

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR QUE
PERMITA APROVECHAR LA ENERGÍA GENERADA POR UN CONCENTRADOR
CILÍNDRICO PARABÓLICO COMO EQUIPO DE LABORATORIO FUNCIONAL
PARA LA FACULTAD DE INGENIERÍA.**

**AUTOR DEL PROYECTO
SERGIO ANDRÉS HERRERA CELIS**

**Trabajo de grado para optar por el título de
INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR
Jair Zapata Peña. Ph.D**

**UNIVERSIDAD LIBRE
FACULTAD DE INGENIERIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA
BOGOTA D.C
2019**

Nota de Aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

I. AGRADECIMIENTOS.

Para empezar, doy gracias a toda mi familia por su ejemplo y apoyo incondicional en especial a mis padres por su comprensión en una etapa de mi vida llena de retos, con estas palabras también deseo mostrar mi eterna gratitud a la universidad libre que me a brindado un segundo hogar por largos años donde conocí excelentes maestros y maestras, que cambiaron mi forma de pensar en lo que deseo aportar a la sociedad en el ahora y el futuro. Esta universidad me brindo buenos amigos junto con vivencias que marcaron mi vida. Para terminar sin ser menos importante agradezco al Doctor Jair Zapata que entrego mucho tiempo, dedicación y experiencia en la dirección del proyecto más importante que desarrollado hasta ahora en trayectoria.

II. RESUMEN.

En este trabajo de grado se realizó la implementación de un concentrador cilíndrico parabólico (CCP) acoplado a un intercambiador de calor (IC) como equipo de laboratorio para la enseñanza de la energía térmica solar en la Facultad de Ingeniería. Se diseñó y construyó un intercambiador de calor de tubos concéntricos, se restauró el CCP cambiando piezas dañadas, mejorando componentes y actualizando el sistema de seguimiento del sol mediante una tarjeta de desarrollo Arduino; de igual manera, se implementaron sensores en el intercambiador de calor de flujo y temperatura, así como el acondicionamiento de bombas de agua para garantizar el movimiento del fluido en el sistema CCP+IC.

Para este desarrollo se trabajaron fenómenos relacionados con la trayectoria del sol, la radiación y transferencia de calor en el CCP y la transferencia de calor y su acumulación en el IC. Se hizo un análisis bajo metodología QFD para la selección del modelo de intercambiador de calor más apropiado para el sistema aquí dispuesto, según requerimientos técnicos, de eficiencia y recursos. En consecuencia, se definieron parámetros geométricos y de materiales para el diseño del IC, se presenta modelado y cálculos para dimensiones del IC y su respectivo acople al CCP, que se utilizaron para la respectiva construcción y mejoramiento del equipo desarrollado. Finalmente se propone la estructuración del equipo como recurso didáctico para prácticas experimentales, mediante el diseño de dos guías de laboratorio, como aporte a los procesos formativos que podrán ser utilizadas en la Facultad de Ingeniería para los programas de Mecánica, Ambiental y la Maestría.

III. DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD.

Por medio del presente certifico que el documento presentado como opción de grado para la carrera Ingeniería mecánica de la Universidad Libre es producto de mi autoría y directa contribución intelectual, todas las referencias de textos, revistas, investigaciones y datos están debidamente bien referenciados con la norma NTC 6166, además declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado de ninguna manera, para su respectiva evaluación.

En caso de que el trabajo de grado llegue a ser aprobado para su publicación, como autor y propietario del documento, autorizo de manera ilimitada que la Universidad Libre de Bogotá puede exhibirlo de manera autónoma.

IV. LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Concentradores cilindros parabólicos.....	18
Figura 2. definición de latitud, ángulo horario y declinación solar.....	20
Figura 3. pérdidas generadas por sombras a través del concentrador cilíndrico parabólico.....	21
Figura 4. Intercambiador de calor de doble tubo a) flujo paralelo y b) contraflujo.....	28
Figura 5. Intercambiadores de calor tipo Coraz.....	28
Figura. 6. Intercambiador de calor tipo placas y armazón.....	34
Figura 7. Matriz de calidad, como se relacionan las filas y columnas.....	36
Figura 8. Grafica ángulo de incidencia versus la hora del día para el día 22 de enero.....	42
Figura 9. Grafica de eficiencia óptica durante el día, el día 14 de cada mes del año.....	45
Figura10. Esquema de funcionamiento de programa en Arduino.....	49
Figura 11. Grafica de radiación solar directa versus temperatura a la salida del receptor.....	56
Figura 12. Grafica de radiación solar directa vs calor absorbido por el receptor.....	57
Figura 13. Grafica de temperatura versus flujo masico.....	58
Figura 14. Cuantificación de las relaciones.	63
Figura 15. Grafica flujo volumétrico versus longitud del intercambiador de calor.....	72
Figura. 16. CCP antes de la restauración.....	74
Figura 17. Cargas en la estructura.....	78
Figura 18. Análisis del punto A del eje.....	79
Figura 19. Vista de Chumacera tipo P250.....	84
Figura 20. Soportes del intercambiador de calor.....	85
figura 21. Diagrama de cuerpo libre del intercambiador.....	86
figura 22. Ubicación del centroide en el arreglo de tornillos.....	87
Figura 22. Diagrama de cuerpo libre de la cercha.....	87
Figura 23. Cargas en la simulación de estructura.....	89
Figura 24. Análisis estructural de la deformación de la estructura	90
Figura 25. Análisis estructural de los esfuerzos.....	90
Figura 26. Diagrama de cuerpo libre de la cercha.....	91
Figura 27. Medidas de las gargantas.....	92
Figura 28. Modelado de CCP.....	93
Figura 29. resultado de la restauración del CCP.....	97
Figura 30. Modelado intercambiador de calor de doble tubo.....	97
Figura 31. Soldadura blanda de estaña con soplete.....	100
Figura 32. Intercambiador de calor.....	100
Figura 32. Modelado de la integración del CCP más el intercambiador de calor.....	101
Figura 34. Foto de la construcción de la Integración del CCP más el intercambiador de calor....	103

V. LISTA DE TABLAS.

Tabla 1 Número de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en una corona circular con una de las superficies aislada y la otra isotérmica.....	30
Tabla 2. Fases del desarrollo del proyecto.....	36
Tabla 3. Variables iniciales geométricas del CCP.....	41
Tabla 4. Variables termo físicas y geométricas del CCP.....	43
Tabla 5. Eficiencia óptica durante el día, el día 14 de cada mes del año.....	44
Tabla 6. Dispositivos sistema de movimiento.....	46
Tabla 7. Dispositivos para adquisición de datos.....	47
Tabla 8. Resultados del comportamiento del CCP en función de la radiación solar.....	56
Tabla 9. Variación de la temperatura de salida del CCP en función del flujo masico.....	57
Tabla 10. Matriz de importancia de los requerimientos del cliente.....	62
Tabla 11. Requerimientos del cliente.....	63
Tabla 12. Requerimientos de ingeniería.....	63
Tabla 13. Matriz QFD para el intercambiador de calor de tubo coraza.	64
Tabla 14. Matriz QFD para el intercambiador de tubos doble tubo.....	65
Tabla 15. Comparación de los materiales para el intercambiador de calor.....	67
Tabla 16. Valores iniciales de la geometría de los tubos del intercambiador de calor de doble tubo.....	67
Tabla 17. Propiedades del agua caliente a la entrada del intercambiador de calor.....	68
Tabla 18. Propiedades del agua fría a la entrada del intercambiador.....	68
Tabla 19. Definición de temperaturas en el intercambiador.....	68
Tabla 20. Datos arrojados por la variación del flujo volumétrico en el intercambiador de calor....	72
Tabla 21. Selección de elementos útiles del CCP antes de la restauración partes estructurales y del reflector.....	75
Tabla 22. Selección de elementos útiles del CCP antes de la restauración de partes restantes.....	76
Tabla 23. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes estructurales.....	90
Tabla 24. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes del reflector.....	91
Tabla 25. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes restantes.....	92
Tabla 26. Modelado y Foto de los elementos del intercambiador de calor acoplado al P.....	94
Tabla 27. Piezas principales de la integración del CCP con el intercambiador de calor.....	97

VI. LETRAS ROMANAS O LATINAS Y LETRAS GRIEGAS.

δ	declinación del Sol
α	posición Angular de la Tierra en la Órbita
Et	ecuación de Tiempo
B	función del día del año
AST	tiempo solar
LST	tiempo local estándar
h	hora del día
mi	minuto
se	segundo
Ll	longitud meridiana
lt	grados de arco en la longitud
min	minuto de arco en la longitud
seg	segundo de arco en la longitud
SL	longitud Meridiano de referencia que para Colombia
h	ángulo horario
L	latitud
la	grados de arco en la latitud
mn	minuto de arco en la latitud
sg	segundo de arco en la latitud
θ	ángulo de incidencia
β	ángulo entre el plano dado y la superficie horizontal
γ	ángulo azimut
η_o	eficiencia Óptica del Concentrador cilíndrico parabólico
ρ	reflectancia de la superficie
τ	transmitancia de la cubierta de vidrio
α	absortancia del receptor
φ	factor de interceptación
A_e	efecto final
A_f	factor geométrico
A_p	área de pérdidas más el efecto final
Y_m	altura de la parábola
W_a	apertura de la parábola
A_b	área perdida
U_L	coeficiente de pérdidas por transferencia de calor en el receptor
F'	factor de eficiencia del colector

F_R	factor de remoción de calor del colector
A_r	área del absorbedor
hr	coeficiente de radiación entre el tubo receptor y la envolvente de vidrio
A_g	área de la cubierta de vidrio
σ	constante de Stefan Boltzmann
ε_r	emisividad del material
ε_g	emisividad de la cubierta de vidrio
T_g	temperatura de la cubierta de vidrio
T_c	temperatura de la envolvente de vidrio
h_c	coeficiente de Pérdidas por Radiación
T_a	temperatura ambiente.
h_c	coeficiente de pérdidas por radiación de la cubierta de vidrio al ambiente.
Q_u	calor útil entregado al fluido de trabajo en el absorbedor
ρ_a	densidad del aire
d_g	diámetro de la envolvente de vidrio
A_a	área de apertura
\dot{m}_h	flujo másico del líquido caliente
h_w	coeficiente de transferencia de calor por convección al interior del receptor
Nu_a	número de Nusselt para las pérdidas debido el viento
Re_a	Reynolds para el viento
ρ_a	densidad del aire
v_a	velocidad del viento
μ_a	viscosidad dinámica del aire
d_g	diámetro de la envolvente de vidrio
Q_u	calor útil entregado al fluido de trabajo en el absorbedor
T_i	temperatura de entrada del fluido en el receptor
G_b	radiación directa
A_a	área de apertura
A_r	área del absorbedor
F_R	factor de remoción
\dot{m}_l	flujo másico del líquido
Cp_l	calor específico del líquido al interior del receptor
\hat{F}	factor de eficiencia del colector
k_{cu}	conductividad térmica del receptor
h_{fi}	coeficiente de convección al interior del tubo
k_l	conductividad térmica del líquido a la entrada del receptor
Nu_l	número de Nusselt del líquido a la entrada del receptor

Re_l	número de Reynolds del líquido a la entrada del receptor
V_l	velocidad del líquido a la entrada del receptor
ν_l	viscosidad cinemática del líquido a la entrada del receptor
T_o	temperatura de salida del líquido en el receptor
η	eficiencia instantánea del concentrador solar
c	relación de concentración del Concentración de colectores
q	calor transferido en el intercambiador de calor
T_h	temperaturas del agua caliente
T_c	temperaturas del agua fría
Cp_h	capacidad calorífica del fluido caliente
Cp_c	capacidad calorífica del fluido frío
\dot{m}_h	flujo másico del fluido caliente
\dot{m}_c	flujo másico del fluido frío
U_i	coeficiente total de transferencia de calor
A_s	área de transferencia de calor
ΔT_m	temperatura media logarítmica
Di_l	diámetro interno del tubo receptor
Di_h	diámetro interior del tubo donde circula el fluido caliente
Do_h	diámetro Exterior del tubo donde circula el fluido caliente
H_o	coeficiente de transferencia de calor por convección del agua fría
H_i	coeficiente de transferencia de calor por convección del agua caliente
K_h	coeficiente de conducción del fluido al caliente
K_c	coeficiente de conducción del fluido al frío
D_h	diámetro anular o hidráulico
Nu_i	número de Nusselt del fluido frío
Nu_o	número de Nusselt del fluido caliente
f	factor de fricción para tubos lisos
V_h	velocidad del líquido caliente
V_c	velocidad del líquido frío
V_h	velocidad del líquido caliente
ρ_c	densidad del fluido frío
ν_c	viscosidad cinemática del fluido frío
μ_c	viscosidad dinámica del fluido frío
ρ_h	densidad del fluido caliente
ν_h	viscosidad cinemática del fluido caliente
μ_h	viscosidad dinámica del fluido caliente
Re_h	número de Reynolds del líquido caliente
Re_c	número de Reynolds del líquido frío

VI. TABLA DE CONTENIDO

1.	CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	ANTECEDENTES.....	13
1.2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.3.	JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4.	OBJETIVOS.....	16
1.4.1.	Objetivo general.....	16
1.4.2.	Objetivos específicos.....	17
2.	CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO.....	17
2.1.	ENERGÍA SOLAR.....	17
2.1.1.	Concentradores solares.....	17
2.2.	TRAYECTORIA DEL SOL VISTA DESDE LA TIERRA.....	18
2.3.	ANÁLISIS OPTICO DEL CONCENTRADOR SOLAR CILINDRICO.....	21
2.4.	ANÁLISIS TÉRMICO DEL CCP.....	23
2.5.	INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	27
2.5.1.	Caída de la presión y potencia de bombeo.....	32
2.6.	ESTÁTICA, MECÁNICA DE MATERIALES Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS 33	
2.7.	METODOLOGÍA QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT).....	34
2.8.	MARCO LEGAL.....	35
3.	METODOLOGÍA.....	35
4.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	37
4.1.	DESARROLLO DE LA FASE 1, INPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.....	38
4.1.1.	Trayectoria del sol.....	39
4.1.2.	La eficiencia Óptica del Concentrador cilíndrico parabólico.....	43
4.1.3.	Dispositivos electrónicos para el sistema de seguimiento del sol del CCP.....	46
4.1.4.	Dispositivos electrónicos para el sistema de adquisición de datos del intercambiador de calor y el CCP.....	48
4.1.5.	Esquema del programa sistema de seguimiento del sol y adquisición de datos.....	48

4.2.	DESARROLLO DE LA FASE 2, CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL CCP.....	51
4.2.1.	Cálculo de la eficiencia térmica del CCP.....	51
4.3.	DESARROLLO DE LAS FASE 3 SE SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR MEDIANTE LA METODOLOGÍA QFD.....	59
4.3.1.	Metodología QFD (quality function deployment) para selección del intercambiador de calor.....	59
4.4.	DESARROLLO DE LA FASE 4 DONDE SE DISEÑO Y CONSTRUYO EL PROTOTIPO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.	67
4.4.1.	Cálculo dimensiones del intercambiador de calor de doble tubo.....	67
4.4.2.	Calculo caída de la presión y potencia de bombeo.....	73
4.4.3.	Selección del flujómetro.....	75
4.4.4.	Restauración del concentrador cilíndrico.....	75
4.4.5.	Cálculos estructurales.....	78
4.4.6.	Modelado y construcción del intercambiador de calor vinculado al CCP.	98
4.1.	DESARROLLO DE LA FASE 5 ACONDICIONAMIENTO DEL MONTAJE COMO EQUIPO DE LABORATORIO.....	104
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	105
5.1.	ANÁLISIS DE LA FASE 1.....	105
5.2.	ANÁLISIS DE LA FASE 2.....	106
5.3.	ANÁLISIS DE LA FASE 3.....	106
5.4.	ANÁLISIS DE LA FASE 4.....	106
5.5.	ANÁLISIS DE LA FASE 5.....	107
6.	CONCLUSIONES.....	108
7.	RECOMENDACIONES.....	110
8.	REFERENCIAS.....	111

1. CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.

El siguiente documento contiene el desarrollo de la implementación de un intercambiador de calor que aproveche la energía que pueda ceder un fluido que circule en el foco de un concentrador cilíndrico parabólico el cual tiene el propósito de concentrar la radiación solar para aprovechar la energía solar. Con la primera parte de este documento se pretende dar una muestra del planteamiento inicial y fuentes fundamentales de este proyecto como lo son los antecedentes que darán una luz del estado de las investigaciones actuales de los temas referentes al proyecto anteriormente mencionado, el planteamiento del problema que se desea abordar, la justificación del por qué se desarrolló este proyecto y los objetivos que se alcanzaron.

1.1. ANTECEDENTES.

La necesidad de energía que desencadena una serie de conductas comenzando con buscar recursos en sitios que pueden llegar a generar daños a los ecosistemas que a su vez contribuye a la disminución del oxígeno sobre la tierra, entre otros. Como consecuencia de estos efectos se ha buscado aprovechar diferentes medios alternativos para la obtención de energía provenientes de la energía solar, el viento, la biomasa, el agua, etc. (De La Hoz & Gonzalez, 2014).

Se generaron productos como fotoceldas, aerogeneradores, generadores mareométricos, generación de energía térmica o calor de procesos (colectores solares), entre otros (Lopez & Hortua, 2013). Contribuyendo a minimizar el consumo energético de instalaciones e industrias, de tal manera que sea posible aportar en la mitigación de los problemas ambientales y la reducción en el uso de recursos naturales no renovables ha llevado a los países desarrollados a implementar este tipo de energías como lo son China Estados Unidos y países europeos en especial España. Que cuenta con el Centro de investigaciones de Almería que aporta conocimiento al desarrollo de la implementación de la energía solar térmica como se puede apreciar en el artículo “La energía solar termoeléctrica en España” en el cual se exponen las inversiones realizadas en este campo lo que llevó a que en el año 2010 ya se hayan instalado y puesta en marcha 12 plantas generadoras de este tipo que suman 482.4 megavatios (Cayetano y Garcia, 2010).

Con la implementación adecuada de concentradores solares cilíndricos parabólicos se ha logrado suplir parte del calor requerido por ejemplo en una caldera o un simple calentador de agua residencial con ayuda de los intercambiadores de calor que pueden realizar la transferencia de calor de un flujo de agua caliente a un flujo de agua fría de manera que no tengan necesidad de mezclarse los fluidos llegando a usar fluidos térmicos como sales y aceites que alcanzan una mayor de energía por su alta capacidad calorífica aumentando así las temperaturas de operación .

A continuación, se presentan algunas investigaciones realizadas que engloban las temáticas anteriormente mencionadas:

Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para calor de proceso: Este proyecto se diseñó y construyó un Concentrador Solar de Canal Parabólico que sirve para la producción de vapor de agua a una temperatura aproximada de 120°C a partir de la energía solar donde además se presenta un análisis y costo del sistema (Vidriales, 2007).

Diseño y mantenimiento de equipos de transferencia de calor: en esta Tesis se expone las ecuaciones básicas para el diseño de intercambiadores de Calor por medio de la diferencia media logarítmica además se exponen los parámetros de diseño de las normas ASME y TEMA como también los efectos del ensuciamiento, la importancia del mantenimiento en equipos de transferencia de calor además un caso práctico del diseño de un intercambiador de calor de carcasa y tubos (Garza,1997).
Diseño y fabricación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos para los Laboratorios de Termo fluidos de la Universidad Santo Tomás: como se menciona en el título del proyecto se realizó el diseño conceptual y de detalle de un intercambiador de calor de tubos concéntricos que se integró al intercambiador de calor de tubo coraza que ya existía en la universidad mencionada, el tipo de intercambiador de doble tubo se seleccionó realizando un análisis por la metodología QFD (que se mencionara en los próximos capítulos), con el fin de comparar diferentes equipos de laboratorio usados y existentes en el mercado que se semejaran a los requerimiento de equipo de laboratorio de la universidad Santo Tomas (Guillen,2014).

Simulación y diseño del modelo de captación de energía en una planta termo solar con SolidWorks: en este proyecto se analizó cómo funcionan las plantas de energía térmica que usa Concentradores cilíndricos parabólicos, para poder simular mediante SolidWorks, el comportamiento del fluido térmico que circula en el receptor. Con la simulación se compararon diferentes fluidos térmicos que ofrece el mercado como las sales fundidas para realizar una comparativa de costo beneficio en un Planta de concentración solar (Soriano,2016).

Diseño de una planta solar de colectores cilíndrico parabólicos para una lavandería industrial en Vícar (Almería): con este proyecto se logró dimensionar una planta concentradores cilíndricos parabólicos que se acoplara a las necesidades de calor para procesos en una lavandería teniendo en cuenta que se realizó un análisis térmico y se tuvieron en cuenta restricciones geométricas además de analizar el recurso térmico en Almeira una ciudad española (Rodríguez, 2014).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

De acuerdo con algunos autores actualmente en Colombia el panorama relacionado con las investigaciones en el campo de exploración de las energías renovables a partir del uso de la energía térmica proveniente del sol, aún es escaso. (Rodríguez, 2009; Lopez y Hortua, 2013; De la hoz y Gonzales, 2014). Además, se encuentra que son pocas las entidades que se arriesgan a brindar sistemas robustos que permitan reemplazar la energía eléctrica convencional por dispositivos para

el uso de energía térmica solar, principalmente por dos razones, una de carácter económico debido a la alta inversión inicial en la instalación de este tipo de sistemas, y de otro lado la baja eficiencia energética. Este panorama muestra que los pocos estudios y avances generan en el entorno nacional un desconocimiento en el uso de la energía solar para su aprovechamiento en la generación de calor mediante aparatos distinto a los paneles fotovoltaicos.

Mediante la recopilación de la información se logró apreciar las cualidades en cuanto a su aplicabilidad de los diferentes tipos de concentradores solares uno de los más viables como objeto de estudio por el manejo de las altas temperaturas alcanzadas en sus focos como lo son Concentradores Cilindro Parabólico (CCP) que podría reemplazar tecnologías en las que son necesarias grandes cantidades de energía para generar productos. Su adecuado uso permitirá innovaciones relevantes en este campo y será de gran importancia en procesos como la destilación de aceites, alcoholes, la pasteurización de leche o la producción de calor para diferentes usos vistos sus alcances (Romero, Bistoni y Iriarte, 2007; Vicario, 2013).

Teniendo en cuenta este panorama de investigaciones y la necesidad latente en la búsqueda de alternativas para diseñar y proyectar sistemas solares térmicos para diferentes usos en Colombia; se encuentra el rol protagonista que la ingeniería posee frente a este campo de acción para los futuros desarrollos en investigaciones e implementaciones de esta alternativa de generación energética. En este sentido, la formación de ingenieros requiere un especial interés en la integración de estos campos de conocimientos a su que hacer profesional, y su desarrollo, de cara a los requerimientos y problemáticas emergentes en el avance tecnológico y energético del país.

De acuerdo a esto, se encuentra que en la Universidad Libre no se cuenta actualmente con equipos de laboratorio para la enseñanza y el desarrollo de prácticas experimentales que aborden las temáticas de energía térmica solar y el uso de CCP. De igual manera, se evidencia que generalmente la implementación de sistemas CCP, por sí mismos no son utilitarios, si no se hace un correcto uso de la energía concentrada; debido a esto, estos sistemas deben ser complementados con dispositivos adicionales como intercambiadores de calor, que pueden ser apropiados para suplir algunas necesidades energéticas haciendo uso de la energía térmica solar. En consecuencia el diseño de intercambiadores de calor tiene alta versatilidad en su aplicabilidad por ser un dispositivo altamente usado en la industria, además las diferentes investigaciones, han arrojando una gran gama de posibilidades en su uso, derivadas por las variaciones de operación que admite, lográndose diseñar dispositivos que puedan soportar altas temperaturas a grandes caudales o bajas temperaturas a bajos caudales, para el calentamiento de agua sanitaria o como calentador auxiliar en procesos industriales. Este aspecto evidencio una necesidad de la Facultad de Ingeniería, tanto en pregrado como en posgrado, relacionada con material de laboratorio para la enseñanza de tópicos asociados a radiación solar, energía térmica solar, transferencia de calor, entre otros.

De acuerdo a la problemática anteriormente descrita se planteó como pregunta de investigación para el desarrollo de este proyecto la siguiente:

¿Qué factores se deben tener en cuenta para el diseño y construcción de un intercambiador de calor que permita aprovechar la energía generada por un Concentrador Cilíndrico Parabólico como equipo de laboratorio funcional para la Facultad de Ingeniería?

1.3. JUSTIFICACIÓN.

La pertinencia de esta propuesta de trabajo de grado, se fundamentó en dos aspectos, el primero enfocado a la falencia de equipos de laboratorio en el campo de la energía solar en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, y el segundo encaminado a la importancia de este tipo de equipos como material de apoyo para la enseñanza de estas temáticas, tanto en el pregrado como en posgrado. Así, como se planteó anteriormente, se evidenció una necesidad de equipos didácticos de laboratorio en la Facultad para el desarrollo de prácticas experimentales que aborden las temáticas de energía térmica solar y el uso de CCP. De acuerdo a esto, se busca que la adecuación de este CCP como equipo didáctico de laboratorio contribuya acertadamente para el mejoramiento de los procesos de formación llevados a cabo en los programas como:

- Ingeniería Mecánica- áreas de térmica
- Ingeniería Ambiental- área de energías alternativas
- Maestría en Ingeniería con Énfasis Energías Alternativas- área de energía solar

De acuerdo a lo planteado anteriormente, con este proyecto se buscó materializar el montaje de un CCP acoplado a un intercambiador de calor como elemento de laboratorio: El montaje de este equipo de laboratorio contará con la instalación del sistema en un sitio específico, mediante el diseño de un intercambiador de calor se aprovechará el calor concentrado del tubo absorbedor para que este seda energía a un fluido con menor temperatura, para la selección del intercambiador más apropiado se usó el modelo de Diseño QFD (Quality Function Deployment), para la realización de una práctica: orientada para el reconocimiento y calibración del sistema.

Para este fin, además, se construyó y programó un circuito electrónico que permita inclinar el CCP siguiendo la trayectoria del sol dependiendo de la posición geográfica donde esté ubicado, además el dispositivo tendrá la capacidad de realizar la adquisición de datos como la temperatura en diferentes componentes del CCP. La programación se dejará abierta para posibles cambios del valor de la latitud para futuras experimentaciones en otros sitios de la geografía local o nacional. Además, este sistema está implementado bajo controlador Arduino, que es una tecnología que cuenta con diferentes usos en la actualidad y que presenta alto potencial de versatilidad para futuras mejora.

1.4. OBJETIVOS.

1.4.1. Objetivo general.

Implementar un concentrador cilíndrico parabólico acoplado a un intercambiador de calor como equipo de laboratorio para la enseñanza de la energía térmica solar en la facultad de Ingeniería.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Desarrollar el sistema de seguimiento y adquisición de datos bajo la programación de una tarjeta de desarrollo Arduino que involucre el sistema eléctrico y mecánico del concentrador cilíndrico parabólico.
- Evaluar el desempeño del sistema térmico en función de las variables ambientales y de la radiación solar incidente en la sede el bosque de la Universidad Libre.
- Seleccionar un intercambiador de calor por la metodología QFD que se ajuste al flujo de calor adquirido por el concentrador cilíndrico parabólico.
- Diseñar y construir un prototipo de intercambiador que permita el aprovechamiento del calor del concentrador cilíndrico parabólico.
- Acondicionar el montaje del Concentrador Cilíndrico Parabólico acoplado a un intercambiador de calor, como un equipo funcional de laboratorio para la Facultad de Ingeniería.

2. CAPITULO 2. MARCO TEÓRICO

En el siguiente capítulo se va describir la teoría que enmarca los referentes teóricos y cálculos de ingeniería previos a la resolución del proyecto, inicialmente para el primer segmento se discute la energía solar que será el recurso energético del cual se va hacer uso, para el segundo segmento se analizaron los concentradores solares que serán los que aprovecharan la energía solar térmica utilizada, en el tercer segmento los concentradores cilíndricos, el cuarto apartado presenta bases teóricas sobre la trayectoria del sol, en la quinta parte se habla sobre eficiencia óptica y térmica, en el sexto apartado se presenta la Metodología QFD (Quality Function Deployment) y finalmente en el séptimo parte del capítulo se presenta el desarrollo del marco legal.

2.1. ENERGÍA SOLAR

Es toda la energía que provee la estrella más cercana a la tierra que es el Sol el cual emite irradiancia que dota la superficie terrestre de aproximadamente 1367 w/m^2 de los cuales aproximadamente 367 w/m^2 son disipados en la atmosfera debido a condiciones climáticas, la temporada del año, la contaminación entre otros (Pacesila, 2015).

2.1.1. Concentradores solares

Estos aparatos realizan un aprovechamiento de la radiación solar de tal manera que permiten concentrar la energía del sol en un sitio específico, ya sea un punto o línea (el foco). Los principales

dispositivos utilizados para el uso de concentradores solares son: intercambiadores de calor, condensadores, tubos absorbentes, acumuladores y calderas (López y Hortua, 2013).

2.1.2.1 Sistemas Concentradores Cilindro Parabólicos

Este tipo de tecnología realiza el seguimiento del movimiento del sol en un solo eje. Están conformados por superficies reflectoras en forma de parábola, que captan y dirigen la radiación hacia receptores lineales y tubulares que poseen materiales con propiedades de absorción que lo ayudan a almacenar el calor (De la Hoz y Gonzales, 2014). En la figura 1, se muestra la fotografía de un concentrador de este tipo, en donde se aprecia claramente la conformación de las superficies reflectoras y de las líneas de foco donde se concentra el calor reflejado.



Figura 1. Concentradores cilindros parabólicos.

Fuente: (Solarweb, 2017)

2.2. TRAYECTORIA DEL SOL VISTA DESDE LA TIERRA

Con el propósito de alcanzar la mayor radiación solar directa, es indispensable estudiar los diferentes movimientos de la tierra como son la rotación sobre su propio eje, el movimiento de traslación alrededor del sol, además de la inclinación sobre su propio eje (Kalogirou, 2009). En consecuencia, para el mejor aprovechamiento de la radiación solar en el CCP que es el propósito de este trabajo de grado, se emplea el seguimiento solar con el fin de garantizar la incidencia de la radiación solar directa en el foco de la parábola del CCP, donde está ubicado el tubo receptor. Para determinar el cambio en la posición del concentrador con respecto al sol, se tuvieron en cuenta las ecuaciones que describen dicho movimiento tomadas de (Kalogirou, 2009), las cuales se describen a continuación.

Declinación Del Sol (δ).

Esta declinación del sol (δ), es el ángulo que se forma por los rayos que proceden del sol y el plano ecuatorial de la tierra, la cual debe ser calculada para cada día del año, este ángulo cambia durante

el año debido al movimiento de traslación, que se observa en la figura 4 donde se aprecia el ángulo formado por el centro de la tierra y el centro del sol (Kalogirou, 2009):

$$\delta = (0,006918 - 0,0399912 \cos(\alpha) + 0,070257 \operatorname{sen}(\alpha) - 0,006758 \cos^2(\alpha) + 0,000907 \operatorname{sen}(2\alpha) - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \operatorname{sen} 3\alpha) \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (1)$$

Donde (α) será la Posición Angular De La Tierra En La Órbita que se explicó más adelante.

Posición Angular De La Tierra En La Órbita (α).

La Posición Angular de la Tierra en la Órbita (α) es una variable donde nd es número del día del año dentro de los 365 días del año, esto se puede calcular mediante la ecuación número 2 (Kalogirou, 2009).

$$\alpha = \frac{(2\pi(nd-1))}{365} \quad (2)$$

Ecuación De Tiempo (ET).

El valor de la ecuación del tiempo es en función del día del año que puede ser obtenía por las ecuaciones 3 y 4.

$$B = (nd - 81) * \left(\frac{360}{364}\right) \quad (3)$$

$$Et = 9.87 * \sin(2 * B) - (7.53 * \cos(B)) - (1.5 * (\sin(B))) \quad (4)$$

Tiempo solar (AST).

Se define la correlación de Tiempo solar con la ecuación 5.

$$AST = LST + \left(\frac{Et}{60}\right) \pm \frac{(4*(SL-Ll))}{60} + DS \quad (5)$$

Donde, se define el tiempo local estándar (LST) se definirá con la ecuación 6, mientras que Ll es la longitud meridiana del lugar, Et es la Ecuación De Tiempo definida en la ecuación 3.

$$LST = ho + (mi/60) + (se/3600) \quad (6)$$

Continuando con la ecuación 6 en el cual ho es la hora del día de 1 a 24, mi es minuto específico de 0 a 60 y por último se el segundo.

la ubicación real en la tierra se debe definir mediante coordenadas, primero se define la longitud meridiana del lugar de la realización de las pruebas Ll .

$$Ll = lt + (min/60) + (seg/3600) \quad (7)$$

Donde lt son los grados, min es el minuto de arco que va de 0 a 60 y seg el segundo de arco de 0 a 60. El termino DS suele ser cero o no tenido encuentra porque solo afecta en el final de marzo o final de octubre y la variable SL es la longitud Meridiano de referencia que para Colombia suele es 75°

Angulo horario (h).

El ángulo horario, h , de un punto en la superficie de la tierra se define como el ángulo que la tierra giraría para llevar el meridiano del punto directamente debajo del sol. La figura 2 muestra el ángulo de la hora del punto P como el ángulo medido en el plano ecuatorial de la tierra entre la proyección de OP y la proyección de la línea centro tierra al centro del sol. el ángulo de la hora en el mediodía solar local es cero, entonces $360/24$ o 15° de longitud equivalente a 1 h, y las horas de la tarde se designan como positivas (Kalogirou, 2009).

$$h = \frac{360}{24} (AST - 12) \quad (8)$$

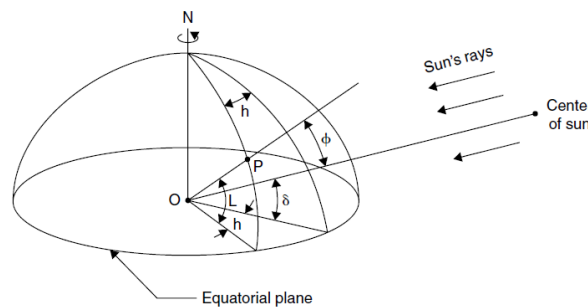


Figura 2. definición de latitud, ángulo horario y declinación solar.

Fuente: (Kalogirou,2009).

Ahora se define la latitud (L) con la ecuación 9, donde la son los grados, mn es el minuto de arco y sg es el segundo de arco.

$$L = la + (mn/60) + (sg/3600) \quad (9)$$

Angulo de incidencia (θ).

formado por el haz de radiación sobre una superficie y el haz de Angulo entre el plano dado y la superficie horizontal se determina a partir de la ecuación 10 (Kalogirou, 2009).

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin(\delta) \sin(L) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(L) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\beta) \cos(h) \\ & + \cos(\delta) \sin(L) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(h) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(h) \end{aligned} \quad (10)$$

Donde el Angulo entre el plano dado y la superficie horizontal (β) que va desde $0 \leq (\beta) \leq 180$ y Angulo azimut (γ) sobre la superficie.

2.3. ANÁLISIS OPTICO DEL CONCENTRADOR SOLAR CILINDRICO.

La eficiencia óptica del concentrador cilíndrico parabólico está definida como la relación de la energía absorbida por el receptor a la energía incidente en la apertura del colector. La eficiencia óptica (η_o) depende de las propiedades de los materiales involucrados, la geometría del colector, y varias imperfecciones de la construcción del colector, esta además depende del día del año y la hora en términos del ángulo de incidencia, se describe mediante la ecuación 11, según (Kalogirou, 2009):

$$\eta_o = \rho \cdot \tau \cdot \varphi \cdot \alpha [1 - A_f \tan \theta] \cos \theta \quad (11)$$

Donde:

ρ = reflectancia de la superficie

τ = transmitancia de la cubierta de vidrio

α = absortancia del receptor

φ = factor de interceptación

θ = ángulo de incidencia

La geometría del colector la dicta el factor geométrico A_f , que es una medida de la disminución efectiva del área de apertura debido a efectos de incidencia anormales, incluidos bloqueos, sombras y pérdida de radiación reflejada desde el espejo más allá del extremo del receptor. Durante el funcionamiento anormal, debido a los rayos reflejados cerca del extremo del centro de concentrador, el sol no puede alcanzar el receptor; a esto se le llama efecto final A_e . La cantidad de área de abertura perdida se muestra en la figura 3 y viene dada por la ecuación 12:

$$A_e = f * W_a * \left(1 + \frac{W_a}{48*(f^2)}\right) \quad (12)$$

Donde W_a es la apertura de la parábola y f es la longitud del eje focal.

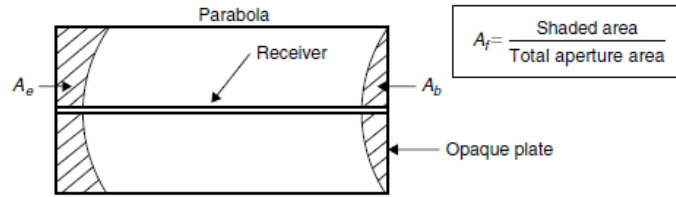


Figura 3. pérdidas generadas por sombras a través del concentrador cilíndrico parabólico.

Fuente: (Kalogirou,2009).

generalmente, los colectores de este tipo terminan con placas opacas para evitar la concentración no deseada o peligrosa lejos del receptor. estas placas dan como resultado el bloqueo o sombreado de una parte del reflector, que en efecto reduce el área de apertura. para una placa que se extiende de borde a borde, el área perdida se muestra en la figura 5 y está dada por:

$$A_b = \left(\frac{2}{3}\right) * W_a * Y_m \quad (13)$$

Donde las variables anteriormente expuestas simbolizan lo siguiente:

Y_m = Altura de la parábola

W_a = Apertura de la parábola

A_p = Área de pérdidas más el efecto final

La para realizar el caculo de perdidas más el efecto final se debe tener en cuenta la ecuación 14.

$$A_p = A_e + A_b \quad (14)$$

En cuanto al cálculo de la relación del factor geométrico será dada por:

$$A_f = A_p / A_a \quad (15)$$

El área de apertura (A_a) depende de la siguiente ecuación:

$$A_a = (L_a - D_g) * L \quad (16)$$

Donde las variables anterior mente expuesta simbolizan lo siguiente:

L_a = Longitud de área de apertura

D_g = Diámetro del vidrio

L = Longitud de apertura

Por último, el dato final que se necesita para cálculos futuros es el área del absorbedor (A_r) donde:

Do_l = Diámetro externo del tubo receptor de cobre

Di_l = Diámetro interno del tubo receptor de cobre

$$A_r = \pi * L * Do_l \quad (17)$$

2.4. ANÁLISIS TÉRMICO DEL CCP

El análisis térmico generalizado de un colector solar de concentración es semejante al de un colector plano. es necesario derivar expresiones apropiadas para el factor de eficiencia del colector, F' ; el coeficiente de pérdidas por transferencia de calor, U_L ; y el factor de remoción de calor del colector, F_R . Para el coeficiente de pérdida, se pueden usar relaciones de transferencia de calor estándar para tubos. Las pérdidas térmicas de los receptores colectores concentradores no se pueden resumir tan fácilmente como los de placa plana, porque hay muchos diseños y configuraciones disponibles.

Por lo general, para reducir las pérdidas de calor, se emplea un tubo de vidrio concéntrico alrededor del receptor. El espacio entre el receptor y el vidrio generalmente se evacua, en cuyo caso las pérdidas por convección son despreciables (Kalogirou, 2009). En este caso, U_L basada en el área del receptor A_r , viene dada por la ecuación 18:

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_c)A_g} + \frac{1}{h_r} \right]^{-1} \quad (18)$$

Aquí A_g el área de la cubierta de vidrio, ahora hr es el coeficiente de radiación entre el tubo receptor y la envolvente de vidrio esta ecuación se obtiene de una linealización previa para dar como resultado la siguiente ecuación 19.

$$h_r = \frac{\sigma(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{\frac{1}{\varepsilon_r} + \frac{A_r}{A_g} \left(\frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right)} \quad (19)$$

Donde σ es la constante de Stefan Boltzmann, ε_r emisividad del material del absorbedor, ε_g emisividad de la cubierta de vidrio, temperatura del receptor T_r y temperatura de la envolvente de vidrio T_g . Para obtener el coeficiente de radiación de la cubierta de vidrio al ambiente se usa la siguiente ecuación 20.

$$h_c = \varepsilon_g * \sigma * (T_g + T_a)(T_g^2 + T_a^2) \quad (20)$$

Donde T_a es la temperatura ambiente.

A continuación, la manera de obtener el coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta de vidrio al ambiente esta dado la ecuación siguiente.

$$h_w = (Nu_a)k_a/D_g \quad (21)$$

En la evaluación del Número de Nusselt para las pérdidas debido el viento puede ser usado
Para $0.1 < Re < 1000$

$$Nu_a = 0.4 + 0.54(Re)^{0.52} \quad (22)$$

Para $1000 < Re < 50000$

$$Nu_a = 0.3(Re)^{0.6} \quad (23)$$

Para calcular el número de Reynolds para el viento se puede usar la siguiente ecuación:

$$Re_a = (\rho_a * v_a * d_g)/\mu_a \quad (24)$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, v_a velocidad del viento, μ_a es la viscosidad dinámica del aire y d_g diámetro de la envolvente de vidrio. Para estimar las propiedades en la cubierta de vidrio, se requiere la temperatura de la cubierta de vidrio, T_g . Esta temperatura está más cerca de la temperatura ambiente que la temperatura del receptor. Por lo tanto, al ignorar la radiación absorbida por la cubierta, T_g puede obtenerse a partir de un equilibrio total. El procedimiento para encontrar T_g es mediante la estimación de la iteración a partir de la cual se considera un T_g aleatorio, si la T_g obtenida de un valor original difiere del valor original; por lo general, no se requieren más de dos iteraciones. Si se debe considerar la radiación absorbida por la cubierta, se debe agregar el término apropiado al lado derecho (Kalogirou, 2009).

$$T_g = \frac{A_r * h_r * T_r + A_g (h_c + h_w) T_a}{A_r * h_r + A_g (h_c + h_w)} \quad (25)$$

Coeficiente promedio de transferencia de calor del agua al interior del tubo receptor.

$$h_{fi} = Nu_l * k_l / Di_l \quad (26)$$

Donde k_l es la conductividad térmica del agua entrando al tubo receptor, Di_l es el diámetro interno del tubo anteriormente mencionado y Nu_l es el número de Nusselt calculado con la siguiente ecuación

$$Nu_l = 0.023 * RE_l^{0.8} * Pr_l^{0.4}$$

Pero es preferible el uso de la siguiente modificación que mejora la exactitud del cálculo realizada por dependerá del numero de la temperatura principalmente en la entrada del fluido.

$$Nu_l = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) Re_l Pr_l}{1.07 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} (Pr_l^{\frac{2}{3}} - 1)} \quad (27)$$

Para el cálculo del número de Reynolds a la entrada del del receptor (Re_l) se puede usar la ecuación:

$$Re_l = V_l * Di_l / \nu_l \quad (28)$$

ó

$$Re_l = \frac{(4 * \dot{m}_h)}{3.1416 * Di_l * \mu_l}$$

Donde V_l es la velocidad del líquido, ν_l es la viscosidad cinemática del líquido, \dot{m}_h flujo masico del agua al interior del tubo, Di_l diámetro interno del tubo receptor y μ_l Viscosidad dinámica del agua en el interior del tubo. Para estimar el número Prandall se usa la temperatura del agua a la entrada del receptor como también las variables que intervienen en el cálculo del número de Reinolds. Como también existe la necesidad de conocer la temperatura de salida del agua que circula en el recetor al obtener la energía de la radiación surgió la variable temperatura de salida T_o como resultado de un despeje de balance de energía en (Kalogirou,2009).

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m}_h c_{p_l}} \quad (29)$$

Previamente se debe calcular el calor transferido por la focalización de la radiación del concentrador solar al tubo receptor mediante la siguiente ecuación:

$$Q_u = F_R * (G_B * \eta_o * A_a - (A_r * U_L * (T_i - T_a))) \quad (30)$$

Donde G_B es la Radiación Solar en el sitio donde esta ubicado el concentrador solar, para determinar el Factor de remoción (F_R).

$$F_R = \frac{\dot{m}_h C_{p_l}}{A_r * U_{l1} * F} * \left(1 - 2.71 \frac{\dot{m}_h C_{p_l}}{A_r * U_{l1} * F}\right)^{-1} \quad (31)$$

Donde \dot{m}_h es flujo masico del agua al interior del tubo, C_{p_l} es el poder calorífico del agua al interior del tubo, A_r es el área del receptor U_{l1} flujo masico del agua al interior del tubo F es el factor de tasa de flujo con la ecuación 32.

$$F = \frac{1/U_{l1}}{\left(\frac{1}{U_{l1}} + \frac{D_{o_l}}{D_{i_l} * h_{f_i}} + \frac{D_{o_l}}{2 * \kappa_{cu}} + \ln \frac{D_{o_l}}{D_{i_l}}\right)} \quad (32)$$

Donde κ_{cu} es la conductividad térmica del receptor concluyendo, la relación de concentración del CCP está dada por la ecuación 33.

$$c = \frac{A_a}{A_r} \quad (33)$$

La eficiencia instantánea del concentrador solar que relaciona el análisis térmico y óptico del concentrador solar está dada por:

$$\eta = F_R \left[\eta_o - U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_B * c} \right) \right] \quad (34)$$

Tubos absorbedores

El material del tubo absorbedor tiene una gran importancia a la hora de analizar la eficiencia térmica del mismo, en conjunto con el resto de partes del CCP, en consecuencia, se tendrán en cuenta los siguientes materiales.

El cobre como material absorbente para el receptor es un material accesible y presenta respecto a otros materiales una alta absorción y una baja emitancia, ideal para esta función de absorción de energía térmica solar. Mientras que el acero como material absorbente presenta menor absorción y mayor emitancia respecto al cobre; de otro lado la resistencia del acero a altas temperaturas es mayor que la del cobre, lo que permite que tenga una mayor vida útil los dispositivos termo solares (Chavez, 2012).

Fluidos de trabajo.

Para el fluido de trabajo se tienen varias alternativas según el tipo de temperaturas que se quieran alcanzar y los materiales que se usaran para transportar y almacenar estos fluidos. Por ejemplo, el agua tiene un punto de ebullición muy bajo y alcanza presiones muy altas, mientras que el aceite

tiene un punto de ebullición más alto lo que permite conservar mayor cantidad de energía, sin generar esfuerzos que dañen los tubos absorbedores (Chavez, 2012).

2.5. INTERCAMBIADORES DE CALOR

La función de un intercambiador es transferir el calor de un fluido a otro, existen gran variedad de equipos para intercambio de calor en el caso existen tres intercambios que necesitan ser descritos:

1 transferencia de calor convectiva del fluido hacia la pared interna del tubo.

2 transferencia de calor conductiva a través de la pared del tubo

3 transferencia de calor convectiva desde la pared externa del tubo hacia el fluido exterior.

Entonces considerando dos flujos en un intercambiador, con base en la Primera Ley de la Termodinámica o Conservación de la Energía, se establece que el calor transferido entre ambos flujos se puede describir por un balance de entalpía de la forma:

$$\dot{Q} = \dot{m}_h C p_h (T_{h,2} - T_{h,1}) = \dot{m}_c C p_c (T_{c,2} - T_{c,1}) \quad (35)$$

Donde los subíndices 1 y 2 se refieren a la entrada o salida del intercambiador respectivamente y las T_h y T_c son empleadas para indicar las temperaturas caliente y fría, respectivamente.

La variable \dot{Q} es el calor transferido asumiendo que no hay pérdidas de calor mientras que $C p_h$ y $C p_c$ son la capacidad calorífica del fluido caliente y el fluido frío respectivamente, así como \dot{m} es el flujo másico con el subíndice h del fluido caliente y el subíndice c del fluido frío.

Los tipos básicos de intercambiadores de calor varían según la necesidad inicialmente se tienen los de tubo doble donde hay dos tipos de disposición de flujo paralelo y a contraflujo como se muestra en la figura 4 más adelante.

Además se tiene los intercambiadores de tipo tubos - coraza los más usados en la industria y efectivos gracias a la mayor área de transferencia de calor en espacios muy comprimidos como se muestra en la figura 5, estos pueden variar en la cantidad de tubos y separaciones en la coraza por ejemplo “un paso por la coraza y dos paso por los tubos” también “dos pasos por la coraza y cuatro pasos por los tubos” por último se tiene el de placas y armazón donde se encuentran placas sobre puestas con pasos corrugados y aplastados para el flujo. En donde el fluido caliente y frío fluyen en pasos alternados lo que da una transferencia de calor muy eficaz ver figura 6.

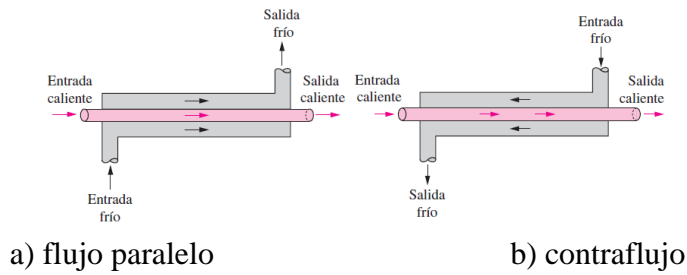


Figura 4. Intercambiador de calor de doble tubo a) flujo paralelo y b) contraflujo.
Fuente: (Çengel, 2007)

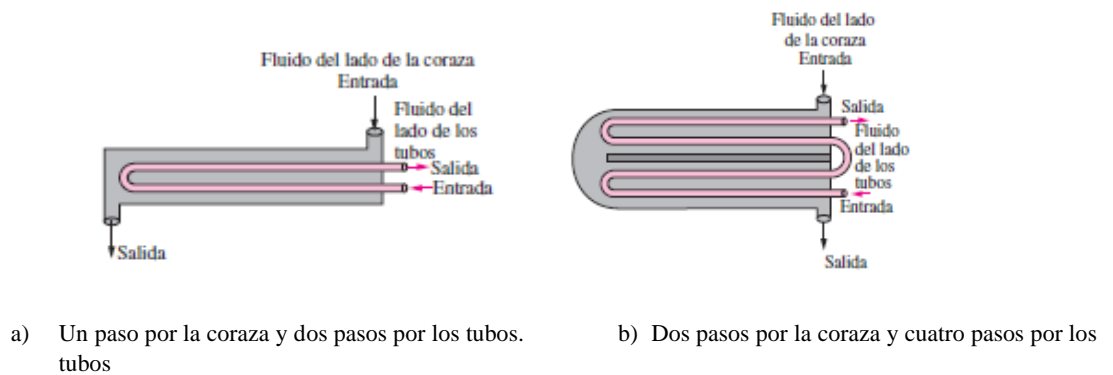


Figura 5. Intercambiadores de calor tipo coraza
Fuente: (Çengel, 2007)

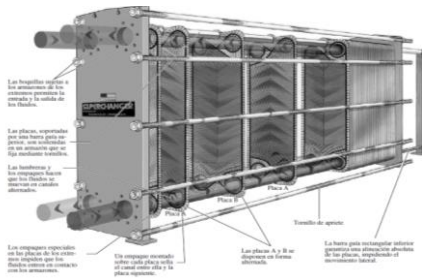


Figura. 6. Intercambiador de calor tipo placas y armazón
Fuente: (Çengel, 2007)

Para el desarrollo de este proyecto se busca que el intercambiador de calor cumpla con una transferencia de calor efectiva, con bajo costo en los materiales, baja dificultad en su construcción y un cálculo sencillo de diseño térmico para cumplir estos requerimientos se realizara un análisis por la metodología QFD y seleccionar el intercambiador apropiado que dio como resultado el intercambiador de tubos concéntricos en contraflujo (Çengel, 2007).

Para este diseño se parte de la siguiente ecuación de la razón de transferencia de Calor, como es:

$$\dot{Q} = U_i * A_s * \Delta T_m \quad (36)$$

Donde U_i es el coeficiente total de transferencia de calor, A_s es el área de transferencia de calor y ΔT_m que es una diferencia de temperatura media usada en el método de la diferencia media logarítmica y que se halla con la siguiente expresión (Çengel, 2007):

$$\Delta T_m = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (37)$$

Donde ΔT_1 es la diferencia de la temperatura de entrada del fluido caliente menos la temperatura de salida del fluido frío mientras ΔT_2 es la diferencia entre temperatura de salida del fluido caliente menos la temperatura de entrada del fluido frío quedando de la siguiente manera.

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,2} \quad (38)$$

$$\Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,1} \quad (39)$$

Para continuar se tiene la relación del coeficiente global de transferencia de calor en función de las dos resistencias por convección y la resistencia por conductividad de la pared del tubo. Donde se debe tener la geometría de la tubería como es el Di_h (diámetro interior del tubo donde circula el fluido caliente) y Do_h (diámetro Exterior del tubo donde circula el fluido caliente), P es el perímetro del tubo donde circula el agua caliente y l (longitud de los tubos) por último k_{cu} es la conductividad del tubo para dar como resultado la siguiente expresión (Çengel, 2007):

$$U_i = \frac{1}{P * \left[\left(\frac{1}{H_i * \pi * Di_h} \right) + \left(\frac{\log\left(\frac{Do_h}{Di_h}\right)}{2 * \pi * k_{cu}} \right) + \left(\frac{1}{H_o * \pi * Do_h} \right) \right]} \quad (40)$$

Aún faltaba definir la variable H_i y H_o que es coeficiente de transferencia de calor por convección al interior y al exterior del tubo respectivamente. Estas variables dependen de la velocidad a la que circula el flujo al interior y exterior del tubo. se calculan independiente mente así:

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua fría

$$H_o = \frac{Nu_c * K_c}{D_h} \quad (41)$$

Coefficiente de transferencia de calor por convección del agua caliente

$$H_i = \frac{Nu_h * K_h}{Di_h} \quad (42)$$

Donde K_h es el coeficiente de conducción del fluido caliente, lo mismo para el caso de K_h para el coeficiente de conducción del fluido del exterior que esta frio. donde también se debe calcular un diámetro anular de fluido que se simplifica en:

$$D_h = Di_c - Do_h \quad (43)$$

Continuando con los números de Nusselt Nu_i y Nu_o se pueden calcular por diferentes expresiones estas dependen del valor que resulte del número de Reynolds por ejemplo si el flujo es turbulento se recomienda usar la ecuación 44.

$$Nu_h = \frac{(f/8)(Re_h - 1000)Pr_h}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8}\right)^{0.5} \left(Pr_h^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (44)$$

Para rangos del Re_h y Pr_h como los que se presentan a continuación, el número de Prandtl que se asume dependiendo la temperatura del fluido.

$$3 * 10^3 < Re < 5 * 10^6$$

$$0.5 \leq Pr \leq 2000$$

Para acabar con Nusselt f es un factor de fricción para tubos lisos se calcula de la siguiente manera con la ecuación 45.

$$f = (0.790 \ln Re_h - 1.64)^{-2} \quad (45)$$

En el caso de que el número de Reynolds arroje que es flujo laminar completamente desarrollado en una corona circular con una de las superficies aislada y la otra isotérmica donde se puede usar la siguiente tabla 1 para determinar el número de Nusselt.

Tabla 1 número de Nusselt para flujo laminar completamente desarrollado en una corona circulas con una de las superficies aislada y la otra isotérmica.

D_i/D_o	Nu_i	Nu_o
0.00	—	3.66
0.05	17.46	4.06
0.10	11.56	4.11
0.25	7.37	4.23
0.50	5.74	4.43
1.00	4.86	4.86

Fuente: (Çengel, 2007)

Entonces para definir el número de Reynolds al interior del tubo se necesita inicialmente la velocidad que puede ser definida a raíz del flujo másico con la siguiente expresión teniendo muy en claro los subíndices i y o .

$$V_h = \frac{\dot{m}_h}{\rho_h \left(\frac{1}{4} \pi D_i^2 \right)} \quad (46)$$

Donde la densidad (ρ_h) para la temperatura en la que se encuentre el fluido caliente:

$$Re_h = \frac{V_h D_i}{\nu_h} \quad (47)$$

Donde ν_h es la viscosidad cinemática que es la división de la viscosidad dinámica (μ_h) y la densidad (ρ_h) para la temperatura en la que se encuentre el fluido caliente, para finalizar Re_c depende de otra velocidad V_c que se calcula así:

$$V_c = \frac{\dot{m}_c}{\rho_c \left[\frac{1}{4} (D_o^2 - D_i^2) \right]} \quad (48)$$

Y Re_c Reynolds al exterior del tubo quedaría de la siguiente manera con las propiedades del fluido externo haciendo uso del D_h mostrado anteriormente.

$$Re_c = \frac{V_c D_h}{\nu_c} \quad (49)$$

Donde ν_c es la viscosidad cinemática que es la división de la viscosidad dinámica (μ_c) y la densidad (ρ_c) para la temperatura en la que se encuentre el fluido caliente, Como el fin de este cálculo es encontrar la longitud que debe tener el intercambiador de calor de doble tubo debido a que las otras variables geométricas como diámetros de los tubos se especifican previamente la expresión que define la longitud sería la ecuación 50 (Çengel, 2007).

$$L_i = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_m * U_i * P} \quad (50)$$

Donde \dot{Q} es el calor trasferido de un fluido a otro, ΔT_m es la diferencia de temperaturas entre los dos fluidos, U_i es el coeficiente global de transferencia de calor del intercambiador y P el perímetro del tubo que separa el fluido caliente del frio.

2.5.1. Caída de la presión y potencia de bombeo.

Para calcular la potencia de bombeo de una bomba en una tubería es necesario determinar inicialmente la caída de presión para mantener el flujo en la tubería, venciendo el rozamiento interno de los fluidos con la rugosidad, para saber esto se usa la siguiente ecuación número 51 (Guillen,2014).

$$\Delta P_l = f_d \frac{L_o * \rho_f * V_f}{D_a * 2} \quad (51)$$

Donde:

ΔP_l = caída de presión

f_d = Factor de fricción de darcy

L_o = Longitud del tubo que se estima que sea aproximadamente 10 metros

ρ_f = densidad del fluido a temperatura de entrada del fluido kg/m^3

V_f = velocidad del fluido (m/s)

D_a = Diámetro interno del tubo (m)

Donde: El factor de fricción de Darcy, es un valor aproximado a la fricción del fluido que circula en un área transversal circular. Para un flujo laminar desarrollado, este puede hallarse mediante la siguiente ecuación 52 que está en función del número de Reynolds (Re).

$$f_d = \frac{64 * \mu_f}{\rho_f * D_a * V_f} = \frac{64}{Re} \quad (52)$$

Para saber la potencia que debe tener la bomba que va a mover un fluido en un tubo se usa la formula (53)

$$\dot{W}_{Bomba} = \frac{\dot{m}_f * \Delta P_l}{\rho_f} \quad (53)$$

2.6. ESTÁTICA, MECÁNICA DE MATERIALES Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS

Con el fin analizar que la estructura soportara las cargas a las que va ser sometido durante su funcionamiento se expone la siguiente teoría don primero se realizara un análisis estático para la ubicación de las cargas después un calculo de esfuerzos con la determinación del factor de seguridad para terminar con el análisis de que soporta el concentrador solar.

Estudios estáticos.

El análisis estático de las fuerzas actuantes en las estructuras se basa en que las reacciones y momentos sobre los puntos de análisis (Beer et al.2013), se calcula a partir de las siguientes:

$$\sum F_y = 0 \quad (53)$$

$$\sum M = 0 \quad (54)$$

Mecánica de materiales.

Obteniendo los diagramas de momento flector y fuerza cortante. Al tener el valor del cortante máximo se debe reemplazar en la ecuación del esfuerzo τ_{max} , que relaciona las propiedades de la sección transversal de la pieza para la determinación de las dimensiones de la estructura (Beer et al.2013). El Esfuerzo cortante máximo relacionado con el esfuerzo de fluencia del material, dado por la ecuación:

$$\tau_{max} = 0,5 * S_y \quad (55)$$

Donde S_y equivale al esfuerzo de fluencia del material, y τ_{max} representa el esfuerzo cortante máximo que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_{adm} = \frac{V*Q}{I*t} \quad (56)$$

Donde V representa la fuerza cortante máxima donde Q se define como el área que se encuentra debajo del punto de aplicación de la carga (centroide de la geometría) y multiplicado por la altura del mismo centroide; I es la inercia de la geometría; t es el espesor de pared de estructura.

Por último se calcula el factor de seguridad (n_s) y se verifica que no se encuentre por debajo del factor de seguridad definido para esta aplicación, que basándose en la información publicada por (Álvarez, 2007) donde se establece en que puede ser mínimo 2 y 2.5 para materiales probados o para materiales frágiles en condiciones promedias de ambiente ,carga y esfuerzo, para este cálculo se usa la ecuación:


$$n_s = \frac{\tau_{adm}}{\tau_{máx}} \quad (57)$$

2.7. METODOLOGÍA QFD (QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT)


La metodología QFD es una metodología usada en el diseño de productos y servicios. Nacida en empresas japonesas y mejorada a lo largo del siglo 20 por diferentes empresas del mundo y autores. con estas iniciativas se pretende recopilar las demandas de los clientes que finalmente serán quienes adquieran el producto o servicio parte fundamental que dota de necesidades el productos o servicio que se desea comercializar. Como también las características técnicas y operativas que deba suplir. [41].

La síntesis del QFD es una matriz que relaciona los requerimientos de los clientes (que se abrevia con RC) con las características técnicas (que se abrevia con CT), los RC se indican en la dimensión vertical de la matriz; las CT, en la horizontal. la cantidad de RC y CT dependen de la complejidad tecnológica de que puedan tener productos muy modernos que se pueden ver fácilmente en la actualidad. A la hora de complementar el interior de esta matriz se hace en función de la relación que pueden tener los RC con CT que puede ser baja, media o alta. Ponderándolo de la siguiente manera para baja se coloca un 1 lo que significa que el RC una relación muy baja con la CT, para media un 3 que nos indica que la RC tiene una mediana relación no muy influyente en la CT y para alta un 9 que quiere decir que la RC está muy coaccionada por la destreza la CT las anteriores ponderaciones no son obligatorias son dadas bajo el criterio del desarrollo de la metodología QFD como se muestra en la figura 7.


		Características técnicas				
		A	B	C	D	E
Requerimientos de los clientes	1					9
	2		3			
	3	9				
	4				1	
	5					3




A y 3 son altamente relacionadas



B y 2 es medianamente relacionado



CT innecesaria



D y 4 están relacionados mínimamente

Figura 7. Matriz de calidad, como se relacionan las filas y columnas.

Fuente: Elaboración propia.

Con el resultado de esta matriz se suman las columnas para identificar que características técnicas son primordiales a las horas de los diseños. La metodología QFD que tiene una gran versatilidad y

utilidad, lo cual la hace una herramienta idónea a la hora de cuantificar lo cualitativo. Sacar conclusiones de diferentes perspectivas de ver la implementación de nuevas tecnologías dando a los usuarios ventajas en el mercadeo y ventajas competitivas como la innovación.

Últimamente se ha aplicado a diferentes áreas como la planificación de estrategias en las operaciones de manufactura, en la planificación de programas y en PYME, a organización y en la educación, en entes públicos.

2.8. MARCO LEGAL

Con el siguiente marco legal se pretende argumentar legalmente la investigación de concentradores solares que rigen en nuestro entorno nacional e internacional que darán conceptos, para realizar experimentos y demás características que rodean la investigación en cuanto las energías alternativas. Como las siguientes normas:

- NTC N. 1736, «Energía solar. Definiciones y nomenclatura», de Icontec. Esta norma será una fuente importante de información al proveer la nomenclatura necesaria para hacer los estudios, cálculos pertinentes de la energía solar además de dotar del lenguaje técnico para no caer en errores (NTC,2006).
- ISO N.50001, « Energy management systems requiremensts with guiandance for use», de International organization for standardization: La norma ISO da parámetros y orientación sobre los sistemas de gestión energética para el uso en general de estos sistemas alternativos como sistemas de energía fotovoltaica y termo eléctrica (ISO,2011).
- NTC N.5434-2 «sistemas solares térmicos y componentes. Colectores solares. Parte 2: métodos de ensayo» de Icontec: en esta norma se aprecian métodos para calcular eficiencia térmica y prueba de funcionamiento de concentradores solares de placa plana que fueron guía para la caracterización del concentrador cilíndrico parabólico.

3. METODOLOGÍA

El desarrollo del proyecto de investigación fue efectuado siguiendo la metodología de investigación experimental, para este propósito y de acuerdo con los objetivos propuestos se proponen las siguientes fases en la tabla 2 donde describen las fases, actividades y recursos necesarios para el desarrollo del proyecto de acuerdo a los objetivos propuestos:

Tabla 2. Fases del desarrollo del proyecto.

OBJETIVO	FASES DEL PROYECTO	ACTIVIDADES	INSTRUMENTOS, SOFTWARES Y RECURSOS
<p>Desarrollar el sistema de seguimiento y adquisición de datos bajo la programación de una tarjeta de desarrollo Arduino que involucre el sistema eléctrico y mecánico del concentrador cilíndrico parabólico.</p>	<p>Implementar un sistema de seguimiento y adquisición de datos.</p>	<p>Se reviso el estado de funcionamiento de las partes mecánicas y electrónicas.</p> <p>Se selecciono y provo el funcionamiento del sensor del sistema de seguimiento.</p> <p>Se selecciono y provo el funcionamiento de los sensores del sistema de adquisición de datos del intercambiador de calor.</p> <p>Se Programó el sistema de seguimiento del concentrador cilindro parabólico.</p> <p>Se programó el sistema de adquisición de datos.</p> <p>Se Calibro y Probo el funcionamiento del CCP dentro del emplazamiento del campus.</p>	<p>Software Arduino. Laboratorios de la Universidad Libre. Software Matlab. Potenciómetro. Flujómetro. Bombas de agua. Termocuplas.</p>
<p>Evaluar el desempeño del sistema térmico en función de las variables ambientales y de la radiación solar incidente en la sede el</p>	<p>Análisis de transferencia de calor en el CCP.</p>	<p>Se analizo y tomo datos experimentales de comportamiento de variables ambientales en la sede de la</p>	<p>Estación Meteorológica. Software Excel. Matlab.</p>

bosque de la Universidad Libre.		universidad libre mediante el uso de la estación meteorológica Con los datos aportados por la estación meteorológica se calculó la eficiencia, óptica e instantánea del CCP.	
Seleccionar un intercambiador de Calor por la metodología QFD que se ajuste al flujo de calor adquirido por el concentrador cilíndrico parabólico.	Selección del intercambiador de calor mediante la metodología QFD.	Se identifico el cliente y los requerimientos del mismo. Se realizo un análisis de la competencia y los requerimientos de ingeniería como del cliente. Se califico la competencia, se organizará la matriz de relaciones. Para finalizar se definieron los objetivos a alcanzar y la definición de los requerimientos finales.	Word. Exel.
Diseñar y construir un prototipo de intercambiador que permita el aprovechamiento del calor del concentrador cilíndrico parabólico.	Diseño y construcción del prototipo de intercambiador de calor	Se calculo las dimensiones del intercambiador de calor con base al fluido de trabajo y las temperaturas que se pueden alcanzar conectándolo al CCP. Se Modelo el montaje del CCP integrado a el intercambiador de calor en 3D mediante SolidWorks Se construyó y acoplo el intercambiador de calor al CCP.	Excel. SolidWorks. Matlab. Máquina de soldadura. Taladro de árbol. Torno. Herramientas de taller. Soplete de Butano. Tronzadora.
Acondicionar el montaje del concentrador cilíndrico parabólico acoplado a un intercambiador de calor, como un equipo funcional de laboratorio para la facultad de ingeniería	Montaje laboratorio CCP	Se separo un espacio dentro del campus de la universidad para ubicar el CCP más el intercambiador de Calor que fuera cercano al rango de datos que proporciona la estación meteorológica. Además, se desarrolló una guía orientada para el reconocimiento y calibración del sistema.	Word

Fuente: Autor del proyecto.

4. DESARROLLO DEL PROYECTO

En el capítulo de desarrollo del proyecto se expondrá el proceso que se llevó a cabo para la elaboración del proyecto en donde siguiendo la metodología manifiesta anteriormente en el capítulo 3. Se mostrara las tareas realizadas que engloban las fases de desarrollo donde en la fase 1 se caculo la eficiencia óptica del CCP que tiene como raíz la trayectoria del sol de donde se extrajo el algoritmo que será parte de la programación se sistema de seguimiento en el programa

que será embebido en el Arduino que a su vez controlara un motor con reductor y leerá señales de ubicación angular dotadas por el sensor que este caso será un potenciómetro lineal terminando con esta fase se seleccionaron y programaron la manera de para adquirir datos de los sensores y actuadores necesarios para las mediciones del comportamiento del intercambiador de calor como son: las termocupla, el flujómetros y las bombas de agua. Para la fase 2 basándose en los resultados arrojados por la eficiencia óptica en la fase 1 se calcular la eficiencia térmica de CCP basándose en datos de la estación meteorológica fundamentales para analizar variables ambientales en la ubicación que para este caso será la Universidad libre sede Bosque en la ciudad de Bogotá Distrito Capital. Con los datos proporcionados por el cálculo de la eficiencia térmica con son el calor obtenido se procedió a calcular las dimensiones del intercambiador de calor que para este caso será de tubos concéntricos la razón por cual se seleccionó este tipo de intercambiador de calor se explicara más adelante en la fase 3 que es alterna a las dos anteriores donde usando la metodología del QFD se seleccionó el tipo de intercambiador de calor más apropiado para la integración con el CCP, metodología en la cual variables cualitativas se cuantificaron para obtener un número real que dio como resultado el intercambiador de calor de tubos concéntricos. Empezando a concluir con la fase 4 se logró una restauración necesaria al CCP que consto de dos partes la selección de las partes útiles del CCP y en la segunda parte el modelado en 3D para ser guía de la restauración total de CCP, teniendo el modelo en 3D del CCP se diseñó e implemento al modelo el intercambiador de calor de tubos concéntricos, terminado esta fase se presenta la construcción del intercambiador de calor como también su integración al CCP. Finalizando con la fase 5 se muestra más detalladamente el resultado de la integración de CCP más intercambiador de Calor detallando como se implementó toda la electrónica expuesta en la fase 1 mediante la formulación de dos guías de laboratorio para un correcto entendimiento de las partes y el funcionamiento del equipo construido (ver anexo 6).

4.1. DESARROLLO DE LA FASE 1, IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE SEGUIMIENTO Y ADQUISICIÓN DE DATOS.

En la primera fase se procedió con la creación del sistema de seguimiento del sol para el concentrador solar usando como base lo realizado por de la hoz [8] pero agregando un nuevo y diferente hardware que es compatible con Arduino como por ejemplo el “Módulo Relé de 2 Canales” del que se hablara detalladamente más adelante para con el controlar el movimiento del motor que moverá el CCP sin dejar de lado que este sistema será programado con el software Arduino el cual es de uso gratuito y accesible a la comunidad para fomentar el aprendizaje e intercambiar experiencias en el mundo de la electrónica, además se procedió a programar e implementar un sistema de adquisición de datos del intercambiador de calor, como también datos del receptor del CCP para dar cumplimiento al primer objetivo que proponía la elaboración del

sistema de seguimiento y adquisición de datos bajo la programación de una tarjeta de desarrollo Arduino para el sistema eléctrico y mecánico del CCP.

4.1.1. Trayectoria del sol.

Se implementó el seguimiento solar con el fin de garantizar la incidencia de la radiación solar directa en el foco de la parábola donde está ubicado el tubo receptor. Para determinar el cambio en la posición del concentrador con respecto al sol se tuvo en cuenta las ecuaciones que describen dicho movimiento, conforme se desarrollan cada una de las ecuaciones para el estudio de la trayectoria solar mencionadas anteriormente. A manera de ejemplo se describe un cálculo de cada ecuación, seleccionando uno de los días de mayor radiación solar, para este caso el 22 de enero del 2019 a la 1 pm; con el propósito de obtener, además, la eficiencia óptica con la geometría del concentrador solar.

Para comenzar se calcula la posición angular de la tierra en la órbita (α), con la ecuación 2 mencionada en el marco teórico.

$$\alpha = \frac{(2\pi(nd-1))}{365} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{(2\pi(22-1))}{365} = 0.3615$$

Se continúa con la definición de la declinación del sol (δ) usando la ecuación número 1 como se muestra a continuación que depende del resultado de la ecuación número 2 donde se calculó la posición angular.

$$\delta = (0,006918 - 0,0399912 \cos(\alpha) + 0,070257 \operatorname{sen}(\alpha) - 0,006758 \cos 2(\alpha) + 0,000907 \operatorname{sen}(2\alpha) - 0,002697 \cos 3\alpha + 0,00148 \operatorname{sen} 3\alpha) \left(\frac{180}{\pi}\right) \quad (1)$$

$$\delta = (0,006918 - 0,0399912 \cos(0.3615) + 0,070257 \operatorname{sen}(0.3615) - 0,006758 \cos(2 * 0.3615) + 0,000907 \operatorname{sen}(2 * 0.3615) - 0,002697 \cos(3 * 0.3615) + 0,00148 \operatorname{sen}(3 * 0.3615)) \left(\frac{180}{\pi}\right)$$

$$\delta = -19.8655$$

Teniendo como dato inicial el día del experimento que en este caso será el día 22 (nd) se define la ecuación de tiempo (ET) con la ecuación número 3 y 4 donde Et depende de B .

$$B = (nd - 81) * \left(\frac{360}{364}\right) \quad (3)$$

$$B = (22 - 81) * \left(\frac{360}{364}\right) = -58.3516$$

$$Et = 9.87 * \sin(2 * B) - (7.53 * \cos(B)) - (1.5 * (\sin(B))) \quad (4)$$

$$Et = 9.87 * \sin(2 * (-58.3516)) - (7.53 * \cos(-58.3516)) - (1.5 * (\sin(-58.3516)))$$

$$Et = -11.4914$$

Teniendo el valor de la ecuación de tiempo que dio como resultado que

$Et = -11.4914$ se determina mediante la ecuación numero 5 el tiempo solar donde $Sl = 75$ debido a que es el meridiano de referencia para Colombia.

$$AST = LST + \left(\frac{Et}{60}\right) \pm \frac{(4*(SL-Ll))}{60} + DS \quad (5)$$

El valor de LST se refiere a la hora exacta del día volviendo minutos y segundo horas usando la ecuación 6.

$$LST = ho + (mi/60) + (se/3600) \quad (6)$$

$$LST = 13 + \left(\frac{0}{60}\right) + \left(\frac{0}{3600}\right) = 13$$

Ll se refiere a la longitud de la ubicación en donde se va hacer el análisis la cual es $74^{\circ}4'54''$ para la ubicación de la universidad libre sede bosque usando la ecuación 7.

$$Ll = lt + (min/60) + (seg/3600) \quad (7)$$

$$Ll = 74 + (4/60) + (54/3600) = 74.1025^{\circ}$$

Se reemplazan los resultados de LST , Et , SL , Ll y DS donde $DS = 0$. Se puede obtener AST con la ecuación 5.

$$AST = LST + \left(\frac{Et}{60}\right) \pm \frac{(4*(SL-Ll))}{60} + DS \quad (5)$$

$$AST = 13 + \left(\frac{-11.4914}{60} \right) \pm \frac{(4 * (75 - 74.1025))}{60} + 0$$

$$AST = 12.8683$$

Definiendo previamente AST se determina el valor del ángulo horario con la ecuación número 8.

$$h = \frac{360}{24} (AST - 12) \quad (8)$$

$$h = \frac{360}{24} (12.8683 - 12) = 13.0246$$

se define la latitud (L) con la ecuación (9) que para este caso en la universidad libre sede Bogotá es 4 grados, 39 minutos de arco y 54 segundo de arco.

$$L = la + (mn/60) + (sg/3600) \quad (9)$$

$$L = 4 + (39/60) + (54/3600) = 4.6650^\circ$$

Finalizando para obtener el Angulo de incidencia (θ) sobre una superficie y el haz de Angulo entre el plano dado y la superficie horizontal se determina con la ecuación (10) en este caso (β) y (γ) es 0. Aparte se usa variables anteriormente definidas como son declinación (δ), latitud (L) y el ángulo horario (h).

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin(\delta) \sin(L) \cos(\beta) - \sin(\delta) \cos(L) \sin(\beta) \cos(\gamma) + \cos(\delta) \cos(L) \cos(\beta) \cos(h) + \\ & \cos(\delta) \sin(L) \sin(\beta) \cos(\gamma) \cos(h) + \cos(\delta) \sin(\beta) \sin(\gamma) \sin(h) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin(-19.8655) \sin(4.6650) \cos(0) - \sin(-19.8655) \cos(4.6650) \sin(0) \cos(0) \\ & + \cos(-19.8655) \cos(4.6650) \cos(0) \cos(13.0246) \\ & + \cos(-19.8655) \sin(4.6650) \sin(0) \cos(0) \cos(13.0246) \\ & + \cos(-19.8655) \sin(0) \sin(0) \sin(13.0246) \end{aligned}$$

$$\theta = 27.6715^\circ$$

Para futuros cálculos de eficiencia térmica del concentrador solar se necesitan los siguientes dos datos el área del absorbedor (A_r) mediante la ecuación 17 y el área de apertura (A_a) usando la ecuación 16 usando las variables de la siguiente tabla número 3.

Tabla 3. Variables iniciales geométricas del CCP.

Variable	Valor	Significado
L_a	1.18 m	Longitud de apertura
D_g	0.0254 m	diámetro de la cubierta de vidrio
L	2.44 m	longitud del colector
Do_l	0.0159 m	diámetro externo del tubo receptor

Fuente: Elaboración propia.

$$A_a = (L_a - D_g) * L \quad (16)$$

$$A_a = (1.18 - 0.0254) * 2.44 = 2.1872 \text{ m}^2$$

$$A_r = \pi * L * Do_l \quad (17)$$

$$A_r = \pi * 2.44 * 0.015875 = 0.1217 \text{ m}^2$$

Con la determinación del Angulo de incidencia se pudo determinar los posibles ángulos a los que se debería ubicar el CCP durante el día como se muestra en la figura número 8 donde se aprecia como es el cambio del Angulo desde las 8 de la mañana hasta las 4 de la tarde, en la figura se puede apreciar que desde las 8 de la mañana hasta las 12 de la tarde los datos van de 65 grados hasta los 25 grados, en la parte de las 12 de la tarde a las 4 de la tarde o 16 horas los datos van desde los 24 grados a los 62 grados, lo que se debe traducir a que la perspectiva en que se ve el ángulo cambio después de las 12 de la tarde, con la ayuda de las ecuaciones para el cálculo del ángulo de incidencia en el apartado 4.2.4 se mostrara como llegan a ser la raíz del algoritmo del sistema de seguimiento que se programó.

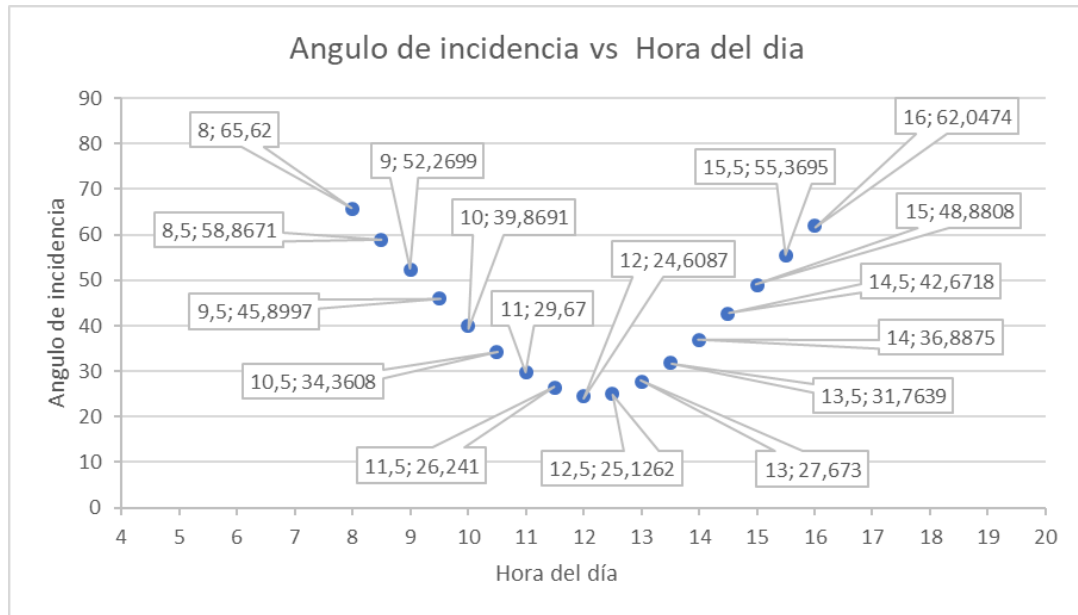


Figura 8. Grafica ángulo de incidencia versus la hora del día para el día 22 de enero.
Fuente: Elaboración propia.

4.1.2. La eficiencia Óptica del Concentrador cilíndrico parabólico

La eficiencia óptica es definida como la relación de la energía absorbida por el receptor a la energía incidente en la apertura del colector. La eficiencia óptica depende de las propiedades de los materiales como son el cobre para el receptor, el vidrio para la cubierta y el acero inoxidable de la superficie reflectora estas constantes de propiedades termofísicas vienen de trabajo de grado (De La Hoz & Gonzalez, 2014) y son condensadas en la tabla número 4.

Tabla 4. Variables termofísicas y geométricas del CCP.

Variable	Valor	Significado
ρ	0.852	reflectancia de la superficie reflectora de acero inoxidable
τ	0.88	transmitancia de la cubierta de vidrio
α	0.92	transmitancia de la cubierta de vidrio
φ	0.78	factor de interceptación
A_a	$2.1872 m^2$	área de apertura
f	$0.364 m$	longitud del eje foca
Y_m	$0.215 m$	altura de la parábola
W_a	$1.118 m$	apertura de la parábola

Fuente: Elaboración propia.

$$A_e = f * W_a * \left(1 + \frac{W_a}{48 * (f^2)}\right) \quad (12)$$

$$A_e = 0.364 * 1.118 * \left(1 + \frac{1.118}{48 * (0.364^2)}\right)$$

$$A_b = \left(\frac{2}{3}\right) * W_a * Y_m$$

$$A_b = \left(\frac{2}{3}\right) * 1.118 * 0.215 = 0.1602 \text{ m}^2$$

A_p es el área de perdidas más el efecto final

$$A_p = A_e + A_b \quad (14)$$

$$A_p = 0.4785 + 0.1602 = 0.6387 \text{ m}^2$$

Por último, la relación del factor geométrico será dada por la división entre A_p y A_a

$$A_f = A_p / A_a \quad (15)$$

$$A_f = 0.6387 / 0.73 = 0.2340$$

Teniendo en cuenta los datos anteriores se hace el cálculo de la eficiencia óptica usando la ecuación 11, los parámetros termofísicas de la tabla 8 y el Angulo de incidencia (θ) calculado en el apartado 4.2.1.

$$\eta_o = \rho \cdot \tau \cdot \varphi \cdot \alpha [1 - A_f \tan \theta] \cos \theta \quad (11)$$

$$\eta_o = 0.852 \cdot 0.88 \cdot 0.78 \cdot 0.92 [1 - 0.2340 * \tan 27.6715] \cos 27.6715$$

$$\eta_o = 0.4180$$

A continuación se presenta una muestra mensual de cada mes del año de la eficiencia óptica del CCP el día 14 de cada mes más específicamente con el objetivo de conocer las horas de mayor eficiencia óptica, durante 12 días del año dispersos de una manera equivalentemente en las que más

se puede aprovechar el recurso solar como se puede apreciar en la tabla 5 los resultados de esta tabla son calculados mediante la programación en Matlab del anexo 1 .

Tabla 5. Eficiencia óptica durante el día, el día 14 de cada mes del año.

Mes	Hora del día												
	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00	18,00
Enero	-0,15	-0,02	0,11	0,23	0,33	0,40	0,43	0,41	0,34	0,25	0,13	0,00	-0,13
Febrero	-0,16	-0,02	0,12	0,24	0,35	0,43	0,47	0,45	0,39	0,29	0,16	0,03	-0,11
Marzo	-0,14	0,00	0,14	0,27	0,39	0,47	0,52	0,49	0,41	0,30	0,17	0,03	-0,11
Abril	-0,11	0,03	0,17	0,30	0,41	0,49	0,53	0,48	0,40	0,29	0,16	0,02	-0,13
Mayo	-0,10	0,04	0,18	0,30	0,40	0,47	0,49	0,45	0,38	0,27	0,00	0,01	-0,13
Junio	-0,10	0,03	0,16	0,28	0,38	0,45	0,47	0,44	0,37	0,27	0,15	0,02	-0,12
Julio	-0,11	0,02	0,15	0,27	0,37	0,45	0,48	0,45	0,38	0,28	0,16	0,03	-0,11
Agosto	-0,12	0,02	0,16	0,29	0,39	0,47	0,51	0,47	0,40	0,29	0,16	0,03	-0,11
Septiembre	-0,10	0,04	0,18	0,31	0,42	0,50	0,53	0,48	0,39	0,27	0,14	0,00	-0,14
Octubre	-0,09	0,05	0,19	0,31	0,41	0,48	0,49	0,44	0,36	0,24	0,11	-0,03	-0,17
Noviembre	-0,10	0,04	0,17	0,28	0,38	0,44	0,45	0,40	0,32	0,21	0,09	-0,05	-0,18
Diciembre	-0,13	0,00	0,13	0,25	0,34	0,40	0,42	0,39	0,32	0,22	0,10	-0,03	-0,16

Fuente: elaboración propia.

Para identificar y visualizar las eficiencias ópticas a lo largo del año se presenta la siguiente figura 11 basándose en los datos anteriormente expuestos en la tabla 5.

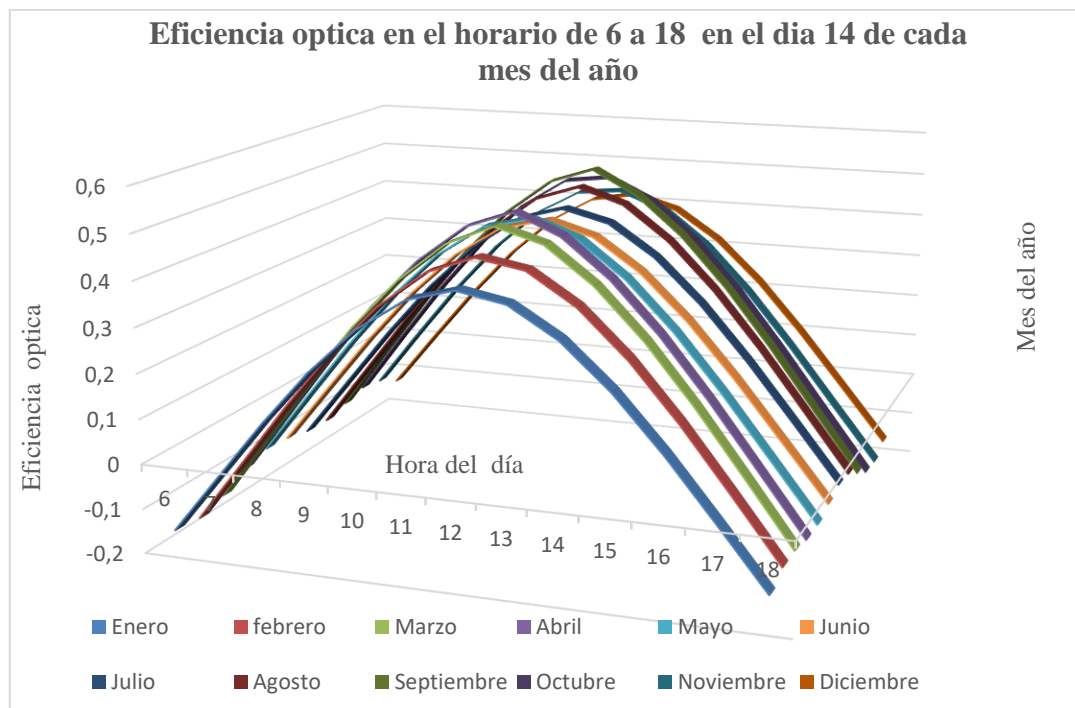


Figura 11. Grafica de eficiencia óptica durante el día, el día 14 de cada mes del año.
Fuente: elaboración propia.

Como se puede apreciar en la figura 11 dentro de la franja horaria que hay de las 10 am a las 2 pm el promedio de eficiencia óptica para esta ubicación de la tierra es de un promedio 0.42 lo que equivale a una eficiencia óptica promedio del 42% para el día 14 de los 12 meses del año dato que se tendrá en cuenta para los próximos cálculos de eficiencia térmica del colector parabólico en el apartado 4.31.

4.1.3. Dispositivos electrónicos para el sistema de seguimiento del sol del CCP.

En esta parte del documento se explicará la razón por la cual se seleccionaron ciertos dispositivos para que el CCP siga la trayectoria del sol en función del día del año y la hora del día además de la ubicación en la tierra debido a que el equipo ya contaba con ciertas piezas del sistema de transmisión por ejemplo, no hubo necesidad de seleccionar ciertas piezas como se explicara en la tabla 6.

Tabla 6. Dispositivos sistema de movimiento.





Dispositivo	Foto
<p>Arduino. Es una plataforma electrónica de código abierto basada en hardware y software fáciles de usar. Las placas Arduino pueden leer entradas como la temperatura en una termocupla o un sensor de flujo y convertirla en una salida que puede ser activar una bomba de agua. En la tarjeta se puede programar infinidad de instrucciones como un computador más, con un lenguaje de programación sencillo para este proyecto se usó el Arduino Mega 2560 que es una placa que contiene un micro controlador ATmega2560 con una conexión USB para embeber programas. Este se puede ver en la figura 12.</p>	
<p>Motor reductor DC Valeo 404603. El motor usado es marca Valeo modelo 404603 como se puede ver en la figura 13, de aplicación en maquinaria industrial se conectó a una tensión de alimentación de 12 voltios de corriente directa y una velocidad de 40rpm con potencia nominal de 35 watts el cual se alimentó con 5 voltios para obtener la velocidad optima del movimiento del CCP, este dispositivo ya venía con el equipo por lo que no se tuvo que seleccionar.</p>	
<p>Arreglo de engranajes mecánicos. Al motor anterior se le adapto un sistema de dos engranajes formado por un engranaje de 9 dientes y el otro engranaje de 60 dientes como se puede ver en la figura 14, con el fin de garantizar la reducción del movimiento del motor, estos dispositivos ya venían con el equipo por lo que no se tuvo que seleccionar.</p>	
<p>Modulo relé de 2 canales. El módulo relé incluye 2 canales como se puede ver en la figura 15, sirve para controlar de manera digital, controlado por una entrada TTL para ser controlada por un Arduino, esta modulo requiere de una alimentación de 5V a ser un módulo reduce la cantidad de dispositivos electrónicos que se usan para este fin, este viene a ser un arreglo para la reducción de espacio por lo que es muy común en el mercado, este dispositivo permite aislar las corrientes de control de las corrientes que mueven el actuador que para este caso será el motor Valeo con la finalidad también de cambiar de dirección la rotación del motor.</p>	
<p>Potenciometro lineal. Con un potenciometro lineal de 10 kilo Ohmios como se puede ver en la figura 16, alineado al giro del eje rotacional en el concentrador se usará para medir voltajes en un rango de 0 ° a 180°, este sensor funciona con una tención de 5.2 voltios se usó para conocer la posición del CCP realizando una regresión lineal de la variación arrojada por la salida analógica del sensor en función del ángulo.</p>	
<p>Fuentes TXT (De Polaridad Positiva y Polaridad Negativa). La siguiente fuente es ampliamente utilizada en computadores de escritorio como se puede ver en la figura 17, pero tiene la cualidad de poseer salidas de 12 voltios, -12voltios, 5 voltios y 3.3voltios. Que son voltajes necesarios para la alimentación de la tarjeta Arduino, los actuadores, los sensores y estará conectada al módulo relé de dos canales para mover el motor Valeo.</p>	

Fuente: laboración propia.

4.1.4. Dispositivos electrónicos para el sistema de adquisición de datos del intercambiador de calor y el CCP.

En esta parte del documento se explicará la razón por la cual se seleccionaron ciertos dispositivos como sensores que medirán variables como velocidad del caudal y temperatura de los fluidos aparte de la mini bomba seleccionada que servirá de actuador para mover el fluido al interior de las tuberías, en la tabla 7 se expondrán las características y la razón de la selección de cada uno de estos elementos que compone el sistema de adquisición de datos.

Tabla 7. Dispositivos para adquisición de datos.

Dispositivos	Foto
<p>Mini Bomba de agua 12v. Bomba de 12 voltios con una corriente de 0.5 Amperios – 0.7 A puede mover de 1.5 a 2 litros por minuto es muy usada en electrodomésticos con 3 metros de elevación vertical Cuando la tensión de 6 voltios, el poder es de 6 Watts por hora y si es de 6-12 voltios es de 5 Watts a 10 Watts de potencia, se seleccionó en función del cálculo realizado en el apartado 4.4.2.</p>	
<p>Modulo L298N. El driver L298N permite controlar la velocidad de motores de corriente directa y paso a paso, mediante el cambio la variación de pulsos. Además, se puede cambiar la dirección de giro de los motores mediante el uso señales análogas. El propósito de este dispositivo es controlar flujo de las bombas que se incluyeron en el intercambiador de calor.</p>	
<p>Sensor de flujo YF-S201. Este sensor funciona con un principio físico llamado efecto hall mediante un molino y un sensor magnético que cuenta la cantidad de vueltas que gira el rotor interno del sensor para determinar el caudal que circula en el interior. tiene una entrada y salida de media pulgada con un rango de medida de 1l/min a 30 l/min. se seleccionó en función de lo analizado en el apartado 4.4.3.</p>	
<p>Termocupla tipo k con MAX 6675. El circuito integrado MAX6675 de Maxim/Dallas Semiconductor es un convertidor analógico a digital para termopares tipo K ahorrará bastante espacio al momento de diseñar un circuito impreso. Dentro circuito se encuentra la electrónica necesaria para amplificar, compensar y convertir a digital el voltaje generado por el termopar para medir temperaturas 0-600 grados con una resolución de la temperatura de 0. 25 grados.</p>	

Fuente: elaboración propia.

4.1.5. Esquema del programa sistema de seguimiento del sol y adquisición de datos

Para la implementación de sistema de seguimiento del sol se pretende mover un eje paralelo al eje focal que sea perpendicular al ángulo de incidencia del Sol para esto se utilizaron las ecuaciones de trayectoria del sol usadas en el capítulo 4.1.1 que están en función de la ubicación

específica y también del día del año que serán variables de entrada para este sistemas de seguimiento que son piezas fundamentales para el algoritmo que fue programado para el sistema de seguimiento además también se programó todo el sistema de adquisición de datos de los diferentes sensores y actuadores expuestos en el apartado 4.1.4 y embebido en el Arduino para cumplir con los siguientes requerimientos:

- Monitorear la posición angular del concentrador además de adquirir los datos del ángulo de incidencia en el receptor del CCP usando como sensor el potenciómetro durante el funcionamiento.
- El motor debe acomodar el receptor del CCP en una posición donde se pueda realizar la alimentación del fluido que va circular por el receptor, el ángulo de posición deberá ser aproximadamente 90 grados respecto al suelo donde se encuentra el CCP que deberá estar nivelado.
- El programa debe preguntar cuándo debe iniciarse el posicionamiento del sol para cuando se le introduzca la hora y la fecha, después calcule y se posicione en el Angulo correcto.
- El programa mediante el monitor serial de Arduino debe preguntar si desea descargar los datos.
- El programa también debe guardar los datos arrojados por los sensores.
- Por último el programa debe tener la facultad de variar la velocidad de las bombas para realizar experimentos con diferentes flujos volumétricos mediante el monitor serial.

A continuación, se explica de manera esquemática en la figura 10 el funcionamiento del programa que será embebido en el Arduino este programa se podrá consultar en el anexo 6 y en el anexo 9 se podrá consultar el manual de la maquina.

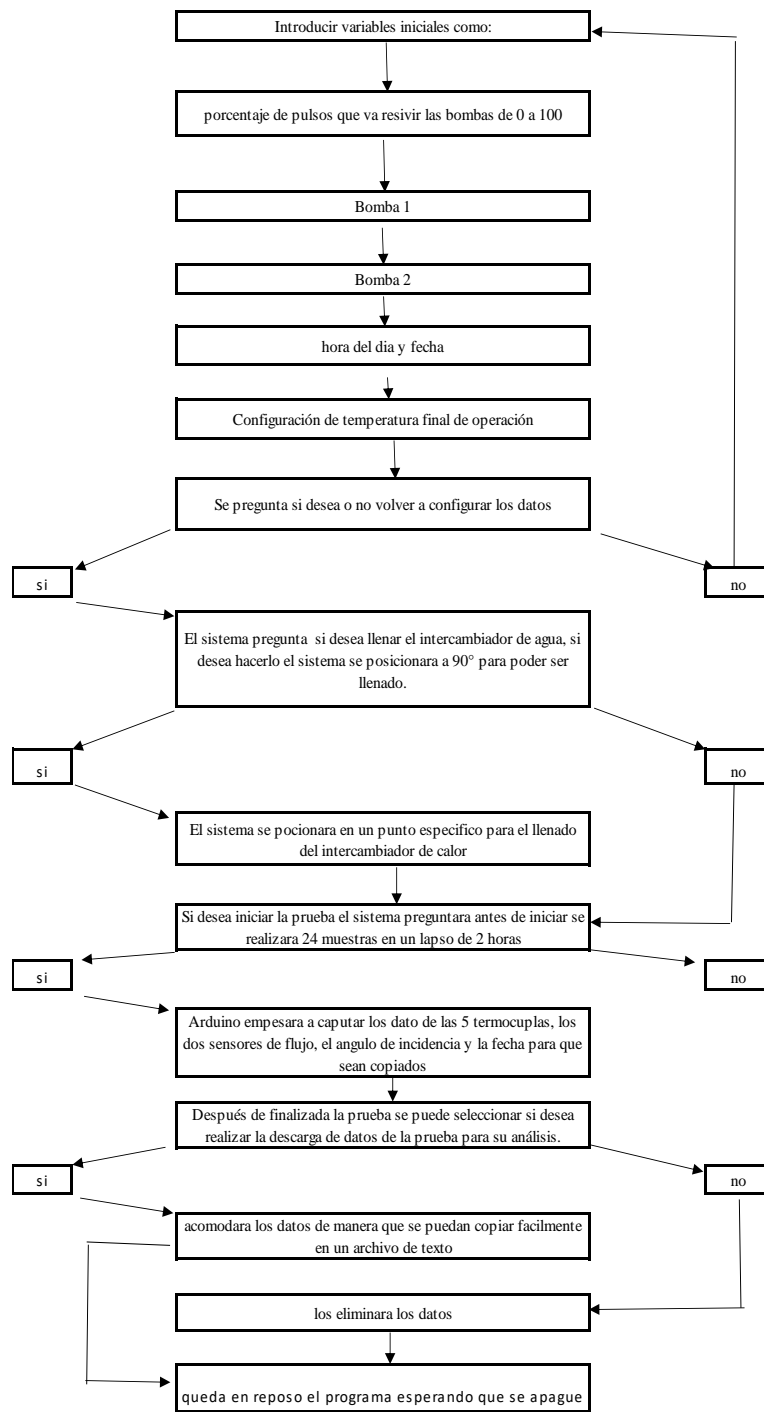


Figura 10. Esquema de funcionamiento de programa en Arduino.
Fuente: elaboración propia.

4.2. DESARROLLO DE LA FASE 2, CARACTERIZACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DEL CCP

En esta fase se mostrara el análisis térmico de transferencia de calor del CCP para determinar el calor que puede aportar al intercambiador de calor de doble tubo que se seleccionó en el apartado 4.3 donde sus dimensiones serán calculadas también en el actual apartado usando el histórico de las variables ambientales proporcionadas por la estación meteorológica Davis ubica en el campus de la Universidad Libre Sede Bosque en la Ciudad de Bogotá Distrito Capital estos fueron proporcionados por el departamento de ingeniería ambiental y se pueden consultar en el Anexo 8.

4.2.1. Cálculo de la eficiencia térmica del CCP.

Teniendo previamente la eficiencia óptica del concentrador cilíndrico parabólico ahora se definen la geometría del receptor además de sus propiedades termo físicas, la geometría de la cubierta de vidrio además de sus propiedades termo físicas, las propiedades del aire y las propiedades del fluido que va circular dentro del receptor para dar solución al objetivo diseñar y construir un prototipo de intercambiador que permita el aprovechamiento del calor del concentrador cilíndrico parabólico.

A continuación, la geometría del receptor de cobre y sus propiedades:

$A_r = 0.1217 m^2$	área del absorbedor
$\epsilon_r = 0.92$	emisividad del material del absorbedor
$Di_l = 0.015164 m$	diámetro interno del tubo
$Do_l = 0.015875 m$	diámetro interno del tubo
$\kappa_{cu} = 410 w/m^2.k$	conductividad térmica del cobre

La geometría de la envolvente de vidrio, temperaturas que influyen y sus propiedades.

$A_g = 0.1947 m^2$	área de la cubierta de vidrio
$d_g = 0.0254 m$	diámetro de la envolvente de vidrio
$\epsilon_g = 0.87$	emisividad de la cubierta de vidrio
$T_g = 16 c^\circ = 299^\circ K$	temperatura de la envolvente de vidrio cercana o similar a la temperatura ambiente, tomada aleatoriamente y verificada con la ecuación 25 que afirma que si está bien estimada.

La cantidad de agua que circula y sus propiedades:

$\dot{m}_h = 0.025 kg/s$	Flujo masico se tomó de la Bomba que otorga un flujo masico en el rango de 1.5 l/min a 3 l/min, debido a que al aumentar el flujo, disminuye la cantidad de calor concentrada como se ve en la figura 13 por lo que se tomó el flujo volumétrico de 1 l/m que equivale a 0.025 kg/s.
--------------------------	--

$Pr_l = 6.0799$	Número de Prandtl del agua
$k_l = 0.6083 \frac{w}{k \cdot m}$	conductividad térmica del agua en el interior del tubo
$MI_l = 8.988 * 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s}$	Viscosidad dinámica del agua en el interior del tubo
$Cp_l = 4173.3$	Capacidad calorífica del agua

Velocidad y Propiedades del aire circundante al concentrador solar que son aportadas por valores históricos de la estación meteorológica como se puede apreciar en el anexo 8

$T_a = 19.9 \text{ } ^\circ\text{C} = 292.9 \text{ } K^\circ$	temperatura ambiente
$\mu_a = 1.8360 * 10^{-5}$	viscosidad dinámica del aire
$\rho_a = 0.8520 \text{ } kg/m^3$	densidad del aire
$k = 0.02553 \frac{w}{k \cdot m}$	conductividad del aire
$v_a = 5.8 \text{ } m/s$	velocidad del viento promedio en Bogotá.

Otras variables

$A_a = 2.8172 \text{ } m^2$	área de apertura del concentrador solar
$G_B = 800 \text{ } w/m^2$	radiación Solar
$\sigma = 5.67 * 10^{-8}$	constante de Boltzmann

A continuación, se inicia suponiendo diferentes temperaturas en el dispositivo como son:

$T_r = 40 \text{ } ^\circ\text{C} = 313.15 \text{ } ^\circ\text{K}$	temperatura del receptor.
$T_g = 16 \text{ } ^\circ\text{C} = 289.15 \text{ } ^\circ\text{K}$	temperatura de la envolvente de vidrio.
$T_i = 25 \text{ } ^\circ\text{C} = 299 \text{ } ^\circ\text{K}$	temperatura del agua a la entrada del concentrador solar después de una iteración partiendo de la temperatura $t_i = 16 \text{ } ^\circ\text{C}$

Para empezar, se definen con la ecuación número 19 el coeficiente de radiación entre el tubo receptor y la envolvente de vidrio.

$$h_r = \frac{\sigma(T_r^2 + T_g^2)(T_r + T_g)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{A_r}{A_g} \left(\frac{1}{\epsilon_g} - 1 \right)} \quad (19)$$

$$h_r = \frac{5.67 * 10^{-8} * (313.15^2 + 289.15^2)(313.15 + 289.15)}{\frac{1}{0.92} + \frac{0.1217}{0.1947} \left(\frac{1}{0.87} - 1 \right)}$$

$$h_r = 5.2462$$

Se continúa calculando el coeficiente de radiación de la cubierta de vidrio al ambiente con la ecuación 20.

$$h_c = \varepsilon_g * \sigma * (T_g + T_a)(T_g^2 + T_a^2) \quad (20)$$

$$h_c = 0.87 * (5.67 * 10^{-8}) * (289.15 + 292.9)(289.15^2 + 292.9^2)$$

$$h_c = 4.8637$$

También se define el coeficiente de transferencia de calor por convección de la cubierta de vidrio al ambiente con la ecuación 21.

$$h_w = (Nu_a)k/D_g \quad (21)$$

Pero primero se calcula el Número de Nusselt con la ecuación 23 para las pérdidas debido a el viento por lo cual se calcula el número de Reynolds con la ecuación 24 como pre requisito:

$$Re_a = (\rho_a * v_a * d_g)/\mu_a \quad (24)$$

$$Re_a = (1.1259 * 5.8 * 0.0254)/1.9176 * 10^{-5}$$

$$Re_a = 9837.5$$

Para $1000 < Re < 50000$

$$Nu_a = 0.3(Re_a)^{0.6} \quad (23)$$

$$Nu_a = 0.3(9837.5)^{0.6}$$

$$Nu_a = 74.6193$$

$$h_w = (74.619) * 0.025/0.0254 \quad (21)$$

$$h_w = 73.39$$

Para estimar las propiedades en la cubierta de vidrio, se requiere la temperatura de la cubierta de vidrio, T_g .

$$T_g = \frac{A_r * h_r * T_r + A_g (h_c + h_w) T_a}{A_r * h_r + A_g (h_c + h_w)} \quad (25)$$

$$T_g = \frac{0.1217 * 5.2562 * 313.15 + 0.1947(4.86 + 73.39) * 292.9}{0.1217 * 5.2562 + 0.1947(4.86 + 73.39)}$$

$$T_g = 293.71 \text{ } ^\circ K$$

Como el resultado es similar se puede apreciar que la estimación inicial fue correcta, continuando con los cálculos se debe definir el coeficiente promedio de transferencia de calor del agua al interior del tubo receptor con la ecuación número 26.

$$h_{fi} = Nu_l * k_l / D_o \quad (26)$$

Donde k_l es la conductividad térmica del agua en el interior del tubo mientras que Nu_l es el número de Nusselt con la ecuación número 27 pero antes se debe calcular el número de Reynolds a la entrada del receptor (Re_l) con la ecuación número 28 como se puede apreciar a continuación:

$$Re_l = V_l * D_i / \nu_l \quad (28)$$

$$Re_l = \frac{(4 * 0.025)}{3.1416 * 0.015164 * (8.98 * 10^{-4})} = 2230.8$$

$$Nu_l = 0.023 * RE_l^{0.8} * Pr_l^{0.4} \quad (27)$$

$$Nu_l = 0.023 * 2230.8^{0.8} * 6.0799^{0.4} = 22.597$$

$$h_{fi} = 22.597 * 0.6083 / 0.01516 \quad (26)$$

$$h_{fi} = 865.94$$

Teniendo el cálculo previo de todos los coeficientes ahora se calcula el coeficiente global de transferencia de calor mediante la ecuación número 18.

$$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_c)A_g} + \frac{1}{h_r} \right]^{-1} \quad (18)$$

$$U_L = \left[\frac{0.1217}{(73.39 + 4.86) * 0.1947} + \frac{1}{5.2562} \right]^{-1}$$

$$U_L = 5.044$$

Con el coeficiente global de transferencia de calor se realiza el cálculo del factor de tasa de flujo con la ecuación 32 como se muestra a continuación.

$$F = \frac{1/U_L}{\left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_{o1}}{D_{i1} * h_{fi}} + \frac{D_{o1}}{2 * \kappa_{cu}} + \ln \frac{D_{o1}}{D_{i1}} \right)} \quad (32)$$

$$F = \frac{1/5.044}{\left(\frac{1}{5.044} + \frac{0.015875}{0.015164 * 865.94} + \frac{0.015875}{2 * 470} + \ln \frac{0.015875}{0.015164} \right)}$$

$$F = 0.9939$$

Se continúa determinando el Factor de remoción (F_R) con la ecuación 31.

$$F_R = \frac{\dot{m}_h C_{p1}}{A_r * U_{L1} * F} * \left(1 - 2.71 \frac{\frac{-1}{\dot{m}_h C_{p1}}}{A_r * U_{L1} * F} \right) \quad (31)$$

$$F_R = \frac{0.025 * 4176.3}{0.1217 * 5.044 * 0.9939} * \left(1 - 2.71 \frac{\frac{-1}{0.025 * 4176.3}}{0.1217 * 5.044 * 0.9939} \right)$$

$$F_R = 0.9880$$

Como también existe la necesidad de conocer la temperatura de salida del agua que circula en el receptor al obtener la energía de la radiación surgió la variable temperatura de salida T_o que se puede definir usando la ecuación 29 como resultado de un despeje de balance de energía, pero primero se calcula el calor (Q_u) con la ecuación 30.

$$Q_u = F_R * (G_B * \eta_o * A_a - (A_r * U_L * (T_i - T_a))) \quad (30)$$

$$Q_u = 0.9880 * (800 * 0.42 * 2.8172 - (0.1217 * 75.044 * (25 - 19.9)))$$

$$Q_u = 932.15$$

$$T_o = T_i + \frac{Q_u}{\dot{m}_h c_{p_i}} \quad (29)$$

$$T_o = 25 + \frac{932.15}{0.025 * 4173.3}$$

$$T_o = 33.9281 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Finalizando para realizar el cálculo de la relación de concentración del Concentración de colector se usa la ecuación 33.

$$c = \frac{A_a}{A_r} \quad (33)$$

$$c = \frac{2,8172}{0.1217} = 23.1518$$

Por último, para determinar la eficiencia instantánea del concentrador solar que relaciona el análisis térmico y óptico del concentrador solar está dada por la ecuación número 34.

$$\eta = F_R \left[\eta_o - U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_B * c} \right) \right] \quad (34)$$

$$\eta = 0.9880 * \left[0.42 - 5.044 \left(\frac{25 - 19.9}{800 * 23.1518} \right) \right]$$

$$\eta = 0.413$$

Usando los datos recopilados de la estación meteorológica de la universidad libre sede el bosque que se puede consultar en el Anexo 8 se buscó visualizar el comportamiento del CCP con la variación de variables muy importantes como son la radiación solar por metro cuadrado y el flujo masico del fluido en el receptor. A continuación, se muestran las posibles temperaturas a la salida del tubo de absorción con una radiación directa que oscila entre $500 \frac{W}{m^2}$ y $900 \frac{W}{m^2}$ en sus mejores condiciones dando como resultado la figura 11 donde se aprecia la radiación solar versus la

temperatura que se puede alcanzar partiendo de una temperatura del agua de 25°C con la figura 12 se puede apreciar el calor concentrado el receptor versus la radiación solar todos estos los resultados que se muestran en la siguiente tabla 8.

Tabla 8. Resultados del comportamiento del CCP en función de la radiación solar.

Flujo másico en el interior del tubo absorbedor (kg/s)	Temperatura supuesta en el receptor (C°)	Temperatura de entrada (C°)	Calor absorbido por el receptor (w)	Temperatura de salida (C°)	eficiencia térmica	Radiación solar (w/m)
0,025	40	25	581,4	30,3	0,3912	500
0,025	40	25	639,9	30,8	0,3915	550
0,025	40	25	698,3	31,3	0,3917	600
0,025	40	25	756,8	31,9	0,3919	650
0,025	40	25	815,2	32,4	0,3920	700
0,025	40	25	873,7	32,9	0,3922	750
0,025	40	25	932,2	33,5	0,3923	800
0,025	40	25	990,6	34,0	0,3924	850
0,025	40	25	1049,1	34,5	0,3925	900

Fuente: elaboración propia.

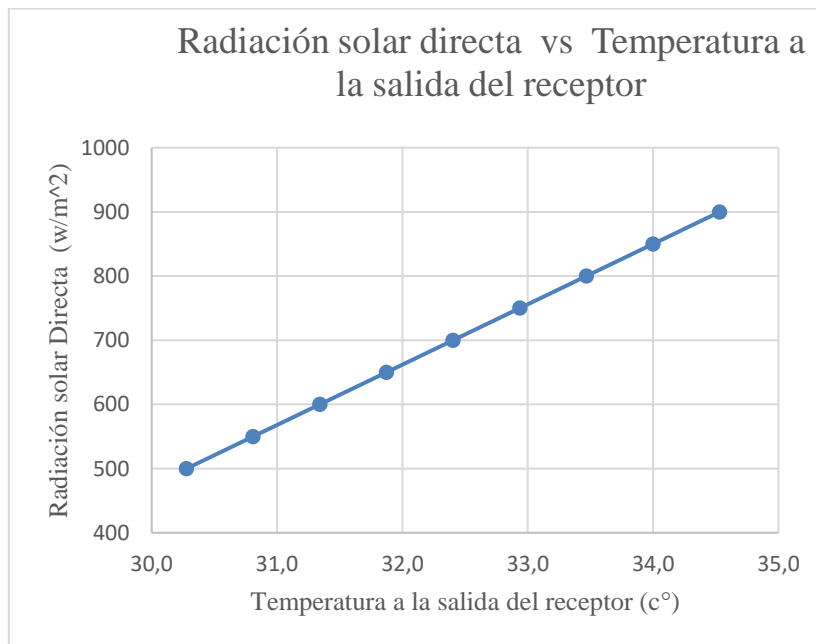


Figura 11. Grafica de radiación solar directa versus temperatura a la salida del receptor.

Fuente: elaboración propia.

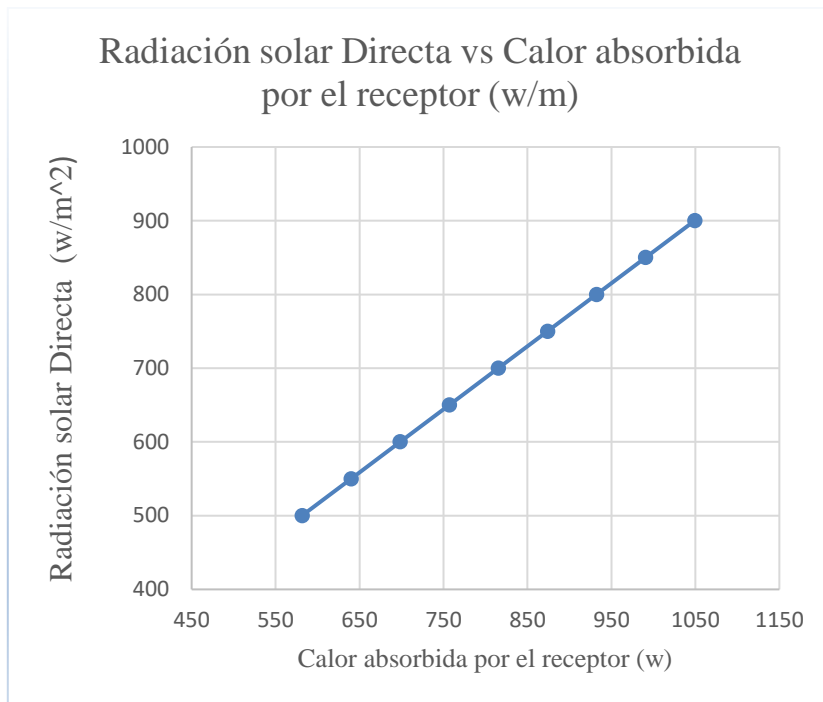


Figura 12. grafica de radiación solar directa vs calor absorbido por el receptor.
Fuente: elaboración propia.

A continuación, mediante el uso de la tabla 9 y la figura número 13 se puede apreciar la disminución de la temperatura de salida del intercambiador de calor aumentando el flujo masico dentro del circuito hidráulico.

Tabla 9. Variación de la temperatura de salida del CCP en función del flujo masico.

Flujo másico en el interior del tubo absorbedor (kg/s)	Temperatura supuesta en el receptor	Temperatura de entrada del absorbedor (c°)	Calor (w)	Temperatura de salida del absorbedor (c°)	eficiencia térmica	Radiación solar (w/m)
0,025	40	25	933,5093	33,9411	0,4142	800
0,03	40	25	934,2779	32,457	0,4145	800
0,035	40	25	934,8466	31,3956	0,4148	800
0,04	40	25	935,286	30,5988	0,415	800
0,045	40	25	935,6369	29,9786	0,4151	800
0,05	40	25	935,9241	29,4821	0,4153	800
0,055	40	25	936,164	29,0757	0,4154	800
0,06	40	25	936,3676	28,7369	0,4155	800
0,065	40	25	936,543	28,4501	0,4155	800
0,07	40	25	936,6956	28,2041	0,4156	800
0,075	40	25	936,8299	27,991	0,4157	800

Fuente: elaboración propia.

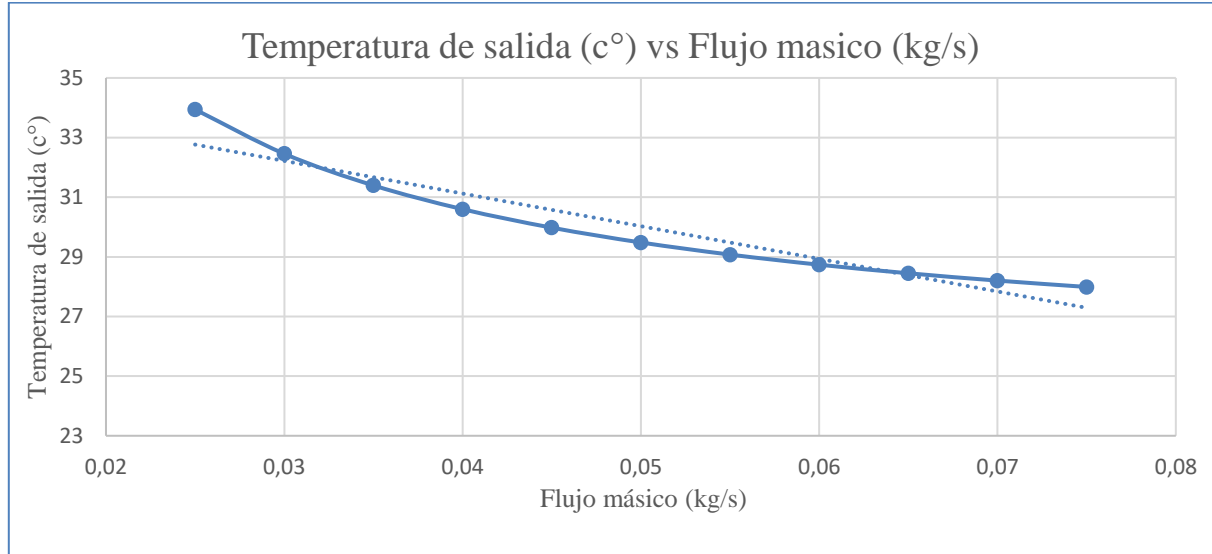


Figura 13. Grafica de temperatura versus flujo masico
Fuente: elaboración propia.

Con todo lo referente a esta sección se pudo concluir que la cantidad de energía que provee el sol en el sitio donde se colocó el CCP daría temperaturas de trabajo para hacer pruebas además de concretar que el menor flujo masico de aproximadamente es de 0.025 [kg/s] que en el intercambiador calor facilitaría la transferencia de calor como se verá en el aparatado 4.4.1.

4.3. DESARROLLO DE LAS FASE 3 SE SELECCIÓN DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR MEDIANTE LA METODOLOGÍA QFD.

Con esta fase se pretende exponer el uso que se le dio a la metodología QFD del objetivo propuesto basándose en variables cualitativas que se volverán cuantitativas usando esta metodología que tiene gran variedad de usos y matices a la hora de usarlo, dando como resultado un método fiable en las selecciones sencillas y complejas. Con esto, se muestra la metodología usada para selección del tipo de intercambiador de calor más adecuado para la integración al concentrador cilíndrico parabólico y aprovechar el calor que este genera para dar solución al objetivo seleccionar un intercambiador de Calor por la metodología QFD que se ajuste al flujo de calor adquirido por el concentrador cilíndrico parabólico.

4.3.1. Metodología QFD (quality function deployment) para selección del intercambiador de calor.

Se plantea el Diseño de un intercambiador de calor que se adapte al Concentrador cilindro parabólico que va estar ubicado en el campus de la universidad libre para que el estudiantado vea una de las muchas maneras de aprovechar la energía de concentración solar, teniendo este objetivo se procedió a modelar el diseño QFD. Para realizar la selección del tipo de intercambiador de calor, se aplicó una metodología con la cual se definieron los parámetros necesarios para realizar el diseño del equipo, así como se determinaron las condiciones y requerimientos a las cuales este estaría sometido, satisfaciendo las necesidades del cliente mediante una propuesta que integrara los aspectos más importantes, seleccionando la opción de diseño más apropiada. Para esto se utilizó el método QFD (Quality Function Deployment) o despliegue en función de la calidad mediante el modelo de casa de la calidad, el cual integra y organiza de manera desarrollada los principales elementos de información, necesarios para entender el problema. primero se definirá el cliente, segundo se definirán los requerimientos del cliente,

Se hará un análisis de la competencia, cuarto se requerimientos de ingeniería, quinto se definirán la importancia de los requerimientos del Cliente, sexto se realizarán las matrices de relaciones con las que se dieron cierto resultado y se tomaron las decisiones expuestas al final de este apartado.

Cliente

La identificación del quien, en el desarrollo del proyecto, fue de forma directa, ya que el cliente que va hacer uso el equipo fue la Universidad Libre.

Requerimientos del Cliente

Los requerimientos dados por la Universidad Libre para la construcción del intercambiador de calor se describen continuación a ser las necesidades que se debieron solventar:

- Menor número de controles a operar (Restricción variable): Como el prototipo va ser de uso para el estudiantado deberá contar con simplicidad operacional.
- Integración del intercambiador de calor (Restricción fija): Lo que se desea es que el intercambiador de calor pueda hacer uso del fluido caliente generado por el concentrador cilíndrico parabólico.
- Resistencia el medio ambiente (restricción variable): Debido a que el concentrador cilíndrico parabólico funciona a la intemperie el intercambiador de calor también lo debe hacer es por esta razón que el uso de materiales resistentes a la inclemencia del medio ambiente es indispensable.
- Tamaño del equipo según espacio disponible (Restricción variable): El espacio disponible para ubicar el equipo es de aproximadamente de $3 m^2$.
- Comodidad en la alimentación y extracción de los fluidos (Restricción variable): Como el uso de prototipo va ser a la intemperie es necesario que haya una facilidad a la hora de preparar los experimentos.

- **Facilidad de Operación (Restricción variable):** La universidad solicitó un equipo de fácil operación, para facilitar a los estudiantes las prácticas en el dispositivo.
- **seguridad (Restricción variable):** El equipo a diseñar tenía que contar con sistemas seguros, para evitar posibles accidentes tanto eléctricos como hidráulicos.
- **Vida Útil (Restricción variable):** Se solicitó un equipo robusto de buenas características y excelentes materiales, con el fin de que este tuviera una larga vida útil en la Universidad.
- **Facilidad de Mantenimiento (Restricción variable):** Se requirió que el equipo a diseñar fuera de fácil mantenimiento, para reducir futuros costos de mantenimiento.
- **Costo (Restricción fija):** El costo del equipo debía estar acorde con el presupuesto disponible, con un tope máximo de 15 millones de pesos.

Análisis de la Competencia

Dentro de las de posibles configuraciones de intercambiadores de calor que son usados hoy en día en la industria y vida común se encuentran tres grandes grupos.

- **Los intercambiadores de tubos concéntricos:** son los intercambiadores más sencillos constan de dos tubos uno más grande que el otro, el tubo más pequeño se ubica al interior del más grande y alberga por lo general el fluido caliente que va ceder calor al fluido que circulara en la parte anular de los dos tubos.
- **Los intercambiadores de tubos y coraza:** En la actualidad este tipo de intercambiador es el más común en la industria por que puede ser muy compacto a la hora de transferir calor entre grandes flujos de másicos. Consta de un para o varias series de tubos paralelos dentro en una coraza a la cual generalmente se le adhieren baffles que hacen que el fluido que pasa netamente por la coraza fluya más eficiente alrededor de los tubos que albergan el otro fluido con el que intercambiaran calor.
- **Los intercambiadores de placas paralelas:** este tipo de intercambiador de calor es especializado en el uso de fluidos en estado gaseoso - liquido o también gaseoso- gaseoso. Usado comúnmente como radiadores y condensadores se tienen placas paralelas que son atravesadas por tubos donde fluye el líquido y alrededor de las placas el gas (por las anteriores razones no se tuvo en cuenta para el análisis QFD y fue descartado en esta fase).

Requerimientos de ingeniería

Continuando se presentan los requerimientos de ingeniería para solventar las necesidades del cliente en el producto final:

- **Potencia de bombeo del fluido caliente y frio:** La potencia de bombeo necesaria iría acorde con el caudal necesario para realizar la trasferencia de calor, debido a que se usará un pequeño caudal no será necesaria una potencia de bombeo mayor a 10 watts.
- **calor del concentrador cilíndrico parabólico:** Para calentar el agua que será el fluido caliente que circulara por el foco del concentrador solar para adquirir el calor necesario.

- Cambio de temperaturas: Con el objetivo de un cambio de temperaturas, se planteó que con los caudales de 1 l/m se debería evidenciar un cambio mínimo de 5°C, entre las temperaturas de los fluidos.
- Resistencia a la corrosión: Usando los materiales como el cobre se logrará prevenir la corrosión en las piezas que constituyen el intercambiador de calor.
- Área del equipo: El tamaño aproximado del equipo se determinó por las restricciones de espacio existentes, con un área de 2m²
- Peso del equipo: Para poder transportar y trasladar el equipo de forma sencilla, se determinó un peso máximo de 400Kg, para poder manejarlo y ubicarlo fácilmente.
- Conductividad térmica de los materiales: Como es necesario que el equipo sea resistente a la corrosión, se determinó que el material también tenía que tener una buena conductividad térmica para evidenciar la transferencia de calor como aluminio, cobre o acero.
- Diseño: El proceso de diseño debe ser el más apropiado para la necesidad de proveer un equipo versátil de construcción asequible.
- Construcción: La construcción debe dar como resultado un prototipo que cumpla con requerimientos y sea de fácil mantenimiento.
- Presión: Las presiones de trabajo, están dadas según la presión que ejerza las columnas de agua del tanque de almacenamiento de agua, con valores entre 1 atmosfera y 1 atmosferas.
- Control: El control del equipo se planeó de forma digital de tal manera que el estudiante interactuara de forma directa con el equipo y determinara fácilmente el proceso con la ayuda de un portátil.

Importancia de los requerimientos del Cliente

Estos requerimientos que irán en la matriz general ubicados en la izquierda de la matriz o en los “Que”, primero se les dará un valor de importancia interrelacionándolos uno a uno como se muestra en la siguiente Tabla 10 asignando un valor de uno a los relacionados y de cero a los no relacionados.

Tabla 10. Matriz de importancia de los requerimientos del cliente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Requerimientos del cliente	Menor número de controles para operar	Integración con el Concentrador cilindro parabólico	Resistencia al medio ambiente	Tamaño según espacio disponible	Comodidad de alimentación y extracción de los fluidos	Fácil de operar	Segura	Vida útil prolongada	Fácil mantenimiento	Bajo costo	suma	IR(%)	Importancia
1 Menor número de controles para operar	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	13,21	3
2 Integración con el Concentrador cilindro parabólico	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	5	9,43	6
3 Resistencia al medio ambiente	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	4	7,55	10
4 Tamaño según espacio disponible	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	6	11,32	4
5 Comodidad de alimentación y extracción de los fluidos	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	5	9,43	7
6 Fácil de operar	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	5	9,43	8
7 Segura	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	7	13,21	2
8 Vida útil prolongada	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	6	11,32	5
9 Fácil mantenimiento	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	8	15,09	1
10 Bajo costo	1	0	1	1	0	0	1	1	0	1	5	9,43	9
											53	100	

Fuente: elaboración propia.

Es por esto que los requerimientos del cliente de mayor importancia son fácil mantenimiento, fácil de operar, menor número de controles, tamaño según el espacio disponible y vida útil prolongada. Es decir que los demás requerimientos también son de importancia, pero de los anteriores dependen que el equipo sea lo más práctico y funcional acomodándose a las necesidades.

Matriz de Relaciones

Para relacionar los requerimientos del cliente con los requerimientos de ingeniería, el diagrama QFD hace uso de una matriz donde se establece, que tan fuerte es la relación de un requerimiento con el otro teniendo en cuenta la importancia que se le había dado anterior mente al requerimiento de ingeniería, y así determinar los más importantes que influirán en el diseño del equipo. A continuación se muestra en la tabla 11 el número que indica los requerimientos del cliente, mientras que en la tabla 12 se puede apreciar el número que va indicar los requerimientos de ingeniería.

Tabla 11. Requerimientos del cliente

No.	Requerimientos del cliente
1	Menor número de controles para operar
2	Integración con el Concentrador cilindro parabólico
3	Resistencia al medio ambiente
4	Tamaño según espacio disponible
5	Comodidad de alimentación y extracción de los fluidos
6	Fácil de operar
7	Segura
8	Vida útil prolongada
9	Fácil mantenimiento
10	bajo costo

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Requerimientos de ingeniería.

No.	Requerimientos de ingeniería (RI)
1	Potencia de bombeo del fluido caliente y frío
2	calor de CCP
3	Cambio de temperaturas
4	Resistencia a la corrosión
5	Area del equipo
6	Peso del equipo
7	Conductividad térmica de los materiales
8	Diseño
9	Construcción
10	Presión
11	Control

Fuente: elaboración propia.

Para interrelacionar los requerimientos de ingeniería con los del cliente se usaron las siguientes cuantificaciones de las relaciones que hay como son: “baja relación” con el valor de 1 lo que significaría que entre los requerimientos no hay un vínculo por lo que pierde importancia, mientras que cuando es “relacionado” con el valor 3 nos indica que es un requerimiento útil pero no tanto como el caso de “altamente relacionado” con el valor de 9 que indica que esos requerimientos poseen importancia en el proceso de diseño este valor es más alejado aumentara el resultado con el fin de obtener una mayor diferencia entre los tipos de intercambiador de calor que se seleccionó. Además debido a que es un uso específico, ver en la figura 14.

Figura 14. Cuantificación de las relaciones.

Relaciones	$\left\{ \begin{array}{l} 9 \\ 3 \\ 1 \end{array} \right.$	Altamente relacionado
		Relacionado
		Baja relación

Fuente: elaboración propia.

Siguiendo con las pautas dadas primero se mostrará las relaciones para el tipo de intercambiador de calor de doble tubo en la tabla 13 y en la tabla 14 para el intercambiador de calor de tubo coraza.

Tabla 13. Matriz QFD para el intercambiador de calor de tubo coraza.

Intercambiador de tubo coraza												
RC / RI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	3 0,40	3 0,40	1 0,13	9 1,19	
2	9 0,85	9 0,85	9 0,85	1 0,09	9 0,85	9 0,85	1 0,09	9 0,85	3 0,28	3 0,28	9 0,85	
3	1 0,08	1 0,08	3 0,23	9 0,68	9 0,68	3 0,23	3 0,23	9 0,68	9 0,68	3 0,23	1 0,08	
4	1 0,11	3 0,34	3 0,34	1 0,11	9 1,02	1 0,11	3 0,34	9 1,02	9 1,02	3 0,34	3 0,34	
5	1 0,09	1 0,09	1 0,09	1 0,09	9 0,85	1 0,09	1 0,09	9 0,85	9 0,85	1 0,09	1 0,09	
6	3 0,28	1 0,09	3 0,28	1 0,09	3 0,28	3 0,28	1 0,09	1 0,09	1 0,09	9 0,85	9 0,85	
7	3 0,40	3 0,40	1 0,13	1 0,13	9 1,19	1 0,13	9 1,19	9 1,19	9 1,19	9 1,19	9 1,19	
8	1 0,11	3 0,34	3 0,34	9 1,02	3 0,34	1 0,11	1 0,11	3 0,34	3 0,34	3 0,34	3 0,34	
9	9 1,36	3 0,45	3 0,45	3 0,45	9 1,36	3 0,45	1 0,15	1 0,15	3 0,45	3 0,45	3 0,45	
10	3 0,28	1 0,09	1 0,09	9 0,85	3 0,28	3 0,28	3 0,28	3 0,28	3 0,28	1 0,09	3 0,28	
	3,70	2,87	2,94	3,66	6,98	2,68	2,72	5,85	5,58	4,00	5,66	
	Total											46,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Matriz QFD para el intercambiador de tubos doble tubo.

Intercambiador de doble tubo												
RC \ RI	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	1 0,13	3 0,40	3 0,40	1 0,13	9 1,19	
2	9 0,85	9 0,85	9 0,85	1 0,09	9 0,85	9 0,85	1 0,09	9 0,85	3 0,28	3 0,28	9 0,85	
3	1 0,08	1 0,08	3 0,23	9 0,68	3 0,23	3 0,23	3 0,23	9 0,68	9 0,68	3 0,23	1 0,08	
4	1 0,11	3 0,34	3 0,34	1 0,11	9 1,02	1 0,11	3 0,34	9 1,02	9 1,02	3 0,34	3 0,34	
5	1 0,09	1 0,09	1 0,09	1 0,09	9 0,85	1 0,09	1 0,09	9 0,85	9 0,85	1 0,09	1 0,09	
6	3 0,28	1 0,09	9 0,85	1 0,09	3 0,28	3 0,28	9 0,85	9 0,85	9 0,85	9 0,85	9 0,85	
7	3 0,40	3 0,40	1 0,13	1 0,13	9 1,19	1 0,13	9 1,19	9 1,19	9 1,19	9 1,19	9 1,19	
8	1 0,11	3 0,34	3 0,34	9 1,02	3 0,34	1 0,11	1 0,11	9 1,02	9 1,02	3 0,34	9 1,02	
9	9 1,36	3 0,45	3 0,45	1 0,15	3 0,45	9 1,36	1 0,15	3 0,45	9 1,36	1 0,15	3 0,45	
10	3 0,28	1 0,09	3 0,28	9 0,85	9 0,85	3 0,28	3 0,28	9 0,85	9 0,85	1 0,09	3 0,28	
	3,70	2,87	3,70	3,36	6,19	3,58	3,47	8,15	8,49	3,70	6,34	
	Total											53,5471698

Fuente: elaboración propia.

Con los resultados obtenidos en la interrelación se sumaron las columnas para dar subtotales que se sumaron también para obtener un total final de las matrices. Se aprecia un mayor despiece y acople a las necesidades ya establecidas del intercambiador de tipo tubos concéntricos con un total final de interrelación de 53.4 superior al de tubo coraza de 46.6 con una diferencia del 12.7 % dando como conclusión que el tipo de intercambiador que se uso es el de tubos concéntricos.

4.4. DESARROLLO DE LA FASE 4 DONDE SE DISEÑO Y CONSTRUYO EL PROTOTIPO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR.

En este apartado se expone el modelado realizado tanto del CCP, como de intercambiador de calor además de su integración total como un único equipo. Alternó a lo anterior se muestra la manera en la cual se restauró el CCP además de acondicionándolo para la construcción del intercambiador de calor al cual va suplir de energía. para dar solución al objetivo Diseñar y construir un prototipo de intercambiador que permita el aprovechamiento del calor del concentrador cilíndrico parabólico.

4.4.1. Cálculo dimensiones del intercambiador de calor de doble tubo

Como se puede apreciar en la siguiente fase la 3 usando la teoría del QFD dio como resultado el intercambiador de doble tubo para el siguiente cálculo se define la longitud del intercambiador de calor de doble tubo en el que previamente se fijaron ciertas variables como el tipo de material el cual será el cobre debido a su alta conductividad térmica, punto de fusión adecuado para las temperaturas de operación, fácil de conformar y soldar. Para justificar esta selección se presenta la tabla 15 donde la siguiente opción pudo haber sido AISI 304 por su resistencia a la corrosión en comparación a los otros materiales. Para el fluido de trabajo se tiene bastantes alternativas, pero debido a que el acceso a ciertas propiedades termo físicas de por ejemplo algunos fluidos especializados en transferencia de calor como aceites térmicos son limitados se usara agua para limitar el error en la estimación de las propiedades debido a que el mencionado es un fluido bastante estudiado como se puede apreciar en las tablas de la fuente las tablas del Çengel, (2007).

Tabla 15. Comparación de los materiales para el intercambiador de calor.

Propiedades	Acero al Carbono		Acero inoxidable		Aluminio 66061	Cobre Tipo k
	AST A53	ASTM A106	AISI 304	AISI		
Conductividad térmica a 20°C (W/m °C)	47	52	15	15	200	338
Densidad (kg/m ³)	7850	7830	7930	7960	2740	7160
Coefficiente de expansión térmica a 20°C	15x10-6	15x10-6	18x10-6	18x10- 6	23x10-6	17x10-6
Temperatura de fusión (°C)	1200	1250	1450	1400	657	955
Resistencia a la tensión a 20°C (Mpa)	330	400	460	460	214	303
Resistencia a la corrosión	Baja	Baja	Alta	Alta	Alta	Media

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presentan las medidas en la tabla 16 estimadas inicialmente para las tuberías de cobre que tiene una conductividad térmica conductividad (k_{cu}) de $410 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ en el tubo de cobre tipo m de ½” (el tubo interno) y el tubo de cobre tipo m de 1” (el tubo externo).

Tabla 16. Valores iniciales de la geometría de los tubos del intercambiador de calor de doble tubo.

Variable	Valor	Significado
D_{ih}	0.015164 m	diámetro interior del tubo de cobre tipo m de ½”
D_{oh}	0.015875 m	diámetro Exterior del tubo de cobre tipo m de ½”
P	0.0476 m	perímetro del tubo de cobre tipo m de ½”
D_{ic}	0.02766 m	diámetro interior del tubo de cobre tipo m de 1”
D_{oc}	0.028575 m	diámetro exterior del tubo de cobre tipo m de 1”

Fuente: Elaboración propia.

Como fluido de trabajo se eligió el agua a continuación se presentan las propiedades del agua caliente en la tabla 17 y el agua fría en la tabla 18 que para este caso el agua caliente circulara a contraflujo en el tubo interior además el agua fría circulara en el área anular formada por los dos tubos y por último se la tabla 19 se muestran las temperaturas que se deberían dar en el intercambiador.

Tabla 17. Propiedades del agua caliente a la entrada del intercambiador de calor

Variable	Valor	Significado
\dot{m}_h	0.025 Kg/s	flujo masico
Cp_h	4173.8	capacidad calorífica
ρ_h	994.78	Densidad
ν_h	$7.3385 * 10^{-7}$	viscosidad cinemática
μ_h	$7.3002 * 10^{-4}$	viscosidad dinámica
Pr_h	4.8894	Prandal
K_h	0.6217	conductividad térmica

Fuente: elaboración propia

Tabla 18. Propiedades del agua fría a la entrada del intercambiador

Variable	Valor	Significado
\dot{m}_c	0.025 Kg/s	flujo masico
Cp_c	4183.4 J/K	capacidad calorífica
ρ_c	1000.9 kg/m ³	densidad
ν_c	$1.1092 * 10^{-6}$ Kg/m ²	viscosidad cinemática
μ_c	0.0011 Kg/(m * s)	viscosidad dinámica
K_c	0.5938 w/(m * s)	conductividad térmica

Fuente: elaboración propia

Tabla 19. Definición de temperaturas en el intercambiador.

Variable	Valor	Significado
$T_{h,2}$	29 °C	temperatura de salida del agua caliente
$T_{h,1}$	33.8722 °C	temperatura de entrada que es la misma T_o anteriormente, que será el agua caliente
$T_{c,2}$	21 °C	temperatura de salida del agua fría
$T_{c,1}$	16 °C	temperatura de salida del agua fría
T_d	5 °C	Delta de temperatura deseado

Fuente: elaboración propia

Con base a los datos anterior mente suministrados se inicia estimando las velocidades del fluido caliente y frio como se muestra a continuación respectivamente con la ecuación 46 y 48.

$$V_h = \frac{0.025}{994.78(\frac{1}{4}\pi*0.015164)} \quad (46)$$

$$V_h = 0.1396 \text{ m/s}$$

$$V_c = \frac{0.025}{1000.9 * \left[\frac{1}{4} (0.028575 - 0.02766) \right]} \quad (48)$$

$$V_c = 0.0620 \text{ m/s}$$

Ahora se procede a calcular los números de Reynolds del fluido caliente y frío como se muestra a continuación respectivamente con la ecuación 47 y 49.

$$Re_h = \frac{0.1396}{7.3385 * 10^{-7}} * 0.015164 \quad (47)$$

$$Re_h = 2884.6$$

$$Re_c = \frac{0.0620 * 0.0118}{1.1092 * 10^{-6}} \quad (49)$$

$$Re_c = 659.17$$

Para el cálculo de (D_h) diámetro hidráulico se realiza la siguiente operación usando la ecuación 43.

$$D_h = Di_c - Do_h \quad (43)$$

$$D_h = 0.02766 - 0.028575 = 0.0118 \text{ m}$$

Debido a que el número de Reynolds para el para el fluido caliente fue aproximado a estar en los rangos $3 * 10^3 < Re < 5 * 10^6$ se aplica la siguiente ecuación número 40.

$$Nu_h = \frac{(f/8)(Re_h - 1000)Pr_h}{1 + 12.7 \left(\frac{f}{8} \right)^{0.5} \left(Pr_h^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (40)$$

Pero antes se debe calcular f que es un factor de fricción para tubos lisos se calcula de la siguiente manera con la ecuación número 45:

$$f = (0.790 \ln Re_h - 1.64)^{-2} \quad (45)$$

$$f = (0.790 \ln(2884.6 - 1.64))^{-2}$$

$$f = 0.0462$$

$$Nu_h = \frac{(0.0462/8)(2884.6-1000)*4.8894}{1+12.7\left(\frac{0.0462}{8}\right)^{0.5}\left(4.8894^{\frac{2}{3}}-1\right)} \quad (40)$$

$$Nu_h = 18.8941$$

Para definir el número de Nuselt del agua fría (Nu_c) se usa la tabla 1 por lo que el numero será

$$Nu_c = 5.6168$$

Teniendo lo datos anteriores se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección del agua fría con la ecuación 42 y coeficiente de transferencia de calor por convección del agua caliente con la ecuación 41.

$$H_o = \frac{Nu_c * K_c}{D_h} \quad (41)$$

$$H_o = \frac{5.6168 * 0.6217}{0.0118} = 283.02$$

$$H_i = \frac{Nu_h * K_h}{D_i} \quad (42)$$

$$H_i = \frac{18.8941 * 0.5938}{0.015164} = 774.59$$

A continuación, se hace el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U_i) con la ecuación numero 40.

$$U_i = \frac{1}{P * \left(\frac{1}{H_i * \pi * D_i} \right) + \left(\frac{\log\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2 * \pi * k_{cu}} \right) + \left(\frac{1}{H_o * \pi * D_o} \right)} \quad (40)$$

$$U_i = \frac{1}{0.0476 * \left[\left(\frac{1}{774.59 * \pi * 0.015164} \right) + \left(\frac{\log\left(\frac{0.015875}{0.015164}\right)}{2 * \pi * 470} \right) + \left(\frac{1}{283.02 * \pi * 0.015875} \right) \right]}$$

$$U_i = 214.27$$

Después se calcula la temperatura media logarítmica con la ecuación número 37.

$$\Delta T_1 = T_{h,1} - T_{c,2} \quad (38)$$

$$\Delta T_1 = 33.8722 - 21 = 12.8722$$

$$\Delta T_2 = T_{h,2} - T_{c,1} \quad (39)$$

$$\Delta T_2 = 29 - 16 = 13$$

$$\Delta T_m = \frac{(\Delta T_1 - \Delta T_2)}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} \quad (37)$$

$$\Delta T_m = \frac{(12.8722 - 13)}{\ln \left(\frac{12.8722}{13} \right)} = 12.936 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para empezar a finalizar este diseño se parte de la siguiente ecuación de la transferencia de calor con la ecuación 36.

$$\dot{Q} = U_i * A_s * \Delta T_m \quad (36)$$

$$\dot{Q} = 4183.4 * 0.025 * 5 = 523.403 \text{ W}$$

Finalizando la longitud que debe tener el intercambiador de calor de doble tubo se calcula con la ecuación número 50.

$$L_i = \frac{\dot{Q}}{\Delta T_m * U_i * P} \quad (50)$$

$$L_i = \frac{523.403}{12.936 * 214.27 * 0.0476} = 3.9636 \text{ m}$$

Mediante el uso de las ecuaciones anteriormente expuestas se realiza la siguiente tabla número 20 y la figura 26 que muestran el aumento de la longitud de intercambiador de calor en función del aumento del flujo masico arrojando la necesidad de usar un flujo masico de $0.025 \frac{kg}{s}$. en el fluido caliente y la longitud más apropiada para el intercambiador de calor debe ser de 4 metros aproximadamente.

Tabla 20. Datos arrojados por la variación del flujo volumétrico en el intercambiador de calor.

Calor (W°)	Temperatura de entrada del fluido caliente (C°)	Eficiencia térmica del intercambiador de calor	Flujo masico del agua fría y caliente (kg/s)	Flujo Volumétrico del agua fría y caliente (L/min)	Calor en el interior del intercambiador (w)	Longitud del intercambiador de calor (m)
927,503	38,2987	0,4115	0,0167	1	348,9	2,8783
929	36	0,4123	0,0209	1,25	436,2	3,6011
930	34	0,4128	0,025	1,5	523,4	4,324
931	33	0,4132	0,0292	1,75	610,6	5,0471
932	32	0,4135	0,0334	2	697,9	5,7701
932	31	0,4137	0,0375	2,25	785,1	6,4931
933	30	0,4139	0,0417	2,5	872,3	7,2162
933	30	0,4141	0,0459	2,75	959,6	7,9393
933	29	0,4142	0,05	3	1046,8	8,6624
934	29	0,4143	0,0542	3,25	1134	9,3855
934	29	0,414	0,058	3,5	1221	10,11
934	29	0,4145	0,0626	3,75	1308,5	10,832
934,4	28,35	0,415	0,067	4	1396	11,55
934,5	28,16	0,415	0,071	4,25	1483	12,28
934,67	27,98	0,4147	0,0751	4,5	1570,2	13,001
934,8	27,826	0,4148	0,0792	4,75	1657,4	13,724
934,924	27,6842	0,4148	0,0834	5	1744,7	14,4473

Fuente: elaboración propia.

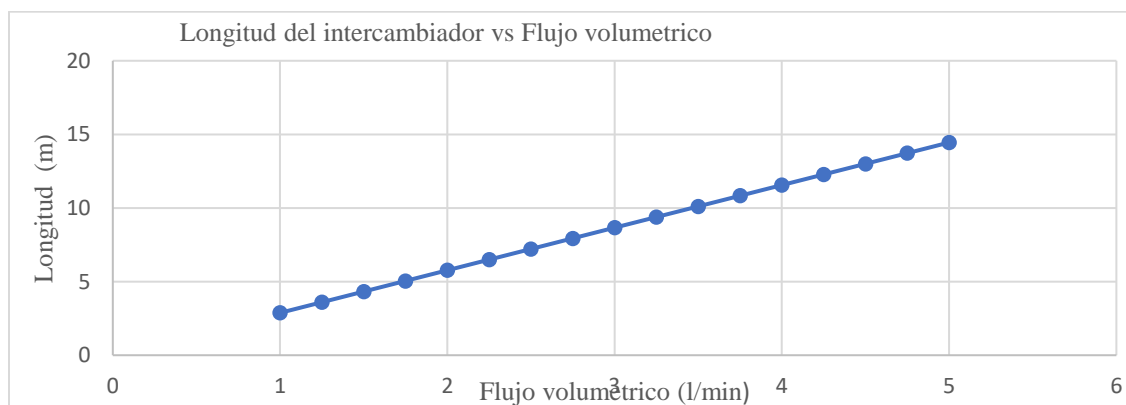


Figura 15. Grafica flujo volumétrico versus longitud del intercambiador de calor

Fuente: elaboración propia

4.4.2. Calculo caída de la presión y potencia de bombeo.

Para calcular la potencia de bombeo de una bomba en una tubería es necesario determinar inicialmente la caída de presión para mantener el flujo en la tubería, venciendo el rozamiento interno de los fluidos con la rugosidad, para saber esto se usa la siguiente ecuación número 51 basándose en los datos mencionados en el ejemplo del anterior apartado.

$$\Delta P_l = f_d \frac{L_o * \rho_f * V_f}{D_a * 2} \quad (51)$$

ΔP_l = caída de presión

f_d = Factor de fricción de Darcy

L_o = Longitud del tubo de cobre será máximo 10 metros

ρ_f = densidad del fluido a temperatura de entrada del fluido en el circuito frio es 994.7836 kg/m^3

V_f = velocidad del fluido en el circuito frio es de 0.1396 m/s

D_a = Diámetro interno del tubo de media pulgada de 0.0152 metros

Remplazando los valores para el fluido del circuito del fluido frio se tiene que el factor de fricción de Darcy, es un valor aproximado a la fricción del fluido que circula en un área transversal circular. Para un flujo laminar desarrollado, este puede hallarse mediante la siguiente ecuación 52 que está en función del número de Reidnolds (Re).

$$f_d = \frac{64}{Re} \quad (52)$$

$$f_d = \frac{64}{659.17} = 0.09$$

Con el dato del factor de Darcy se puede calcular la caída de presión con la ecuación 51.

$$\Delta P_l = 0.09 \frac{10 * 994.7836 * 0.1396}{0.0152 * 2} \quad (51)$$

$$\Delta P_l = 620.62$$

Para saber la potencia que debe tener la bomba que va a mover un fluido en un tubo se usa la formula (53)

$$\dot{W}_{Bomba} = \frac{\dot{m}_f * \Delta P_l}{\rho_f} \quad (53)$$

Donde: \dot{m}_f es el flujo masico en este caso del fluido frio que será 0.0251 entonces la potencia de la bomba (\dot{W}_{Bomba}) será:

$$\dot{W}_{Bomba} = \frac{0.0251 * 620.62}{994.78}$$

$$\dot{W}_{Bomba} = 0.0156 \text{ watts}$$

Con este dato se puede determinar que la potencia necesaria de bomba puede ser de 5 a 10 watts que bastara para mover el flujo dentro del intercambiador de calor.

4.4.3. Selección del flujómetro

A continuación, se en la figura ## se muestran los sensores de flujo que inicialmente se tuvieron en cuenta al ser compatible con Arduino y manejar un flujo volumétrico relativamente bajo.

Sensor de flujo	Modelo	Conexión	Caudal
	YF-S201	½"	1-30 L/min
	F5300A	¾"	1-60 L/min
	F5400A	1"	1-60 L/min

Figura #. Sensores de flujo.

Fuente: (naylormechanics)

Teniendo en cuenta la figura anterior se seleccionó el Sensor de flujo YF-S201 en función del flujo volumétrico que puede arrojar la bomba como se ve la tabla 7 que es de 1 l/min a 2 l/min estando en el rango de medida del flujómetro, además el fluido en este caso agua que podrá estar en un rango 14°C a 70°C esta entre los parámetros de funcionamiento por lo cual la densidad, viscosidad dinámica y demás variables termofísicas no afectaran su funcionamiento debido a que este dispositivo posee un rango de funcionamiento de -25°C a 80°C. Sin dejar de lado que los diámetros de la entrada y la salida de ½" los cuales se adaptan a las tuberías que tiene la misma medida evitando cambios en el caudal, en los sitios donde estos dispositivos se instalaron no se encuentran campos magnéticos que perturben la medición ya que como se explicaba en la tabla 7 el dispositivo tiene un sensor magnético que lo hace vulnerable. Otra cualidad que tiene este dispositivo es que envía los datos analógicos al Arduino cada 5 minutos tal cual como se necesita en el proceso de adquisición de datos, Por último, el dispositivo necesita una alimentación de 5 voltios por lo que el Arduino lo puede proveer de esta energía para el funcionamiento al tener una salida de 5 voltios.

4.4.4. Restauración del concentrador cilíndrico

Para comenzar el segmento se procedió a restaurar y modificar la estructura del concentrador solar, como también reemplazar componentes que estaban averiados o no son los adecuados a la exposición al medio ambiente. Para la planeación de esta reconstrucción y para una futura implementación con un intercambiador de calor se modelo el concentrador cilíndrico parabólico mediante el uso del software SolidWorks con el fin de tener claras cuales son los componentes además de sus medidas y el espacio que se pueda usar para la integración del intercambiador de calor,

Selección de componentes útiles para la restauración del CCP.







Como indica el anterior titulo se ubicaron del concentrador solar los compontes aun funcionales debido a que el CCP viene de estar un largo tiempo averiado y sin mantenimiento, como se puede ver en la Figura 16 esta razón anteriormente expuesta y agregándole la condición de que se pensó integrar el CCP a un intercambiador de calor se puede ver en la tabla 21 y 22 cuales componentes fueron útiles aun para la restauración aparte de las modificaciones CCP junto a los que fueron modificados como los materiales o simplemente reemplazados.



Figura. 16. CCP antes de la restauración

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 21. Selección de elementos útiles del CCP antes de la restauración partes estructurales y del reflector.

Elemento y condición (modifico, utilizo o remplazo)	Fotografía	Elemento y condición (modifico, utilizo o remplazo)	Fotografía
Patas de acero A36: se reemplazó y modifíco.		Soportes de lámina en nilón: se utilizó y modifíco.	
Tubos estabilizadores de acero A36: se reemplazó y modifíco		Vertebras en nilón: se utilizó y modifíco	
Perfiles cuadrados de 1" de acero A36: se reemplazaron.		Lamina de acero inoxidable: se utilizó y modifíco	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Selección de elementos útiles del CCP antes de la restauración de partes restantes.

Elemento y condición (modifico, utilizo o reemplazo)	Fotografía.
Chumaceras de una pulgada: se reemplazó por una nueva y verifíco si su selección era la correcta según el apartado 4.4.4	
Soporte del receptor: se modificó y reemplazó por una pieza en aluminio a la cual no se le realizaron cálculos de esfuerzos al no presentarse cargas externas relevantes	
Caja de electrónica: se reemplazó por una nueva con la misma geometría	
Ejes de acero: se utilizó y se verificaron los factores de seguridad por esfuerzos combinados y cargas cíclicas en el apartado 4.4.4	

Fuente: Elaboración propia.

4.4.5. Cálculos estructurales

A continuación, se presentan los análisis de la estructura del CCP que se modeló para posteriormente ser construida, pero antes de esto se realizó un análisis de piezas propensas a fallar en la estructura. Para iniciar como se puede ver en la figura 17 donde se presenta las fuerzas ejercidas por el peso del concentrador ejerciendo un esfuerzo cortante entre los rodamientos y el eje.

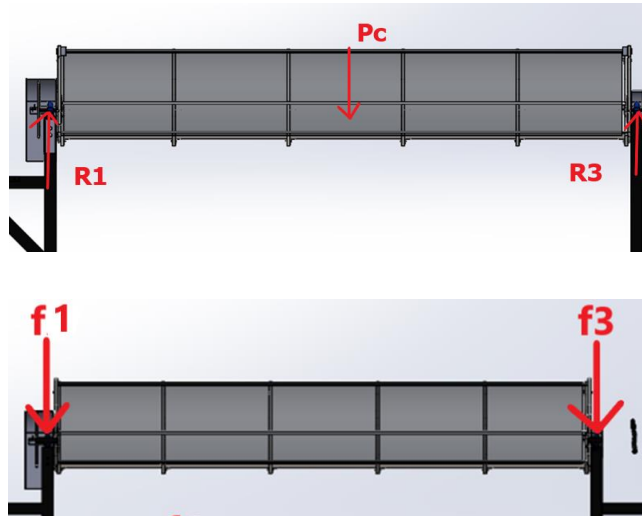


Figura 17. Cargas en la estructura
Fuente: Elaboración propia.

Con lo anterior se calculan las reacciones con la ecuación 53.

$$\sum F_y = R_1 + R_3 - P_c = 0 \quad (53)$$

$$\sum M_a = -P_c * 1.22 + R_3 * 2.43 = 0 \quad (54)$$

$$\sum M_a = -498.82 * 1.22 + R_3 * 2.43 = 0$$

$$R_3 = 250.43 \text{ N}$$

$$\sum F_y = -R_1 + 249.41 - 498.82 = 0$$

$$R_1 = 250.43 \text{ N}$$

Análisis punto A en el eje.

En los ejes que soportan el concertador existe el punto A que se analizará a continuación donde se aprecia uno de los puntos más propensos a fallar en el eje como se ve en la figura 18.

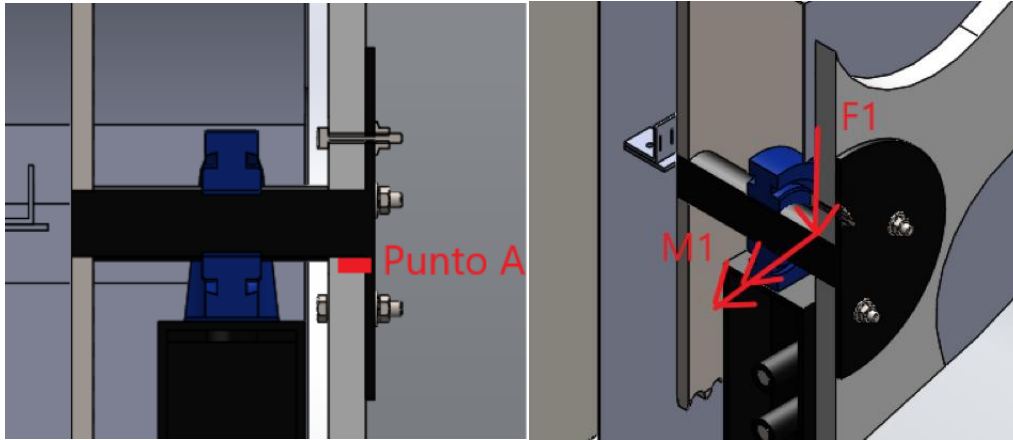


Figura 18. Análisis del punto A del eje.
Fuente: Elaboración propia.

Peso del Concentrador es de (F_1) se distribuye en 2 al ser soportado por dos ejes como se ve en la figura 20. Primero se hace el cálculo del esfuerzo cortante.

$$\tau_1 = \frac{v \cdot Q}{I \cdot t} \quad (56)$$

Donde La reacción del Peso generan en los dos extremos de la estructura las siguientes reacciones en los ejes

$$v = F_1 = 250.43$$

Ahora Q va ser el producto de A^* (área asterisco) por Y .

$$Q = A^* \cdot Y$$

$$A^* = \frac{\pi \cdot (D^2)}{8}$$

Donde D es el diámetro de eje

$$A^* = \frac{\pi \cdot (0.0254^2)}{8} = 0.025 \text{ m}^2$$

$$Y = \frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}$$

$$Y = \frac{4 \cdot 0.0127}{3 \cdot \pi} = 5.39 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$Q = 1.34 * 10^{-4}$$

Donde t es el diámetro del eje

$$t = 0.0254 \text{ m}$$

Para el cálculo de la Inercia (I) se usa la ecuación

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

$$I = \frac{\pi}{64} 0.0254^4 = 2.043 * 10^{-8}$$

Para Finalizar con el cálculo de

$$\tau_A = \frac{250.43 * (1.34 * 10^{-4})}{(0.0254)(2.043 * 10^{-8})}$$

$$\tau_A = 64.6 \text{ MPa}$$

Cálculo del esfuerzo por flexión.

$$\sigma_A = \frac{M_1 * C}{I}$$

Donde C es la distancia del eje del momento al punto de estudio que será el radio del eje

$$C = 0.0127$$

Momento flector para el punto A va ser M_1 pero primero se define el flector máximo.

$$M_{Max} = P_c * 1.22 = 500.86 * 1.22 = 611.04 \text{ Nm}$$

$$M_1 = 611.04 * 0.05/1.22 = 25.04 \text{ Nm}$$

Donde x es la distancia de la fuerza al punto de aplicación A.

$$\sigma_A = \frac{25.04 * (0.0127)}{2.043 * 10^{-8}} = -15.56 \text{ MPa}$$

Cálculo de esfuerzos máximo con el circulo de Mohr para esfuerzos combinados

Se calcula el esfuerzo promedio (σ_{pr})

$$\sigma_{pr} = \frac{\sigma_A + 0}{2} = \frac{379.84}{2} = -7.78 MPa$$

Radio en el círculo de Mohr

$$r_{m1} = \sqrt{\sigma_{pr}^2 + \tau_a^2} = \sqrt{-7.78^2 + 64.6^2}$$

$$r_{m1} = 64.12 MPa$$

Esfuerzo normal máximo

$$\sigma_{max} = \sigma_{pr} + r_{m1}$$

$$\sigma_{max} = 56.34 MPa = \sigma_1$$

Esfuerzo normal mínimo

$$\sigma_{min} = \sigma_{pr} - r_{m1}$$

$$\sigma_{min} = -71.9 MPa = \sigma_2$$

Esfuerzo cortante máximo

$$\tau_{A max} = r_{m1} = 64.12 MPa$$

Esfuerzo cortante mínimo

$$\tau_{A min} = -r_{m1} = -64.12 MPa$$

Cálculo del factor de seguridad por el criterio de Von mises, donde el esfuerzo de fluencia del acero A36 es de 250 Mpa con la ecuación 56.

$$\sigma_{equi} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

$$\sigma_{equi} = \sqrt{\frac{1}{2} * [(56.34 - (-71.9))^2 + ((-71.9) - 0)^2 + (0 - 56.34)^2]}$$

$$\sigma_{equi} = 111.9 MPa$$

$$n_s = \frac{\sigma_{flue}}{\sigma_{equi}} = \frac{250}{11.9} = 2.23 \quad (56)$$

Con el factor de seguridad de 2.23 se puede afirmar que l eje puede soportar este tipo de cargas a las que se va someter.

Cálculo del eje bajo carga cíclica

A continuación, se realiza la verificación del factor de seguridad del eje bajo carga cíclica despejando la siguiente ecuación.

$$d = \left[\frac{32n_s}{\pi S_y} \sqrt{(M_m + \frac{S_y}{S_e} * K_f * M_a)^2 + (T_m + \frac{S_y}{S_e} * K_{fs} T_a)^2} \right]^{1/3}$$

$$n_s = \frac{1}{\frac{32 * n_s}{\pi * d^3 * S_y} \sqrt{(M_m + \frac{S_y K_f M_a}{S_e})^2 + (T_m + \frac{S_y K_{fs} T_a}{S_e})^2}}$$

Donde T_a es el torque del motor aplicado el en el eje.

$$velocidad\ angular = \omega = 40\ rpm$$

$$\omega = 40 \frac{rev}{min} * \frac{2\pi\ rad}{1\ rev} * \frac{1\ min}{60\ seg} = 4.18 \frac{rad}{seg}$$

$$T_a = \frac{Potencia}{velocidad\ angular} = \frac{35}{4.18} = 8.37Nm$$

El eje al tener cambio de sección trasversal posee dos diámetros distintos donde

$$\theta_e = 0.0254m$$

$$\theta_i = 0.020m$$

El esfuerzo de fluencia del material del eje

$$S_y = 250\ MPa$$

Para el calculo de S_e se usa la siguiente ecuación

$$S_e = K_f K_s K_r K_t K_m S_{e'}$$

$$S_{e'} = 0.5 * 250 * 10^6 = 125 * 10^6$$

$$K_f = 1 + 0.7(1.5 - 1) = 1.35$$

$$K_s = 1.189(0.020^{-0.122}) = 1.9$$

$$K_m = \frac{1}{K_f} = \frac{1}{1.35} = 0.74$$

$$K_r = 0.82$$

$$K_t = 1$$

$$K_c = 1.5$$

A continuación, se define M_a que para este caso es el mismo momento flector (M_1) en el eje mencionado anteriormente.

$$M_a = M_1 = 25.04 \text{ Nm}$$

Para el cálculo de K_{fs} se usa la siguiente ecuación

$$K_{fs} = 1 + 0.9 * (1.9 - 1) = 1.81$$

Limite a la fatiga modificado S_e

$$S_e = 0.82 * 1.9 * 0.82 * 1 * 0.74 * 125 * 10^6 = 0.4478 * 125 * 10^6 = 55.9 \text{ MPa}$$

$$n_s: \frac{1}{\frac{32}{\pi * 0.02^3 * 250 * 10^6} \sqrt{\left(0 + \frac{250 * 10^6 * 1.35 * 25.04}{55.9 * 10^6}\right)^2 + \left(0 + \frac{250 * 10^6 * 1.81 * 8.37}{55.9 * 10^6}\right)^2}}$$

Con lo que se concluye que el eje va soportar la carga cíclica en el eje.

$$n_s = 1.18$$

Selección de chumacera

Para la verificación de chumacera de pedestal se usó el dato inicial de 1 pulgada de diámetro del eje y se verifica la información en Anexo 11 que arrojó como resultado el soporte de pie con rodamientos P 250 que se puede ver en la figura 19.

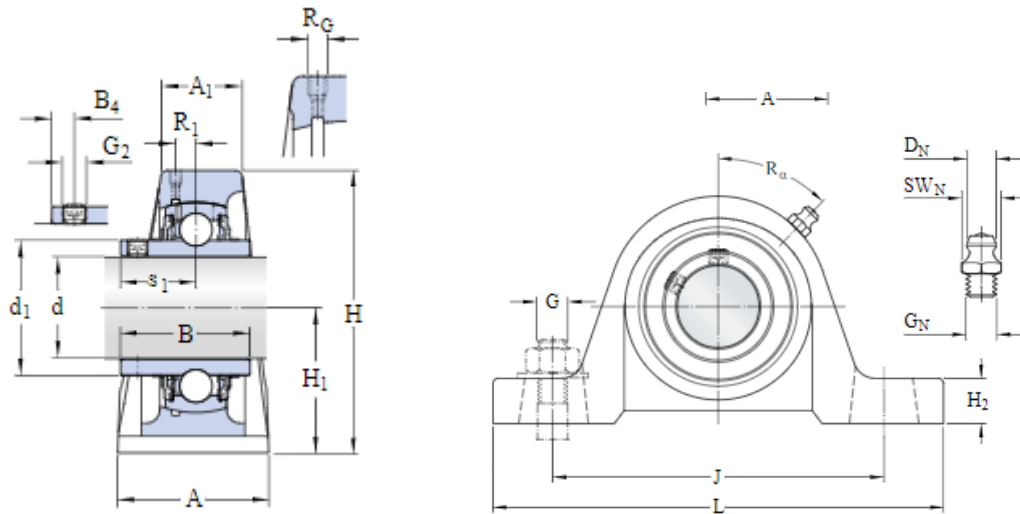


Figura 19. Vista de Chumacera tipo P250.

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el rodamiento gira a velocidades de ($n < 10$ r.p.m) la selección se realiza por carga dinámica y no estática por lo que se usa la siguiente ecuación:

Donde:

$$P_d = x * Fr + y * Fa$$

P_d = carga dinámica equivalente a la mitad del peso

Fr = carga radial

Fa = carga axial

x = factor de carga x

y = factor de carga y

$f1$ = es el peso del concentrador solar dividido en 2

C = Carga dinámica equivalente del rodamiento

$$fr = F1 = 249.443 \text{ N}$$

$$P_d = 0.56 * 0 + 0.85 * 249.44 = 212.02 \text{ N} = 0.212 \text{ KN}$$

El factor de seguridad por cargas dinámica (s) sería igual a

$$s = \frac{C}{Pd} = \frac{14}{0.212} = 66.07$$

Con lo que se concluye que la chumacera es el indicado para la carga que va soportar

Verificación de tornillos.

Los tornillos que soportan el peso del intercambiador son 4 pares de tornillos como los que se ven a continuación en la figura 20 mediante una abrazadera.

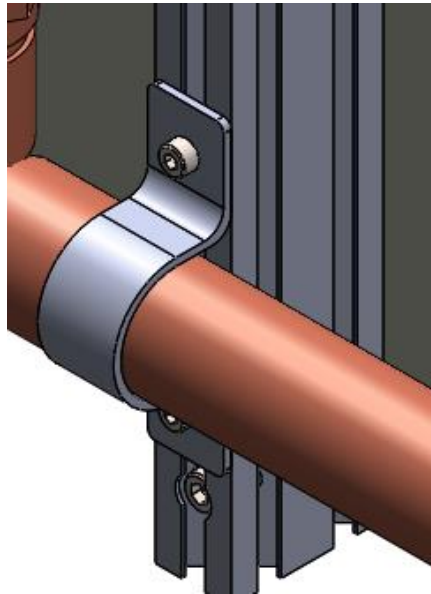


Figura 20. Soportes del intercambiador de calor.
Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente figura 21 se mostrará el efecto que genera el peso del intercambiador de calor ($P_i=250$ N) en los tornillos donde se generan dos reacciones y dos momentos en esas líneas de acción en la que cada una de las reacciones es soportada por 4 tornillos.

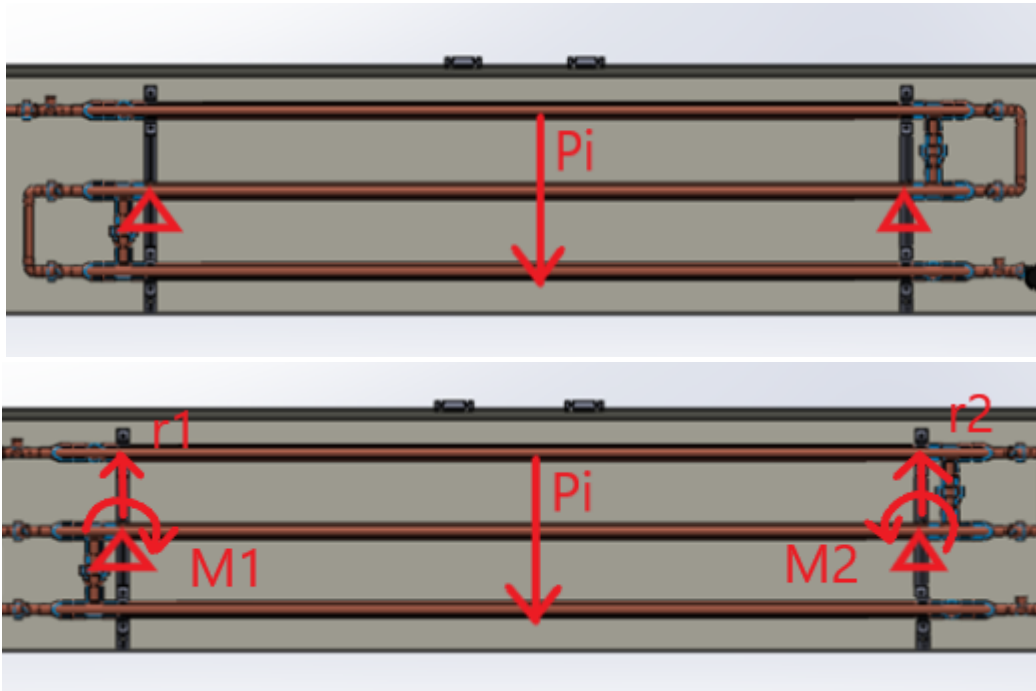


figura 21. Diagrama de cuerpo libre del intercambiador.
Fuente: Elaboración propia.

Se realizo la sumatoria de fuerzas y momentos para calcular las reacciones en esos puntos.

$$\sum F_y = r_1 + r_3 - P_i = 0 \quad (53)$$

$$\sum M_a = -P_i \cdot 0.68 + r_3 \cdot 1.36 = 0 \quad (54)$$

$$x_2 = x_1 \cdot 2$$

$$\sum M_a = -250 \cdot 0.68 + r_3 \cdot 1.36 = 0$$

$$r_3 = 125 \text{ N}$$

$$\sum F_y = -250 + 125 + r_1 = 0$$

$$r_1 = 125 \text{ N}$$

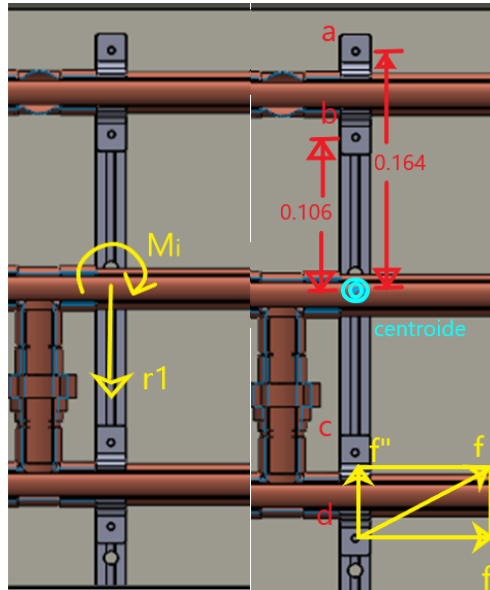


figura 22. Ubicación del centroide en el arreglo de tornillos

Fuente: Elaboración propia.

Para los cálculos del esfuerzo cortante que se genera en los tornillos de acero inoxidable de M8 de la designación 4.8, con un diámetro de 8 milímetros con un esfuerzo de fluencia de 420 Mpa se tiene que tener en cuenta que los tornillos poseen cargas excéntricas debido al momento que aumenta el valor de la fuerza resultante que actúa sobre los tornillos sabiendo esto se calcula el momento:

$$M_i = P_i \cdot 0.6805 = 250 \cdot 0.6805 = 170.125 \text{ N}$$

Como se puede ver en la figura 22, Las fuerzas y el momento actúan sobre esta organización de tornillos de modo que todas las fuerzas se trasladan al centroide de la configuración con el fin de determinar las fuerzas que actúan en cada tornillo. Para la ubicación del centroide se calcula únicamente \bar{y} :

$$\bar{y} = \frac{0 + 0.058 + 0.27 + 0.328}{4} = 0.164 \text{ N}$$

La fuerza resultante r_1 se divide en la cantidad de tornillo de la configuración para hallar F'_a de las fuerzas primarias teniendo en cuenta lo siguiente:

$$F'_a = F'_b = F'_c = F'_d = \frac{r_1}{4} = \frac{125}{4} = 31.25 \text{ N}$$

Para determinar F''_a de las fuerzas secundarias se usa la siguiente ecuación

$$F''_n = \frac{M_1 * r_n}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2 \dots}$$

Donde r_n es la distancia del centroide al punto específico ya sea a, b, c...etc

$$r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2 = 0.164^2 + 0.106^2 + 0.164^2 + 0.106^2 = 0.076$$

$$F''_a = \frac{M_1 * r_a}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2} = \frac{170.125 * 0.164}{0.076} = 367.1 \text{ N}$$

$$F''_b = \frac{M_1 * r_b}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2} = \frac{170.125 * 0.106}{0.076} = 237.27 \text{ N}$$

$$F''_c = \frac{M_1 * r_c}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2} = \frac{170.125 * 0.106}{0.076} = 237.27 \text{ N}$$

$$F''_d = \frac{M_1 * r_d}{r_a^2 + r_b^2 + r_c^2 + r_d^2} = \frac{170.125 * 0.164}{0.076} = 367.1 \text{ N}$$

Teniendo las dos componentes F''_a y F'_a se calcula F_a por la ley del paralelogramo.

$$F_a = \sqrt{F'_a{}^2 + F''_a{}^2} = \sqrt{367.11^2 + 31.15^2} = 368.43 \text{ N}$$

$$F_b = \sqrt{F'_b{}^2 + F''_b{}^2} = \sqrt{237.27^2 + 31.15^2} = 239.31 \text{ N}$$

$$F_c = \sqrt{F'_c{}^2 + F''_c{}^2} = \sqrt{237.27^2 + 31.15^2} = 239.31 \text{ N}$$

$$F_d = \sqrt{F'_d{}^2 + F''_d{}^2} = \sqrt{367.11^2 + 31.15^2} = 368.43 \text{ N}$$

Sabiendo que los puntos donde las cargas son más altas va calcular el esfuerzo cortante en a y d.

$$\sigma_t = \frac{368.43}{\left(\frac{\pi}{4}\right) * 0.008^2} = 73.21 \text{ MPa}$$

Con el factor de seguridad n_t se comprueba que los tornillos que sostienen el intercambiador de calor no van a fallar.

$$n_t = \frac{420}{73.21} = 5.7$$

Análisis por elementos Finitos

Con el fin de conocer los esfuerzos y deformaciones en la estructura, se introdujo el CAD de la estructura para enmallarlo con una malla fina y de relevancia 1.5 donde se determino como se ve en la figura 25 la deformación máxima es 0.15 milímetros y además que en la figura 26 el esfuerzo máximo puede llegar a ser de 7.86 Mpa, lo que decir que la estructura cuenta con un factor de seguridad de 38.8 por lo que la estructura esta sobre dimensionada, pero cumplirá con la necesidad de sostener la estructura. Cabe recalcar que las condiciones de frontera para simulación la estructura estará restringida en todos los grados de libertad ya que se asumió que la estructura está fijada al suelo y tiene aplicadas fuerzas aplicadas en diferentes puntos que corresponde a los pesos que va a sostener, sin dejar de lado que solo se tiene en cuenta ecuaciones de deformación mecánica mas no térmica por lo que no se tuvieron en cuenta temperaturas ni flujos de calor por ultimo tampoco existen presiones externas aparte de la de la atmosfera en la simulación.

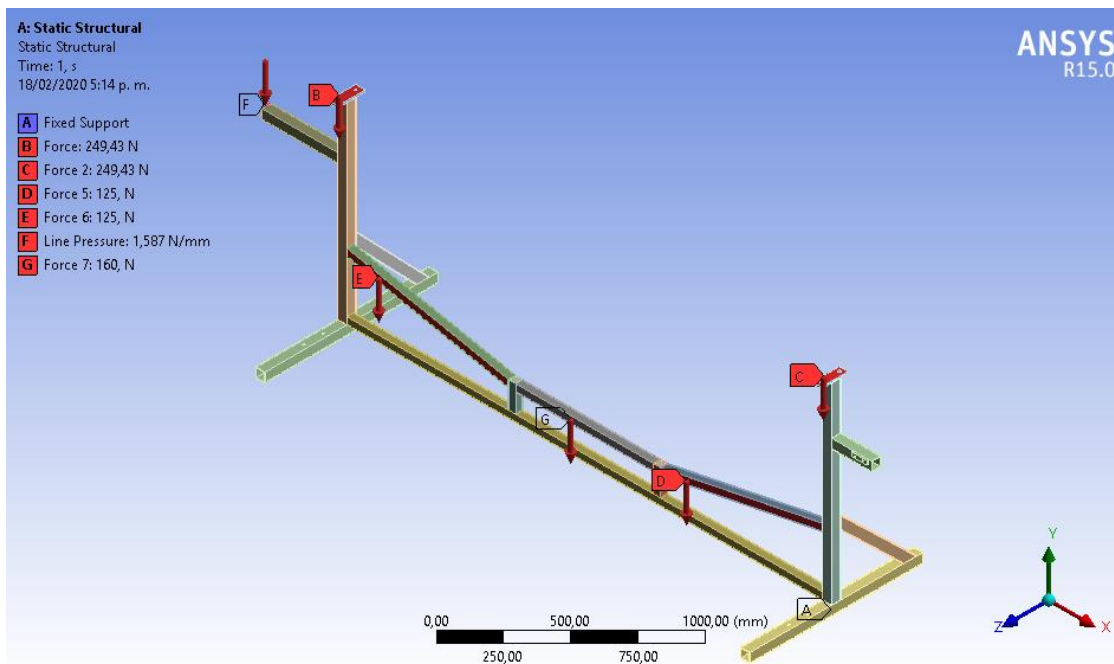


Figura 23. Cargas en la simulación de estructura.
Fuente: Elaboración propia.

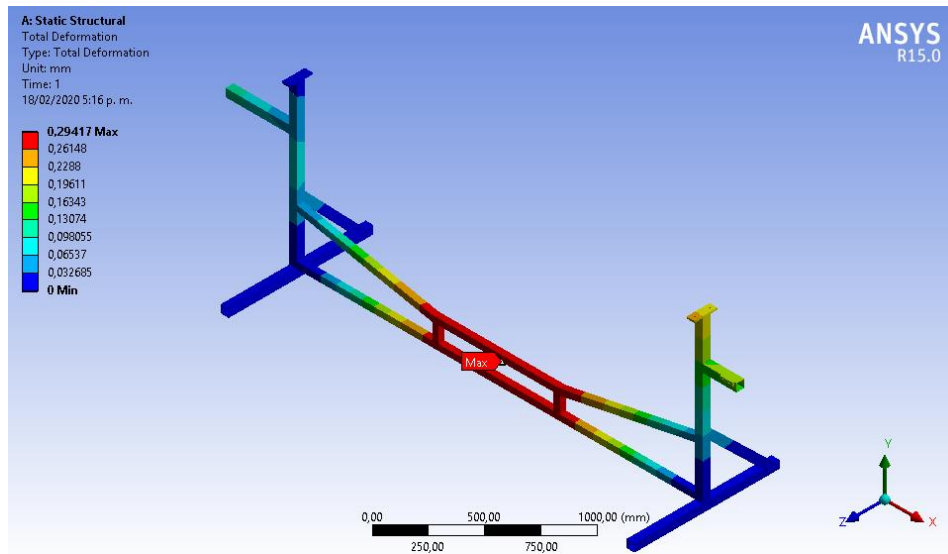


Figura 24. Análisis estructural de la deformación de la estructura.
 Fuente: Elaboración propia.

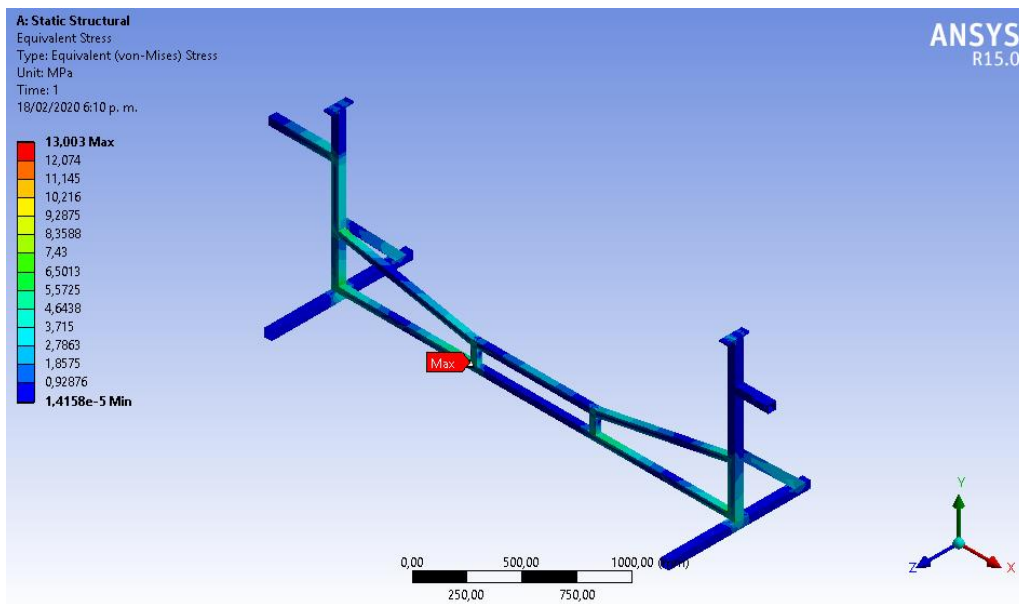


Figura 25. Análisis estructural de los esfuerzos
 Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de soldaduras.

La ubicación de la soldadura más propensa a fallar será la ubicada en la reacción en y_2 tomando como antecedente lo arrojado por la simulación de esfuerzos anteriormente mostrada que en pasa la línea de acción en y_2 el cual es un perfil cuadrado de 40 mm X 40 con espesor de 3 milímetros que fue soldado con el electrodo E60xx con un esfuerzo de fluencia de 345 MPa.

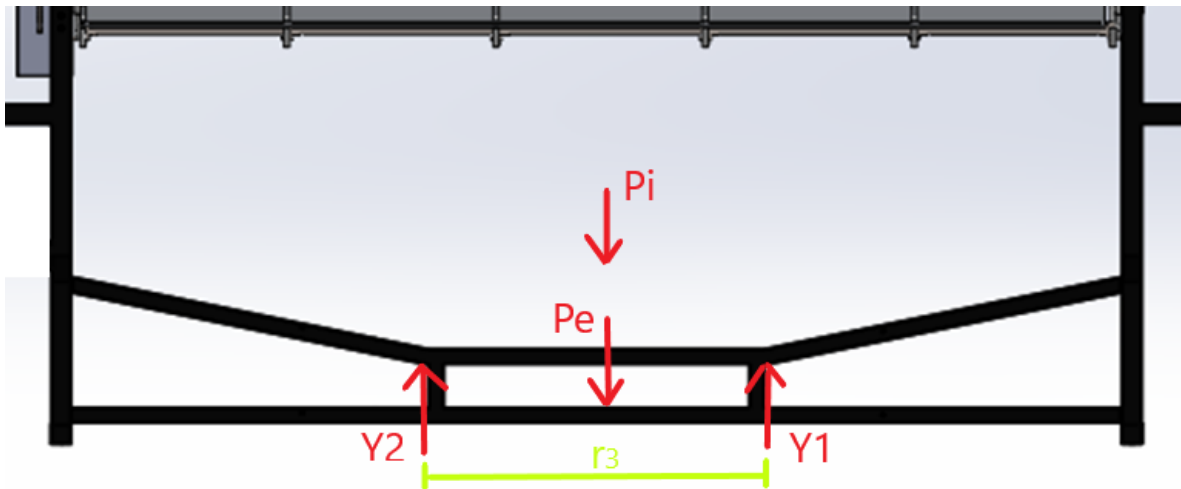


Figura 26. Diagrama de cuerpo libre de la cercha.
Fuente: Elaboración propia.

Ahora se realiza la sumatoria de fuerzas y momentos con la figura 22.

$$\sum F_y = y_2 + y_1 - P_i - P_e = 0 \quad (53)$$

$$\sum M_t = (-P_i - P_e) * r_3/2 + y_1 * r_3 = 0 \quad (54)$$

$$r_3 = 0.723 \text{ m}$$

$P_i = 250 \text{ N}$	Peso del intercambiador de calor
$P_e = 160 \text{ N}$	Peso de la cercha de perfil cuadrado que se va sostener de las soldaduras
$y_2 = 205 \text{ N}$	Reacciones en las soldaduras
$y_1 = 205 \text{ N}$	Reacciones en las soldaduras

Por lo anterior se procede a calcular el esfuerzo de corte puro.

$$\tau_s = \frac{v}{A_s}$$

Donde A es el área total de las gargantas con ayuda de la figura 23.

$$A_s = (d_1 * b_1 + d_2 * b_2) * 2$$

$d_1 = 3/16" = 0.0047625 \text{ m}$ Longitud del cateto de la soldadura
 $b_1 = 0.04 \text{ m}$ Longitud de la garganta de la soldadura
 $d_2 = 0.0047625 \text{ m}$ Longitud del cateto de la soldadura
 $b_2 = 0.04 \text{ m}$ Longitud de la garganta de la soldadura

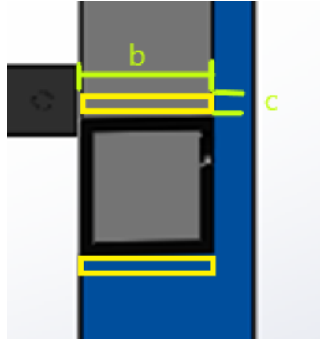


Figura 27. Medidas de las gargantas.
 Fuente: Elaboración propia.

$$A_s = 7.6 * 10^{-4} \text{ m}$$

$$\tau_s = \frac{205}{7.6 * 10^{-4}} = 0.269 \text{ MP}$$

Ahora el calculo del esfuerzo cortante por momento flector

$$\tau_s = \frac{M}{I}$$

$$I = 0.0707 * h_c * I_u$$

I_u es el momento resiste unitario, M momento, h_c medida de la soldadura, b cambia para este calculo.

$$h_c = 3/16" = 0.0047625 \text{ m}$$

$$I_u = b * d$$

$$b = 0.04$$

$$M = 410 * 0.361 = 148.01$$

$$\tau_s = \frac{M}{0.0707 * h_c * b * d}$$

$$\tau_s = \frac{148.01}{0.0707 * 0.0047625 * 0.04 * 0.04} = 274.73 \text{ Mpa}$$

El factor de seguridad se calcula en función del esfuerzo de fluencia de 345 MPa para electrodo E60xx.

$$N_s = \frac{345}{274.73} = 1.2$$

Por lo anterior se puede concluir que las soldaduras en filete van a resistir las cargas de una manera apropiada

Modelado y reconstrucción del CCP.

A continuación, se muestra el resultado del modelado del CCP y la reconstrucción, en la Figura 27 y 28 respectivamente. Mientras que en tabla 23 y 24 se observa más detalladamente los cambios que tuvieron las piezas y las razones de los cambios. Además, se observa el modelado en 3D junto con el resultado del producto que se muestra en la última columna para poder mirar todas las dimensiones se puede acceder a los planos en el Anexo7 .

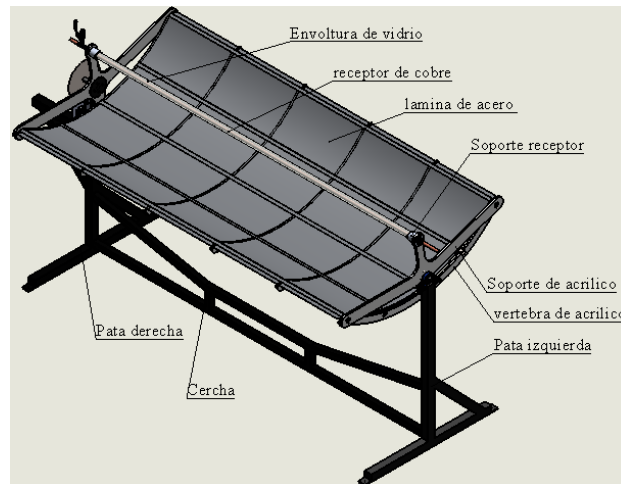
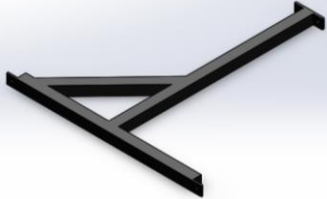

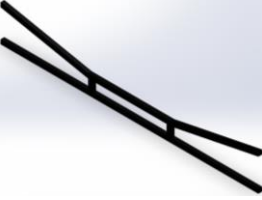





Figura 28. Modelado de CCP.

Fuente: Elaboración propia.

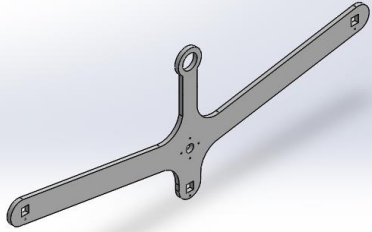



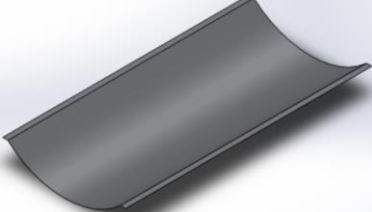

Tabla 23. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes estructurales

Elemento y descripción	Modelado en 3 D	Resultado
Se modifico y reemplazo. La geometría de la patas agregando mayor longitud al soporte para mejorar la estabilidad del concentrador usando acero dejando una longitud de 181 cm que inicialmente era de 176 cm.		
Tubos estabilizadores de acero A36: Se reemplazo y modifiko. Creando una cercha que pueda dar soporte a la estructura y peso para aumentar la inercia en acero.		
Perfiles cuadrados de 1” de acero A36: Se reemplazaron por Perfiles cuadrados de 1” de acero inoxidable.		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes del reflector.

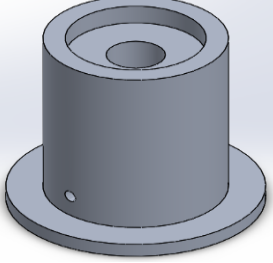


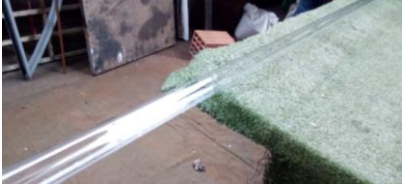
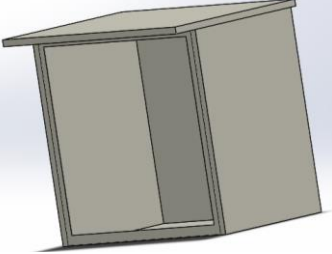

Elemento y descripción	Modelado en 3 D	Resultado
------------------------	-----------------	-----------

<p>Soportes de lámina en nilón: Se utilizo y se limpio</p>		
<p>Vertebras en nilón: Se utilizo y se limpió con desengrasante</p>		
<p>Lamina de acero inoxidable: Se utilizo, se limpio y brillo</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Modelado y construcción de los elementos del CCP de partes restantes.

Elemento y descripción	Modelado en 3 D	Resultado
------------------------	-----------------	-----------

<p>Soporte del receptor se diseño en aluminio por su baja densidad que con lleva a un menor peso, bajo costo, facilidad en el mecanizado y bajo costo.</p>		
<p>Cubierta de vidrio: Se utilizo un tubo de vidrio reutilizado de un tubo de luz de la marca siemens con una medida de 237 cm.</p>		
<p>Caja de electrónica: se reemplazó y modifíco. Diseñando una caja más compacta y mucho más hermética.</p>		

Fuente: Elaboración propia.

Para terminar esta sección se presenta continuación el resultado de la reconstrucción final del concentrador en la figura 11 donde cabe recalcar que las uniones de las patas con la cercha se hicieron con soldadura TIG y pintado inicialmente con anticorrosivo y después con pintura de esmalte color negro que fuera resistente al medio ambiente. Adicional a lo anterior se ubicó de manera estratégica la ubicación de la electrónica del proyecto dentro de una caja en acero galvanizado que fue pintado con pintura electrostática.



Figura 29. resultado de la restauración del CCP.

Fuente: Elaboración propia.

4.4.6. Modelado y construcción del intercambiador de calor vinculado al CCP.

En este segmento se mostrará todo el resultado del modelado y construcción del intercambiador de calor de doble tubo acoplado al CCP basado en los resultados del apartado 4.2.2 cálculo de las dimensiones del intercambiador de calor en los cuales se determinó una longitud de aproximadamente 4 metros apropiada para que el intercambiador seda calor a un fluido externo, para este intercambiador de calor se empleó como material base tubos de cobre tipo m de 1/2 pulgada y 1 pulgada de diámetro, además se utilizaron diferentes accesorios también en cobre, para el caso de los sensores como las termocuplas se diseñó un bushin que permita atornillar el sensor de calor, para el caso del actuador como es la mini bomba se diseñó y construyó un soporte para la misma, además de lo anterior también se diseñó una estructura en aluminio que soporte todo el circuito y para finalizar se diseñó una caja hermética que pueda soportar la intemperie que su vez albergue el intercambiador de calor con todos sus componentes a continuación se presentara mediante la tabla 26 cada pieza usada junto con el respectivo modelado pero primero se dará una muestra del modelado inicial del intercambiador de calor en la figura 29 donde se ve también un corte de sección transversal para apreciar el interior de la tubería los planos se pueden ver en el anexo 7.

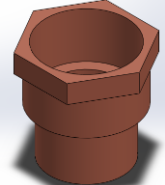

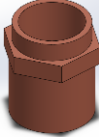

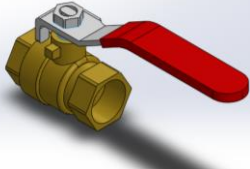

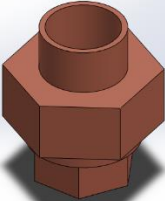

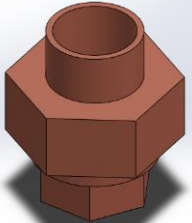

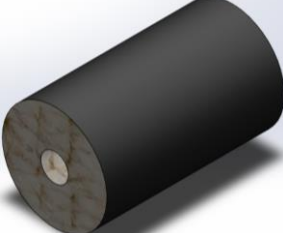

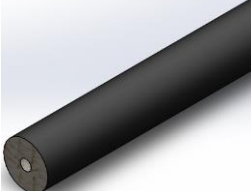



Figura 30. Modelado intercambiador de calor de doble tubo.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. Modelado y Foto de los elementos del intercambiador de calor acoplado al CCP.

Elemento y Descripción	Modelado en 3 D	Resultado
<p>Tubo de 1 de cobre tipo M: se seleccionó este tipo de tubería debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión además el tubo de cobre tipo M es usado en aplicación de conducción de agua potable además de ser fácil de instalar donde se usan soldaduras blandas en este caso estaño con antimonio.</p>		
<p>Tubo de ½" de cobre tipo M: se seleccionó este tipo de tubería debido a su alta conductividad y resistencia a la corrosión además el tubo de cobre tipo M es usado en aplicación de conducción de agua potable además de ser fácil de instalar donde se usan soldaduras blandas en este caso estaño con antimonio.</p>		
<p>Codo de cobre 1/2" 90 grados: este accesorio es fundamental para el cambio de orientación de la tubería.</p>		
<p>Tee de cobre ½ : este accesorio de uso para implementar sensores de temperatura.</p>		
<p>Unión Reducción 1 x ½" de cobre: con este accesorio se lograron dos objetivos, el primero reducir la tubería de 1" a ½" donde se necesitó hacer el cambio y segundo al realizar un mecanizado que retirara el tope que impide el paso del tubo de ½" permitió la construcción del diseño propuesto.</p>		
<p>Tee de 1": con este accesorio se concretó el diseño propuesto del intercambiador de calor.</p>		

<p>Adaptador 1/2" Hembra Cobre: este dispositivo se usó para la adaptación de sensores y actuadores .</p>		
<p>Adaptador Macho 1/2 Cobre: este dispositivo se uso para realizar pruebas de hermeticidad y adaptación de mangueras.</p>		
<p>Válvula de bola 1/2 de Agua.</p>		
<p>Universal de 1" Cobre: se utilizo para facilitar la construcción y a futuro agilizar los mantenimientos que necesite el intercambiador.</p>		
<p>Universal de 1/2" Cobre: se utilizó para facilitar la construcción y a futuro agilizar los mantenimientos que necesite el intercambiador.</p>		
<p>Aislante térmico elastomérico de celdas cerradas de 1/2" espesor de 25 mm: con esta cubierta se pretende minimizar las pérdidas de calor de todo el dispositivo.</p>		
<p>Aislante térmico elastomérico de celdas cerradas de 1" espesor de 25 mm: con este cubierta se pretende minimizar las pérdidas de calor de todo el dispositivo.</p>		

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se presenta el resultado de la construcción del intercambiador de calor en la figura 30 que fue soldado con soldadura blanda de estaño, donde primero se limpiaron las

piezas, después se untaron de fundente para después fundir el material usando un soplete de butano para crear las juntas como se aprecia en la figura 31.



Figura 31. Soldadura blanda de estaño con soplete
Fuente: elaboración propia.



Figura 32. Intercambiador de calor
Fuente: elaboración propia.

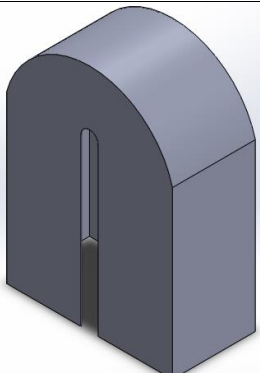
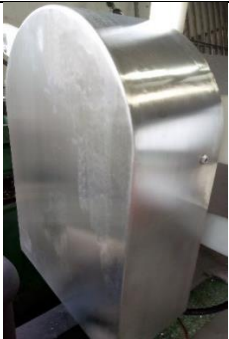
Para terminar esta sección se presenta el CCP integrado al intercambiador de calor con sus respectivos sensores y actuadores. El modelado se presenta en la figura 32 continuando con la tabla 27 en donde se muestra el modelado y la construcción de las piezas que harán la integración del intercambiador de calor como también las piezas que soportaran los

actuadores y sensores, además de toda estructura que mantendrá en posición el intercambiador de calor.



Figura 33. Modelado de la integración del CCP más el intercambiador de calor.
Fuente: elaboración propia.

Tabla 27. Piezas principales de la integración del CCP con el intercambiador de calor.

Elemento y Descripción	Modelado en 3 D	Resultado
Caja engranajes para la protección de uno de los rodamientos y sistemas de engranajes, esta echo en acero inoxidable por su durabilidad		

<p>Caja rodamiento para la protección de uno de los rodamientos esta echo en acero inoxidable por su durabilidad.</p>		
<p>Caja para el intercambiador de calor: Esta caja esta echa en acero galvanizado en calibre 18 fue soldado en mediante soldadura TIG y pintada con pintura electrostática con además dentro del diseño se contempló que tuviera canales para no dejar ingresar el agua de la lluvia.</p>		
<p>Esparrago en cobre para manguera:</p>		
<p>Esparrago en cobre para manguera:</p>		
<p>Soporte mini bomba: esta pieza es utilizada para sostener la mini bomba</p>		

Fuente: elaboración propia.

Terminando este segmento se puede apreciar en la figura 33 la construcción final del equipo que contara también con la electrónica necesaria para seguir el sol, adquirir datos de

temperatura del agua en el intercambiador de calor, las bombas que moverán el agua en el interior y los sensores de flujo.



Figura 34. Foto de la construcción de la Integración del CCP más el intercambiador de calor.
Fuente: elaboración propia.

4.1. DESARROLLO DE LA FASE 5 ACONDICIONAMIENTO DEL MONTAJE COMO EQUIPO DE LABORATORIO.

En esta sección del proyecto se expone la manera en la cual se integró mayormente la electrónica expuesta en el apartado 4.1 y el resultado mecánico del apartado 4.4, para entender con claridad las funciones que puede tener el equipo completo. Inicialmente se debe decir que este equipo cumple como primera función la concentración de la radiación en un punto focal, llamado receptor, por el que circula un fluido de trabajo que para este caso fue agua; el fluido circula por un circuito cerrado con un diámetro de $\frac{1}{2}$ " , donde se tiene una ganancia de energía, logrando que a medida que pasa el tiempo la energía térmica se empiece a acumular aumentando la temperatura del fluido, este fluido es movido mediante una bomba. Este circuito cerrado está revestido por otro circuito de 1" de diámetro donde circula a contraflujo un fluido, que para este caso práctico es agua, que se denominó fluido frío y es movido mediante otra bomba de agua, además este fluido no se mezclara con el fluido que se calienta, aspecto que genera una ganancia de calor por conducción térmica con la pared del tubo de cobre de $\frac{1}{2}$ ". El agua que circula por los dos circuitos se almacena en tanques separados para ser reciclados.

Para realizar la focalización de la radiación este equipo se mueve con un motor Valeo, descrito en el apartado 4.1, con la ayuda del programa embebido en el Arduino que permitió programar el cambio de posición del sol, almacenando información sobre la posición la hora y el día durante el proceso de funcionamiento, también permite registrar el flujo volumétrico

que circulara por los dos circuitos con la ayuda de sensores de flujo y también registra la temperatura de entrada de los dos circuito y la temperatura de salida de los dos fluidos para estudiar la ganancia de energía en el intercambiador de calor. Como la idea es también saber que tanto calor gano el concentrador solar se usaran las mismas termocuplas que registran las temperaturas del circuito cerrado.

Para operativizar el uso del dispositivo construido y poner en práctica la utilización del equipo como recurso didáctico para la enseñanza, se elaboraron dos guías de laboratorio descritas en el anexo 5 y 6. La primera guía, anexo 5, está orientada a fundamentar al estudiante en el reconocimiento de las partes y el uso del CCP+IC, con el objetivo de identificar de manera detallada cómo se inicia, opera y sacan los datos aportados por el equipo. La segunda guía, anexo 6, presenta una introducción teórica de los temas que engloban el funcionamiento de este equipo, luego se plantea un ejercicio práctico para hacer mediciones de eficiencia óptica en función de variables meteorológicas, eficiencia térmica y ganancia de calor dentro del receptor.

5. ANALISIS DE RESUTADOS

A continuación, se presentan una síntesis de los resultados obtenidos, los cuales fueron descritos en el capítulo anterior sobre el desarrollo del proyecto, y que a continuación se describen como aspectos representativos para cada una de las fases.

5.1. ANÁLISIS DE LA FASE I

El sistema de seguimiento del sol en un solo eje mediante un algoritmo, fue planteado de manera correcta, los dispositivos de mando como el Arduino envían y computan las señales de movimiento en el tiempo correcto, además de recopilar los datos de una manera ordenada y adecuada para poder realizar estudios y posteriores análisis con los datos; adicionalmente, es importante mencionar que el sistema electrónico mediante la programación aporta a la operación inicial del equipo, durante el proceso de experimentación, un espacio para la alimentación del agua que circulara por el receptor dándole un plus a esta programación.

5.2. ANÁLISIS DE LA FASE 2

Mediante los datos históricos, sobre variables ambientales, suministrados por la estación meteorológica de la Universidad Libre, se realizaron estudios térmicos del comportamiento del CCP, el cual tiene variables geométricas fijas. Se calcularon diferentes temperaturas alcanzadas por el CCP para distintos valores históricos de radiación, que son los óptimos para una buena operación del equipo en el sector donde se va operar; factores que dieron viabilidad al diseño de un intercambiador de calor que pudiera aprovechar la energía obtenida por el CCP con una eficiencia térmica promedio del 40 %.

5.3. ANÁLISIS DE LA FASE 3

La metodología QFD se acondicionó de manera adecuada en la conversión de datos cualitativos, para las necesidades operativas y físicas del equipo, en datos cuantitativos, diferenciando con un rango bastante alto el tipo de intercambiador apropiado para este uso, aspecto que representó la base fundamental del análisis para la integración con el CCP. Esta fase, sirvió también para convalidar y profundizar en las fortalezas de cada tipo de intercambiador comparado, arrojando elementos de apoyo para descartar otros diseños de intercambiador como los intercambiadores de placas, facilitando así el ahorro de espacio.

5.4. ANÁLISIS DE LA FASE 4

En esta fase se determinó algo importante y es que el material óptimo para una transferencia de calor por conducción difícilmente mejorable, debido a su alta conductividad térmica y acceso al mismo, es el cobre; con el cual se calculó la longitud del intercambiador que se estableció en el modelado de 4.2m en el área de transferencia, con el fin de obtener deltas de temperatura en promedio de 5°C, esto con el propósito que para los experimentos que se hagan a futuro, con este equipo, arrojen cambios relevantes en el fluido al que se desea aumentar la temperatura como lo será el agua. Además se pudo encontrar que es mejor realizar las mediciones con agua como fluido de trabajo, debido a que es un fluido altamente estudiado y todas las variables termo físicas ya están documentadas en todas sus temperaturas, como por ejemplo la viscosidad dinámica y cinemática, que suele ser poco documentada en algunos fluidos de trabajo calorífico a distintas temperaturas, ya que generalmente se encuentran datos a temperaturas fijas o un rango pequeño de temperaturas; de igual manera, estos fluidos son de difícil acceso debido a su costo lo que implicaría mayor gasto en insumos a la hora de realizar prácticas con este equipo. Es importante aclarar, que durante el proceso de modelado y construcción del equipo se pudo concluir que el material seleccionado es el indicado, considerando la viabilidad para la consecución de accesorios de cobre, que son relativamente sencillos y moderadamente fáciles de unir a una tubería de cobre con la ayuda de soldadura de estaño fundiéndola con un soplete de butano; aspecto que a futuro facilitaría el mantenimiento del equipo debido al uso regular que tendrá y la manipulación continua por diferentes personas.

5.5. ANÁLISIS DE LA FASE 5

Este dispositivo desarrollado, como equipo de laboratorio, presenta una adecuada versatilidad para su uso como recurso didáctico experimental, considerando que podría servir para ejemplificar fenómenos físicos y de aplicación a la ingeniería en diferentes campos como por ejemplo en óptica, por el análisis que se debe tener para comprender la ubicación del foco de una parábola y la influencia de la concentración de los rayos solares. De otro lado, con las guías propuestas en este trabajo es posible realizar un análisis térmico más profundo de transferencia de calor que rodea toda la conversión de radiación solar a flujo de calor al interior de las tuberías, lográndose estudiar la radiación, la convección y la conducción; donde cohabitan además las pérdidas que se tienen por convección provenientes del medio ambiente, factores importantes para que los estudiantes puedan realizar cálculos del coeficiente global de transferencia de calor que interviene en el CCP, como también el coeficiente global de transferencia de calor en el IC, que siempre dará nuevos resultados debido a las variables meteorológicas que influyen en este tipo de energías renovables. Además se les puede sumar la variación de flujo volumétrico que se puede hacer al equipo cambiando los pulsos de voltaje que llegan a las bombas de agua.

6. CONCLUSIONES

La implementación del sistema desarrollado en este trabajo de grado consistente en el CCP+IC, como equipo de laboratorio para la enseñanza, manifiesta un importante aporte como recurso didáctico para los procesos formativos que se imparten en la Facultad de Ingeniería, considerando que la facultad no contaba con un equipo de estas condiciones técnicas y versátiles que permitan desarrollar prácticas experimentales relacionadas con el aprovechamiento de la energía térmica solar. Así, el sistema desarrollado podrá aportar directamente en los programas de Ingeniería Mecánica en el área de térmica, Ingeniería Ambiental en el área de energías alternativas y la Maestría en Ingeniería con Énfasis en Energías Alternativas en el área de energía solar.

Con la implementación del sistema de seguimiento del sol en un solo eje mediante un algoritmo, al sistema del CCP, permitirá que los estudiantes en las prácticas de laboratorio puedan visualizar variables como la trayectoria del sol, en función del ángulo de incidencia y la ubicación del sol cada día del año y hora del día. De igual manera, el algoritmo realizado para el seguimiento del sol, al estar embebido en una tarjeta de desarrollo Arduino facilitará la mejora futura del programa por parte de estudiantes y/o investigadores, considerando que al ser un software libre se le pueden hacer modificaciones y actualizaciones, y que la programación realizada arroja datos fácilmente accesibles en el caso que se quieran realizar gráficas o regresiones.

Se realizaron estudios térmicos del comportamiento del CCP con parámetros geométricos del diseño y la medición de variables externas ambientales suministradas por la estación meteorológica del campus de la universidad. En el proceso de concentración solar se obtuvo una eficiencia óptica promedio del 42%; se calcularon diferentes temperaturas alcanzadas por el CCP a distintos valores históricos de radiación y demás variables ambientales que ya se han presentado en el pasado para esta ubicación de la Universidad Libre sede Bosque, dando viabilidad al diseño de un intercambiador de calor que podrá aprovechar la energía obtenida por el CCP con eficiencia térmica promedio obtenida del 40 %.

El método QFD permitió establecer parámetros de comparación e identificación de características para seleccionar adecuadamente el tipo de intercambiador de calor óptimo para el acoplamiento al CCP, arrojando como resultado que el intercambiador más apropiado es el de tubos concéntricos, teniendo en cuenta su viabilidad en aspectos de fabricación, estudio, mantenimiento y manejo, ajustándose de manera apropiada al CCP. De igual manera, sirvió como complemento efectivo para el sistema CCP+IC, al presentar ventajas frente a otros intercambiadores de calor según lo estimado en el resultado del análisis arrojado por el QFD.

En el diseño y construcción del intercambiador de calor se lograron modelar aspectos propios del dispositivo que permitieron la identificación del material óptimo la transferencia de calor

por conducción, el cálculo de dimensiones del intercambiador, el área de transferencia, deltas de temperatura promedio y el fluido de trabajo.

La propuesta didáctica aquí desarrollada y materializada a través de las dos guías de laboratorio propuestas, permitirá realizar análisis térmicos aplicados con la transferencia de calor que rodea toda la conversión de radiación solar a flujo de calor en el interior de la tubería. De esta manera, será posible estudiar temáticas específicas sobre radiación, convección, conducción, pérdidas por convección con el ambiente, variación de flujo volumétrico del fluido, cálculos de los coeficientes globales de transferencia de calor en el CCP y el IC, los cuales además estarán sujetos a condiciones y variables meteorológicas generando así la variación en los resultados según el recurso solar y condiciones ambientales disponibles. Todos estos factores físicos y técnicos permitirán también la elaboración posterior de otras prácticas de laboratorio, que propongan diferentes variaciones a los parámetros de control y medición del equipo desarrollado.

Como aporte fundamental el logro obtenido con este trabajo de grado trasciende el hecho de la construcción de un equipo de laboratorio, sino que adicionalmente permitirá a los estudiantes de la facultad de ingeniería estudiar temáticas relacionadas con las energía renovables y sus posibles usos desde una mirada experimental, aspecto que directamente se busca contribuya a la consolidación de competencias profesionales específicas que dotaran al ingeniero en formación de habilidades necesarias para un futuro mercado laboral relacionado con plantas de concentración solar, que según la variación de escalas podrían hacer generación energética para: procesos industriales, generación de vapor, generación de electricidad, procesos de desalinización, almacenamiento de energía, entre otros. Aspectos que claramente podrán ser aportes complementarios que se brinden desde la Facultad de Ingeniería de la Universidad Libre, en la formación de ingenieros hacia campos profesionales que estudien, promuevan y le apuesten a estas tecnologías.

7. RECOMENDACIONES

A partir de la propuesta aquí desarrollada, se considera importante continuar con el estudio de concentradores cilíndricos parabólicos para aportar a los estudiantes posibles áreas de interés o énfasis en sus carreras profesionales, desarrollando la implementación de prácticas de laboratorio que puedan ser incluidas en los planes de estudios, para asignaturas asociadas con energías alternativas y termodinámica, presentándose así una versatilidad importante en los programas de Ingeniería Mecánica en el área de térmica e Ingeniería Ambiental y la Maestría en el área de energías alternativas.

Se recomienda que el equipo CCP+IC, aportado a la universidad, debería quedar a cargo de alguna dependencia responsable ya sea un programa o la dirección de laboratorios; para facilitar así, el acceso al equipo y garantizar un uso responsable del mismo. Esto considerando, que la versatilidad del equipo permitirá no solo realizar las prácticas experimentales propuestas, sino que a futuro se pueden diseñar practicas adicionales en otras áreas, como por ejemplo, en pruebas de sistemas de control automático para el sistema de bombeo del IC en función de otras variables, en campos de regulación automática; al igual que se pueden seguir implementado mejoras en el uso de diferentes fluidos y cálculos de eficiencia.

A partir del trabajo aquí realizado, se deja un precedente de apoyo para futuros trabajos con otros tipos de concentradores solares que existen en la actualidad, como son concentradores de torre o concentradores esféricos parabólicos, que también podrían diseñarse y modelarse con metodología similares a la aquí desarrollada, en cuanto al sistema de seguimiento y control o la evaluación de diferentes fluidos de trabajo mediante simulaciones en SolidWorks.

Como posibles complementos al CCP+IC, se podría evaluar el diseño y construcción de un receptor de mayor eficiencia, como los utilizados en configuraciones de gran escala por grandes corporaciones, teniendo en cuenta que este tipo de desarrollos involucran procesos de alta tecnología, que podría buscar optimizarse con un equipo funcional como este, con costos no tan altos. Al igual, que sería viable realizar un estudio de radiación y eficiencias térmicas con el uso del software especializados como el TransSys, para mejorar las posibles condiciones de diseño y funcionamiento.

8. REFERENCIAS

- Alener (sitio web). Sevilla (Consultado el 10 de marzo del 2017). recuperado de <http://www.alener.es>
- Alvarez, F (2007). Elementos de diseño de maquinaria agrícola. Universidad Nacional de Medellín. Colombia.
- Beer, F et al (2013). Mecanica de materiales. 5ed. México D.F: Editorial McGraw Hill.
- Çengel, Y. (2007). Transferencia de calor y masa, fundamentos un enfoque practico. 3ed. México D.F: Editorial McGraw Hill.
- Çengel, Y, & boles, M. (2011) Termodinámica. 7ed. México D.F.: Editorial McGraw Hill.
- Chavez, F, & Orquera ,D (2011). Modelamiento energético y mecánico de un motor striling tipo beta para deneracion de 70 We para el DECEM-UGI. Tesis Pregrado. Sangolqui, Colombia Escuela Politécnica del Ejercito. 2012.142p. Disponible en <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/5157/1/T-ESPE-033127.pdf>
- Chemisan, D. (2009). Diseño y caracterización de un concentrador térmico-fotovoltaico cuasiestacionario para integración arquitectónica. Tesis doctoral. Lerida, España. Universidad de Lerida.. 268p. recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=101965>
- Cleveland, C. & morris, (2006). Christopher. Dictionary of Energy.2ed New York: Jordan Hill, GBR: Elsevier Science & Technology.. 680p. ISBN978-008-096811-7
- Costa ,J.(2005). Diccionario de Química física. España: Díaz de Santos. 872p. ISBN 84-7978-691-4
- De la hoz , A & Gonzalez, C. (2014).Diseño y construcción de un concentrador cilíndrico con sistema de seguimiento solar y sistema de adquisición de datos. Tesis de pregrado. Bogotá, Colombia. Universidad Distrital. 128p .
- Delgado , E. (2007). Diseño construcción y evaluación de tres colectores solares térmicos. Revista Avances.,nro 6. pp 72-76.
- Enerstar [sitio web]. Barcelona (Consultado el 10 de marzo del 2017). recuperado de <http://www.enerstar.es>
- Garcia,R Y Espejo, C. . (2010) La energía solar termoeléctrica en España. Anales de geografía, Vol 2,nro 30, pp. 81-115.
- Garza,B. (1997) . Diseño y mantenimiento d equipos de trasferencia de calor. Universidad. Autónoma de Nuevo Leon (Tesis de Maestría). Nuevo Leon. Mexico. 177p
- Gemasolar [sitio web]. Madrid (cosultado en enero del 2010). recuperado de <http://www.torresolenergy.com>
- Gonzales, A. (2006). El concepto “energía” en la enseñanza de las ciencias. Revista Iberoamericana de Educación. 2006 nro 38. pp 1-7. recuperado de <https://rieoei.org/RIE/article/view/2660>

Global Energy Network Institute.San Diego, California (Consultado el 10 de marzo del 2017). Disponible en <http://www.geni.org>.

Guillen,F. (2014). Diseño y fabricación de un intercambiador de calor de tubos concéntricos para los Laboratorios de Termo fluidos de la Universidad Santo Tomás, Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomas. Bogotá Distrito Capital. Colombia. .

Hernandez, J., Saenz, E., & VALLEJO, A. (2010) Estudio del recurso solar en la ciudad de Bogotá para el diseño de Sistemas fotovoltaicos Interconectados Residenciales. Revista Colombiana de Física. Vol 2. nro 42. recuperado de <http://studylib.es>.

Instituto colombiano de normas tecnicas y certificación NTC 1736. (2006). Energía solar. Definiciones y nomenclatura. 2006.Incontec

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. .(1990).Energia solar evaluación de materiales aislantes térmicos empleados en colectores solares. NTC 2774

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. .(1990). sistemas solares térmicos y componentes. Colectores solares. Parte 2: métodos de ensayo.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Energy management systems requiremensts with guindance for use. ISO 5001. 2011.

Jaramillo,A.(2007). Intercambiadores de calor. Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico.

Kalogirou, S. (2009), Solar energy engineering : procesess and systems, San Diego, Estados unidos de America: Editorial Elsevier,.

Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y química Solar [sitio web]. Mexico D.F (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de <http://www.concentrationsolar.org.mx>

Lopez, A., & Hortua J. (2013) Diseño y construcción de un prototipo de colector solar parabólico tipo disco con sistema de seguimiento solar(Tesis de pregrado). Bogotá, Colombia. Universidad Distrital.

Mendez, J & Cuervo, (2011). Rafael. Energia solar Termica.3ed. Madrid: Editorial fundacion confemetal.

National Research Council, Division on Engineering and Physical Science. Sun to the Earth -- and Beyond: A decadal Strategy in Solar and Space phisics.: National Academies Press. 2002. washington ISBN 0-309-50800-2. recuperado de <https://www.nap.edu/catalog/10860/the-sun-to-the-earth-and-beyond-panel-reports>.

naylampmechatronics (sitio web). (Consultado el 15 de febrero del 2019) recuperado de <https://naylampmechatronics.com/>.

Păceșilă, M. (2013). Solar energy policy developments in Europe. Theoretical and Empirical Researches in Urban Management. nro 1 Vol 10. pp 22-24.

Portalcienza (sitio web). (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de www.portalcienza.net.

Quimicaorganica (sitio web). Oviedo, España (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de www.quimicaorganica.net.

Real academia de ingeniería (sitio web). Madrid (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de <http://diccionario.raing.es>

Rodríguez, D. (2014). Diseño de una planta de colectores cilíndrico parabólicos para una lavandería industrial en Vicar (Almería) (Tesis de grado). Universidad de Almería, Almería, España.

Rodríguez, H. (2009). Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas. Revista de ingeniería. nro 28. pp 83-89. ISSN. 0121-4993 recuperado de <http://www.redalyc.org>.

Romero, E, ed al. (2007) Obtención de aceite esencial de comino utilizando concentradores solares. Avances en Energías Renovables y Medio ambiente. nro11. vol 9. pp41-45. ISSN 0329-5184. recuperado de <http://www.cricyt.edu.ar>.

Sensovant (sitio web). (2017). Valencia (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de <http://sensovant.com>.

Solarweb (sitio web). Sevilla (Consultado el 10 de marzo del 2017). recuperado de <http://www.solarweb.net>

Soriano, S. (2016). Simulación y diseño del modelo de captación de energía en una planta termosolar con Solidworks (tesis de grado). Universidad Politécnica de Cataluña. Cataluña. España.

Twenergy. (sitio web). Sevilla (Consultado el 10 de marzo del 2017) recuperado de <http://twenergy.com>

Vicario, D.,(2013). Pasteurización de leche en Managua con energía solar térmica. Universidad Carlos III de Madrid. Recuperado de <http://e-archivo.uc3m.es>.

Vidriales, I. (2007). Colector de Canal Parabólico para la Generación Directa de Vapor para calor de proceso (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. México Distrito Federal, México.

Villarreal, D. (2016). Implementación y pruebas de un motor Stirling tipo beta utilizando un concentrador solar parabólico esférico (Tesis de maestría). Universidad de las Fuerzas Armadas. Sangolquí, Ecuador.

Yacuzzi, E, & Martín, F. (2002) QFD: conceptos, aplicaciones y nuevos desarrollos, lugar año Universidad del CEMA) (Aventis Pharma)

Yndurain, F. (2005). Energía: Presente y futuro de las diversas tecnologías. Academia Europea de ciencias y artes, 2-30, Recuperado de <http://www.academia-europea.org>.



NIT: 860.013.798-5

EL SUSCRITO DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA

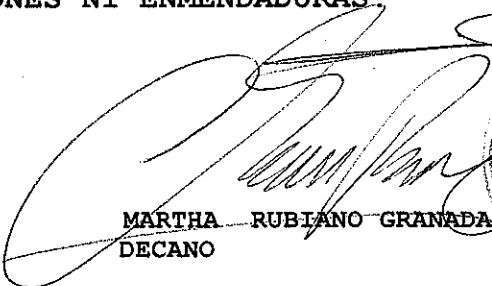
H A C E C O N S T A R

Que, **SERGIO ANDRES HERRERA CELIS**, identificado(a) con cédula de ciudadanía No. **1019089986** expedida en **Bogotá, D. C.**, con código estudiantil No. **065121013** cursó y aprobó en esta universidad los **10 semestres** del programa de **Ingeniería Mecánica (Snies 5023) Res. 20250 (26/10/2016) vigencia 7 años - duración 10 semestres** en los **periodos académicos de primer periodo 2012 a segundo periodo 2018** . Inclusive

QUEDANDO ACADEMICAMENTE AL DIA .

Se expide la presente constancia a solicitud del interesado en la ciudad de Bogotá, D. C. a los un (01) días del mes de noviembre de dos mil diecinueve (2019). **DEBIDAMENTE FIRMADA Y SELLADA SIN BORRONES NI ENMENDADURAS.**


MARTHA ROCÍO SAAVEDRA TORRES
 SECRETARIA ACADEMICA
 Facultad de Ingeniería


MARTHA RUBIANO GRANADA
 DECANO