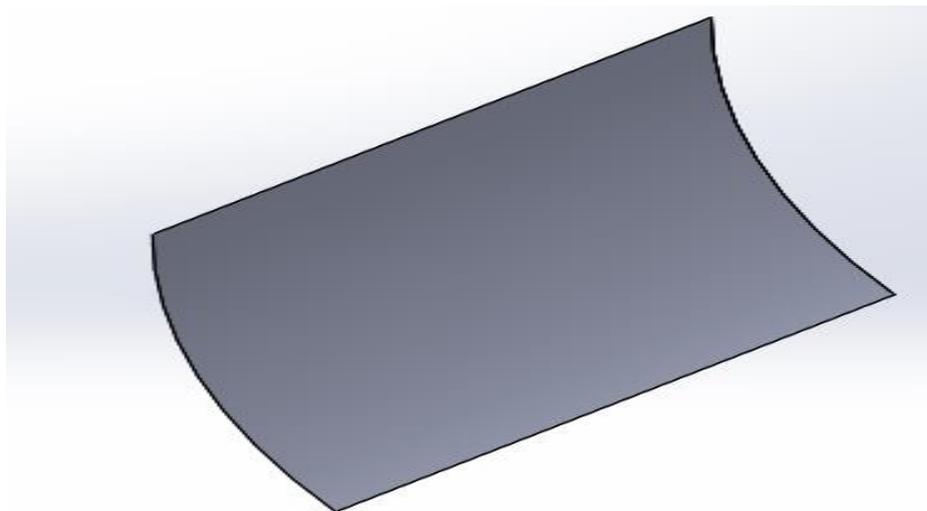


Ilustración 20-2: Reflector cilindro-parabólico.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.1.4. Ensamblaje

La primera parte del ensamblaje, consistió en colocar los cobertores en ambos lados del contenedor. Para esto, se empleó el plano alzado y se seleccionó la opción imitar componentes en el extremo derecho del contenedor para tener el mismo resultado en ambos lados. La componente seleccionada fue justamente el cobertor ya fabricado.

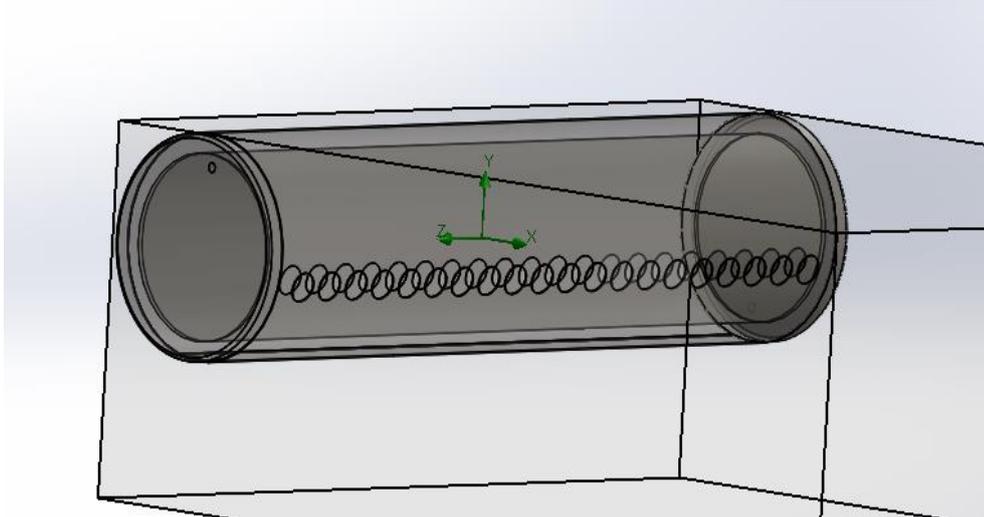


Ilustración 21-2: Contenedor ensamblado con cobertores.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Luego, se insertaron los tubos como nuevas componentes a ensamblar. Con la ayuda de la herramienta combinar se seleccionó el orificio circular de la cisterna interna y el extremo del tubo de vacío para que estos encajaran.

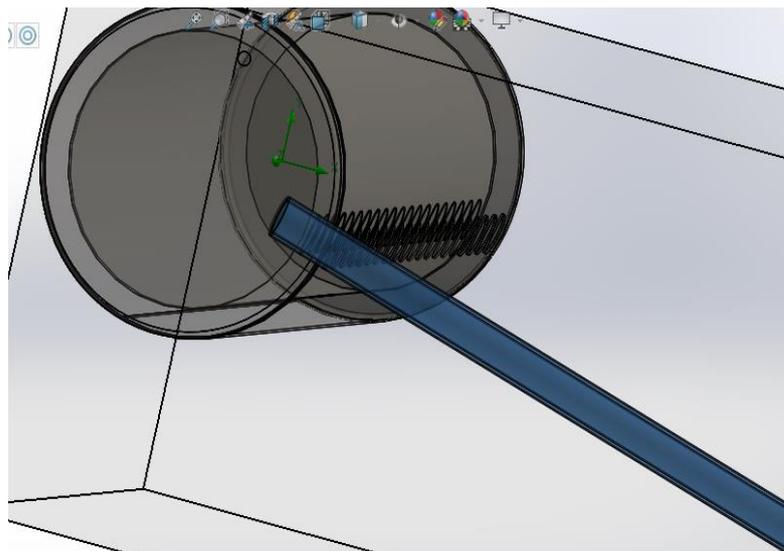


Ilustración 22-2: Ensamblaje de tubos en el contenedor.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Se repitió el proceso para cada uno de los tubos obteniendo el calentador solar resultante.

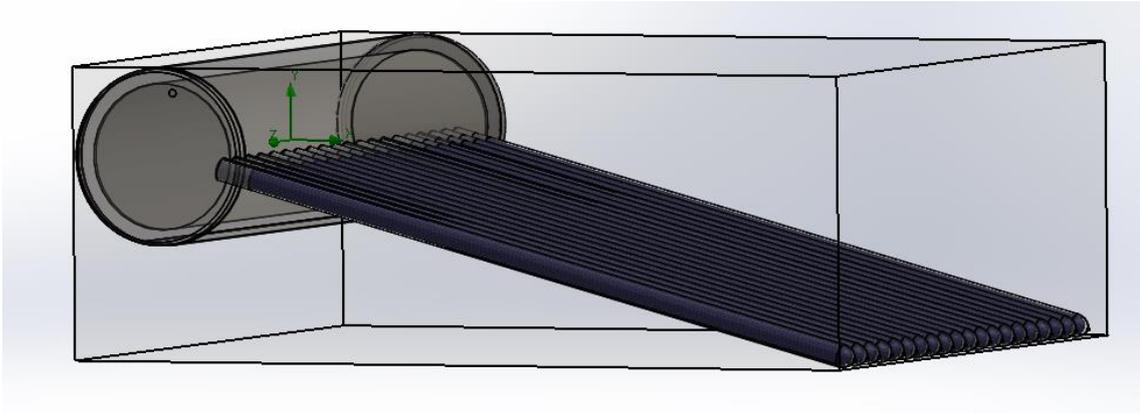


Ilustración 23-2: Calentador solar construido.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.1.5. Características físicas de los materiales

Tabla 11-2: Características físicas de los materiales de los tubos de vacío.

Material	Calor Específico (J/(kg*K))	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/(mK))	Coefficiente de absorción (1/mm)	Índice de refracción	Coefficiente de emisividad	Absorbancia solar
Borosilicato	834.6	2457.60	1.2	200.00	1	0.06	0.93
Nitrato de aluminio	800.0	3300.00	170.0	0	1	0.06	0.93

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.2. Razón de concentración

Para calcular la razón de concentración del colector solar se consideró las dimensiones del reflector y el receptor. La razón de concentración es importante para obtener valores considerables

de temperatura del fluido en el tanque, por ende, se procuró obtener un valor alto del mismo. En la ecuación 2-30, se tomó en cuenta el ancho W y largo L del reflector para el cálculo del área de apertura. Para obtener el área del cilindro receptor, se tomó en cuenta radio r y largo l del tubo externo del receptor.

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{W * L}{2\pi r l} = \frac{122.39 \text{ cm} * 176.38 \text{ cm}}{2\pi * 3 \text{ cm} * 176.38 \text{ cm}} = 6.5$$

Dadas las dimensiones del colector solar, y el hecho de que las temperaturas que se manejarán serán para uso doméstico o de baja demanda de energía, se considera que la razón de concentración es la apropiada.

2.3.3. Cálculo de la radiación total incidente en los tubos inclinados

Para obtener la radiación total incidente en los tubos inclinados se empleó el modelo HDKR. A partir de cada ángulo de inclinación se realizaron los respectivos cálculos. La latitud se tomó como -1.6562° . La densidad del suelo se la tomó con un valor de 0.6. Para cada caso, se calculó la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal I_0 . Para ello, se obtuvo previamente la declinación, los ángulos horarios y el enésimo día del año. Los datos tomados por hora para cada una de las fechas se midieron casi al mismo tiempo, difiriendo en apenas unos pocos segundos, por lo que se generalizó los ángulos horarios para todos los casos.

Tabla 12-2: Ángulos horarios iniciales y finales en función de los periodos de tiempo.

Hora	Ángulo horario inicial ω_1	Ángulo horario final ω_2
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	-15°	0°
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	0°	15°

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.3.1. 5 de enero del 2021

Se calculó la declinación. Para ello, se obtuvo el valor de la variable B tomando como 5 el valor del enésimo día.

$$B = (5 - 1) \frac{360}{365} = 3.94 \quad (51)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912\cos(3.94) + 0.070257\text{Sen}(3.94) - 0.006758\cos(2 * 3.94) + 0.000907\text{Sen}(2 * 3.94) - 0.002697\cos(3 * 3.94) + 0.00148\text{Sen}(3 * 3.94)) \quad (52)$$

$$\delta = -22.69^\circ \quad (53)$$

- Ángulo de inclinación de 10°

Se calculó la radiación extraterrestre sobre una superficie horizontal para cada una de las horas.

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} 1367 \left(1 + 0.033 \cos \frac{360 * 5}{365}\right) x \left[\cos - 1.6562 \cos - 22.69(\text{sen}(-30) - \text{sen}(-45)) + \frac{\pi(-30 - (-45))}{180} \text{sen} - 1.6562 \text{sen} - 22.69 \right] \quad (54)$$

$$I_o = 3764978,998 \text{ J/m}^2 \quad (55)$$

Luego, se obtuvo el valor del índice de claridad horario, calculando la razón entre la radiación global y extraterrestre sobre una superficie horizontal.

$$k_T = \frac{I}{I_o} = \frac{474.276 \text{ J/m}^2}{3764978,998 \text{ J/m}^2} = 0.00012 \quad (56)$$

Dado que el índice de claridad horario es menor a 0.22, podemos obtener la radiación difusa mediante la correlación de Erbs.

$$\frac{I_d}{I} = 1.0 - 0.09k_T = 1.0 - 0.09(0.00012) = 0.9999 \quad (57)$$

$$I_d = 0.9999I = 0.9999(474.276 \text{ MJ/m}^2) = 474.271 \text{ J/m}^2 \quad (58)$$

De esta relación anterior, obtenemos la radiación directa, tomando en cuenta que la radiación global sobre una superficie horizontal es la suma de sus componentes difusa y directa.

$$I_b = I - I_d = 474.276\text{J}/\text{m}^2 - 474.271\text{J}/\text{m}^2 \quad (59)$$

$$I_b = 0.005\text{MJ}/\text{m}^2 \quad (60)$$

Luego, calculamos el factor geométrico tomando el valor medio de los dos ángulos horarios.

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} = \frac{-35^\circ - 45^\circ}{2} = -37.5^\circ \quad (61)$$

$$R_b = \frac{\text{Cos}(\phi - \beta)\text{Cos}\delta\text{Cos}\omega + \text{Sen}(\phi - \beta)\text{Sen}\delta}{\text{Cos}(\phi)\text{Cos}\delta\text{Cos}\omega + \text{Sen}(\phi)\text{Sen}\delta} \quad (62)$$

$$R_b = (\text{Cos}(-1.6562 - 10)\text{Cos}(-22.69)\text{Cos}(-37.5) + \text{Sen}(-1.6562 - 10)\text{Sen}(-22.69))/(\text{Cos}(-1.6562)\text{Cos}(-22.69)\text{Cos}(-37.5) + \text{Sen}(-1.6562)\text{Sen}(-22.69)) \quad (63)$$

$$R_b = 0,834 \quad (64)$$

Para el modelo HDKR, es necesario obtener el índice anisotrópico y el factor modulante. Calculando la razón entre la radiación directa y extraterrestre sobre una superficie horizontal se obtiene el índice anisotrópico, y para el factor modulante se realiza la raíz cuadrada de la radiación directa sobre la radiación global sobre una superficie horizontal

$$A_i = \frac{I_b}{I_o} = \frac{0.005\text{J}/\text{m}^2}{3764978,998\text{J}/\text{m}^2} = 1.42 \times 10^{-9} \quad (65)$$

$$f = \sqrt{\frac{I_b}{I}} = \sqrt{\frac{0.005\text{J}/\text{m}^2}{474.276\text{J}/\text{m}^2}} = 0.0034 \quad (66)$$

Finalmente, podemos calcular la radiación total sobre el colector inclinado.

$$I_T = (0.005\text{J}/\text{m}^2 + 474.271\text{J}/\text{m}^2 * 1.42 \times 10^{-9})0,834 + 474.271\text{J}/\text{m}^2(1 - 1.42 \times 10^{-9})\left(\frac{1 + \text{Cos}10}{2}\right)\{1 + 0.0034 * \text{Sen}^3\left(\frac{10}{2}\right)\} + 474.276\text{J}/\text{m}^2 * 0.6\left(\frac{1 - \text{Cos}10}{2}\right) \quad (67)$$

$$I_T = 472,835137\text{J}/\text{m}^2 \quad (68)$$

De manera semejante se calcula la radiación total sobre el colector inclinado a 10° para las horas restantes.

Tabla 13-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 05-01-2021.

Horas	I_o (J/m ²)	k_T	I_d (J/m ²)	A_i	f	I_T (J/m ²)
9 a.m. – 10 a.m.	3764 978, 998	0,00012 597	474,2706 23	1,42817 E-09	0,00336 71	472,8351 37
10 a.m. – 11 a.m.	4375 085, 067	0,00024 5045	1072,068 36	5,40423 E-09	0,00469 617	1068.836 51
11 a.m. – 12 p.m.	4690 899, 208	0,00013 6891	642,1360 89	1,68653 E-09	0,00351 002	640,1943 57
12 p.m. – 1 p.m.	4690 899, 208	7,96225 E-05	373,4983 23	5,70576 E-10	0,00267 694	372,3667 93
1 p.m. – 2 p.m.	4375 085, 067	6,82343 E-05	298,5291 67	4,19033 E-10	0,00247 812	297,6243 14

2 p.m. – 3 p.m.	3764 978, 998	0,00010 7325	404,0730 97	1,03668 E-09	0,00310 794	402,8494 41
3 p.m. – 4 p.m.	2902 158, 72	4,998E- 05	145,0493 48	2,2482E -10	0,00212 09	144,6092 84
4 p.m. – 5 p.m.	1845 424, 01	0,00030 7999	568,3732 44	8,53771 E-09	0,00526 497	566,6574 11
5 p.m. – 6 p.m.	6667 89,5 913	0,00010 1627	67,76338 02	9,29529 E-10	0,00302 431	67,55810 35

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 20°

Se sigue el mismo procedimiento, pero se cambia el ángulo de inclinación por 20°. El único parámetro que se ve afectado por esto es el factor geométrico.

$$R_b = (\text{Cos}(-1.6562 - 20) \text{Cos}(-22.69) \text{Cos}(-37.5) + \text{Sen}(-1.6562 - 20) \text{Sen}(-22.69)) / (\text{Cos}(-1.6562) \text{Cos}(-22.69) \text{Cos}(-37.5) + \text{Sen}(-1.6562) \text{Sen}(-22.69)) \quad (69)$$

$$R_b = 0,886 \quad (70)$$

De tal forma, se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 14-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 05-01-2021.

Horas	I_o (J/m ²)	k_T	I_d (J/m ²)	A_i	f	I_T (J/m ²)
9 a.m. – 10 a.m.	376497 8,998	0,00012597	474,2706 23	1,42817 E-09	0,00336 71	468,56319

10 a.m. – 11 a.m.	437508 5,067	0,00024504 5	1072,068 36	5,40423 E-09	0,00469 617	1059,1865 7
11 a.m. – 12 p.m.	469089 9,208	0,00013689 1	642,1360 89	1,68653 E-09	0,00351 002	634,41061 5
12 p.m. – 1 p.m.	469089 9,208	7,96225E- 05	373,4983 23	5,70576 E-10	0,00267 694	369,00123
1 p.m. – 2 p.m.	437508 5,067	6,82343E- 05	298,5291 67	4,19033 E-10	0,00247 812	294,93403 4
2 p.m. – 3 p.m.	376497 8,998	0,00010732 5	404,0730 97	1,03668 E-09	0,00310 794	399,20928 5
3 p.m. – 4 p.m.	290215 8,72	4,998E-05	145,0493 48	2,2482E -10	0,00212 09	143,30192 6
4 p.m. – 5 p.m.	184542 4,01	0,00030799 9	568,3732 44	8,53771 E-09	0,00526 497	561,54500 7
5 p.m. – 6 p.m.	666789, 5913	0,00010162 7	67,76338 02	9,29529 E-10	0,00302 431	66,947915 2

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 35°

Se halló el facto geométrico y se procedió a calcular la radiación total sobre una superficie inclinada.

$$R_b = 0,913$$

(71)

Tabla 15-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 05-01-2021.

Horas	I_o (J /m ²)	k_T	I_d (J/m ²)	A_i	f	I_T (J/m ²)
9 a.m. – 10 a.m.	376497 8,998	0,00012597	474,2706 23	1,42817 E-09	0,00336 71	457,16114 6
10 a.m. – 11 a.m.	437508 5,067	0,00024504 5	1072,068 36	5,40423 E-09	0,00469 617	1033,4407 1
11 a.m. – 12 p.m.	469089 9,208	0,00013689 1	642,1360 89	1,68653 E-09	0,00351 002	618,97434 9

12 p.m. – 1 p.m.	469089 9,208	7,96225E- 05	373,4983 23	5,70576 E-10	0,00267 694	360,01658 3
1 p.m. – 2 p.m.	437508 5,067	6,82343E- 05	298,5291 67	4,19033 E-10	0,00247 812	287,75165 5
2 p.m. – 3 p.m.	376497 8,998	0,00010732 5	404,0730 97	1,03668 E-09	0,00310 794	389,49277 4
3 p.m. – 4 p.m.	290215 8,72	4,998E-05	145,0493 48	2,2482E -10	0,00212 09	139,81118 5
4 p.m. – 5 p.m.	184542 4,01	0,00030799 9	568,3732 44	8,53771 E-09	0,00526 497	547,90520 4
5 p.m. – 6 p.m.	666789, 5913	0,00010162 7	67,76338 02	9,29529 E-10	0,00302 431	65,318761 6

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 45°

Se realizó el mismo procedimiento anterior, calculando el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 0,891$$

(72)

Tabla 16-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 05-01-2021.

Horas	I_o (J /m ²)	k_T	I_d (J/m ²)	A_i	f	I_T (J/m ²)
9 a.m. – 10 a.m.	376497 8,998	0,00012597	474,2706 23	1,42817 E-09	0,00336 71	446,57017 8
10 a.m. – 11 a.m.	437508 5,067	0,00024504 5	1072,068 36	5,40423 E-09	0,00469 617	1009,5328 4
11 a.m. – 12 p.m.	469089 9,208	0,00013689 1	642,1360 89	1,68653 E-09	0,00351 002	604,63662 3
12 p.m. – 1 p.m.	469089 9,208	7,96225E- 05	373,4983 23	5,70576 E-10	0,00267 694	351,66989 3
1 p.m. – 2 p.m.	437508 5,067	6,82343E- 05	298,5291 67	4,19033 E-10	0,00247 812	281,07897 9

2 p.m. – 3 p.m.	376497 8,998	0,00010732 5	404,0730 97	1,03668 E-09	0,00310 794	380,46696 1
3 p.m. – 4 p.m.	290215 8,72	4,998E-05	145,0493 48	2,2482E -10	0,00212 09	136,56791 2
4 p.m. – 5 p.m.	184542 4,01	0,00030799 9	568,3732 44	8,53771 E-09	0,00526 497	535,23976 3
5 p.m. – 6 p.m.	666789, 5913	0,00010162 7	67,76338 02	9,29529 E-10	0,00302 431	63,805254 1

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.3.2. 7 de enero del 2021

Se calculó la declinación tomando el 7 de marzo como el 66 día del año. Para esto se empezó obteniendo el valor de la variable B.

$$B = (7 - 1) \frac{360}{365} = 5.92 \quad (73)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right) (0.006918 - 0.399912 \cos(64.11) + 0.070257 \sin(64.11) - 0.006758 \cos(2 * 64.11) + 0.000907 \sin(2 * 64.11) - 0.002697 \cos(3 * 64.11) + 0.00148 \sin(3 * 64.11)) \quad (74)$$

$$\delta = -22.47^\circ \quad (75)$$

- Ángulo de inclinación de 10°

Desarrollando el mismo procedimiento para todas las horas se obtiene la Tabla 17-2.

Tabla 17-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 07-01-2021.

Horas	I_o (J/m ²)	k_T	I_d (J/m ²)	A_i	f	I_T (J/m ²)
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4697456, 092	0,000118 386	556,105 075	1,26136E- 09	0,003264 15	554,422 479

12:00:09 p. m.	4697456,	0,000247	1161,23	5,50014E-	0,004716	1157,73
- 1:00:10 p. m.	092	21	116	09	87	218
12:00:09 p. m.	4381158,	0,000278	1222,13	7,00363E-	0,005010	1218,45
- 1:00:10 p. m.	132	959	232	09	62	186

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 20°

Se realizó el mismo procedimiento anterior, calculando el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 1.01$$

(76)

Tabla 18-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 7-01-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4697456, 092	0,000118 386	556,105 075	1,26136E- 09	0,003264 15	549,41297 6
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4697456, 092	0,000247 21	1161,23 116	5,50014E- 09	0,004716 87	1147,2795 5
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4381158, 132	0,000278 959	1222,13 232	7,00363E- 09	0,005010 62	1207,4530 1

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 35°

Se calculó el factor geométrico considerando el nuevo ángulo

$$R_b = 0.99$$

(77)

Tabla 19-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 7-01-2021.

Horas	$I_o(\text{J}/\text{m}^2)$	k_T	$I_d(\text{J}/\text{m}^2)$	A_i	f	$I_T(\text{J}/\text{m}^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4697456, 092	0,000118 386	556,105 075	1,26136E- 09	0,003264 15	536,04209 4
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4697456, 092	0,000247 21	1161,23 116	5,50014E- 09	0,004716 87	1119,3924 9
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4381158, 132	0,000278 959	1222,13 232	7,00363E- 09	0,005010 62	1178,1109 7

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 45°

Se obtuvo primero el factor geométrico considerando el ángulo de 45° y luego se obtuvo los valores de radiación total sobre la superficie inclinada respectivos para cada hora.

$$R_b = 0.94 \quad (78)$$

Tabla 20-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 7-01-2021.

Horas	$I_o(\text{J}/\text{m}^2)$	k_T	$I_d(\text{J}/\text{m}^2)$	A_i	f	$I_T(\text{J}/\text{m}^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4697456, 092	0,000118 386	556,105 075	1,26136E- 09	0,003264 15	523,62213 6
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4697456, 092	0,000247 21	1161,23 116	5,50014E- 09	0,004716 87	1093,4964 7
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4381158, 132	0,000278 959	1222,13 232	7,00363E- 09	0,005010 62	1150,8654

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.3.3. 27 de septiembre del 2021

Se obtuvo primero la declinación tomando en cuenta que 22 de septiembre es el 265 día del año.

$$B = (270 - 1) \frac{360}{365} = 265.3 \quad (79)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912\text{Cos}(265.3) + 0.070257\text{Sen}(265.3) - 0.006758\text{Cos}(2 * 265.3) + 0.000907\text{Sen}(2 * 265.3) - 0.002697\text{Cos}(3 * 265.3) + 0.00148\text{Sen}(3 * 265.3)) \quad (80)$$

$$\delta = -1.30^\circ \quad (81)$$

- Ángulo de inclinación de 10°

En la Tabla 21-2 se resume los coeficientes y datos de radiación obtenidos.

Tabla 21-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 27-09-2021.

Horas	$I_o(\text{J}/\text{m}^2)$	k_T	$I_d(\text{J}/\text{m}^2)$	A_i	f	$I_T(\text{J}/\text{m}^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4854910, 636	0,000203 218	986,586 955	3,71678E- 09	0,004276 64	983,60972 8
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4854910, 636	0,000173 489	842,261 849	2,70887E- 09	0,003951 46	839,71776 2
1:00:10 p. m. - 2:00:09 p. m.	4524277, 441	0,000107 55	486,583 29	1,04104E- 09	0,003111 2	485,11013 5

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 45°

Calculamos el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 0,566 \quad (82)$$

Tabla 22-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 27-09-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4854910, 636	0,000203 218	986,586 955	3,71678E- 09	0,004276 64	929,01003 6
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4854910, 636	0,000173 489	842,261 849	2,70887E- 09	0,003951 46	793,09282 8
1:00:10 p. m. - 2:00:09 p. m.	4524277, 441	0,000107 55	486,583 29	1,04104E- 09	0,003111 2	458,15580 4

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.3.4. 14 de noviembre del 2021

Se obtuvo primero la declinación tomando en cuenta que 14 de noviembre es el 265 día del año.

$$B = (318 - 1) \frac{360}{365} = 312.66 \quad (83)$$

$$\delta = \left(\frac{180}{\pi}\right)(0.006918 - 0.399912\text{Cos}(312.66) + 0.070257\text{Sen}(312.66) - 0.006758\text{Cos}(2 * 312.66) + 0.000907\text{Sen}(2 * 312.66) - 0.002697\text{Cos}(3 * 312.66) + 0.00148\text{Sen}(3 * 312.66)) \quad (84)$$

$$\delta = -18.04^\circ \quad (85)$$

- Ángulo de inclinación de 10°

La Tabla 23-2 resume los resultados obtenidos para 10°.

Tabla 23-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 10° el 14-11-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4774559, 032	0,000198 082	945,737 14	3,53128E- 09	0,004222 25	942,88310 3
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4774559, 032	0,000227 592	1086,62 874	4,66183E- 09	0,004525 84	1083,3526 4

1:00:10 p. m. -	4452250,	0,000259	1154,89	6,05605E-	0,004831	1151,4160
2:00:09 p. m.	96	402	604	09	79	9

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 20°

Calculamos el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 1.01 \quad (86)$$

Tabla 24-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 20° el 14-11-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m.						
-	4774559,	0,000198	945,737	3,53128E-	0,004222	934,36770
12:00:09 p. m.	032	082	14	09	25	5
12:00:09 p. m.	4774559,	0,000227	1086,62	4,66183E-	0,004525	1073,5701
- 1:00:10 p. m.	032	592	874	09	84	7
1:00:10 p. m. -	4452250,	0,000259	1154,89	6,05605E-	0,004831	1141,0208
2:00:09 p. m.	96	402	604	09	79	8

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 35°

Calculamos el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 1.01 \quad (87)$$

Tabla 25-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 35° el 14-11-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4774559,032	0,000198082	945,73714	3,53128E-09	0,00422225	911,646098
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4774559,032	0,000227592	1086,62874	4,66183E-09	0,00452584	1047,47006
1:00:10 p. m. - 2:00:09 p. m.	4452250,96	0,000259402	1154,89604	6,05605E-09	0,00483179	1113,28831

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- Ángulo de inclinación de 45°

Calculamos el factor geométrico y luego la radiación total sobre la superficie inclinada para cada hora.

$$R_b = 0.89$$

(88)

Tabla 26-2: Coeficientes y datos de radiación para un colector inclinado a 45° el 14-11-2021.

Horas	$I_o(J/m^2)$	k_T	$I_d(J/m^2)$	A_i	f	$I_T(J/m^2)$
11:00:09 a. m. - 12:00:09 p. m.	4774559,032	0,000198082	945,73714	3,53128E-09	0,00422225	890,544726
12:00:09 p. m. - 1:00:10 p. m.	4774559,032	0,000227592	1086,62874	4,66183E-09	0,00452584	1023,23263
1:00:10 p. m. - 2:00:09 p. m.	4452250,96	0,000259402	1154,89604	6,05605E-09	0,00483179	1087,53651

Realizado por: Bustos, J., 2023.

2.3.4. Cálculo del factor de intercepción

Una vez se determinó, mediante los datos de la simulación, que ángulo de inclinación del colector y que fecha de las 3 elegidas presentaban el mejor desempeño del sistema, se procedió a calcular

el factor de intercepción mediante la ecuación (4), la cual es una fracción de la radiación reflejada que llega a los tubos de vacío. En el numerador se ingresó los datos de la fracción de intensidad solar absorbida por el receptor y en el denominador se colocó la intensidad solar reflejada por el reflector. Las variables A y B en la integral corresponden al ancho de apertura del reflector.

2.3.5. Cálculo de los ángulos de incidencia

El ángulo de incidencia respecto a una superficie horizontal se calculó a partir de la ecuación 30. Para el cálculo se tomó en cuenta la declinación del 5 de enero.

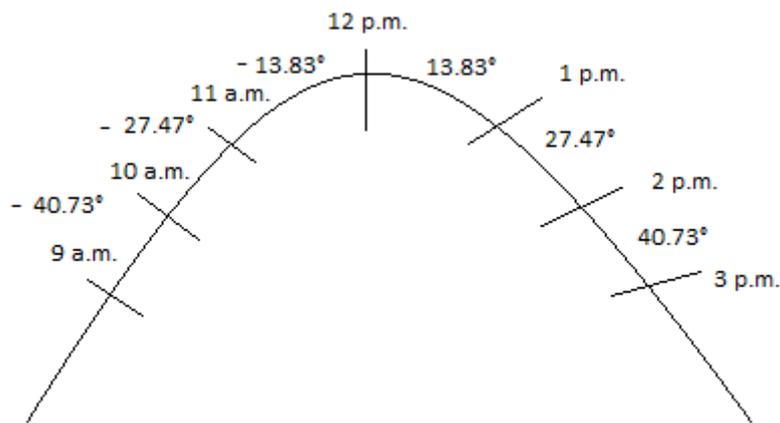


Ilustración 24-2: Ángulos de incidencia el 5 de enero del 2021.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

2.3.6. Pre-simulación sin reflector

La simulación, se llevó a cabo con un Software de diseño y simulación que nos permitió realizar análisis ópticos y térmicos. La temperatura ambiente y presión atmosférica se tomaron como constantes igual a 293.2 K y 1022 hPa, respectivamente. La intensidad de la radiación solar se insertó como función del tiempo gracias a la herramienta Wizard. Es importante mencionar que para especificar la dirección de los rayos solares se colocó el ángulo azimutal y altitud del sol para cada hora, partiendo desde las 11:00 a.m. hasta las 1:00 p.m. Para esta investigación se tomó la aceleración de la gravedad como una constante igual a $-9.8m/s^2$. Se analizó el agua en los tubos y en el tanque. Los tubos se rotaron usando los 4 ángulos empleados anteriormente. La inclinación de los tubos respecto a la horizontal generaba una variación de la altura del tanque respecto a los mismos. Se tomó en cuenta esta altura y el ángulo de inclinación para analizar su impacto en el efecto termosifón del sistema.

2.3.6.1. Introducción de datos en el simulador

Se creó un proyecto con la herramienta Wizard en el simulador. Ahí, se eligió como sistema de unidades el SI. Luego, como tipo de análisis, se eligió análisis interno. En cuanto a las características físicas, se marcó conducción de calor en sólidos. Aparte, en el estudio se especificó que es dependiente del tiempo, que incluye efectos gravitacionales y de radiación. El modelo de radiación fue de tipo transferencia discreta. La radiación solar se definió según la dirección e intensidad de los rayos y también en función del ángulo azimutal y la altitud. Se colocó primero los valores del ángulo azimutal y altitud por hora desde las 11 a.m. hasta las 1 p.m., lo cual, generaba automáticamente las componentes cartesianas de los rayos.

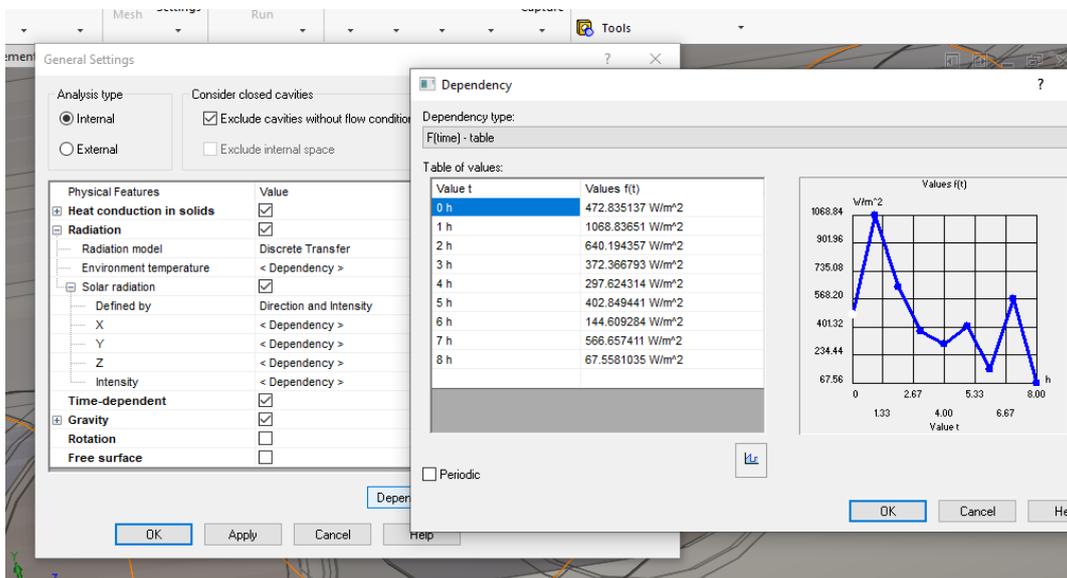


Ilustración 25-2: Configuraciones generales del proyecto e introducción de datos.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

Como fluido por defecto se eligió el agua. El movimiento del agua se consideró como laminar y turbulento. La velocidad del viento se tomó como una constante igual 5 m/s. Por último, la temperatura del cielo se tomó como 3°C.

2.3.6.2. Ángulos de inclinación y alturas del tanque

Se realizaron 4 configuraciones diferentes para analizar el efecto termosifón en función del ángulo de inclinación y la altura. El ángulo de inclinación se tomó respecto a la horizontal y únicamente giraban los tubos manteniéndose el tanque fijo. Una vez se inclinó los tubos a un ángulo específico, se registró la altura del tanque tomando como punto de referencia el extremo de los tubos.

Tabla 27-2: Configuraciones de ángulos de inclinación y alturas del tanque.

Ángulo de inclinación (grados)	Altura (cm)
10°	18.38
20°	20.63
35°	24.01
45°	26.07

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Para determinar el efecto de la altura de los tubos respecto al techo del tanque en el efecto termosifón, se eligió un ángulo de 10° de inclinación el 14/11/2021, pero con los tubos insertados en el fondo del tanque, de tal forma que la altura de los tubos respecto al techo del tanque aumentaba a 28cm.

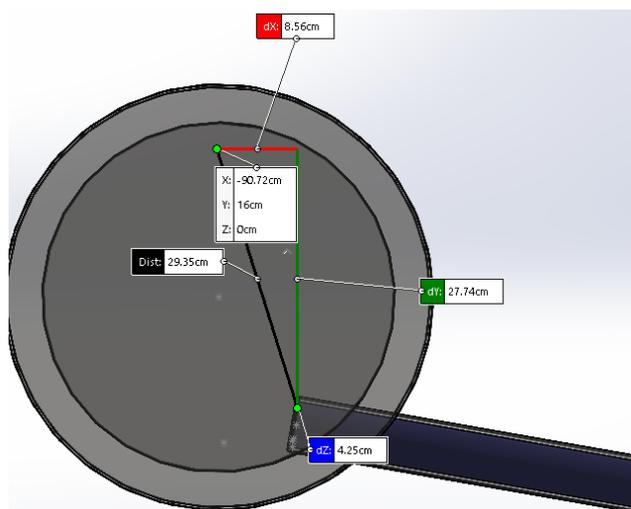


Ilustración 26-2: Tubos inclinados a 10° con nueva altura.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

Para el análisis del efecto de la altura de los tubos en el efecto termosifón, se tomó en cuenta únicamente la distribución de la temperatura del tanque y la velocidad de salida del agua en los tubos.

2.3.6.3. Toma de datos del tanque y boca del tubo

Para obtener datos del tanque, se colocaron puntos que daban datos de temperatura del fluido en varios sectores del tanque. Se eligió un punto en el centro del tanque y dos puntos cerca del techo y el fondo. Para los datos de velocidad, se fijó en la boca del tubo 2 puntos próximos a las paredes del mismo. El punto D se empleó para registrar la velocidad de salida del agua. Por último, se colocó el punto E para obtener la temperatura en la boca del tubo.

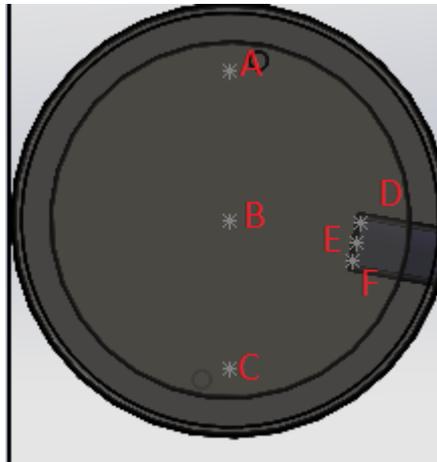


Ilustración 27-2: Puntos de análisis en el tanque y la boca del tubo.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

2.3.6.4. Toma de datos del tubo, del cobertor y absorbedor

Se colocó un punto H en el extremo inferior del tubo y un punto G en el centro del tubo para obtener datos de temperatura del agua. Los puntos mencionados se ilustran en la Ilustración 28-2.

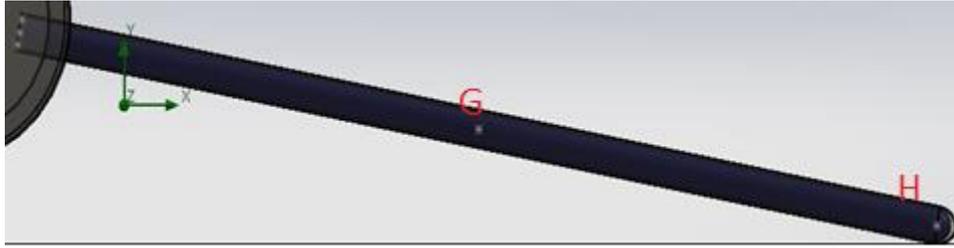


Ilustración 28-2: Puntos de análisis del tubo de vacío.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

Para obtener los datos de temperatura del absorbedor y cobertor se marcó ambas superficies en un tubo de vacío y se fijó una meta superficial.

2.3.7. *Pre-simulación con reflector*

Los datos de intensidad, temperatura, presión, las configuraciones del colector, las fechas y horas empleadas fueron las mismas. Se introdujo el reflector cilindro-parabólico en el sistema. Se analizó el impacto del ángulo de inclinación y la curvatura del reflector en el desempeño del colector solar. Los ángulos de inclinación del reflector fueron en el sentido de las manecillas del reloj. El arco de la parábola del reflector se varió en la simulación para determinar si es más eficiente un reflector con mayor o menor curvatura. Para determinar el impacto de la forma del reflector se comparó los resultados previos obtenidos con una parábola de ángulo de 35° con los obtenidos con una parábola de 25° y 15° . Para estas simulaciones, se ejecutó el programa entre 9 a.m. y 10 p.m. La disposición del reflector se ilustra en la Ilustración 29-2.

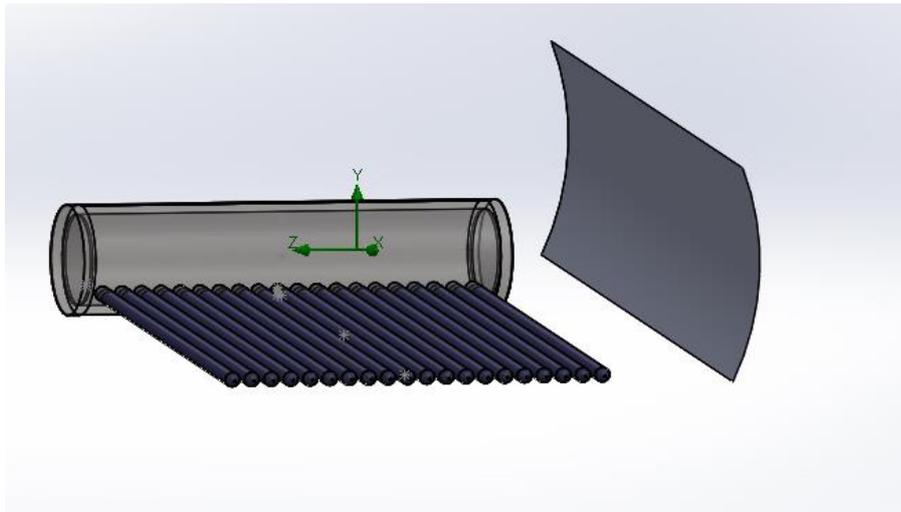


Ilustración 29-2: Reflector solar de cara al oeste.

Realizado por: Bustos, J. 2022.

Tabla 28-2: Parámetros y valores de experimentación para el reflector.

Parámetros	Valores
Ángulo de inclinación del reflector (°)	10°, 20°, 30°, 5°
Ángulo de la parábola	25°, 45°, 15°

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Se eligió los 3 puntos H, G y E del tubo de vacío para analizar la temperatura del agua. Se tomó datos de temperatura del cobertor, receptor y la intensidad reflejada por el reflector y la absorbida por el absorbedor. Se ignoró los datos de temperatura del agua en el tanque en este apartado.

2.4. Simulación

Con la herramienta Opciones de Control de Cálculo se especificó 2 horas como el tiempo físico de simulación y se seleccionó todos los objetivos a simular. Por último, se dio a la opción Correr para simular. Se realizó un total de 21 simulaciones. Quince de las simulaciones se realizaron sin reflector para analizar la configuración apropiada de los tubos de vacío, las restantes fueron para descubrir que parámetros del reflector aumentan la temperatura de los tubos. Las simulaciones con reflector se realizaron únicamente con un ángulo de inclinación de tubos. El nivel de la malla inicial se colocó en 4. El tamaño mínimo de los huecos de malla se colocó en 0.028m para obtener resultados más precisos.

2.5. Técnicas para la recolección de datos

Una vez se finalizó el proceso de simulación, se obtuvo los resultados respectivos para cada caso. Para extraer los datos, se cargó en SolidWorks los resultados de la simulación. Luego, en la opción Goal Plot se marcó los parámetros de estudio y la componente del sistema que se deseó analizar. Las componentes analizadas fueron tubos externos, tubos internos y el tanque.

Una vez se encasilló los parámetros, se exportó a Excel los resultados obtenidos durante un tiempo físico de 2 horas, obteniendo los datos por hora de las variables, los valores máximos y mínimos, el promedio y los gráficos de los parámetros versus el tiempo.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

3.1. Análisis de resultados

Para el desarrollo del análisis e interpretación de resultados este proyecto se dividió por apartados.

3.1.1. Análisis de resultados térmicos del calentador solar sin reflector

Se obtuvo datos de temperatura del tanque y los tubos de vacío para cada una de las fechas empleadas y para los 4 ángulos de inclinación sin el uso del reflector.

3.1.1.1. Análisis de resultados obtenidos el 05/01/2021

En la simulación efectuada el 05/01/2021 para un tubo externo inclinado a 10° , 20° , 35° y 45° respecto a la horizontal, se obtuvo las siguientes gráficas de temperaturas del fluido en el colector solar versus tiempo y de velocidad de salida del fluido en función de la hora.

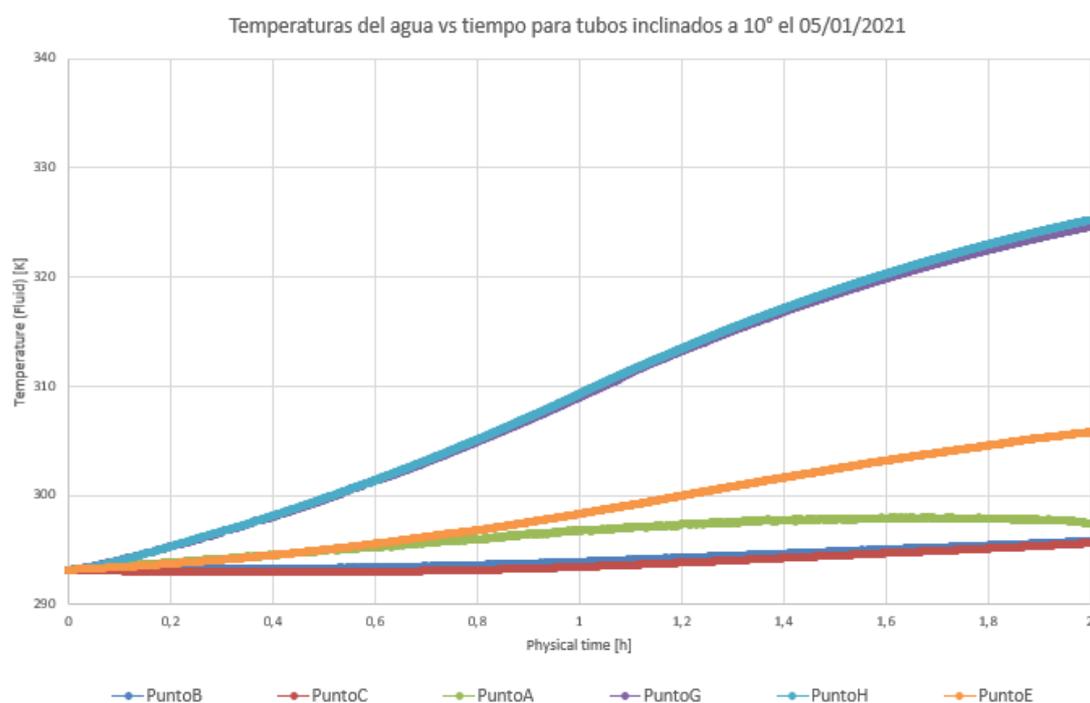


Ilustración 1-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 5/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

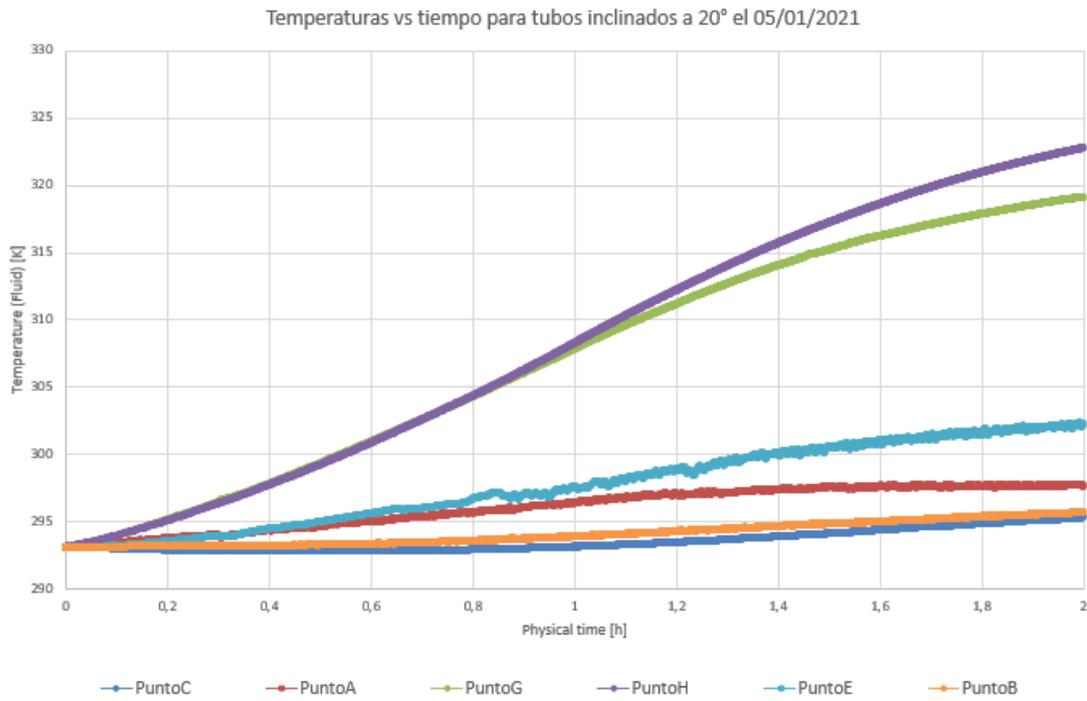


Ilustración 2-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 5/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

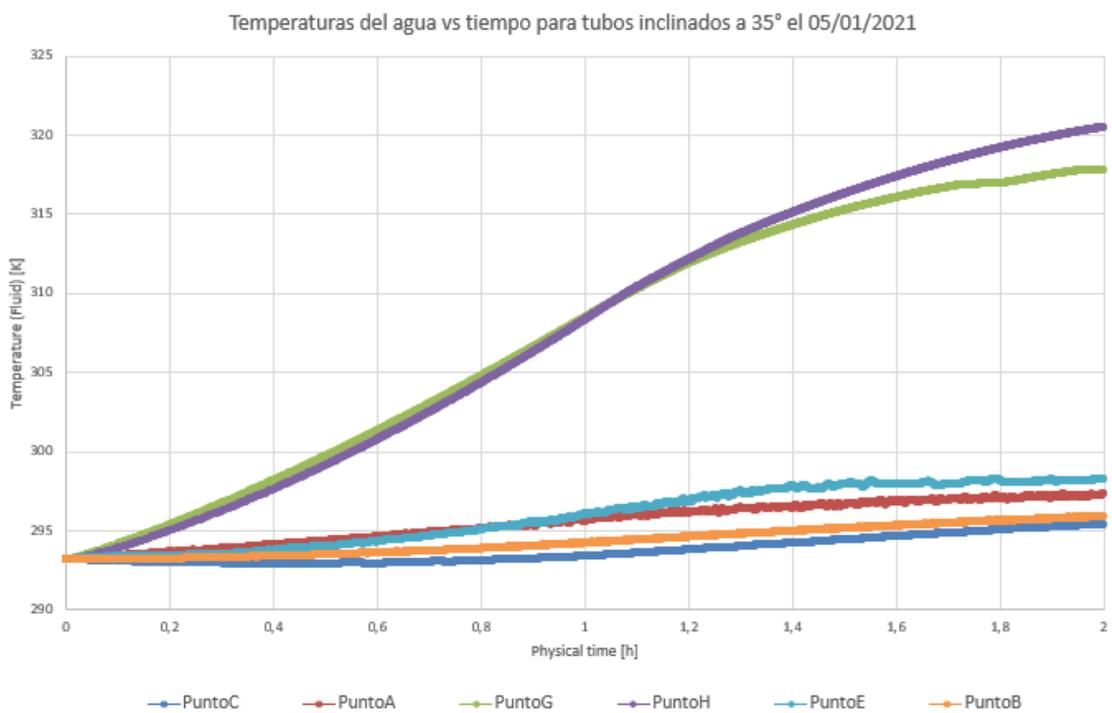


Ilustración 3-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 5/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

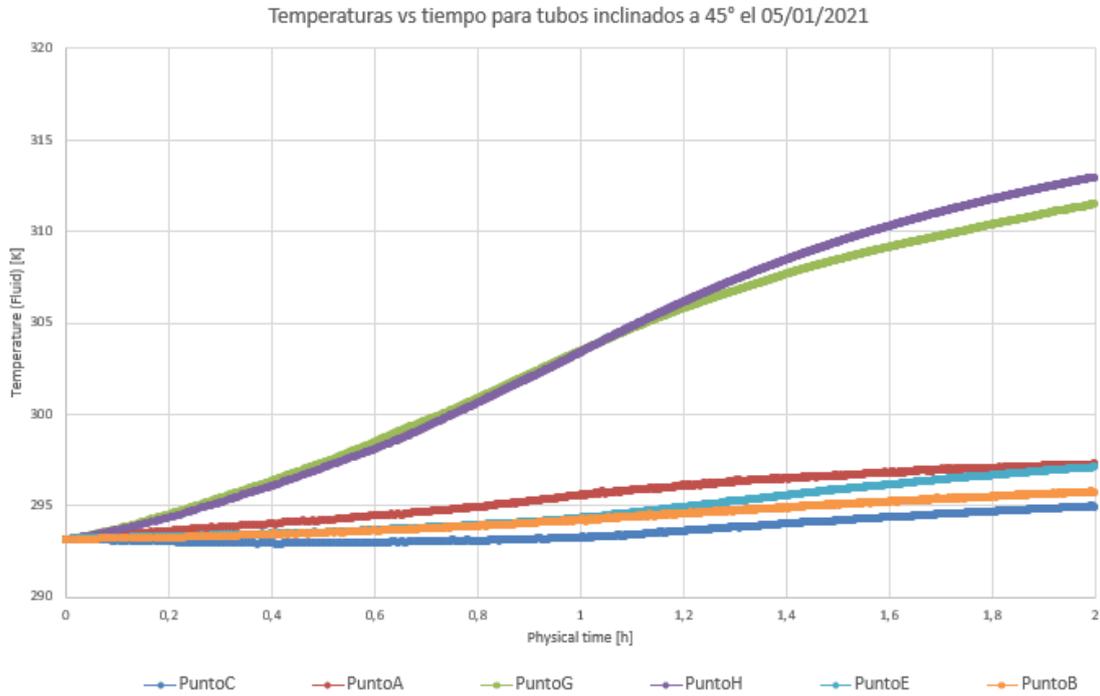


Ilustración 4-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 5/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En las Ilustraciones 1-3, 2-3, 3-3 y 4-3 se observa un patrón en la distribución de las temperaturas, el agua en el extremo inferior del tubo es más alta, seguida por el agua en el centro y en la boca del tubo. Se observa mayores promedios y máximos de temperatura del agua para el ángulo de 10° en los 3 puntos de los tubos. En el tanque se apreciaron temperaturas semejantes para todos los ángulos.

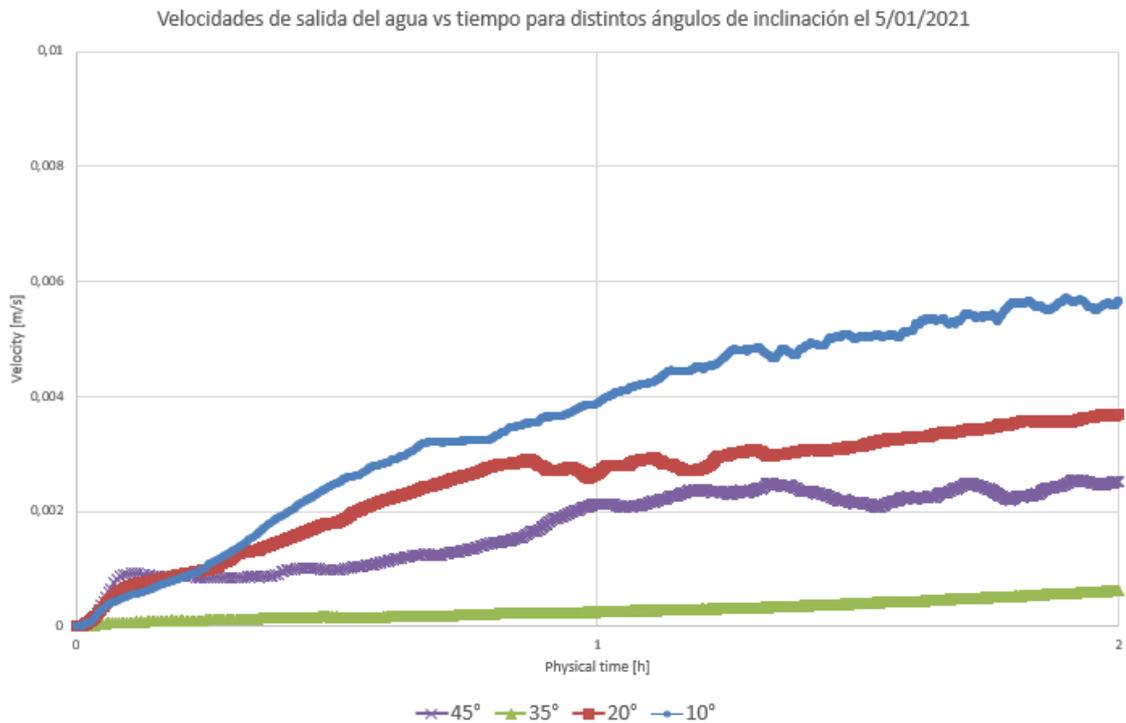


Ilustración 5-3: Velocidades de salida del agua para distintos ángulos de inclinación el 5/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 5-3 se observa una mayor velocidad de salida para el ángulo de 10°, seguido por el ángulo de 20°, 45° y por último el de 35°. Esto, junto con las distribuciones de temperatura del agua en los tubos, nos demuestra que el efecto termosifón tiene un mejor desempeño para un ángulo de 10°, es decir, para ángulos de inclinación bajos.

- Resultados específicos

Las tablas 1-3 resume los datos obtenidos del cobertor y absorbedor, la tabla 2-3 resume los resultados del tanque, respectivamente.

Tabla 1-3: Valores del tubo de vacío 05/01/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del agua en el punto H (K)	10	293,12	325,2353	313,3614281	0,157892047
	20	293,12	322,817	311,3246007	0,138088623
	35	293,12	317,8492	310,6525469	0,162979472
	45	293,12	312,99	306,0642498	0.240714564
Temperatura del agua en el punto G (K)	10	293,12	324,63	313,1950185	0,154587665
	20	293,12	319,1714	309,9445564	0,143530887
	35	293,12	320,5476	311,3713049	0,180418717
	45	293,12	297,1191	295,2652174	0.240714564
Temperatura del agua en el punto E (K)	10	293,12	305,8133	300,3891256	3.81757419
	20	293,12	302,4166	298,6754197	0,037374231
	35	293,12	298,3241	296,6756899	0,023945213
	45	293,12	297,1191	295,2652174	0.240714564
Velocidad en el punto D (m/s)	10	7.22E-05	0,005715	0,004262034	9,62537E-05
	20	0.00020	0,003693	0,002779135	6,26474E-05
	35	5,69E-05	0,000623	0,00034581	4,98796E-06
	45	4,62E-05	0,002556	0,001993047	0.240714564

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 2-3: Valores obtenidos del tanque el 05/01/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto C (K)	10	292,9780	295,6728	294,1266273	0,007171083
	20	293,055	295,3559	293,8144937	0,004404689
	35	292,2423	295,4364	294,0717959	0,008051659
	45	292,9479	294,9845	293,8837921	0,0159238801
Temperatura del fluido en el punto B (K)	10	293,12	295,8917	294,4852447	0,003569816
	20	293,12	295,771	294,4112534	0,009092701
	35	293,12	295,9632	294,7276807	0,008669748
	45	293,12	295,7848	294,6792129	0,0100663993
Temperatura del fluido en el punto A (K)	10	293,12	297,9996	296,8915333	0,043250346
	20	293,12	297,8415	296,5742346	0,050185019
	35	293,12	297,4054	296,054289	0,033605276
	45	293,12	297,3003	296,0077436	0,00603483128

Realizado por: Bustos, J., 2023.

3.1.1.2. Resultados obtenidos el 27/09/2021

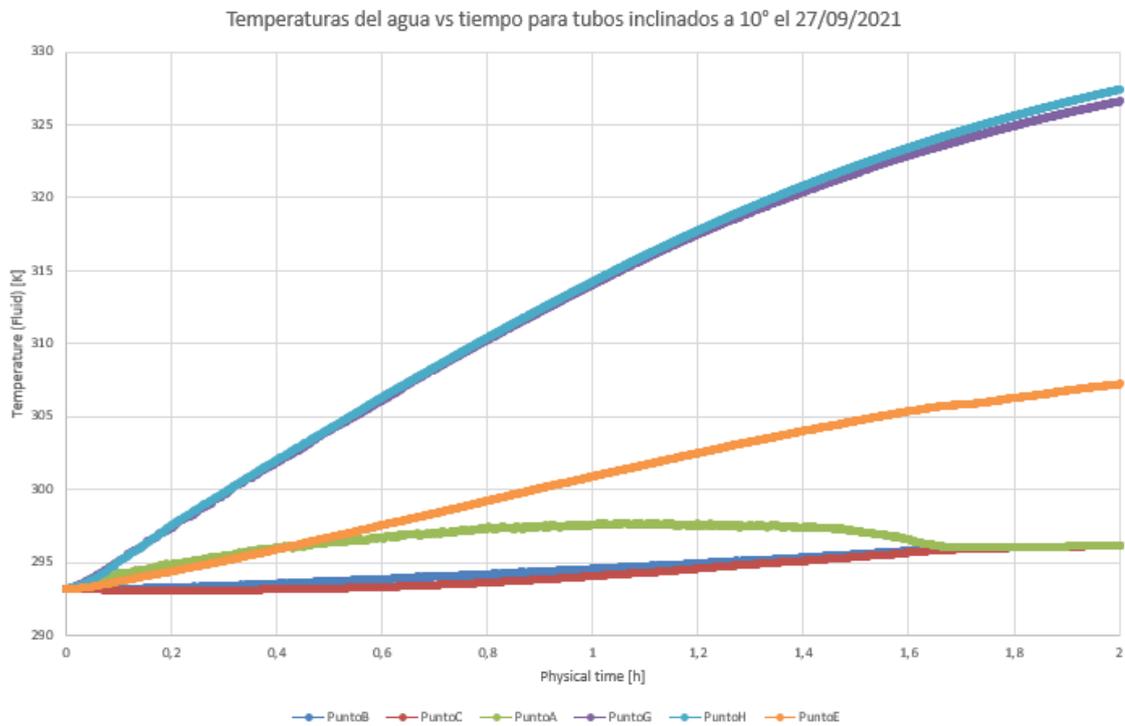


Ilustración 6-3: Temperaturas del agua vs con 10° de inclinación el 27/09/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

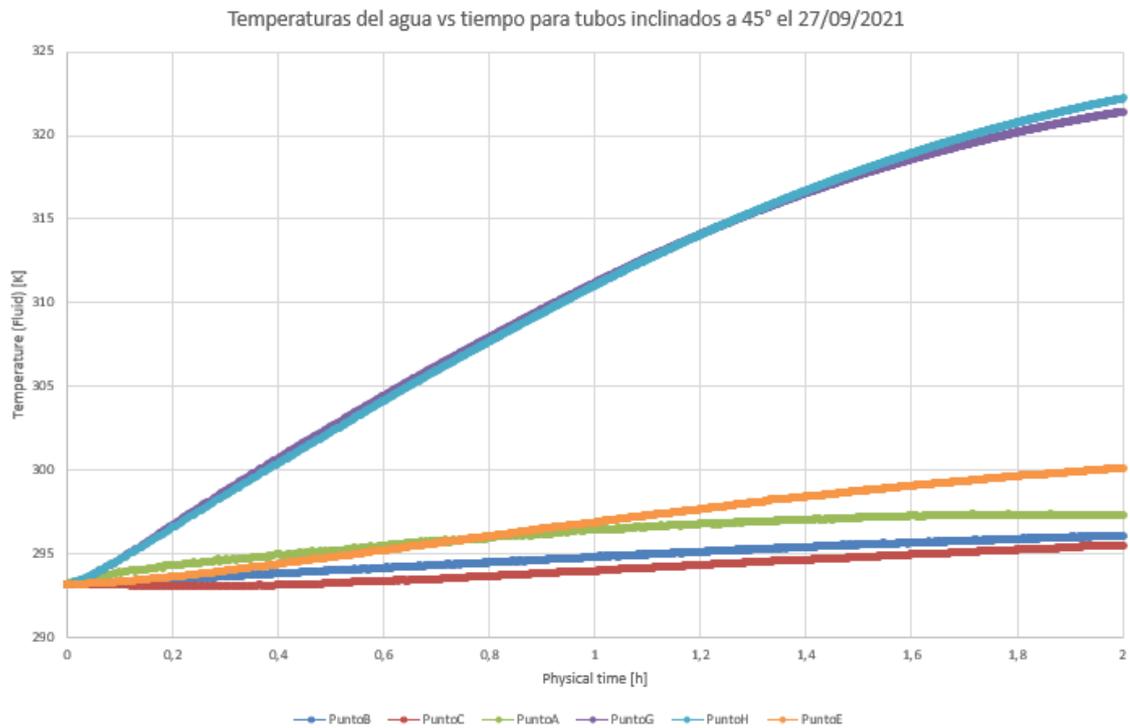


Ilustración 7-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 27/09/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En las Ilustraciones 6-3 y 7-3 se observa mayores valores en los 3 puntos de los tubos para el ángulo de 10°. Esto se debe a que los rayos impactan de manera casi perpendicular al estar los tubos inclinados a un ángulo bajo, haciendo que la temperatura del agua suba más que en el ángulo de 45°. Las temperaturas en el tanque fueron semejantes en los puntos elegidos. Sin embargo, las distribuciones de temperatura, observadas en el ANEXO C, son mayores para 10°.

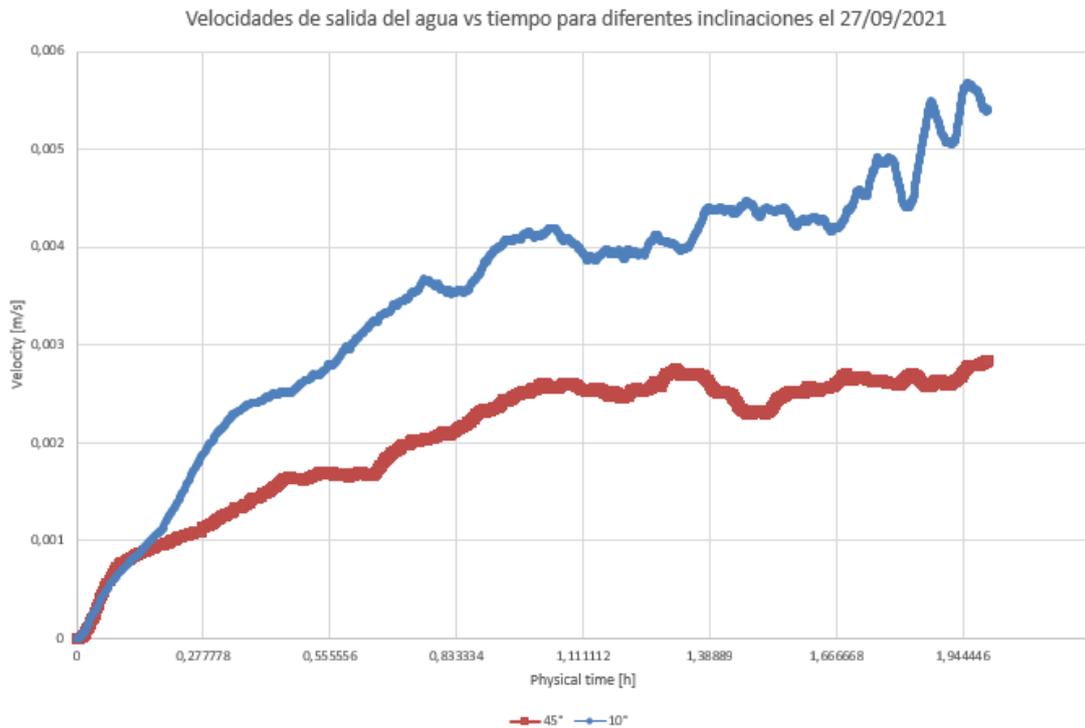


Ilustración 8-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 27/09/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 8-3 se observa que la mayor velocidad de salida del agua se da para el ángulo de 10°.

Tabla 3-3: Valores del tubo de vacío el 27/09/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del agua en el punto H (K)	10	293,12	327.419	316.152	3.81757419
	45	293,12	322.219	312.801	0.240714564
Temperatura del agua en punto G (K)	10	293,12	326.601	315.796	3.81757419
	45	293,12	321.428	312.684	0.240714564
Temperatura del agua en el punto E (K)	10	7.22E-05	307.236	302.035	3.81757419
	45	4,62E-05	300.120	297.511	0.240714564
Velocidad en el punto D (m/s)	10	7.22E-05	0.0066	0.0039	3.81757419
	45	4,62E-05	0.0036	0.0023	0.240714564

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 4-3: Valores del tanque el 27/09/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto C (K)	10	293,12	296.172	294.671	0.0662514345
	45	293,12	295.537	294.353	0.0159238801
Temperatura del fluido en el punto B (K)	10	293,12	296.161	294.944	0.0484553388
	45	293,12	296.095	295.048	0.0100663993
Temperatura del fluido en el punto A (K)	10	293,12	297.753	296.672	0.0391097695
	45	293,12	297.377	296.485	0.00603483128

Realizado por: Bustos, J., 2023.

3.1.1.3. Resultados obtenidos el 7 de enero del 2021

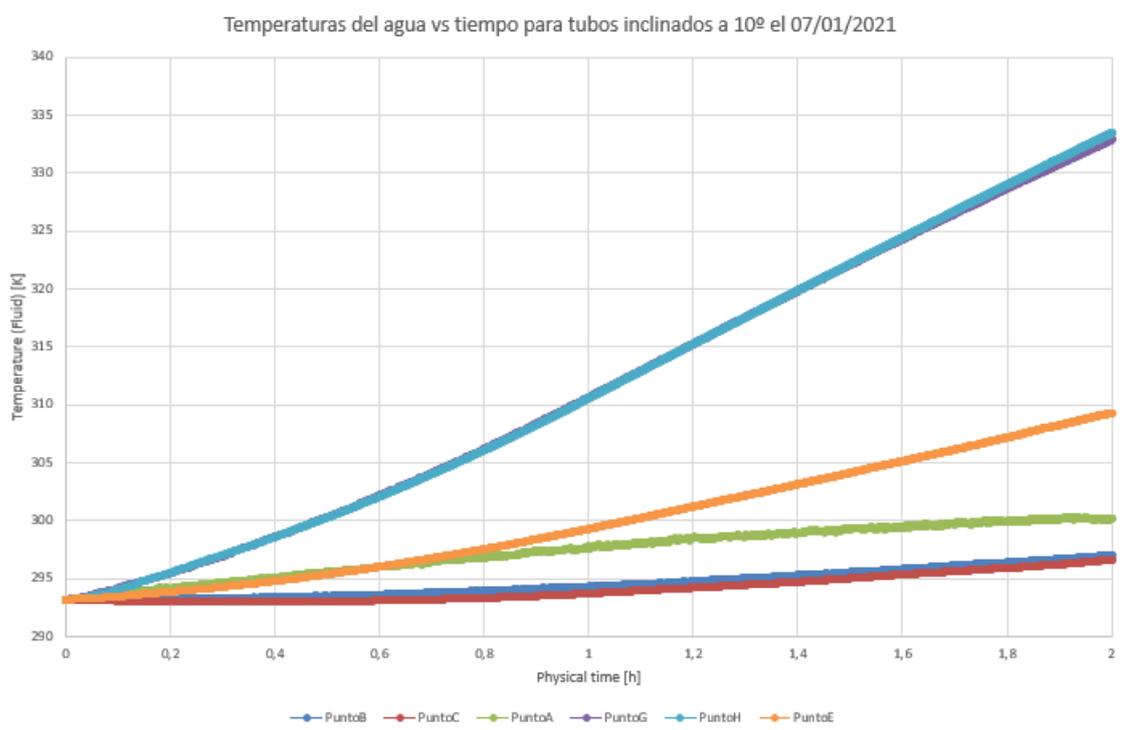


Ilustración 9-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 07/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

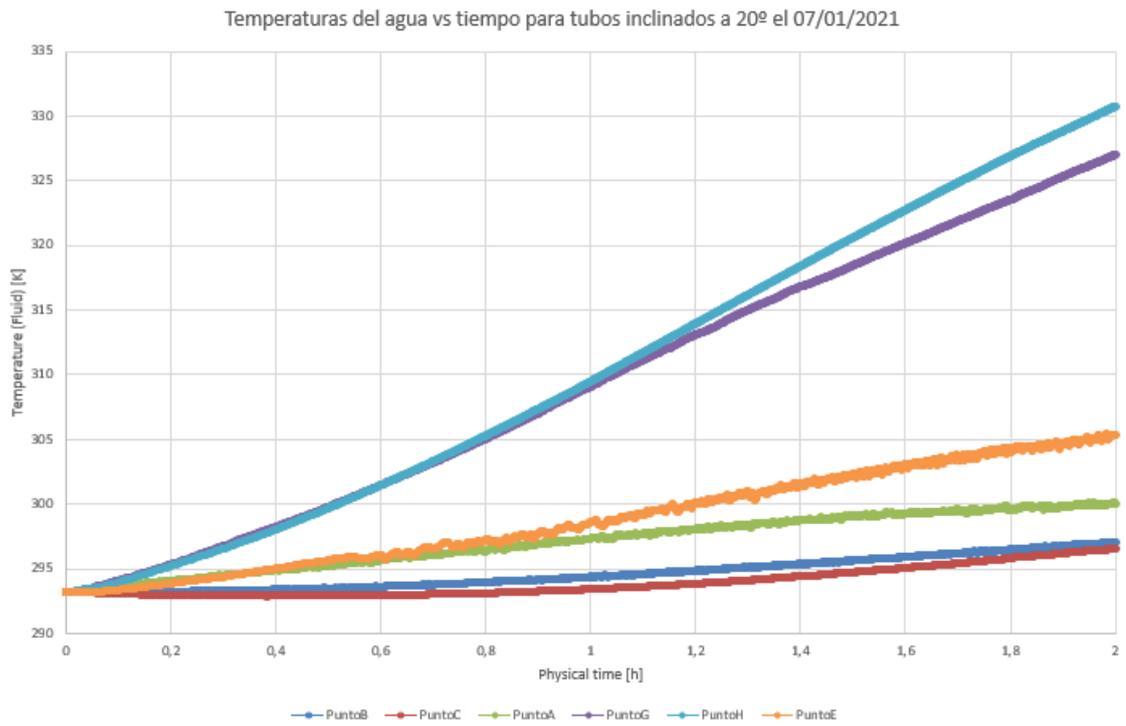


Ilustración 10-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 07/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

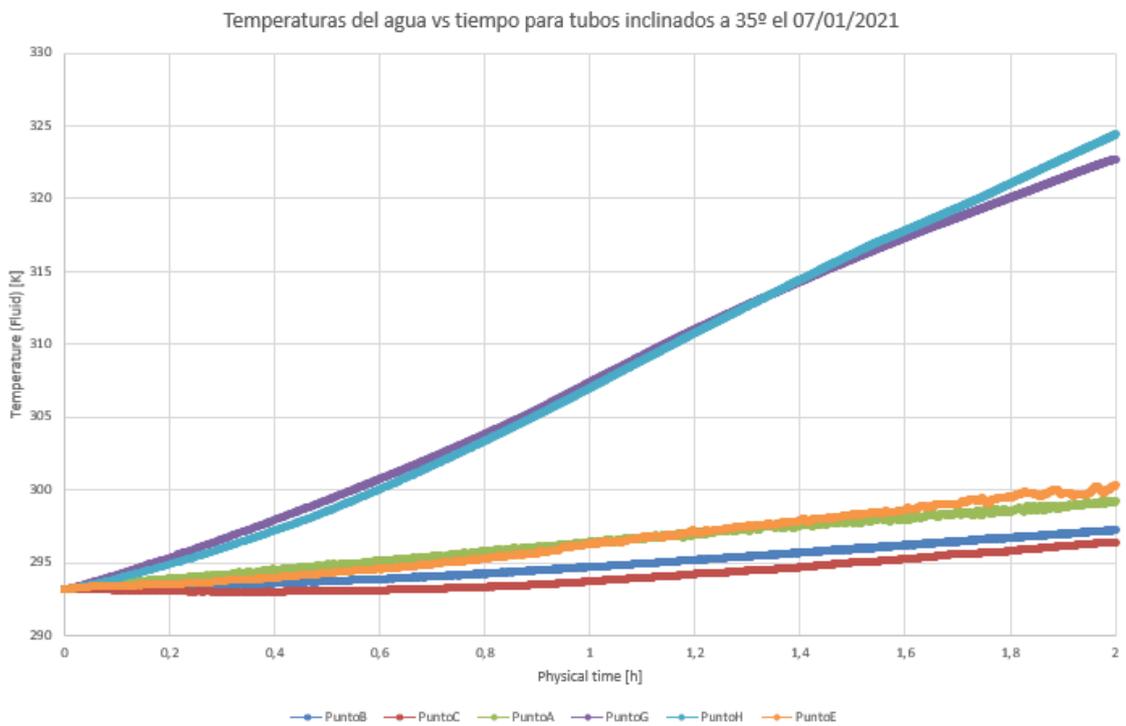


Ilustración 11-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 07/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

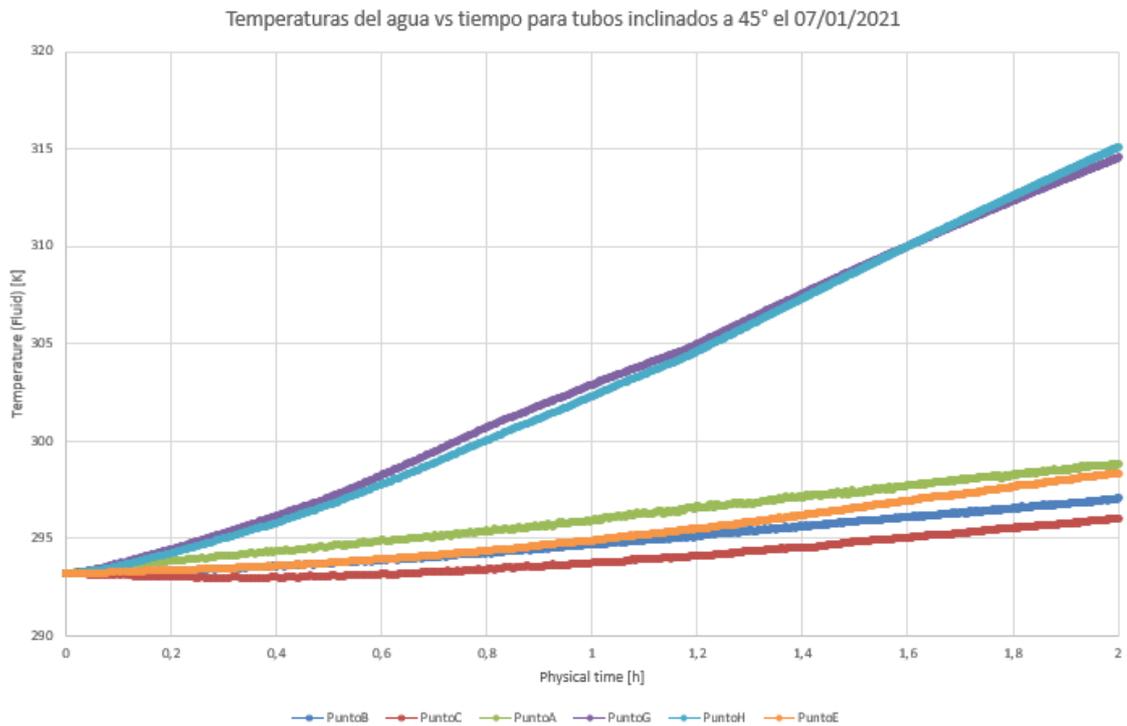


Ilustración 12-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 07/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Tabla 5-3 se observa que los promedios de temperatura en el tanque son semejantes para los 3 puntos elegidos para cada una de las inclinaciones de tubos, sin embargo, analizando el ANEXO F, se observa una mayor distribución de temperatura para los ángulos bajos, especialmente para el de 10°. Los ángulos de 35° y 45° mostraron menores distribuciones de temperatura en el tanque respecto al resto de ángulos. Por otra parte, la temperatura del agua en los 3 puntos del tubo fue siempre superior para 10°.

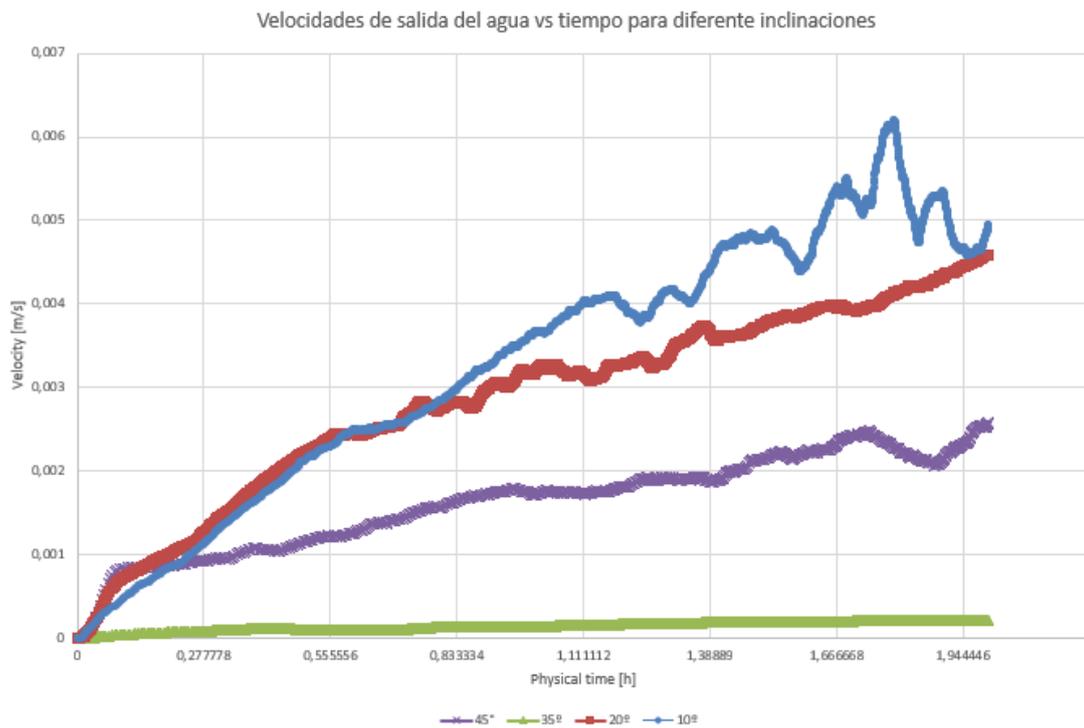


Ilustración 13-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 07/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 13-3 se observa mayores velocidades de salida para el ángulo de 10°. Esto, sumado a las distribuciones de temperatura, nos dice que el efecto termosifón tuvo mejor desempeño para el ángulo de 10° y 20°, respectivamente.

Tabla 5-3: Valores del tubo de vacío el 7/01/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del agua en el punto H (K)	10	293,2	333.47	316.487	3.81757419
	20	293,2	330.773	314.561	1.52919722
	35	293,12	324.413	311.739	0.611627109
	45	293,12	315.099	305.487	0.240714564
Temperatura del agua en el punto G (K)	10	293,2	332.882	316.394	3.81757419
	20	293,12	327.031	313.069	1.52919722
	35	293,12	322.696	311.572	0.611627109
	45	293,12	314.565	305.632	0.240714564
Temperatura del agua en el punto E (K)	10	293,2	309.278	301.951	3.81757419
	20	293,2	305.42	300.205	1.52919722
	35	293,2	300.312	297.301	0.611627109
	45	293,2	298.379	295.863	0.240714564
Velocidad en el punto D (m/s)	10	1.14E-15	0.0080	0.0040	3.81757419
	20	0.00020	0.0052	0.0034	1.52919722
	35	5,69E-05	0.00023	0.00016	0.611627109
	45	4,62E-05	0.0039	0.0018	0.240714564

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 6-3: Valores del tanque el 7/01/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto C (K)	10	293,026	296.626	294.57	0.0662514345
	20	293,12	296.569	294.319	0.01292705
	35	293,12	296.433	294.55	0.0259436436
	45	293,12	296.03	294.413	0.0159238801
Temperatura del fluido en el punto B (K)	10	293,2	297.049	295.061	0.0484553388
	20	293,12	297.086	295.073	0.0115323493
	35	293,12	297.264	295.421	0.00988467179
	45	293,12	297.073	295.297	0.0100663993
Temperatura del fluido en el punto A (K)	10	293,2	300.341	298.214	0.0391097695
	20	293,12	300.155	297.848	0.00620790458
	35	293,12	299.261	297.08	0.00622746162
	45	293,12	298.854	296.639	0.00603483128

Realizado por: Bustos, J., 2023.

3.1.1.4. Resultados del 14 de noviembre del 2021

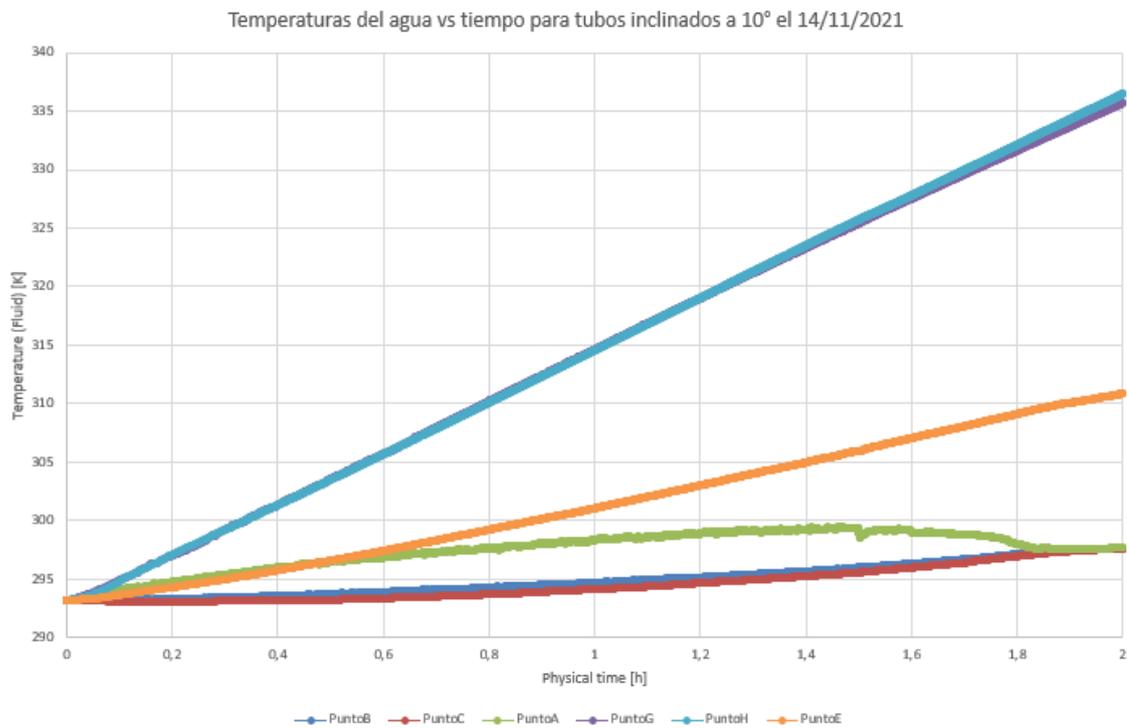


Ilustración 14-3: Temperaturas del agua vs tiempo con 10° de inclinación el 14/11/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

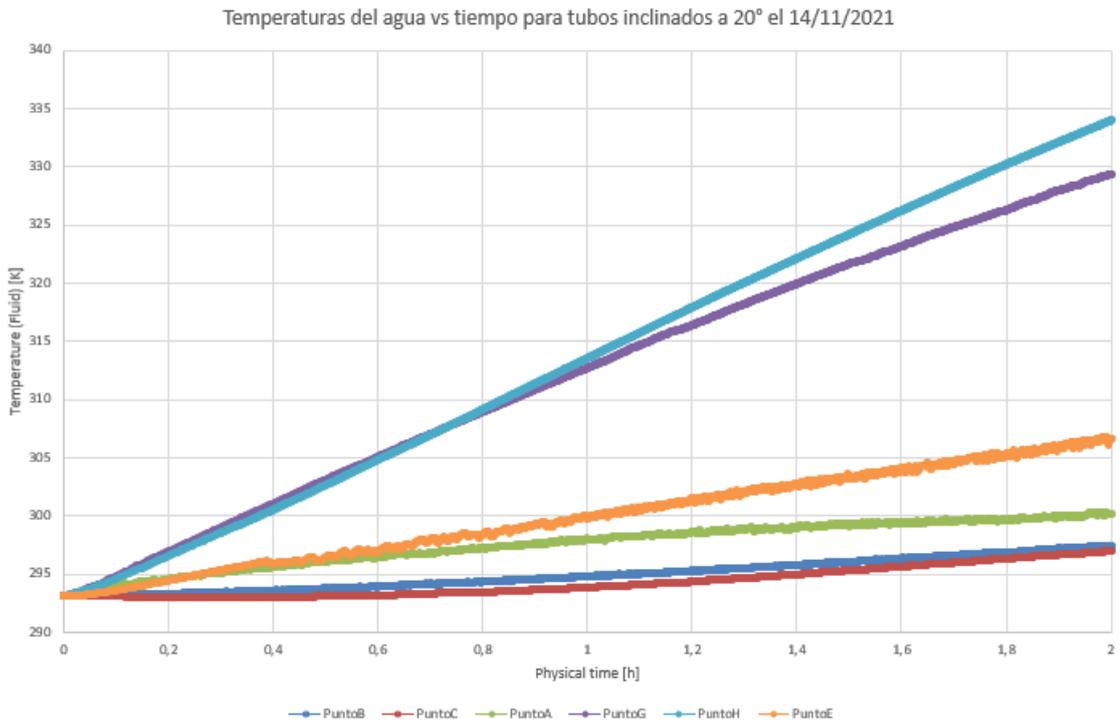


Ilustración 15-3: Temperaturas del agua vs con 20° de inclinación el 14/11/2021.
Realizado por: Bustos, J., 2023.

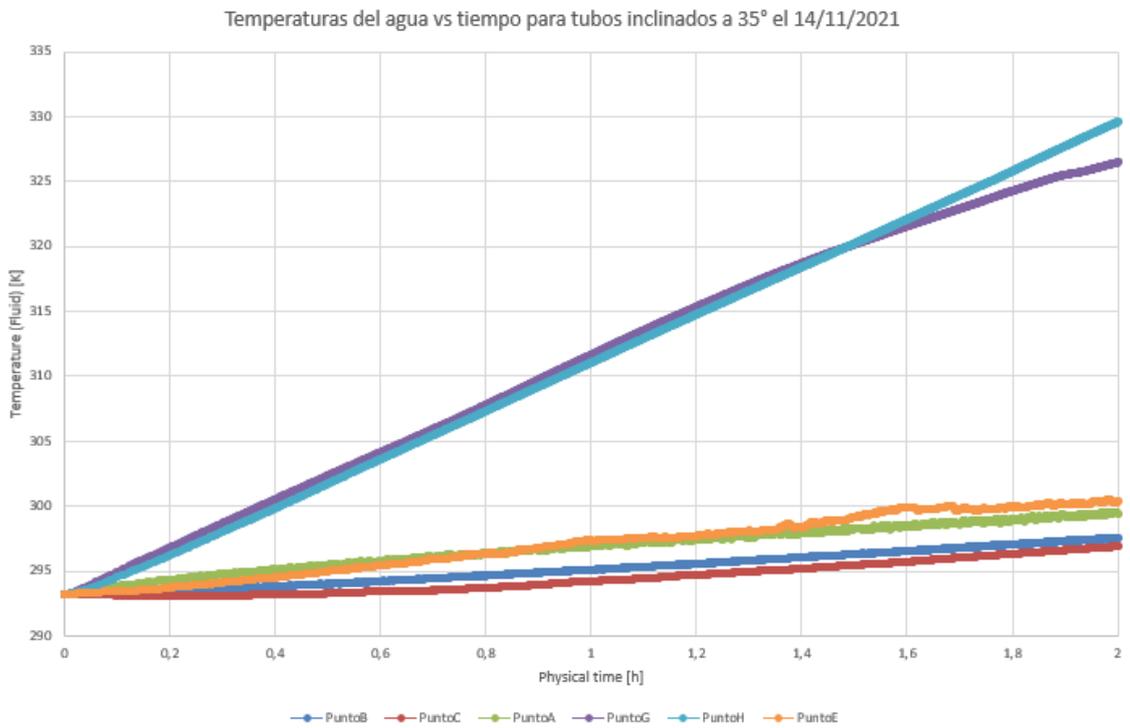


Ilustración 16-3: Temperaturas del agua con 35° de inclinación el 14/11/2021.
Realizado por: Bustos, J., 2023.

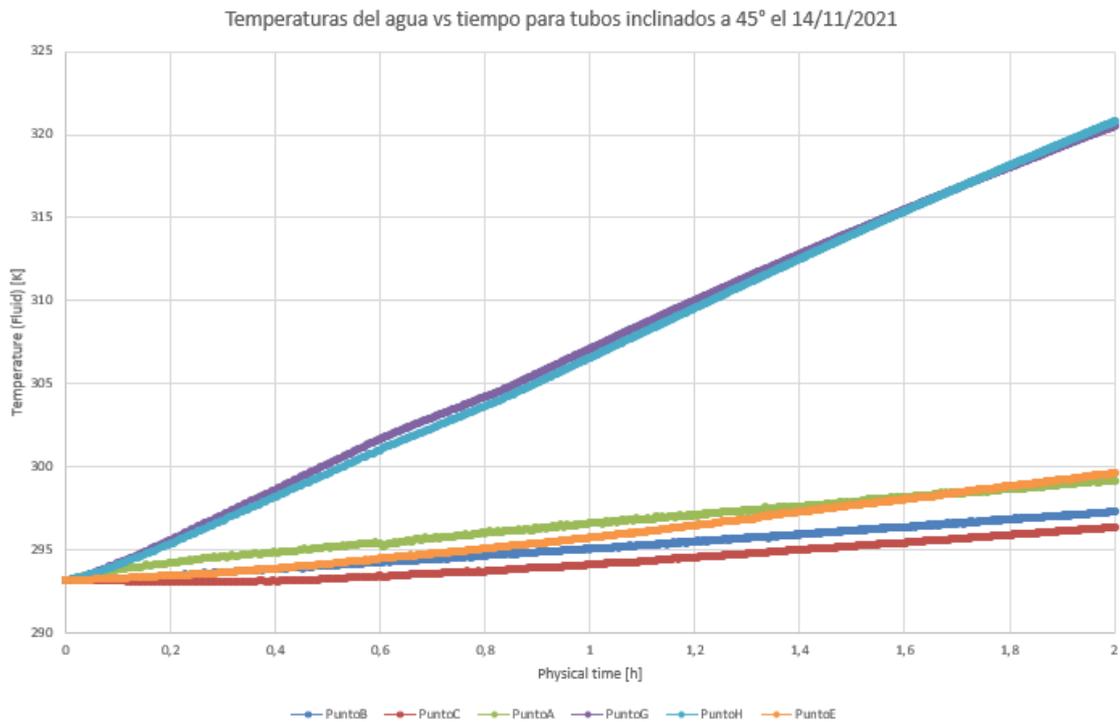


Ilustración 17-3: Temperaturas del agua con 45° de inclinación el 14/11/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Tabla 7-3 se observa mayores promedios y máximos de temperatura en los 3 puntos del tubo para el ángulo de 10°. Las distribuciones de temperatura fueron semejantes en el tanque para todos los ángulos. Pese a registrarse mayores temperaturas en el techo para los ángulos de 20°, 35° y 45°, la distribución en toda la superficie del tanque, mostrada en el ANEXO G, es ligeramente mayor para el ángulo de 10° ya que cubre una mayor área a diferencia de los otros ángulos que poseen temperaturas más bajas en el resto del tanque.

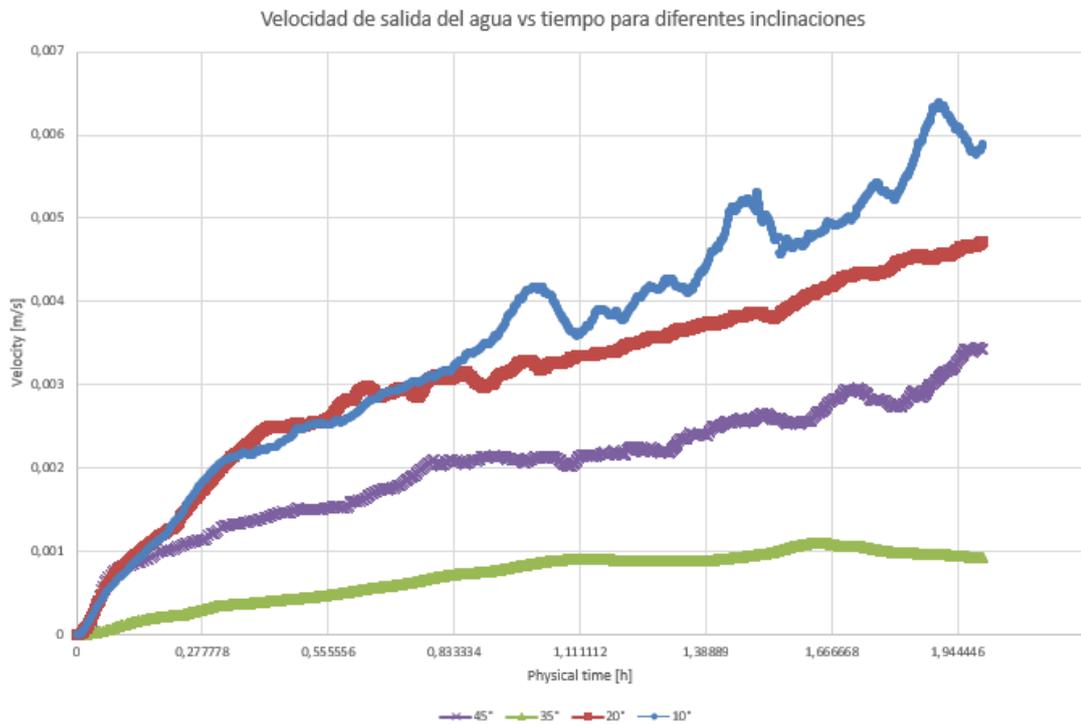


Ilustración 18-3: Velocidades de salida del agua para diferentes inclinaciones el 14/11/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 18-3 se vuelve a observar, en este caso en el mes de noviembre, que la mayor velocidad de salida del agua se da para el ángulo de 10° seguido por el de 20°, 45° y por último el de 35°. Las tablas 7-3 resume los datos obtenidos de los tubos, la Tabla 8-3 resume los resultados del tanque.

Tabla 7-3: Valores del tubo de vacío el 14/11/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del agua en el punto H (K)	10	293,2	336.484	318.957	3.81757419
	20	293,2	333.988	317.236	1.52919722
	35	293,2	329.598	315.115	0.611627109
	45	293,2	320.795	309.727	0.240714564
Temperatura del agua en punto G (K)	10	293,2	335.696	318.798	3.81757419
	20	293,2	329.384	315.511	1.52919722
	35	293,2	326.481	314.909	0.611627109
	45	293,2	320.524	309.968	0.240714564
Temperatura del agua en el punto E (K)	10	293,2	310.888	303.216	3.81757419
	20	293,2	306.765	301.123	1.52919722
	35	293,2	300.500	297.878	0.611627109
	45	293,2	299.628	296.69	0.240714564
Velocidad en el punto D (m/s)	10	1.14E-15	0.0186	0.0041	3.81757419
	20	0.00020	0.0052	0.0035	1.52919722
	35	5,69E-05	0.0011	0.00082	0.611627109
	45	4,62E-05	0.0046	0.0023	0.240714564

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 8-3: Valores del tanque el 14/11/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto C (K)	10	293,026	297.65	295.018	0.0662514345
	20	293,12	297.008	294.668	0.01292705
	35	293,12	296.905	294.906	0.0259436436
	45	293,12	296.375	294.705	0.0159238801
Temperatura del fluido en el punto B (K)	10	293,2	297.645	295.393	0.0484553388
	20	293,12	297.484	295.369	0.0115323493
	35	293,12	297.604	295.684	0.00988467179
	45	293,12	297.306	295.563	0.0100663993
Temperatura del fluido en el punto A (K)	10	293,2	299.502	297.976	0.0391097695
	20	293,12	300.304	298.115	0.00620790458
	35	293,12	299.587	297.436	0.00622746162
	45	293,12	299.194	297.08	0.00603483128

Realizado por: Bustos, J., 2023.

3.1.1.5. Impacto de la altura en el efecto termosifón

- 14 de noviembre del 2021

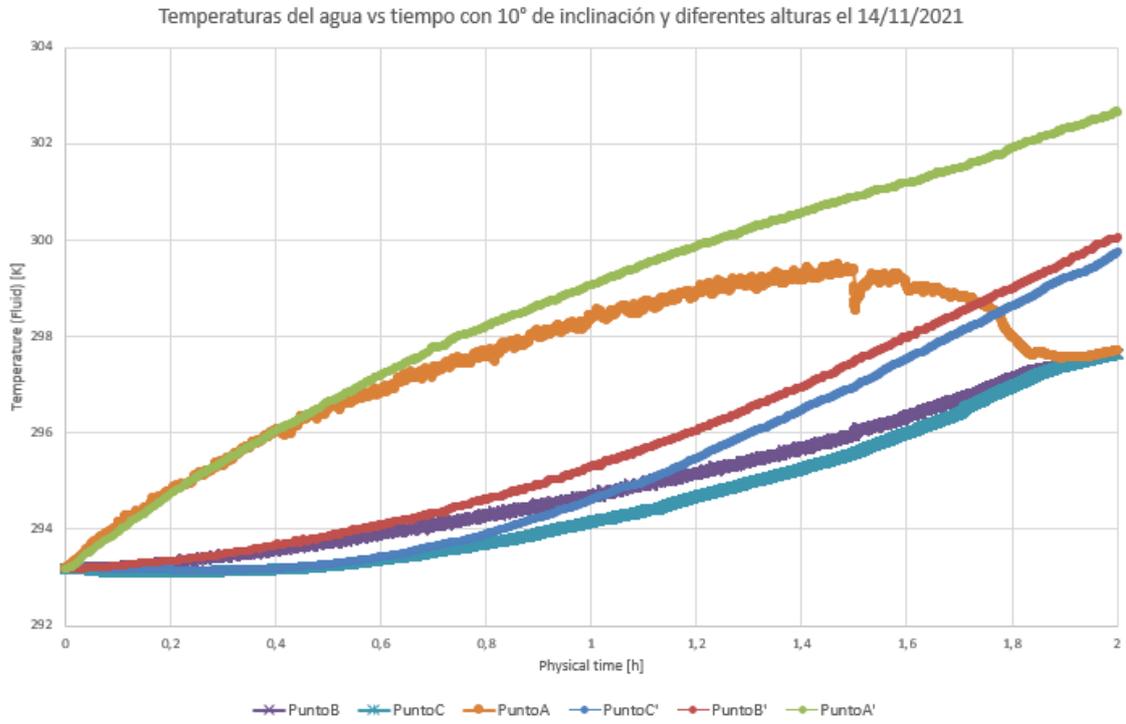


Ilustración 19-3: Temperaturas del agua con 10° de inclinación y diferentes alturas el 14/11/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

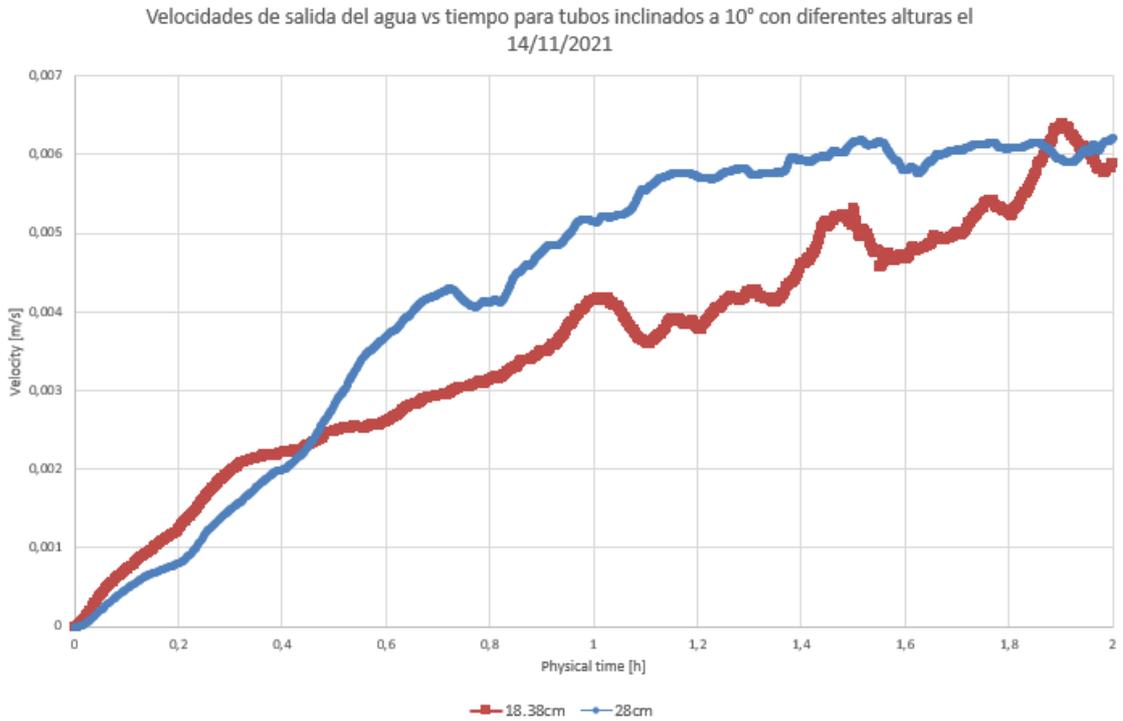


Ilustración 20-3: Velocidades de salida del agua para tubos a 10° y mayor altura el 14/11/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Se observa en la Ilustración 19-3 y en el ANEXO K mayores valores de temperatura en el tanque para tubos inclinados a 10° con 28 cm de altura respecto al techo del tanque. Esta mejor distribución de la temperatura respecto a la simulación realizada con una menor altura se debe a que la presión del agua es mayor ya que el volumen de agua por encima de los tubos es más grande y por ende la velocidad con la que el fluido caliente se distribuye aumenta considerablemente. Las diferencias en la velocidad de salida se observan en la Ilustración 20-3. Los puntos que corresponden a la nueva simulación son A', B', D' Y C' en las Ilustraciones 19-3 y 20-3.

Tabla 9-3: Valores del tubo el 14/11/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Velocidad en el punto D' (m/s)	10	1.14E-15	0.00801	0.00505	3.81757419

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Tabla 10-3: Valores del tanque el 14/11/2021.

Variable	Ángulo (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto C' (K)	10	293,2	299.753	295.939	0.0662514345
Temperatura del fluido en el punto B' (K)	10	293,2	300.05	296.436	0.0484553388
Temperatura del fluido en el punto A' (K)	10	293,2	302.677	299.55	0.0391097695

Realizado por: Bustos, J., 2023.

- 5 de enero del 2021

En las Ilustraciones 21-3 y 22-3, se observan mayores valores de temperatura en el tanque y velocidad de salida nuevamente para uniones en el fondo del tubo.

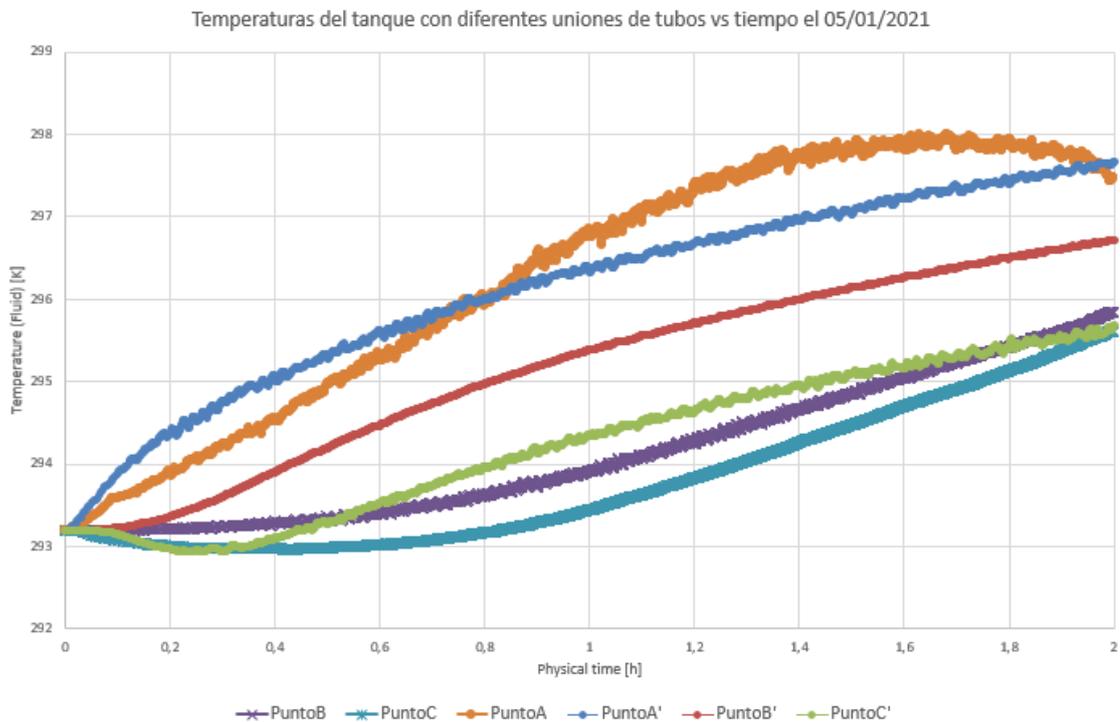


Ilustración 21-3: Temperaturas del agua con 10° de inclinación y diferentes alturas el 05/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

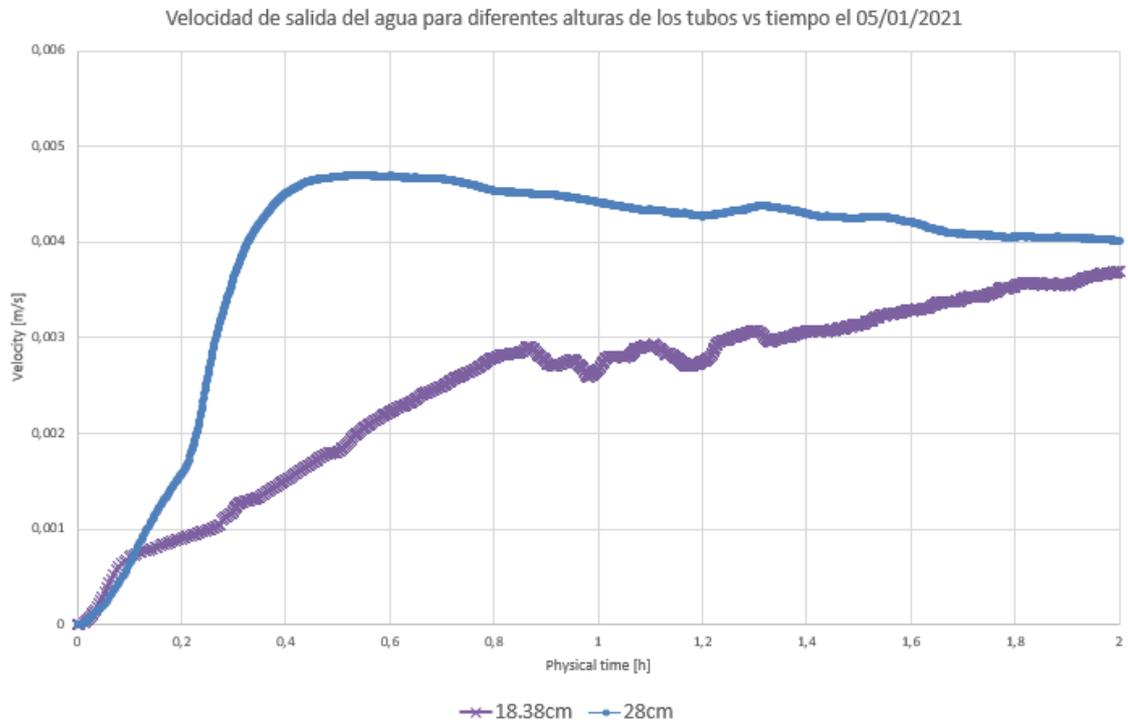


Ilustración 22-3: Velocidades de salida del agua para tubos a 10° y mayor altura el 05/01/2021.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

3.1.2. Resultados térmicos y ópticos del calentador solar con reflector

Los datos de simulación corresponden al 5 de enero del 2021 con tubos inclinados a 10°.

3.1.2.1. Impacto del ángulo de inclinación del reflector solar

La Tabla 11-3 resume los datos obtenidos de los tubos de vacío con un reflector inclinado a 10°, 20°, 30° y 5° en sentido horario el 05/01/2021.

Tabla 11-3: Datos obtenidos del tubo de vacío con varias inclinaciones del reflector.

Variable	Inclinación del reflector (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto H (K)	10	293,2	302.391	299.32	0,007171083
	20	293,2	301.553	297.855	0,004404689
	30	293,2	302.139	299.536	0,008051659
	5	293,2	299.116	297.332	0,008051659
Temperatura del fluido en el punto G (K)	10	293,2	299.779	297.567	0,003569816
	20	293,12	299.469	296.885	0,009092701
	30	293,12	298.888	297.337	0,008669748
	5	293,2	298.641	296.728	0,043250346
Temperatura del fluido en el punto E (K)	10	293,2	297.403	295.286	0,043250346
	20	293,12	297.783	295.461	0,050185019
	30	293,2	297.009	294.923	0,033605276
	5	293,2	296.453	294.817	0,033605276

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Temperatura del agua en el centro del tubo vs tiempo para diferentes inclinaciones del reflector el 05/01/2021

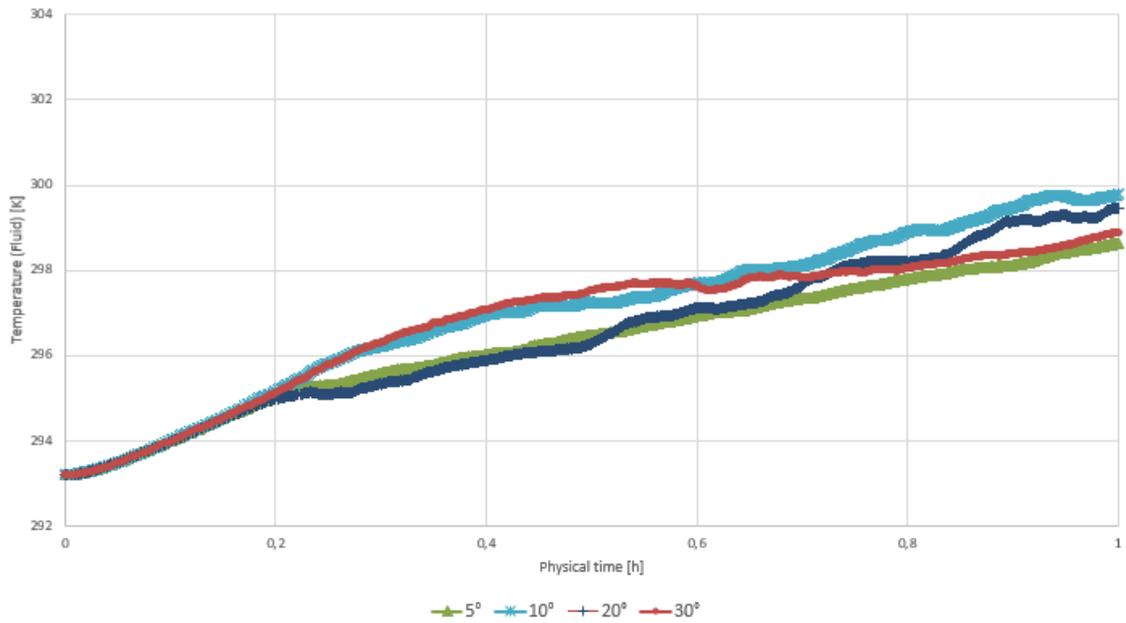


Ilustración 23-3: Temperatura del agua en el centro del tubo para varias inclinaciones del reflector.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Temperatura del agua en el fondo del tubo vs tiempo para diferentes inclinaciones del reflector el 05/01/2021

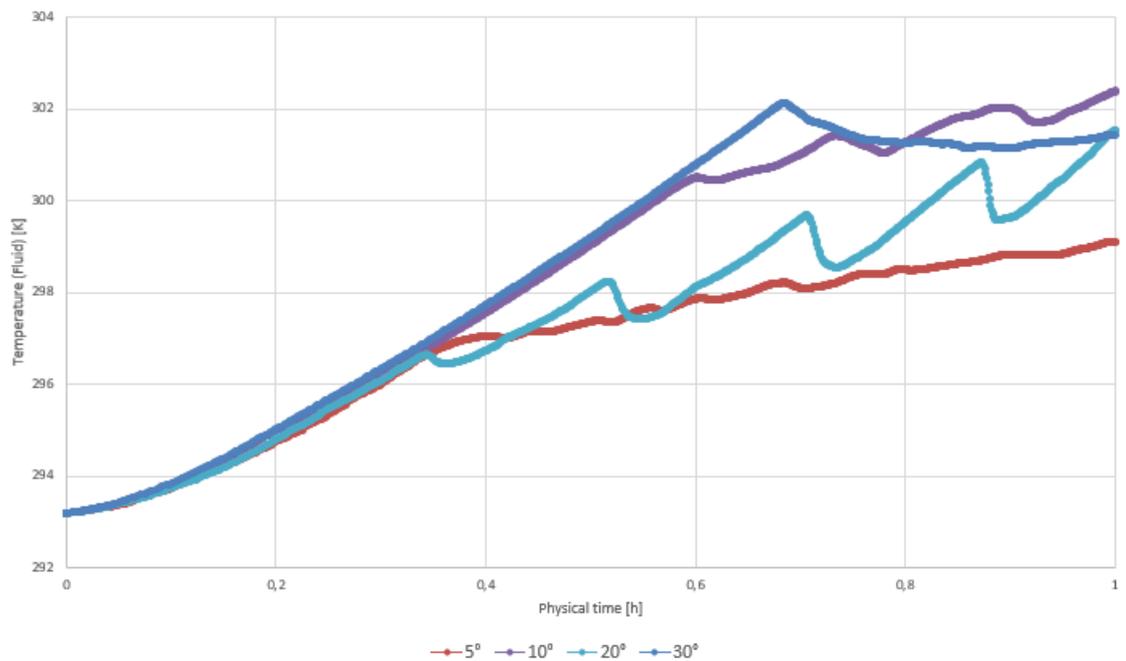


Ilustración 24-3: Temperatura del agua en el fondo del tubo para varias inclinaciones del reflector.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

En la Ilustración 23-3 y Ilustración 24-3 se observa mayores temperaturas del agua en los tubos para un reflector inclinado a 10° , es decir, para ángulos de incidencia entre 39.27° y 52.53° respecto a la normal del reflector solar. Estos resultados coinciden con el artículo de Setiawan y Dewi del 2013, ya que los resultados obtenidos de la investigación también encuentran que es mejor posicionar un reflector solar con 15° de inclinación entre estas horas de la mañana. Las diferencias radican por el material elegido, las latitudes que son próximas al ecuador y la fecha del mes elegido. La distribución de temperatura se observa de mejor manera en el ANEXO H, en donde se observa tubos más calientes al cabo de una hora para un reflector inclinado a 10° simulado de 9 a.m. hasta 10 a.m.

3.1.2.2. Impacto de la curvatura del reflector

La Tabla 12-3 resume los datos obtenidos del tubo de vacío simulado con un reflector inclinado 10° con una curvatura de 25° , 35° y 15° .

Tabla 12-3: Datos obtenidos del tubo de vacío con un reflector de varios arcos el 05/01/2021.

Variable	Arco del reflector (grados)	Valor mínimo	Valor máximo	Promedio	Refinamiento
Temperatura del fluido en el punto H (K)	15	293,2	299.487	297.323	0,007171083
	35	293,2	302.391	299.32	0,004404689
	25	293,2	302.875	299.404	0,008051659
Temperatura del fluido en el punto G (K)	15	293,2	298.943	296.729	0,003569816
	35	293,2	299.779	297.567	0,009092701
	25	293,2	300.377	297.741	0,008669748
Temperatura del fluido en el punto E (K)	15	293,2	297.289	295.243	0,043250346
	35	293,2	297.403	295.286	0,050185019
	25	293,2	297.385	295.249	0,033605276

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Temperatura del agua en el centro del tubo vs tiempo para diferentes valores del arco el 05/01/2021

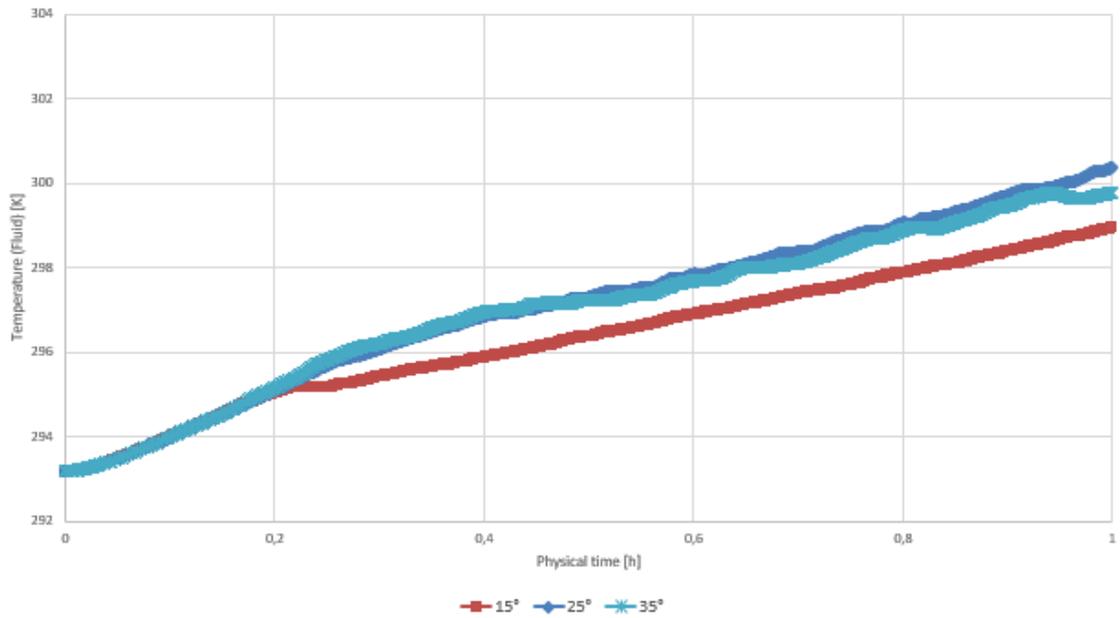


Ilustración 25-3: Temperatura en el centro del tubo para varios valores del arco del reflector.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Temperatura del agua en el fondo del tubo vs tiempo para diferentes valores del arco el 05/01/2021

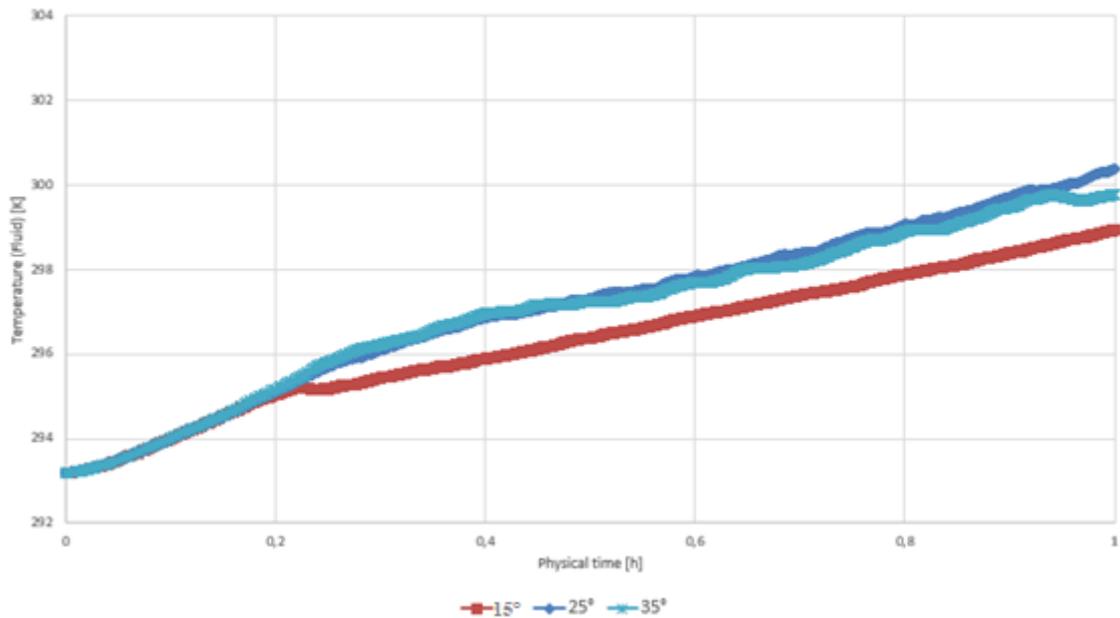


Ilustración 26-3: Temperatura en el fondo del tubo para varios valores del arco del reflector.

Realizado por: Bustos, J., 2023.

Entre las 9 a.m. y 10:00 a.m. se obtuvo una velocidad de 0.0039 m/s , un promedio de radiación reflejada por el reflector de 867.288 W/m^2 , una fracción de radiación absorbida por los tubos de 560.738 W/m^2 , una temperatura de cobertor de 297.485 K y una temperatura en el absorbedor de 302.558 K . Analizando las Ilustraciones 23-3 y 24-3 se observa una temperatura ligeramente mayor en el fondo y en el centro del tubo para un arco de 25° . Tomando en cuenta las distribuciones de temperatura del ANEXO I, se observa mayores valores de temperatura en el tubo para el arco de 25° de igual manera. De esta forma, para ángulos de incidencia entre 39.27° y 52.53° respecto a la normal del reflector solar, resulta mejor emplear reflectores con arcos próximos a los 25° , en latitudes cercanas al ecuador. Este resultado nos muestra que es mejor emplear reflectores que tenga una forma cóncava, lo cual concuerda con los resultados del artículo publicado en 2018 por Sahaan y Siswono, en donde también obtienen mejores desempeños para un reflector con una forma cóncava.

3.1.3. Análisis del desempeño del colector solar

Los cálculos de eficiencia se realizaron entre las 9:00 a.m.-10:00 a.m. del colector solar con reflector el día 05/1/2021.

3.1.3.1. Coeficiente de pérdida

Para calcular el coeficiente de pérdida se tomó en cuenta las dimensiones y temperaturas del cobertor y absorbedor. El espesor y radio externo del nitrato de aluminio son de 0.21 cm y 2.4 cm . El tubo de borosilicato, posee un radio de 3 cm con un espesor de 0.2 cm y con las temperaturas registradas posee una emisividad de 0.88 .

- Coeficiente de transferencia del viento

Se obtuvo el número de Reynolds para la temperatura promedio entre el aire y el borosilicato.

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu_f} = \frac{5 \text{ m/s} * 0.88 \text{ kg/m}^3 * 0.06 \text{ m}}{1.78 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2} = 14831.46 \quad (89)$$

Dado que el número de Reynolds es mayor 1000 y menor a 50000 , usamos la expresión del número de Nusselt para encontrar el coeficiente de transferencia del viento.

$$Nu = \frac{h_w D_{co}}{k} = 0.30(14831.46)^{0.6} = 95.46 \quad (90)$$

$$h_w = 95.46 \frac{k}{D_{co}} = 95.46 \frac{0.025 \text{ W/mK}}{0.06 \text{ m}} = 39.775 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (91)$$

- Pérdidas de calor

Con el coeficiente de transferencia del viento podemos calcular las pérdidas de calor del colector solar.

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \varepsilon \pi D_{co} L \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (92)$$

$$Q_{loss} = \pi 0.06 \text{ m} * 1.764 \text{ m} * 39.775 \text{ W/m}^2\text{K} * (297.485 \text{ K} - 293.2 \text{ K}) \\ + 0.88 \pi * 0.06 \text{ m} * 1.764 \text{ m} \\ * 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4 ((297.485 \text{ K})^4 - (275 \text{ K})^4) \quad (93)$$

$$Q_{loss} = 91.72 \text{ W} \quad (94)$$

- Temperatura dentro del cobertor

Con las pérdidas de calor, podemos hallar la temperatura en el interior del cobertor mediante la siguiente expresión.

$$T_{ci} = Q_{loss} \ln \left(\frac{D_{co}}{D_{ci}} \right) \frac{1}{2\pi k_c L} + T_{co} \quad (95)$$

$$T_{ci} = 91.72 \text{ W} * \ln \left(\frac{0.06 \text{ m}}{0.056 \text{ m}} \right) \frac{1}{2\pi * 1.2 \text{ W/mK} * 1.764 \text{ m}} + 297.485 \text{ K} \quad (96)$$

$$T_{ci} = 297.961 \text{ K} \quad (97)$$

- Cálculo coeficiente de pérdida

$$U_L = \frac{Q_{loss}}{A_r (T_r - T_a)} = \frac{Q_{loss}}{2\pi r l (T_r - T_a)} \quad (98)$$

$$U_L = \frac{91.72W}{2\pi * 0.024m * 1.764m(302.558K - 293.2K)} = 36.84 W/m^2K \quad (99)$$

3.1.3.2. Calor útil y eficiencia del colector

- Área de apertura

El área del receptor lo calculamos como el área de un cilindro.

$$A_r = 2\pi rl = 2\pi * 0.024m * 1.764m = 0.266 m^2 \quad (100)$$

El área de apertura la calculamos con la siguiente ecuación

$$A_a = W * L = 1.22m * 1.764m = 2.15 m^2 \quad (101)$$

- Factor de eliminación de calor

Calculamos primero la eficiencia del colector solar.

$$F = \frac{U_o}{U_L} = \frac{\left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi}D_i} + \frac{D_o \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2k}\right)^{-1}}{U_L} \quad (102)$$

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor del agua dentro del receptor h_{fi} empleamos el número de Nusselt.

$$Re = \frac{v\rho d}{\mu_f} = \frac{0.0039 m/s * 1000kg/m^3 * 0.048 m}{0.00046 Ns/m^2} = 406.96 \quad (103)$$

$$Nu = 0.40 + 0.54(406.96)^{0.52} = 12.68 \quad (104)$$

$$Nu = \frac{h_{fi}D_o}{k} \quad (105)$$

$$h_{fi} = Nu \frac{k}{D_o} = 12.68 \frac{0.598 W/mK}{0.048m} = 158.03 W/m^2K \quad (106)$$

Con h_{fi} , procedemos a calcular F .

$$F = \frac{\left(\frac{1}{36.84 \text{ W/m}^2\text{K}} + \frac{0.048\text{m}}{158.03 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.046\text{m}} + \frac{0.048\text{m} * \ln\left(\frac{0.048\text{m}}{0.046\text{m}}\right)}{2 * 170.0\text{W/mK}} \right)^{-1}}{36.84 \text{ W/m}^2\text{K}} \quad (107)$$

$$F = 0.804 \quad (108)$$

$$F' = \frac{F_R}{F} = \frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L F} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_r U_L F}{\dot{m}C_p}\right) \right] \quad (109)$$

Para obtener el flujo másico realizamos la derivada de la masa respecto al tiempo. Dado que la densidad se tomó como constante, el volumen varía en función del área A del tubo interno y el promedio de la velocidad del agua v .

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho V)}{dt} = \frac{\rho d(V)}{dt} = \rho v A \\ &= 1000\text{kg/m}^3 * 0.0039\text{m/s} * \pi * (0.024\text{m})^2 \end{aligned} \quad (110)$$

$$\dot{m} = 0.00705 \text{ kg/s} \quad (111)$$

$$F' = \frac{0.00705 \text{ kg/s} * 4185.5 \text{ J/kgK}}{0.266 \text{ m}^2 * 36.84 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.804} \left[1 - \exp\left(-\frac{0.266 \text{ m}^2 * 36.84 \text{ W/m}^2\text{K} * 0.804}{0.00705 \text{ kg/s} * 4185.5 \text{ J/kg}^\circ\text{C}}\right) \right] \quad (112)$$

$$F' = 0.878 \quad (113)$$

$$F_R = F'F = 0.878 * 0.804 = 0.706 \quad (114)$$

3.1.3.3. Radiación absorbida

La primera parte del cálculo es hallar el producto KL , que es el coeficiente de extinción por el espesor del tubo. El borosilicato tiene un coeficiente de extinción de $K = 16.1\text{m}^{-1}$ y el tubo tiene un espesor de 0.2cm .

$$KL = 16.1\text{m}^{-1} * 0.002\text{m} = 0.032 \quad (115)$$

De la Ilustración 1-6 observamos que para valores de KL de 0.032 y un ángulo de incidencia de 40° , tenemos una transmitancia de $\tau = 0.87$. De la Ilustración 1-8 se observa que para ángulos

de incidencia menores o iguales a 40°, la razón entre la absorbancia y absorbancia normal de la pintura se aproxima a 1.

$$\frac{\alpha}{\alpha_n} = 0.97 \quad (116)$$

Tomando en cuenta que la absorbancia normal equivale a 0.93, podemos hallar la absorbancia de la pintura.

$$\alpha = 0.97 * 0.93 = 0.90 \quad (117)$$

Entonces, tenemos el siguiente producto transmitancia-absorbancia.

$$\tau\alpha = 1.01 * 0.87 * 0.90 = 0.79 \quad (118)$$

Se calculó el factor de intercepción tomando en cuenta que la fracción de radiación absorbida por el receptor fue de 560.738 W/m^2 y la intensidad reflejada fue de 867.288 W/m^2 , dándonos un factor de intercepción de 0.65.

$$S = I_T \rho \gamma \tau \alpha K_{\gamma \tau \alpha} \quad (119)$$

$$S = 472,835 \text{ W/m}^2 * 0.8 * 0.65 * 0.79 * \text{Cos}(39.27) \quad (120)$$

En donde el último término representa el área efectiva del reflector, dándonos el siguiente resultado.

$$S = 150.38 \text{ W/m}^2 \quad (121)$$

Con los datos anteriores podemos calcular el calor útil mediante la siguiente ecuación.

$$Q_u = F_R A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_r - T_a) \right] \quad (122)$$

$$Q_u = 0.706 * 2.15 \text{ m}^2 \left[150.38 \text{ W/m}^2 - \frac{0.266 \text{ m}^2}{2.15 \text{ m}^2} 36.84 \text{ W/m}^2 \text{K} (302.558 \text{ K} - 293.2 \text{ K}) \right] \quad (123)$$

$$Q_u = 163.46 \text{ W}$$

(124)

Con los cálculos anteriores se observa que por tubo tenemos una pérdida de 91.72W y un calor útil de 163.46W. Tomando en cuenta que nuestro colector posee 20 tubos equivale a 3269.2 W en el periodo de 9:00 a.m. a 10:00 a.m. lo cual es energía que se puede emplear de manera práctica.

CONCLUSIONES

Se evidenció la influencia del ángulo de inclinación de los tubos del colector en la temperatura del agua y el efecto termosifón. El calentamiento del colector solar dependerá de la declinación o la fecha del año. Sin embargo, para zonas cercanas al ecuador, se obtiene mayores valores de temperatura del agua para ángulos de inclinación bajos debido a que la dirección de los rayos cerca del mediodía es casi perpendicular a los tubos. La unión de los tubos en el tanque es otra variable que afecta al efecto termosifón. El colector solar con los tubos encajados en el fondo del tanque mostró mejores distribuciones de temperatura que aquel con los tubos en la mitad del tanque. La presión que experimenta el agua con los tubos en el fondo del tanque es mayor, y por ende la fuerza con la que sube el agua provoca que el tanque se caliente de manera más rápida. El reflector solar mostró una mayor reflexión con un ángulo de inclinación de 10° en sentido horario y un arco de 25° de curvatura. Por último, la simulación del calentador solar con el reflector efectuado el 05/01/2021 entre las 9:00 a.m. y 10:00 a.m., obtuvo un calor útil lo suficientemente alto como para poder ser utilizado de manera práctica, lo que demuestra la utilidad del reflector para fines domésticos.

RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer una simulación semejante a la de este estudio, pero empleando únicamente un tubo de vacío y un reflector cilindro parabólico que lo rodee y contrastar los resultados obtenidos con los de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

BATTOCCHIO, CHIARA; et al. "Solar Cookers and Dryers: Environmental Sustainability and Nutraceutical Content in Food Processing". *PubMed Central* [en línea], 2021, (Italia) 1(1), P. 1. [Consulta: 09/09/2022]. ISSN 2075-1729. Disponible en:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8535029/>

YAN, Jinyue. *Handbook of Clear Energy Systems*. 1ª ed. Vasteras-Suecia: Wiley, 2015. P. 340.

AGRAWAL, Basant; &TIWARI, Gopal. *Building Integrated Photovoltaic Thermal Systems: For Sustainable Development*. Delhi-India: Royal Society of Chemistry, 2012. P. 19.

BARCERS, S. *Conservation of Energy*. Estados Unidos-Oakland: Teacher Created Materials, 2015. P. 20.

BELLOS, E; ET AL. "Experimental and numerical investigation of a linear Fresnel solar". *ResearchGate* [en línea], 2016, (Grecia) 1(1), P. 47. [Consulta: 07/09/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/309455106_Experimental_and_numerical_investigation_of_a_linear_Fresnel_solar_collector_with_flat_plate_receiver

BENFORD, F; & BOCK, J. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ta edición. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 12.

CODDINGTON, H. *A Treatise on the Reflection and Refraction of light: being Part 1 of a System of Optics*. Montana-Estados Unidos: Kessinger Publishing, 1829. P. 15.

COOLEY, L. *The New Text-Book of Physics: An Elementary Course in Natural Philosophy*. California-Estados Unidos: Forgotten Books, 1880. P. 134.

DENDRINOS, D. "The dynamics of shadows at and below the Tropic of Cancer in the Northern Hemisphere: Update No 2". *ResearchGate* [en línea], 2022, (Alemania) 1(2), P. 2. [Consulta: 17/09/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/359858967_The_dynamics_of_shadows_at_and_below_the_Tropic_of_Cancer_in_the_Northern_Hemisphere_Update_No_2

DESIDERI, U; ET AL. *The 25th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization and Simulation of Energy Conversion Systems and Processes. 8^a vol. Perugia-Italia::* Firenze University, 2012, P. 2.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 10.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 334.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 214.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 163.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 330.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 329.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 328.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 331.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 265.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 332.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes.* 4^a ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 12.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 13.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 89.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 72.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 40.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 89.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 23.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 91.

DUFFIE, J; & BECKMAN, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4ª ed. Madison-Estados Unidos: Wiley, 1939. P. 92.

FERNÁNDEZ, A; ET AL. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". *ResearchGate* [en línea], 2010, (España) 1(1), P. 217. [Consulta: 17/08/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230794088_Parabolic-trough_solar_collectors_and_their_applications

FERNÁNDEZ, A; ET AL. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". *ResearchGate* [en línea], 2010, (España) 1(1), P. 218. [Consulta: 17/08/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230794088_Parabolic-trough_solar_collectors_and_their_applications

FERNÁNDEZ, A; ET AL. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". *ResearchGate* [en línea], 2010, (España) 1(1), P. 220. [Consulta: 17/08/2022]. ISSN 0261-3077.

Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230794088_Parabolic-trough_solar_collectors_and_their_applications

FERNÁNDEZ, A; ET AL. "Parabolic-trough solar collectors and their applications". *ResearchGate* [en línea], 2010, (España) 1(1), P. 215. [Consulta: 17/08/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230794088_Parabolic-trough_solar_collectors_and_their_applications

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 138.

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 139.

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 140.

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 144.

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 142.

GARCÍA, V; ET AL. *Comportamiento térmico de la materia: Termodinámica*. Riobamba-Ecuador: Universidad Nacional de Chimborazo, 2020. P. 143.

JJI, L. *Heat Convection*. Berlín-Alemania: Springer, 2006. P. 8.

KARATHANASIS, S. *Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration*. Berlín-Alemania: Springer, 2019. P. 93.

KATZOFF, S. *The electromagnetic radiation environment of a satellite. pt. 1*. 1er vol: Estados Unidos: Generic, 1962. P. 2.

LOS ALAMOS SCIENTIFIC LABORATORY. SOLAR ENERGY GROUP. *Pacific Regional Solar Heating Handbook*. Michigan-Estados Unidos: University of Michigan Library, 1977. P. 99.

MILLAR, A. *Manejo de Agua y Producción Agrícola*. Concepción-Chile: 1993. P. 18.

ZOBAA, A; & BANSAL, R. *Handbook of Renewable Energy Technoogy*. Singapore: World Scientific Publishing Company 1993. P. 280.

MONREAL, B; & ASCASO, B. *Curso de Geografía, Astronomía, Física y Política, Moderna e Histórica*. Alicante-España: Aribau, 2011. P. 14.

AMINE, A; ET AL. "Numerical Modeling of A Parabolic Through Collector". *ResearchGate* [en línea], 2013, (España) 1(1), P. 22. [Consulta: 25/08/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/287021016_Numerical_simulation_of_a_parabolic_rough_solar_collector_considering_the_concentrated_energy_flux_distribution

JARAMILLO, J., & CARDENAS, H. Número de Reynolds (Trabajo de Titulación) (Maestría). Corporación Universitaria Minuto de Dios, Facultad de Ingeniería, Ingeniería Civil. Bogota-Colombia. 2015. pp. 17-19.

RATHAKRISHNAN, E. *Elements of Heat Transfer*. Boca-Ratón-Estados Unidos: CRC Press, 2012. P. 19.

READ, P. *Gemmology*. 3ª ed. Ramsbury-Reino Unido: NAG Press, 1991. P. 80.

STEADMAN, W. *An Elementary Treatise on Geometrical Optics*. Londres-Reino Unido: Forgotten Books, 1886. P. 5.

TATUM, J. *Chapter 1: Reflection and Refraction* [en línea]. Victoria-Estados Unidos: University of Victoria, 2006. [Consulta: 27/08/2022]. Disponible en: <http://astrowww.phys.uvic.ca/~tatum/goptics/geomop1.pdf>

USÓN, J; & BIELSA, A. *Integración de energías renovables en edificios*. Zaragoza-España: Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2011. P. 144.

AL-HALLAJ, S; & KISZYNSKI, K. *Hybrid Hydrogen Systems: Stationary and Transportation Applications (Green Energy and Technology)*. Londres-Inglaterra: Springer, 2011. P. 17.

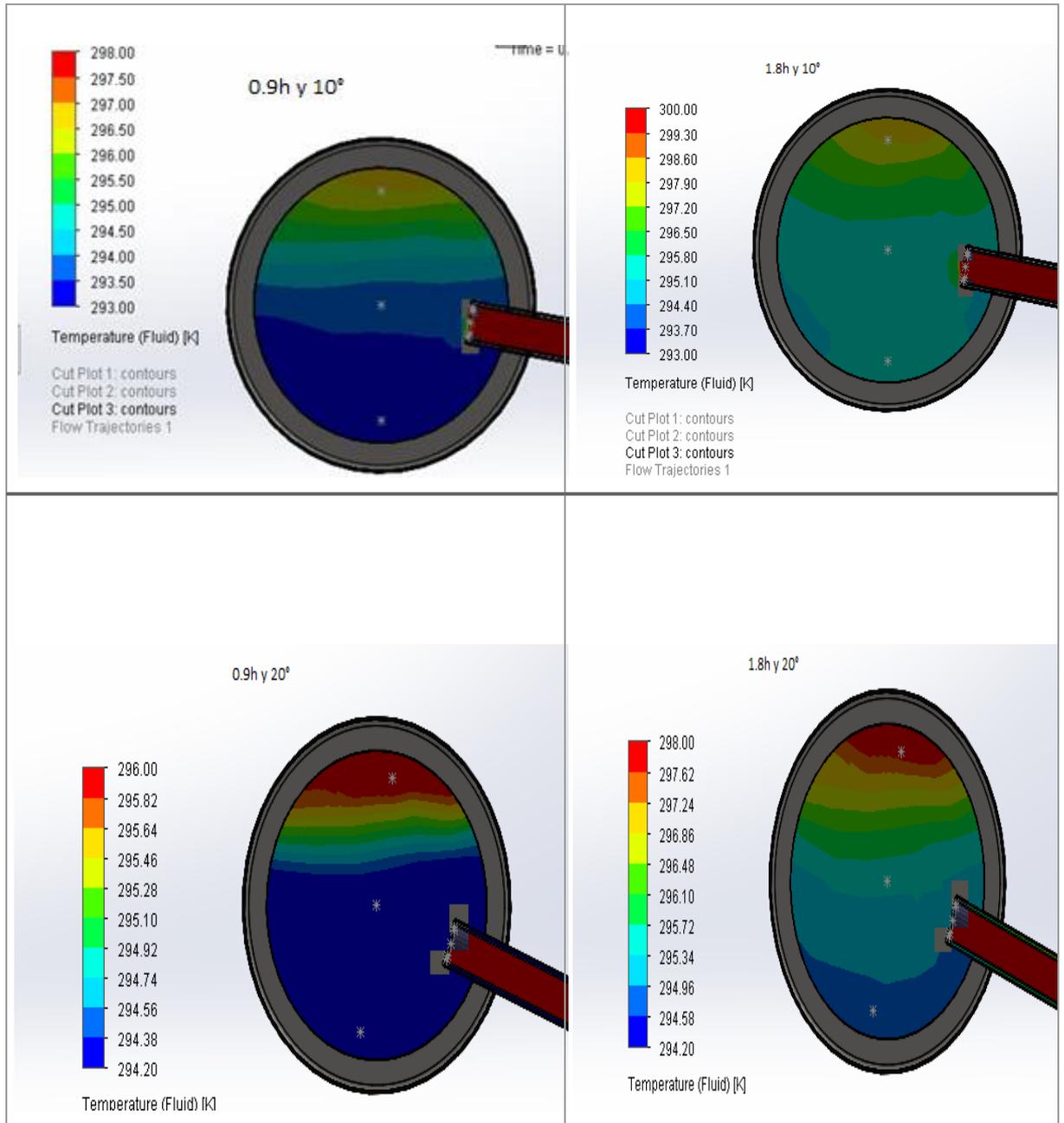
SETIAWAN, E; & DEWI, K. "Impact of two types flat reflector materials on solar panel characteristics". *ResearchGate* [en linea], 2013, (Indonesia) 1(1), P. 198. [Consulta: 07/09/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/269529304_Impact_of_Two_Types_Flat_Reflector_Materials_on_Solar_Panel_Characteristics#:~:text=Aluminum%20foil%20reflector%20and%20stainless,31.5%20%25%20and%2021.5%25%20respectively.

SIAHAAN, Y; & SISWONO, H. "Analysis the effect of reflector (flat mirror, convex mirror, and concave mirror) on solar panel". *ResearchGate* [en linea], 2018, (Indonesia) 1(1), P. 952. [Consulta: 08/09/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/333538439_Analysis_the_effect_of_reflector_flat_mirror_convex_mirror_and_concave_mirror_on_solar_panel

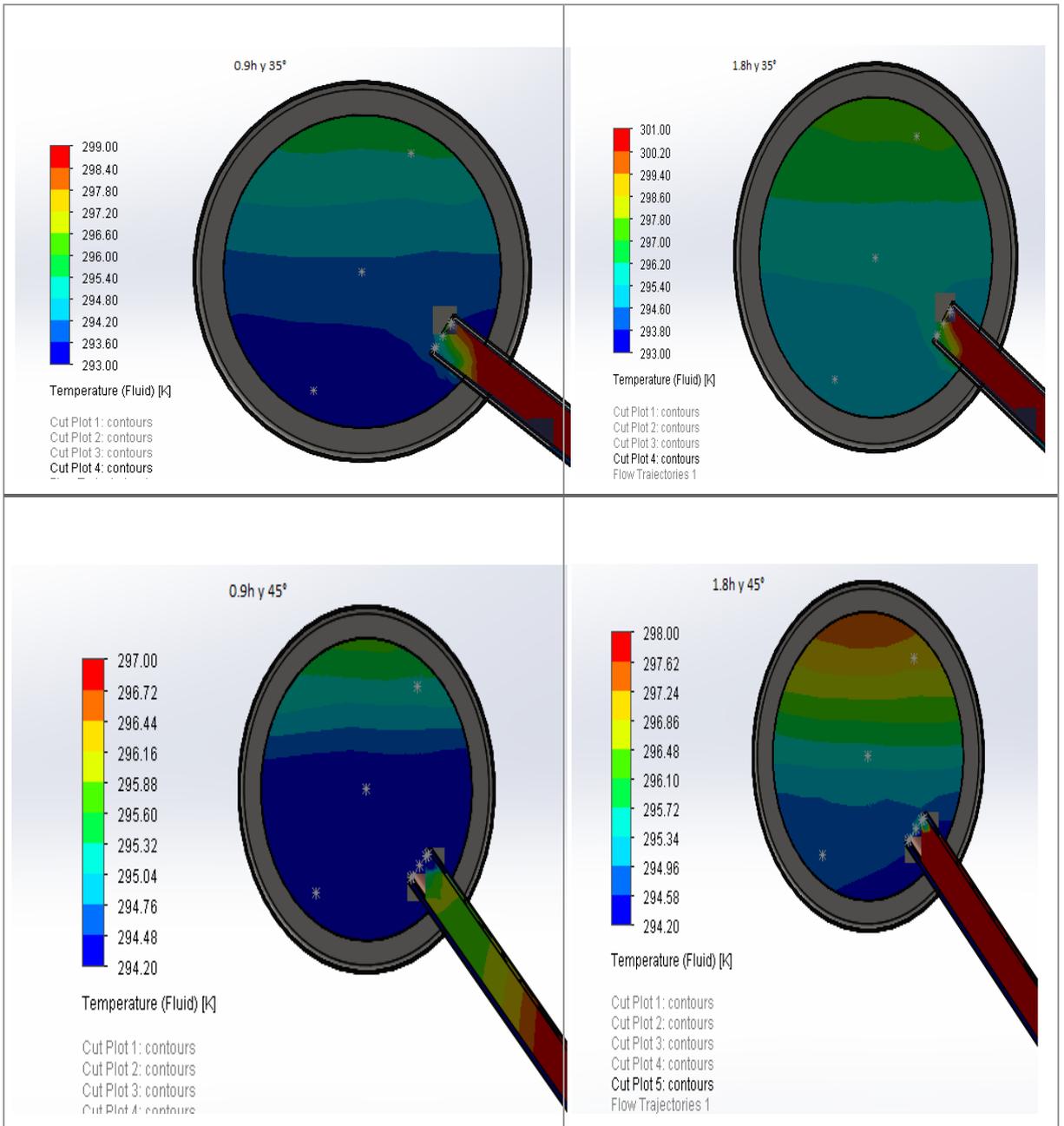
YEDILKHAN, A; ET AL. "Mathematical justification of thermosyphon effect main parameters for solar heating system". *Tandfonline* [en linea], 2020, (Kazakhstan) 1(1), P. 1. [Consulta: 07/09/2022]. ISSN 0261-3077. Disponible en:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2020.1851629>

ANEXOS

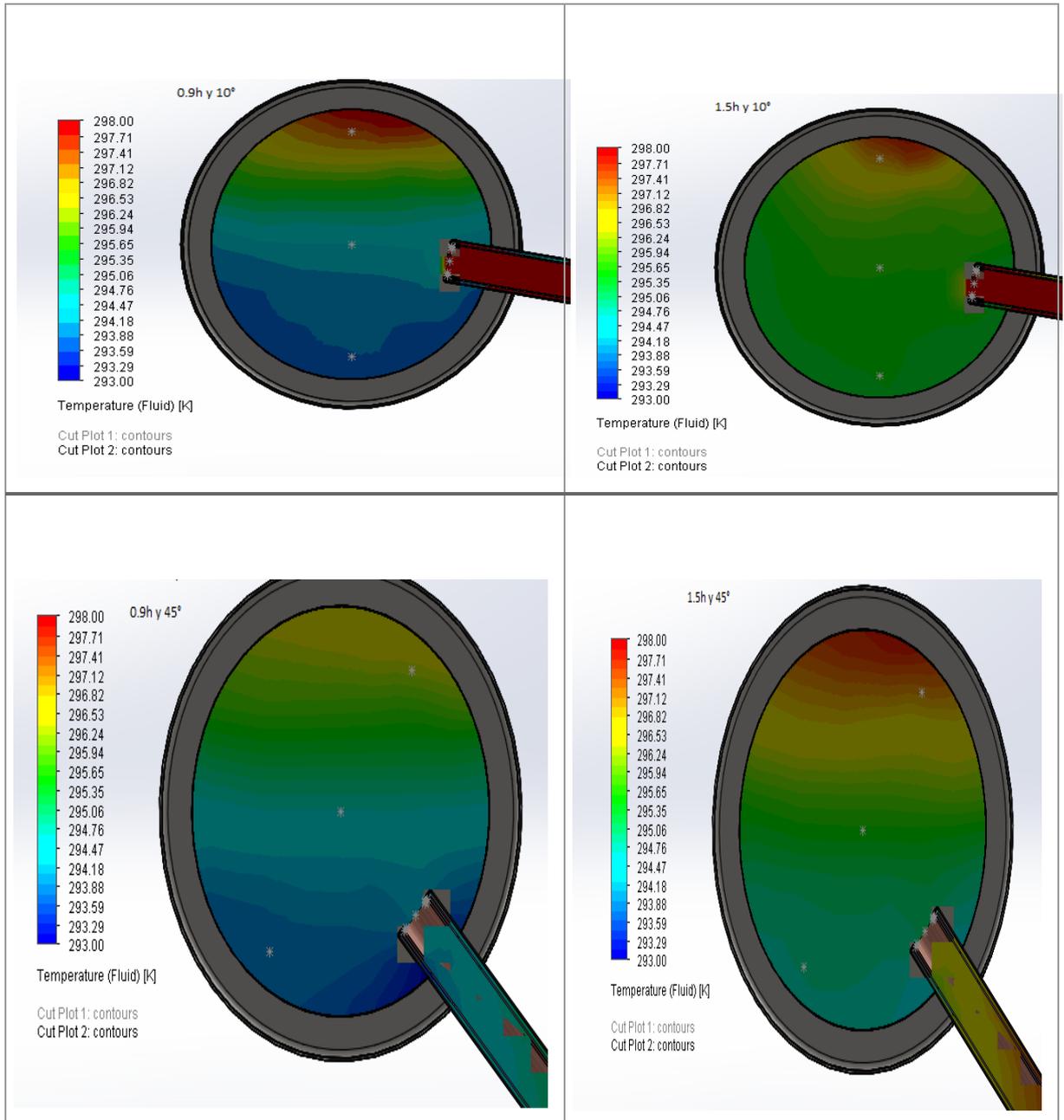
ANEXO A: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EL 5/01/2021.



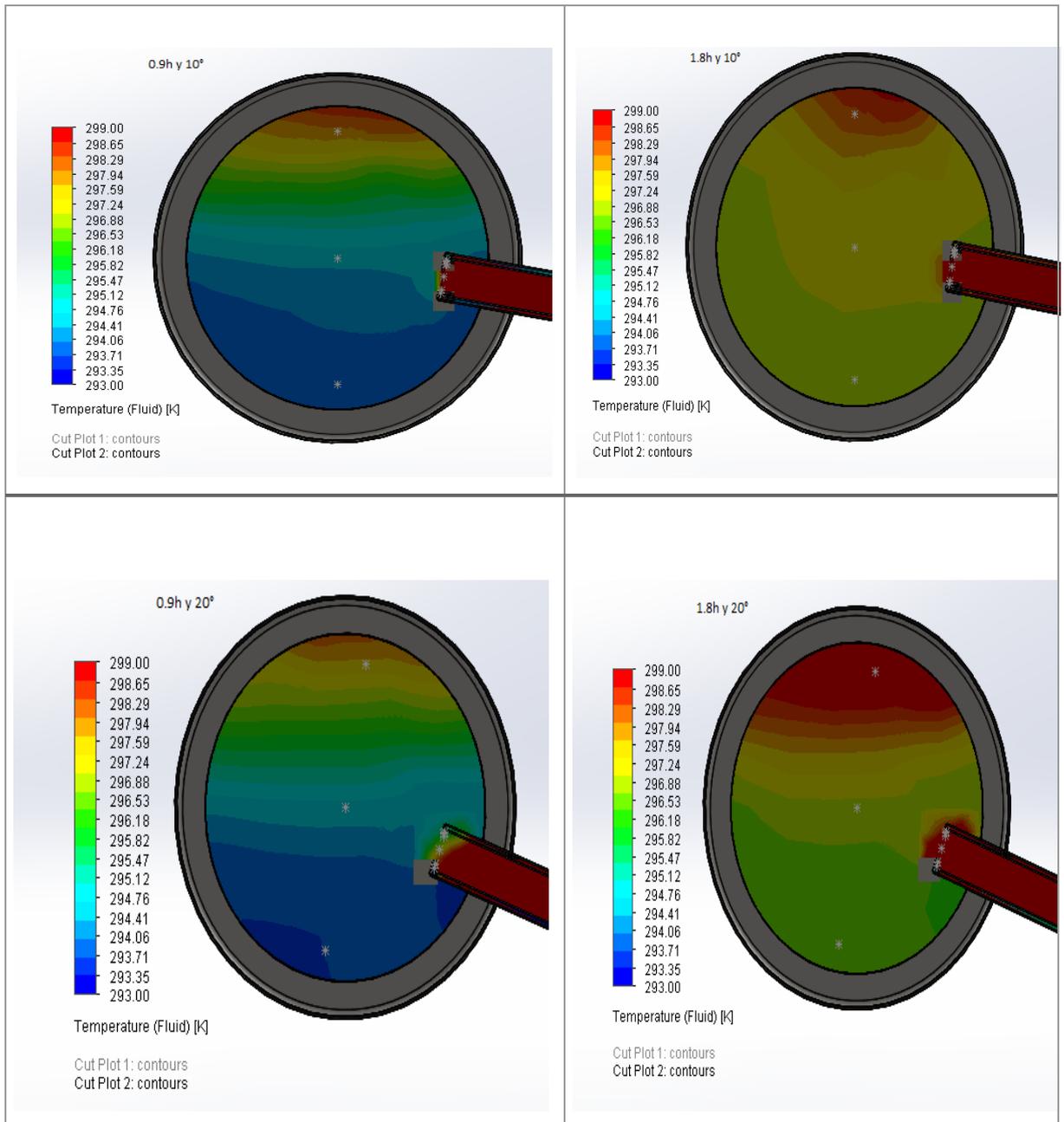
ANEXO B: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 5/01/2021.



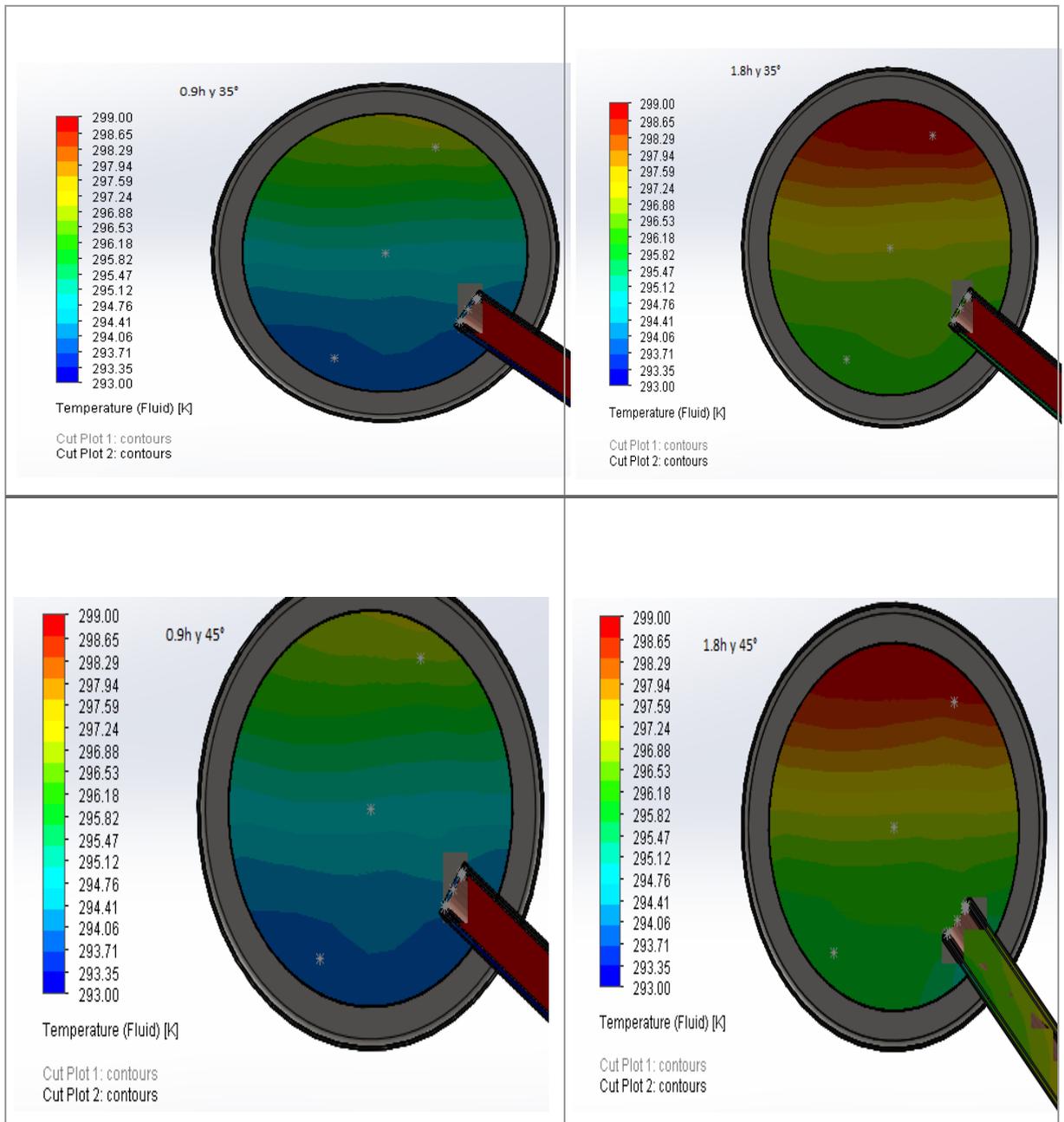
ANEXO C: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 45° EL 27/09/2021.



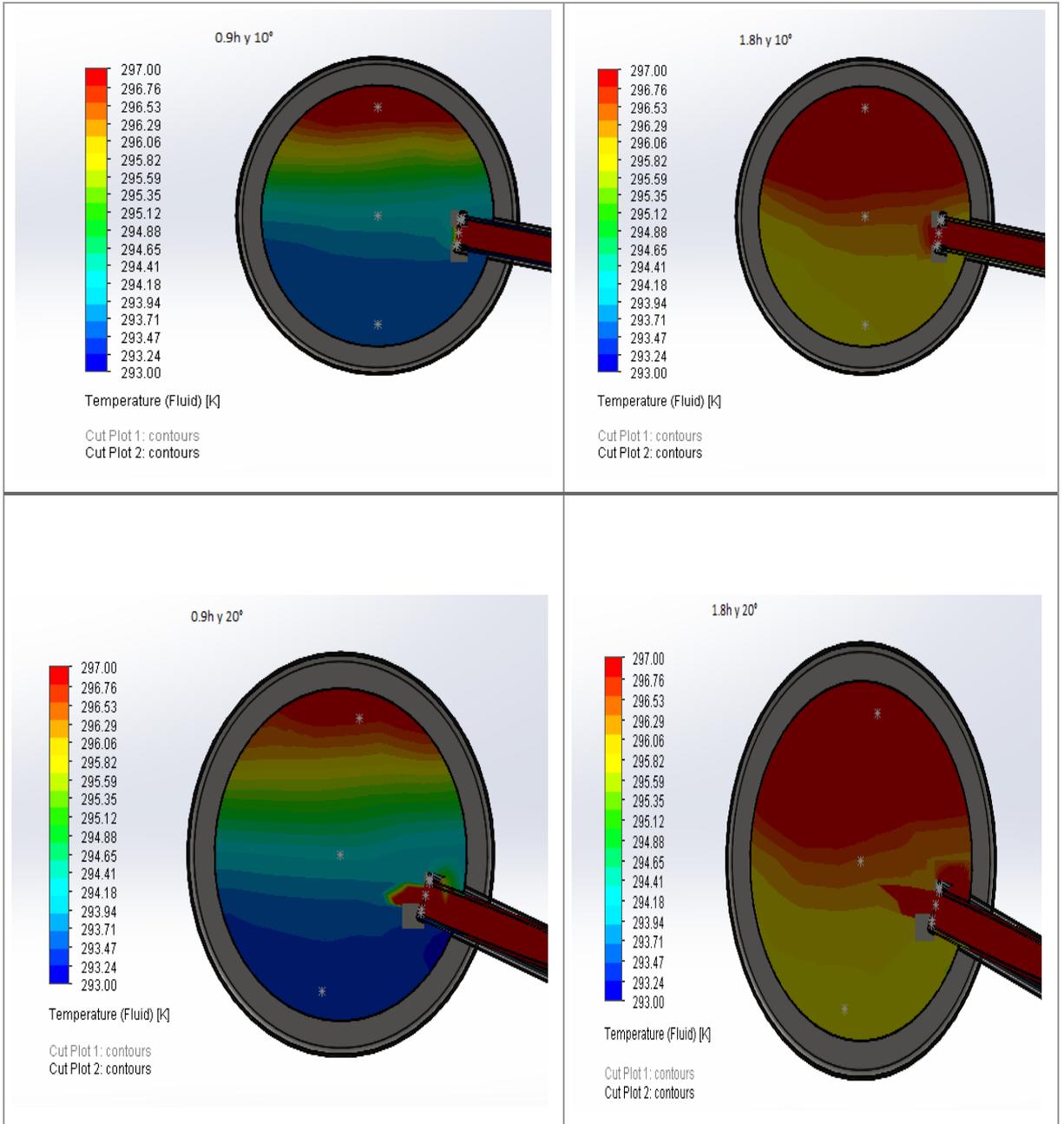
ANEXO D: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EN 0.9 Y 1.8 H EL 14/11/2021.



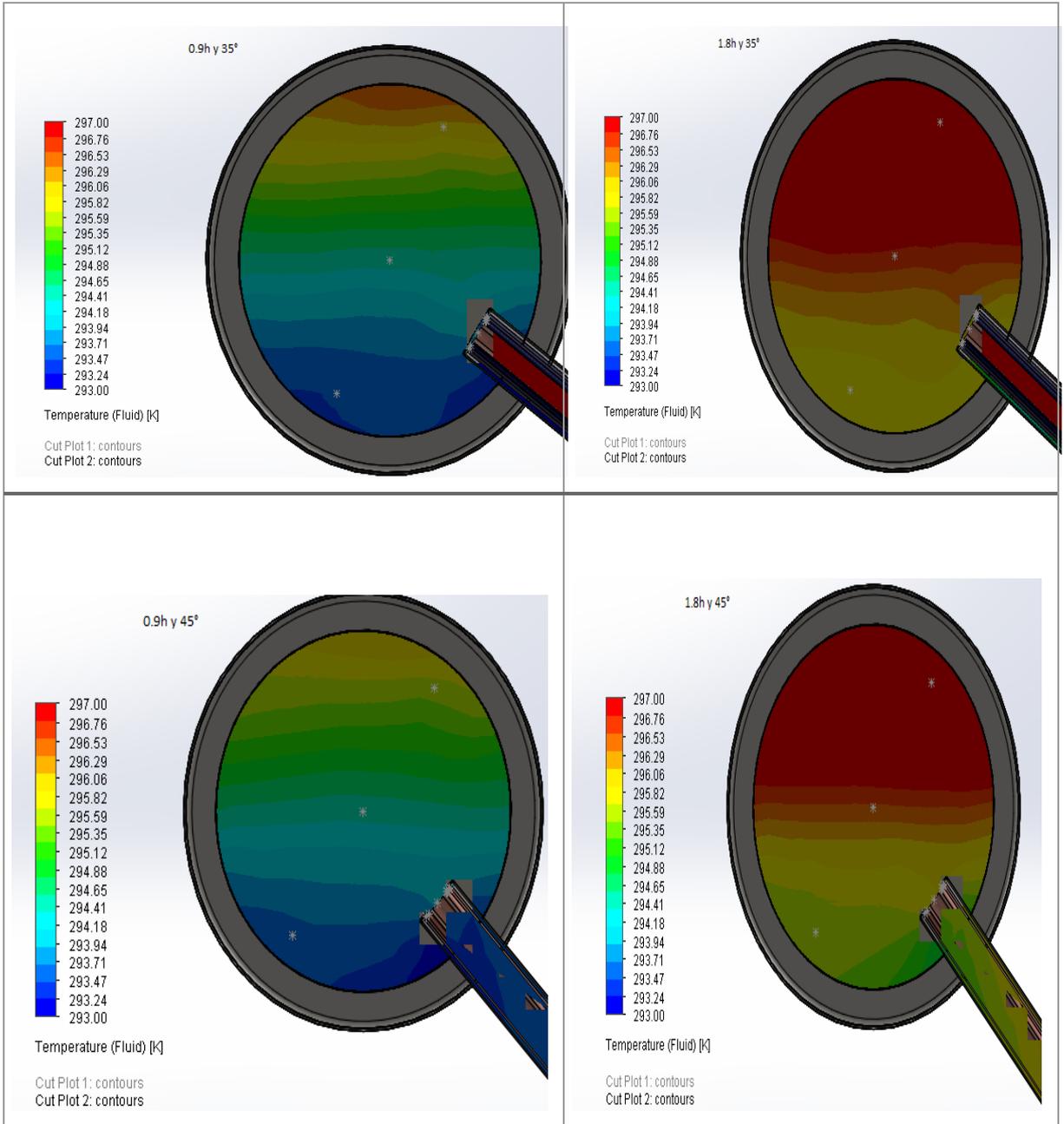
ANEXO E: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 14/11/2021.



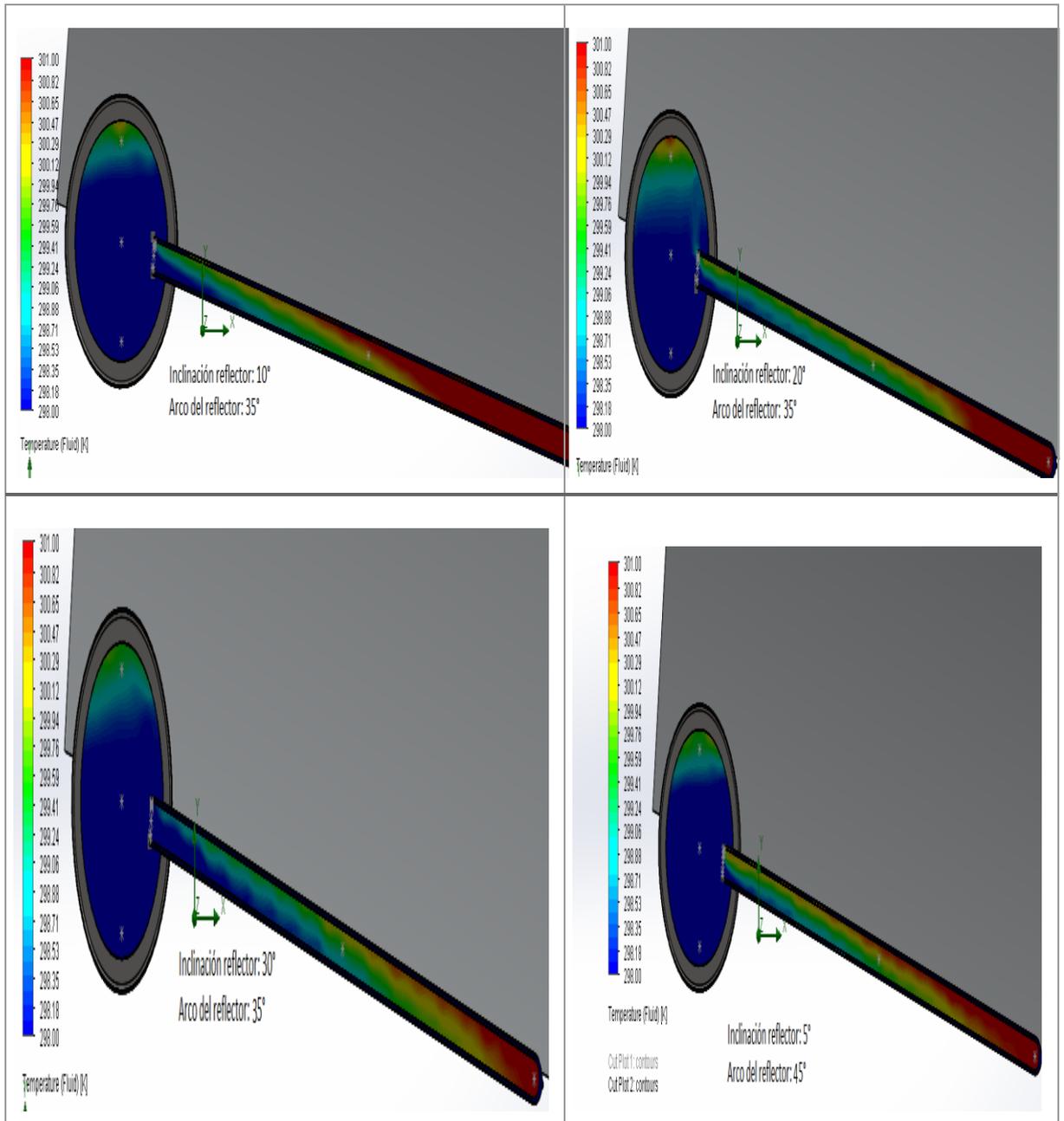
ANEXO F: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 10° Y 20° EL 07/01/2021.



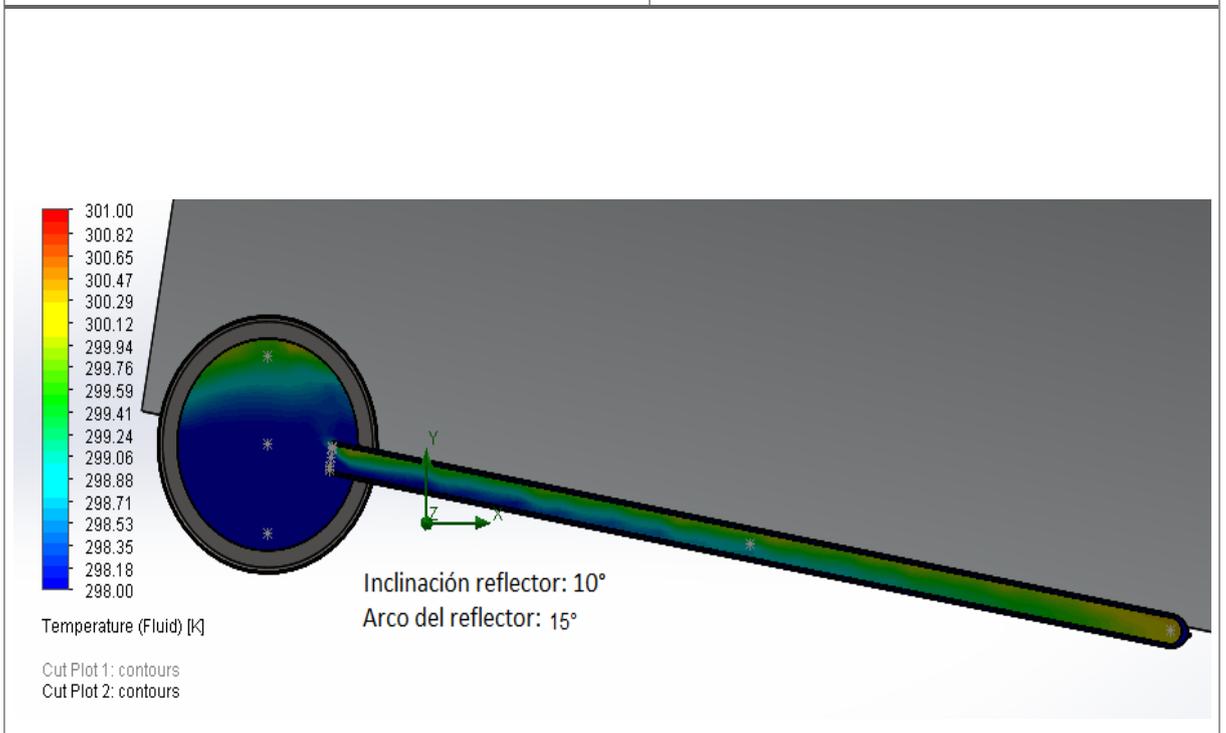
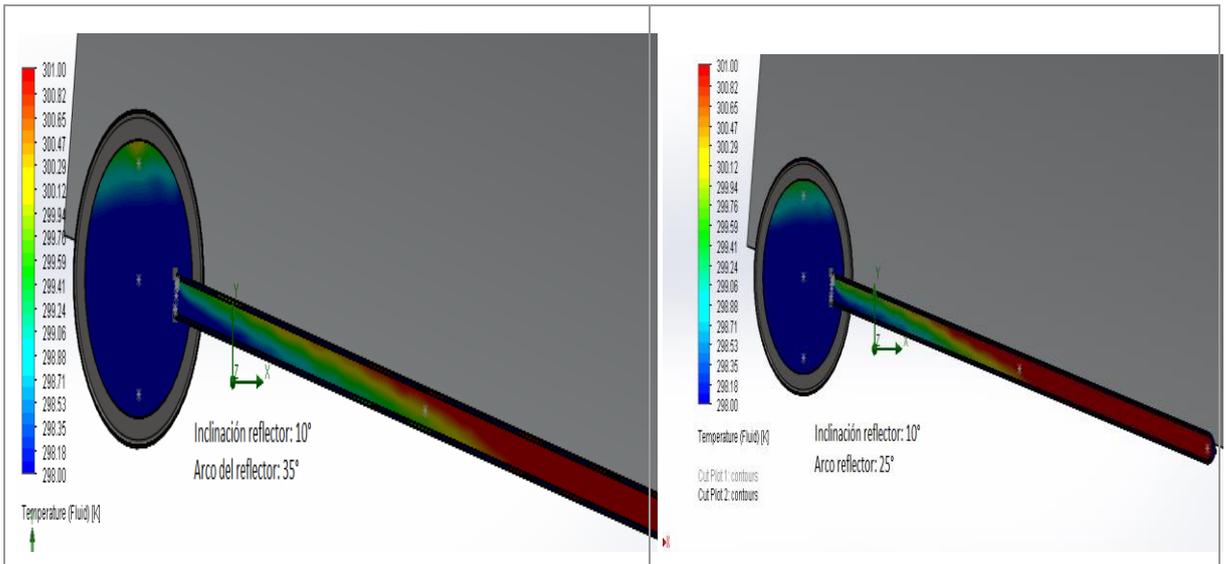
ANEXO G: TEMPERATURAS CON INCLINACIONES DE 35° Y 45° EL 07/01/2021.



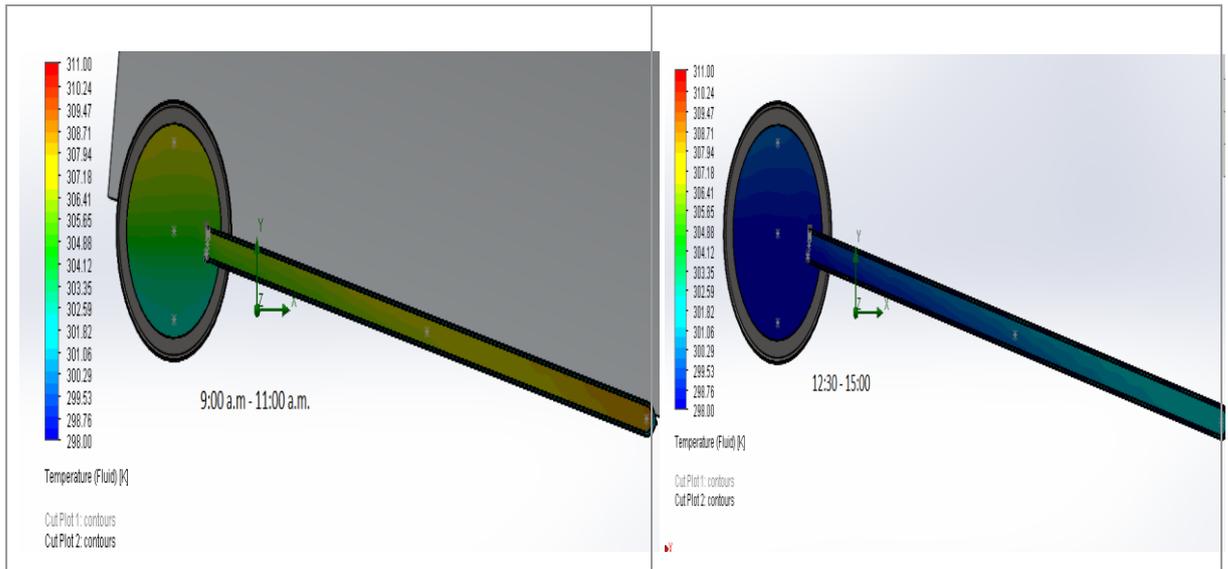
ANEXO H: TEMPERATURAS CON UN REFLECTOR A VARIAS INCLINACIONES.



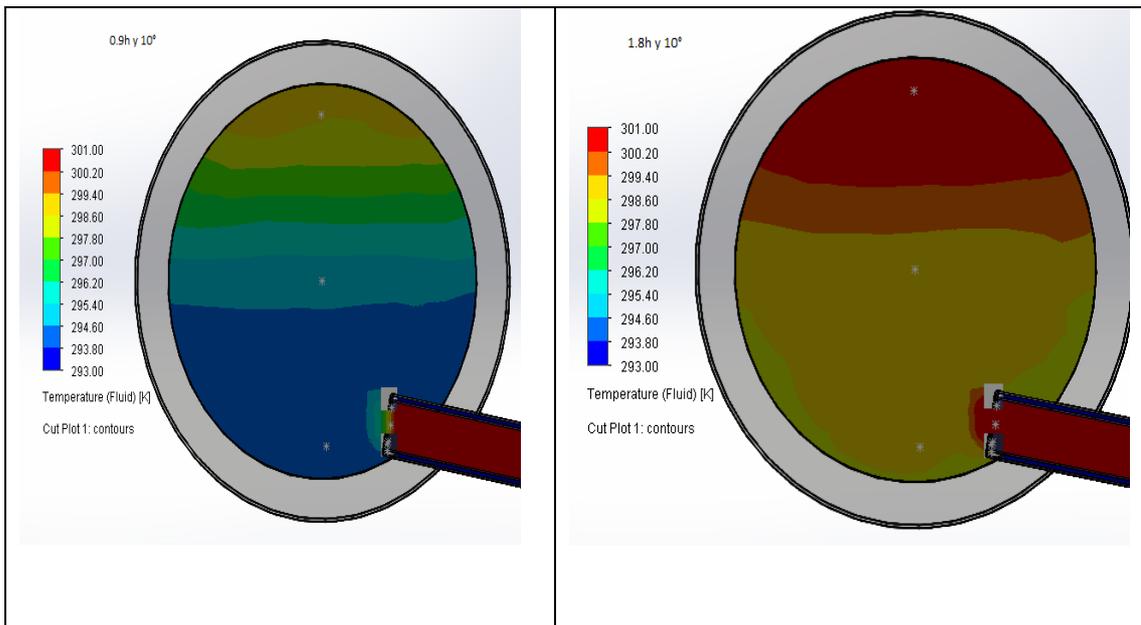
ANEXO I: TEMPERATURAS CON UN REFLECTOR CON DIFERENTES ARCOS.



ANEXO J: TEMPERATURAS DE UN COLECTOR CON REFLECTOR EL 05/01/2021.



ANEXO K: TEMPERATURAS CON TUBOS A 10° Y 28 CM DE ALTURA EL 14/11/2021.



ANEXO L: DATOS DE ENTRADA Y DOMINIO COMPUTACIONAL.

INPUT DATA

Global Mesh Settings

Automatic initial mesh: On
Result resolution level: 2
Advanced narrow channel refinement: Off

Geometry Resolution

Evaluation of minimum gap size: Manual
Minimum gap size: 0.039 m
Evaluation of minimum wall thickness: Automatic

Computational Domain

Size

X min	-0.230 m
X max	1.376 m
Y min	-1.376 m
Y max	0.230 m
Z min	-0.874 m
Z max	0.874 m
X size	1.606 m
Y size	1.606 m
Z size	1.748 m

ANEXO M: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, AMBIENTALES Y GRAVITACIONALES.

Physical Features

Heat conduction in solids: On
Heat conduction in solids only: Off
Radiation: On
Radiation in gases: Off
Time dependent: On
Gravitational effects: On
Rotation: Off
Flow type: Laminar and turbulent
Cavitation: Off
High Mach number flow: Off
Free surface: Off
Default roughness: 0 micrometer

Gravitational Settings

X component	0 m/s ²
Y component	-9.80 m/s ²
Z component	0 m/s ²

Environment radiation

Environment temperature	283.00 K
Spectrum	Blackbody

ANEXO N: CONDICIONES INICIALES.

Initial Conditions

Thermodynamic parameters	Static Pressure: 103000.00 Pa Temperature: 288.00 K
Velocity parameters	Velocity vector Velocity in X direction: 0 m/s Velocity in Y direction: 0 m/s Velocity in Z direction: 0 m/s
Solid parameters	Default material: BOROSILICATO Initial solid temperature: 293.20 K Radiation Transparency: Opaque
Turbulence parameters	Turbulence intensity and length Intensity: 2.00 % Length: 0.007 m



esPOCH

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 22/ 08 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)
Joaquín Mateo Bustos Barragán
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Física
Título a optar: Físico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo