



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELECTROMECAÁNICO**

**TEMA: DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN COLECTOR
CILINDRO-PARABÓLICO CON SEGUIMIENTO SOLAR PARA
OBTENER AGUA CALIENTE**

AUTORES: CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO

JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO

DIRECTOR: ING. MARIO JIMÉNEZ

LATACUNGA

2017



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, **“DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN COLECTOR CILINDRO-PARABÓLICO CON SEGUIMIENTO SOLAR PARA OBTENER AGUA CALIENTE”** realizado por **CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO** y **JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO** ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a los señores **CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO** y **JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO** para que los sustente públicamente.

Latacunga, 31 de julio del 2017

Ing. Mario Jiménez León

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, **CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO**, con cédula de ciudadanía N° **0503218125** y **JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO**, con cédula de ciudadanía N° **0706333168** declaramos que este trabajo de titulación "**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN COLECTOR CILINDRO-PARABÓLICO CON SEGUIMIENTO SOLAR PARA OBTENER AGUA CALIENTE**" ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros, considerándose en las citas bibliográficas.


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

Latacunga, 31 de julio del 2017.



Carlos Alejandro Mantilla Tenorio

C.C.: 0503218125



José Miguel Toro Zambrano

C.C.: 0706333168



DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO** y **JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de institución el presente trabajo de titulación “**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN COLECTOR CILINDRO-PARABÓLICO CON SEGUIMIENTO SOLAR PARA OBTENER AGUA CALIENTE**” cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 31 de julio del 2017.

Carlos Alejandro Mantilla Tenorio

C.C.: 0503218125

José Miguel Toro Zambrano

C.C.: 0706333168

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mis padres y hermanos que son los que me apoyaron en todos los aspectos en este proyecto.

Carlos Alejandro

Este trabajo se lo dedico a mis padres Angel Guiberto y María Eugenia, a mis hermanos Santiago y María que fueron el apoyo fundamental para que hoy pueda realizarme como persona y profesional gracias a ellos que con su trabajo arduo han permitido que nuestra familia Toro Zambrano crezca día a día.

José Miguel

AGRADECIMIENTO

Agradezco especialmente a mis padres, Carlos y Edith, mis hermanos, Bryan y Darla, y mi familia en general por todo el apoyo durante todo mi vida estudiantil, así también al Ing. Mario Jiménez por su aporte al desarrollo de este proyecto y a todas las otras personas que siempre estuvieron pendientes por si necesitaba algo.

Carlos Alejandro

En primer lugar a Dios por guiarme en esta etapa de mi vida, a mis familiares y amigos que siempre estuvieron ahí apoyándome durante el transcurso de mi vida académica, así también a cada uno de los maestros que con sus conocimientos ayudaron a mi formación como profesional, un agradecimiento especial al Ing., Mario Jiménez por su disponibilidad de tiempo y de recursos físicos que fueron un apoyo fundamental en el desarrollo de este proyecto.

José Miguel

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
CAPITULO I	1
1. PROBLEMA	1
1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.2. Antecedentes	1
1.3. Justificación e importancia	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo general	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
CAPITULO II	4
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	4
2.1. Radiación solar	4
2.1.1. Nociones básicas sobre la radiación solar.....	4
a. Tipos de radiación	4
2.1.2. Concentración de la radiación solar	5
2.1.3. Radiación solar en el Ecuador.....	7
2.2. Nubosidad.....	8
2.3. Estudio del movimiento solar.....	9

2.3.1.	Ángulo de incidencia solar	13
2.3.2.	Tiempo solar verdadero (TSV)	15
2.4.	Tipos de colectores	16
2.4.1.	Colectores solares de un eje	16
2.4.2.	Sistemas de concentración	17
2.5.	Colector solar cilindro-parabólico (CCP)	18
2.5.1.	Componentes principales de un CCP	18
2.5.2.	Razón de concentración geométrica y ángulo de aceptación	20
a.	Lado recto y puntos máximos.....	20
b.	Cálculo del ángulo de abertura α y de la distancia ρ	21
c.	Cálculo del diámetro del tubo receptor	21
2.5.3.	Pérdidas ópticas y geométricas en un CCP	23
2.5.4.	Pérdidas térmicas de un CCP	27
2.5.5.	Rendimiento global de un CCP	28
2.6.	Mecanismo de seguimiento solar	29
2.6.1.	Seguidores solares	29
2.6.2.	Sistemas de regulación de tiempo	29
2.7.	Sistemas de calentamiento de agua.....	30
2.7.1.	Sistema Heat Pipe	30
a.	Tubo sellado al vacío	31
b.	Tubo de calor	33
c.	Absorbedor	34
d.	Fluidos de trabajo.....	34
2.7.2.	Producción directa de agua caliente por el CCP	35
2.8.	Mecanismos de transferencia de calor	35
2.8.1.	Conducción	35
2.8.2.	Convección	36
2.8.3.	Radiación	36
2.9.	Conducción de calor en cilindros.....	38
2.10.	Convección natural sobre superficies.....	38
2.11.	Aislamiento Térmico.....	40
2.11.1.	El valor \mathcal{R} del aislamiento	40
2.12.	Calor incidente sobre el tubo absorbedor	40
2.13.	Calor necesario	41

2.14.	Registro de variables físicas.....	42
2.14.1.	Sondas de temperatura.....	42
a.	Termistor.....	42
b.	RTD.....	42
c.	Termopar.....	43
d.	Termocuplas estándar.....	43
2.14.2.	Medidor de Radiación.....	44

CAPITULO III **46**

3.	MARCO METODOLÓGICO.....	46
3.1.	Antecedentes investigativos.....	46
3.2.	Fundamentación legal.....	47
3.2.1.	Modelo genérico para la evaluación del entorno de aprendizaje.....	47
3.3.	Variables de investigación.....	48
3.4.	Operacionalización de las variables.....	48
3.5.	Modalidad de investigación.....	50
3.5.1.	Investigación bibliográfica.....	50
3.5.2.	Investigación de campo.....	50
3.5.3.	Investigación experimental.....	50
3.5.4.	Investigación aplicada.....	50
3.6.	Técnica de recolección de datos.....	51
3.6.1.	Observación en laboratorio.....	51
3.7.	Técnica de análisis de datos.....	51

CAPITULO IV **52**

4.	ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN.....	52
4.1.	Análisis del recurso solar en el lugar de instalación.....	52
4.1.1.	Radiación solar directa.....	52
4.1.2.	Ángulo de incidencia solar.....	53
4.1.3.	Análisis del movimiento solar.....	58
4.2.	Diseño del colector solar cilindro-parabólico.....	60
4.2.1.	Diseño conceptual (casa de la calidad).....	60

4.2.2.	Descripción del colector	63
4.2.3.	Componentes del colector cilindro parabólico	63
a.	Base reflectora	63
b.	Tubo receptor	66
4.2.4.	Pérdidas Geométricas del CCP	67
a.	Sin seguimiento solar:	67
b.	Con seguimiento solar:	68
4.3.	Construcción del colector cilindro-parabólico	69
4.4.	Mecanismo de seguimiento solar	81
4.4.1.	Estudio mecánico	82
4.4.2.	Selección del mecanismo	84
4.4.3.	Descripción del algoritmo de control	86
4.5.	Implementación del mecanismo de seguimiento solar	88
4.6.	Análisis de sistemas de calentamiento de agua	91
4.6.1.	Análisis de obtención de agua caliente mediante Heat Pipe	91
4.7.	Diseño del sistema de obtención de agua caliente	93
4.7.1.	Diseño conceptual (casa de la calidad)	93
4.7.2.	Análisis de la temperatura del agua en el lugar de instalación	96
4.7.3.	Diseño del sistema	96
a.	Tubo de vacío	96
b.	Tubo de calor	97
c.	Tanque de almacenamiento	98
d.	Aislamiento	103
4.7.4.	Descripción del sistema	107
4.8.	Construcción del sistema para obtener agua caliente	107
4.8.1.	Tanque de almacenamiento de agua	108
4.8.2.	Mesa soporte	109
4.9.	Conexión del sistema hidráulico	115
4.10.	Selección de dispositivos eléctricos y mecánicos	116
4.10.1.	Fuente de alimentación eléctrica	116
a.	Batería	116
b.	Controlador de carga solar	118
c.	Panel solar	120
4.11.	Sistema del monitoreo de variables físicas	121

4.11.1. Equipos para el monitoreo de variables	123
a. Termómetro digital de 4 canales	123
b. Termopar; transferencia Tipo: K.....	124
4.12. Implementación del módulo de control	125

CAPÍTULO V **128**

5. PRUEBAS Y RESULTADOS..... 128

5.1. Pruebas del sistema de carga.....	128
5.1.1. Procedimiento de las pruebas.....	128
5.1.2. Resultados de las pruebas.....	130
5.2. Pruebas del mecanismo de seguimiento solar del CCP	132
5.2.1. Procedimiento para las pruebas.....	132
5.2.2. Resultados de las pruebas.....	133
5.3. Pruebas en el sistema de agua caliente.....	135
5.3.1. Procedimiento para realizar las pruebas del sistema	135
5.3.2. Resultados de las pruebas.....	136
5.4. Pérdidas térmicas en el tanque de almacenamiento	144
5.5. Determinación del rendimiento global del sistema.....	147

CONCLUSIONES..... 149

RECOMENDACIONES..... 151

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 152

SIMBOLOGÍA 156

ANEXOS 160

ANEXO A Propiedades mecánicas y características del aluminio y acero utilizados en el proyecto.

ANEXO B Características técnicas del tubo de vacío.

ANEXO C Características técnicas de equipos y dispositivos utilizados en la implementación del colector cilindro parabólico.

ANEXO D Planos estructurales del colector cilindro parabólico.

ANEXO E Planos eléctricos y diagrama de tuberías de agua para el tanque.

ANEXO F Guías de práctica de laboratorio.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Irradiación solar mensual en el cantón Latacunga	8
Tabla 2.	Valores de ET dados en minutos	15
Tabla 3.	Colectores solares por su rango de temperatura	16
Tabla 4.	Temperaturas fluidos de trabajo Heat Pipe	34
Tabla 5.	Valores típicos del coeficiente de convección	39
Tabla 6.	Características de las termocuplas estándar.....	44
Tabla 7.	Operacionalización de variable independiente	48
Tabla 8.	Operacionalización de variable dependiente.....	49
Tabla 9.	Declinación mensual en el lugar de instalación.....	54
Tabla 10.	Ángulo horario a lo largo del día con luz solar útil	54
Tabla 11.	Datos del ángulo de incidencia solar y la radiación media	55
Tabla 12.	Datos para el cálculo del rendimiento óptico	56
Tabla 13.	Radiación efectiva en el mes de junio sin seguimiento	56
Tabla 14.	Radiación efectiva con seguimiento solar	57
Tabla 15.	Relación de distancias focales	65
Tabla 16.	Materiales de construcción del CCP	73
Tabla 17.	Espectro Skewness para calidad de malla	76
Tabla 18.	Especificaciones del seguidor solar	85
Tabla 19.	Análisis de sistema de calentamiento de agua.....	91
Tabla 20.	Características del agua en el lugar de instalación	96
Tabla 21.	Características técnicas tubo de vacío.....	97
Tabla 22.	Especificaciones del tubo de calor	98
Tabla 23.	Datos para el dimensionamiento del tanque	99
Tabla 24.	Datos del termopozo para el dimensionamiento del tanque	101
Tabla 25.	Datos para el dimensionamiento del aislamiento	104
Tabla 26.	Especificaciones del tanque de almacenamiento	108
Tabla 27.	Datos para el cálculo de la capacidad de la batería	117
Tabla 28.	Especificaciones técnicas batería seleccionada.....	118
Tabla 29.	Especificaciones del regulador de carga solar	119
Tabla 30.	Calibre de conductores AWG.....	120
Tabla 31.	Especificaciones del panel solar	121
Tabla 32.	Lista de instrumentos del sistema de agua caliente	122

Tabla 33.	Lista de válvulas del sistema de agua caliente.....	122
Tabla 34.	Especificaciones Termómetro Digital 4 Canales	123
Tabla 35.	Equipos del módulo de control	125
Tabla 36.	Datos de pruebas 6 de junio	137
Tabla 37.	Datos de pruebas 16 de junio	139
Tabla 38.	Datos de pruebas sin base reflectora.....	141
Tabla 39.	Datos para el cálculo de pérdidas en el tanque.....	144
Tabla 40.	Datos de la práctica	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Componentes de la radiación solar terrestre total	5
Figura 2	Entorno focal de una parábola	6
Figura 3	Concentración rendimiento y temperatura de colectores	6
Figura 4	Insolación media global en el ecuador	7
Figura 5	Cantidad de nubes medidas en octas	9
Figura 6	Representación de una bóveda celeste	9
Figura 7	Medición del azimut	10
Figura 8	Simulación de la posición del sol 21 de marzo al medio día	11
Figura 9	Simulación de la posición del sol 21 de junio al medio día	12
Figura 10	Sim. de la posición del sol 21 de septiembre al medio día	12
Figura 11	Sim. de la posición del sol 21 de diciembre al medio día	13
Figura 12	Esquema de un CCP	18
Figura 13	Representación de una parábola	20
Figura 14	Gráfica de la curva.....	20
Figura 15	Ángulo de abertura y distancia ρ del CCP	21
Figura 16	Proyección del disco solar sobre el absorbedor	22
Figura 17	Angulo de aceptación de un CCP	23
Figura 18	Pérdidas ópticas de un CCP	25
Figura 19	Pérdidas geométricas debido a sombras	25
Figura 20	Pérdidas en el tubo absorbedor de un CCP.....	27
Figura 21	Componentes principales del Heat Pipe	31
Figura 22	Tubo de vidrio sellado al vacío.....	32
Figura 23	Capa de bario del tubo de vidrio	32
Figura 24	Diferencia entre tubo en buen estado y tubo defectuoso	33
Figura 25	Componentes de un tubo de calor convencional	34
Figura 26	Esquema de una termocupla cualquiera.....	43
Figura 27	Piranómetro	44
Figura 28	Pirheliómetro	45
Figura 29	Datos de ubicación en el software SAM.....	52
Figura 30	Datos de radiación directa software SAM	52
Figura 31	Gráfica de la radiación directa en un día del mes de junio	53
Figura 32	Comparación de la radiación efectiva en un día	58

Figura 33	Mapa del Ecuador.....	59
Figura 34	Ubicación geográfica del lugar de instalación	60
Figura 35	Casa de la calidad del CCP	62
Figura 36	Gráfica de la curva.....	63
Figura 37	Gráfica de las distancias focales.....	65
Figura 38	Perfil del CCP expresado en metros	65
Figura 39	Ángulo de abertura y distancias dentro del perfil del CCP	66
Figura 40	Canal parabólico de la base reflectora en SolidWorks	69
Figura 41	Plancha de aluminio en proceso de rolado	70
Figura 42	Base reflectora del CCP	70
Figura 43	Base reflectora en las platinas de soporte	70
Figura 44	Platina exterior a la base reflectora.....	71
Figura 45	Colector solar cilindro parabólico diseñado.....	71
Figura 46	Columna norte el CCP	72
Figura 47	Columna sur del CCP	72
Figura 48	Columnas norte y sur del CCP.....	73
Figura 49	Chumaceras en cada columna del CCP	73
Figura 50	Ensamble exportado a ANSYS	75
Figura 51	Materiales asignados en ANSYS	75
Figura 52	Mallado del ensamble	76
Figura 53	Valores Skewness del proyecto	76
Figura 54	Puntos de fijación para simulación.....	77
Figura 55	Gravedad representada en el sistema	77
Figura 56	Análisis de esfuerzo.....	78
Figura 57	Esfuerzo soportado por el eje de la columna norte	78
Figura 58	Esfuerzo soportado por el eje de la columna sur	79
Figura 59	Deflexión eje de la columna norte.....	79
Figura 60	Deflexión eje de la columna sur	80
Figura 61	CCP construido	81
Figura 62	DCL de la base reflectora	82
Figura 63	Sistema de seguimiento solar.....	84
Figura 64	Actuador lineal.....	85
Figura 65	Motor del seguidor solar	86
Figura 66	Celdas fotovoltaicas del seguidor solar.....	86

Figura 67	Circuito de conexión de los relés del controlador	87
Figura 68	Caja del controlador del seguidor solar.....	87
Figura 69	Control remoto del seguidor solar	88
Figura 70	Dimensiones para la ubicación del actuador.....	88
Figura 71	Ángulo de inclinación del CCP.....	89
Figura 72	Implementación del mecanismo de seguimiento.....	89
Figura 73	Ubicación del sensor de seguimiento	90
Figura 74	Implementación final del actuador lineal	90
Figura 75	Principio de funcionamiento del Heat Pipe.....	92
Figura 76	Tubo de calor dentro del termopozo	92
Figura 77	Casa de la calidad del sistema de calentamiento	95
Figura 78	Prototipo de pruebas	98
Figura 79	Datos anuales del clima dados por el software SAM	103
Figura 80	Esquema de resistencias de un tanque aislado	105
Figura 81	Gráfica radio de aislamiento	106
Figura 82	Tanque modelado en SolidWorks.....	108
Figura 83	Mesa soporte para el tanque	109
Figura 84	Vista lateral mesa soporte del tanque.....	109
Figura 85	Mallado sobre la mesa.....	111
Figura 86	Skewness del mallado sobre la mesa.....	111
Figura 87	Puntos de soporte de la mesa	112
Figura 88	Fuerza colocada sobre el tanque.....	112
Figura 89	Esfuerzo ejercido por el tanque lleno sobre la mesa.....	113
Figura 90	Esfuerzo máximo soportado por la mesa y el tanque.....	113
Figura 91	Deformación de la mesa	114
Figura 92	Tanque y mesa construidos.....	115
Figura 93	Diagrama de tuberías	115
Figura 94	Diagrama de válvulas	116
Figura 95	Batería seleccionada 12V18Ah.....	117
Figura 96	Controlador de carga solar	119
Figura 97	Diagrama de termocuplas.....	122
Figura 98	Termómetro digital de 4 canales.....	123
Figura 99	Termopar tipo K.....	124
Figura 100	Gabinete colocado en la columna norte.....	125

Figura 101	Esquema de conexiones del sistema de seguimiento	126
Figura 102	Componentes colocados en el gabinete metálico	127
Figura 103	Diagrama de conexión del medidor de energía.....	128
Figura 104	Funciones de visualización del controlador de carga solar	129
Figura 105	Estado de la carga en el controlador de carga solar	129
Figura 106	Datos del medidor de energía.....	130
Figura 107	LED de estado la carga encendido	130
Figura 108	LED de estado de carga apagado	131
Figura 109	Estado de carga de batería en 25 a 75%.....	131
Figura 110	LED de estado de carga en normal funcionamiento.....	132
Figura 111	Indicación de movimiento hacia el este.....	133
Figura 112	Posicionamiento total al este del CCP	133
Figura 113	Indicación de movimiento hacia el oeste.....	134
Figura 114	Posicionamiento total al oeste del CCP	134
Figura 115	Indicación de sol bajo en la pantalla	135
Figura 116	Radiación solar vs tiempo 6 de junio	138
Figura 117	Temperatura del agua almacenada vs tiempo 6 de junio	138
Figura 118	Radiación solar vs tiempo 16 de junio.....	140
Figura 119	Temperatura del agua almacenada vs tiempo 16 de junio	140
Figura 120	Base reflectora cubierta para ensayo	141
Figura 121	Radiación solar ensayo sin base reflectora.....	142
Figura 122	Comparación de la temperatura del Heat Pipe	143
Figura 123	Comparación de la temperatura del agua en el tanque.....	143
Figura 124	Circuito térmico del tanque	145

RESUMEN

El presente trabajo de titulación describe el diseño e implementación de un colector solar cilindro parabólico (CCP) con seguimiento solar para obtener agua caliente. En donde se desarrolla el planteamiento del problema y los objetivos que se pretenden alcanzar, la fundamentación teórica donde se recopila toda la información necesaria para la elaboración del proyecto. Para el diseño e implementación del CCP se analiza la radiación solar disponible en el lugar de instalación seguido del diseño y construcción del sistema mecánico realizando una serie de cálculos para el dimensionamiento de la base reflectora, y se realiza un análisis de esfuerzos y deflexión de la estructura para verificar la factibilidad del diseño en el software ANSYS, se realiza un análisis del sistema de seguimiento solar, el cual se dimensiona a partir de la estructura del CCP, para determinar el tipo seguidor solar a implementar; para la alimentación de energía del sistema de seguimiento se dimensiona el sistema de carga, conformado por un panel solar y una batería; como último punto, para el sistema de calentamiento se determina la cantidad de agua que es capaz de calentar el sistema a partir del análisis energético en el lugar de instalación, el sistema de calentamiento se basa en colocar un Heat Pipe, en el foco de la parábola para recibir los rayos solares reflejados por el colector e intercambiar calor al agua a partir de un termopozo donde ingresa el condensador del tubo de calor, finalmente se realizan las pruebas en el CCP implementado obteniendo un rendimiento global de 16,37%.

PALABRAS CLAVE:

- **COLECTOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO**
- **RADIACIÓN SOLAR**
- **TUBO DE CALOR**

ABSTRACT

The present titration work describes the design and implementation of the cylindrical parabolic solar collector (CCP) with solar tracking to obtain hot water. Where develops the approach of the problem and the objectives that are intended to be reached, the theoretical foundation where all the necessary information for the elaboration of the project is gathered. For the design and implementation of the CCP the solar radiation available at the installation site is analyzed followed by the design and construction of the mechanical system by performing a series of calculations for the dimensioning of the reflecting base, with an analysis of efforts and deflection of the structure for check the feasibility of the design on the software ANSYS, in addition an analysis of the solar tracking system, whose is dimensioned from the structure of the CPC, is carried out to determine the solar tracking type to implement, for the power supply of the tracking system the charging system is dimensioned, formed by a solar panel and a battery; As a last point, for the heating system the amount of water that is able to heat the system from the energy analysis at the installation site is determined, the heating system is based on placing a Heat Pipe in the focus of the Parabola In order to receive the solar rays reflected by the collector and to exchange heat to the water from a thermowell where the heat pipe condenser. Finally, tests are performed in the implemented CPC obtaining a global yield of 16,37%

KEYWORDS:

- **CYLINDRICAL PARABOLIC SOLAR COLLECTOR**
- **SOLAR RADIATION**
- **HEAT PIPE**

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente se tienen distintas maneras de obtener agua caliente, desde usar sistemas basados en combustibles fósiles hasta el uso de energías renovables; siendo estos últimos con baja eficiencia pero, a su vez, no afectan al medio ambiente como lo hacen los sistemas que utilizan combustibles. La baja eficiencia de los sistemas de energías renovables es debido a que están basados a fuentes que no se pueden controlar, como lo es, la velocidad del viento, radiación solar, etcétera.

Por ello hemos decidido diseñar e implementar un colector cilindro parabólico con seguimiento solar, para así conseguir incrementar la eficiencia del colector solar cilindro-parabólico, así como también mejorar la producción de agua caliente durante el día, la cual puede ser utilizada para múltiples aplicaciones en el área industrial como residencial, teniendo en cuenta que no se afectará al medio ambiente.

1.2. Antecedentes

El uso de colectores cilindro parabólicos en el Ecuador, hasta el momento, no han sido motivo de estudio e innovación tecnológica; a su vez, se puede encontrar información sobre este tema en diferentes países que fomentan el uso de energías renovables, uno de los casos es el proyecto de Eduardo Zarza, con su tema de proyecto “Generación directa de vapor con colectores cilindro parabólicos” acota que “la radiación solar nunca es elevada cuando el ángulo de giro de los colectores son pequeños”, además concluyó que “en ningún caso de han obtenido diferencias de temperatura superiores a los 41K”, con lo que se puede conocer que si el sistema de colector cilindro parabólico no se lo realiza con un mecanismo de seguimiento solar, este no produce temperaturas necesarias para la generación de vapor, o a su vez el calentamiento de agua.

En otros trabajos según Oscar Higuera y Efraín Ruiz, en su proyecto “Diseño y Construcción de un seguidor mecánico para un potabilizador solar parabólico.”, “el colector cilindro-parabólico se hace más eficiente al instalar el dispositivo de seguimiento solar, debido a que, en primer lugar el movimiento del colector es continuo, describiendo así una trayectoria muy cercana a la del sol, lo que garantiza un mejor aprovechamiento de la radiación solar” dicho por los autores, tiene relación con el proyecto planteado en el presente documento, el cual tiene como fin diseñar e implementar un colector cilindro parabólico con seguimiento solar para obtener agua caliente.

Con el análisis de información de la tesis, tanto de Eduardo Zarza, como de Oscar Higuera y Efraín Ruiz, se puede concluir que mediante la implementación de un mecanismo de seguimiento solar mejora la eficiencia del colector cilindro-parabólico, además se puede optimizar el proceso de obtención de agua caliente.

1.3. Justificación e importancia

La humanidad desde sus comienzos han aprovechado la energía solar de distintas formas, esta puede ser como una opción energética o como fuente de vida. Actualmente el concepto de energías renovables y su aplicación ha empezado a tomar fuerza en el país y el mundo ya que se buscan nuevas fuentes de energías que sean limpias y que no afecten al medio ambiente.

La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE tiene como misión el formar profesionales de excelencia capaces de solucionar problemas de interés público, es por eso que nos hemos planteado el diseño e implementación de un sistema de calentamiento de agua usando energía solar, principalmente en la ejecución de un mecanismo de seguimiento solar.

Mediante el diseño e implementación del colector solar cilindro-parabólico con seguimiento solar se pretende incrementar la eficiencia del colector y así logrando obtener mayor cantidad de agua caliente durante el día, la cual puede ser utilizada en varias aplicaciones en el área industrial, así como también en residencias.

Este proyecto puede ser utilizado como módulo de investigación y práctica con los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; haciendo énfasis a la carrera de ingeniería en Electromecánica.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar e implementar un colector cilindro-parabólico con seguimiento solar para obtener agua caliente.

1.4.2. Objetivos específicos

- Obtener las variables necesarias para realizar el sistema de seguimiento solar.
- Especificar los materiales a usar para la construcción del colector cilindro parabólico, el mecanismo de seguimiento solar.
- Diseñar un sistema de calentamiento de agua mediante un intercambiador de calor.
- Monitorear las variables físicas que intervienen en el proceso de calentamiento de agua.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Radiación solar

2.1.1. Nociones básicas sobre la radiación solar

La radiación son ondas electromagnéticas las cuales producen la transferencia de energía, esta se produce en todas las direcciones directamente desde la fuente.

Todas las formas de radiación son producidas por cargas aceleradas y no precisan de un medio material para propagarse. Así las ondas provenientes tanto del sol como de las estrellas tienen la capacidad de atravesar la atmósfera para llegar a la superficie terrestre. Estas ondas tienen una longitud, la cual se representa por λ_0 , y una frecuencia (ν), y que se expresa mediante la siguiente ecuación: (Cuestas & Rincón, 2011)

$$\lambda_0 \times \nu = c \quad (1)$$

Donde c es la velocidad de la luz, si se conoce la longitud de onda se puede determinar características de esta como: energía o también su visibilidad, entre otras. (Cuestas & Rincón, 2011)

a. Tipos de radiación

- **Radiación directa:** este tipo de radiación es la que cae directamente del sol sin sufrir desviación en su trayectoria al pasar por la atmósfera, considerando que a la atmósfera llega un 100% de la radiación emitida por el sol, y al pasar por la misma solo un 25% de la radiación alcanza a llegar a la superficie de la Tierra de manera directa.

- **Radiación difusa:** es la que sufre un cambio de dirección al pasar por la atmósfera antes de llegar a la superficie terrestre. La desviación de los rayos solares se debe a que estos chocan con las moléculas y partículas que se encuentran en el aire, por lo tanto, se desvían los rayos solares y así no se tendrá dirección directa. (Echeverría, 2011).

- **Radiación terrestre o reflejada o de “albedo”**: es la radiación que se provoca por los rayos reflejados por objetos en la tierra, estos pueden ser la luz reflejada por los lagos, suelo, paredes, etc.

- **Radiación total**: Es la radiación obtenida por todas las radiaciones, directa, difusa y de albedo, como se muestra en la figura 1.

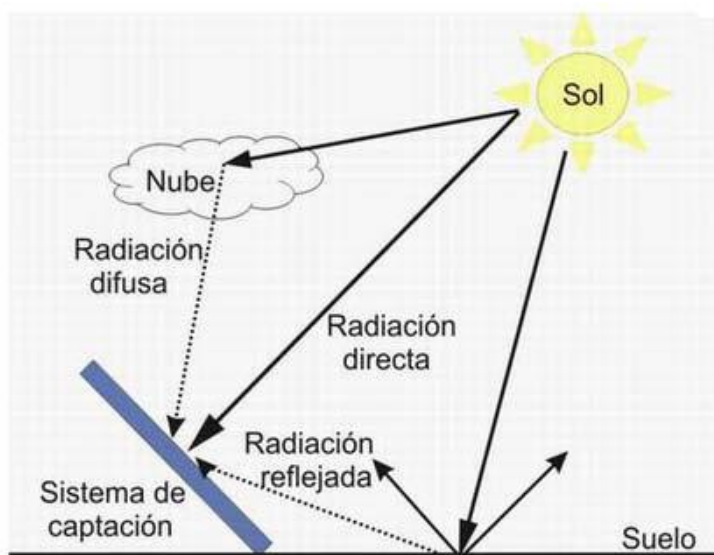


Figura 1 Componentes de la radiación solar terrestre total

Fuente: (Pacco, 2008)

2.1.2. Concentración de la radiación solar

La radiación del sol que alcanza el límite externo de la atmósfera es de 1400 W/m^2 . Pero al ingresar a la atmósfera y tocar la superficie de la tierra la radiación puede llegar hasta poco más de 1000 W/m^2 .

Con esto para aplicaciones que utilizan radiación solar directa se recurre a concentradores solares para mejorar su eficiencia. Esta concentración se logra mediante superficies reflectantes parabólicas, ya que una propiedad de la parábola es que “el ángulo formado por la tangente en cualquier punto de la parábola con la recta paralela al eje de la parábola en ese punto, es igual al formado por dicha tangente con la recta que une el punto de tangencia con el foco de la parábola” (Godoy, 2016). Si la superficie parabólica es reflectante y la recta paralela al eje es un rayo de luz, este se reflejará siempre con un rayo que pase por el foco. Ver la figura 2:

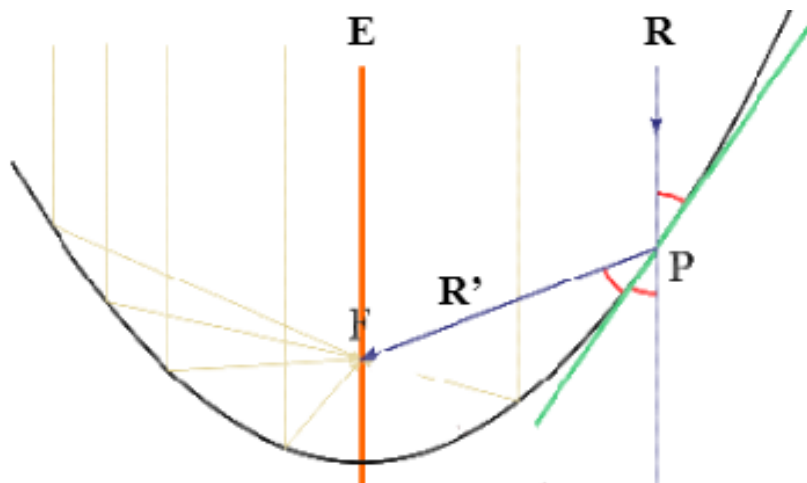


Figura 2 Entorno focal de una parábola

Fuente: (Zarza, 2003)

Así, el rayo que ingrese paralelo al eje E de la parábola, tal como el R , se reflejara en el punto P con R' que pasa por el foco F . Cualquier otro rayo, como los representados con color claro, se reflejarán pasando siempre por F . En la práctica, F no es un punto, ya que el sol tiene un tamaño aparente (su imagen no es puntual), por lo que en torno al punto F aparece una zona de muy alta densidad, llamada “entorno focal”. (Godoy, 2016)

El rendimiento de los sistemas viene condicionado por la tipología del concentrador, pero también por otros factores. Pero, se puede decir que el rendimiento crece con la concentración y dentro de cada tipo, el rendimiento es mayor para concentradores continuos y del 15% en colectores cilindro parabólico, como se indica en la figura 3.

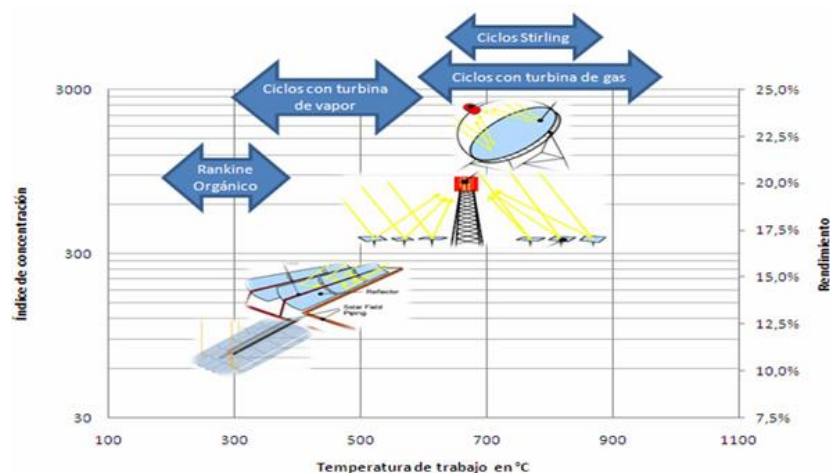


Figura 3 Concentración rendimiento y temperatura de colectores

Fuente: (Zarza, 2003)

2.1.3. Radiación solar en el Ecuador

El Ecuador está ubicado sobre la línea ecuatorial, se encuentra en ambos hemisferios, siendo un país con alta incidencia de radiación solar. A medida que la luz solar llega a los polos va disminuyendo su intensidad; en cambio ésta impacta con más fuerza sobre la línea ecuatorial. Nuestra posición geográfica hace que la luz solar pase por menos atmósfera, aquí la radiación cae perpendicularmente, situación que no ocurre en otros sitios del planeta en donde el ángulo de incidencia de la luz solar varía acorde a las estaciones del año.

En cambio en nuestro país depende de las condiciones climatológicas locales y de la cercanía o lejanía del Sol, convirtiéndolo en un país privilegiado en lo que a recurso solar, como se muestra en la figura 4. (Conelec, 2008).

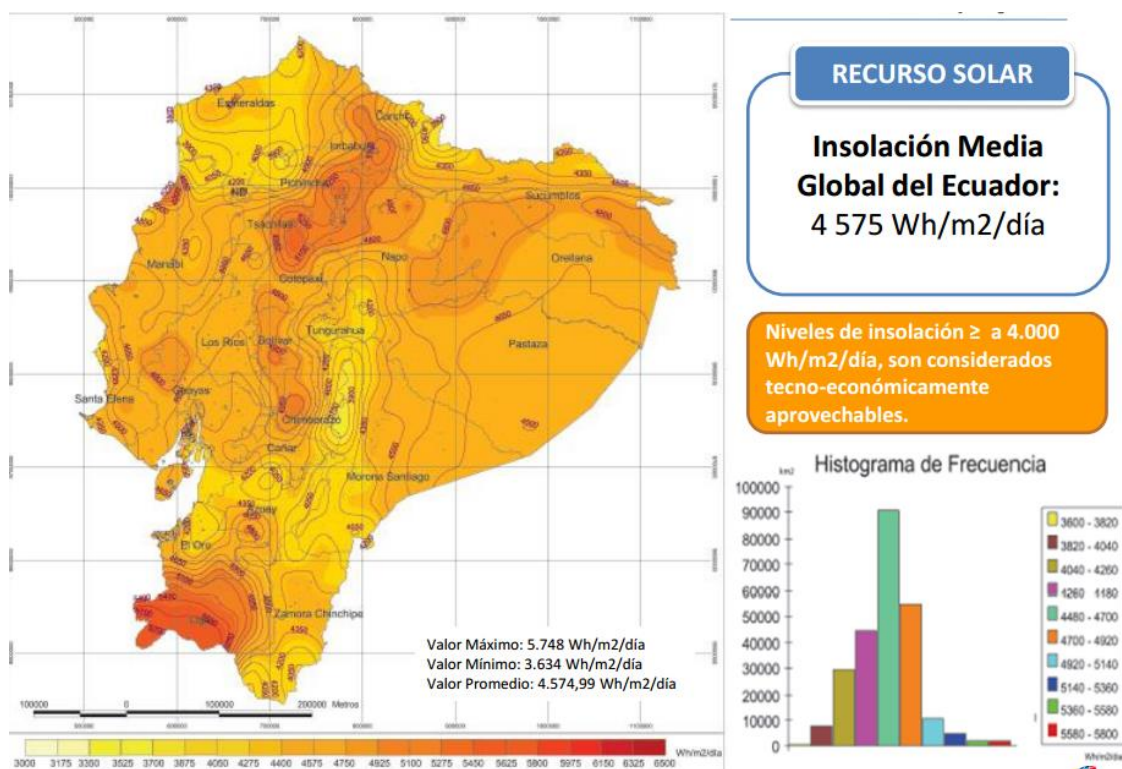


Figura 4 Insolación media global en el ecuador

Fuente: (Conelec, 2008)

Tabla 1.
Irradiación solar mensual en el cantón Latacunga

UBICACIÓN	TABLA DE IRRADIACIÓN SOLAR MENSUAL Y PROMEDIA DURANTE 10 AÑOS (KWh/m ²)														
	LAT.	LONG.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	PROMEDIO
COTOPAXI	1 S	79 W	3,73	3,98	4,05	3,88	3,74	3,47	3,71	3,97	3,98	3,77	3,88	3,79	3,83
LATACUNGA	0,92 S	78,62 W	4,47	4,38	4,21	4,01	4,07	4,09	4,32	4,53	4,44	4,51	4,44	4,37	4,32
QUITO	0,22 S	78,48 W	4,48	4,6	4,68	4,35	4,55	4,28	5,22	5,1	5,11	4,68	4,39	4,69	4,68

Fuente: (Conelec, 2008)

De acuerdo a la tabla 1, de irradiación solar mensual promedio, en el cantón Latacunga se tiene una radiación solar diaria de $4,32 \text{ kWh/m}^2$.

2.2. Nubosidad

La fracción del cielo cubierta por nubes en un lugar particular se conoce como nubosidad siendo en invierno máxima y en verano mínima. Si consideramos la latitud las zonas de mayor nubosidad se encuentran en la zona ecuatorial y desde los 60 y 70 grados de latitud la nubosidad será mínima.

La nubosidad se clasifica en cirros, cúmulos y estratos se puede medir de varias maneras una de ellas es utilizando un instrumento de medición conocido como nefometro y otra más sencilla es en octas, consiste en dividir el cielo en ocho partes iguales. Cada parte es una octa, es decir un octavo de cielo. Se debe valorar la cantidad de cielo cubierto por nubes, y de esta manera se puede determinar el número de octas. (Velazquez, 2006)

Se puede hacer la siguiente equivalencia:

- 0 a 2 octas: cielo despejado o pocas nubes.
- 3 a 5 octas: parcialmente nuboso,
- 6 octas: nuboso
- 7 octas: muy nuboso
- 8 octas: cielo cubierto.

Cada denominación tiene un símbolo, como se puede observar en la figura 5:



Figura 5 Cantidad de nubes medidas en octas

Fuente: (Velazquez, 2006)

2.3. Estudio del movimiento solar

Existen varios métodos para determinar el recorrido que tiene el sol durante el día en un lugar determinado, uno de estos es considerando el recorrido que tiene el mismo por una bóveda celeste (ver figura 6), en donde la Tierra es el centro de tal recorrido solar, así se toma el concepto antiguo que se creía que la Tierra era el centro del universo.

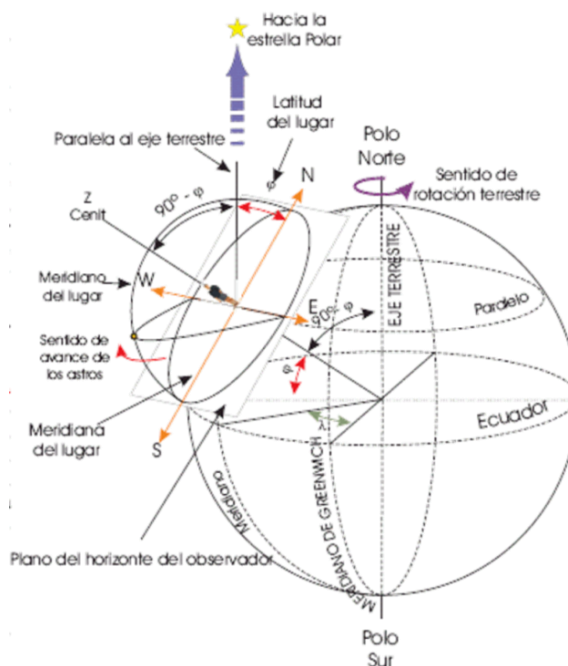


Figura 6 Representación de una bóveda celeste

Fuente: (Ferrer, 2015)

Los puntos a tomar en cuenta en la bóveda solar serán: el punto más alto, denominado cénit, así como también el plano del horizonte que se da por las principales orientaciones N, S, E y O. (Ferrer, 2015)

Con las coordenadas celestes se puede encontrar la ubicación geográfica de cualquier punto del hemisferio si se conoce su altura (h) que tiene sobre el horizonte y su azimut (a). El azimut es el ángulo, que se mide sobre el horizonte, comprendido desde el punto cardinal sur, si se ubica en el hemisferio sur; caso contrario se toma desde el punto cardinal norte, y el punto P siguiendo las manecillas del reloj. Ver figura 7. (Ferrer, 2015)

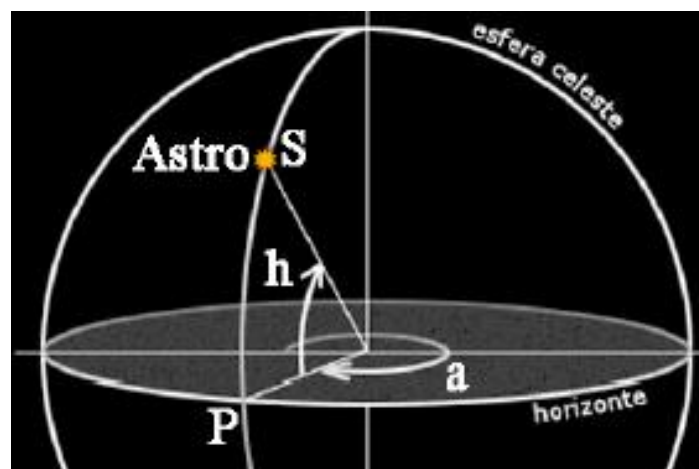


Figura 7 Medición del azimut

Fuente: (Ferrer, 2015)

Ya que en el año se tiene días específicos en los cuales se va a tener equinoccios (21 de marzo y septiembre) y solsticios (21 de junio y diciembre); se tienen consideraciones diferentes, ya que en los equinoccios el amanecer coincide con el punto del horizonte al este a las 6:00, y el ocaso coincide con el oeste a las 18:00. Así pudiendo encontrar la altura a la que se encuentra el sol con la fórmula:

$$h = 90^\circ - \varphi \quad (2)$$

Donde φ es el valor de la latitud del lugar.

Por otra parte, durante los solsticios la Tierra sufre una inclinación de 23.5° , denominado declinación δ , así en el ecuador el sol no alcanzaría el cénit durante el medio día; siendo así la altura de sol en los solsticios,

teniendo en cuenta la declinación tendría como fórmula la ecuación (3) para el solsticio de verano y la ecuación (4) para el solsticio de invierno.

$$h = 90^\circ - \varphi + \delta \quad (3)$$

$$h = 90^\circ - \varphi - \delta \quad (4)$$

Para determinar el azimut en donde se ocultará el sol, así como también el punto en donde amanece, denominados ocaso y orto, respectivamente, se procede a resolver la siguiente ecuación:

$$a = 90^\circ + \varphi \quad (5)$$

Con la dirección este para el orto y dirección oeste para el ocaso.

Para la ciudad de Latacunga, usando el simulador de astronomía de la Universidad de Nebraska-Lincoln, podemos observar el comportamiento del sol al medio día durante los solsticios y equinoccios en la latitud que se encuentra, la cual es $0,93^\circ\text{S}$.

The image shows a screenshot of an astronomy simulator interface. On the left, a horizon diagram displays a stick figure on a green horizon with cardinal directions (N, E, S, W) and a sun at the top. The right side contains control panels:

- Time and Location Controls:**
 - the day of year: 21 (March)
 - the time of day: 12:00
 - the observer's latitude: 0.9 °S
 - A world map shows the observer's location in South America.
- Animation Controls:**
 - start animation button
 - animation mode: continuous, loop day, step by day
 - animation speed: 3.0 hrs/sec (slower to faster slider)
 - use lower quality graphics when animating to improve performance
- General Settings:**
 - show the sun's declination circle
 - show the ecliptic
 - show month labels
 - show underside of celestial sphere
 - show stickfigure and its shadow
 - dragging the sun's disk changes the ...
 - time of day
 - day of year

Information Panel:

The horizon diagram is shown for an observer at latitude 0.9°S on 21 March at 12:00 (12:00 PM).

advanced

sun's hour angle: -0h 7m	sun's altitude: 87.7°
sidereal time: 23h 57m	sun's azimuth: 51.7°
equation of time: -7:04	sun's right ascension: 0h 4m
<input type="checkbox"/> show analemma	sun's declination: 0.5°

Figura 8 Simulación de la posición del sol 21 de marzo al medio día

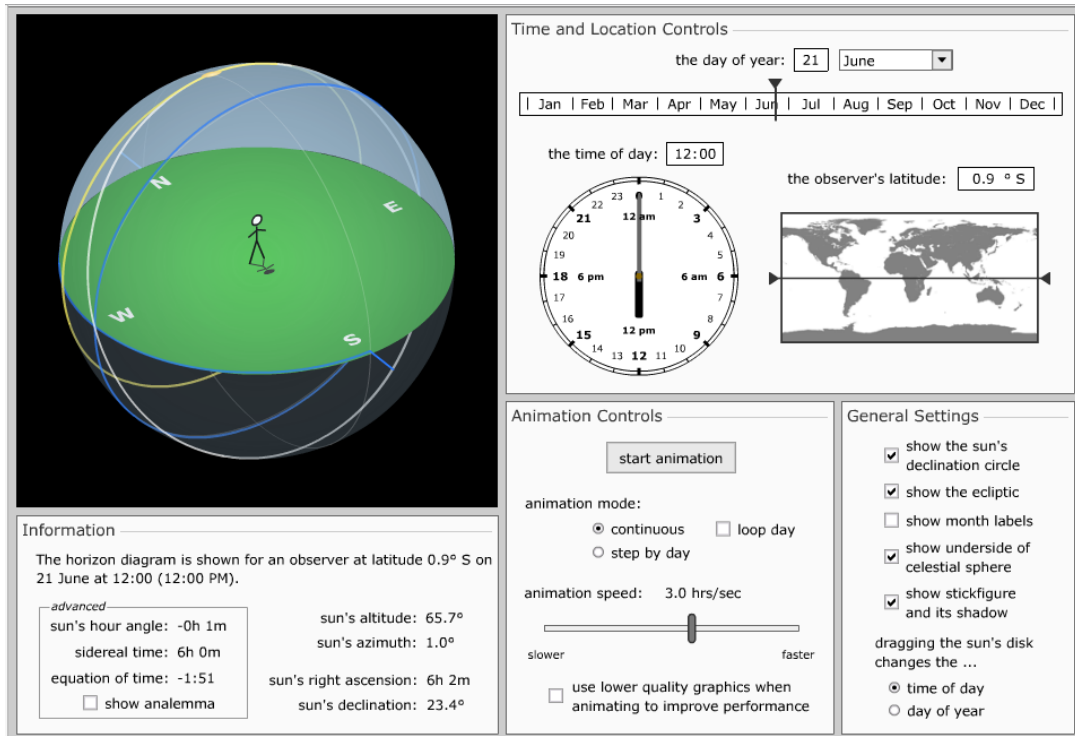


Figura 9 Simulación de la posición del sol 21 de junio al medio día

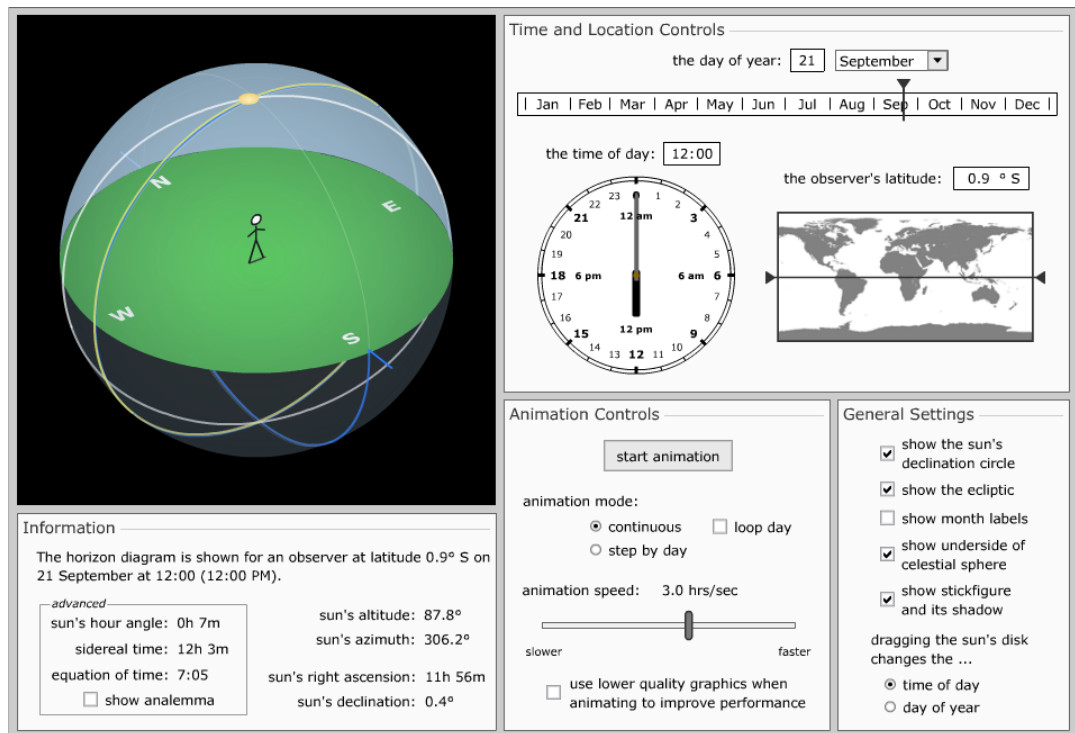


Figura 10 Sim. de la posición del sol 21 de septiembre al medio día

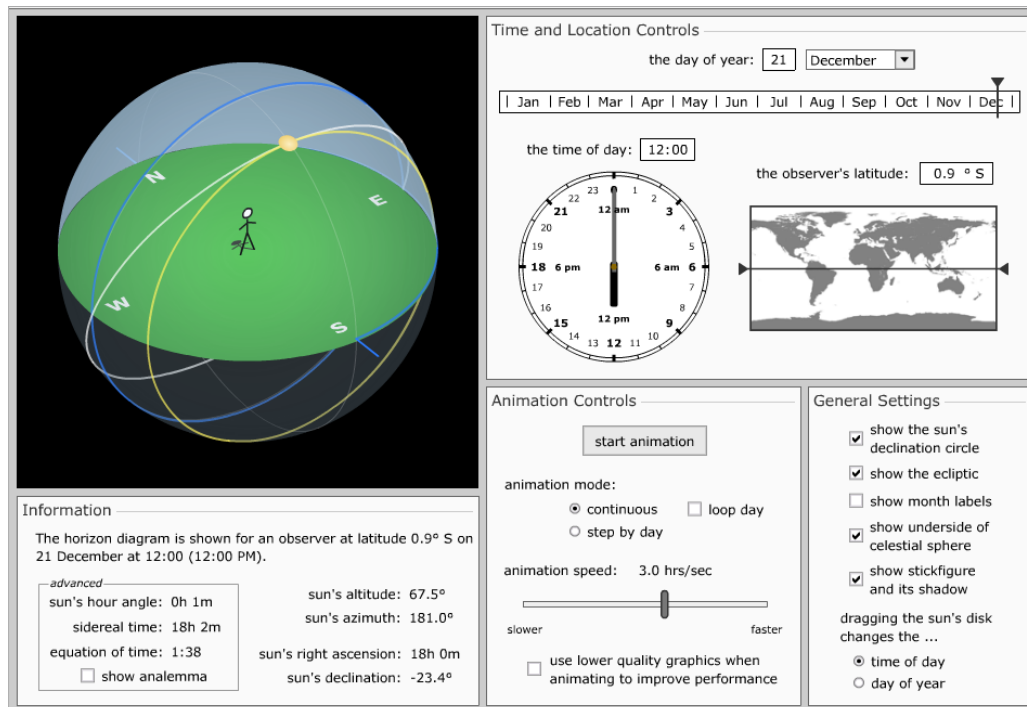


Figura 11 Sim. de la posición del sol 21 de diciembre al medio día

En la figura 8 y figura 10 se muestra una simulación de la posición del sol en la ciudad de Latacunga al medio día en los equinoccios de marzo y septiembre, respectivamente, con esto podemos observar que durante estos días el sol alcanza su máxima altura sobre la bóveda celeste y la declinación del sol es 0,5° el 21 de marzo y de 0,4° el 21 de septiembre, por lo que se puede decir que el sol es perpendicular a la ubicación. Por otra parte, en la figura 9 y figura 11 se tiene una simulación durante los solsticios de junio y diciembre, donde podemos observar que en junio la altitud del sol es de 65,7° y la declinación solar es de 23,4°; en cambio en diciembre se tiene una altitud de 67,5° y una declinación de -23,4°.

2.3.1. Ángulo de incidencia solar

El ángulo de incidencia solar es el que se forma por la línea de radiación directa del sol sobre una superficie, este ángulo se lo obtiene utilizando los siguientes parámetros: (León & Sarmiento Vintimilla, 2011)

- **Latitud geográfica (φ):** es el valor de la latitud de acuerdo a la ubicación.

- **Inclinación de la superficie (s):** es la inclinación que tiene la superficie que recibe los rayos solares con la horizontal del terreno, este va desde 0° a 90°.
- **Declinación (δ):** La declinación se la define como el ángulo formado entre el rayo solar y el plano Ecuador en cada época del año. Entonces tenemos en los solsticios de ±23.45° y se anula en los equinoccios. Esta puede calcularse con la fórmula de Cooper:

$$\delta = 23,45^\circ \times \text{sen}\left(360 \times \frac{284 + n}{365}\right) \quad (6)$$

Siendo n el día del año.

- **Azimet u orientación (a):** Es el ángulo que se forma por el plano perpendicular a la superficie a reflejar con la dirección de la meridiana del lugar siendo su valor constante. Se considera lo siguiente para hallar su origen:
 - Si se ubica en el hemisferio norte, lo toma hacia el sur y viceversa.
 - Si utilizamos una brújula, debemos considerar la declinación magnética, el cual es el ángulo formado por el norte verdadero y el norte magnético.
 - Si se dirige al este, se toman grados negativos.
- **Ángulo horario (w):** Este ángulo se lo toma respecto al mediodía solar, es la relación que existe entre los 360° sexagesimales para las 24 horas del día, lo que da 15° por hora, su unidad son las horas solares (León & Sarmiento Vintimilla, 2011).

$$w = 15^\circ \times (hs - 12) \quad (7)$$

Con estos parámetros expuestos anteriormente el ángulo de incidencia solar (θ) se obtiene de la siguiente fórmula:

$$\begin{aligned} \theta = \arccos & \left(\text{sen}(\delta) \times \text{sen}(\varphi) \times \text{cos}(s) - \text{sen}(\delta) \times \text{cos}(\varphi) \times \text{sen}(s) \right. \\ & \times \text{cos}(a) + \text{cos}(\delta) \times \text{cos}(\varphi) \times \text{cos}(s) \times \text{cos}(w) + \text{cos}(\delta) \\ & \times \text{sen}(\varphi) \times \text{sen}(s) \times \text{cos}(w) \times \text{cos}(a) + \text{cos}(\delta) \times \text{sen}(s) \\ & \left. \times \text{sen}(a) \times \text{sen}(w) \right) \end{aligned} \quad (8)$$

2.3.2. Tiempo solar verdadero (TSV)

Es el tiempo que marca la posición del sol sobre una longitud determinada. Este es el tiempo que tarda el sol para pasar dos veces seguidas por el mismo meridiano terrestre. (Fabara, 2016)

Se debe considerar que la velocidad de rotación de la Tierra no es constante durante todo el año, esto causa que varíe la duración del día solar, por lo que se tiene un valor de tiempo solar medio (TSM), en el cual se considera que la Tierra es esférica y rota a una velocidad constante, teniendo así la ecuación del tiempo (ET), la cual se obtiene mediante la diferencia que existe entre el TSV y el TSM. (Fabara, 2016)

La cual para fines prácticos se tiene valores detallados en la tabla 2.

Tabla 2.
Valores de ET dados en minutos

Valor medio	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
1 decena del mes	-5	-14	-12	-3	3	2	-4	-6	1	11	16	10
2 decena del mes	-9	-14	-9	0	4	0	-6	-4	5	14	15	5
3 decena del mes	-12	-13	-6	2	3	-2	-6	-2	8	16	13	0
Promedio Mensual	-10	-14	-9	-1	3	0	-5	-4	5	14	15	5

Fuente: (Fabara, 2016)

Para encontrar el TSV se utiliza la siguiente ecuación:

$$TSV = HO + ET + \frac{\lambda_m - \lambda}{15^\circ} \quad (9)$$

Dónde:

HO = Hora oficial en el punto a estudiar.

ET = Ecuación del tiempo.

λ_m = Es la longitud del meridiano debido al uso horario que corresponde según la ubicación.

λ = Es la longitud del meridiano sobre el punto a estudiar.

2.4. Tipos de colectores

Existen varias formas de clasificar a los colectores en sistemas solares térmicos, esta clasificación puede ser de acuerdo al tipo de colector solar empleado, de acuerdo a la temperatura de operación y de acuerdo a la aplicación final de la energía térmica alcanzada. (Echeverría, 2011)

En cuanto a la aplicación, se tiene 3 sistemas térmicos más desarrollados, que son:

- Generación termosolar de potencia
- Calor solar para procesos industriales
- Calentamiento de agua y acondicionamiento de espacios.

De acuerdo al rango de temperatura se tiene los siguientes tipos de colectores.

Tabla 3.
Colectores solares por su rango de temperatura

Seguimiento	Tipo de colector	Tipo de absorbente	Ratio de concentración	Rango de temp. (°C)
Estacionario	Plano (FPC)	Plano	1	30-80
	Tubo Evacuado (ETC)	Plano	1	50-200
	Parabólico Compuesto (CPC)	Tubular	1-5	70-240
Un Eje	Reflectores Fresnel (LFR)	Tubular	5-15	70-290
	Cilindro Parabólico(PTC)	Tubular	10-40	60-250
		Tubular	15-45	70-290

Fuente: (Echeverría, 2011)

2.4.1. Colectores solares de un eje

Según la tabla 3, (Echeverría, 2011), se tiene 3 tipos de colectores que son:

- Parabólico compuesto, se constituye de 2 superficies parabólicas las cuales comparten el mismo foco, en donde se coloca un tubo de cobre pintado de negro; el CPC concentra la radiación en el foco, aún al recibir rayos con incidencia oblicua. (Pacheco, 2006)
- Reflectores Fresnel, suelen tener tres veces la anchura de los cilindros parabólicos, así recogen la misma cantidad de energía con

una fracción de la longitud del tubo de absorción. Permite la generación directa de vapor poco saturado. (Echeverría, 2011)

- Cilindro parabólico, tienen forma de sectores cilíndricos, en cuyo foco lineal se coloca la tubería que contiene el fluido a calentar. (Echeverría, 2011)

2.4.2. Sistemas de concentración

En la actualidad existen diferentes maneras para aprovechar la energía solar, que son la fotovoltaica, que es la generación de energía eléctrica, y la termo-solar, que puede servir tanto para generar energía eléctrica y para el aprovechamiento directo de calor. (Salgado, 2010)

Existen diferentes aplicaciones de los sistemas termo solares que pueden ser de:

- Baja temperatura, que se utiliza para calentamiento de agua doméstico y aplicaciones industriales con temperaturas hasta los 90°C.
- Media temperatura, que se utiliza para procesos exclusivamente industriales y van de temperaturas en el rango de 150°C y 400°C.
- Alta temperatura, se utilizan para usos industriales y también para generación eléctrica. Se manejan temperaturas superiores a los 400°C.

Los equipos utilizados para captar el calor son varios tales como los colectores de cara plana, en los cuales en su interior se encuentran tuberías metálicas por las que se mueve un fluido que recoge el calor.

Actualmente se han desarrollado nuevos sistemas basados en el uso del vacío para que las pérdidas de calor sean menores. Se tienen diferentes tipos de uso de los tubos al vacío:

- Sistema Heat Pipe: Este es un tubo de vidrio al vacío el cual tiene en su interior un tubo concéntrico con fluido en su interior que, al exponerse al sol, este se evapora y asciende por el tubo hasta

llegar a la parte superior, en donde se condensa y cede calor al absorbedor.

- Flujo directo: Se constituye de un tubo de vidrio al vacío y que en su interior fluye un líquido, que puede ser agua o aceite térmico.
- Schott: Posee doble tubo de cristal en donde en su interior se encuentra el fluido de trabajo. Este no tiene problemas de esfuerzos por dilatación.

2.5. Colector solar cilindro-parabólico (CCP)

La principal característica de los CCP's es que tienen un foco lineal y que transforma la radiación solar directa en energía térmica cuando se calienta un fluido a través de un tubo que se encuentra en el eje focal del mismo. Estos se los toma como colectores solares de media temperatura. (Paredes, 2012)

Además, se tiene que la eficiencia en este tipo de colector tiene valores que van del 12,5% al 17% de la radiación solar, y son de las tecnologías de concentración más desarrolladas y con más aplicaciones comerciales actualmente. (Fabara, 2016)

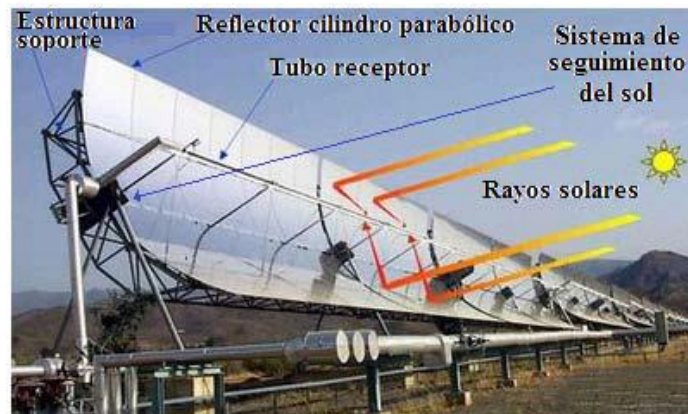


Figura 12 Esquema de un CCP

Fuente: (Murillo, 2011)

2.5.1. Componentes principales de un CCP

En la figura 12 se encuentran detallados los elementos que componen un CCP, y que se definen de la siguiente manera:

El reflector cilíndrico parabólico: Se caracteriza por ser un espejo curvo, en forma de parábola, el cual refleja y concentra sobre el tubo receptor la radiación solar directa que incide sobre su área. Se puede colocar distintos materiales para la reflexión de los rayos solares, tales como los plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, planchas metálicas o vidrios, en los que se coloca una capa de plata protegido por una base de cobre y pintura epoxi, estos suelen ser los más usados. (Murillo, 2011)

El tubo de absorción o receptor: Este es el alma del CCP, ya que el rendimiento del CCP depende en sí de la capacidad termodinámica del absorbente. Este puede ser un solo tubo o de dos tubos concéntricos

Cuando se tiene dos tubos concéntricos el tubo que se encuentra en el interior es metálico y tiene una absorbidad mayor al 90% y con emisividades menores a 30% en el espectro infrarrojo, teniendo así un alto rendimiento térmico. Por otra parte, el tubo exterior es de cristal para reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico y protegerlo de las condiciones meteorológicas adversas que se puedan presentar. (Paredes, 2012)

El sistema de seguimiento solar: Este sistema sirve para aprovechar de más horas de sol útil durante el día. El seguimiento solar en los CCP's suele ser de este a oeste, es decir, la base reflectora sigue al sol durante el día. Añadir el seguimiento norte-sur mejora la captación de radiación pero implica realizar una serie de conexiones complejas entre módulos. Por lo tanto el sistema de seguimiento de un CCP se construye generalmente de un eje teniendo menos costos. (Paredes, 2012)

El seguimiento solar, cuando se usa el seguimiento de este a oeste, la base reflectora del CCP gira sobre un eje orientado al Norte, además la base tiene una inclinación con la horizontal. El giro ajusta que la base reflectora esté siempre perpendicular al sol. La velocidad de giro es de 15° por hora, como la del reloj.

Cuando se usa el seguimiento norte a sur la base reflectora del CCP gira en un eje horizontal orientado al este. El giro se ajusta para que la normal a

la superficie coincida en todo momento con el meridiano terrestre que contiene al sol. (Paredes, 2012)

2.5.2. Razón de concentración geométrica y ángulo de aceptación

a. Lado recto y puntos máximos.

La base reflectora es una parábola y para su diseño se debe calcular los parámetros del lado recto y los puntos máximos en X e Y de la parábola (figura 13) que va a formar, por lo que se realizan cálculos en función de diferentes distancias focales.

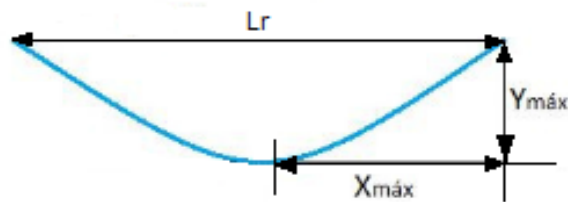


Figura 13 Representación de una parábola

Para realizar el cálculo del lado recto " Lr ", se utiliza la fórmula del arco de una curva (figura 14), y con esta conocer la longitud de la misma.

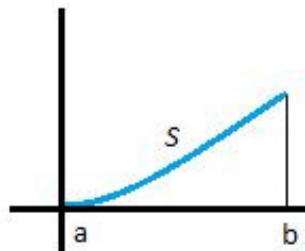


Figura 14 Gráfica de la curva

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)} dx \quad (10)$$

En la ecuación anterior se debe conocer la longitud de la curva (S); $f'(x)$ es la derivada de la ecuación de la parábola. El límite $a = 0$, y el límite b es el punto a calcular, por lo que, operando, sustituyendo y despejando b se puede conocer el valor del punto máximo en X ($Xmáx$).

Para obtener el punto máximo en Y ($Ymáx$), se sustituye el valor de $Xmáx$ en la ecuación general de la parábola.

b. Cálculo del ángulo de apertura α y de la distancia ρ

El ángulo de apertura α y la distancia ρ es el que se muestra en la figura 15.

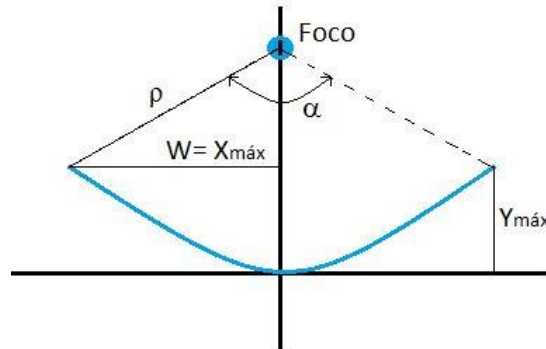


Figura 15 Ángulo de apertura y distancia ρ del CCP

Ya que se forma un triángulo rectángulo entre la distancia ρ con $X_{máx}$, se puede obtener el valor de α mediante la siguiente expresión:

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{X_{máx}}{F - Y_{máx}} \quad (11)$$

Con el mismo principio de triángulo rectángulo se obtiene el valor de ρ .

$$\rho = \sqrt{W^2 + (F - Y_{máx})^2} \quad (12)$$

c. Cálculo del diámetro del tubo receptor

El astro rey no es una fuente solar luminosa exacta. Contemplado desde la superficie de la Tierra, el disco solar que conforma concierne a un ángulo de apertura de $0^{\circ}32'$ (ver figura 16), por tanto la radiación solar directa sobre la superficie terrestre no está formada por rayos perfectamente paralelos entre sí, sino que se distribuyen sobre un cono de direcciones de semiángulo igual a $16'$ alrededor de la todos los rayos de este cono alcanzarán un receptor de tamaño arbitrario. (Paredes, 2012)

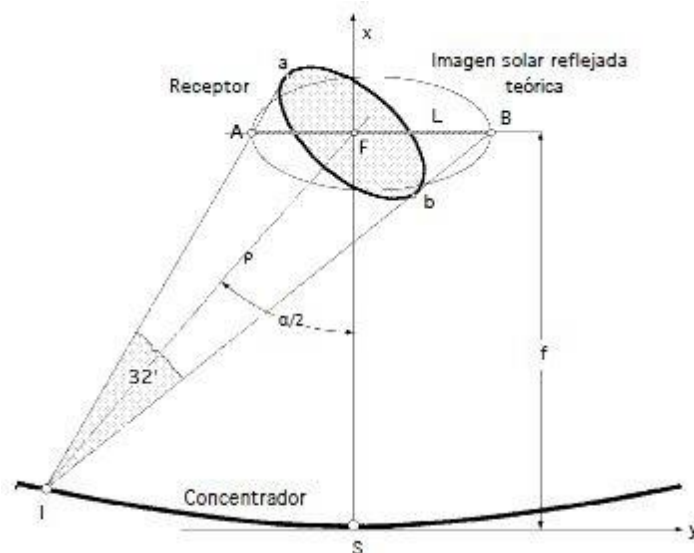


Figura 16 Proyección del disco solar sobre el absorbedor

Fuente: (Paredes, 2012)

El valor del diámetro mínimo que debe tener el tubo receptor depende especialmente de la distancia focal a través del valor de ρ , se obtiene mediante de la siguiente ecuación:

$$\phi_{min} = \frac{2 \times \rho \times \tan 0^{\circ}16'}{\cos \frac{\alpha}{2}} \quad (13)$$

Dos de los parámetros básicos de un CCP son su razón de concentración geométrica (C) y el ángulo de aceptación (ψ).

La razón de concentración viene dada por la ecuación:

$$C = \frac{A}{2 \times \pi \times r_{tr} \times L} \quad (14)$$

Siendo

A = área de apertura; L = longitud del colector; r_{tr} = radio del tubo receptor

La razón de concentración geométrica, es la razón entre el área de apertura del colector y el área total del tubo absorbedor, mientras que el ángulo de aceptación, es el ángulo máximo que puede ser formado por dos rayos en un plano transversal a la abertura del colector de manera que intercepten el tubo absorbedor después de ser reflejados por los espejos cilindro parabólicos (ver figura 17).

La tolerancia del sistema de seguimiento solar de un CCP tiene que ser menor que su ángulo de aceptación, cuanto mayor es el ángulo de aceptación menor tiene que ser la precisión del sistema de seguimiento solar. Los CCP actuales tienen un ángulo de aceptación inferior a 2° (valores usuales del ángulo de aceptación son de $0,7^\circ$ - 1°) y necesitan un sistema de seguimiento preciso ($\pm 0,2^\circ$), caso contrario captarían solamente una pequeña fracción de radiación solar directa disponible en cada momento.

En teoría, el valor que debe tomar la razón de concentración es aproximadamente en 220, pero en estudios prácticos esta llega a valores de 20. Por otra parte lado, el rango de temperatura de trabajo está en el rango de 150 a 400 °C. (Zarza, 2003)

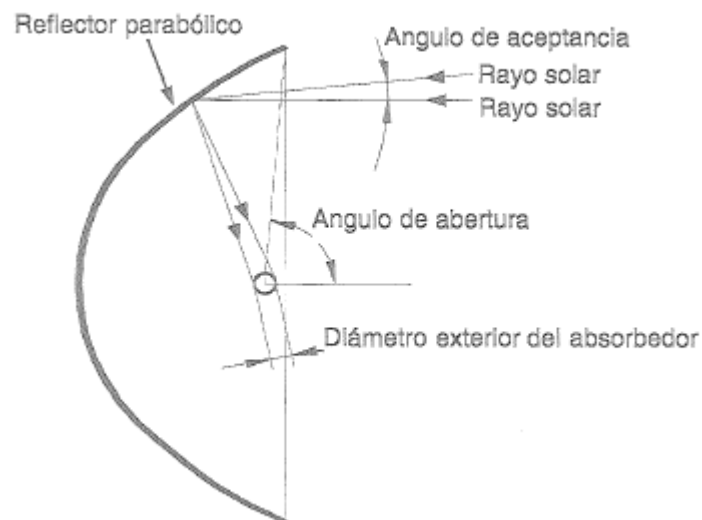


Figura 17 Ángulo de aceptación de un CCP

Fuente: (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

2.5.3. Pérdidas ópticas y geométricas en un CCP

Al momento que la radiación solar directa alcanza la superficie de un CCP, se pierde una importante cantidad de la misma debido a diversos factores. El total de las pérdidas que tienen lugar en un CCP se dividen en 3 grupos que de mayor a menor importancia se ordenan de la siguiente manera: pérdidas ópticas, pérdidas térmicas, pérdidas geométricas. (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

Las pérdidas ópticas: debidas a que la superficie reflexiva del concentrador no es un reflector perfecto, el vidrio del tubo absorbedor no es totalmente transparente, ni la superficie selectiva del tubo metálico es un absorbedor lo que provoca que, de la totalidad de radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico, llegue solo una parte al fluido que circula por el tubo receptor.

Por lo que se tiene cuatro parámetros que afectan a las pérdidas ópticas, representadas en la figura 18, los cuales son:

- i. **Reflectividad de la superficie del concentrador (r):** Este suele ser el 90 % de los valores de la reflectividad, este se reduce progresivamente conforme la suciedad en la superficie aumenta. (Paredes, 2012)
- ii. **Factor de interceptación (γ):** Su valor suele ser del 95%, pues este factor se origina en las imperfecciones de los espejos y la posibilidad de errores en el seguimiento del sol lo que provoca que se reduzca el número de rayos reflejados sobre el tubo absorbente. (Paredes, 2012)
- iii. **Transmisividad de la cubierta de cristal (τ):** Un valor característico de la transmisividad está en el rango 90-95 % ya que una porción de la radiación solar no atraviesa la superficie del tubo absorbedor. (Paredes, 2012)
- iv. **Absortividad de la superficie selectiva (a):** Su valor típico cae en el rango de 90-96% y este pondera la cantidad de radiación incidente sobre el área que puede absorber. (Paredes, 2012)

Por lo tanto, el rendimiento óptico pico del CCP es el producto de los parámetros descritos anteriormente:

$$n_{opt} = r * \gamma * \tau * a \quad (15)$$

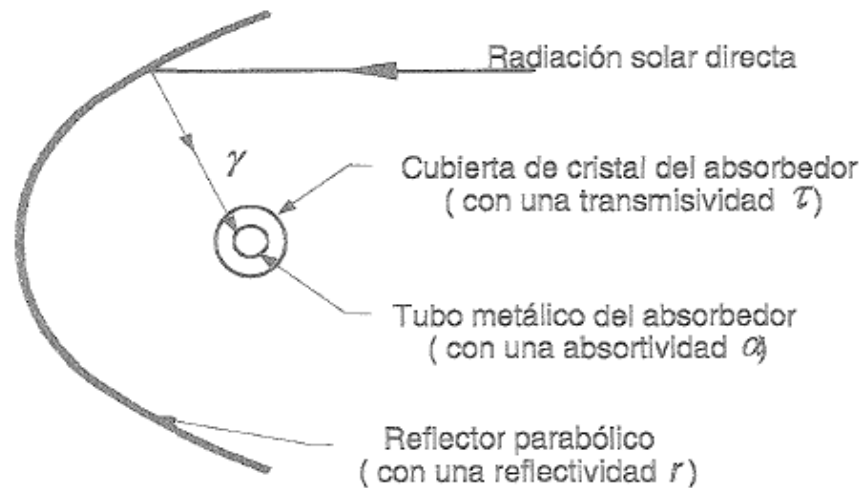


Figura 18 Pérdidas ópticas de un CCP

Fuente: (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

Las pérdidas geométricas: Debido a una disminución del área efectiva de captación de los colectores estas pérdidas se dividen en 2 grupos:

- Pérdidas debidas a la posición relativa de los colectores entre sí.
- Pérdidas inherentes a cada colector.

Las primeras pérdidas, conocidas también como pérdidas por sombras, y son causadas por las sombra parcial que algunos colectores proyectan sobre los colectores situados en filas paralelas. La figura 19 describe este tipo de pérdidas geométricas. (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

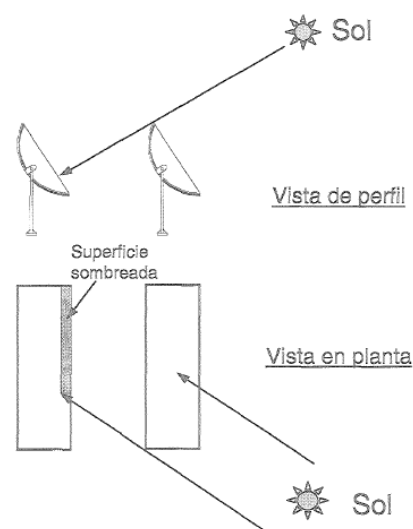


Figura 19 Pérdidas geométricas debido a sombras

Fuente: (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

Las pérdidas geométricas inherentes a cada colector son causadas por el hecho de que estos colectores están provistos de un sistema de seguimiento solar en un solo eje y por lo tanto solo giran alrededor del eje de seguimiento, lo que da lugar al ángulo de incidencia. La existencia del ángulo de incidencia no solo reduce el área efectiva de captación que tiene el colector sino que afecta a los valores de reflectividad, absorptancia y transmisividad, ya que cuando el ángulo de incidencia es 0° estos valores presentan su valor máximo. Lo que el ángulo de incidencia produce sobre el rendimiento del colector se cuantifica mediante un parámetro que se denomina modificador por ángulo de incidencia, $K(\theta)$. (Carta Gonzales & Calero Pérez, 2013)

Por lo tanto la superficie del colector se ve mermada por esto, y el valor de superficie pérdida define según las ecuaciones:

$$S_e = L_r \times L_e = L_r \times F_m \times \tan(\theta) \quad (16)$$

$$F_m = F + \left(F \times \frac{L_r^2}{48} \times F^2 \right) \quad (17)$$

Siendo:

S_e → El área de pérdida

L_r → El lado recto de la parábola

L_e → Longitud efectiva del colector

F → La distancia focal

θ → El ángulo de incidencia de la radiación solar directa

F_m → Distancia media entre la superficie de la parábola y el receptor. (Zarza, 2003)

2.5.4. Pérdidas térmicas de un CCP

Especialmente se hallan relacionadas a dos elementos del sistema, el tubo absorbedor y las tuberías de fluido térmico. Las pérdidas asociadas están establecidas por pérdidas por conducción, por convección y por radiación de los diferentes medios que conforman el conjunto del tubo absorbedor, es decir, por el tubo metálico, la cubierta de cristal, y la atmosfera. (Ver figura 20)

Si bien cada una de las pérdidas asociadas se puede computar de forma independiente según las ecuaciones de transferencia de calor, en la práctica las pérdidas térmicas totales Q_L se engloban en un único coeficiente global.

$$Q_L = Q_{ABS,radiación} + Q_{ABS,cond/conv} \quad (18)$$

Siendo:

$Q_{ABS,radiación} \rightarrow$ Pérdidas del tubo absorbente por radiación.

$Q_{ABS,cond/conv} \rightarrow$ Pérdidas del tubo absorbente por conducción y convección.

El valor de las pérdidas es un dato experimental el cual es dado por el fabricante. (Zarza, 2003)

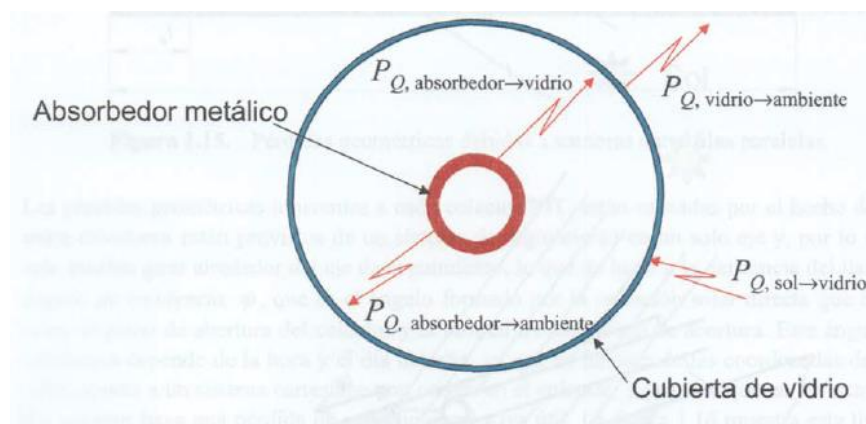


Figura 20 Pérdidas en el tubo absorbedor de un CCP

Fuente: (Zarza, 2003)

2.5.5. Rendimiento global de un CCP

Debido a las pérdidas que existen en un CCP (sean ópticas, geométricas y térmicas) la energía térmica que proporciona un CCP se reduce a la energía que produce en condiciones ideales. (Paredes, 2012)

Se definen tres rendimientos diferentes y un parámetro para un CCP:

- **Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de 0° ($n_{opt.0^\circ}$):** Se toma en consideración todas las pérdidas ópticas que se dan en el CCP el cual tiene un ángulo de incidencia de 0°. Existen cuatro factores para determinar su valor, que son: reflectividad de los espejos, transmisividad del tubo de vidrio, factor de interceptación (“que tiene en cuenta la parte de radiación reflejada que por cualquier causa no alcanza el absorbente” (Paredes, 2012)) y absorptividad de la superficie recubre el tubo absorbedor, en este caso el vacío.
- **Rendimiento térmico n_{th} :** Se toma en cuenta todas las pérdidas térmicas que sufre el CCP.
- **Rendimiento global n_{global} :** Se consideran las pérdidas ópticas, geométricas y térmicas en el CCP.
- **Modificador por ángulo de incidencia, K:** Si se tiene un ángulo de incidencia diferente a cero se toma en cuenta las pérdidas ópticas y geométricas que tienen lugar en el CCP y que no se consideran en $n_{opt.0^\circ}$ (Paredes, 2012)

La energía solar incidente que existe sobre un CCP se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{sol} = S_C \times I_{ef} \times \cos \theta \quad (19)$$

Siendo:

Q_{sol} = energía solar incidente sobre el colector

S_C = Área de apertura de la superficie de la base reflectora (m^2)

I_{ef} = Radiación solar directa efectiva (W/m^2)

θ = Ángulo de incidencia

2.6. Mecanismo de seguimiento solar

2.6.1. Seguidores solares

El sistema de seguidores solares se realiza mediante el uso de sensores de radiación, que se componen en tres sensores de luz visible, se toma uno de referencia el cual activa el servomotor para que mueva el colector hasta que la luminosidad recibida por los tres sea similar. Así logrando que el colector reciba radiación directa. Los sensores se colocarán en las esquinas opuestas al colector, de manera que cuando no esté perpendicular al sol estos reciban sombra y por ende activen al servomotor. (Mendoza, 2015)

La diferencia de luminosidad entre el sensor de referencia y cada uno de los otros permitirá determinar el sentido del giro que debe realizar el sistema de seguimiento para mantenerse en todo momento perpendicular al sol. Pero este sistema puede provocar fallos cuando el día se encuentre nublado, es decir se tenga alta radiación difusa, ya que las sombras no serán lo suficientemente oscuras para determinar los errores de posición; también la presencia de claros ocasionará movimientos erráticos con un consumo de energía en el posicionamiento. (Mendoza, 2015).

Los sensores de luz visible son capaces de detectar todo el espectro de la luz visible, y el usuario puede elegir el de energía fotópica o escotópica. Esto permite especificar el nivel de luz óptimo para que el colector reciba radiación directa. (Light, 2015)

2.6.2. Sistemas de regulación de tiempo

El sistema se basa en un reloj-calendario en tiempo real el cual debe tener, de la forma más precisa posible, la fecha y hora junto a la latitud y longitud de la posición del sistema, esto se lo realiza mediante cálculos matemáticos de la determinación de la posición del Sol en cada momento, logrando así la orientación adecuada del sistema.

Con este sistema se debe agregar un reloj de tiempo real para realizar el cálculo de la posición del sol y conocer la latitud y longitud del lugar donde se ubica el sistema. Teniendo en cuenta estas variables se dispone a

realizar el control de los actuadores mecánicos, que según la hora del día deberán posicionarse de manera que reciban directamente la luz solar.

2.7. Sistemas de calentamiento de agua

Las aplicaciones que se le pueden dar al agua caliente son muchas dentro del campo doméstico, sea para aseo personal, como en el sector industrial: en lecherías, restaurantes, hospitales, así como también en hoteles. Para esto se puede realizar el calentamiento del agua mediante energía solar usando un sistema Heat Pipe, como también realizando la producción directa de agua caliente.

2.7.1. Sistema Heat Pipe

El Heat Pipe, que en principio fue desarrollado por la NASA para resolver problemas relacionados con el enfriamiento de dispositivos espaciales, es un sistema térmicamente complejo de evaporización-condensación que transporta rápidamente gran cantidad de calor y que consta de una estructura de un tubo de calor y una pequeña cantidad de fluido vaporizable.

Un Heat Pipe actúa como conductor térmico de conductancia elevada. Ya que por sus propiedades térmico-físicas, su velocidad de transferencia de calor supera considerablemente a la de un conductor de calor sólido de las mismas dimensiones. Las conductividades térmicas de conductores sólidos van desde $250 W/mK$ hasta los $1500 W/mK$, por su parte los Heat Pipes tienen conductividades térmicas que van desde los $5000 W/mK$ hasta los $200000 W/mK$. (Mahjouri, 2015)

El ciclo de evaporación-condensación acepta calor desde una fuente externa, la cual eleva la temperatura del fluido de trabajo del Heat Pipe a su zona de ebullición, este se evapora para luego liberar calor latente mediante transformación inversa (condensación) en la sección del disipador de calor. Este proceso se repite continuamente por un mecanismo de retorno por gravedad del fluido condensado de vuelta a la zona de calor. (Reay, Kew, & McGlen, 2014)

Los componentes principales de un Heat Pipe se pueden observar en la figura 21 y estos son:

- Tubo de vidrio sellado al vacío
- Tubo de calor
- Absorbedor
- Fluido de trabajo

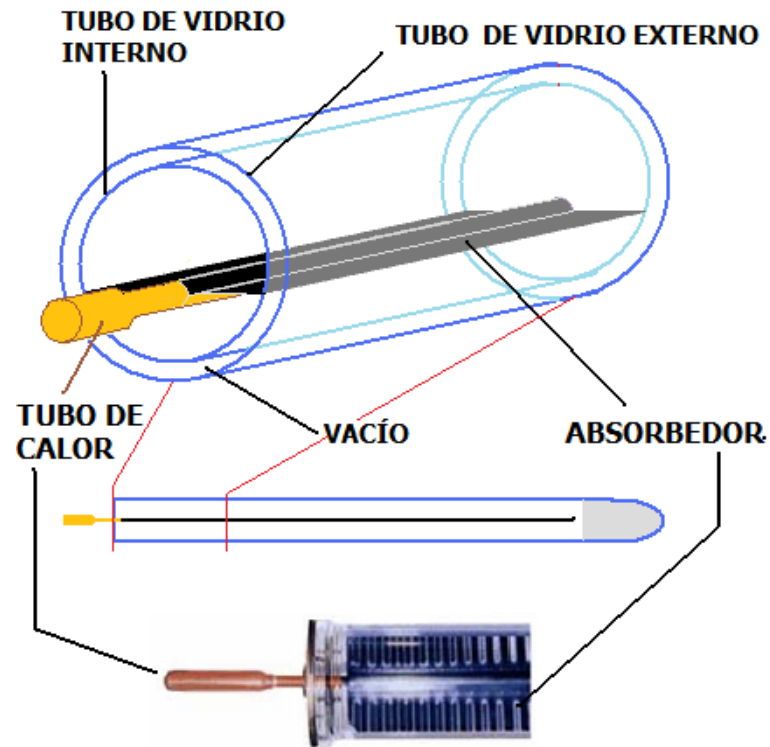


Figura 21 Componentes principales del Heat Pipe

Fuente: (Salcedo, 2011)

a. Tubo sellado al vacío

El tubo es sellado al vacío ya que es el mejor aislante térmico y eléctrico en la actualidad, ya que no existen partículas por las cuales se pueda conducir calor ni electricidad. (Salcedo, 2011)

Estos tubos consisten en dos tubos de vidrio hechos de boro silicato transparente de alta resistencia, para que pueda resistir el impacto de granizo de hasta 2.5cm de diámetro; por otra parte el tubo interior está recubierto con nitrato de aluminio con el objetivo de incrementar la absorción de energía solar y minimizar las propiedades de reflexión (ver figura 22).



Figura 22 Tubo de vidrio sellado al vacío

Fuente: (Thermosol, 2017)

El vacío dentro del tubo se mantiene mediante un elemento de bario, que es expuesto a alta temperatura, ubicado en el fondo del tubo tomando un color plateado, como se muestra en la figura 23.



Figura 23 Capa de bario del tubo de vidrio

Fuente: (Salcedo, 2011)

Cuando el tubo se encuentra defectuoso se pierde el vacío entre los tubos y se la capa de bario pierde su color plateado como se puede ver en la figura 24(b).



(a) Tubo en buen estado



(b) Tubo defectuoso

Figura 24 Diferencia entre tubo en buen estado y tubo defectuoso**Fuente:** (Salcedo, 2011)**b. Tubo de calor**

El tubo de calor es el que contiene el fluido de trabajo y que se encuentra dentro del tubo sellado al vacío haciendo contacto con la placa interna del mismo mediante el absorbedor. En el tubo de calor es donde se produce el ciclo de evaporación-condensación del fluido de trabajo.

Estos pueden ser construidos de aluminio, cobre, titanio, acero inoxidable, y tungsteno, siendo el más común el de cobre. La elección del material de contención del tubo de calor depende en gran medida de la compatibilidad con el fluido de trabajo.

Los tubos de calor tienen tres secciones típicas las cuales son el evaporador, el cual es la entrada (fuente de calor), una sección adiabática (la cual será la de transporte) y una sección de condensador (la cual es donde se produce la salida de calor). (Mahjouri, 2015)

En el tubo de calor el transporte del fluido de trabajo se lo realiza mediante una mecha, la cual se coloca sobre su pared interior, tal como se muestra en la figura 25. (Rosas, 2012)

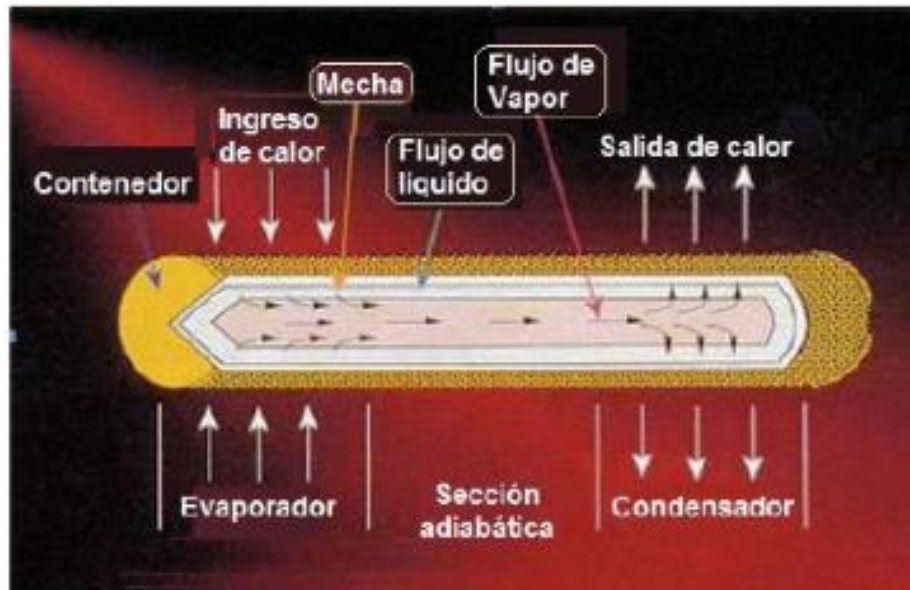


Figura 25 Componentes de un tubo de calor convencional

Fuente: (Rosas, 2012)

La mecha proporciona el bombeo capilar para retornar el fluido de trabajo condensado a la sección del evaporador, para esto se debe saturar la mecha con suficiente fluido de trabajo. Para permitir que el fluido, una vez condensado, pueda descender por gravedad se debe tener una inclinación del tubo (entre 5° y 20° según el fabricante). (Rosas, 2012)

c. Absorbedor

Son dos aletas de aluminio que están moldeadas para aumentar el área de contacto entre el tubo de calor y el tubo de vidrio al vacío.

d. Fluidos de trabajo

El fluido de trabajo del tubo de calor elegido depende de las temperaturas que se van a necesitar para la aplicación. El fluido de trabajo más utilizado es el agua (temperaturas de 1 ° C a 325 °C). Se tiene la tabla 4 con los diferentes fluidos de trabajo y sus características.

Tabla 4.
Temperaturas fluidos de trabajo Heat Pipe

Fluidos de trabajo para media temperatura		
Fluido de trabajo	Rango de temperatura de funcionamiento (° C)	Material del Tubo de calor
Acetona	-48 a 125	Cobre, aluminio, acero inoxidable

Amoníaco	-75 a 125	Aluminio, acero inoxidable
Metanol	-75 a 120	Cobre, acero inoxidable
Metilamina	-90 a 125	Aluminio
Pentano	-125 a 125	Aluminio, acero inoxidable
Propileno	-150 a 60	Aluminio, acero inoxidable
Agua	1 a 325	Cobre, níquel, titanio

Fuente: (Thermacore, 2016)

2.7.2. Producción directa de agua caliente por el CCP

El sistema para la producción directa de agua caliente mediante el colector cilindro parabólico consiste en integrar en un solo lugar la captación de energía solar y el almacenamiento de energía, teniendo así la toma de agua conectada a la entrada del CCP, o al grupo de CCP's, y la salida directamente a la tubería de distribución de agua caliente o a un tanque de almacenamiento con aislamiento térmico, para evitar pérdidas.

Se debe tomar en cuenta la capacidad de un CCP para producir agua caliente, ya que tener un solo CCP en el sistema no sea suficiente para alcanzar las temperaturas necesarias para las aplicaciones domésticas e industriales. También se deberá tomar en cuenta el lugar de instalación del sistema de calentamiento de agua para determinar el número de colectores necesarios para producir la energía requerida para cubrir la demanda de agua caliente.

2.8. Mecanismos de transferencia de calor

El calor tiene tres formas distintas de transferirse de un cuerpo al otro, estas son: conducción, convección y radiación. Todos estos modos requieren que exista una diferencia de temperatura, así la transferencia se da del medio de mayor temperatura al de menor temperatura. (Cengel, 2007)

2.8.1. Conducción

Este modo de transferencia de calor “es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas” (Cengel, 2007); esto se da por la interacción entre las

partículas. Este modo puede ocurrir en sólidos, líquidos, como también en los gases.

La rapidez o razón de conducción de calor a través de un medio depende de la geometría del mismo, su espesor y el material del cual esté hecho. Se puede reducir la pérdida de calor de un contenedor cuando a este se lo envuelve con un material aislante, como puede ser la fibra de vidrio, lana de roca o a su vez poliuretano. (Cengel, 2007)

2.8.2. Convección

Este es el modo de transferencia de energía que ocurre entre una superficie sólida con un líquido o un gas adyacente, los cuales están en movimiento y comprenden los elementos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido se mueva el fluido, la transferencia de calor será mayor; si no hay movimiento de fluido, entre una superficie sólida y un líquido, la transferencia de calor es de conducción pura. (Cengel, 2007)

La convección se denomina convección forzada si el fluido es manipulado mediante medios externos; se dice que es convección natural si el movimiento del fluido se produce por las fuerzas de empuje inducidas por las diferencias de densidades del fluido debido a las variaciones de temperatura que existen en el mismo. (Cengel, 2007)

2.8.3. Radiación

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, este no requiere de un medio interventor como las dos formas de transferencia de calor anteriores. Esta es la forma más rápida de transferencia de calor, ocurre a la velocidad de la luz, y no sufre atenuación en un vacío, así es como llega la energía del sol a la Tierra. (Cengel, 2007)

Para encontrar la rapidez de transferencia de calor por radiación se tiene las siguientes fórmulas:

$$Q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{cielo}^4) \quad (20)$$

En donde:

ε , Es la emisividad de la superficie de la placa

σ , es la constante de Stefan Boltzman [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$].

A_s , Área de la superficie (m^2)

T_s , temperatura de la superficie, K.

T_{cielo} , temperatura del cielo, K.

La temperatura del cielo se da por la ecuación siguiente:

$$T_{cielo} = 0,0552(T_{\infty})^{1.5} \quad (21)$$

En donde:

T_{∞} , es la temperatura ambiente dada en K.

Para obtener la transferencia de calor por radiación entre dos placas paralelas se tiene:

$$Q_{rad} = \frac{\sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{cielo}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (22)$$

Donde:

ε_1 , es la emisividad de la superficie de la cubierta.

ε_2 , es la emisividad de la superficie de la placa.

Por otra parte, para obtener la transferencia de calor por radiación en dos tubos concéntricos se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{rad} = \frac{\sigma \times A_s \times (T_s^4 - T_{cielo}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \times \left(\frac{D_i}{D_o}\right)} \quad (23)$$

En donde:

D_o , Diámetro del cilindro exterior

D_i , Diámetro del cilindro interior

Para hallar el coeficiente transferencia de calor por radiación viene dado por la siguiente ecuación:

$$h_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times (T_s + T_{cielo})(T_s^2 + T_{cielo}^2) \quad (24)$$

Y la resistencia térmica por radiación se expresa por:

$$R_1 = \frac{1}{h_{rad} \times \pi \times D \times L} \quad (25)$$

Donde,

D , es el diámetro del cilindro (m)

L , Longitud (m)

2.9. Conducción de calor en cilindros

Se considera una capa cilíndrica larga, como un tubo circular de radio interior r_1 , radio exterior r_2 , y longitud L y conductividad térmica promedio k . Teniendo en cuenta que se tiene las temperaturas de las superficies constantes T_1 y T_2 . Por lo tanto, según la ley de Fourier de la conducción de calor para la transferencia de calor para la capa cilíndrica se puede expresar de la siguiente manera: (Cengel, 2007)

$$\dot{Q}_{cond,cil} = -kA \frac{dT}{dr} [W] \quad (26)$$

En donde $A = 2\pi rL$, que es el área de transferencia en la ubicación r . El área (A) depende del radio (r), por lo tanto varía en la dirección de la transferencia de calor. Al integrar la ecuación desde $r = r_1$, donde $T(r_1) = T_1$, hasta $r = r_2$ en donde $T(r_2) = T_2$ y sustituyendo A en la integración, y como $\dot{Q}_{cond,cil}$ es constante la ecuación se reduce a:

$$\dot{Q}_{cond,cil} = \frac{T_1 - T_2}{R_{cil}} \quad (27)$$

Donde:

$$R_{cil} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L_{cil}k} = \frac{\ln(\text{radio exterior}/\text{radio interior})}{2\pi \times \text{Longitud} \times \text{Conductividad térmica}} \quad (28)$$

2.10. Convección natural sobre superficies

Cuando un sistema se expone a vientos externos se tiene pérdidas por convección relacionando el coeficiente de transferencia de calor a la velocidad del viento, teniendo.

$$h_{conv} = 5,7 + 3,8 V_v \quad (29)$$

Donde,

V_v , es la velocidad del viento (m/s)

Los valores típicos que suele tener el coeficiente de convección vienen dados por la siguiente tabla 5.

Tabla 5.
Valores típicos del coeficiente de convección

Proceso	$h(W/m^2.K)$
Convección Libre	
Gases	2 - 25
Líquido	50 - 1000
Convección Forzada	
Gases	25 - 250
Líquido	50 - 20000

Fuente: (Incropera, 1999)

Para hallar el coeficiente de convección del agua almacenada dentro de un tanque según su temperatura se sigue la siguiente ecuación:

$$h_i = 12,705 \times e^{0,0369 \times T_{agua}} \quad (30)$$

En donde

h_i , es el coeficiente de convección del agua

T_{agua} , la temperatura del agua almacenada ($^{\circ}C$)

La resistencia térmica por convección viene dada por la siguiente ecuación:

$$R_1 = \frac{1}{h_{conv} \times \pi \times D_t \times L_t} \quad (31)$$

Donde: D_t es el diámetro del tanque de almacenamiento y L_t la longitud del mismo.

2.11. Aislamiento Térmico

Son materiales o combinaciones de materiales que se usan principalmente para suministrar resistencia al flujo de calor, es decir, impedir que existan pérdidas térmicas. Suelen ser materiales heterogéneos, los cuales tienen baja conductividad térmica y contienen bolsas de aire como la fibra de vidrio, lana de roca o poliuretano. (Cengel, 2007)

2.11.1. El valor \mathcal{R} del aislamiento

Es la resistencia térmica del material por unidad de área superficial. El valor \mathcal{R} se obtiene al dividir el espesor de ese aislamiento entre su conductividad térmica y es diferente según la forma del mismo. Es decir:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{k} \quad (\text{Para aislamiento plano}) \quad (32)$$

$$\mathcal{R} = \frac{r_2}{k} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (\text{Para aislamiento en tubos}) \quad (33)$$

Donde k es la conductividad térmica del aislamiento, r_1 es el radio interior del tubo, y r_2 el radio exterior del aislamiento. Una vez encontrado el valor \mathcal{R} , se puede determinar la rapidez, o razón, de la transferencia de calor a través del aislamiento, mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{\mathcal{R}} \times \text{Área} \quad (34)$$

Donde ΔT es la diferencia de temperatura a través del aislamiento y área es la superficie exterior para un cilindro.

2.12. Calor incidente sobre el tubo absorbedor

El calor que recibirá el tubo absorbedor proveniente de la superficie reflectora del CCP vendrá dado por:

$$Q_{inc} = S_{ef} \times I_{ef} - U_c \times A_r (T_r - T_\infty) \quad (35)$$

Dónde:

S_{ef} Superficie efectiva de captación del colector

A_r Área del receptor

I_{ef} Radiación solar directa efectiva sobre la base reflectora

U_c Coeficiente global de pérdidas al exterior

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_a + h_{rad,vacio}}$$

R_v Coeficiente de transferencia por conducción de la cubierta

$$R_v = \frac{2k}{D_{ev} \times \ln\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)}$$

k Conductancia del material

D_{ev} Diámetro exterior de la cubierta de vidrio

D_{iv} Diámetro interior de la cubierta de vidrio

R_a Coeficiente de transferencia por conducción del vacío

$$R_a = \frac{2k}{D_{iv} \times \ln\left(\frac{D_{iv}}{D_e}\right)}$$

D_e Diámetro exterior del tubo de vidrio interior

A_r Área del receptor

T_r Temperatura del receptor

T_∞ Temperatura ambiente

2.13. Calor necesario

Es la cantidad de calor mínima que se utiliza para elevar un medio de una temperatura inicial a una final. Este viene dado por la siguiente ecuación:

$$Q_{nec} = m \times C_p \times (T_f - T_i) \quad (36)$$

Dónde:

m : Cantidad de agua a calentar (Kg).

C_p : Calor específico del agua ($4,18 KJ/Kg^{\circ}C$).

T_f : Temperatura final ($^{\circ}C$).

T_i : Temperatura inicial ($^{\circ}C$).

2.14. Registro de variables físicas

2.14.1. Sondas de temperatura

Son dispositivos capaces de transformar los cambios de temperatura en señales eléctricas procesados por equipos de tipo eléctrico o electrónico. Generalmente se utilizan 3 tipos de sensores para medir temperatura: RTD, termistores y termopares.

El sensor de temperatura, típicamente suele estar formado por el elemento sensor, de cualquiera de los tipos anteriores, la vaina que lo envuelve y que está rellena de un material con alta conductividad térmica, para que los cambios se transmitan rápidamente al elemento sensor y del cable al que se conectarán el equipo electrónico.

a. Termistor

Se basa en la acción de la resistencia de los semiconductores siendo variable en función de la temperatura.

Existen termistores de dos tipos los NTC y PTC, los primeros, al aumentar la temperatura, disminuye la resistencia. En los PTC al incrementar la temperatura, la resistencia se eleva de manera proporcional. El problema principal del termistor es que no son lineales según la temperatura, siendo complicados de calibrar.

b. RTD

Sensor de temperatura basado en la variación de resistencia de un conductor con la temperatura. Los metales empleados normalmente como RTD son platino, cobre, níquel y molibdeno tienen mejor linealidad, mayor rapidez y margen de temperatura.

c. Termopar

Conocido también como termocupla, recibe este nombre por estar formado por dos metales, el principio de funcionamiento es el efecto termoeléctrico. Los materiales termoeléctricos permiten transformar directamente el calor en electricidad, generando un voltaje en función de la temperatura que está aplicándose al sensor.

Los termopares son económicos, tienen un amplio rango de medida, y son muy utilizados en la industria. La principal desventaja está en su precisión que es mala en comparación a los otros tipos de sensores. Se muestra un esquema de una termocupla en la figura 26.

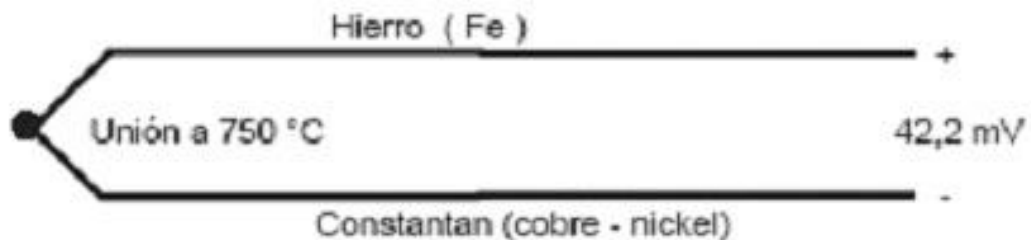


Figura 26 Esquema de una termocupla cualquiera

Fuente: (Bausá, 2004)

Los termopares se suelen encapsular en cabezales de acero, para protegerlos de las condiciones extremas. Dependiendo de la distancia se deben utilizar cables compensados para transportar la señal eléctrica para que no se modifique y pueda ser reconocida por los equipos transductores de la señal. (Bausá, 2004)

d. Termocuplas estándar.

Hay siete tipos de termocuplas según la Instrument Society of America (ISA). Se ha uniformado las normas europeas DIN (alemanas), BS (inglesas), NF (francesas) y las ANSI (norteamericanas) en cuanto a la correlación de temperaturas y f.e.m. en las distintas aleaciones. En la tabla 6 se detallan características de termocuplas estándar. (Bausá, 2004)

Tabla 6.
Características de las termocuplas estándar

Tipo	Denominación	Composición y símbolo	Rango de temperaturas (1)	Diámetro del alambre apropiado (2)	F.e.m.en mV (3)
B	Platino-rodio 30% vs. platino-rodio 6%	PtRh 30% - PtRh 6%	0 ...1.500 (1.800)	0,35 y 0,5 mm	0...10,094 (13,585)
R	Platino-rodio 13% vs. platino	PtRh 13% - Pt	0...1.400 (1.700)	0,35 y 0,5 mm	0,16,035 (20,215)
S	Platino-rodio 10% vs. platino	PtRh 10% - Pt	0...1300(1.600)	0,35 y 0,5 mm	0...13,155 (15,576)
J	Hierro vs. constatan	Fe - CuNi	-200 ... 700 (900)	3 mm 1mm	-7,89 ... 39,130 (51,875)
K	Niquel-cromo vs. níquel (Chromel vs. Alumel)	NiCr - Ni	-200 ... 600 (800)	3 ó 2 mm	-7,89 ... 33,096 (45,498)
			0...1000(1.300)		0...41,269 (52,398)
T	Cobre vs. constatan	Cu - CuNi	0 ... 900 (1.200)	1,38 mm	0...37,325 (48,828)
E	Niquel-cromo vs. constatan (Chromel vs. constatan)	NiCr - CuNi	-200 ... 700 (900)	0,5 mm	-5,60 ... 14,86 (20,86)
			-200 ... 600 (800)	3 mm	-9,83 ... 53,11 (68,78)
					-8,83 ... 45,08 (61,02)

Fuente: (Bausá, 2004)

2.14.2. Medidor de Radiación

La radiación global se mide mediante un piranómetro que se coloca sobre una superficie horizontal. Su funcionamiento es el de obtener la diferencia de temperaturas entre dos superficies encerradas en una cámara semiesférica de vidrio (ver figura 27).



Figura 27 Piranómetro

Fuente: (Fabara, 2016)

Con el piranómetro también es posible la medición de la radiación difusa, siempre y cuando este tenga un disco de sombreado en la cámara, para evitar la radiación directa en el recorrido diario del sol.

Por otra parte, la radiación directa se mide mediante un pirheliómetro, el cual es similar a los piranómetros. Este posee un par termoeléctrico que se coloca en una superficie negra en el interior de un tubo y posee un seguimiento constante del sol. (Ver figura 28)



Figura 28 Pirheliómetro

Fuente: (Fabara, 2016)

CAPITULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. Antecedentes investigativos

Desde hace muchos años se han realizado estudios para aprovechar la energía solar, alrededor del mundo en varios países como España, México, Japón, China y Estados Unidos se han realizado investigaciones para mejorar los sistemas de calentamiento solar permitiéndoles ser más eficientes y recibir mayor cantidad de energía. En Estados Unidos en el año de 1987 se inventó un calentador solar que consta de tubos de vidrio al vacío y de un tubo de calor que transmite la energía absorbida al agua para su calentamiento, esto fue inventado por John D. Garrison.

El uso de colectores cilindro parabólicos en el Ecuador, hasta el momento, no han sido motivo de estudio e innovación tecnológica; a su vez, se puede encontrar información sobre este tema en diferentes países que fomentan el uso de energías renovables, uno de los casos es el proyecto de Eduardo Zarza, con su tema de proyecto “Generación directa de vapor con colectores cilindro parabólicos”. (Zarza, 2003)

Otro estudio realizado en la Universidad Técnica de Ambato en el año 2011 por el ingeniero Víctor Salcedo mediante el uso de la tecnología de vacío, quien realizó ensayos donde calentó agua a una temperatura cercana a 62 ° C, en un tiempo de seis horas y logró almacenar una energía útil de aproximadamente 1854,61 *Wh*. (Salcedo, 2011)

Según Oscar Higuera y Efraín Ruiz, en su proyecto “Diseño y Construcción de un seguidor mecánico para un potabilizador solar parabólico.”, el colector cilindro-parabólico se hace más eficiente al instalar el dispositivo de seguimiento solar, debido a que, en primer lugar el movimiento del colector es continuo, describiendo así una trayectoria muy cercana a la del sol, lo que garantiza un mejor aprovechamiento de la radiación solar” dicho por los autores, tiene relación con el proyecto planteado en el presente proyecto, el cual tiene como fin diseñar e

implementar un colector cilindro parabólico con seguimiento solar para obtener agua caliente.

3.2. Fundamentación legal

La ley orgánica de Educación Superior en su artículo 173, establece que el Consejo de Evaluación, Acreditación y aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (CEEAAACES) es la organismo técnico publico encargado de ejecutar los procesos de evaluación externa, acreditación y aseguramiento de la calidad de la educación superior, así como de normar el proceso de autoevaluación. En el mismo artículo también se establece que las universidades, deberán someterse en forma obligatoria a la evaluación interna y externa, a la clasificación académica y el aseguramiento de la calidad de la educación.

3.2.1. Modelo genérico para la evaluación del entorno de aprendizaje

Este modelo establece 5 criterios para la evaluación del entorno de aprendizaje de la carrera, que son: pertinencia, plan curricular, academia, ambiente institucional y estudiantes.

El criterio de ambiente institucional evalúa el sistema de gestión académica de la carrera y los recursos de apoyo relacionados con bibliotecas y laboratorios, que cumplan con los objetivos para los cuales fueron creados mejorando la calidad de la educación.

Este criterio contiene tres subcriterios que son:

- Gestión Académica
- Fondo Bibliográfico
- Laboratorios/Centros de simulación/Talleres

Con el presente proyecto se pretende equipar el laboratorio de Fuentes de energía alternativa mejorando las técnicas de aprendizaje de los estudiantes con la utilización del módulo didáctico.

3.3. Variables de investigación

Variable independiente: Diseño e Implementación de un colector cilindro-parabólico con seguimiento solar.

Variable dependiente: Obtención de agua caliente.

3.4. Operacionalización de las variables

En las tablas 7 y 8 se encuentra la operacionalización de la variable independiente y dependiente respectivamente.

Tabla 7.
Operacionalización de variable independiente

Variable	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Diseño e Implementación de un colector cilindro parabólico con seguimiento solar.	El colector cilindro parabólico absorbe la radiación solar directa y la concentra en un punto focal donde está ubicado un tubo de vacío que absorbe la energía para convertirla en energía térmica que calienta un tubo de cobre conocido como "heat pipe" que transfiere el calor para el calentamiento de agua, el CCP está dotado de un sistema de seguimiento solar que permitirá incrementar el rendimiento del colector.	Diseño del canal parabólico	<ul style="list-style-type: none"> • Superficie de captación. • Distancia focal.
		Diseño del sistema de seguimiento solar y su fuente de alimentación de energía.	<ul style="list-style-type: none"> • Fuerza que soportara el actuador lineal. • Ángulo de posicionamiento del concentrador. • Energía consumida en Wh. • Capacidad de batería • Regulador de carga de la batería. • Corriente y voltaje del panel solar
		Diseño del sistema mecánico	<ul style="list-style-type: none"> • Altura de las bases. • Ángulo de inclinación de las bases. • Esfuerzos y deflexión que soportara la estructura.

Tabla 8.
Operacionalización de variable dependiente

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores
	Conceptual		
Obtención de agua caliente	Obtener agua caliente a partir de la concentración de energía solar absorbida por el CCP y transferida al agua por medio del heat pipe.	Diseño del sistema para obtención de agua caliente.	<ul style="list-style-type: none"> • Medición de la radiación solar. • Medición de temperatura heat pipe. • Temperatura del agua al ingreso del tanque de almacenamiento. • Hoja de toma de datos.
		Sistema de almacenamiento del agua	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad del tanque de almacenamiento • Espesor mínimo de aislamiento del tanque. • Esfuerzo y deflexión que soporta la mesa soporte del tanque. • Ángulo de inclinación de la mesa soporte.
		Sistema de visualización de variables físicas	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura del agua en el interior del tanque. • Temperatura del condensador. • Orientación de la base reflectora del CCP.

3.5. Modalidad de investigación

3.5.1. Investigación bibliográfica

Este tipo de investigación es una parte esencial dentro del proceso de desarrollo debido a que permitirá conocer diferentes mecanismos de seguimiento solar, sistemas de calentamiento de agua, lineamientos y procedimientos requeridas para el monitoreo de variables para el posterior diseño del sistema, usando para ello diferentes fuentes bibliográficas.

3.5.2. Investigación de campo

La presente investigación se desarrolla en la terraza del bloque C de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga en el laboratorio de Fuentes alternativas de energía que es el lugar donde se realizara la implementación del proyecto. Se obtiene información del área que se tiene para la instalación del equipo y de disponibilidad de recursos como el agua que es indispensable para el desarrollo del proyecto.

3.5.3. Investigación experimental

Esta investigación utiliza métodos, técnicas y un conjunto de actividades que permite la formación de hipótesis, y la obtención de datos e información necesarios para la construcción del colector cilindro parabólico, se obtiene información por medio de la medición de variables físicas como radiación y temperatura con la finalidad de analizar cómo funciona el sistema y poder realizar los cambios respectivos antes de su instalación final.

3.5.4. Investigación aplicada

Mediante el presente proyecto se plantea una mejora en el aprendizaje de los estudiantes, especialmente a los de la carrera de ingeniería Electromecánica que son los que reciben la asignatura de Fuentes alternativas de energía, al implementar el colector cilindro parabólico para obtener agua caliente se podrá obtener datos y calcular la cantidad de energía que es capaz de concentrar un CCP y a su vez determinar su rendimiento.

3.6. Técnica de recolección de datos

3.6.1. Observación en laboratorio

Es necesario aplicar la técnica de observación para obtener los datos necesarios experimentalmente mediante la implementación de un sistema piloto que permita observar de manera detallada los datos registrados por los instrumentos de medición y así poder realizar la construcción final del colector cilindro parabólico.

3.7. Técnica de análisis de datos

Para realizar el análisis de los datos de radiación y temperatura obtenidos de manera experimental se utiliza una serie de fórmulas, presentadas en el capítulo anterior, para calcular la energía útil producida por el colector y la energía consumida para el calentamiento de agua y así hallar el rendimiento del sistema.

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS, DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

4.1. Análisis del recurso solar en el lugar de instalación

4.1.1. Radiación solar directa

Utilizando el software SAM, en la ubicación geográfica del lugar de instalación, como se muestra en la figura 29, en donde se encontrará ubicado el sistema.

City	-	Time zone	GMT -5	Latitude	-0.95 °N
State	-	Elevation	2759 m	Longitude	-78.62 °E
Country	-	Data Source	NSRDB	Station ID	1084263
Data file	C:\Users\COMPU\SAM Downloaded Weather Files\lat-0.93000 Ion-78.61000_2014.csv				

Figura 29 Datos de ubicación en el software SAM

Ya que el estudio se lo realiza en el mes de junio se utilizarán los datos dados por el software SAM en dicho mes, en donde se tiene un valor de radiación directa promedio máxima por día en el lugar de instalación de $868,45 \text{ W/m}^2$ (ver figura 30).

	Max	Avg Daily Max
✓ All		
▼ lat-0.93000 Ion-78.61000_2014.csv		
> Global irradiance - GHI (W/m2)		
▼ Beam irradiance - DNI (W/m2)		
Jan	1020	970
Feb	994	679.4194
Mar	965	635.4839
Apr	965	801.4839
May	934	832.8065
Jun	960	868.4516
Jul	970	921.8387
Aug	960	825
Sep	978	824.6452
Oct	978	819
Nov	992	876.0968
Dec	1025	919.871

Figura 30 Datos de radiación directa software SAM

Se puede ver la gráfica de radiación directa en un día del mes de junio en la figura 31.

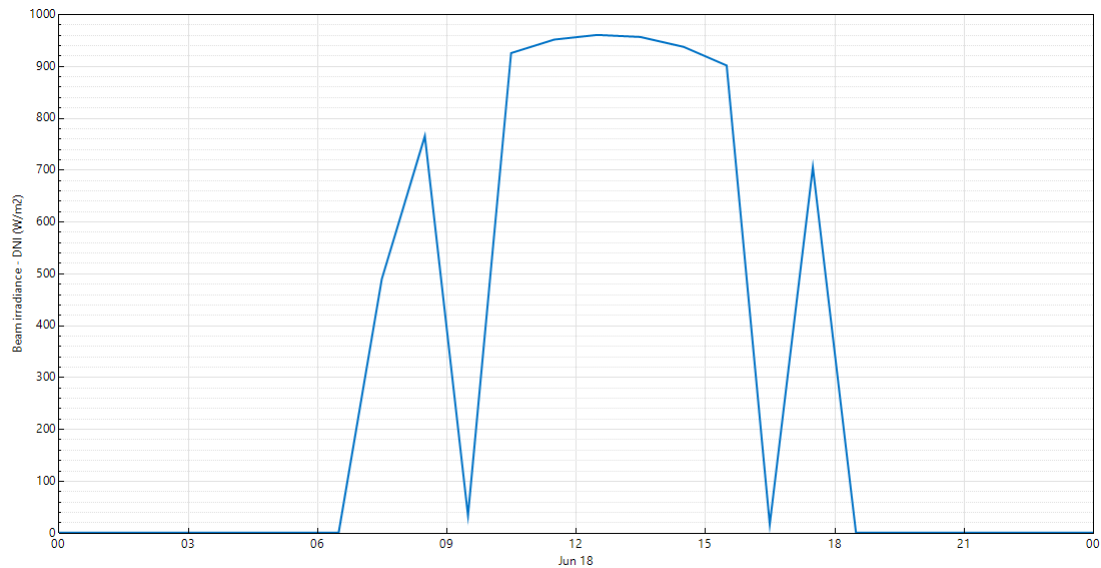


Figura 31 Gráfica de la radiación directa en un día del mes de junio

Fuente: (Software SAM, 2014)

4.1.2. Ángulo de incidencia solar

Para el encontrar el ángulo de incidencia solar con una inclinación mínima del colector respecto a la horizontal de 6° (ya que al usar un sistema de calentamiento basado en Heat Pipe se debe tener una inclinación mínima de 5° para su correcto funcionamiento) se realiza el siguiente cálculo y con los siguientes parámetros:

- Latitud geográfica (φ): $-0,9354^\circ$ (Lugar de instalación)
- Inclinación del colector (s): 6°
- Declinación (δ)
- Azimut u Orientación (a): 180°
- Ángulo horario (w)

Con esto el ángulo de incidencia (θ) se obtiene mediante la ecuación (8), como $a = 180^\circ$, ya que el CCP está orientado al norte, esta ecuación se reduce a:

$$\cos \theta = \cos(\varphi - s) \times \cos(\delta) \times \cos(w) + \text{sen}(\varphi - s) \times \text{sen}(\delta) \quad (37)$$

La declinación se calculará para cada mes del año, mediante la ecuación (6) obteniendo los resultados de la tabla 9:

$$\delta = 23,45^\circ \times \text{sen} \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$$

Tabla 9.
Declinación mensual en el lugar de instalación

Mes	Número de día (n)	Declinación (δ)(°)
Enero	15	-21,26
Febrero	45	-13,61
Marzo	75	-2,41
Abril	105	9,41
Mayo	135	18,79
Junio	165	23,26
Julio	195	21,67
Agosto	225	14,42
Septiembre	255	3,41
Octubre	285	-8,42
Noviembre	315	-18,17
Diciembre	345	-23,12

Para el cálculo del ángulo horario, según la posición geográfica del CCP, se lo analizará en las horas de luz útil, es decir, desde las 7 am hasta las 5 pm, mediante la ecuación (7), los valores que se obtienen mediante la ecuación se encuentran en la tabla 10.

$$w = 15^\circ \times (hs - 12)$$

Tabla 10.
Ángulo horario a lo largo del día con luz solar útil

Horas (hs)	w (°)	w (rad)
07:00	-75	-1,31
08:00	-60	-1,05
09:00	-45	-0,79
10:00	-30	-0,52
11:00	-15	-0,26
12:00	0	0
13:00	15	0,26
14:00	30	0,52
15:00	45	0,79
16:00	60	1,05
17:00	75	1,31

Con el dato de radiación directa máxima por día dado por el software SAM $I_{o(avg,mes)} = 868,45 \text{ W/m}^2$, se determina el valor de radiación media reemplazándolo en la ecuación (38).

$$I_{o(media)} = I_{o(avg,mes)} \times e^{\frac{-1}{3,8 \times \cos(w-1,6)}} \quad (38)$$

$$I_{o(media)} = 868,45 \times e^{\frac{-1}{3,8 \times \cos(w-1,6)}}$$

Con esto reemplazamos los valores de ángulo horario (w) obtenidos en la tabla 10 en la ecuación anterior, así como también se obtiene el valor del $\cos(\theta)$, reemplazando los valores de latitud (φ), declinación (δ) para el mes de junio (dado en la tabla 9Tabla 9), inclinación del colector (s) y ángulo horario (w) de la tabla 10 en la ecuación (37) y los ubicamos como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11.
Datos del ángulo de incidencia solar y la radiación media
Junio (Declinación $\delta = 23,26^\circ$)

Hora	Ángulo horario (w)(°)	$\cos(\theta)$	$I_o \left(\frac{W}{m^2} \right)$
07:00	-75	0,1883	278,98
08:00	-60	0,4083	499,40
09:00	-45	0,5971	592,11
10:00	-30	0,7421	637,61
11:00	-15	0,8332	659,91
12:00	0	0,8643	667,43
13:00	15	0,8332	662,61
14:00	30	0,7421	643,9
15:00	45	0,5971	604,57
16:00	60	0,4083	525,57
17:00	75	0,1883	345,7

Conociendo los valores de radiación media, ahora nos enfocaremos en calcular el valor de la radiación efectiva, para esto debemos saber el rendimiento óptico del sistema de concentración, el cual depende de la superficie reflectora y el tubo absorbedor, así obteniendo los siguientes valores, para esto se utiliza la ecuación (15).

Los datos de la tabla 12 son dados por el fabricante, se encuentran en el anexo A1 y B1.

Tabla 12.
Datos para el cálculo del rendimiento óptico

Variable	Valor
Reflectividad superficie reflectora (ρ)	0,853
Transmisividad del tubo absorbedor (τ)	0,90
Absortividad del tubo absorbedor (α)	0,94
Factor de interceptación (γ)	0,95

Por lo tanto el rendimiento óptico es de:

$$n_{opt} = 0,6855$$

De este modo obtenemos la radiación efectiva:

$$I_{ef} = I_o \times \cos \theta \times n_{opt} \quad (39)$$

Reemplazando los valores de $\cos \theta$ de la tabla 11 y el rendimiento óptico en la ecuación (39) se obtienen los datos que se muestran en la tabla 13.

Tabla 13.
Radiación efectiva en el mes de junio sin seguimiento
Junio (Declinación $\delta = 23,26^\circ$)

Hora	Ángulo horario (w)($^\circ$)	$\cos(\theta)$	$I_o \left(\frac{W}{m^2}\right)$	$I_{ef} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
07:00	-75	0,1883	278,98	36,01
08:00	-60	0,4083	499,40	139,78
09:00	-45	0,5971	592,11	242,36
10:00	-30	0,7421	637,61	324,36
11:00	-15	0,8332	659,91	376,91
12:00	0	0,8643	667,43	395,44
13:00	15	0,8332	662,61	378,46
14:00	30	0,7421	643,9	327,56
15:00	45	0,5971	604,57	247,46
16:00	60	0,4083	525,57	147,10
17:00	75	0,1883	345,7	44,62

Ahora con estos valores obtenemos un valor promedio para el mes de junio y los reemplazamos en la ecuación (37) y (39) para realizar los estudios.

$$\cos \theta_{sin,seg} promedio = 0,582$$

$$I_{O(sin,seg.)} promedio = 556,16 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$I_{ef(sin,seg.)} promedio = 221,88 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Al implementar en el sistema un mecanismo de seguimiento solar se tiene que el ángulo de incidencia solar tiende a ser siempre el del valor de las 12:00, ya que es cuando el sol es perpendicular a la superficie de la Tierra, por lo tanto se obtienen los valores de la tabla 14:

Tabla 14.
Radiación efectiva con seguimiento solar

Junio (Declinación $\delta = 23,26^\circ$)				
Hora	Ángulo horario (w)($^\circ$)	$\cos(\theta)$	$I_o \left(\frac{W}{m^2} \right)$	$I_{ef} \left(\frac{W}{m^2} \right)$
07:00	-75	0,8643	278,98	165,29
08:00	-60	0,8643	499,40	295,88
09:00	-45	0,8643	592,11	350,81
10:00	-30	0,8643	637,61	377,77
11:00	-15	0,8643	659,91	390,98
12:00	0	0,8643	667,43	395,44
13:00	15	0,8643	662,61	392,58
14:00	30	0,8643	643,9	381,50
15:00	45	0,8643	604,57	358,19
16:00	60	0,8643	525,57	311,39
17:00	75	0,8643	345,7	204,82

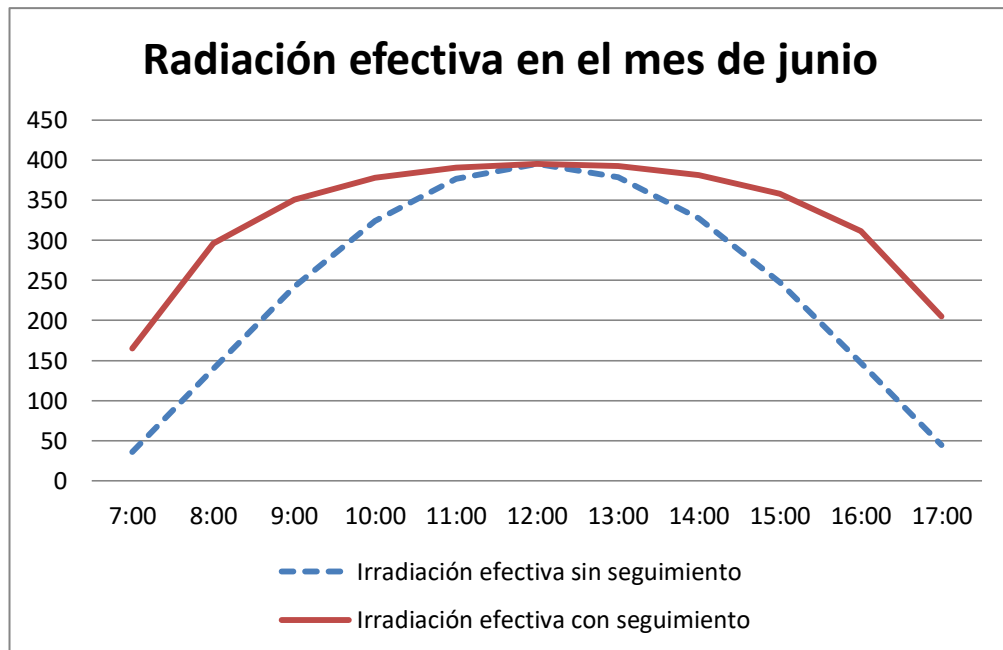


Figura 32 Comparación de la radiación efectiva en un día

En la figura 32 se puede observar una gráfica de comparación de la radiación efectiva cuando se tiene el CCP con y sin seguimiento solar.

Con esto, se obtienen valores promedio distintos que cuando no se implementa un sistema de seguimiento solar, obteniendo los siguientes valores.

$$\cos \theta_{(con,seg.)} promedio = 0,8643$$

$$I_{O(con,seg.)} promedio = 556,16 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$I_{ef(con,seg.)} promedio = 329,51 \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Después de este análisis realizado se obtiene que al implementar un mecanismo de seguimiento solar se incrementa un 48,50% la radiación efectiva que recibe el CCP.

4.1.3. Análisis del movimiento solar

Realizando el análisis en el mes de junio y en la posición de instalación del colector, siendo las 12 del día (hora oficial HO), TSV será:

$$TSV = HO + ET + \frac{\lambda_m - \lambda}{15^\circ}$$

Como se mencionó en el capítulo II se tienen los siguientes datos:

ET = Según la tabla 2 para el mes de junio, su tiempo promedio del mes es = 0 horas.

λ_m = Es la longitud del meridiano debido al huso horario que corresponde al Ecuador que es el meridiano 75° , el cual marca la hora civil del país (Ver figura 33).



Figura 33 Mapa del Ecuador

Fuente: (EcuadorWorld, 2010)

λ = Es la longitud del meridiano sobre el punto estudiado. Según la ubicación de Google Maps, como se muestra en la figura 34, se determina que en donde se ubicará el sistema es $78^\circ 36' 41''$.

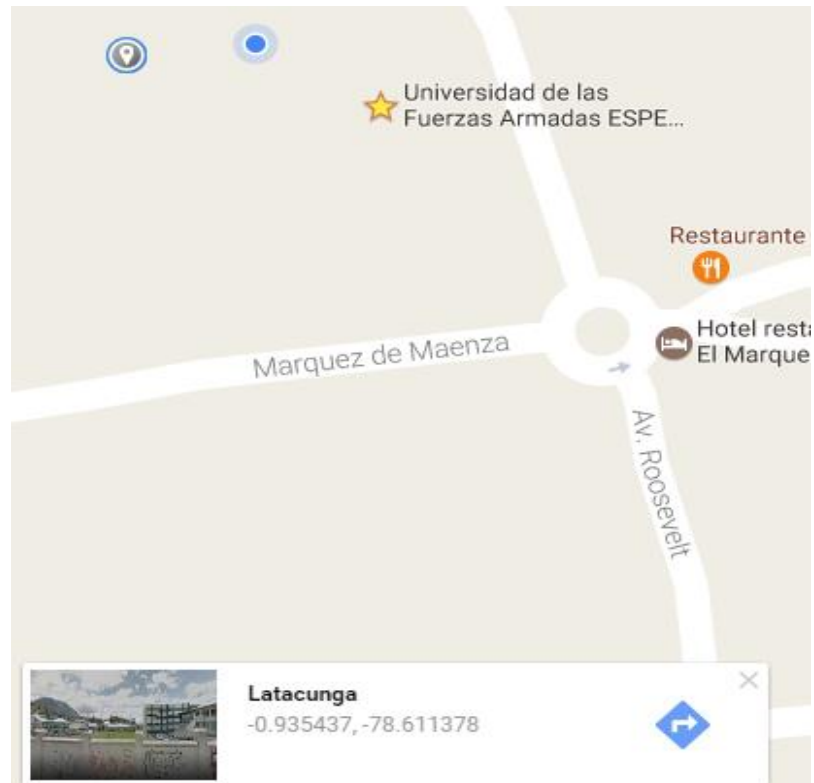


Figura 34 Ubicación geográfica del lugar de instalación

Fuente: (Google Maps, 2017)

$$TSV = 12 \text{ horas} + 0 \text{ horas} + \frac{75 - 78^{\circ}36'41''}{15^{\circ}}$$

$$TSV = 12 \text{ horas} + 0 \text{ horas} - 0,2407 \text{ horas}$$

$$TSV = 12 \text{ horas} + 0 \text{ horas} - 0,2407 \text{ horas}$$

$$TSV = 11 \text{ horas } 45 \text{ minutos } 33 \text{ segundos}$$

Entonces en el lugar de instalación del CCP, en el mes de junio cuando el reloj marque las 11 horas 45 minutos 33 segundos, el sol alcanzará su máxima altura.

4.2. Diseño del colector solar cilindro-parabólico

4.2.1. Diseño conceptual (casa de la calidad)

Requisitos del cliente

- Resistente
- Duradero

- Bajo Costo
- Fácil Mantenimiento
- Tolerancia de construcción de $\pm 0.5\text{mm}$

Requisitos técnicos

- Resistencia a la flexión
- Resistente a la corrosión
- Dimensión
- Peso
- Tolerancia de construcción
- Fiabilidad en el sistema de seguimiento

Con estos datos se realiza la casa de la calidad representada en la figura 35 y con la cual se obtienen las siguientes conclusiones.

Conclusión de la casa de la calidad

- Resistencia a la flexión: Los ejes soporte de la base reflectora deben ser capaces de resistir su peso.
- Resistente a la corrosión: Los componentes del CCP deben resistir el permanecer al aire libre durante toda su vida útil.
- Dimensión: Las partes que componen al CCP deben ser de dimensiones de acuerdo a los elementos que existan en el mercado y al espacio disponible para su instalación.
- Peso: El CCP debe ser lo más ligero posible para su fácil transporte y para que pueda realizar el seguimiento solar.
- Tolerancia de construcción: Debe ser hasta $\pm 0,5\text{mm}$ del diseño mostrado en los planos, para que así se pueda ensamblar todas las partes del sistema correctamente.
- Fiabilidad en el sistema de seguimiento: Debe ser capaz de permanecer al aire libre y de mover a la base reflectora del CCP.

Título: Colector cilindro Parabólico
 Autor: JOSÉ MIGUEL TORO - CARLOS ALEJANDRO MANTILLA
 Fecha: 28 de Mayo del 2017
 Notas:

Legenda	
9	Relación Fuerte
3	Relación Moderada
1	Relación Débil
+	Correlación positiva Fuerte
+	Correlación Positiva
+	Correlación Negativa
+	Correlación negativa Fuerte
▲	Objetivo para minimizar
▲	Objetivo para maximizar
X	Objetivo para alcanzar meta

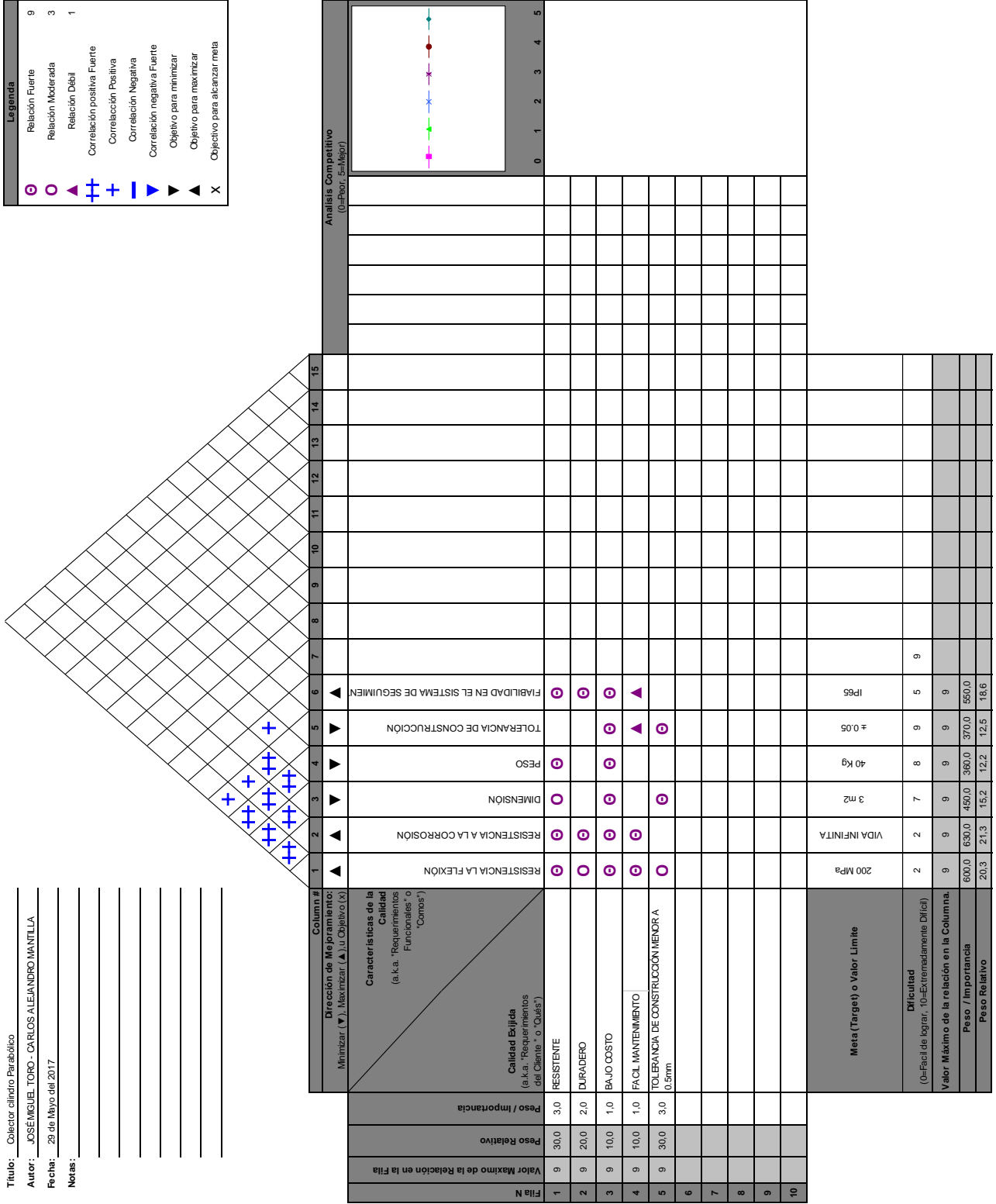


Figura 35 Casa de la calidad del CCP

4.2.2. Descripción del colector

El colector solar cilindro-parabólico a implementar se conforma principalmente por una base reflectora en forma de parábola, la cual es la encargada de reflejar los rayos solares al punto focal en el cual se encuentra un tubo absorbedor, el cual permanece fijo durante todo el funcionamiento. La base reflectora gira para posicionarse perpendicularmente al sol, mediante un sistema de seguimiento, teniendo como eje de giro al punto focal de la base reflectora. Así se logra que la radiación incida sobre toda la superficie del tubo absorbedor a lo largo del día.

4.2.3. Componentes del colector cilindro parabólico

a. Base reflectora

Para el diseño de la base reflectora se utilizará una plancha de aluminio reflectante cuyas dimensiones son 1.75x1.20 metros; el lado de 1.20 metros será donde se realiza la curva de la parábola, con esto se procede a realizar los cálculos pertinentes para determinar la distancia focal.

Se tomará como vértice de la parábola la mitad del lado curvo, es decir la longitud de la curva (S) será de 0,6 metros. Siendo así, se realizarán los cálculos para dos distancias focales que serán, 25 y 35 centímetros.

Teniendo que la longitud de la curva se determina por la ecuación (10), obteniendo una gráfica como se muestra en la figura 36:

$$S = \int_a^b \sqrt{1 + f'(x)} dx$$

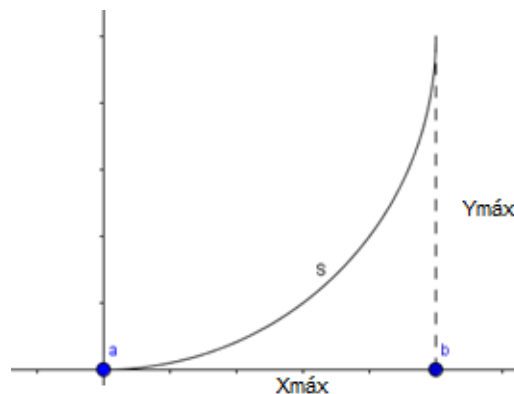


Figura 36 Gráfica de la curva

Ya conociendo la longitud de la curva $S = 0,60 \text{ m}$; hallamos la derivada $f'(x)$ de la ecuación de la parábola, la cual es:

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4 \times F} \quad (40)$$

Sustituyendo las distancias focales en la ecuación (40), para luego derivarla y sustituyéndola en la ecuación (10), obtendremos el valor del límite b , siendo el límite $a = 0$; así conoceremos el valor de $X_{\text{máx}}$.

Si $F = 25 \text{ cm}$,

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4 \times 0,25} = x^2 \rightarrow f'(x) = 2x$$

Reemplazando el valor de $f'(x)$ en (10)

$$0,6 = \int_0^b \sqrt{1 + 2x} dx$$

Integrando la función

$$b = 0,49 \text{ cm}$$

Si $F = 35 \text{ cm}$,

$$f(x) = y = \frac{x^2}{4 \times 0,35} = \frac{x^2}{1,4} \rightarrow f'(x) = 1,42x$$

Reemplazando el valor de $f'(x)$ en (10)

$$0,6 = \int_0^b \sqrt{1 + 1,42x} dx$$

Integrando la función

$$b = 0,51 \text{ cm}$$

Conociendo el valor de $X_{\text{máx}}$ podemos conocer el valor de $Y_{\text{máx}}$, reemplazando $X_{\text{máx}}$ en la ecuación de la curva, obteniendo los valores que se representan en la tabla 15:

Tabla 15.
Relación de distancias focales

Foco	$X_{m\acute{a}x}$	$Y_{m\acute{a}x}$
0,25	0,49	0,24
0,35	0,51	0,19

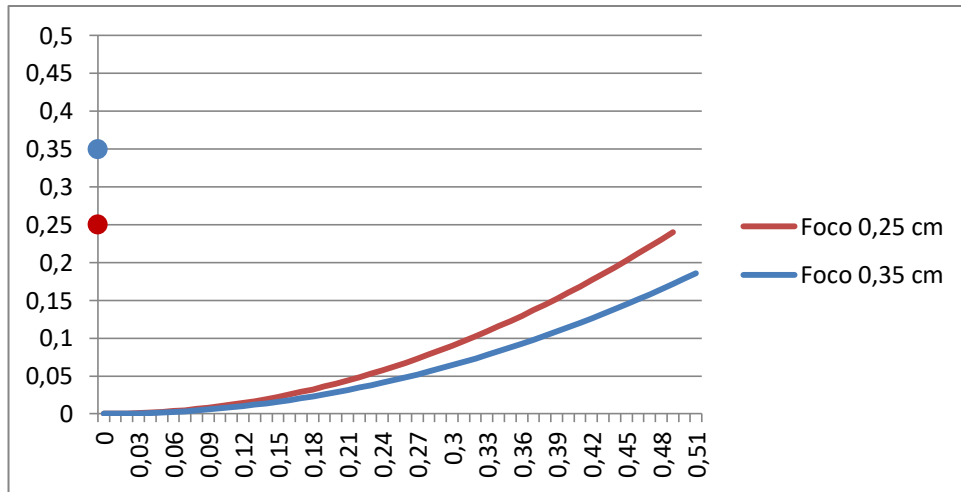


Figura 37 Gráfica de las distancias focales

Con las distancias focales (ver figura 37) podemos determinar que al tener un foco de 25 centímetros tendremos una distancia $Y_{m\acute{a}x}$ de 0,24 m; es decir, un valor aproximadamente igual a la distancia del foco, y con una distancia focal de 35 centímetros se tendrá una distancia $Y_{m\acute{a}x}$ de 0,19 m con la cual tendremos una curvatura menos pronunciada.

La figura 38 muestra el perfil del CCP para una distancia focal de 35 centímetros ($Y_{m\acute{a}x} = 0,19\text{ m}$; $X_{m\acute{a}x} = 0,51\text{ m}$):

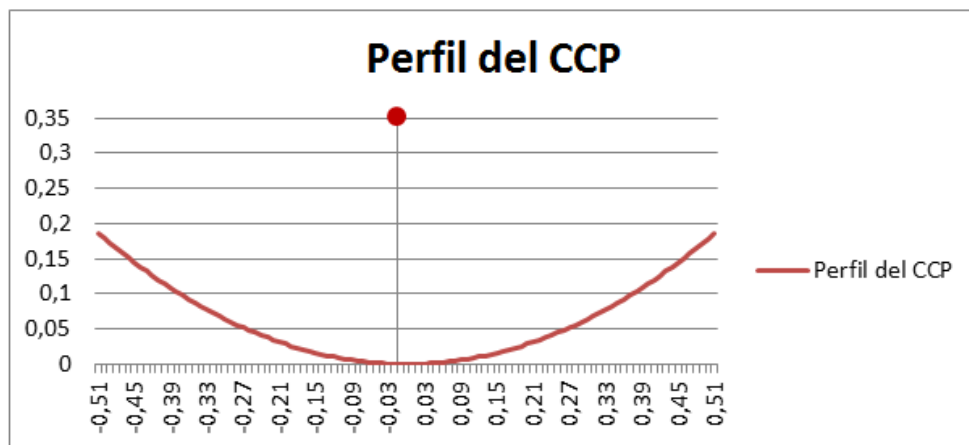


Figura 38 Perfil del CCP expresado en metros

Ahora procedemos a calcular el ángulo de abertura α y la distancia ρ correspondientes al punto focal con la parábola, como se muestran en la figura 39.

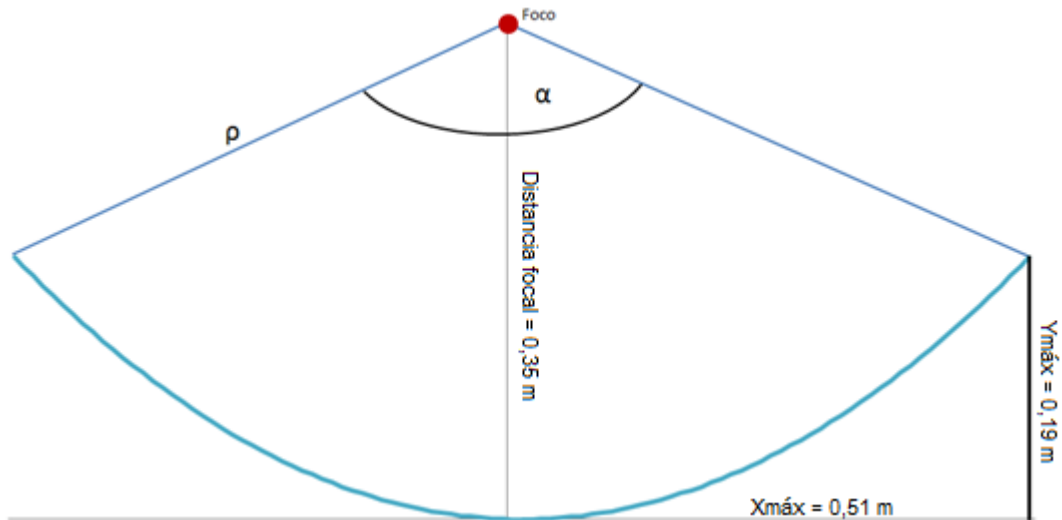


Figura 39 Ángulo de abertura y distancias dentro del perfil del CCP

Para calcular α procedemos a resolver la ecuación (11) y (12) reemplazando los valores obtenidos anteriormente:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{X_{\max}}{F - Y_{\max}} = \frac{0,51}{0,35 - 0,19} = 3,1875$$

$$\alpha = 2 \times \operatorname{arctg}(3,1875) = 145,164^\circ$$

$$\rho = \sqrt{X_{\max}^2 + (F - Y_{\max})^2}$$

$$\rho = \sqrt{0,51^2 + (0,35 - 0,19)^2}$$

$$\rho = 0,53 \text{ cm}$$

b. Tubo receptor

Ahora procedemos a calcular el diámetro del tubo receptor utilizando la ecuación (13):

$$\phi_{\min} = \frac{2 \times \rho \times \operatorname{tg} 16'}{\cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

$$\phi_{\min} = \frac{2 \times 0,53 \times \operatorname{tg} 16'}{\cos\left(\frac{145,164}{2}\right)}$$

$$\varnothing_{min} = 1,6 \text{ cm}$$

Utilizando el valor de distancia focal igual a 25 cm, se obtiene un valor de diámetro mínimo del tubo de 22 centímetros; por lo tanto la distancia focal a utilizar en el proyecto será la de 35 centímetros para utilizar un tubo de un diámetro mínimo de 1,6 centímetros.

Teniendo un tubo de radio 0,8 centímetros y 1,75 metros de longitud para la aplicación procedemos a calcular la razón de concentración geométrica mínima, C, reemplazando los valores en la ecuación (14), obteniendo:

$$C = \frac{A}{2 \times \pi \times r \times L}$$

$$C = \frac{1,785}{2 \times \pi \times 0,008 \times 1,75}$$

$$C = 20,29$$

Por lo tanto la razón de concentración mínima del CCP será de 20,29; estando así entre los rangos usuales para este tipo de colector.

4.2.4. Pérdidas Geométricas del CCP

Determinados los valores de las dimensiones de la base reflectora, así como también del ángulo de incidencia solar se procede a calcular las pérdidas geométricas en el CCP utilizando la ecuación (16) de la siguiente manera:

a. Sin seguimiento solar:

$$\cos \theta_{(sin,seg.)} = 0,582$$

$$\theta_{(sin,seg.)} = \arccos 0,582$$

$$\theta_{(sin,seg.)} = 54,4^\circ$$

$$Se = L_r \times F_m \times \tan \theta_{(sin,seg.)}$$

$$F_m = F + \left(F * \frac{L_r^2}{48} * F^2 \right)$$

$$F_m = 0,35 + \left(0,35 * \frac{1,02^2}{48} * 0,35^2 \right)$$

$$F_m = 0,3509 \text{ m}$$

Por lo tanto la superficie de pérdida será

$$S_e = 1,02 \times 0,3509 \times \tan 54,4$$

$$S_e = 0,4999 \text{ m}^2$$

Con esto tenemos que la superficie de reflexión efectiva S_{ef} es 1,2501 m², es decir se reduce un 28,56% de la superficie total de reflexión.

Con esto podemos calcular la energía solar incidente sobre el CCP mediante la siguiente fórmula:

$$Q_{sol} = S_{ef} \times I_0 \times \cos \theta_{(sin,seg.)}$$

Para este caso siendo I_0 la radiación efectiva sin seguimiento ($I_{ef(sin,seg.)}$), con esto se tiene que:

$$Q_{sol} = 1,2501 \times 221,88 \times 0,582$$

$$Q_{sol} = 161,43(W)$$

b. Con seguimiento solar:

$$\cos \theta_{(con,seg.)} = 0,8643$$

$$\theta_{(con,seg.)} = \arccos 0,8643$$

$$\theta_{(con,seg.)} = 30,19^\circ$$

$$S_e = L_r \times F_m \times \tan \theta_{(con,seg.)}$$

$$F_m = F + \left(F * \frac{L_r^2}{48} * F^2 \right)$$

$$F_m = 0,35 + \left(0,35 * \frac{1,02^2}{48} * 0,35^2 \right)$$

$$F_m = 0,3509 \text{ m}$$

Por lo tanto la superficie de pérdida será

$$S_e = 1,02 \times 0,3509 \times \tan 30,19$$

$$S_e = 0,2082 \text{ m}^2$$

Con esto tenemos que la superficie de reflexión efectiva (S_{ef}) es 1,5418 m^2 , es decir se reduce un 11,89% de la superficie total de reflexión.

Con esto podemos calcular la energía solar incidente sobre el CCP mediante la siguiente fórmula:

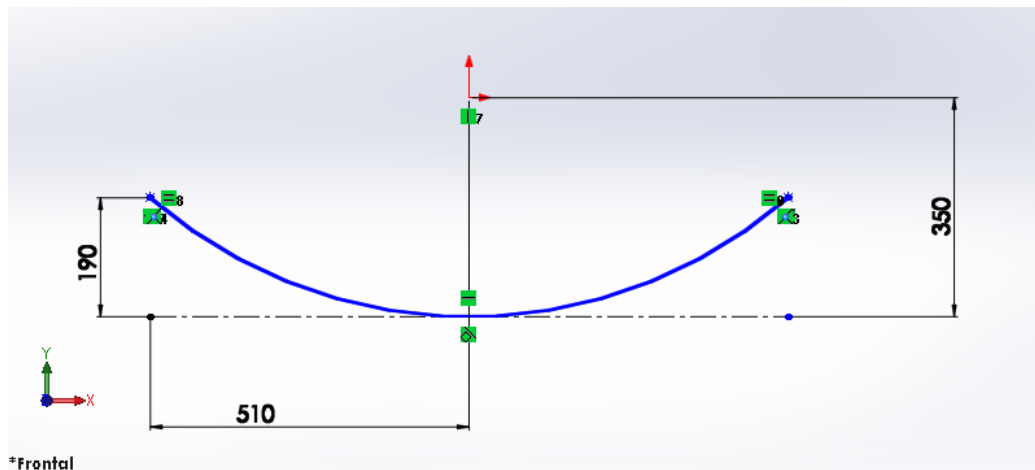
$$Q_{sol} = S_{ef} \times I_{ef(con,seg)} \times \cos \theta_{(con,seg)}$$

$$Q_{sol} = 1,5418 \times 329,51 \times 0,8643$$

$$Q_{sol} = 439,09(W)$$

4.3. Construcción del colector cilindro-parabólico

Para la construcción del colector cilindro-parabólico se diseñó las piezas en el Software SolidWorks 2014 basados en los cálculos obtenidos anteriormente.



*Frontal

Figura 40 Canal parabólico de la base reflectora en SolidWorks

Como se observa en la figura 40 se tiene en el diseño las dimensiones que se obtuvieron anteriormente, con el foco de la parábola a 350 mm, el valor de $X_{m\acute{a}x} = 510 \text{ mm}$ y el valor de $Y_{m\acute{a}x} = 190 \text{ mm}$.

Se utilizará una plancha de aluminio liso 6061, con un espesor de 0,7 mm con las dimensiones dadas de 1200 x 1750 mm, dando un peso de 2,69 kg,

la cual será rolada para que tenga la curvatura necesaria, (figura 41). Se puede observar en la figura 42 la pieza modelada en SolidWorks.



Figura 41 Plancha de aluminio en proceso de rolado

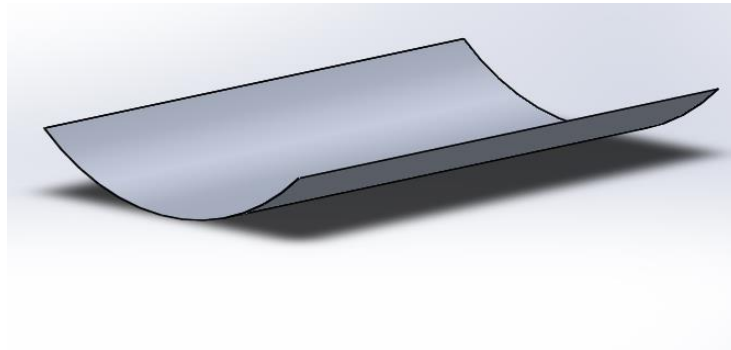
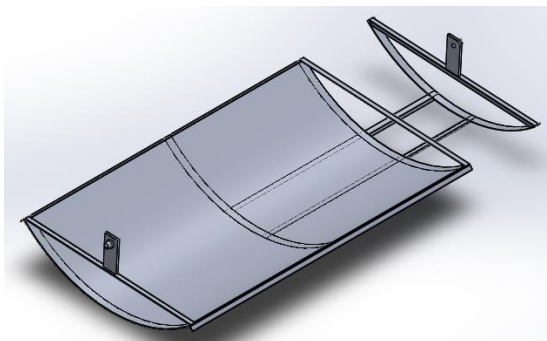
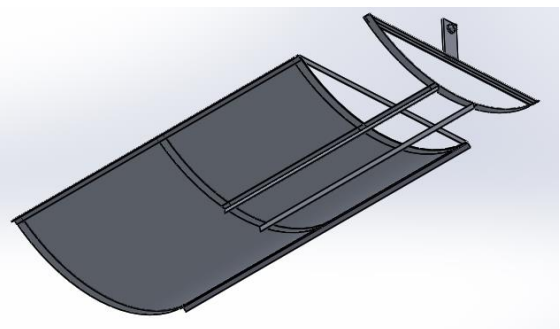


Figura 42 Base reflectora del CCP

Esta base reflectora estará sujeta a tres platinas y ángulos de aluminio para conservar su forma, como lo indica la figura 43, una platina externa se colca a 40 centímetros de la base reflectora la cual es sujeta por ángulos que salen de la base reflectora, ver figura 44, con esto el peso de la base reflectora es de 10kg.



(a) Vista superior



(b) Vista inferior

Figura 43 Base reflectora en las platinas de soporte

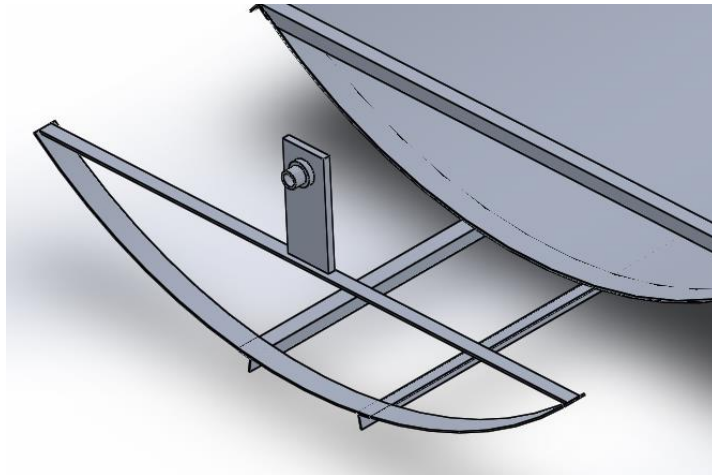


Figura 44 Platina exterior a la base reflectora

Las platinas de los costados tendrán un bocín con centro en el foco de la parábola en donde ingresará un eje apoyado sobre dos columnas de tubo cuadrado de 6 x 6 cm mediante dos ejes de acero, ASTM A36, haciendo eje en el foco de la parábola como se muestra en la figura 45.

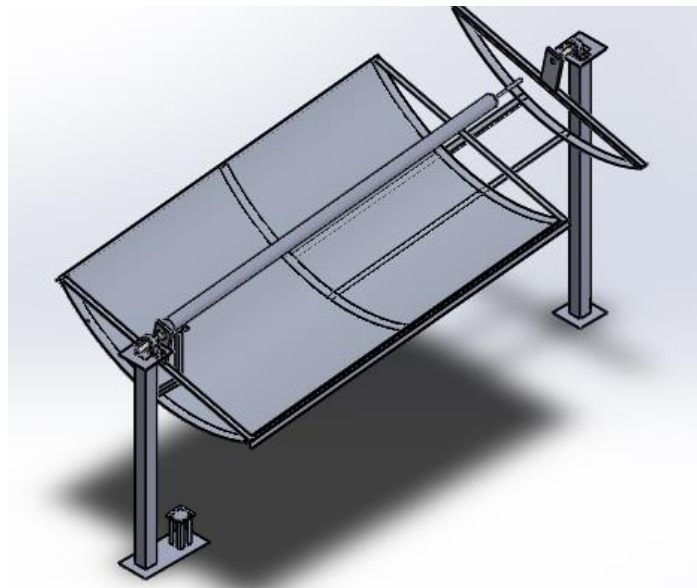
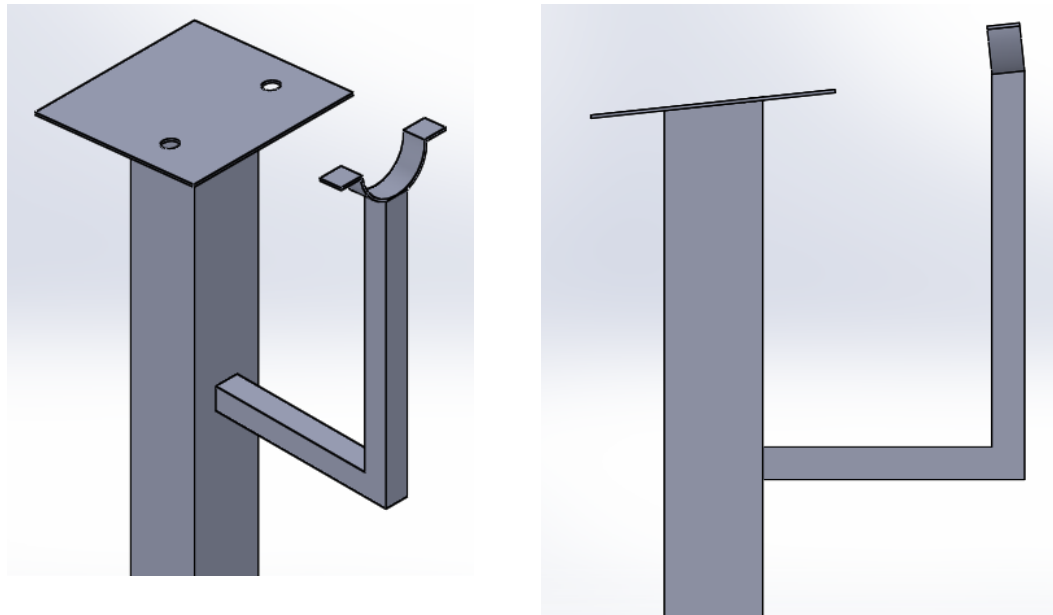


Figura 45 Colector solar cilindro parabólico diseñado

La columna que se ubicará al norte tiene en una de sus paredes el soporte para que se apoye el tubo de vacío, ver figura 46(a). Esto se lo hace mediante un semicírculo cuyo centro se coloca en el foco de la parábola, logrando así que el foco de la parábola sea el eje del tubo de vidrio, además esta tendrá una inclinación de 6° en la placa de soporte superior, como se muestra en la figura 46(b), esto para lograr que el tubo de vacío tenga una inclinación respecto a la horizontal.



(a) Vista isométrica

(b) Vista lateral

Figura 46 Columna norte el CCP

De la misma manera, en la columna sur se tiene la inclinación en su placa superior, como se muestra en la figura 47, pero esta es más alta que la columna norte para que se pueda obtener la inclinación de 6° del sistema Heat Pipe, ver figura 48.

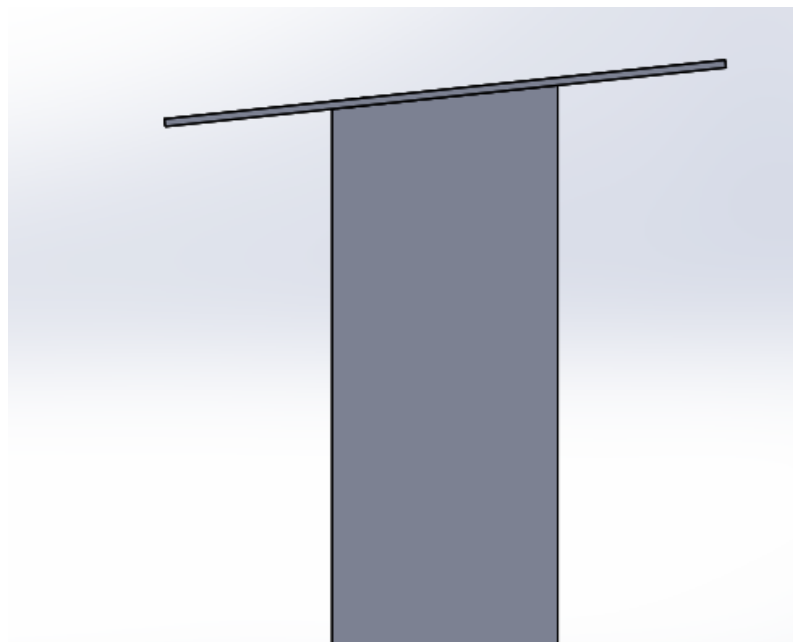
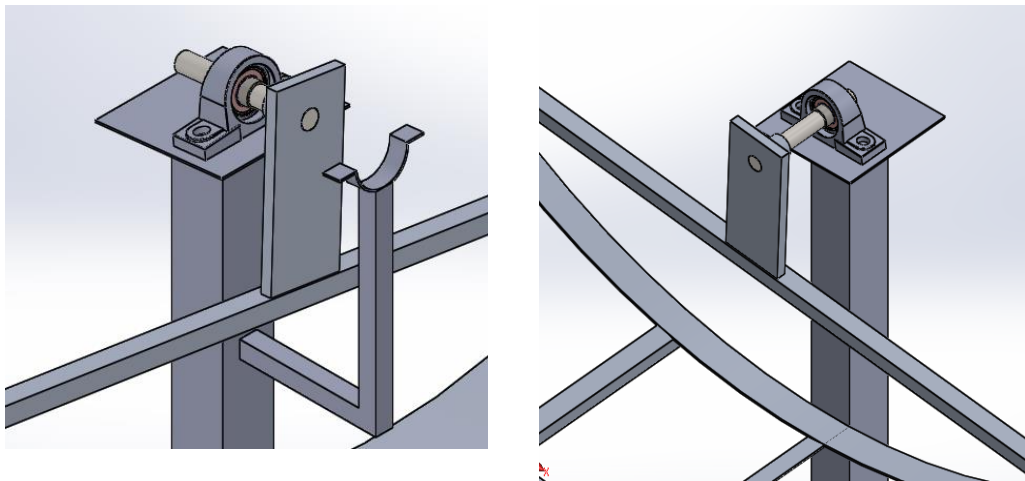
**Figura 47 Columna sur del CCP**



Figura 48 Columnas norte y sur del CCP

En ambas bases se colocarán las chumaceras en donde se encontrarán los ejes que sostienen la base reflectora. Ver figura 49.



(a) Columna norte

(b) Columna sur

Figura 49 Chumaceras en cada columna del CCP

Una vez diseñado la estructura del colector, se procede a realizar los cálculos de esfuerzo y deflexión, tomando en cuenta las especificaciones detalladas en la tabla 16.

Tabla 16.
Materiales de construcción del CCP

Materiales a utilizar		
Características mecánicas	Acero ASTM A36	Aluminio 6061
Resistencia a la tracción	250 MPa	205 MPa
Módulo de Young	200000 MPa	70000 MPa
Resistencia a la compresión	250 MPa	110 MPa

El esfuerzo permisible del acero y se obtienen mediante la ecuación siguiente:

$$\sigma_{perm} = 0,40 \times S_y \quad (41)$$

Donde:

σ_{perm} , Esfuerzo permisible del acero sometido a corte

S_y , Resistencia a la tensión del material

Se reemplazan los valores en la ecuación (45) y se obtiene:

$$\sigma_{perm} = 0,40 \times 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{perm} = 100 \text{ MPa}$$

La deflexión máxima que puede tener el material viene dada por la ecuación:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{Pl^3}{3 \times EI} \quad (42)$$

En donde:

$\delta_{m\acute{a}x}$, Deflexión máxima permisible del material

P , Fuerza aplicada (49 [N])

l , Longitud del eje (150 mm)

E , Módulo de Young del material

I , Momento de inercia del eje

$$I = \frac{\pi \times D^4}{64}$$

Donde:

D , Diámetro del eje (0,0127 m)

$$I = \frac{\pi \times 0,0127^4}{64} = 1,276 \times 10^{-9} m^4$$

Por lo tanto se tiene que:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{98 \text{ N} \times (0,15 \text{ m})^3}{3 \times 200000 \text{ MPa} \times (1,276 \times 10^{-9} \text{ m}^4)}$$

$$\delta_{m\acute{a}x} = 0,432 \text{ mm}$$

Para el análisis se utiliza Software ANSYS, primero se exporta el diseño de SolidWorks con extensión Parasolid.x_t, como se muestra en la figura 50.

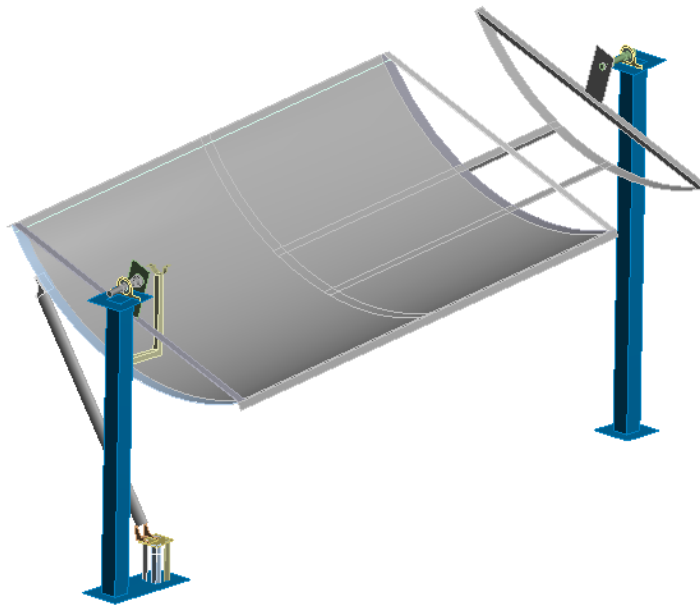


Figura 50 Ensamble exportado a ANSYS

Una vez exportado se asigna el material a cada uno de los elementos que conforman el CCP, se los detalla en la figura 51.

Outline of Schematic D2, E2: Engineering Data				
	A	B	C	D
1	Contents of Engineering Data		source	Description
2	Material			
3	Aluminum Alloy	<input type="checkbox"/>		General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel	<input type="checkbox"/>		Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1

Figura 51 Materiales asignados en ANSYS

El siguiente paso es realizar el mallado del ensamble (ver figura 52).

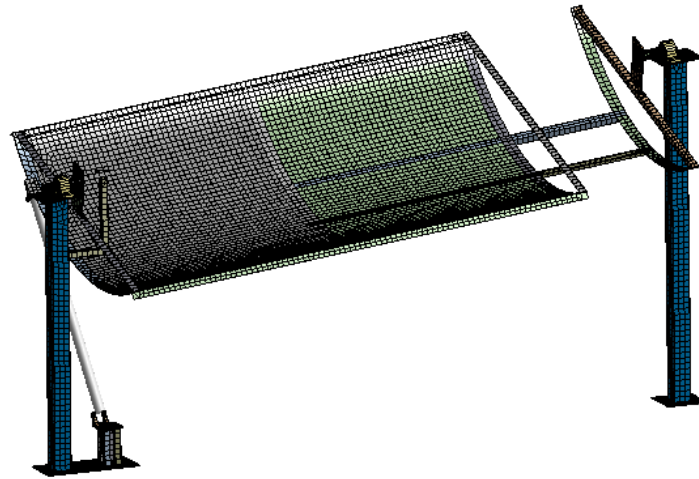


Figura 52 Mallado del ensamblaje

Para determinar la calidad de malla, el software ANSYS nos proporciona un parámetro para el mallado bajo el criterio de Skewness, el cual toma valores desde 0 a 1. Este parámetro debe estar entre los rangos de “Excelente” hasta “Aceptable”, como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17.
Espectro Skewness para calidad de malla

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Fuente: (Ansys, 2014)

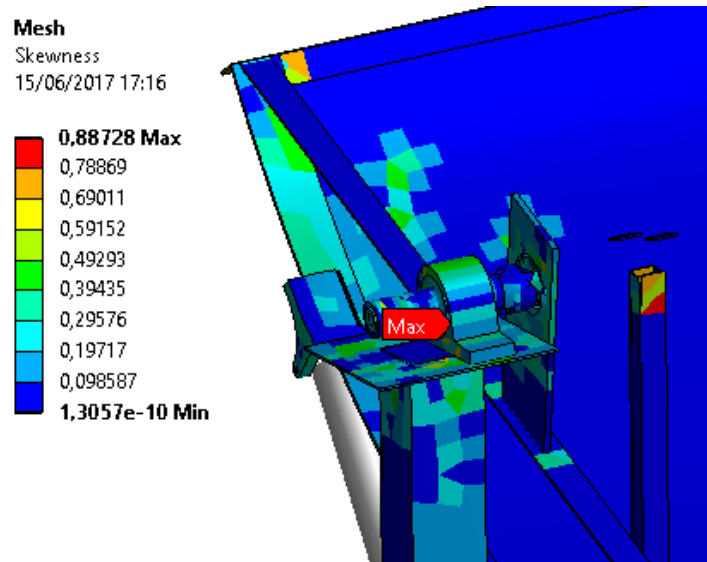


Figura 53 Valores Skewness del proyecto

Como se puede observar en la figura 53, el mallado del presente proyecto tiene un valor máximo de Skewness de 0,88728, obteniendo así una calidad de malla “Aceptable”.

Luego se colocan los puntos de fijación en el ensamble, ver figura 54.

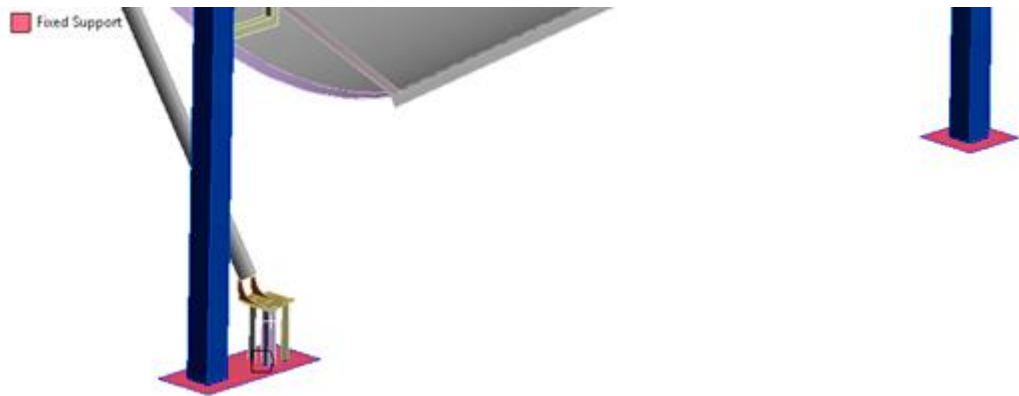


Figura 54 Puntos de fijación para simulación

Se aplican las cargas que estarán actuando sobre la estructura, en este caso la carga que se encontrará será el peso del colector, por lo que se activa la gravedad para la simulación, ver la figura 55.

D: Diseño 2

Standard Earth Gravity

Time: 1, s

15/06/2017 17:42

Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s²
Components: 0,-9806,6;0, mm/s²

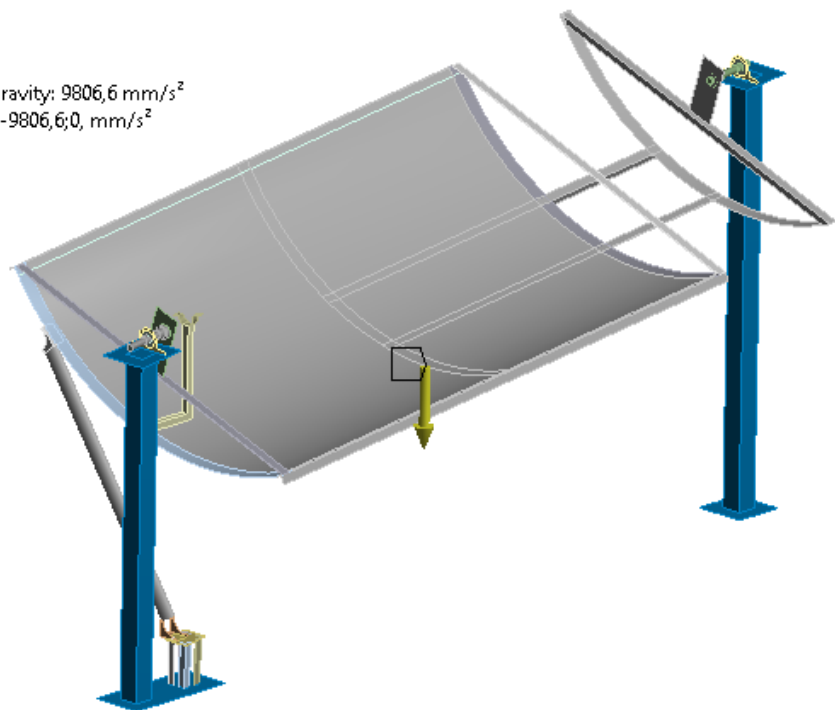


Figura 55 Gravedad representada en el sistema

Ahora se procede a realizar la simulación, obteniendo los siguientes resultados.

D: Diseño 2
 Equivalent Stress
 Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
 Unit: MPa
 Time: 1
 15/06/2017 17:51

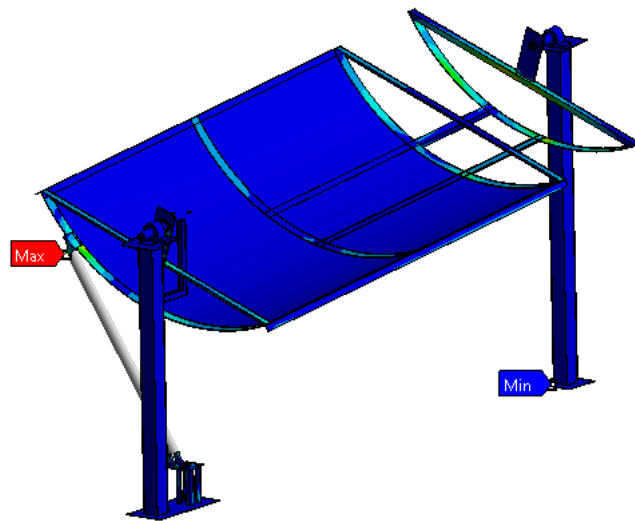
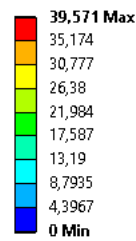


Figura 56 Análisis de esfuerzo

Con este análisis se determinó que el esfuerzo máximo que soportará la estructura es de $39,571 \text{ MPa}$, ver figura 56.

Analizando uno de los puntos críticos de la estructura se tiene en los ejes el esfuerzo máximo a soportar es de $3,2209 \text{ MPa}$ y se produce en el eje de la columna norte, como muestra la figura 57, por otra parte en el eje de la columna sur se tiene que el esfuerzo máximo de $2,0113 \text{ MPa}$, ver figura 58.

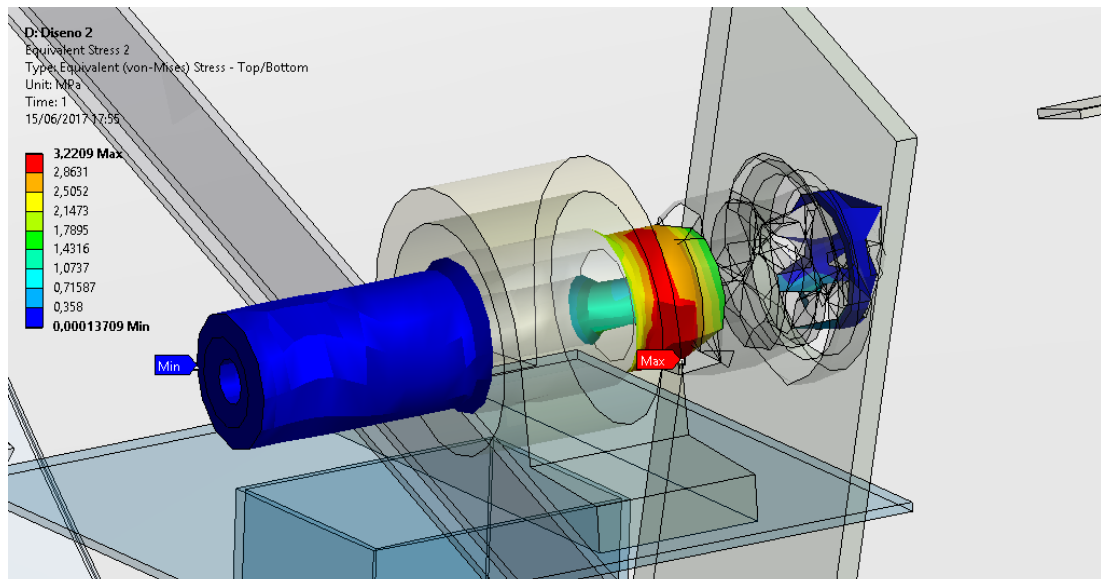


Figura 57 Esfuerzo soportado por el eje de la columna norte

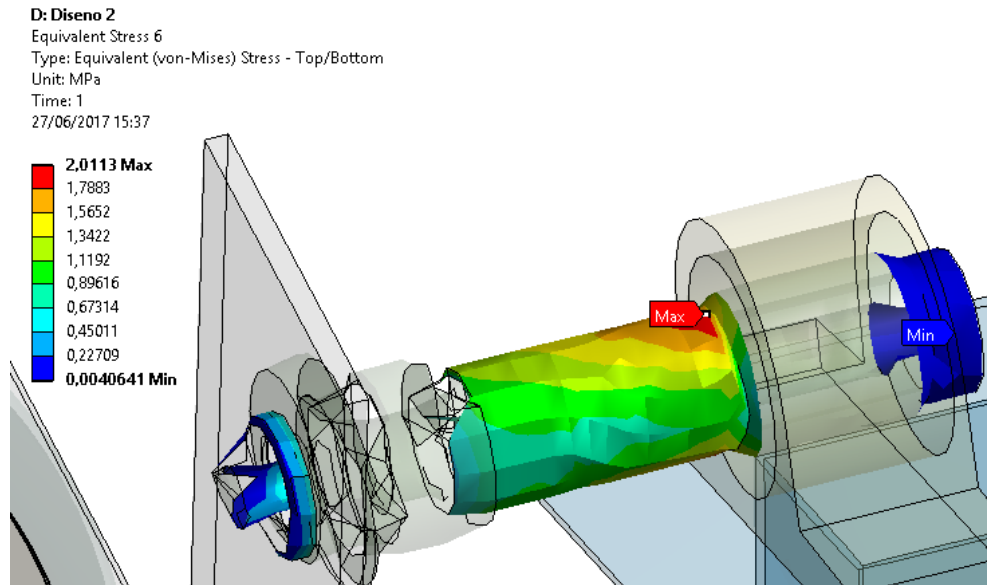


Figura 58 Esfuerzo soportado por el eje de la columna sur

Para determinar que el diseño es válido se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{simulado} < \sigma_{perm}$$

Teniendo que el máximo valor de esfuerzo que se obtiene en la simulación en los ejes es de 3,2299 MPa y el esfuerzo máximo permisible del acero es de 165 MPa, se tiene que la condición de esfuerzo se cumple.

$$3,2299 \text{ MPa} < 165 \text{ MPa}$$

En estos puntos críticos se analiza la deflexión que tendrán los ejes por el peso que tiene la base reflectora.

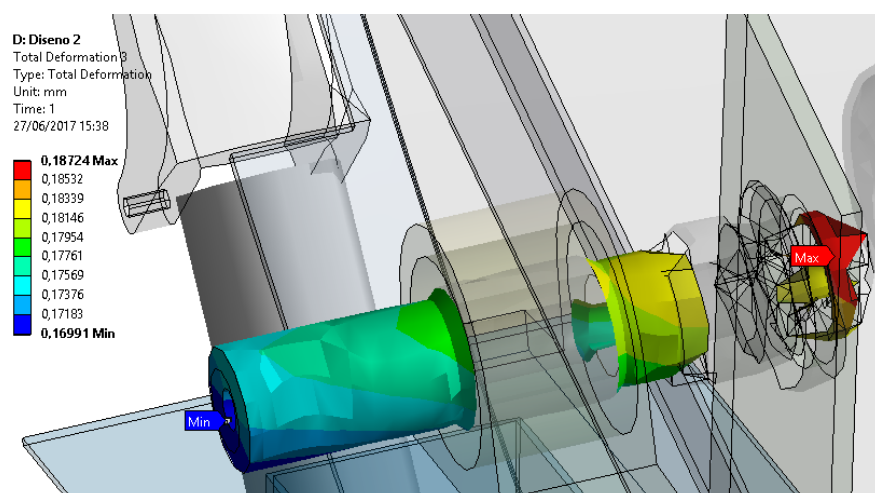


Figura 59 Deflexión eje de la columna norte

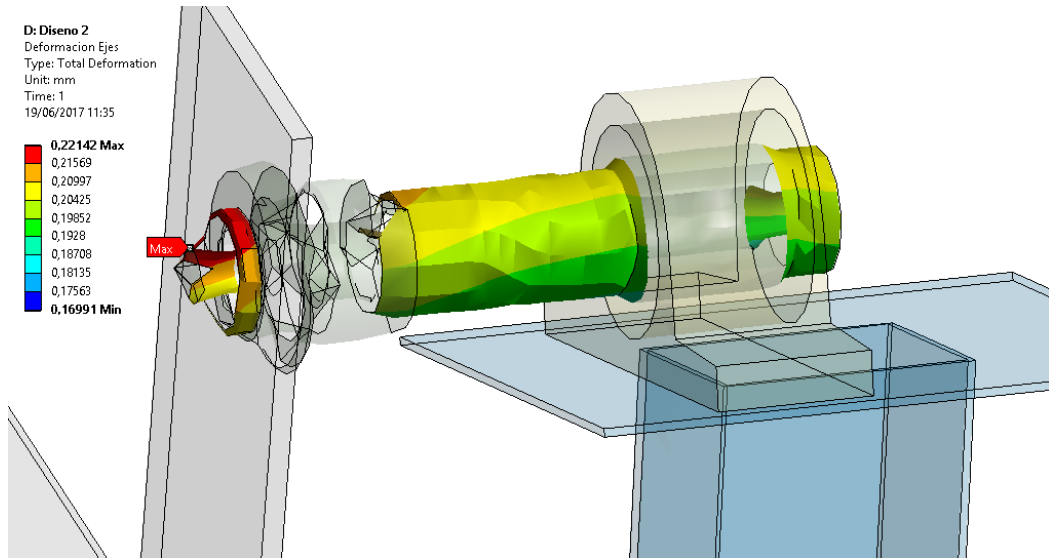


Figura 60 Deflexión eje de la columna sur

Como se puede observar en la figura 60 la deflexión es mayor, y toma un valor de 0,22142 mm. En el eje figura 59 se puede observar que la deflexión máxima que se tendrá está en el rango de 0,18724 mm.

Otra condición que debe cumplir el diseño para que sea válido es:

$$\delta_{simulado} < \delta_{m\acute{a}x}$$

Como la deformación máxima permisible del material es de 0,432 mm, y la deformación que se obtiene en la simulación es de máximo 0,22142 mm, cumple la condición.

$$0,22142 \text{ mm} < 0,432 \text{ mm}$$

Al cumplirse las condiciones, tanto de esfuerzo como deflexión, se puede determinar que el diseño es satisfactorio, pues que los valores obtenidos, mediante la simulación en el software ANSYS, no superan a los valores calculados.

La construcción del CCP se puede ver en la figura 61, esto se realizó mediante los planos generados en SolidWorks que se los encuentra en el anexo C.



(a) Columna norte



(b) Columna sur

(c) Base reflectora colocada
Figura 61 CCP construido

4.4. Mecanismo de seguimiento solar

De acuerdo al capítulo II se tienen diferentes tipos de mecanismos de seguimiento solar, en este punto se analizará cada uno a detalle para conocer cuál será el más recomendable para su implementación.

El seguidor solar en un eje se basa en dos sensores de luz visible, direccionados uno al este y el otro al oeste, que mediante la diferencia de luminosidad entre ellos se determina el sentido del giro que debe realizar el sistema de seguimiento para mantener a la base reflectora perpendicular al sol. Cabe resaltar que este sistema puede provocar fallos cuando el día se encuentre nublado, y puede haber errores de posición, ya que el sensor hará que la base reflectora se oriente a donde exista mayor radiación.

El sistema de reloj solar se basa en un reloj-calendario en tiempo real lo que conlleva a realizar cálculos matemáticos para determinar la posición del sol en cada momento. Por lo que, con este sistema se debe agregar un reloj de tiempo real para realizar el cálculo de la posición del sol, así como también la ubicación geográfica del lugar donde se ubica el sistema. Teniendo en cuenta estas variables se dispone a realizar el control de los actuadores mecánicos, que según la hora del día deberán posicionarse de manera que reciban directamente la luz solar. Este sistema estará actuando siempre, de manera que el consumo de energía será elevado y el reloj a programar deberá tener mantenimientos frecuentes para que este sea exacto.

Una vez analizados estos dos sistemas de llegó a la conclusión de que la mejor alternativa a implementar será la del seguidor solar, ya que este sistema permite el ahorro energético y cuando exista nubosidad este buscará la mejor ubicación para obtener la mayor radiación posible y el seguimiento se lo hará de este a oeste.

4.4.1. Estudio mecánico

En este punto se analiza la fuerza mínima que debe ejercer el actuador para poder realizar el seguimiento solar.

Teniendo la base reflectora de la figura 43, se realiza un diagrama de cuerpo libre (DCL) para determinar las fuerzas que van a actuar sobre la misma, (ver figura 62).

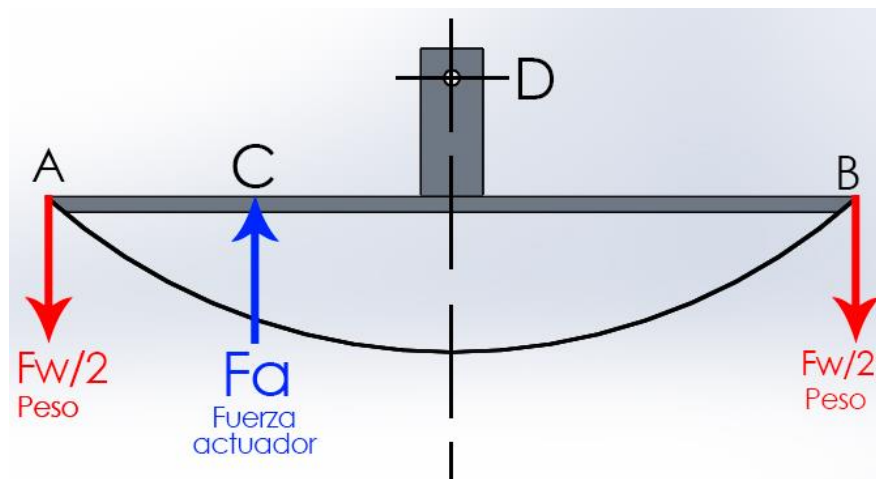


Figura 62 DCL de la base reflectora

Se tiene como eje de giro al punto D, que se encuentra en el foco de la parábola, el cual se ubica en el centro del lado recto, logrando así estar en equilibrio. Por lo tanto, la fuerza necesaria para mover la base reflectora del CCP se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$F_w = m \times g$$

$$F_w = 10kg \times 9,8 \frac{m}{s^2}$$

$$F_w = 98 [N]$$

$$\sum F_y = 0$$

$$F_a - F_w/2 - F_w/2 = 0$$

$$F_a = F_w$$

$$F_a = 98[N]$$

Por lo tanto, la fuerza mínima que deberá ejercer el actuador será de 98 [N]. Para calcular el torque (τ_x), se toma como punto de acción de la fuerza del actuador al punto C, que es el punto medio entre el punto A y el punto D, dando como resultado:

$$\overline{AB} = 1,02 m$$

$$\overline{AC} = \frac{\overline{AB}}{4}$$

$$\overline{AC} = 0,255 m$$

$$\tau_x = F_a \times \overline{AC}$$

$$\tau_x = 98 [N] \times 0,255[m]$$

$$\tau_x = 24,99 [Nm]$$

A partir de los cálculos realizados se determina que se necesita un actuador capaz de ejercer una fuerza de mínimo 98 [N].

4.4.2. Selección del mecanismo

El mecanismo de seguimiento solar a utilizar en el proyecto es de marca EcoWorthy (figura 63), este se basa en un actuador lineal (figura 64), que funciona por medio de un motor DC que transmite su movimiento al eje de aluminio sólido (figura 65) por medio engranajes de metal, capaz de ejercer una fuerza de hasta 1500 [N], y se conecta a un controlador que mediante dos celdas fotovoltaicas, colocadas en forma de paraguas y orientadas una al este y otra al oeste (figura 66), captan la radiación solar generando así un valor de voltaje en cada una de las celdas, según la diferencia de voltaje que existe entre ellas se produce el sentido de giro del motor para regular la posición del eje así logrando posicionar el colector lo más perpendicularmente posible a la radiación directa del sol.



Figura 63 Sistema de seguimiento solar

Fuente: (EcoWorthy, 2015)

En la tabla 18 se detallan las especificaciones técnicas del mecanismo a utilizar en el proyecto.

Tabla 18.
Especificaciones del seguidor solar

Especificaciones	
Voltaje de operación	12 V
Capacidad de carga	1500N
Velocidad	5,7mm/s
Longitud de carrera	14" (355mm)
Distancia mínima de instalación	18,5" (470mm)
Ciclo de trabajo	25%
Clase de protección	Caja del controlador: IP65 Actuador: IP54
Corriente sin carga	<1 A
Corriente a plena carga	5 A
Dimensiones caja del controlador	115mm x 80mm x 35mm

Fuente: (EcoWorthy, 2015)



Figura 64 Actuador lineal

Fuente: (EcoWorthy, 2015)



Figura 65 Motor del seguidor solar

Fuente: (EcoWorthy, 2015)



Figura 66 Celdas fotovoltaicas del seguidor solar

Fuente: (EcoWorthy, 2015)

4.4.3. Descripción del algoritmo de control

El control se lo realiza mediante la comparación de los voltajes generados entre las celdas de silicio, esta diferencia se compara dentro de un circuito integrado IC 15F2K32S2, cada 10 segundos en horas de sol útil y cada 15 minutos cuando el voltaje generado por las celdas es menor a 1,5 voltios, el cual activa o desactiva dos relés que están conectados como muestra en la figura 67 y los cuales hacen que se invierta el sentido de giro del motor dependiendo de la variación de voltaje.

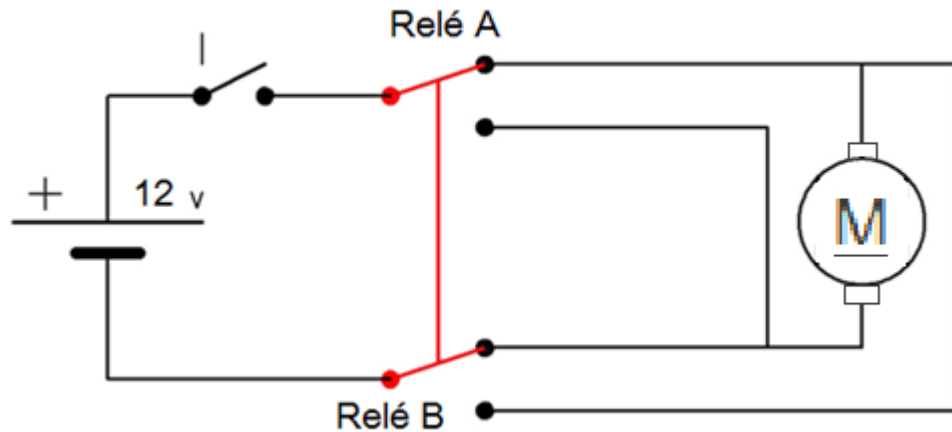


Figura 67 Circuito de conexión de los relés del controlador

Cuando el sol se posiciona al este la celda fotovoltaica *East* recibe la mayor radiación haciendo que el motor tienda a girar en sentido anti horario haciendo que el eje ingrese en el cilindro, teniendo así la mínima extensión al amanecer; cuando el sol se encuentra en el oeste la celda fotovoltaica *West* genera mayor voltaje lo que ocasiona que el controlador invierta el sentido de giro del motor, haciendo que este vaya en sentido horario, así en horas de la tarde el eje alcanza su máxima extensión.

La caja en donde se encuentra el circuito de control posee una pantalla LCD (figura 68) en donde se visualizan los parámetros de: tiempo restante de comparación (Tx), la diferencia de voltaje entre las celdas (G). Además, el controlador posee la opción de ser controlado manualmente, mediante mando remoto (figura 69).



Figura 68 Caja del controlador del seguidor solar

Fuente: (EcoWorthy, 2015)



Figura 69 Control remoto del seguidor solar

Fuente: (EcoWorthy, 2015)

4.5. Implementación del mecanismo de seguimiento solar

El mecanismo de seguimiento solar dado por un actuador o pistón eléctrico se colocó en uno de los soportes de la lámina brillante o canal parabólico antes de colocar el seguidor se analizó la altura desde el piso a la que se colocara la base del actuador que será de 14,6 (cm) y la ubicación a lo largo del perfil parabólico donde estará empernado el pistón cuyas dimensiones se puede visualizar en la siguiente figura 70, estos parámetros darán los grados de inclinación que tendrá el colector respecto al sol cuando el actuador este contraído que será de -45° (figura 71a) y cuando este extendido en su totalidad donde será de 45° (figura 71b).

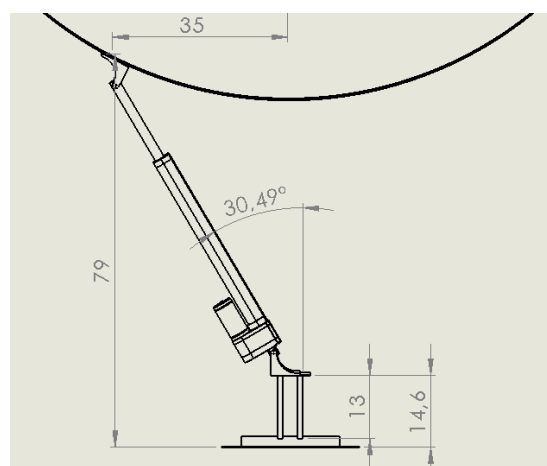
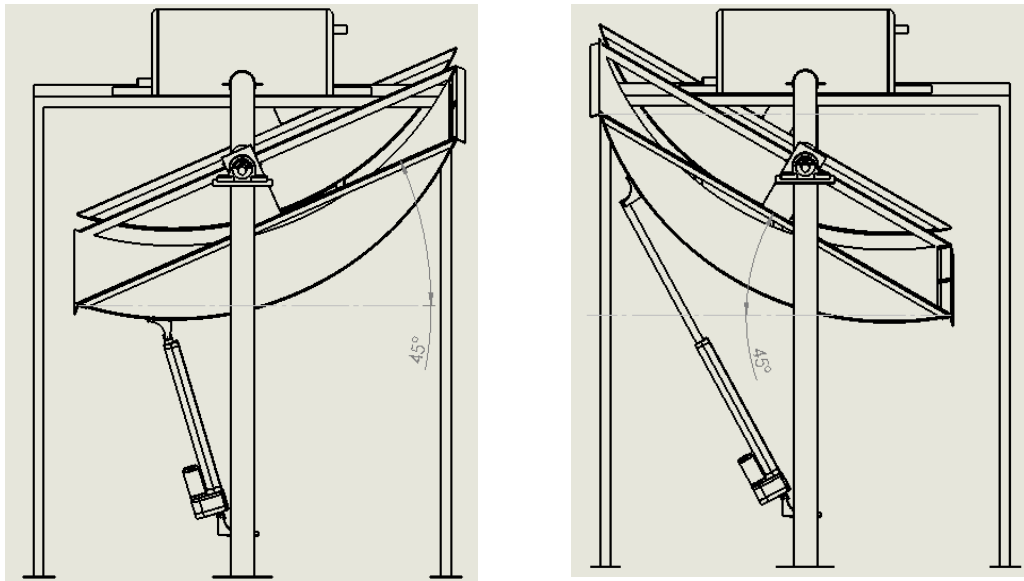


Figura 70 Dimensiones para la ubicación del actuador



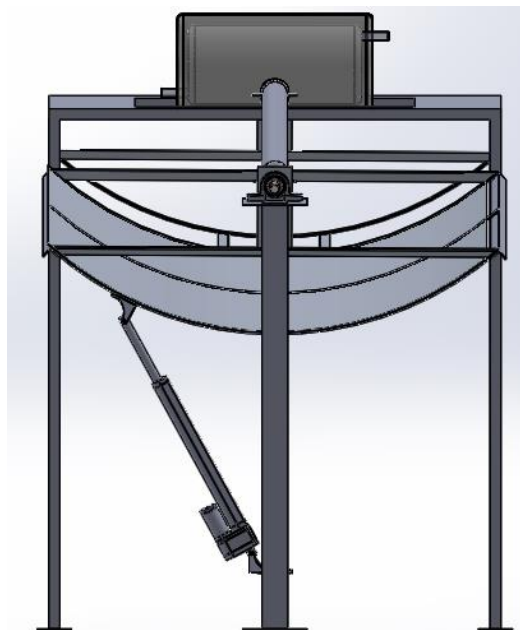
(a) Este

(b) Oeste

Figura 71 Ángulo de inclinación del CCP

La implementación del mecanismo se realizó a partir del análisis dado en el punto 4.1.2 donde se analiza el ángulo de incidencia solar y la radiación solar útil, a partir de esto se determinó que la radiación solar útil en el lugar de ubicación del seguidor sea desde las 9am con un ángulo de inclinación del colector de -45° y hasta las 3pm que tendrá una inclinación de 45° .

En la figura 72 se puede visualizar la implementación final del mecanismo de seguimiento en el medio día.

**Figura 72 Implementación del mecanismo de seguimiento**

Un elemento fundamental para el control del mecanismo de seguimiento es el sensor o celdas fotovoltaicas que son las encargadas de enviar la señal de ubicación del sol para producir el movimiento del actuador para ello es necesario que se coloquen en un lugar sin interferencias y sobre el colector para que el sensor se mueva al igual que este, para ello se ubicó las celdas fotovoltaicas en uno de los extremos de la estructura de la base reflectora tal como se muestra en la figura 73.

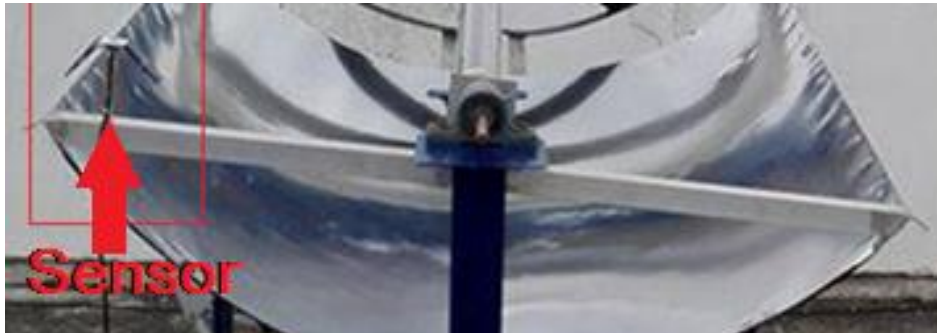


Figura 73 Ubicación del sensor de seguimiento

En la figura 74 se puede observar la implementación final del actuador lineal en el CCP.



Figura 74 Implementación final del actuador lineal

4.6. Análisis de sistemas de calentamiento de agua

En este punto se pretende analizar el funcionamiento de los sistemas de calentamiento de agua utilizando un intercambiador de calor, con fluido de trabajo: agua, aceite térmico y el uso de Heat Pipe.

Tabla 19.
Análisis de sistema de calentamiento de agua

Fluido de trabajo	Material del tubo absorbedor	Transferencia de calor	de	Circulación
Agua	Tubo de cobre	Intercambiador calor	de	Bomba
Aceite Térmico	Tubo de cobre	Intercambiador calor	de	Bomba
Heat Pipe	Tubo de cobre cubierto de tubo de vidrio al vacío	Ampolla térmica		Gravedad

De acuerdo a la tabla 19, podemos determinar que el sistema de calentamiento que utiliza Heat Pipe como absorbedor de calor es el más adecuado para la implementación en el proyecto, ya que todos los componentes están disponibles en el mercado y se ajusta de mejor manera al presupuesto al no tener que usar una bomba para la recirculación del fluido, sea agua o aceite térmico, ayudando además a la reducción de consumo energético del sistema.

Además el uso de tubo de vacío hace que se eviten las pérdidas por conducción y convección, y solamente teniendo pérdidas por radiación ya que esta energía se puede transmitir en el vacío. Con esto al tener menos pérdidas se tendrá más calor para calentar el fluido incrementado así el rendimiento.

4.6.1. Análisis de obtención de agua caliente mediante Heat Pipe

El Heat Pipe es un tubo sellado que utiliza el calor latente de vaporización de un líquido para absorción y transferencia de energía térmica de un lugar a

otro. Este no necesita de una fuerza impulsora externa, únicamente la propia energía térmica que trasfiere, ya que la radiación solar incide sobre la capa de absorción del tubo de vacío y es transmitida a un tubo superconductor de cobre, que es el tubo de calor, el cual contiene una pequeña cantidad de fluido, con punto de ebullición muy bajo, el cual al evaporarse se desplaza a la parte superior del tubo superconductor hasta el condensador del Heat Pipe donde se sitúa el foco frío donde cede calor y se condensa volviendo a caer al fondo del tubo por gravedad, así repitiendo el ciclo durante las horas de sol útil, ver figura 75.

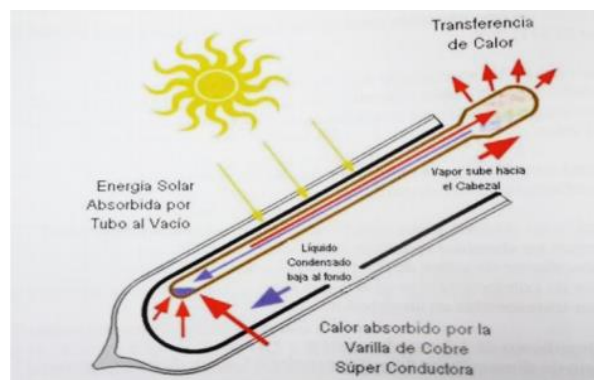


Figura 75 Principio de funcionamiento del Heat Pipe

Fuente: (Madrid, 2009)

El intercambio de calor se realiza sin contacto directo entre el condensador del Heat Pipe y el fluido a calentar, por lo que es necesario que este ingrese dentro de un termopozo, el cual estará dentro de un tanque de almacenamiento, y es el que tendrá contacto con el fluido a calentar, ver figura 76.

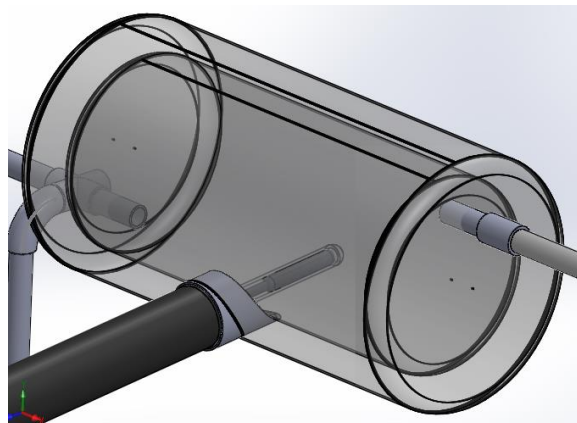


Figura 76 Tubo de calor dentro del termopozo

4.7. Diseño del sistema de obtención de agua caliente

De acuerdo al análisis anterior se llega a la conclusión que el sistema para la obtención de agua caliente para este proyecto se lo hará utilizando Heat Pipe como fuente de calor, ya que al utilizar un tubo de vacío como absorbedor de radiación la eficiencia del sistema es mucho mayor que al tener un tubo de cobre en el foco del reflector, ya que al realizar un sistema de intercambiador de calor, es necesario que se utilice una bomba de recirculación de fluido de trabajo, que puede ser aceite térmico o agua, lo cual implica costos mayores de implementación y mantenimiento.

4.7.1. Diseño conceptual (casa de la calidad)

Requisitos del cliente

- Resistente
- Duradero
- Bajo costo
- Agua caliente para uso sanitario
- Fácil mantenimiento
- Ajuste preciso entre el tubo de calor y tanque

Requisitos técnicos

- Resistente a la corrosión
- Dimensión
- Capacidad
- Tolerancia de construcción
- Nivel de aislamiento térmico

Con estos datos se realiza la casa de la calidad representada en la figura 77 y con la cual se obtienen las siguientes conclusiones.

Conclusión de la casa de la calidad

- Resistente a la corrosión: El tanque deben resistir al almacenamiento de agua y permanecer al aire libre durante toda su vida útil.

- Dimensión: El tanque deben ser de dimensiones acorde al tamaño del Heat Pipe y al espacio disponible para su instalación.
- Capacidad: El tanque tendrá una capacidad entre 10 a 12 litros.
- Tolerancia de construcción: Deben estar hasta $\pm 0,05\text{mm}$ en la construcción del sistema para que exista el contacto adecuado entre el condensador del Heat Pipe y el termopozo del tanque.
- Nivel de aislamiento térmico: Tener la capacidad de mantener el agua caliente.

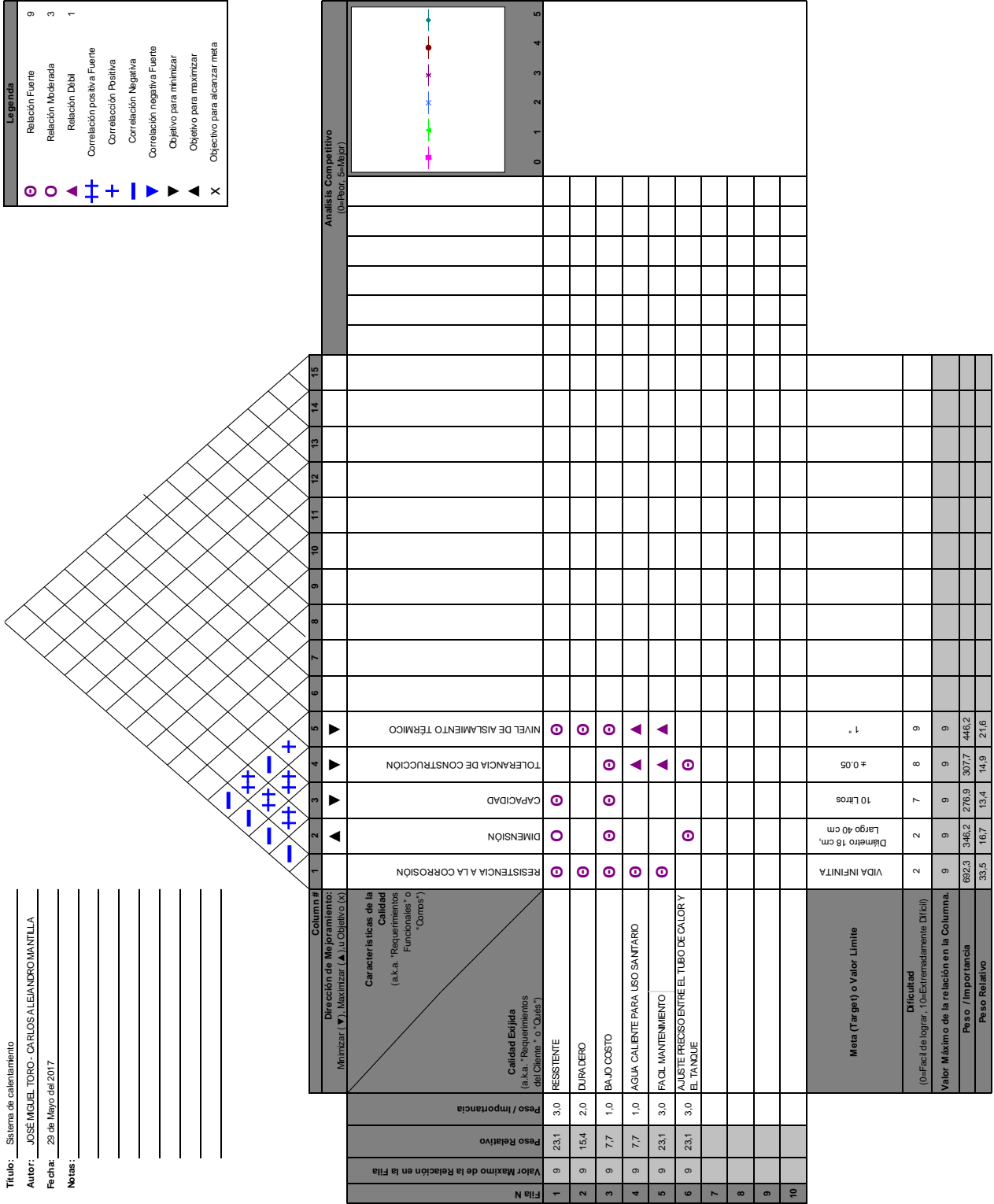


Figura 77 Casa de la calidad del sistema de calentamiento

4.7.2. Análisis de la temperatura del agua en el lugar de instalación

Para este análisis se midió la temperatura del agua en el lugar de instalación del CCP, en la terraza del edificio bloque C de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

Para obtener la temperatura se tomaron diez muestras diarias, durante diez días. Estos valores se detallan en la tabla 20:

Tabla 20.
Características del agua en el lugar de instalación

Características del agua en el lugar de instalación	
Temperatura (°C)	Fecha – Hora
15,3	10/04/2017
16,6	11/04/2017
16,4	12/04/2017
14,5	13/04/2017
15,6	14/04/2017
15,8	17/04/2017
14,8	18/04/2017
15,6	19/04/2017
16,2	20/04/2017
15,7	21/04/2017

Dados estos valores se obtiene que la temperatura promedio en el lugar de instalación es de: 15,65°C

4.7.3. Diseño del sistema

a. Tubo de vacío

El tubo de vacío adquirido es de la marca Thermosol, y su aplicación es absorber la radiación solar captada por el colector y presenta los datos técnicos descritos en la tabla 21:

Tabla 21.
Características técnicas tubo de vacío

Descripción	Valor
Modelo	58/1800
Material	Vidrio borosilicato 3.3
Diámetro Exterior	58 mm
Diámetro Interior	47 mm
Longitud del tubo	1.8mts (1800mm.)
Espesor del vacío	2,1 mm.
Espesor del vidrio exterior	1,8 mm.
Espesor del vidrio interior	1,6 mm
Material absorbente	Aluminio
Acabado	Aluminio nitrado
Coeficiente de absorción	0.94
Resistencia contra viento	30 m/s
Toleración de congelación	-30°C
Resistencia en caso de granizo	25 mm. granizo
Temperatura de insolación	250°C

Fuente: (Thermosol, 2017)

b. Tubo de calor

Es un tubo de calor de cobre de alta pureza, sellado al vacío, que contiene una pequeña cantidad de líquido volátil que puede ser agua o mezclas de agua y glicol u otros fluidos de trabajo. El objetivo del vacío es conseguir que el punto de ebullición del líquido descienda a temperaturas cercanas a 30°C.

El tubo de cobre que se utiliza para el presente proyecto presenta las características técnicas de la tabla 22:

Tabla 22.
Especificaciones del tubo de calor

Especificaciones	
Dimensiones del tubo	Longitud:1800 mm Diámetro:8mm
Dimensiones del intercambiador condensador	o Longitud:70 mm Diámetro:13.8 mm
Fluido de trabajo	Acetona

Para aprovechar de mejor manera el Heat Pipe y de acuerdo a recomendaciones del fabricante se debe instalar con una inclinación mínima de 5° para que pueda trabajar sin afectar su rendimiento.

c. Tanque de almacenamiento

Para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento es necesario calcular el calor que recibirá el tubo absorbedor proveniente de la superficie reflectora del CCP, para esto se realizó un prototipo del sistema a implementar para la obtención de datos, ver figura 78, los valores de temperaturas obtenidos se detallan en la tabla 23, así como también los datos necesarios para el dimensionamiento del tanque.



Figura 78 Prototipo de pruebas

Tabla 23.
Datos para el dimensionamiento del tanque

Descripción	Valor
Superficie efectiva con seguimiento (S_{ef})	1,5418 m ²
Radiación directa efectiva en el lugar de instalación (I_{ef})	329,51 W/m ²
Declinación con seguimiento solar ($\cos \theta$)	0,8643
Temperatura exterior del tubo de vidrio (T_r)	35°C
Temperatura ambiente (T_∞)	20 °C
Temperatura interior del tubo de vidrio (T_1)	170 °C
Diámetro exterior de la cubierta de vidrio (D_{ev})	0,058 m
Diámetro interior de la cubierta de vidrio (D_{iv})	0,0544 m
Diámetro exterior del tubo de vidrio interno (D_e)	0,047 m
Longitud del tubo de vidrio	1,80 m
Conductividad térmica del vidrio (k)	0,8
Conductividad térmica del aire (ka)	0,0267

$$Q_{inc} = Se \times I_{ef(con,seg)} - Uc \times A_r(T_r - T_\infty)$$

Para encontrar el coeficiente global de pérdidas al exterior (Uc), se debe realizar el siguiente cálculo:

$$\frac{1}{Uc} = \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_a + h_{rad,vacio}}$$

En donde el coeficiente de convección viene dado por:

$$h_{conv} = 5,7 + 3,8 V_v$$

$$h_{conv} = 5,7 + 3,8 (3,1)$$

$$h_{conv} = 17,48 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Para hallar el coeficiente de radiación se realiza el siguiente cálculo

$$h_{rad} = \varepsilon_v \times \sigma \times (T_r + T_{cielo}) \times (T_r^2 + T_{cielo}^2)$$

Donde T_{cielo} se determina mediante la siguiente ecuación:

$$T_{cielo} = 0,0552 \times (T_\infty)^{1,5}$$

$$T_{cielo} = 0,0552 \times (20 + 273)^{1,5}$$

$$T_{cielo} = 276,84 \text{ K}$$

Por lo tanto el coeficiente de radiación es:

$$h_{rad} = 1 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (308 + 276,84)(308^2 + 276,84^2)$$

$$h_{rad} = 5,69 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Se halla el coeficiente de transferencia por conducción de la cubierta de vidrio (R_v):

$$R_v = \frac{2k}{D_{ev} \times \ln\left(\frac{D_{ev}}{D_{iv}}\right)}$$

$$R_v = \frac{2(0,8)}{0,058 \times \ln\left(\frac{0,058}{0,0544}\right)}$$

$$R_v = 430,50 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

El coeficiente de transferencia por conducción del vacío (R_a):

$$R_a = \frac{2ka}{D_{iv} \times \ln\left(\frac{D_{iv}}{D_e}\right)}$$

$$R_a = \frac{2(0,0267)}{0,0544 \times \ln\left(\frac{0,0544}{0,047}\right)}$$

$$R_a = 6,71 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

El coeficiente de radiación en el vacío viene dado por:

$$h_{rad,vacío} = \varepsilon_p \times \sigma \times (T_1 + T_r) \times (T_1^2 + T_r^2)$$

$$h_{rad,vacío} = 0,05 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (443 + 308)(443^2 + 308^2)$$

$$h_{rad,vacio} = 0,62 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Por lo tanto se tiene que el coeficiente global de pérdidas al exterior (U_c) es:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{h_{conv} + h_{rad}} + \frac{1}{R_v} + \frac{1}{R_a + h_{rad,vacio}}$$

$$\frac{1}{U_c} = \frac{1}{17,48 + 5,69} + \frac{1}{430,50} + \frac{1}{6,71 + 0,62}$$

$$U_c = 5,497 \text{ W/m}^2\text{K}$$

El área del tubo receptor se obtiene mediante el siguiente cálculo:

$$A_r = \pi \times 0,047 \times 1,80 = 0,265 \text{ m}^2$$

Por lo que el calor incidente sobre el tubo de calor es:

$$Q_{inc} = 1,5418 \times 329,51 - 5,497 \times 0,265 (35 - 20)$$

$$Q_{inc} = 486,19 \text{ W}$$

Con este dato se procede a calcular la masa de agua mínima que se podrá calentar hasta los 60 °C, ya que a partir de esta temperatura las bacterias, como la legionela no sobreviven.

Como el tubo de calor se encuentra dentro de un termopozo para el intercambio de calor en el tanque se toma en cuenta las pérdidas que existe en el mismo, los valores detallados en la tabla 24 se obtuvieron mediante el prototipo inicial de pruebas:

Tabla 24.
Datos del termopozo para el dimensionamiento del tanque

Descripción	Valor
Temperatura de la pared interior - T_1	81 (° C)
Temperatura de la pared exterior - T_2	80 (° C)
Radio interior del termopozo - r_1	0,0069 (m)
Radio externo del termopozo - r_2	0,0084 (m)
Conductividad térmica del acero inoxidable	15 (W/m.K)
Longitud del tubo	0,130 (m)

$$R_1 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \times k_{acero} \times L}$$

$$R_1 = \frac{\ln(0,0084/0,0069)}{2\pi \times 15 \times 0,13} = 0,016 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Con el valor de la resistencia total, se procede a calcular el valor de las pérdidas en el termopozo, en donde:

$$Q_{perdidas} = \frac{T_1 - T_2}{R_T}$$

$$Q_{perdidas} = \frac{81 - 80}{0,016}$$

$$Q_{perdidas} = 62,5 \text{ W}$$

Con esto se tiene que el calor que útil que entrega el colector al agua almacenada en el tanque será

$$Q_{util} = Q_{inc} - Q_{perdidas}$$

$$Q_{util} = 486,19 - 62,5$$

$$Q_{util} = 423,69 \text{ [W]}$$

En donde el calor necesario

$$Q_{nec} = Q_{inc} \times 1h = 423,69 \times 3600$$

$$Q_{nec} = 1525,28 \text{ kJ}$$

$$Q_{nec} = m \times Cp \times (Tf - Ti)$$

$$1525,28 = m \times 4,18 \times (60 - 15,65)$$

$$m = 8,22 \text{ kg}$$

Por lo tanto, en una hora el CCP es capaz de elevar la temperatura del agua desde los 15,65°C hasta 60°C de 8,22 litros de agua, por lo que el tanque a diseñar será cilíndrico y tendrá una capacidad de 10 litros. Para esto se determina el diámetro del tanque, para una longitud de 40 centímetros, mediante los siguientes cálculos:

$$V = \pi \times \frac{D_t^2}{4} \times L_t \quad (43)$$

Siendo:

- V , el volumen del tanque
- D_t , el diámetro del tanque
- L_t , la longitud del tanque

Despejando D de la ecuación (43), obtenemos la siguiente ecuación:

$$D_t = \sqrt{\frac{4 \times V}{\pi \times L_t}} \quad (44)$$

Reemplazando los valores de volumen y longitud requerida para el tanque en la ecuación (44), se obtiene:

$$D_t = \sqrt{\frac{4 \times 10000 [cm^3]}{\pi \times 40 [cm]}} = 17,84 [cm]$$

Con el cálculo realizado se requiere de un diámetro mínimo de 17,84 cm y una longitud de 40 cm para obtener un tanque de 10 litros de capacidad, con un termo pozo de diámetro igual al diámetro del condensador del Heat Pipe.

d. Aislamiento

Para el cálculo del aislamiento que se debe implementar en el tanque se deben conocer los datos de la tabla 25.

Así como también el coeficiente de convección del agua dentro del tanque, así como también el coeficiente de convección del viento al exterior del tanque, para esto se utiliza el valor promedio de la velocidad del viento dado por el software SAM (ver figura 79).

Annual Weather Data Summary					
Global horizontal	5.07	kWh/m ² /day	Average temperature	10.6	°C
Direct normal (beam)	4.13	kWh/m ² /day	Average wind speed	3.1	m/s
Diffuse horizontal	2.30	kWh/m ² /day			

Figura 79 Datos anuales del clima dados por el software SAM

Tabla 25.
Datos para el dimensionamiento del aislamiento

DATOS	
Descripción	Valor
Velocidad del viento - V_v	3,1 m/s
Diámetro interior del tanque - D_1	0,180 m
Diámetro exterior del tanque - D_2	0,1830 m
Conductividad térmica de la lana vidrio - k_1	0,036 (W/m.K)
Conductividad térmica del acero inoxidable - k_2	15 (W/m.K)
Temperatura ambiente - T_∞	20°C
Temperatura superficie del tanque - T_3	30°C
Temperatura del agua - T_i	50°C

$$h_i = 12,705 \times e^{0,0369 \times T_{agua}}$$

$$h_i = 12,705 \times e^{0,0369 \times 50}$$

$$h_i = 80,39 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_{conv} = 5,7 + 3,8 V_v$$

$$h_{conv} = 5,7 + 3,8 (3,1)$$

$$h_{conv} = 17,48 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

Con esto se tiene que el coeficiente de convección del agua dentro del tanque es de $80,39 \text{ W/m}^2\text{°C}$ y el coeficiente de convección del viento sobre el tanque es de $17,48 \text{ W/m}^2\text{°C}$.

Con estos valores podemos encontrar el espesor mínimo de aislamiento que se debe implementar en el tanque, siendo que el material de aislamiento es lana de roca con un coeficiente de conductividad de $0,036 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Para esto se representa el tanque en la figura 80 y se sigue el siguiente procedimiento:

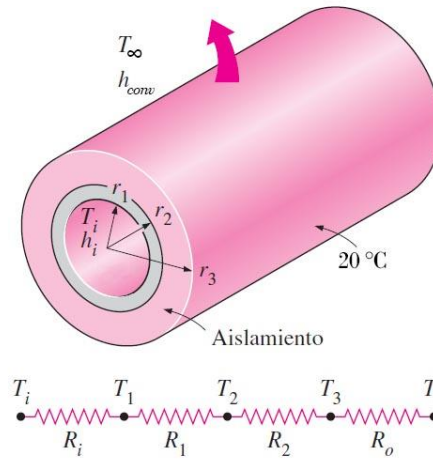


Figura 80 Esquema de resistencias de un tanque aislado

$$A_1 = 2\pi \times r_1 \times L$$

$$A_1 = 2\pi \times 0,09 \times 0,4$$

$$A_1 = 0,2261 \text{ m}^2$$

$$A_3 = 2\pi \times r_3 \times L$$

$$A_3 = 2\pi \times r_3 \times 0,4$$

$$A_3 = 2,51r_3$$

$$R_i = \frac{1}{h_i \times A_1}$$

$$R_i = \frac{1}{80,39 \times 0,2261} = 0,055 \frac{\text{°C}}{\text{m}}$$

$$R_1 = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \times k_2 \times L} = 0,44 \times 10^{-3}$$

$$R_2 = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi \times k_1 \times L} = 11,05 \ln(r_3/0,0915)$$

$$R_o = \frac{1}{h_{conv} \times A_2}$$

$$R_o = \frac{1}{17,48 \times 2,51r_3} = \frac{1}{43,87r_3}$$

$$R_{Total} = R_i + R_1 + R_2 + R_o$$

$$R_{Total} = 0,05544 + 11,05 \ln(r_3/0,0915) + \frac{1}{43,87r_3}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_o}{R_{Total}} = \frac{50 - 20}{0,05544 + 11,05 \ln(r_3/0,0915) + \frac{1}{43,87r_3}}$$

$$\dot{Q} = \frac{30}{0,05544 + 11,05 \ln(r_3/0,0915) + \frac{1}{43,87r_3}}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_3 - T_o}{R_o} = \frac{30 - 20}{\frac{1}{43,87r_3}} = 438,7r_3$$

$$\dot{Q} = \dot{Q}$$

$$\frac{30}{0,05544 + 11,05 \ln(r_3/0,0915) + \frac{1}{43,87r_3}} = 438,7r_3$$

Al igualar las ecuaciones, se tiene la siguiente expresión:

$$1161,69x + 484,76x \ln(x) - 3 = 0$$

Al graficar esta ecuación en el software Geogebra (ver figura 81) se obtiene que el valor de r_3 es:

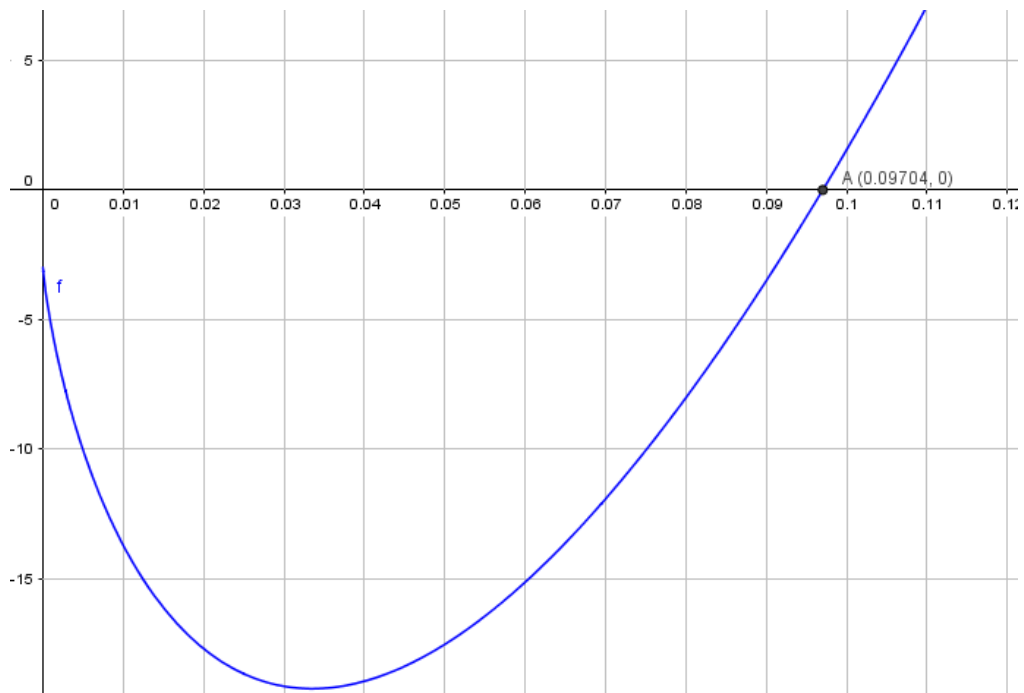


Figura 81 Gráfica radio de aislamiento

$$r_3 = 0,09704 \text{ m}$$

Por lo tanto el espesor mínimo de aislamiento (ξ) es:

$$\xi = r_3 - r_2 = 0,09704 - 0,0915$$

$$\xi = 5,54 \times 10^{-3} \text{ m} = 5,54 \text{ mm}$$

Con esto, se determina que se necesita un espesor mínimo de aislamiento de lana de vidrio de 5,54 milímetros, por lo que para el tanque se implementa un espesor de una pulgada para tener mayor protección.

4.7.4. Descripción del sistema

El sistema consiste en un tanque de acero inoxidable, de un diámetro interior de 18 cm y una longitud de 40 cm como se calculó en el ítem anterior, con un aislamiento de lana de vidrio, que tiene una tubería de entrada de agua fría en la parte inferior de la cara izquierda, y una tubería de salida de agua caliente en la parte superior de la cara derecha, al tanque ingresa el Heat Pipe a través de un termo pozo ubicado en la parte inferior del tanque, el cual es el encargado de permitir la transferencia de calor del Heat Pipe al agua.

El agua ingresa al tanque a la presión y temperatura que tiene en el lugar de instalación del sistema hasta llenar el tanque, una vez lleno empieza el proceso de transferencia de calor. El tanque además contiene un termo-pozo adicional en la parte superior el cual permitirá monitorear la temperatura del agua contenida en el tanque.

4.8. Construcción del sistema para obtener agua caliente

El sistema de calentamiento de agua está conformado por los siguientes elementos:

- Tanque de almacenamiento de agua.
- Heat Pipe (tubo de calor de cobre).
- Mesa soporte del tanque.

4.8.1. Tanque de almacenamiento de agua

Este tanque se diseñó en el software SolidWorks, como se puede ver en la figura 82, de acuerdo a las dimensiones obtenidas en los puntos anteriores.

El tanque presenta las especificaciones técnicas representadas en la tabla 26 y que fueron diseñadas de acuerdo a las necesidades del sistema.

Tabla 26.
Especificaciones del tanque de almacenamiento

Especificaciones técnicas del tanque de almacenamiento	
Material	Acero Inoxidable SA.240-304
Dimensiones del tanque	Longitud interior = 400mm Diámetro interior=180mm Capacidad=10.178L
Entrada de agua	Diámetro= ½" SCH 10Sx65
Salida de agua	Diámetro= ½" SCH 10Sx65
Aislamiento	Lana de vidrio 25,4mm
Cubierta de acero	Longitud=455mm Diámetro=237mm
Termopozo termocupla	Diámetro= ½"
Termopozo heat pipe	Profundidad=130mm Diámetro interior=13.8mm
Peso	8.62Kg

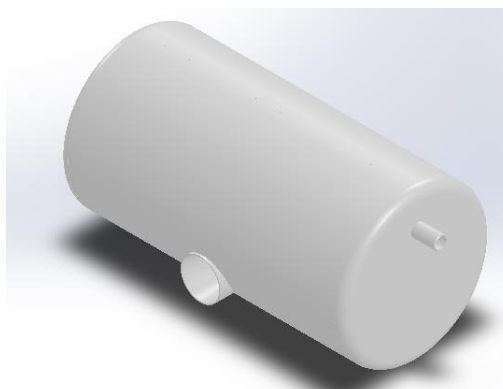


Figura 82 Tanque modelado en SolidWorks

4.8.2. Mesa soporte

Esta mesa servirá para soportar al tanque y al tubo de vacío. La mesa tendrá una abertura (ver figura 83) para que el tanque pueda estar sobre la misma y permita el ingreso del tubo de vacío. Esta tiene una inclinación de 6° en la parte superior, como se muestra en la figura 84, para así lograr que el tubo se encuentre a esta inclinación

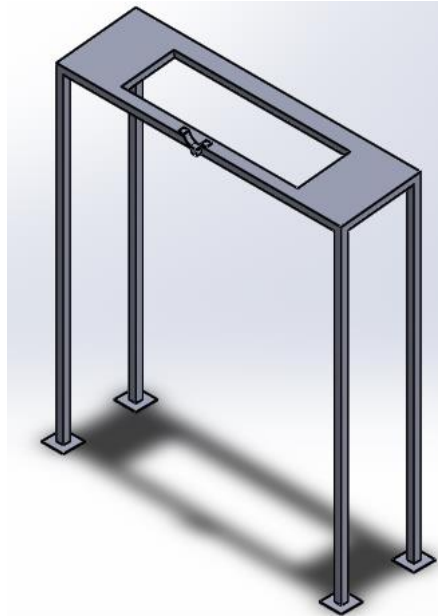


Figura 83 Mesa soporte para el tanque

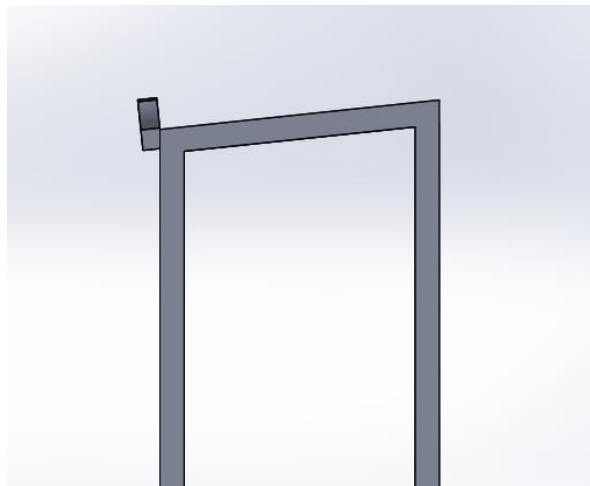


Figura 84 Vista lateral mesa soporte del tanque

Una vez diseñada la mesa se realiza un estudio de esfuerzo y deformación tomando en cuenta los siguientes datos.

- Resistencia a la tensión del material *ASTM A36* = 250 MPa
- Fuerza aplicada a la mesa 196 N

- Longitud de la mesa 1050 mm

El esfuerzo permisible del acero y se obtienen mediante la ecuación siguiente:

$$\sigma_{perm} = 0,66S_y \quad (45)$$

Donde:

σ_{perm} , Esfuerzo permisible del acero sometido a flexión

S_y , Resistencia a la tensión del material

Se reemplazan los valores en la ecuación (45) y se obtiene:

$$\sigma_{perm} = 0,66 \times 250 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{perm} = 165 \text{ MPa}$$

La deflexión máxima que puede tener el material viene dada por la ecuación:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{l}{800} \quad (46)$$

En donde:

$\delta_{m\acute{a}x}$, Deflexión máxima permisible del material

l , Longitud entre los puntos de apoyo de la mesa

Por lo tanto se tiene que:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{1050}{800} = 1,3125 \text{ mm}$$

En el software ANSYS se simularán los esfuerzos a los que estará sometida la mesa cuando se coloque el tanque sobre ella y este se encuentre lleno. Al igual que el estudio realizado en el CCP, se realiza el mallado (figura 85) y se revisa el valor que tiene el Skewness (figura 86).

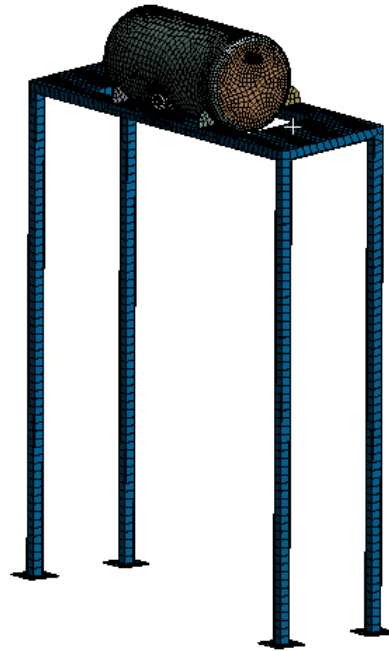


Figura 85 Mallado sobre la mesa

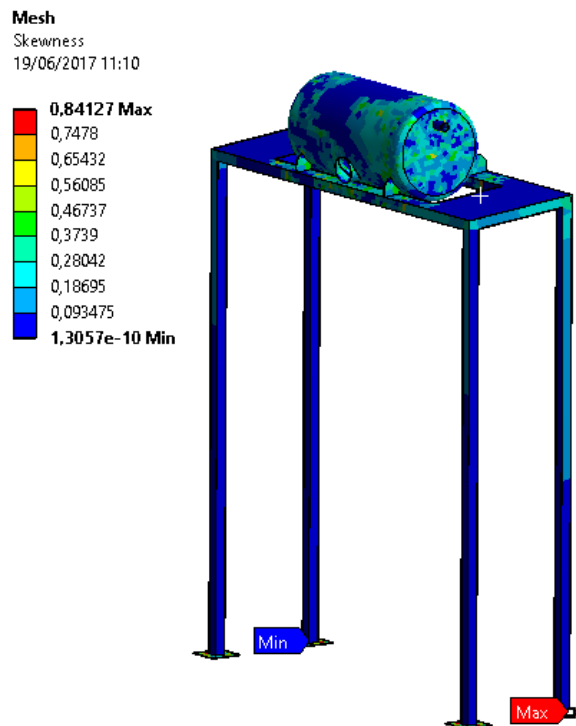


Figura 86 Skewness del mallado sobre la mesa

Como se tiene un valor máximo de Skewness de 0,84122 la calidad del mallado sobre la mesa es aceptable.

Seguido de esto se colocan los puntos de soporte, como se muestra en la figura 87.

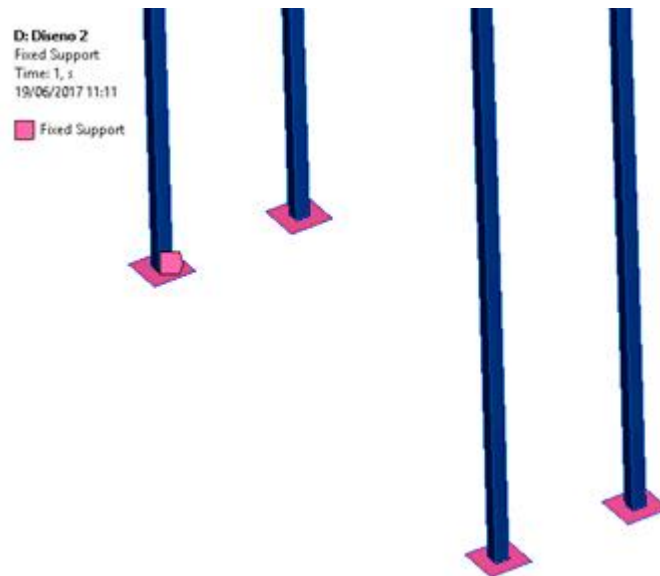


Figura 87 Puntos de soporte de la mesa

Y finalmente se le coloca la fuerza que va a ejercer el tanque cuando está lleno que será de 196 [N], así como se indica en la figura 88.

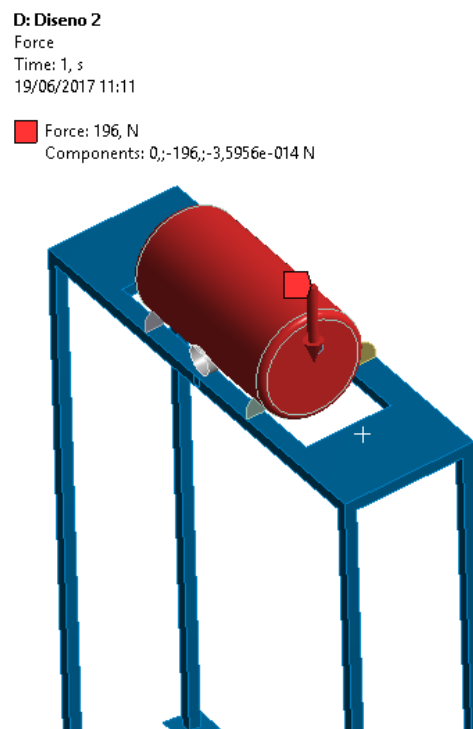


Figura 88 Fuerza colocada sobre el tanque

Una vez colocados estos parámetros se realizan las simulaciones de esfuerzo y deformación, obteniendo los siguientes resultados

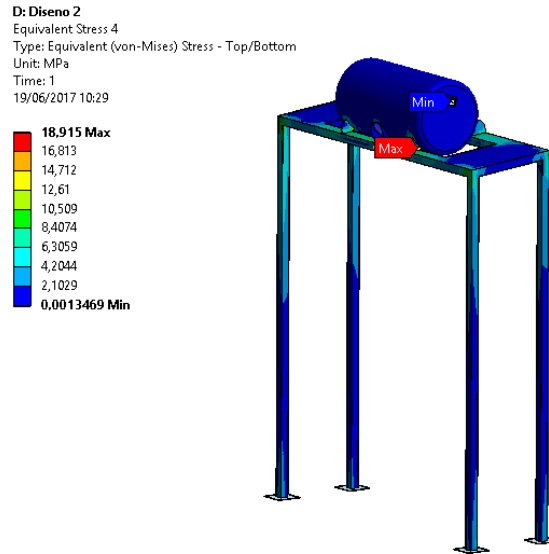


Figura 89 Esfuerzo ejercido por el tanque lleno sobre la mesa

Como se puede observar en la figura 89 el esfuerzo máximo que se tendrá sobre la mesa será de 18,915 MPa, y este ocurre sobre los soportes del tanque con la mesa (ver figura 90). Se puede observar que las patas de la mesa soportarán un esfuerzo en el rango de 2,1029 a 8,4074 MPa debido al peso del tanque lleno.

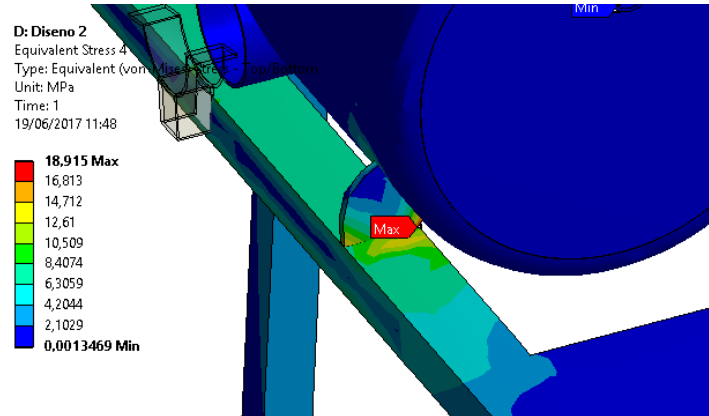


Figura 90 Esfuerzo máximo soportado por la mesa y el tanque

Para determinar que el diseño es válido se debe cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{simulado} < \sigma_{perm}$$

Teniendo que el máximo valor de esfuerzo que se obtiene en la simulación es de 18,915 MPa y el esfuerzo máximo permisible del acero es de 165 MPa, se tiene que la condición de esfuerzo se cumple.

$$18,915 \text{ MPa} < 165 \text{ MPa}$$

La deformación que sufre la mesa, debido al peso del tanque, será de 0,392 mm máximo, como se muestra en la figura 91.

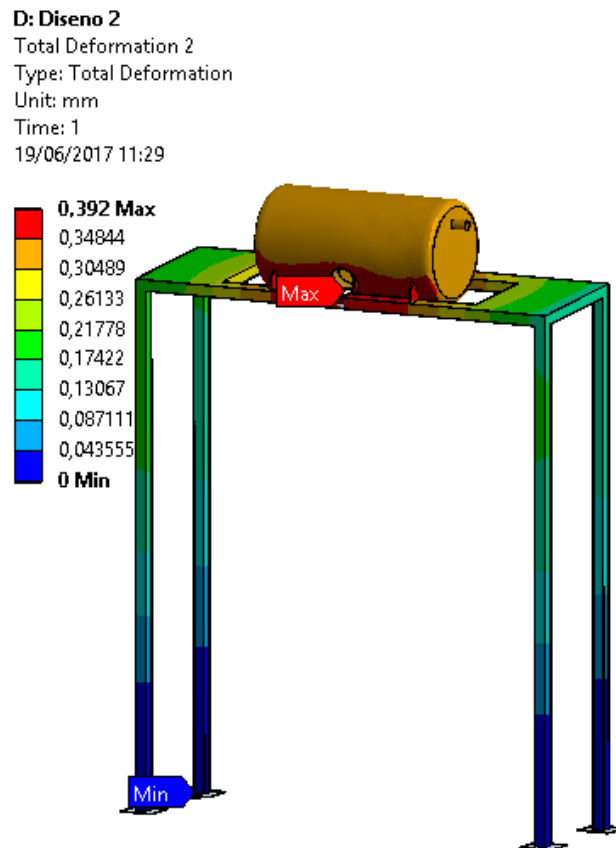


Figura 91 Deformación de la mesa

Otra condición que debe cumplir el diseño para que sea válido es:

$$\delta_{simulado} < \delta_{m\acute{a}x}$$

Como la deformación máxima permisible del material es de 1,3125 mm, y la deformación que se obtiene en la simulación es de máximo 0,392 mm, cumple la condición.

$$0,392 < 1,3125$$

Al cumplirse las condiciones, tanto de esfuerzo como deflexión, se puede determinar que el diseño es satisfactorio, pues que los valores obtenidos mediante la simulación en el Software ANSYS no supera a los valores calculados. Por lo tanto se construyeron el tanque y la mesa, basándose en los planos del anexo C, en la figura 92 se puede observar el tanque y la mesa implementados en el sistema.



Figura 92 Tanque y mesa contruidos

4.9. Conexión del sistema hidráulico

Para suministrar de agua al sistema se realiza la instalación del diagrama de tuberías mostrado en la figura 93, para esto se utiliza tuberías de 1/2".

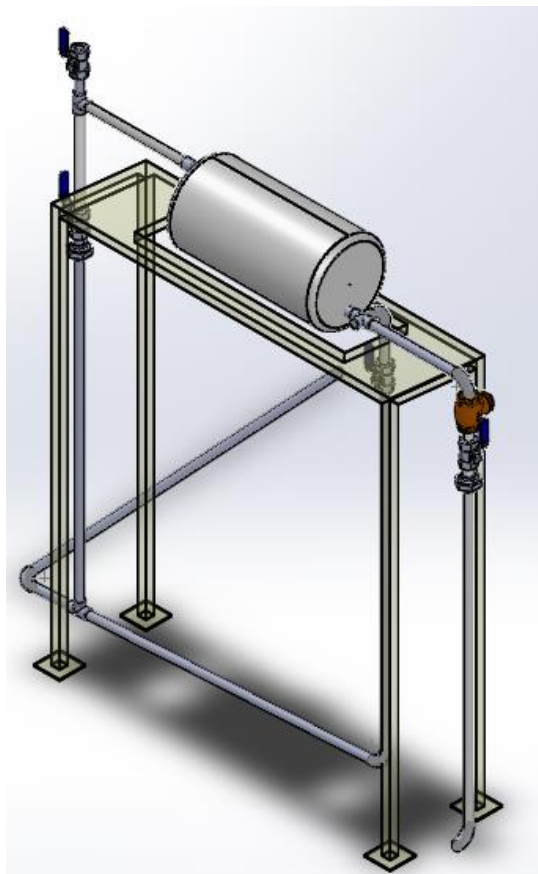


Figura 93 Diagrama de tuberías

En la figura 94 se puede observar la disposición de las válvulas en la conexión de tuberías para suministrar agua al sistema.

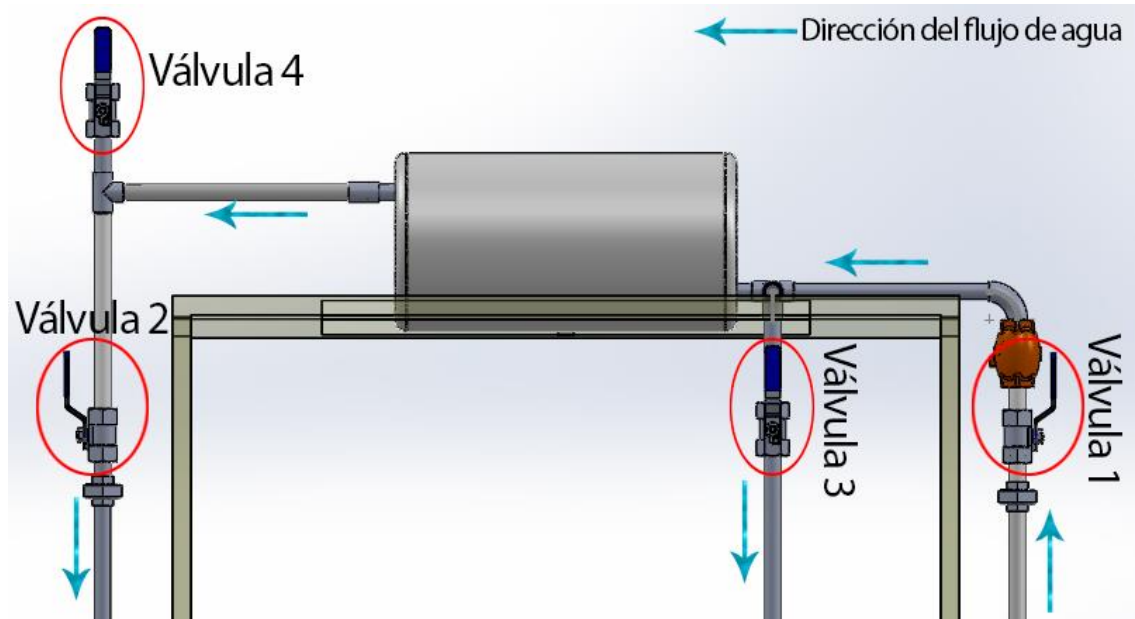


Figura 94 Diagrama de válvulas

En donde se tiene que:

- **Válvula 1:** controla el flujo de agua que ingresa del tanque.
- **Válvula 2:** controla el flujo de agua caliente que sale del tanque.
- **Válvula 3:** controla el flujo de agua para vaciar el tanque.
- **Válvula 4:** Válvula de alivio para vaciar el tanque.

4.10. Selección de dispositivos eléctricos y mecánicos

4.10.1. Fuente de alimentación eléctrica

En este punto se dimensionan los equipos necesarios para dotar de energía al sistema de seguimiento a partir de las características técnicas del mismo, la cuales están dadas en la tabla 18, con esto se podrá tener autonomía en el sistema.

a. Batería

En este punto se realiza el cálculo de la capacidad mínima de la batería a implementar en el proyecto basándose en las características técnicas del seguidor solar, para esto se tienen los datos para el cálculo en la tabla 27.

Tabla 27.
Datos para el cálculo de la capacidad de la batería

Detalle	Valor
Voltaje de operación del sistema	$V_{op} = 12[V_{cc}]$
Corriente máxima del sistema	$I_{sis} = 3[A]$
Potencia del sistema	$P_{sis} = V_{op} \times I_{sis}$ $P_{sis} = 36 [W]$
Ciclo de trabajo del sistema de seguimiento solar	$ct = 25\%$
Horas de trabajo	$ht = ct \times 12$ $ht = 3 [h]$
Energía requerida por el sistema	$E_d = P \times h$ $E_d = 36 [W] \times 3[h] = 108 [Wh]$
Rendimiento de batería	$\eta_B = 80\%$
Energía requerida por la batería	$E_B = \frac{E_n}{\eta_B} = \frac{108}{0,80} = 135 [Wh]$

Cálculo de la capacidad de la batería

$$Capacidad = \frac{E_B}{V} = \frac{135 [Wh]}{12 [V]}$$

$$Capacidad = 11,25 Ah$$

Por lo tanto, se requiere una batería de 12 Vcc con una capacidad de mínimo 11,25 Ah.

Se implementará una batería de 18Ah para este proyecto (figura 95), ya que esta cumple con los requerimientos necesarios y presenta las características técnicas mostradas en la tabla 28:



Figura 95 Batería seleccionada 12V18Ah

Tabla 28.
Especificaciones técnicas batería seleccionada

Especificaciones	
Modelo	RT12-180
Tipo de batería	Ciclo Profundo
Aplicaciones	Fotovoltaica – UPS
Peso aproximado	5kg
Dimensiones	181x77x167
Voltaje nominal	12 VDC
Capacidades nominales	18Ah@20hr-a 1.75V por celda a 25°C
Máxima corriente de descarga	180 A (5 segundos)
Límite máximo de carga	5,4 A
Rango de temperatura de operación	Descarga: -20°C a 60°C Carga: 0°C a 50°C Almacenamiento: -20°C a 60°C
Rango normal de operación	25°C ± 5°C
Tipo de terminales	Faston F3/F13

b. Controlador de carga solar

Para calcular la corriente nominal para el regulador de carga solar se realiza el siguiente cálculo:

$$I_{max,cons} = \frac{P_{max}}{V_{nom,bateria} \times \eta_b}$$

$$I_{max,cons} = \frac{36 W}{12 V \times 0,9}$$

$$I_{max,cons} = 3,33 A$$

$$I_{nom,regulador} = 1,2 \times I_{max,cons}$$

$$I_{nom,regulador} = 1,2 \times 3,33$$

$$I_{nom,regulador} = 4 A$$

Por lo tanto la corriente que debe controlar el regulador será de 4 [A], debido a que en el mercado no se encuentran reguladores de 4 [A], se implementa en el proyecto un regulador de 5 [A], como el que se muestra en la figura 96 y cuyas especificaciones se encuentran en la tabla 29, el manual del mismo se encuentra en el anexo E.



Figura 96 Controlador de carga solar

Fuente: (Phocos, 2016)

Tabla 29.
Especificaciones del regulador de carga solar

Especificaciones	
Voltaje	DC 12V / 24V
Auto consumo	< 4 mA
Corriente de carga	5 A
Protección de sobrecarga	15.5V / 31V
Protección por voltaje bajo	10.5 V/ 21 V
Voltaje máximo a circuito abierto del panel solar	30 V/ 50V
Temperatura de operación	-40°C a 50°C
Dimensiones	80 x 100 x 32 (mm)

Las conexiones desde el regulador se harán con un conductor cuyo calibre se calcula a continuación:

$$S_{cond} = \frac{2 \times L_{B-r} \times I_{max,cons.}}{56 \times \Delta V}$$

Donde,

L , la distancia entre la batería y el regulador

ΔV , es el 0,5% del Voltaje nominal de la batería

Con esto se obtiene:

$$S_{cond} = \frac{2 \times 0,5 \text{ m} \times 3,33 \text{ V}}{56 \times 0,06 \text{ V}}$$

$$S_{cond} = 0,991 \text{ mm}^2$$

El calibre de conductor a utilizar debe tener una superficie mínima de $0,991 \text{ mm}^2$, por lo tanto vemos en la tabla 30 el calibre de conductor a utilizar.

Tabla 30.
Calibre de conductores AWG

Calibre (AWG o kcmil)	Area	
	mm ²	Circular mils
18	0.823	1620
16	1.31	2580
14	2.08	4110
12	3.31	6530
10	5.261	10380
8	8.367	16510
6	13.3	26240
4	21.15	41740

Fuente: (Salcedo, 2011)

Según la tabla 30, se tiene que el conductor a utilizar para la conexión de la batería con el regulador será 16 AWG.

c. Panel solar

Para el cálculo del panel se tiene que la energía demandada es de 135Wh, por lo que la energía del campo solar es:

$$E_{CS} = \frac{E_d}{\eta_B}$$

$$E_{CS} = \frac{108}{0,8} = 135 [Wh]$$

Con esto se obtiene la potencia del panel será:

$$E_p = \frac{E_{CS}}{\text{Horas de sol pico (HSP)}}$$

$$E_p = \frac{135}{5} = 27 [W]$$

Con este valor, se tiene que el panel solar debe tener una potencia mayor o igual a 27 [W], por lo que para este proyecto se implementa un panel de 30 [W] cuyas especificaciones se muestran en la tabla 31:

Tabla 31.
Especificaciones del panel solar

Especificaciones	
Tipo de módulo	TYN-30P6
Potencia máxima	30W
Voltaje a circuito abierto (Voc)	21.60 V
Corriente en corto circuito (Icc)	1,82 A
Voltaje a Pmáx (Vmp)	18 V
Corriente a Pmáx (Imp)	1,67 A
Tolerancia de salida	± 3%
Dimensiones	345 x 285 x 25 (mm)

4.11. Sistema del monitoreo de variables físicas

Las variables físicas a visualizar en este proyecto son las siguientes:

- Temperatura del agua a la entrada del tanque
- Temperatura del agua en el tanque
- Temperatura del condensador del Heat Pipe

La medición se realizará mediante un termómetro digital de 4 canales por medio de termocuplas tipo K cuyo sensor se encontrará en los puntos antes mencionados. Este termómetro se ubicará junto al tanque de

almacenamiento, sobre la mesa soporte. En figura 97 se muestra el diagrama de conexión de las termocuplas en el sistema.

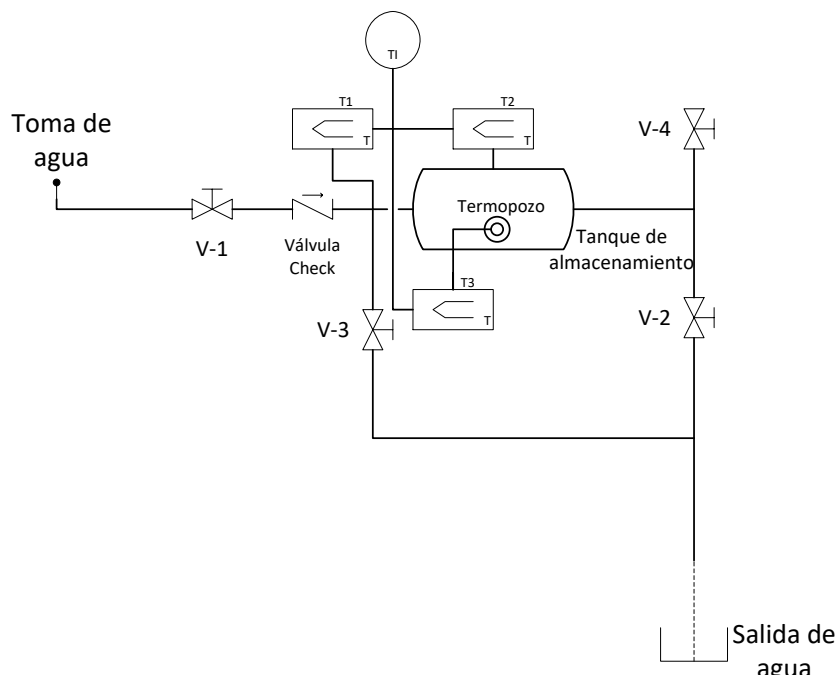


Figura 97 Diagrama de termocuplas

En la tabla 32 se indican el tipo de instrumento que se va a utilizar en la medición de temperatura en los diferentes puntos del sistema de calentamiento de agua.

Tabla 32.

Lista de instrumentos del sistema de agua caliente

Lista de instrumentos			
Texto mostrado	Descripción	Fabricante	Modelo
T1	Temperatura del agua que ingresa al tanque		Tipo K
T2	Temperatura del agua dentro del tanque		Tipo K
T3	Temperatura del condensador del Heat Pipe		Tipo K
TI	Termómetro digital de 4 canales	Xintest	HT-98155

En la tabla 33 se detalla el tipo de válvula a utilizar en el sistema de calentamiento de agua

Tabla 33.

Lista de válvulas del sistema de agua caliente

Lista de válvulas		
Texto mostrado	Descripción	Tamaño de la línea
V-1	Válvula de ingreso de agua al tanque	1/2"
V-2	Válvula de salida de agua caliente	1/2"
V-3	Válvula para vaciar el tanque	1/2"
V-4	Válvula de alivio	1/2"
Válvula Check	Válvula Check	1/2"

4.11.1. Equipos para el monitoreo de variables

a. Termómetro digital de 4 canales

El dispositivo para medir la temperatura en el tanque de almacenamiento será un termómetro digital (figura 98) para termocuplas tipo K de cuatro canales, sus características técnicas se encuentran descritas en la tabla 34, ya que se medirán las siguientes temperaturas:

- Temperatura del agua que ingresa al tanque de almacenamiento, canal 1.
- Temperatura del Heat Pipe, canal 2.
- Temperatura dentro del tanque de almacenamiento, canal 3.



Figura 98 Termómetro digital de 4 canales

Tabla 34.
Especificaciones Termómetro Digital 4 Canales

Especificaciones	
Termómetro digital tipo K	4 Canales
Rango de medición de temperatura	-200°C a 1372 °C
Resolución de temperatura tipo K	1000°C: 1°C/°F/K
Batería	9V CC
Precisión de medición	> - 100°C: ± 1°C
	< - 100°C: ± 2°C
Dimensiones	200 X 85 X 38 mm
Rango temperatura del sensor de prueba	-30°C a 300°C

Fuente: (Xintest, 2016)

b. Termopar; transferencia Tipo: K

Los equipos para medir la temperatura, colocados al ingreso y en el interior del tanque, serán termocuplas tipo K (como la de la figura 99) cuyas características son:

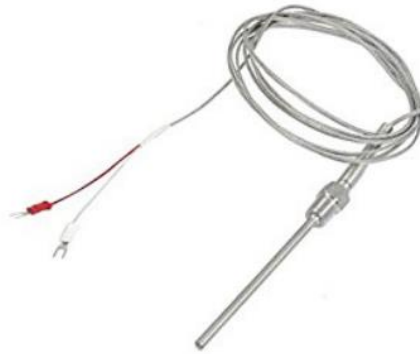


Figura 99 Termopar tipo K

Características del producto termocupla para el ingreso de agua al tanque:

- 3 metros de largo, 13 mm de diámetro de rosca, 1 cm de longitud termopar de la sonda.
- Termopar de tipo K con resorte flexible incorporado.
- 2 terminales de horquilla para una fácil conexión.
- El rango de la medida de la temperatura está a partir de -100 grados Celsius a 1250 Celsius.
- Peso: 85 gramos.

Características del producto termocupla para el interior del tanque:

- 3 metros de largo, 13 mm de diámetro de rosca, 10 cm de longitud termopar de la sonda.
- Termopar de tipo K con resorte flexible incorporado.
- 2 terminales de horquilla para una fácil conexión.
- El rango de la medida de la temperatura está a partir de -100 grados Celsius a 1250 Celsius.
- Peso: 85 gramos.

4.12. Implementación del módulo de control


El módulo de control está construido con un gabinete metálico que servirá para la protección de los equipos cuyas dimensiones son: 20L x 30H x 12W (cm), que se coloca sobre una de las paredes de la columna norte del CCP como se muestra en la figura 100.



Figura 100 Gabinete colocado en la columna norte

En el gabinete metálico se colocaran los elementos que se detallan en la tabla 35:

**Tabla 35.
Equipos del módulo de control**

Equipos del módulo de control		
Nombre del equipo	Característica	Imagen del equipo
Batería	Encargada de suministrar energía para el sistema de seguimiento.	

CONTINÚA



Controlador de carga solar Permite regular los parámetros de voltaje y corriente producidos por el panel solar para cargar la batería.



Caja de control del seguidor solar Es la encargada de realizar el control de movimiento del actuador eléctrico



Las conexiones entre los módulos se las realizan siguiendo el esquema de la figura 101.

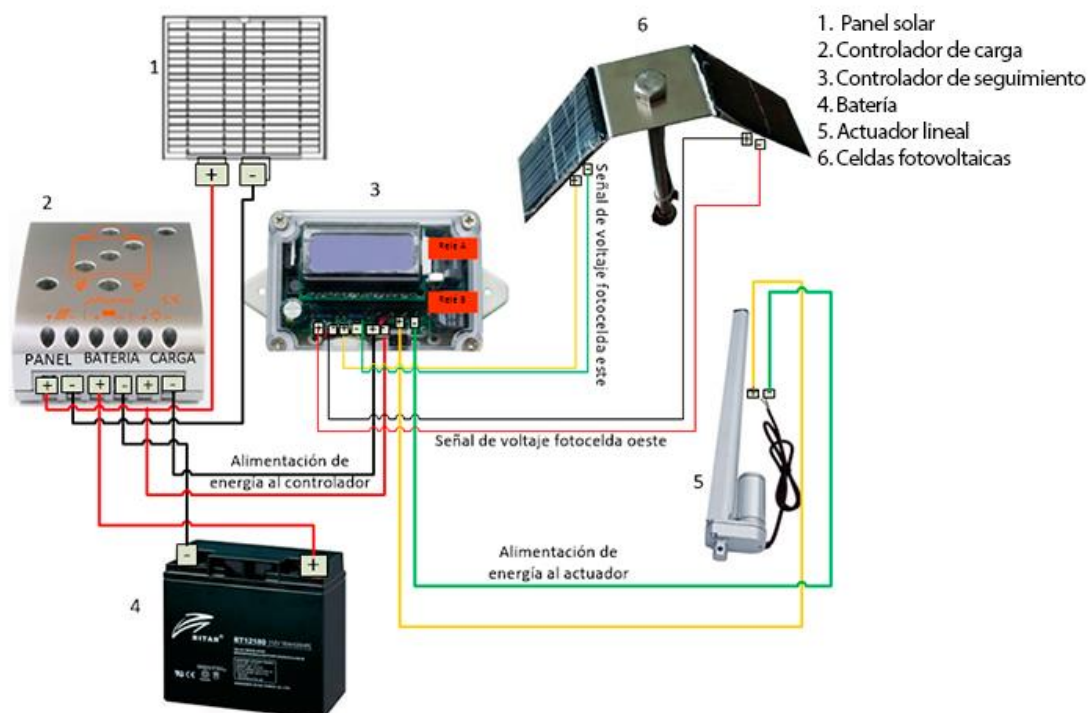


Figura 101 Esquema de conexiones del sistema de seguimiento

El modulo construido ya con cada uno de los elementos se puede ver en la figura 102:



Figura 102 Componentes colocados en el gabinete metálico

CAPÍTULO V

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Pruebas del sistema de carga

5.1.1. Procedimiento de las pruebas

Se realizaron dos pruebas en el sistema de carga, en la primera prueba se midió la energía consumida por el sistema de seguimiento durante ocho horas, la segunda consiste en verificar el funcionamiento del sistema de carga, siguiendo los procedimientos planteados a continuación.

Medición de energía consumida por el sistema de seguimiento

1. Conectar el medidor de energía al sistema de seguimiento, el cual será la carga, y la alimentación del sistema siguiendo el diagrama de la figura 103.

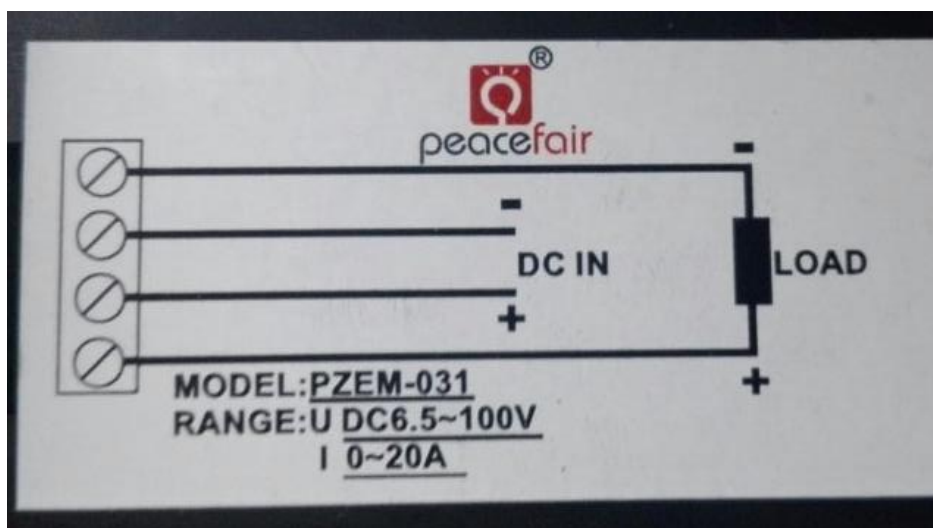


Figura 103 Diagrama de conexión del medidor de energía

2. Dejar el sistema funcionando durante un tiempo no menor a 8 horas.
3. Registrar la medida de energía consumida por el sistema de seguimiento en la pantalla del medidor y desconectarlo.

Funcionamiento del sistema de carga

La prueba se realiza sobre el controlador de carga el cual tiene diferentes LEDs indicativos mostrados en la figura 104.

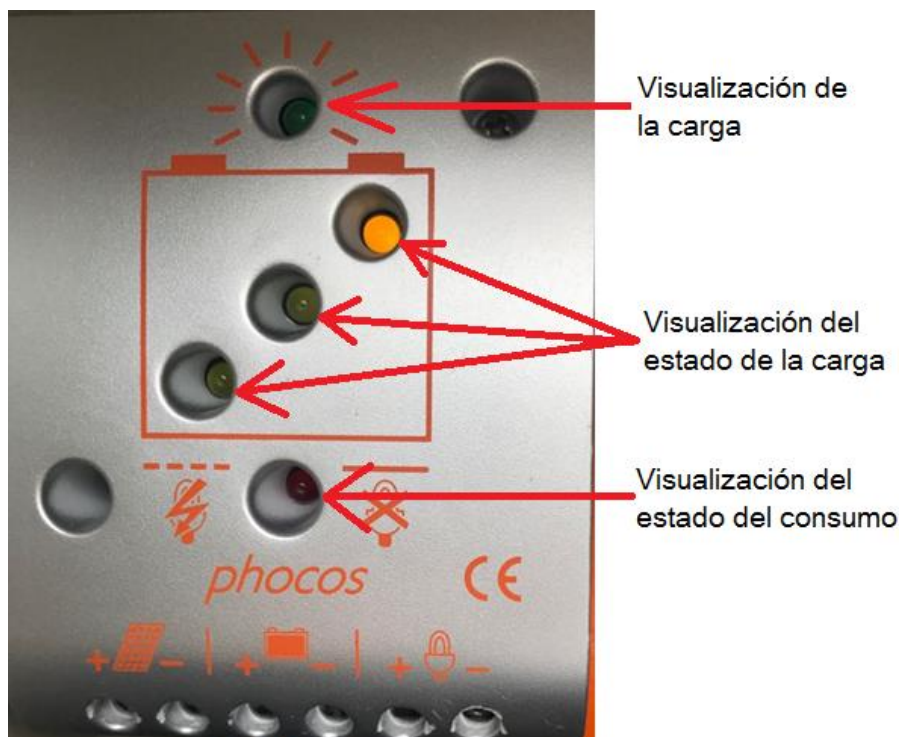


Figura 104 Funciones de visualización del controlador de carga solar

1. Verificar que el LED verde de “visualización de la carga” del controlador de carga solar esté encendido.
2. Desconectar cualquiera de los conectores R4 del panel solar y verificar que el LED de “visualización de la carga” se apague.
3. Visualizar el LED naranja de “visualización del estado de la carga” de la batería y comparar con la figura 105.

Visualización del estado de la carga

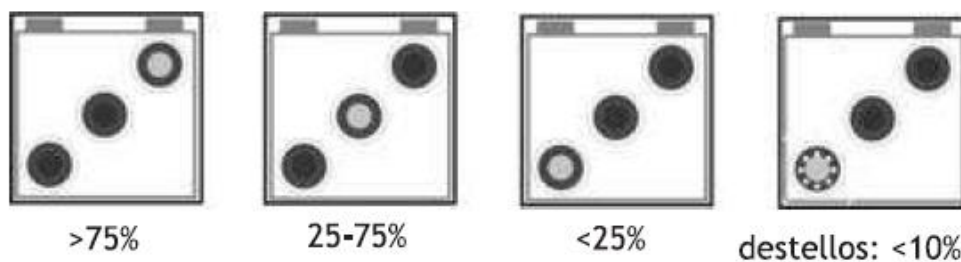


Figura 105 Estado de la carga en el controlador de carga solar

4. Verificar que el LED rojo de “Estado del consumo” esté apagado. Si este se encuentra encendido revisar el manual del controlador de carga solar que se encuentra en el anexo C-3 para determinar el tipo de falla.
5. Conectar el conector R4 del panel solar.

5.1.2. Resultados de las pruebas

Medición de energía consumida por el sistema de seguimiento

Al conectar el medidor de energía al sistema de seguimiento se obtuvo los datos mostrados en la figura 106.



Figura 106 Datos del medidor de energía

Con esta prueba se determinó que cuando el colector se posiciona mediante el actuador lineal se tiene una corriente en el sistema de 0,3 A, y cuando el actuador lineal no está en movimiento se tiene una corriente en el sistema de 0,01 A.

Funcionamiento del sistema de carga

En primer lugar se observó que el LED de “visualización de la carga” estaba encendido, lo que quiere decir que el panel estaba cargando normalmente a la batería, como se ve en la figura 107.



Figura 107 LED de estado la carga encendido

Al desconectar el panel solar se observó que el LED verde se apagó, por lo tanto la batería no se está cargando, ver figura 108.

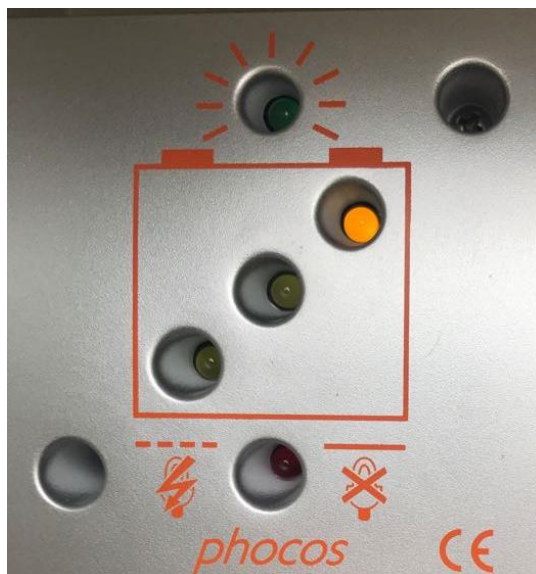


Figura 108 LED de estado de carga apagado

En la figura 108 se observa que el estado de la carga de la batería es mayor al 75%.

Al dejar al sistema sin panel solar durante 4 días el nivel de carga de batería se redujo entre 25% a 75%, como se indica en la figura 109. Simulando posibles días con nubosidad alta.

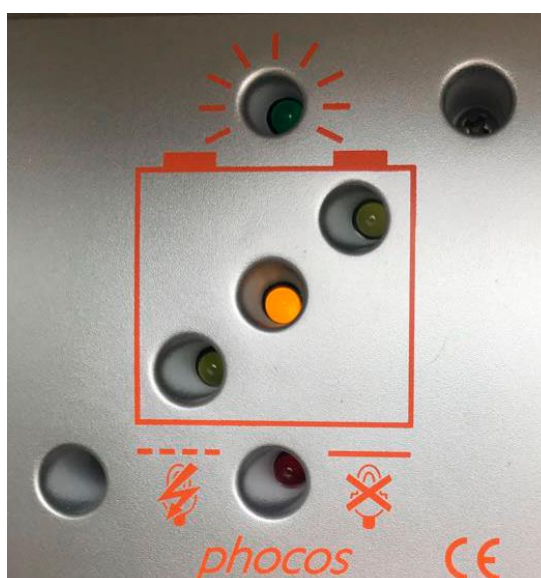


Figura 109 Estado de carga de batería en 25 a 75%

El LED rojo de “Estado del consumo” se mantuvo apagado durante todo el proceso de pruebas, lo que quiere decir que existe un funcionamiento normal del sistema.

El conector R4 del panel solar se conectó y el LED verde se encendió, ver figura 110.

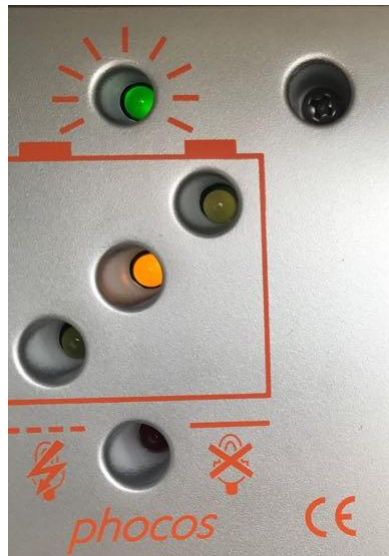


Figura 110 LED de estado de carga en normal funcionamiento

5.2. Pruebas del mecanismo de seguimiento solar del CCP

5.2.1. Procedimiento para las pruebas

Para el mecanismo de seguimiento solar implementado se realizarán pruebas de funcionamiento siguiendo el siguiente procedimiento:

- Orientación del CCP al este.
 1. Con el sistema en funcionamiento, cubrir la celda fotovoltaica WEST en su totalidad.
 2. Revisar la pantalla del controlador.
 3. Visualizar el comportamiento del actuador.
- Orientación del CCP al oeste.
 1. Con el sistema en funcionamiento, cubrir la celda fotovoltaica EAST en su totalidad.
 2. Revisar la pantalla del controlador.
 3. Visualizar el comportamiento del actuador.
- Orientación del CCP con radiación menor a $100 W/m^2$.

1. Con el sistema en funcionamiento, cubrir la celda fotovoltaica EAST y WEST en su totalidad.
2. Revisar la pantalla del controlador.
3. Visualizar el comportamiento del actuador.

5.2.2. Resultados de las pruebas

Orientación del CCP al este

En la pantalla del controlador se visualiza que el movimiento es hacia el este (To East) (ver la figura 111) y se enciende el led verde. En la pantalla se observa el diferencial de voltaje (G), en el sensor fotovoltaico, que es de 1.68 [V], se indica el tiempo de comparación (TX) que será cada 10 segundos.



Figura 111 Indicación de movimiento hacia el este

Al realizar esta prueba se logró visualizar que el actuador se contrae cuando la radiación es mayor al este, es decir en horas de la mañana. Cuando está contraído en su totalidad el CCP estará orientado 45° al Este (ver figura 112).



Figura 112 Posicionamiento total al este del CCP

Orientación del CCP al oeste

En la pantalla del controlador se visualiza que el movimiento es hacia el oeste (To West) (figura 113) y se enciende el led rojo. En la pantalla se observa el diferencial de voltaje (G), en el sensor fotovoltaico, que es de 4.31 [V], se indica el tiempo de comparación (TX) que será cada 10 segundos.



Figura 113 Indicación de movimiento hacia el oeste

Al realizar esta prueba se logró visualizar que el actuador se extiende cuando la radiación es mayor al oeste, es decir en horas de la tarde. Por lo tanto, cuando está extendido totalmente el CCP se orienta 45° al oeste (ver figura 114).



Figura 114 Posicionamiento total al oeste del CCP

Orientación del CCP con radiación menor a 50 W/m²

En la pantalla del controlador se visualiza que no hay movimiento del actuador dando un mensaje que la radiación es baja (Sun Low) (ver figura

115). El diferencial de voltaje (G), en el sensor fotovoltaico, que es 1.48 [V], se indica el tiempo de comparación (T8) se realiza cada 1000 segundos.



Figura 115 Indicación de sol bajo en la pantalla

Al realizar esta prueba se logró visualizar que el actuador no se mueve cuando el voltaje generado por las celdas es menor a 1,50 V.

5.3. Pruebas en el sistema de agua caliente

5.3.1. Procedimiento para realizar las pruebas del sistema

Las pruebas a realizar para el sistema de obtención de agua caliente son las siguientes:

- Potencia generada por el CCP
- Energía útil para el calentamiento de agua

Estas pruebas se harán al mismo tiempo ya que son dependientes una de otra, el procedimiento a seguir es el siguiente:

NOTA: Para el procedimiento todas las válvulas se encuentran inicialmente cerradas, ver figura 97.

1. Si el tanque se encuentra lleno, abrir las válvulas 3 y 4 para la salida de agua.

Válvula	Abierta	Cerrada
1		X
2		X
3	X	
4	X	

- Una vez vacío, cerrar las válvulas 3 y 4, abrir la válvula 1 y medir la temperatura del agua que ingresa al tanque en T1.

Válvula	Abierta	Cerrada
1	X	
2		X
3		X
4		X

- Medir la radiación solar, la temperatura del Heat Pipe y del agua en el interior del tanque, apuntar los datos
- Esperar 5 minutos y repetir las mediciones del paso 5, durante una hora.
- Abrir la válvula 2 para retirar el agua caliente y que ingrese agua fría al tanque.

Válvula	Abierta	Cerrada
1	X	
2	X	
3		X
4		X

5.3.2. Resultados de las pruebas

Las pruebas se realizaron el 6 de junio desde las 10:32 am y el 16 de junio desde las 10:50 am. Se tomaron los datos de radiación solar, temperatura del Heat Pipe y la temperatura del agua almacenada cada 5 minutos durante dos horas, los cuales se detallan en la tabla 36 y en la tabla 37.

Para las pruebas, inicialmente se midió la temperatura del agua que ingresa al tanque, la temperatura a la que se encontraba el ambiente. La velocidad del viento detallada en las tablas es un promedio de las mediciones realizadas durante las pruebas. Durante las pruebas se obtuvo un octavo de cielo cubierto.

Tabla 36.

Datos de pruebas 6 de junio

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA			
Temperatura del agua de entrada		15 °C	
Hora de inicio: 10h32	Temperatura ambiente:20°C	Velocidad del viento promedio: 3,1 m/s	
Nubosidad: Un octavo de cielo cubierto			
CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO			
Tiempo (horas)	Radiación solar (W/m ²)	Temperatura Heat Pipe (°C)	Temperatura del agua almacenada (°C)
10:32	930	77,3	15
10:37	915	76,5	16,65
10:42	912	84,9	18,15
10:47	923	87,9	19,65
10:52	915	88,5	21,05
10:57	910	90,4	22,65
11:02	948	93,4	24,15
11:07	930	93,5	25,55
11:12	920	92	27,15
11:17	901	92	28,8
11:22	904	92,5	30,3
11:27	913	93	32
11:32	948	96,1	33,5
11:37	935	97,7	35,1
11:42	1015	99	36,75
11:47	1026	103,1	38,15
11:52	1060	109	39,75
11:57	911	11,5	41,5
12:02	904	115,2	43
12:07	909	117,3	44,2
12:12	932	117,7	45,5
12:17	962	115,9	46,9
12:22	947	111,6	48,2
12:27	919	113,5	49,4
12:32	910	115	50,2

Las mediciones que se encuentran en la tabla 36 se representan en la figura 116, donde se representa la radiación solar sobre el lugar de instalación a lo largo de la prueba, y en la figura 117 la temperatura del agua en el tanque versus el tiempo.

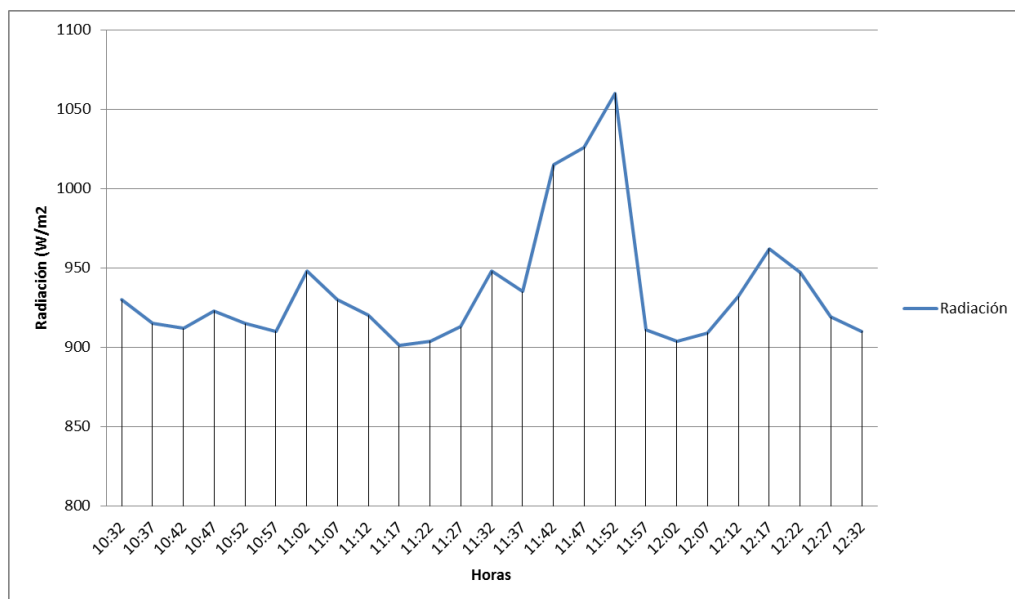


Figura 116 Radiación solar vs tiempo 6 de junio

En la figura 116 se puede observar la radiación solar versus el tiempo, teniendo que la radiación más baja es de 901 W/m^2 y el pico más alto de radiación de 1060 W/m^2 , la energía incidente del sol durante las dos horas es de $1873,25 \text{ Wh/m}^2$.

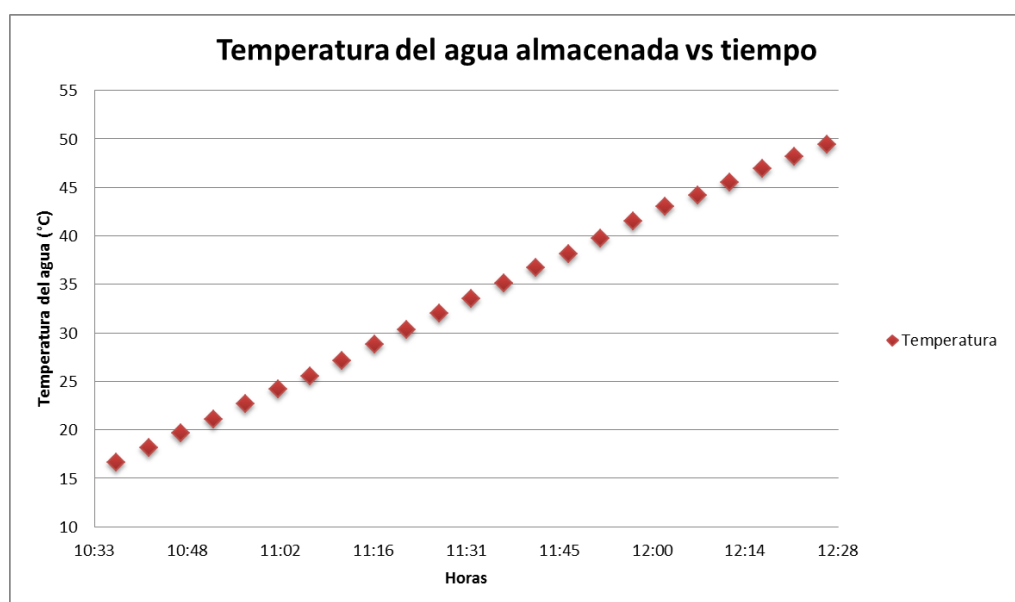


Figura 117 Temperatura del agua almacenada vs tiempo 6 de junio

En la figura 117 se puede observar que la temperatura del agua en el tanque (representada en el eje y) se incrementa desde 15°C a $50,2^\circ\text{C}$ en dos horas (el tiempo está representado en el eje x de la gráfica).

Tabla 37.

Datos de pruebas 16 de junio

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA			
Temperatura del agua de entrada		17 °C	
Hora de inicio: 10h50	Temperatura ambiente:18°C	Velocidad del viento promedio: 3,5 m/s	
Nubosidad: Un octavo de cielo cubierto			
CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO			
Tiempo (horas)	Radiación solar (W/m ²)	Temperatura Heat Pipe (°C)	Temperatura del agua almacenada (°C)
10:50	935	77,8	17
11:00	922	80,7	18,1
11:05	934	81,2	19,2
11:10	925	81,5	20,1
11:15	944	81,8	21,6
11:20	954	84,3	23,1
11:25	945	86,9	24,7
11:30	962	89,3	26,2
11:35	971	90	27,8
11:40	935	90,5	29,2
11:45	912	90,3	30,8
11:50	565	89,8	32,3
11:55	510	89,6	34,2
12:00	435	89,7	35,8
12:05	570	89	37,3
12:10	760	90,2	38,9
12:15	870	90,5	40,4
12:20	884	91	41,5
12:25	877	90,4	42,6
12:30	883	90,7	43,8
12:35	874	91	45,2
12:40	879	93	46,8
12:45	871	93,7	47,7
12:50	850	94,1	48,8
12:55	886	95	49,7
13:00	880	94,7	50,4

Las mediciones que se encuentran en la tabla 37 se representan en la figura 118, donde se representa la radiación solar sobre el lugar de instalación a lo largo de la prueba, y en la figura 119 la temperatura del agua en el tanque versus el tiempo.

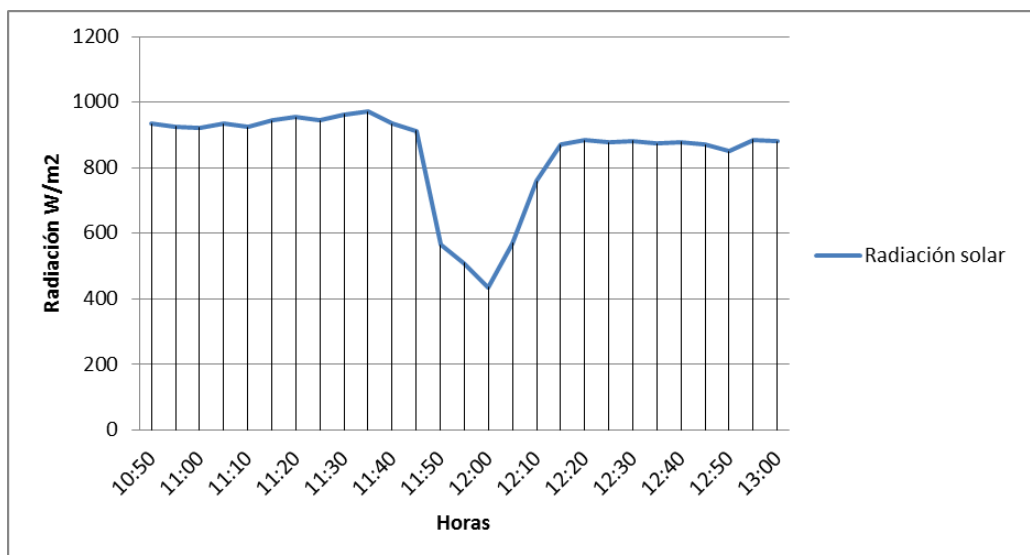


Figura 118 Radiación solar vs tiempo 16 de junio

En la figura 118 se puede observar la radiación solar versus el tiempo, teniendo que la radiación más baja es de 435 W/m^2 y el pico más alto de radiación de 971 W/m^2 , la energía incidente del sol durante el tiempo de la prueba es de $1755,71 \text{ Wh/m}^2$.

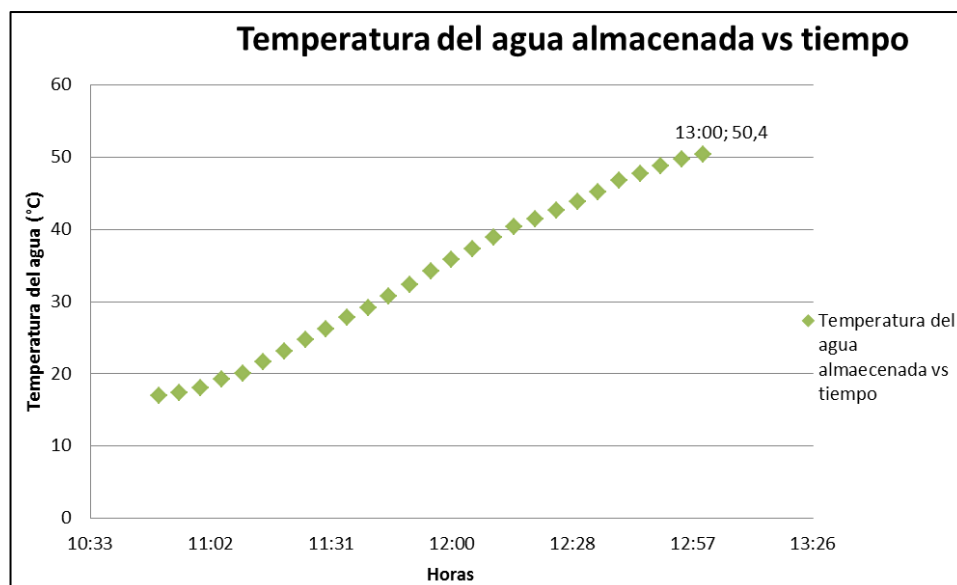


Figura 119 Temperatura del agua almacenada vs tiempo 16 de junio

En la figura 119 se puede observar que la temperatura del agua en el tanque (representada en el eje y) se incrementa desde 17°C a $50,4^\circ\text{C}$ en dos horas y 10 minutos (el tiempo está representado en el eje x de la gráfica).

Comparado las pruebas realizadas el 6 de junio y el 16 de junio, se tiene que para elevar la temperatura hasta los 50°C , desde los 15°C , se necesita

una irradiación de aproximadamente 1900 Wh/m^2 durante dos horas. Como en la prueba realizada el 16 de junio se obtuvo una irradiación de $1755,71 \text{ Wh/m}^2$ se necesitó de diez minutos más que en la prueba del 6 de junio para que el agua en el tanque alcance los 50°C . Por lo que para realizar el análisis de rendimiento del sistema se tomarán en cuenta los datos obtenidos el 6 de junio.

Además de esto se realizó un ensayo con la base reflectora cubierta, como se muestra en la figura 120.



Figura 120 Base reflectora cubierta para ensayo

Con este ensayo se obtuvieron los valores de temperaturas e irradiación representados en la tabla 38.

Tabla 38.

Datos de pruebas sin base reflectora

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

Temperatura del agua de entrada 18 °C

Hora de inicio: 10h00 Temperatura ambiente: 18°C Velocidad del viento promedio: 3,7 m/s

Nubosidad: Un octavo de cielo cubierto

CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO

Tiempo (horas)	Radiación solar (W/m^2)	Temperatura Heat Pipe ($^\circ\text{C}$)	Temperatura del agua almacenada ($^\circ\text{C}$)
10:00	820	65,4	18
10:05	818	68,3	18,7
10:10	845	68,4	19,5
10:15	868	68,7	20,3
10:20	861	67,7	21,2
10:25	903	67,2	22
10:30	925	67,3	22,6
10:35	953	68,7	23,2

10:40	960	69,3	23,9
10:45	984	69,8	24,5
10:50	1004	69,8	25,6
10:55	1054	67,3	26,5
11:00	1004	69,3	27,5
11:05	1049	70	28,3
11:10	1067	68,2	29,1
11:15	1049	68,6	29,6
11:20	1032	70,6	29,9
11:25	1090	70,9	30,6
11:30	990	69,7	31,3
11:35	1025	70,9	31,7
11:40	1020	66,9	32,3
11:45	1053	67,3	32,7
11:50	993	67,5	33
11:55	1054	67,8	33,4
12:00	990	66,7	33,6

Como se visualiza en la figura 121 se tiene que la radiación sobre el lugar de instalación se permanece entre los 900 a 1000 W/m², con lo que se tiene una irradiación de 1958,83 Wh/m².

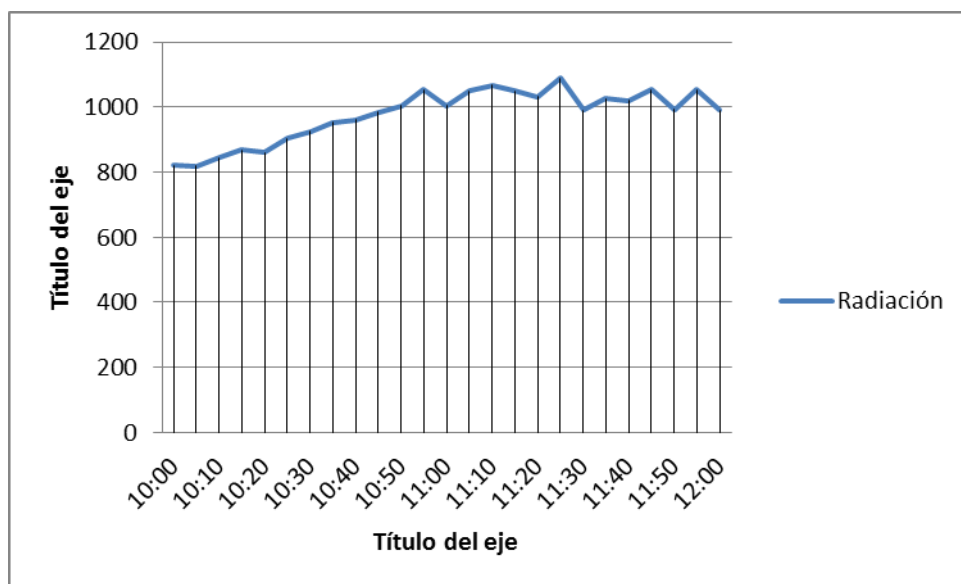


Figura 121 Radiación solar ensayo sin base reflectora

En la figura 122 se tiene la comparación de temperaturas en el Heat Pipe cuando la base reflectora está cubierta y cuando el sistema funciona en condiciones normales.

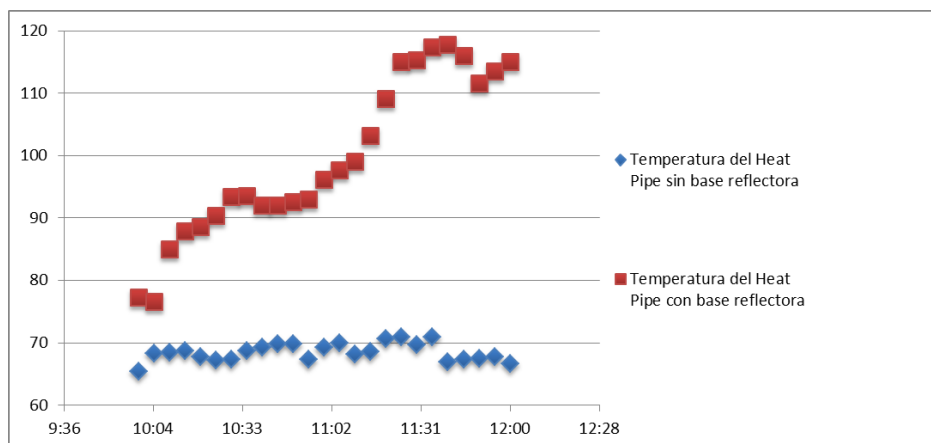


Figura 122 Comparación de la temperatura del Heat Pipe

Como se visualiza en la figura 122, cuando la base reflectora está cubierta la temperatura del Heat Pipe no supera los 71°C, en comparación que cuando el sistema funciona normalmente, en donde supera los 110°C, lo que afecta al calentamiento del agua almacenada en el tanque. La figura 123 muestra que el agua alcanza una temperatura de 50,2°C luego de dos horas de ensayo cuando se tiene base reflectora, y hasta 33,6 °C cuando la base reflectora está cubierta. Por lo que se puede concluir que la superficie reflectora incrementa el rendimiento del colector logrando un mayor incremento de temperatura en dos horas de ensayo.

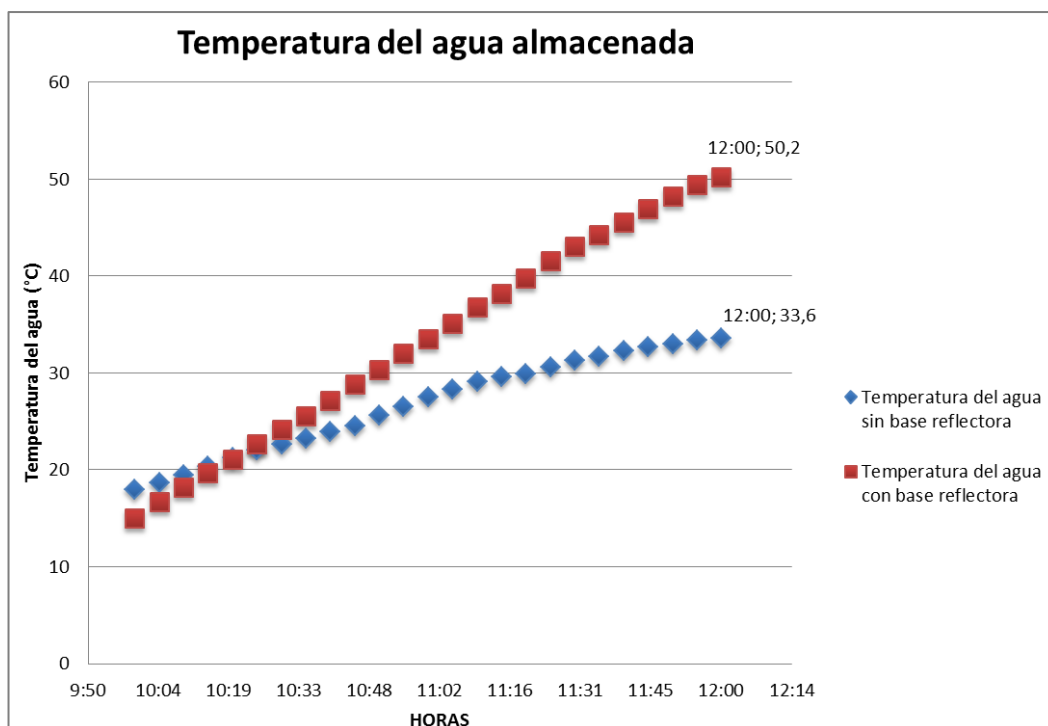


Figura 123 Comparación de la temperatura del agua en el tanque

5.4. Pérdidas térmicas en el tanque de almacenamiento

Para hallar las pérdidas en el tanque de almacenamiento se analiza el circuito térmico representado en la figura 124, para esto se debe conocer las características del mismo, así como también las temperaturas que alcanza, tanto dentro como fuera del mismo, durante el funcionamiento del sistema, estos valores se detallan en la tabla 39.

Tabla 39.
Datos para el cálculo de pérdidas en el tanque

DATOS	
Descripción	Valor
Coeficiente de convección	17,48 (W/m ² . °C)
Diámetro interior del tanque interno - D_1	0,180 m
Diámetro exterior del tanque interno - D_2	0,1830 m
Diámetro de aislamiento - D_3	0,234 m
Diámetro exterior del tanque - D_4	0,237 m
Longitud del tanque interno - L	0,40 m
Longitud de la cubierta del tanque - L_2	0,455 m
Temperatura ambiente - T_∞	20°C
Temperatura superficie interna del tanque - T_2	40°C
Temperatura del agua - T_i	50,2°C
Conductividad térmica del acero inoxidable	15 (W/m. K)
Conductividad térmica de la lana de vidrio	0,036 (W/m. K)
Emisividad del acero	0,23

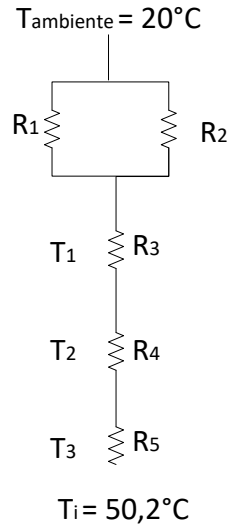


Figura 124 Circuito térmico del tanque

Se encuentran las resistencias térmicas en el tanque mediante el siguiente cálculo:

$$R_1 = \frac{1}{h_{conv} \times \pi \times D_4 \times L_2}$$

$$R_1 = \frac{1}{17,48 \times \pi \times 0,237 \times 0,455} = 0,1688 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$R_2 = \frac{1}{h_{rad} \times \pi \times D_4 \times L_2}$$

En donde:

$$h_{rad} = \varepsilon_{acero} \times \sigma \times (T_2 + T_{cielo}) \times (T_2^2 + T_{cielo}^2)$$

$$h_{rad} = 0,23 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (313 + 276,84)(313^2 + 276,84^2)$$

$$h_{rad} = 1,343 \text{ W}/\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C}$$

Con este valor de coeficiente de radiación se procede a calcular la resistencia térmica por radiación en el ambiente:

$$R_2 = \frac{1}{1,343 \times \pi \times 0,237 \times 0,455} = 2,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

Se tiene que la resistencia equivalente R_{1-2} , ya que es una configuración de resistencias en paralelo, viene dada por:

$$R_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{0,1688} + \frac{1}{2,19}}$$

$$R_{1-2} = 0,156 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Ahora se procede a calcular las resistencias térmicas restantes:

$$R_3 = \frac{\ln(D_4/D_3)}{2\pi \times k_{\text{acero}} \times L_2}$$

$$R_3 = \frac{\ln(0,237/0,234)}{2\pi \times 15 \times 0,455} = 2,97 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_4 = \frac{\ln(D_3/D_2)}{2\pi \times k_{\text{aislante}} \times L}$$

$$R_4 = \frac{\ln(0,234/0,1830)}{2\pi \times 0,036 \times 0,40} = 2,717 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_5 = \frac{\ln(D_2/D_1)}{2\pi \times k_{\text{acero}} \times L}$$

$$R_5 = \frac{\ln(0,1830/0,18)}{2\pi \times 15 \times 0,4} = 4,38 \times 10^{-4}$$

Al ser un sistema de resistencias en serie, se calcula la resistencia total equivalente:

$$R_T = R_{1-2} + R_3 + R_4 + R_5$$

$$R_T = 0,156 + 2,97 \times 10^{-4} + 2,717 + 4,38 \times 10^{-4}$$

$$R_T = 2,87 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

Con el valor de la resistencia total, se procede a calcular el valor de las pérdidas desde el interior del tanque con el ambiente, en donde:

$$Q_2 = \frac{T_i - T_\infty}{R_T}$$

$$Q_2 = \frac{50,2 - 20}{2,87}$$

$$Q_2 = 10,52 \text{ W}$$

Se tiene que las pérdidas térmicas en el tanque son 10,52 W.

5.5. Determinación del rendimiento global del sistema

Con los datos obtenidos en la práctica se obtienen los valores detallados en la tabla 40:

Tabla 40.
Datos de la práctica

Datos	
Descripción	Valor
Irradiación solar sobre el lugar (E_{sol})	1873,25 (Wh/m ²)
Temperatura inicial del agua (T_i)	15 (°C)
Temperatura final del agua (T_f)	50,2 (°C)
$\cos \theta_{(con,seg)}$ promedio	0,8643
Superficie efectiva de captación	1,5418 (m ²)

Se calcula la energía útil basados en los datos obtenidos en la práctica, obteniendo:

$$Q_{util} = m \times C_p \times (T_f - T_i)$$

$$Q_{util} = 10 \times 4,18 \times (50,2 - 15)$$

$$Q_{util} = 1471,36 \text{ [KJ]}$$

$$Q_{util} = 1471,36 \text{ [KJ]} \times \frac{1}{3600 \text{ s}} = 408,71 \text{ [Wh]}$$

La irradiación solar en las dos horas de funcionamiento del sistema es de 1873,25 (Wh/m²), por lo que la energía que capta el colector será de:

$$Q_{in} = S_c \times E_{sol} \times \cos \theta$$

$$Q_{in} = 1,5418 \times 1873,25 \times 0,8643$$

$$Q_{in} = 2496,25 [Wh]$$

Con esto tendremos un rendimiento del colector de:

$$\eta = \frac{Q_{util}}{Q_{in}}$$

$$\eta = \frac{408,71}{2496,25}$$

$$\eta = 0,1637 = 16,37\%$$

Por lo tanto el sistema tiene un rendimiento global es del 16,37%.

CONCLUSIONES

- Se diseñó un colector cilindro parabólico, orientado al norte con una inclinación de 6° respecto a la horizontal con seguimiento solar este-oeste controlado por un sensor fotovoltaico; mediante la implementación del sistema de calentamiento Heat Pipe en el foco de la base reflectora del CCP se produjo 1471,35 [KJ] de energía útil durante dos horas, que permitió tener un incremento de temperatura del agua almacenada en el tanque de $35,2^\circ\text{C}$.
- Se obtuvo un rendimiento global del sistema de 16,37% ya que la energía incidente del sol sobre el colector fue de 2527,23 Wh y la energía útil utilizada por el agua para elevar su temperatura de 15°C a $50,2^\circ\text{C}$ fue de 408,71 [Wh].
- El seguimiento solar es en un eje debido a estar cerca de la línea ecuatorial la declinación solar en los solsticios no supera los $23,4^\circ$ según el software de simulación de astronomía de la Universidad de Nebraska-Lincoln con el cual se analizó el movimiento solar sobre Latacunga, por lo tanto un seguimiento de norte a sur no es necesario.
- Se utilizó aluminio brillante con un coeficiente de reflexión de 0,853 para la base reflectora con el objetivo de reflejar los rayos del sol y, a su vez, de bajo peso; la estructura del sistema se construyó de acero A36 y fue pintada al horno para que soporte condiciones climáticas adversas, el tanque de almacenamiento está construido de acero inoxidable.
- El sistema de seguimiento solar tiene autonomía para su funcionamiento mediante su fuente de alimentación, que fue diseñada mediante un panel solar y una batería, debido a que este tiene un motor DC que mueve un actuador por medio de engranes a una velocidad de 5,7 mm/s y posee una clase de protección IP54 para el actuador e IP65 para la caja de control.
- No es necesario de un sistema de recirculación de agua para el funcionamiento del sistema de calentamiento debido a que se este sistema de calentamiento de agua se diseñó utilizando el sistema

de intercambio de calor mediante heat pipe, en donde el condensador del tubo de calor ingresa al tanque de almacenamiento por un termopozo, que es en donde se produce el intercambio de calor con el agua.

- Mediante un termómetro digital de cuatro canales, al cual se conectan termocuplas tipo K, se mide la temperatura del agua al ingreso del tanque, en el agua almacenada dentro del mismo y en el condensador del Heat Pipe; la radiación solar se mide mediante un piranómetro durante el funcionamiento del sistema.

RECOMENDACIONES

- Manipular el tubo de vacío con precaución ya que tiende a romperse, al ocasionarle golpes indebidos. Al sufrir daños se pierde el vacío y el tubo quedará inutilizable, por lo tanto tendría que ser reemplazado.
- Para retirar el tubo de calor del tanque tener en cuenta que este alcanza temperaturas mayores a 100°C lo que puede provocar quemaduras, por lo que se recomienda utilizar las herramientas adecuadas.
- Operar el sistema siguiendo las guías de laboratorio, las cuales se anexan en este trabajo, previo a cada práctica revisar que la base reflectora se encuentre limpia antes de ya que la suciedad sobre esta afecta a su reflectividad.
- Verificar que el sistema de carga funciona correctamente por medio de las luces indicadoras del controlador de carga antes de la operación del sistema.
- Medir la radiación solar con el piranómetro con la misma orientación que la base reflectora del CCP.
- Se recomienda realizar las pruebas cuando se tenga una nubosidad de máximo dos octas, ya que afecta considerablemente al rendimiento del CCP.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ansys. (2014). *ANSYS CFD*.

Asamblea Nacional del Ecuador. (2010). *Ley Orgánica de Educación Superior*. Quito.

Bausá, J. (2004). *Sensores de temperatura*. Escuela Superior Politécnica de Valencia.

Carta Gonzales, J. A., & Calero Pérez, R. (2013). *Centrales de energías renovables*. Madrid: Pearson.

CEAACES. (2015). *Modelo Genérico de Evaluación del Entorno de Aprendizaje de Carreras Presenciales y Semipresenciales de las Universidades y Escuelas Politécnicas del Ecuador*. Quito.

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Ciudad de México: McGraw Hill.

Charalampos, M. (2011). *Análisis comparativo entre el empleo de aceite y la generación directa de vapor, en una planta termosolar de canales parabólicos*. Sevilla: Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla.

Chipugsi, F. (2014). *Diseño e Implementación de un Sistema de Monitoreo de Energía producida por un Colector Solar Plano*. Latacunga: ESPE.

Conelec. (2008). *Atlas Solar del Ecuador con fines de generación eléctrica*. Quito.

Criollo Cumbe, A. V., & Pogo Guamán, Á. M. Diseño de un sistema dual de calentamiento de agua, por medio de energía solar y GLP y diseño estructural de la cubierta para la piscina de la hostería "Los Juanes" en el cantón Santa Isabel. *Diseño de Máquinas*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca.

- Cuestas, R., & Rincón, I. (2011). *Diseño y construcción y evaluación operacional a pequeña escala de un potabilizador solar parabólico para agua*. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga.
- Echeverría, C. (11 de 09 de 2011). *Diseño de un colector cilindro parabólico compuesto con aplicación para el calentamiento de agua*. Piura: Universidad de Piura.
- EcoWorthy. (2015). *Eco Worthy*. Recuperado el 12 de junio de 2017, de <http://www.eco-worthy.com/>
- EcuadorWorld. (2010). *Ecuador World*. Recuperado el 18 de mayo de 2017, de http://www.ecuaworld.ec/mapa_ecuador.htm
- Fabara, J. (2016). *Desarrollo experimental de un sistema de seguimiento solar para la obtención de la máxima radiación en concentradores cilíndrico parabólicos*. Sangolquí: ESPE.
- Ferrer, F. J. (2015). *Instituto de Tecnologías Educativas*. Recuperado el 18 de mayo de 2017, de https://fjferreer.webs.ull.es/Apuntes3/Leccion02/3_recorrido_aparente_del_sol.html
- Godoy, M. (2016). *Concentración de la radiación solar*. Madrid.
- Incropera, F. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico D.F.: Prentice Hall Hispanoamericana.
- León, W. M., & Sarmiento Vintimilla, J. C. (2011). *Análisis de factibilidad técnica y económica en la implementación de energía fotovoltaica y termo solar para generación de electricidad y calentamiento de agua mediante paneles solares fijos y con un seguidor de sol de construcción casera, para una vivien*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Light, S. (2015). *Solar Light*. Recuperado el 17 de mayo de 2017, de <http://solarlight.com/es/sensores-solares/>
- Madrid, V. (2009). *Curso de Energía Solar*. Madrid: Mundiprensa.

- Mahjouri, F. (2015). Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors. *Thermo Technologies*.
- Mendoza, A. (2015). *Seguidor dinámico solar para incrementar la eficiencia de placas fotovoltaicas mediante fotocélulas y servomotores controlados por un microcontrolador*. Valencia.
- Murillo, A. (21 de Mayo de 2011). *SMI Energías Renovables*. Recuperado el 12 de mayo de 2017, de <https://smienergias.wordpress.com/2011/05/21/tecnologia-generadora-de-energia-termsolar/>
- Nandawani, S. (2005). *Energía Solar - Conceptos básicos y su utilización*. Heredia.
- Pacco, K. Sistemaa híbrido eólico-fotovoltaico (SHEFV) de baja potencia. *Sista híbrido eólico-fotovoltaico (SHEFV) de baja potencia*. Universidad privada de Tacna, Tacna.
- Pacheco, W. (2006). Colector parabólico compuesto para. *Industrial Data*, 9.
- Paredes, C. (2012). *Diseño de captador solar cilíndrico parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*. Asunción.
- Paul, I. D. (2000). *Coeficiente de transferencia Convectiva h en el interior de un destilador tipo Batea*. Argentina: INENCO.
- Phocos. (2016). *Phocos*. Recuperado el 27 de junio de 2017, de <http://www.phocos.com/resources/datasheets/>
- Reay, D., Kew, P., & McGlen, R. (2014). *Heat Pipes; Theory, Design and Applications*. Oxford: Elsevier.
- Rosas, C. (2012). Desarrollo Histórico de los Tubos de Calor y sus Aplicaciones. *ResearchGate*, 50-59.
- Salcedo, V. (2011). *Influencia de la tecnología de vacío en tubos sobre la eficiencia para el calentamiento de agua usando la Energía Solar*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

- Salgado, J. F. (2010). *Compendio de Energía Solar*. Madrid: Mundiprensa.
- Thermacore, A. (2016). *Thermacore*. Recuperado el 3 de junio de 2017, de <http://www.thermacore.com/thermal-basics/heat-pipe-technology.aspx>
- Thermosol. (2017). *Termosol*. Recuperado el 29 de mayo de 2017, de <http://thermosol.com.mx/tubosDeVidrio.html>
- Velazquez, J. (2006). *Meteorología Aeronáutica I*. México D.F.: Seneam SCT.
- Xintest. (2016). *Xintest*. Recuperado el 17 de junio de 2017, de <http://www.xintest.com.cn/>
- Zarza, E. (08 de 2003). *Generación Directa de Vapor con Colectores Solares Cilindro Parabólicos Proyecto Direct Solar Steam (DISS)*. Sevilla.

SIMBOLOGÍA

a	Absortividad de la superficie selectiva
g	Aceleración de la gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)
h	Altura del sol
α	Ángulo de abertura de la parábola
θ	Ángulo de incidencia solar
w	Ángulo horario
S_C	Área de apertura de la superficie de la base reflectora (m^2)
A	Área de apertura del colector
A_s	Área de la superficie (m^2)
A_r	Área del receptor
A_r	Área del receptor
a	Azimut
C_p	Calor específico del agua ($4,18 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C}$)
Q_{inc}	Calor incidente sobre el tubo absorbedor
Q_{nec}	Calor necesario para elevar la temperatura de una sustancia
h_i	Coefficiente de convección del agua
h_{conv}	Coefficiente de transferencia de calor por convección
h_{rad}	Coefficiente de transferencia de calor por radiación
R_v	Coefficiente de transferencia por conducción de la cubierta
R_a	Coefficiente de transferencia por conducción del vacío
U_c	Coefficiente global de pérdidas al exterior
CC	Colector cilíndrico
CCP	Colector cilindro parabólico
CPC	Colector parabólico compuesto
ka	Conductividad térmica del aire
k	Conductividad térmica según material
σ	Constante de Stefan Boltzman [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$].
I_{sis}	Corriente máxima del sistema [A]
δ	Declinación de la Tierra respecto al sol
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deflexión máxima del material
$\delta_{simulado}$	Deflexión máxima generada por software
DCL	Diagrama de cuerpo libre

D_t	Diámetro del tanque de almacenamiento
D_{ev}	Diámetro exterior de la cubierta de vidrio
D_e	Diámetro exterior del tubo de vidrio interior
D_{iv}	Diámetro interior de la cubierta de vidrio
\emptyset_{min}	Diámetro mínimo del tubo receptor
ΔT	Diferencial de temperatura
ρ	Distancia desde el punto (X_{max}, Y_{max}) al foco de la parábola
L_{B-r}	Distancia entre la batería y el regulador
F	Distancia focal
F_m	Distancia media entre la superficie de la parábola y el receptor
ET	Ecuación del tiempo
Se	El área de pérdida del colector
ε	Emisividad de la superficie de la placa
En	Energía requerida por el sistema
E_B	Energía requerida por la batería
Q_{sol}	Energía solar incidente sobre el colector
$\sigma_{simulado}$	Esfuerzo máximo generado por software
σ_{perm}	Esfuerzo permisible
ξ	Espesor de aislamiento
γ	Factor de interceptación
v	Frecuencia de onda
P	Fuerza aplicada sobre una estructura
HO	Hora oficial en el punto a estudiar
hs	Hora solar
ht	Horas de trabajo del sistema
Lr	Lado recto de la parábola
φ	Latitud
S	Longitud de la curva
l	Longitud de la estructura
λ_o	Longitud de onda
L_{cil}	Longitud del cilindro
L	Longitud del colector
λm	Longitud del meridiano correspondiente a la ubicación

λ	Longitud del meridiano sobre el punto a estudiar
L_t	Longitud del tanque de almacenamiento.
L_e	Longitud efectiva del colector
m	Masa (Kg)
K	Modificador por ángulo de incidencia
E	Módulo de Young del material
I	Momento de inercia de la estructura según su geometría
$Q_{ABS,cond/conv}$	Pérdidas del tubo absorbente por conducción y convección.
$Q_{ABS,radiación}$	Pérdidas del tubo absorbente por radiación.
Q_L	Pérdidas térmicas totales en el tubo absorbedor del CCP
P_{panel}	Potencia del panel [W]
P_{sis}	Potencia del sistema [W]
$X_{máx}$	Punto máximo en el eje "X" de la parábola
$Y_{máx}$	Punto máximo en el eje "Y" de la parábola
I_{ef}	Radiación solar directa efectiva (W/m^2)
$I_{o(avg,mes)}$	Radiación solar directa máxima por día
I_{ef}	Radiación solar efectiva
$I_{o(media)}$	Radiación solar media
r_{tr}	Radio del tubo receptor
$\dot{Q}_{cond,cil}$	Rapidez de transferencia de calor por radiación
Q_{rad}	Rapidez de transferencia de calor por radiación
C	Razón de concentración geométrica del CCP
r	Reflectividad de la superficie del concentrador
RF	Reflector Fresnel
η_B	Rendimiento de la batería
n_{global}	Rendimiento global
$n_{opt.0^\circ}$	Rendimiento óptico con ángulo de incidencia de 0°
n_{opt}	Rendimiento óptico pico del CCP
n_{th}	Rendimiento térmico del CCP
S_y	Resistencia a la tensión según el material
R	Resistencia térmica
\mathcal{R}	Resistencia térmica del material por unidad de área superficial

S_{cond}	Superficie conductor
S_{ef}	Superficie efectiva de captación del colector
T_{∞}	Temperatura ambiente dada en K.
T_s	Temperatura de la superficie, K.
T_{agua}	Temperatura del agua almacenada dentro de un tanque
T_{cielo}	Temperatura del cielo, K.
T_r	Temperatura del receptor
T_f	Temperatura final(°C).
T_i	Temperatura inicial (°C).
TSM	Tiempo solar medio
TSV	Tiempo solar verdadero
τ_x	Torque
τ	Transmisividad del cristal
c	Velocidad de la luz
V_v	Velocidad del viento (m/s)
V_{op}	Voltaje de operación del sistema [V]
V	Volumen del tanque

ANEXOS



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

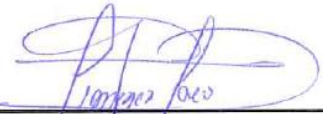
DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTROMECAÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores:

CARLOS ALEJANDRO MANTILLA TENORIO y JOSÉ MIGUEL TORO ZAMBRANO

En la ciudad de Latacunga, a los 02 días del mes de Agosto del 2017.



Ing. Mario Jiménez
DIRECTOR DEL PROYECTO

Aprobado por:



Ing. Katya Torres
DIRECTORA DE CARRERA




Dr. Rodrigo Vaca
SECRETARIO ACADÉMICO