



**Diseño y construcción concentrador solar canal parabólico combinado con  
reflector solar de espejo plano**

**Cristian Ernesto Barrera Moreno**

Código: 21131626600

**Gabriel Hernán Vargas Fonseca**

Código: 21131613881

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Mecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Tunja, Colombia

2022

**Diseño y construcción concentrador solar canal parabólico combinado con  
reflector solar de espejo plano**

**Cristian Ernesto Barrera Moreno**  
**Gabriel Hernán Vargas Fonseca**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Ingeniero Electromecánico**

Director (a):  
Doctor Carlos Ramón Batista Rodríguez

Línea de Investigación:  
Desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de fuentes de Energía Renovable

**Universidad Antonio Nariño**  
Programa Ingeniería Mecánica  
Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica  
Tunja, Colombia  
2022

## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

Tunja, 07 Junio 2022.

*Tan asombrosos son los hechos en esta conexión, que parecería que el creador mismo había diseñado eléctricamente este planeta.*

Nikola Tesla (inventor, ingeniero eléctrico y mecánico)

*Tenemos un práctico reactor de fusión en el cielo llamado sol, no tienes que hacer nada, solo funciona. Aparece todos los días.*

Elon Musk. (emprendedor y magnate, director general de SpaceX, de Tesla Motors, presidente de SolarCity y copresidente de OpenAI.)

## **Agradecimientos**

Al llegar a final de esta etapa queremos extender un agradecimiento, a quienes nos acompañaron en este proceso y fueron inspiración apoyo y fortaleza. En mención especial para Dios, nuestros padres, hermanos y pareja. Gracias por demostrar que el verdadero amor no es otra cosa que el deseo inevitable de ayudar a otro para que este se supere.”

La gratitud, también es para la universidad Antonio Nariño su programa de ingeniera Electromecánica, agradecimiento sincero a nuestro asesor de tesis. Dr. Carlos Ramon Batista Rodríguez, y a todos los docentes que nos acompañaron en este proceso, por su apoyo, enseñanzas y creer en nosotros construyendo la base de nuestra vida profesional.

Gracias totales.

## Contenido

	Pág.
Resumen.....	16
Abstract.....	17
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
Antecedentes .....	19
Objetivos .....	24
Objetivo General .....	24
Objetivos específicos.....	24
Planteamiento del problema.....	24
Hipótesis .....	25
Preguntas de investigación .....	25
Justificación .....	25
<b>1. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>27</b>
<b>1.1 Energía solar.....</b>	<b>27</b>
<b>1.1.1. Radiación solar terrestre .....</b>	<b>27</b>
<b>1.2 Ecuaciones fundamentales de la radiación solar.....</b>	<b>28</b>
<b>1.2.1 La energía solar fotovoltaica.....</b>	<b>30</b>
<b>1.2.1 Energía solar térmica .....</b>	<b>30</b>
<b>1.3 Refracción y reflexión .....</b>	<b>35</b>
<b>1.3.1 Reflexión de la luz .....</b>	<b>36</b>
<b>1.3.2 Leyes de reflexión .....</b>	<b>37</b>
<b>1.3.3 Leyes de refracción de la luz .....</b>	<b>42</b>
<b>1.4 Concentradores de energía solar .....</b>	<b>42</b>
<b>1.4.1 Antecedentes históricos .....</b>	<b>44</b>
<b>1.4.2 Energía termo solar .....</b>	<b>45</b>
<b>1.4.3 Tipos de concentradores solares .....</b>	<b>46</b>
<b>1.4.4 Canal parabólico.....</b>	<b>46</b>
<b>1.4.5 Disco parabólico .....</b>	<b>48</b>
<b>1.4.6 Torre central .....</b>	<b>48</b>
<b>1.4.7 Componentes o elementos principales de un concentrador solar parabólico (CCP) 49</b>	
<b>1.4.8 Ventajas sistemas de concentración solar .....</b>	<b>51</b>
<b>1.5 Seguidores solares .....</b>	<b>52</b>
<b>1.5.1 Ventajas y desventajas de los seguidores solares.....</b>	<b>53</b>

<b>2. DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR CANAL PARABÓLICO .....</b>	<b>55</b>
<b>2.1 Requerimientos: .....</b>	<b>55</b>
<b>2.2 Metodología de cálculo.....</b>	<b>55</b>
<b>2.3 Concentrador solar canal parabólico .....</b>	<b>61</b>
<b>2.3.1 Componentes del CCP.....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.2 Tubo receptor termo-solar.....</b>	<b>63</b>
<b>2.3.3 Fluidos de transferencia de calor para concentración solar.....</b>	<b>64</b>
<b>2.4 Diseño Conceptual.....</b>	<b>69</b>
<b>2.4.1 Estructura Soporte .....</b>	<b>69</b>
<b>2.4.2 Sistema de movimiento reflector espejos planos.....</b>	<b>70</b>
<b>2.4.3 Sistema reflector .....</b>	<b>70</b>
<b>2.4.4 Descripción el funcionamiento concentrador solar canal parabólico                 combinado con reflector de espejos planos .....</b>	<b>70</b>
<b>2.5 Diseño en detalle del concentrador solar.....</b>	<b>71</b>
<b>3. CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR CANAL PARABÓLICO .....</b>	<b>73</b>
<b>3.3 Fase numero 1 ubicación del proyecto .....</b>	<b>73</b>
<b>3.4 Fase 2 Metodología para la construcción del concentrador solar. ....</b>	<b>75</b>
<b>3.4.1 Estructura para sujeción canal-parabólica.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4.2 Estructura tipo soporte para los reflectores.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4.3 Tubo focal concentrador de temperatura .....</b>	<b>77</b>
<b>3.4.4 Ensamble Funcional .....</b>	<b>77</b>
<b>3.4.5 Diseño y construcción del área reflectante del concentrador solar canal                 parabólico.....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.6 Cálculos de ángulos de incidencia .....</b>	<b>82</b>
<b>3.4.7 Metodología de análisis de datos .....</b>	<b>92</b>
<b>3.4.8 Costo de construcción del concentrador solar Canal Parabólico (CCP)....</b>	<b>95</b>
<b>4. ENSAYOS REALIZADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>96</b>
 Se realizan diferentes tipos de ensayos para el receptor solar de la línea focal para así poder determinar la eficacia en cada caso. Dichas pruebas se presentan a continuación: .....	
<b>4.3 Ensayo realizado tubo receptor cobre al desnudo.....</b>	<b>97</b>
<b>4.3.1 Resultado de ensayos .....</b>	<b>101</b>
<b>4.3.2 Conclusiones sobre los ensayos.....</b>	<b>103</b>
<b>4.4 Ensayo realizado CCP Tubo receptor térmico en un sistema de tubo de             vidrio (tubo fluorescente reciclado) al vacío .....</b>	<b>103</b>
<b>4.4.1 Tubos fluorescentes .....</b>	<b>104</b>
<b>4.4.2 Pruebas de resistencia térmica a tubo de vidrio .....</b>	<b>105</b>
<b>4.4.3 Pruebas de vacío a los tubos de cristal. ....</b>	<b>107</b>

<b>4.5 Pruebas realizadas al tubo receptor solar de la línea focal .....</b>	<b>110</b>
<b>4.5.1 Ensayo realizado al tubo receptor. ....</b>	<b>110</b>
<b>4.5.2 Resultados de Ensayo al tubo receptor. ....</b>	<b>114</b>
<b>4.6 Prueba realizada al fluido calo-portador exposición al sol en ausencia de reflectores de espejos planos. ....</b>	<b>115</b>
<b>4.6.1 Ensayo realizado al fluido calo-portador .....</b>	<b>115</b>
<b>4.6.2 Resultados de Ensayo al fluido calo-portador .....</b>	<b>117</b>
<b>4.7 Prueba al fluido calo-portador en tubo receptor de recubrimiento sencillo en presencia de los espejos planos.....</b>	<b>118</b>
<b>4.7.1 Ensayos Realizado .....</b>	<b>118</b>
<b>4.7.2 Resultados de Ensayo .....</b>	<b>120</b>
<b>4.8 Prueba realizada a fluido calo-portador en tubo receptor con doble recubrimiento en presencia de los reflectores de espejos planos .....</b>	<b>120</b>
<b>4.8.1 Ensayo realizado .....</b>	<b>121</b>
<b>4.8.2 Resultados de Ensayo .....</b>	<b>124</b>
<b>5. CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS. ....</b>	<b>127</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>130</b>
<b>Referencias Bibliográficas.....</b>	<b>132</b>

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Central de Ivanpah Estado Unidos .....	20
<b>Figura 2.</b> Sistema de generación energía solar (SEGS) .....	20
<b>Figura 3.</b> Solana. 280 MW. Estados Unidos .....	21
<b>Figura 4.</b> Plataforma solar Extremadura solaben. 200 MW. España .....	22
<b>Figura 5.</b> Noor I-Ouarzazate. 160 MW. Marruecos .....	22
<b>Figura 6.</b> Planta de Energía Solar Andasol. 150 MW. España .....	23
Figura 7. Esquema de distribución de la radiación en el sistema tierra-atmósfera .....	29
<b>Figura 8.</b> Curva de irradiación espectral estándar del WRC a distancia media del sol .....	31
<b>Figura 9.</b> Posicionamiento solar y sus respectivos ángulos .....	32
<b>Figura 10.</b> Comportamiento del sol y los diferentes ángulos .....	33
<b>Figura 11.</b> Parámetro E según los meses del año .....	35
<b>Figura 12.</b> Reflexión de la luz .....	36
<b>Figura 13.</b> Comportamiento del haz de luz (reflexión) .....	36
<b>Figura 14.</b> Leyes de reflexión de la luz .....	38
<b>Figura 15.</b> Reflexión de la luz .....	39
<b>Figura 16.</b> Ejemplo refracción de la luz .....	39
<b>Figura 17.</b> Refracción de la luz .....	41
<b>Figura 18.</b> Refracción de la luz .....	41
<b>Figura 19.</b> Análisis de colectores solares de media temperatura .....	43
<b>Figura 20.</b> Capacidad global de concentración de energía solar térmica, por país y región 2008-2018 .....	44
<b>Figura 21.</b> Concentración lineal y puntual .....	46
<b>Figura 22.</b> Superficie reflectora .....	50
<b>Figura 23.</b> Tubo receptor .....	51
<b>Figura 24.</b> Los seguidores solares .....	52
<b>Figura 25.</b> Esquema de un concentrador solar canal parabólico .....	62
<b>Figura 26.</b> Componentes de un concentrador solar de canal parabólico .....	63
<b>Figura 27.</b> Prueba de densidad aceite tipo térmico .....	65
<b>Figura 28.</b> Prueba de capacidad calorífica aceite tipo térmico .....	66
<b>Figura 29.</b> Prueba de conductividad térmica aceite tipo térmico .....	66
<b>Figura 30.</b> Prueba de presión de vapor aceite tipo térmico .....	67
<b>Figura 31.</b> Prueba de viscosidad aceite tipo térmico .....	68
<b>Figura 32.</b> Estructura soporte (CCP) .....	69
<b>Figura 33.</b> Sistema reflector cilindro-parabólico .....	70
<b>Figura 34.</b> Sistema de CCP estado inicial .....	71
<b>Figura 35.</b> Ubicación Geográfica .....	74
<b>Figura 36.</b> <i>Irradiación solar en Tunja</i> .....	75
<b>Figura 37.</b> <i>Ensamble</i> .....	78

<b>Figura 38.</b> <i>Distancia focal parábola</i> .....	79
<b>Figura 39.</b> <i>Vértice de la parábola</i> .....	80
<b>Figura 40.</b> <i>Dimensiones del diseño de la parábola</i> .....	81
<b>Figura 41.</b> <i>Superficie reflectante (parábola)</i> .....	81
<b>Figura 42.</b> <i>Soporte del concentrador solar canal-parabólico con espejos planos</i> .....	82
<b>Figura 43.</b> <i>Coordenadas solares</i> .....	82
<b>Figura 44.</b> <i>proyección incidencia solar</i> .....	84
<b>Figura 45.</b> <i>Proyección de incidencia solar 27-noviembre 2021</i> .....	84
<b>Figura 46.</b> <i>Proyección de incidencia solar 02-mayo-2022</i> .....	84
<b>Figura 47.</b> <i>proyección de incidencia solar 09-mayo -2022</i> .....	85
<b>Figura 48.</b> <i>Ángulos de posicionamiento para el sistema de reflector en la mañana</i> .....	86
<b>Figura 49.</b> <i>Ángulos de posicionamiento para el sistema de reflector horas de la tarde</i> ...	88
<b>Figura 50.</b> <i>Inclinación reflectora solar de espejo plano en la mañana</i> .....	90
<b>Figura 51.</b> <i>Inclinación reflectora solar de espejo plano en la tarde</i> .....	91
<b>Figura 52.</b> <i>Concentrador solar cilindro parabólico</i> .....	96
<b>Figura 53.</b> <i>Adecuación de concentrador solar para respectivas pruebas</i> .....	97
<b>Figura 54.</b> <i>Adecuación y conexión de la termocupla</i> .....	97
<b>Figura 55.</b> <i>Posicionamiento del CCP</i> .....	98
<b>Figura 56.</b> <i>Graduación de inclinación específica del reflector</i> .....	99
<b>Figura 57.</b> <i>CCP con tubo receptor solar de cobre al desnudo</i> .....	100
<b>Figura 58.</b> <i>Temperatura en función del tiempo</i> .....	102
<b>Figura 59.</b> <i>Graduación de inclinación específica del reflector</i> .....	102
<b>Figura 60.</b> <i>Tubo fluorescente</i> .....	103
<b>Figura 61.</b> <i>Clasificación de tubos fluorescentes</i> .....	104
<b>Figura 62.</b> <i>Prueba realizada a tubos fluorescentes</i> .....	105
<b>Figura 63.</b> <i>Resistencia térmica a tubo de vidrio</i> .....	105
<b>Figura 64.</b> <i>Extracción del aire del tubo receptor solar</i> .....	107
<b>Figura 65.</b> <i>Tubo receptor con sistema de tubo al vacío</i> .....	107
<b>Figura 66.</b> <i>Extracción del aire del centro focal sistema de tubo sencillo</i> .....	108
<b>Figura 67.</b> <i>Extracción de aire tubo receptor solar</i> .....	109
<b>Figura 68.</b> <i>Radiación solar sobre centro focal</i> .....	109
<b>Figura 69.</b> <i>Ensayo realizado al tubo receptor</i> .....	110
<b>Figura 70.</b> <i>Disipación de temperatura en el tiempo</i> .....	114
<b>Figura 71.</b> <i>Receptor Hora/Sol fluido calo-portador</i> .....	117
<b>Figura 72.</b> <i>Receptor Sobre - Canal</i> .....	120
<b>Figura 73-</b> <i>Eva. Temp 1 hora</i> .....	124
<b>Figura 74</b> <i>I w/m<sup>2</sup></i> .....	126
<b>Figura 75.</b> <i>Concentrador solar comercial 1</i> .....	127
<b>Figura 76</b> <i>Concentrador solar comercial 2</i> .....	128

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades del aire .....	58
Tabla 2. Parámetros temperatura .....	60
Tabla 3. Vidrio .....	60
Tabla 4. Cobre.....	61
<b>Tabla 4.</b> <i>Coordenadas</i> .....	79
<b>Tabla 5.</b> Cálculo del ángulo de inclinación Reflector espejo plano.....	89
<b>Tabla 6.</b> Tubería de cobre de temple rígido Tipo “M”.....	93
<b>Tabla 7.</b> Conductividad Termica [W/m.K] diferentes materiales .....	94
<b>Tabla 8.</b> <i>Materiales y costos</i> .....	95
<b>Tabla 9.</b> <i>Ensayos realizados</i> .....	101
<b>Tabla 10.</b> <i>Medidas de tiempo</i> .....	111
<b>Tabla 11.</b> <i>Ensayo realizado al fluido calo-portador</i> .....	115
<b>Tabla 12.</b> <i>Ensayo realizado</i> .....	118
<b>Tabla 13.</b> <i>Ensayo realizado</i> .....	121
<b>Tabla 14.</b> Costos Prototipo.....	129

## Lista de Símbolos y Abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Área	$m^2$	$\iint dx dy$
$A_{BET}$	Área interna del sólido	$\frac{m^2}{g}$	ver DIN ISO 9277
$A_g$	Área transversal de la fase gaseosa	$m^2$	Ec. 3.2
$A_s$	Área transversal de la carga a granel	$m^2$	Ec. 3.6
$A$	Coefficiente	1	Tabla 3-1

### Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\alpha_{\square\square}$	Factor de superficie	$\frac{m^2}{g}$	$(W_{F,waf})(A_{BET})$
$\beta_{\square}$	Grado de formación del componente i	1	$\frac{m_j}{m_{bm} \varrho}$
$\square$	Wandhahfreiwinkel (Stahlblech)	1	Sección 3.2
$\square$	Porosidad de la partícula	1	$1 - \frac{\rho_s}{\rho_w}$
$H$	mittlere Bettneigungswinkel (Stürzen)	1	Figura 3-1

### **Subíndices**

<b>Subíndice</b>	<b>Término</b>
------------------	----------------

---

DR	Dubinin-Radushkevich
----	----------------------

E	Experimental
---	--------------

### **Superíndices**

<b>Superíndice</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

---

N	Exponente, potencia
---	---------------------

### **Abreviaturas**

<b>Abreviatura</b>	<b>Término</b>
--------------------	----------------

---

<i>CCP</i>	Concentrador Cilindro Parabólico
------------	----------------------------------

<i>DF</i>	Dimension fundamental
-----------	-----------------------

## **Resumen**

En este proyecto busca estudiar si al combinar dos tipos de colectores de manera compacta se podría optimizar la obtención de energía; los colectores a utilizar son el cilindro-parabólico y los reflectores de espejo plano (Fresnel) con el fin de comparar su eficiencia entre ellos y su comportamiento al ser combinados.

Como resultado se busca obtener un colector que sea funcional en el aprovechamiento de la luz solar en cualquier momento del día, teniendo en cuenta los ángulos de luz en la trayectoria de la tierra con respecto al sol esto sin abandonar la idea que se debe realizar el seguimiento de los rayos solares según la rotación de la tierra, lugares o puntos de mayor provecho y horario de radiación solar.

Como producto final se desarrolló prototipo para demostrar que se puede mejorar la eficiencia en la obtención en este caso de energía térmica a través de la radiación solar, utilizando colectores combinados donde su fabricación acarrearía bajos costos.

**PALABRAS CLAVES:** Eficiencia, energías limpias, colector solar, espejos planos, radiación y radiación solar.

### **Abstract**

In this project, it seeks to study whether by combining two types of collectors in a compact way, energy production could be optimized; the collectors to be used are the parabolic trough and the flat mirror reflectors (Fresnel) in order to compare their efficiency between them and their behavior when combined.

As a result, it is sought to obtain a collector that is functional in the use of sunlight at any time of the day, taking into account the angles of light in the trajectory of the earth with respect to the sun, without abandoning the idea that the monitoring of solar rays according to the rotation of the earth, places or points of greatest benefit and hours of solar radiation.

As a final product, a prototype was developed to demonstrate that efficiency in obtaining thermal energy through solar radiation can be improved in this case, using combined collectors where their manufacture would entail low costs.

**Key Words:** parabolic channel, solar concentrator, flat mirrors, solar radiation, solar reflector

## INTRODUCCIÓN

Según el acuerdo para el Cambio Climático de París en 2015 quedó claro que el desarrollo económico del mundo debe moverse a partir de energías renovables, para dejar atrás la generación a partir de combustibles fósiles, como carbón, petróleo o gas natural. Los combustibles fósiles provocan contaminación y emisiones de gases de efecto invernadero, que son la causa principal del calentamiento global y el cambio climático. El uso de dichos combustibles y como consecuencia, sus efectos al ambiente, pueden evitarse recurriendo a las fuentes de energía renovable. Colombia se encuentra en una zona geográfica privilegiada para el aprovechamiento de estas fuentes de energía, que incluyen energía solar, eólica y geotérmica, estadísticas de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) evidencian que de las iniciativas radicadas, el 88,3% tienen que ver con energía solar, en donde 9 de cada 10 propuestas para generar energía, usarán paneles solares. Lo que representa un crecimiento del 32% de julio a noviembre de 2017. (UPME, 2013)

En el capítulo 1 tratarán conceptos básicos utilizados para el desarrollo de trabajo de investigación, seguidamente se realizara un énfasis en la concentración solar, la clasificación y los tipos de concentradores solares que existen. Posteriormente se mencionara los antecedentes más relevantes respecto al uso de la energía solar de concentración. Haciendo un recuento tanto a nivel internacional como a nivel local.

En el capítulo 2 se plantea el diseño de un concentrador solar canal parabólico y más específicamente el diseño conceptual el cual tratará la estructura soporte, el sistema de movimientos de los reflectores de espejos planos, descripción del sistema reflector, descripción general del funcionamiento del concentrador solar canal parabólico con reflector de espejos planos, seguido de el diseño en detalle del concentrador solar, y comparación de costos de construcción con concentradores solares comerciales.

En el capítulo número 3 se abordará temas como construcción y ensayos del concentrador canal parabólico dentro de este capítulo se encuentra la metodología para la construcción del concentrador, estructura para la sujeción del área reflectante del canal parabólico, estructura y tipo de soporte para los reflectores de espejos planos, seguidamente se tratará el tema sobre

el tubo receptor de la línea focal del concentrador. Para finalizar con el ensamble funcional del concentrador.

El capítulo 4 se encuentra pruebas y ensayos hacia el concentrador solar, incluyendo el análisis de resultados.

En el capítulo 5 se finalizara con las conclusiones y recomendaciones finales para futuros trabajos de investigación.

### **Antecedentes**

La tecnología de estos concentradores parabólicos ha sido la más avanzada dentro de las termo solares, considerando el desarrollo de las pequeñas empresas que los comercializan y producen. En la investigación bibliográfica realizada, la mayor aplicación se ha encontrado en plantas de energía

#### ***Centrales de energía solar térmica en la actualidad***

Teniendo condiciones adecuadas se podría afirmar que el uso de energía solar térmica podría llegar a satisfacer la demanda energética mundial hasta en un 12 % para el 2050.

La energía solar térmica para la generación de electricidad permite una mayor eficiencia a menor costo. Es capaz de satisfacer la mayor demanda en horas pico como las denominadas carga base. Es una fuente de electricidad que no atenta contra el medio ambiente y se adapta a diversas zonas del mundo con fuerte irradiación solar

En los últimos diez años, la energía solar termoeléctrica se ha expandido rápidamente convirtiéndose en una de las soluciones más fiables de generación de energía. A continuación, se nombra algunos de los proyectos que se encuentran en ejecución actualmente (Roca, 2016).

***Ivanpah. 392 MW Estados Unidos***

**Figura 1.** *Central de Ivanpah Estado Unidos*



Nota: Acosta, 2014.

Esta central está constituida con 3 huertos solares en medio del desierto de mojave, en límites de los estados de nevada y california, dicha planta solar ocupa un área de 13 kilómetros cuadrados y la componen 3 torres de 139 metros de altura y más de 300.000 espejos y posee una capacidad instalada de 392 MW que proporciona electricidad a más de 140.000 hogares.

***Sistema de generación de energía solar (SEGS). 354 MW Estados Unidos***

**Figura 2.** *Sistema de generación energía solar (SEGS)*



Nota: Periódico de la energía, 2016.

Actualmente es la planta de energía solar más grande del mundo, está situada en el desierto de Mojave en California, Estados Unidos. Cuenta con una capacidad instalada de 354 MW y genera 662 GWh de energía al año.

***Solana. 280 MW Estados Unidos***

**Figura 3.** *Solana. 280 MW. Estados Unidos*



Nota: Futureenergy, 2014.

La planta termo solar ubicada Gila Bend Arizona es una planta con colectores cilindro-parabólico con almacenamiento de sales fundidas. La capacidad total 280 MW los cuales abastece 70.000 hogares. La planta cubre una extensión de 780 hectáreas.

***Plataforma solar Extremadura solaben. 200 MW. España***

**Figura 4.** *Plataforma solar Extremadura solaben. 200 MW. España*



Nota: Periódico de la energía, 2016.

Es un complejo termo solar más grande de España con una capacidad instalada de 200 MW, ubicada en Europa y más específicamente en el municipio de Logrosan, en la provincia de Extremadura, España.

**Figura 5.** *Noor I-Ouarzazate. 160 MW. Marruecos*



Nota: Periódico de la Energía, 2016.

Es la primera fase de 160 MW de la planta termo solar de Noor I-Ouarzazate 1 sur de Marruecos. La primera fase consta de 500.000 espejos curvados alineados en 800 filas sobre un área de 450 hectáreas lo cual está proyectada que suministrara energía a 700.000 hogares.

*Planta de Energía Solar Andasol. 150 MW. España*

**Figura 6.** *Planta de Energía Solar Andasol. 150 MW. España*



Nota: Periódico de la Energía, 2016.

Construida en Andalucía España. Fue la primera planta de energía solar de Europa el cual utiliza concentradores solares cilindro-parabólico. La planta consta de tres instalaciones con capacidad de 50 MW cada una, que generan aproximadamente 540 GWH al año. La planta cuenta con una tecnología de sal fundida que almacena el calor solar térmico para la generación de electricidad durante la noche.

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

Desarrollar un concentrador solar canal parabólico combinado con un reflector solar de espejos planos.

### **Objetivos específicos**

1. Diseñar un sistema de concentrador solar canal parabólico combinado con un reflector solar de espejos planos.
2. Construir un modelo del concentrador solar canal parabólico combinado con un reflector solar de espejos planos.
3. Realizar las pruebas del prototipo construido que permitan evaluar su funcionalidad.

### **Planteamiento del problema**

Dado que el agotamiento de los hidrocarburos es inminente e irreversible, pues es el principal recurso utilizado para la producción de energía en la actualidad, es de vital importancia el aprovechar las fuentes alternas y limpias de energía que puedan sustituir a las fuentes no renovables y contaminantes. Como se menciona anteriormente, una fuente renovable de energía es la solar el mayor desafío es diseñar sistemas de captación y aprovechamiento que la puedan transformar y que a su vez, sean económicos y fácilmente operables.

Un tipo de sistema de captación solar puede ser un Concentrador Solar de Canal Parabólico (CCP) y la eficiencia de estos equipos está relacionada con las condiciones del lugar, como pueden ser la irradiación, pero también está íntimamente relacionada con el diseño implementado, particularmente su geometría.

## **Hipótesis**

Para tratar de incrementar el rendimiento del concentrador solar de canal parabólico se pueden considerar las dos siguientes líneas de acción:

Si se construye un CCP implementando dos espejos planos en la parte superior del concentrador solar, entonces mejora la incidencia de los rayos solares sobre la superficie colectora y así mismo tenga una mayor incidencia de los mismos sobre la línea receptora solar,

Si se incorpora un recubrimiento sobre la línea receptora focal, entonces se disminuirá la pérdida de calor por conducción y convección.

## **Preguntas de investigación**

¿Cómo aprovechar y hacer uso de la energía solar?

¿Es posible reducir las pérdidas por conducción y convección al implementar un recubrimiento de tubo de vidrio a la línea receptora solar al concentrador solar canal parabólico (CCP)?

¿Cuáles pueden ser las propuestas para aprovechar la energía solar térmica?

## **Justificación**

La tecnología de concentradores solares del tipo canales parabólicos se ha desarrollado en los últimos años; sin embargo, sus grandes dimensiones y la necesidad de mover estos dispositivos con seguidores solares en un plano complica su funcionamiento, y sus costos de fabricación son extremadamente altos. La Universidad Antonio Nariño radicó en 2020 una solicitud de patente, consistente en un reflector de espejos planos que permite direccionar la radiación solar hacia una determinada superficie. A partir de la problemática planteada y a la disponibilidad de la información de la patente referida es que el presente proyecto de investigación se ha propuesto como objetivo: desarrollar un prototipo a escala de un concentrador solar de canal parabólico con el reflector incorporado en su parte superior, para poder realizar ensayos que permitan obtener datos de la funcionalidad del reflector, las ventajas y desventajas de su uso con respecto a los seguidores solares

tradicionales que usan los canales parabólicos que su función principal es mover la superficie reflectante, al ser superficies grandes requieren de mecanismos complejos lo cual conlleva aumentar los costos de fabricación de los mismos, el proyecto actual da la alternativa de incorporar reflectores planos en la parte superior de la superficie reflectante para evitar el movimiento de la misma. Con el propósito de mejorar su funcionalidad y aminorar costos en la fabricación. Los espejos planos cumplen con la función que hace los seguidores solares. En vez de mover la superficie reflectora se moverían los reflectores. volviéndose así un concentrador más eficiente en cuanto a gastos de construcción. Para lograr el propósito propuesto se pretende diseñar, construir el concentrador parabólico y el reflector, para finalmente realizar los ensayos necesarios. Se espera como resultado obtener datos de los ensayos que permitan corroborar la funcionalidad del reflector y la posibilidad de su utilización a escala industrial.

## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 Energía solar

Es una fuente renovable que proviene del uso de los recursos naturales como, por ejemplo: el sol. El agua, viento, biomasa animal o vegetal y la tierra. Una de las características más fundamentales que hace que se diferencian de los demás tipos de energía como la fósil es que su fuente es inagotable son renovadas ilimitadamente, fuera de esto son energías limpias que no producen emisiones contaminantes al medio ambiente. Por tal motivo también se les puede conocer como energías alternativas o verdes.

#### *1.1.1. Radiación solar terrestre*

La radiación que llega al planeta tierra se conoce como radiación de onda corta. Debido a los valores que llega a la superficie terrestre. Como se evidencia en la (**Figura 1**), A la atmósfera llega un 100 % de radiación solar, sólo un 25% llega directamente a la superficie de la Tierra y un 26% es dispersado por la atmósfera como radiación difusa hacia la superficie, esto hace que un 51 % de radiación llegue a la superficie terrestre. Un 19 % es absorbido por las nubes y gases atmosféricos. El otro 30 % se pierde hacia el espacio, de esto la atmósfera dispersa un 6 %, las nubes reflejan un 20 % y el suelo refleja el otro 4 %. Entonces la radiación solar que llega a la atmósfera puede ser dispersada, reflejada o absorbida por sus componentes. Esto depende de la longitud de onda de la energía transmitida y del tamaño y naturaleza de la sustancia que modifica la radiación.

## 1.2 Ecuaciones fundamentales de la radiación solar

En esta sección, las ecuaciones de la radiación solar son tomadas de: Duffie & Beckman (2013). La irradiación normal sobre una superficie en lo alto de la atmósfera para cada día del año se puede calcular por dos expresiones:

0-1

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (1)$$

n= día consecutivo del año

0-2

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1'000110 + 0.034221 \cos \beta + 0.001280 \operatorname{sen} \beta + 0.000719 \cos 2\beta - 0.000077 \sin 2\beta \right). \quad (2)$$

0-3

$$\beta = (n - 1) \frac{360}{365} \quad (3)$$

0-4

$$G_{sc} = 1367 \frac{w}{m^2} \quad (4)$$

La masa de aire (m) es la razón o índice de la masa de aire de la atmósfera a través de la cual pasa la radiación directa respecto a la masa de aire de la atmósfera como si la radiación pasara cuando el sol está en el zenit.

M=1 – cuando el sol está en el ZENIT

M=2 – cuando  $\theta_Z=60^\circ$

M= $\frac{1}{\cos \theta_Z}$  – cuando  $\theta_Z=0-70^\circ$

La declinación ( $\delta$ )– es la posición angular del Sol cuando esta al mediodía (sobre el meridiano local) respecto al plano del ecuador.

0-5

$$\delta = 23.45 \left[ 2\pi \left( \frac{284+n}{365} \right) \right] \quad (5)$$

El ángulo horario ( $\omega$ ) es el desplazamiento angular del Sol de este a oeste en el meridiano local, debido a la rotación de la Tierra respecto a su eje y de  $15^\circ$  por cada hora. Por la mañana se considera negativo ( $-15^\circ$ ) o y por la tarde positivo ( $+15^\circ$ ).

0-6

$$\omega = (h - 12.00)15^\circ$$

El ángulo zenital ( $\theta_z$ ) es el ángulo que se forma entre el rayo solar y una línea vertical normal a una superficie que define el zenit de la superficie.

0-7

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (6)$$

El ángulo azimutal solar ( $\gamma_s$ ) es el desplazamiento angular desde el sur de la proyección de un rayo directo solar en el plano horizontal. El desplazamiento desde el este hasta el sur se considera negativo, y del sur al oeste positivo.

0-8

$$\gamma_s = \text{Sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left( \frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right| \quad (7)$$

El ángulo de incidencia ( $\theta$ ) es el ángulo que se forma entre la radiación directa sobre una superficie y la línea normal a dicha superficie

0-9

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (8)$$

Para un plano que rota continuamente en los dos ejes y sigue la radiación solar se debe lograr que

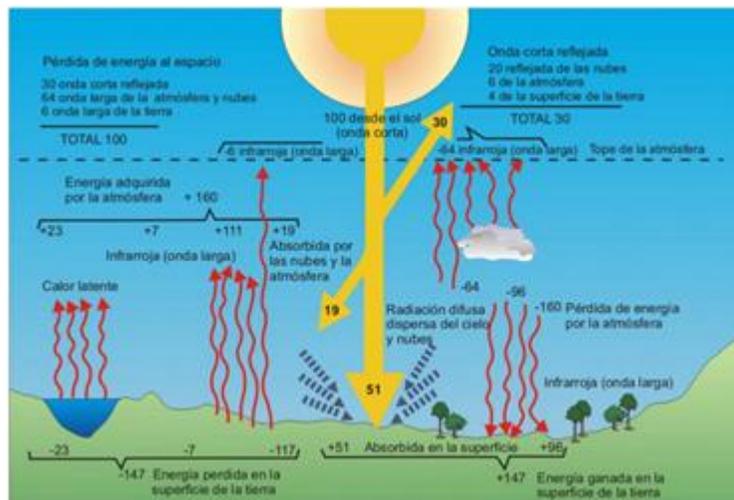
$$\beta = \theta_z$$

$$\gamma = \gamma_s$$

$$\cos(\theta) = 1$$

Es decir, el ángulo de inclinación  $\beta$  debe ser igual al ángulo zenital, el ángulo azimutal igual al ángulo azimutal solar y que el coseno del ángulo de incidencia solar sobre el plano sea igual a la unidad.

**Figura 7.** Esquema de distribución de la radiación en el sistema tierra-atmósfera



Nota: Inzunza, 2008.

Según Inzunza (2003), la energía solar es un tipo de energía renovable obtenida a través de la radiación electromagnética del sol, formada por conjunto de longitudes de onda. Su velocidad de propagación es de  $3 \cdot 10^8 m \cdot s^{-1}$ . Dicha energía se puede obtener de dos maneras

1. Energía solar fotovoltaica (a través de la luz)
2. Energía solar térmica (a través de la temperatura)

### ***1.2.1 La energía solar fotovoltaica***

Consiste primordialmente en obtener directamente electricidad partir de la radiación solar. Gracias a que captan la energía solar en células solares fotovoltaicas placas o paneles solares que forman la luz y calor del sol en electricidad.

### ***1.2.1 Energía solar térmica***

Aprovecha la energía del sol para producir calor, que posteriormente, es utilizada tanto en uso doméstico como uso industrial. transformando en la energía mecánica para así poder producir electricidad.

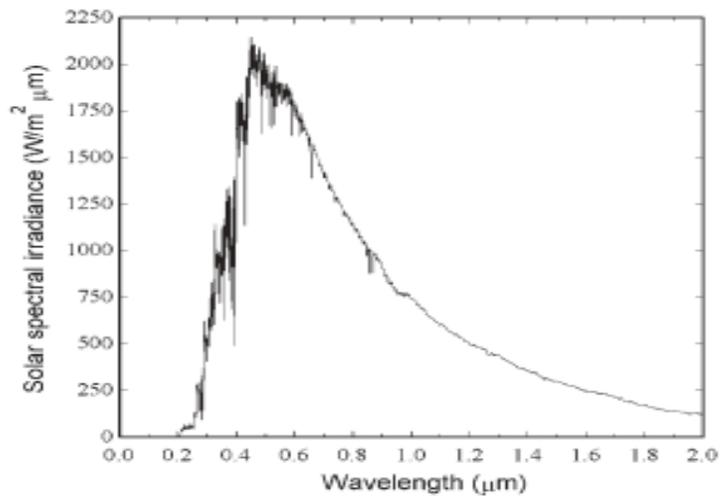
La energía solar térmica a nivel doméstico se trata de una instalación solar térmica de baja temperatura que principalmente consiste en unos captadores o colectores solares instalados en los tejados de las viviendas, que su función principal de dichos concentradores es capturar la radiación solar y la convertirla en calor, para posteriormente pasan por un circuito de tubos metálicos los cuales general suficiente energía para el uso habitual doméstico como por ejemplo: calefacción o agua caliente.

Por otro lado, también se puede aprovechar la energía térmica a gran escala, como por ejemplo plantas termo solares o centrales térmicas solares, ya se estima grandes terrenos de colectores solares y se habla de energía solar de alta temperatura. Dichas instalaciones operan a una temperatura superior a los  $500^{\circ}\text{C}$  transformando energía térmica en energía eléctrica. Fuera de eso también dichas plantas poseen un mecanismo para poder almacenar calor para posteriormente transformarla en electricidad a medida que se requiera, para así poder regular la producción.

Como se puede apreciar la radiación solar sufre drásticas modificaciones desde el sol hasta la superficie terrestre. Como consecuencia del efecto de filtro que ejerce la atmosfera. La mayor parte de la radiación es absorbida por la capa de ozono en la parte más alta de la atmosfera, mientras que la parte visible de onda corta es dispersada por moléculas de aire, dándole así el color azul característico. La energía solar absorbida por la atmosfera puede variar en función de las condiciones medioambientales como, por ejemplo: vapor de agua, contaminación, o el contenido de los aerosoles de la atmosfera. Pero la gran mayoría de la absorción solar se debe a la concentración de nubes.

Los desplazamientos del sol al este del sur son negativos y al oeste del sur son positivos. Según Duffie & Beckman (2013), el centro mundial de radiación (WRC) el promedio de energía solar, llamada constante solar posee un valor de  $1367 \text{ W/m}^2$  con una incertidumbre del orden del 1%, de irradiación sobre la superficie terrestre. Como se ilustra en el siguiente gráfico.

**Figura 8.** *Curva de irradiación espectral estándar del WRC a distancia media del sol*



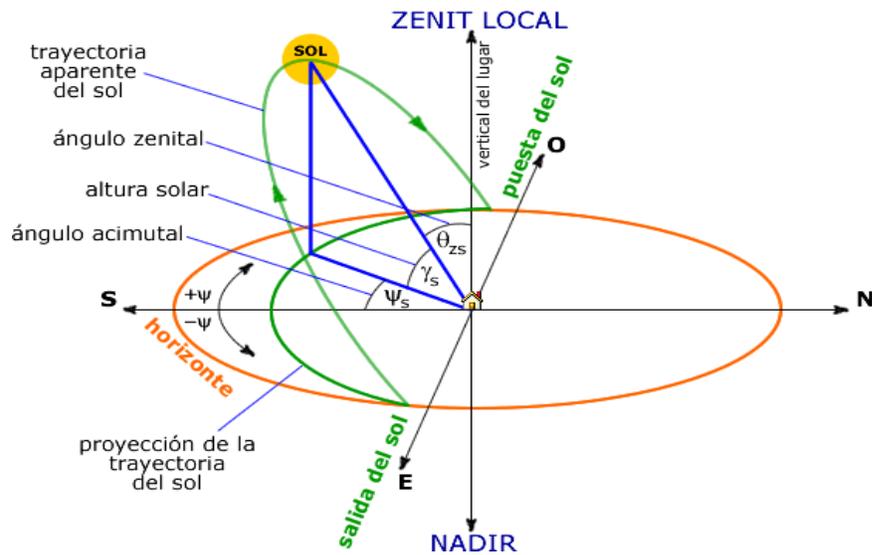
Nota: Porción del Espectro solar (extraterrestre) de Referencia para incidencia normal ASTM (American Society for Testing and Materials; datos NASA) E-490 . se muestran longitudes de onda hasta 3000  $\mu\text{m}$ . Irradiación Espectral. Energía promedio  $G_{sc, \lambda}$  (en  $\text{w/m}^2 \mu\text{m}$ ). Duffie & Beckman, 2013.

Se debe tener en claro uno algunos conceptos que ayudara a entender en comportamiento del sol en el cielo, los cuales se describen a continuación:

Para Duffie & Beckman (2013), los ángulos son los siguientes:

- $\theta_z = \text{angulo cenital}$  el ángulo entre la vertical y la línea del sol, el ángulo de incidencia de la radiación del haz sobre una superficie horizontal. Como lo ilustra la figura 9.

**Figura 9.** Posicionamiento solar y sus respectivos ángulos

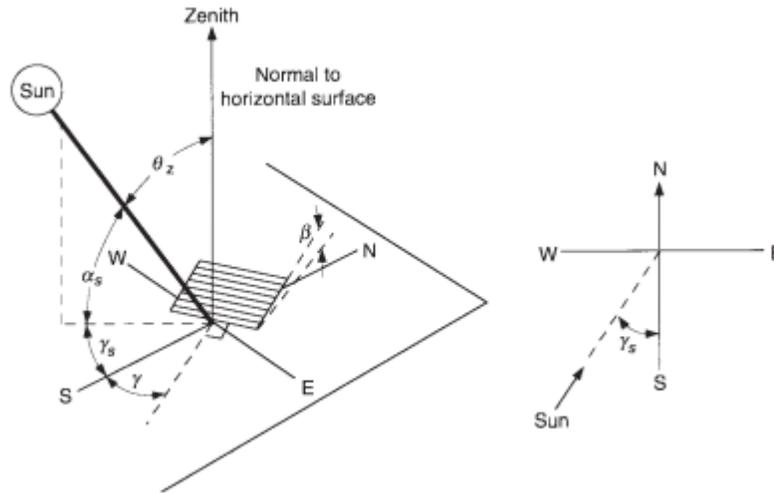


Nota: Ángulos para describir el movimiento aparente del Sol. En el ejemplo  $\gamma_s < 0$ . Los ángulos  $\gamma$  y  $\beta$  describen la orientación de la superficie y se utilizan más adelante. Reproducida de la Ref. Certificación Energética, 2015.

- $\alpha_s = \text{Ángulo de altitud solar}$ . Es el ángulo entre la horizontal y la línea al sol lo que quiere decir este ángulo hace referencia al comportamiento del ángulo cenital.
- $\gamma_s = \text{ángulo azimutal solar}$ . Es el desplazamiento desde el sur de la proyección del haz radiación en el plano horizontal.

•

**Figura 10.** Comportamiento del sol y los diferentes ángulos



Nota: Se puede evidenciar los diferentes ángulos (ángulo cenital, pendiente, ángulo azimutal de superficie y ángulo azimutal solar) para una inclinación sobre una superficie. Reproducida Duffie & Beckman, 2013.

Por otro lado, el tiempo solar se basa en el movimiento angular, el tiempo solar es el tiempo utilizado en todas las relaciones de los ángulos del sol. El factor de 4 minutos proviene del hecho que la tierra gira  $1^\circ$  cada 4 minutos, al tener en cuenta ese tiempo que tarda el sol en llegar a la superficie para poder hacer cuenta los cálculos del tiempo solar. Y se calcula de la siguiente manera:

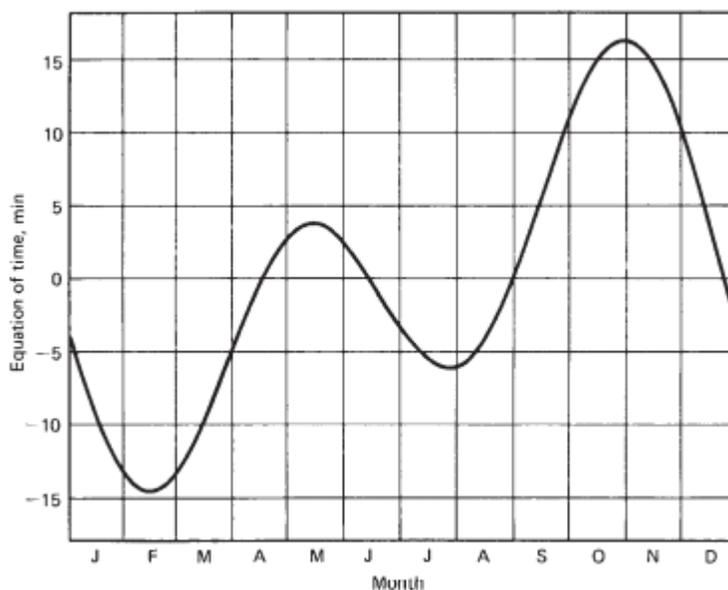
0-10

$$\text{tiempo solar} - \text{tiempo estandar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

Donde:

- $L_{st}$ : es el meridiano estándar para la zona horaria local.
- $L_{loc}$ : es la longitud de ubicación y las longitudes están dadas en grados oeste  $0^\circ < L < 360^\circ$
- $E$ : es un parámetro de tiempo (minutos) de la siguiente figura 5

**Figura 11.** *Parámetro E según los meses del año*



Nota: Ecuación del tiempo, en minutos, en función del ordinal-día, cálculos a partir de ecuación Tiempo Estándar. Reproducida Duffie & Beckman, 2013.

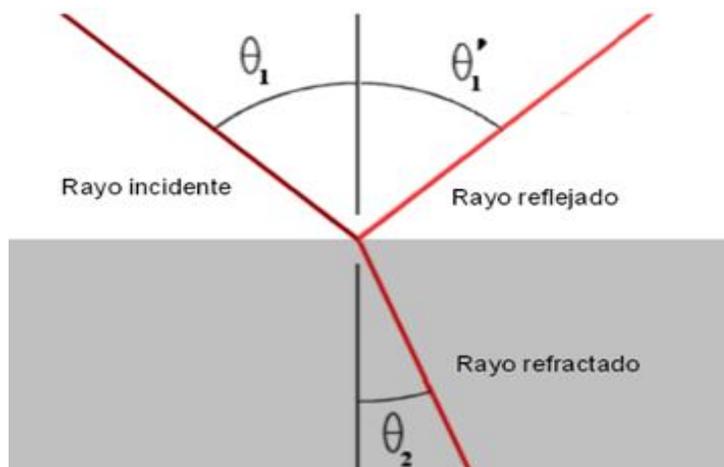
### 1.3 Refracción y reflexión

Para poder entender cuál es el funcionamiento de un concentrador solar primero que todo se debe conocer como es el comportamiento de la radiación solar electromagnética en la superficie terrestre y para ello se debe recurrir a los argumentos expuestos por Amarauma (2017), a dos principios fundamentales de la física de la luz, los cuales son:

1. Refracción de la luz
2. Reflexión de la luz.

La reflexión y refracción son dos fenómenos físicos que experimenta un rayo de luz. Estos fenómenos tienen lugar cuando la luz, que por lo general viaja en línea recta, choca en su trayecto contra una superficie o medio diferente a la cual se propaga. En la reflexión el rayo rebota sobre una superficie, mientras que en la refracción el rayo pasa de un medio a otro cambiando su ángulo de propagación. Para entenderlo más claramente se puede apreciar en la figura 12

**Figura 12.** *Reflexión de la luz*

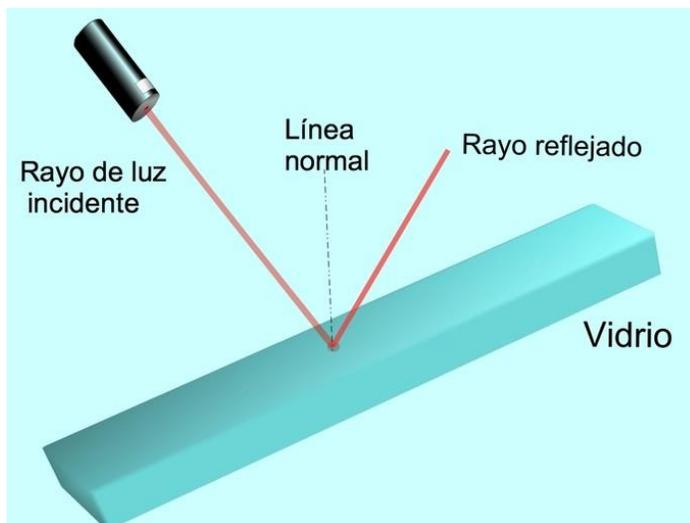


Nota: Se observar cómo los rayos de luz incidente, que se encuentran en la parte superior izquierda, llegan a la superficie del agua, donde forman dos ángulos de refracción, el primero se produce por los rayos reflejados, que es menor al que generan los rayos incidentes, y se representa en el lado superior derecho de la imagen. El segundo ángulo se forma por los rayos incidentes que atraviesan el agua, pero es menor a los ángulos que se describieron, sucede porque el rayo de luz pasa de ir entre las partículas dispersas del aire a ir entre la mayor cantidad de partículas del agua, lo que cambia la dirección y velocidad de los rayos y forma el fenómeno de la refracción de la luz. Adaptada Educapedia.org, 2020.

### **1.3.1** *Reflexión de la luz*

Es un fenómeno que ocurre cuando un haz de luz choca o entra en contacto contra otro objeto que es impenetrable por la luz. Este haz rebota contra el objeto dependiendo su naturaleza y propiedades físicas. Cabe resaltar que si la superficie con la que la luz rebota es una superficie liza cumple con las “leyes de reflexión”. Dicho fenómeno físico se ilustra en la figura 7.

**Figura 13.** *Comportamiento del haz de luz (reflexión)*



Nota: Es un fenómeno que ocurre cuando la luz llega a un medio de mayor densidad. Si el objeto no absorbe la luz o parte de ella, la luz rebotará y cambiará de dirección. Reproducida Toda Materia, 2020.

Para entender la reflexión de la luz se deben tener en cuenta tres elementos:

1. Rayo incidente (i): es el rayo que llega a la superficie reflectante.
2. Rayo reflejado (r): es el rayo que rebota de la superficie de reflexión.
3. Línea normal (n): es la línea imaginaria perpendicular a la superficie que se traza a partir del punto donde el rayo incidente y reflejado se encuentran.

Gracias a la reflexión de la luz se puede percibir formas y colores ya que el reflejo de la luz en las superficies da lugar a la iluminación de los espacios.

### ***1.3.2 Leyes de reflexión***

Para explicar cómo es el funcionamiento de la reflexión de la luz, existen dos leyes:

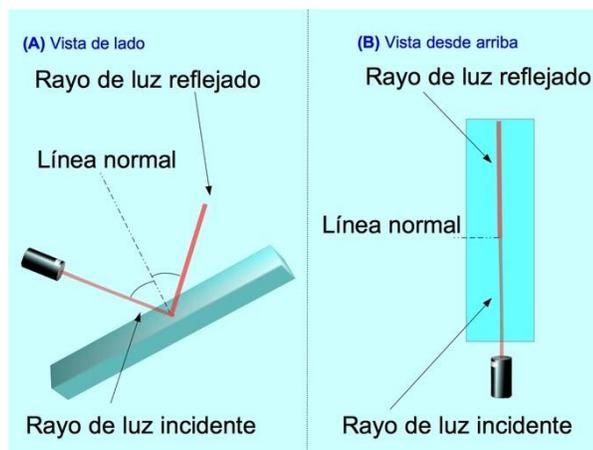
#### ***Primera ley***

Los rayos incidentes y reflejados, como la normal están en el mismo plano. Lo que se apreciaría un solo rayo, el rayo reflejado y el incidente formarían una línea recta. Como se evidencia en la figura 13.

### Segunda ley

El rayo que incide llega con un ángulo y se refleja con el mismo ángulo. figura 14.

**Figura 14.** Leyes de reflexión de la luz



Nota: (A) Vista lateral de la reflexión de un rayo sobre un vidrio, mostrando los ángulos de incidencia y reflexión; (B) Vista desde arriba de los rayos incidente y reflejado mostrando la continuidad de la línea. Reproducida, Segunda ley, Toda Materia, 2020.

Lo cual se concluye que;

0-11

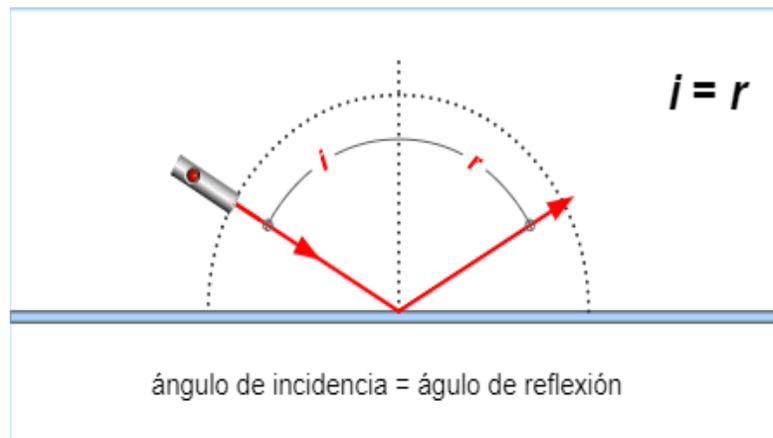
$$i = r$$

Donde:

$i$  = ángulo de incidencia

$r$  = ángulo de reflexión.

**Figura 15.** *Reflexión de la luz*



Nota: Es el cambio de dirección, en el mismo medio, que experimenta un rayo luminoso al incidir oblicuamente sobre una superficie, Reproducida, Reflexión de luz. E+educaplus.org, 2016.

### ***Refracción de la luz***

Es un fenómeno físico que ocurre cuando la luz atraviesa un medio diferente al que procede. Por ejemplo, el medio de propagación del rayo es aire y entra en contacto con el agua se produce el fenómeno de refracción. En otras palabras, ocurre cuando la luz pasa de un medio a otro. Dicho fenómeno se aprecia en el típico ejemplo de colocar un lápiz dentro de un vaso lleno de agua figura 16. El rayo de luz desvía al pasar a un medio diferente del que procede.

**Figura 16.** *Ejemplo refracción de la luz*



Nota: La luz se propaga en línea recta pero su velocidad no siempre es igual, depende del medio o sustancia por la que se propague. Reproducida. índice de refracción [educaconbigbang.com](http://educaconbigbang.com), 2017.

La refracción de la luz figura 17 se presenta en la superficie de separación de dos medios de diferente densidad como, por ejemplo: aire-agua, aire-vidrio. Lo que afecta la velocidad de propagación de la luz. Cada medio tiene un índice de refracción ( $n$ ) que es la relación entre la velocidad de propagación de luz en el vacío ( $c$ ) y la velocidad de propagación de la luz en ese medio ( $v$ ):

0-12

$$n = c/v$$

Donde:

$n$ = índice de refracción

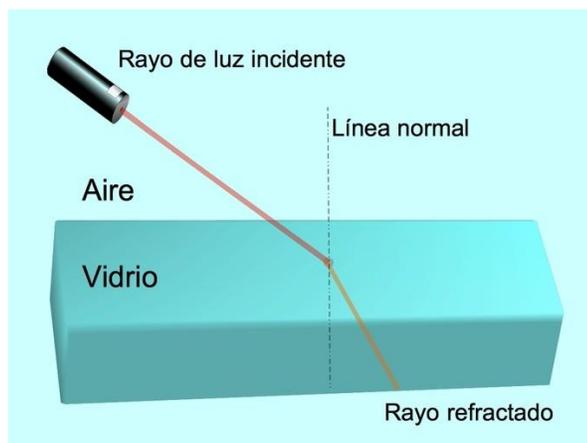
$c$ = velocidad de la luz en el vacío

$v$ = velocidad de la luz en el medio.

En refracción de la luz, se debe tener en cuenta los siguientes elementos:

1. Rayo incidente: es el rayo que llega a la interface entre dos medios
2. Rayo reflectado: es el rayo que sale desviado de la interface
3. Línea normal: es la línea imaginaria perpendicular a la superficie que se traza a partir del punto donde los rayos incidente y refractado se encuentran.

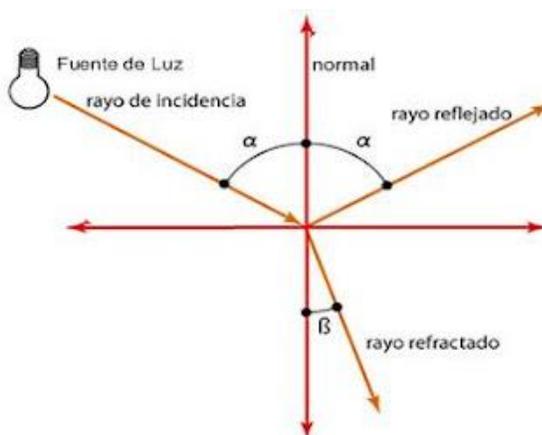
**Figura 17.** *Refracción de la luz*



Nota: La refracción de la luz explica por qué lápiz (línea recta) se ve doblado o partido al introducirla en un vaso con agua u otro líquido. Refracción de la luz. Toda Materia, 2020.

La refracción de la luz figura 18 puede ocurrir en simultaneo con la reflexión. Por ejemplo, si la luz incide en una cara de bloque de vidrio, la luz se refleja y se refracta en la frontera vidrio-aire. Como se aprecia en la figura.

**Figura 18.** *Refracción de la luz*



Nota: la refracción se produce cuando la luz pasa de un medio a otro, y en los cuales se propaga con velocidades distintas. Reproducida, Refracción de la luz, FISICUS, 2016.

### 1.3.3 Leyes de refracción de la luz

Al igual que la reflexión, la refracción se puede explicar mediante dos leyes las cuales las propuso el físico-matemático Christian Huygens:

1. Primera ley: el rayo incidente, el rayo refractado y la línea normal perpendicular al punto de incidencia están sobre el mismo plano.

2. Segunda ley: el rayo de luz que llega a la superficie de separación de los dos medios con un cierto ángulo, pero el rayo refractado sale con una inclinación que depende del índice de refracción del medio. Esta ley también se conoce como la “ley de Snell” y se describe con la siguiente fórmula.

0-13

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}$$

Donde:

$n_1$  = índice de refracción del medio del rayo incidente.

$\alpha_1$  = ángulo de incidencia

$n_2$  = índice de refracción del medio del rayo refractado

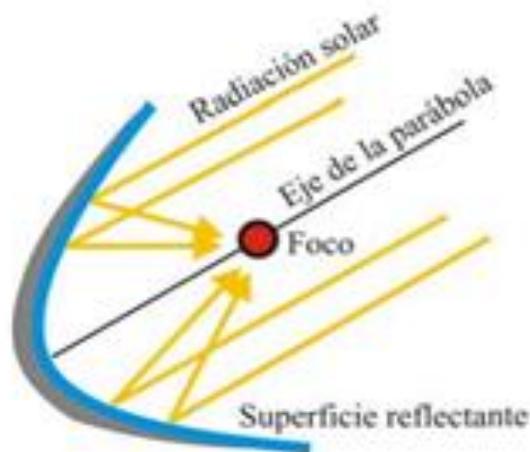
$\alpha_2$  = ángulo de refracción.

Cuando la luz incide perpendicularmente (ángulo de incidencia igual a 0) no hay desvío de la luz, es decir, el rayo incidente sigue su trayectoria lineal.

## 1.4 Concentradores de energía solar

Como definición “Los concentradores solares son dispositivos que incrementan la densidad de radiación solar en superficies concretas, intentando encontrar mejorar la eficiencia de conversión de calor en el trabajo.” Como su nombre lo dice, se ocupa de concentrar la energía en un solo punto. El desempeño es enfocar la luz en un lugar en concreto, pudiendo en ese sentido incrementar los niveles de la temperatura. **Figura 19.**

**Figura 19.** *Análisis de colectores solares de media temperatura*

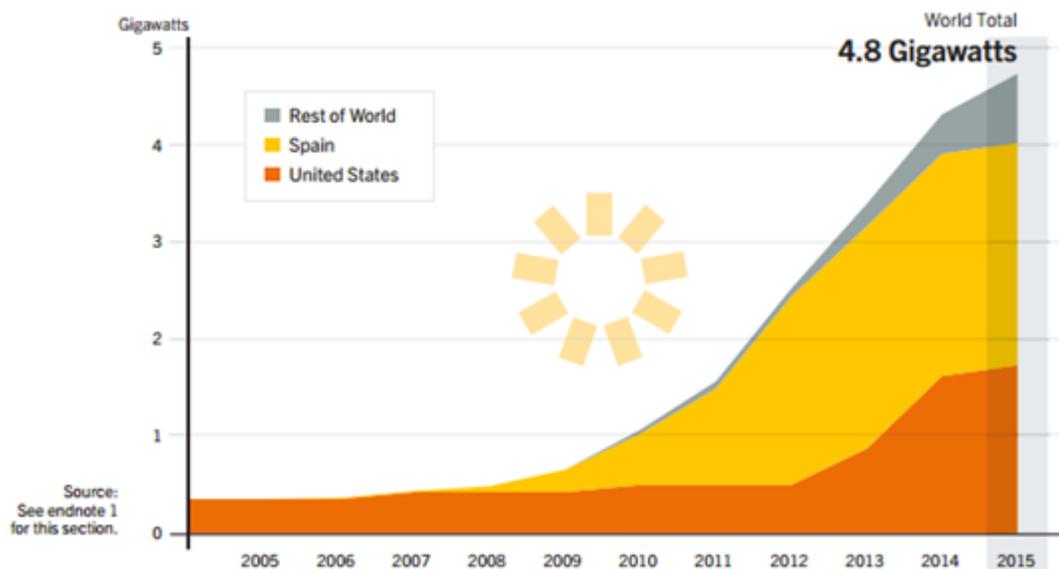


Nota: colector solar tipo canal parabólico incidencia superficie reflectante dirigiendo los rayos al receptor focal. Reproducida. Colector solar Sastre A España, 2016.

La energía solar sin duda alguna es una de las fuentes renovables que cada vez está tomando mayor fuerza como lo afirma “ la energía solar termoeléctrica podría suministrar el 6% de la demanda de electricidad global para 2030 y alcanzar el 12% en 2050” (Greenpeace, 2016), se debe tener claro que la humanidad está tomando cada vez más conciencia sobre el impacto medioambiental que deja el uso de los recursos fósiles, por tal motivo las energías limpias están tomando un papel fundamental en la generación de energía eléctrica.

La energía solar térmica permite el mayor equilibrio medioambiental y a bajo costo. Dicho tipo de energía no genera gases de efecto invernadero y es aprovechable en casi todas las partes del mundo, con fuerte radiación solar como por ejemplo Europa, norte de África, el Medio Oriente, Estados Unidos y Colombia. Según el informe de Greenpeace la capacidad instalada en todo el mundo de energía solar térmica era solo de 0.5 GW ahora es de casi 5.5 GW como lo ilustra la **figura 20**.

**Figura 20.** Capacidad global de concentración de energía solar térmica, por país y región 2008-2018



Nota: capacidad instalada en todo el mundo de energía solar térmica. Reproducida Telenoticias, 2019.

#### 1.4.1 Antecedentes históricos

En los hallazgos de Arquímedes, él usó diversos espejos para conformar un enorme y cóncavo, incendiando de esta forma las naves romanas de la misma manera como una lupa puede producir fuego. Obviamente que, además hay más historias donde el concentrador demostró su potencial en el pasado:

En 1690, en Dresde, Alemania, E. W. Von Tschirnhausen construyó un horno solar con un espejo cóncavo parabólico de 1.6 m de diámetro para cocer el barro usado en la producción de objetos de cerámica. En 1774, el científico inglés Joseph Priestley halló el oxígeno (aunque no le otorgó aquel nombre), concentrando los relámpagos solares sobre lo cual denominaba cal de mercurio (hoy óxido de mercurio). El primer diseño de un colector plano para aprovechar el calor solar ha sido concebido en la segunda mitad del siglo XVII, por el naturalista suizo Horace de Saussure.

El concentrador solar ha tenido además aplicaciones a partir de tiempo atrás como un horno solar, ya fuese usado para cocción de los alimentos, para fundición de metales o modelado del barro.

#### ***1.4.2 Energía termo solar***

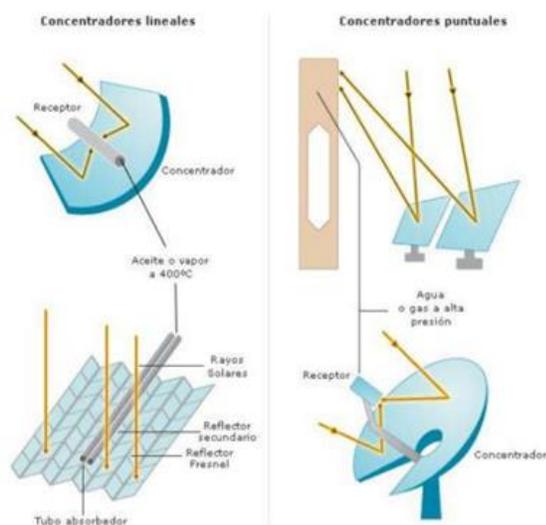
La radiación solar que es recibida por la Tierra podría ser aprovechada por medio de su calor, no importa si es de tipo difusa o directa, o bien la suma de las dos. Generalmente, la tecnología termo solar o solar termoeléctrica, está basada en el término de la concentración de la radiación solar para crear vapor o aire caliente, que puede más adelante ser utilizado para accionar plantas eléctricas convencionales. Se necesita concentrar la radiación solar para que se logren conseguir temperaturas altas, de 300 °C hasta 1000 °C, y obtener de esta forma un rendimiento aceptable en el periodo termodinámico, que no se podría obtener con temperaturas más bajas. La captación y la concentración de los relámpagos solares se realizan mediante espejos que se mueven automáticamente, de forma que constantemente siguen al Sol para absorber su energía. A el área reflectante y al dispositivo que le orienta, se les nombra helióstatos.

Existen también dos tipos de concentración **figura 15** en cuanto a lo que es la captación de la energía solar:

La concentración puntual y lineal puede aprovechar únicamente la radiación directa, y no la difusa, ya que esta última no podría ser concentrada. La concentración lineal es más simple de instalar al tener menos grados de independencia, empero tiene un componente de concentración menor; por consiguiente, puede conseguir menores temperaturas que la tecnología de concentración puntual.

Como sus nombres lo mencionan, la concentración puntual es aquella que combina los relámpagos solares en un solo punto; mientras que la de tipo lineal, a diferencia de la primera, centra la energía en un solo haz o línea.

**Figura 21.** *Concentración lineal y puntual*



Nota. Tipos de concentrador solar, Izquierda Concentración lineal: Canal parabólico y Espejo reflectante Fresnel. Derecha Concentración Puntual: Sistema de torre receptor central y Disco Stirling. Reproducida. [afinidadelctrica.com.ar](http://afinidadelctrica.com.ar). 2021

### 1.4.3 Tipos de concentradores solares

Dependiendo de la óptica utilizada para la concentración, se han desarrollado tres tecnologías para la producción de energía eléctrica, las cuales se describirán a continuación.

#### 1.4.4 Canal parabólico

Usa un reflector de canal cilíndrico parabólico, el cual refleja la luz solar en el foco de la parábola, que es un tubo con área selectiva para absorber la más grande proporción de radiación incidente y una cubierta de vidrio, para evadir las pérdidas de calor al ambiente por convección.

Esta clase de tecnología no únicamente es limpia, sino que cuenta con un historial que muestra que está preparada para ser realizada a gran escala. Su desempeño se fundamenta en el seguimiento solar. Los elementos que la unen son los siguientes. “El reflector cilindro parabólico: La tarea del receptor es reflejar y concentrar sobre el tubo absorbente la radiación

solar directa que incide sobre el área. El área especular se consigue por medio de cintas de plata o aluminio depositadas sobre un soporte que le da la suficiente rigidez. Actualmente, los medios de soporte más usados son la chapa metálica, el vidrio y el plástico. El tubo absorbedor: Consta de 2 tubos concéntricos separados por una capa de vacío. El interior, por el cual circula el fluido que se calienta, es metálico, y el exterior, de cristal. El sistema de seguimiento del sol: El más común, se apoya en un dispositivo que gira los reflectores cilindro parabólicos del colector cerca de un eje. Figura 21.

### ***Clasificación de las tecnologías Concentrador solar tipo parabólico según tamaño***

Una vez que se habla de los tipos de concentradores solares parabólicos comúnmente se refiere a la temperatura de operación. No obstante, tomando como criterio de categorización la medida del colector, o sea, el sector de abertura disponible de un módulo de captador, hay 2 categorías primordiales: pequeña escala y gran escala. En captadores solares lineales, o sea, cada una de esas tecnologías de media concentración, es más a gusto tomar en la práctica la distancia (D) de abertura como criterio de división.

Pequeña escala, micro generación o *micro-CSP*:

- En captadores tipo CCP:  $D < 1,5 - 2$  m
- En captadores lineales tipo Fresnel:  $D < 2-3$  m

Escala media

- En captadores tipo CCP:  $1,5 - 2$  m  $< D < 4$  m
- En captadores lineales tipo Fresnel:  $4-5$  m  $< D < 7$  m

Gran escala

- En captadores tipo CCP:  $D > 4$  m
- En captadores lineales tipo Fresnel:  $D > 7$  m

Por otro lado, la escala se refiere además a la capacidad instalada habitual, atendiendo a la viabilidad económica de la instalación. De esta forma, los módulos de diminuto tamaño se utilizan a potencias instaladas de entre 100 kilovatios y 1 MW comúnmente y, aun cuando no es nada común, inclusive en proyectos de 5-10 MW. A medida que tanto, se estima a gran escala habilidades instaladas mejores a 1 MW. Por causas económicas, los tamaños casi continuamente permanecen por arriba de los 10 MW.

Se espera que, en el futuro, a medio-largo plazo, se logre pensar en instalaciones viables de 200 MW, según desarrollo la curva de aprendizaje de la tecnología Concentrador solar parabólico y la reducción potencial de los costes asociados a la misma. Mucho deberá ver en ello puntos como el desarrollo de novedosas técnicas, u optimización de las ya existentes, como nuevos recubrimientos selectivos que disminuyan la emisividad a temperaturas de operación altas.

El último tipo de concentrador es dependiente en gran medida de los helióstatos, pues son ellos los que le brindarán la energía perteneciente del Sol. Su manejo está basado en una torre; en esa tecnología se puede integrar el almacenamiento de la energía.

#### ***1.4.5 Disco parabólico***

Como su nombre lo sugiere, se apoya en un área reflectora a modo de disco y la cual, enfocada en dirección habitual a los relámpagos solares, los refleja en un área bastante pequeña llamada foco. Ahí se sitúa el receptor, que para aplicaciones de producción de electricidad se instala un motor térmico Stirling. Éste transfiere su energía mecánica a un generador eléctrico acoplado al mismo grupo. Los primordiales elementos de un Sistema disco Stirling son el concentrador parabólico, el motor Stirling y el sistema de seguimiento solar. Figura 21.

#### ***1.4.6 Torre central***

Parte del criterio de mandar una gigantesca proporción de energía a un receptor central fijo. Para poder hacer esto se usan helióstatos, los cuales son dispositivos mecánicos que aguantan espejos y que siguen el desplazamiento solar para reflejar los relámpagos recibidos a un objetivo fijo, el cual principalmente está a una elevación definida sobre una torre; de allí su nombre de torre central. Figura 21

### ***1.4.7 Componentes o elementos principales de un concentrador solar parabólico (CCP)***

Los colectores de canal parabólico están compuestos de los siguientes elementos:

- Reflector cilindro parabólico o superficie reflectora
- Absorbedor o tubo receptor
- Estructura metálica de soporte

#### ***El reflector cilindro parabólico o superficie reflectora***

El reflector es un espejo curvado en una de sus dimensiones con forma de parábola, que concentra sobre su línea focal toda la radiación solar que atraviesa su plano. **Figura 22** La superficie especular se consigue a base de películas de plata o aluminio sobrepuestas en un soporte que le da rigidez. Entre los materiales empleados se encuentran plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas como acero inoxidable, o el más usado: vidrio. Los materiales reflectores solares, deben tener alta reflectividad, larga durabilidad, resistencia mecánica y bajo costo. Nostell et al., 1998 y Syed Mohd et al., 2015 explicaron que el acero inoxidable es un material que puede usarse como material reflector solar, por ser resistente al envejecimiento y mecánicamente más fuerte que la plata y el aluminio. Sin embargo, por tener un costo elevado se utiliza más el aluminio anodizado.

**Figura 22.** *Superficie reflectora*



Nota: Colectores Cilindro parabólicos colectores solares, Energía solar renovable. Reproducida. Marketin Made-in-China, 2018.

***El absorbedor o tubo receptor***

El absorbedor es otro de los elementos que componen un concentrador solar parabólico y en el que recae el rendimiento universal del colector. Puede constar de uno o de 2 tubos concéntricos.

Para describir estos tubos concéntricos, el tubo interior es de material metálico y el tubo exterior de cristal. El tubo metálico lleva un recubrimiento selectivo que tiene una alta absorción (mayor al 90%) y una baja emisividad. El tubo de cristal frecuenta llevar, además, un procedimiento anti flexivo en sus 2 caras para incrementar su transmisividad a la radiación solar y, por lo tanto, el rendimiento óptico del colector. La (Figura 23) Presenta el tubo receptor que es utilizado en los concentradores cana parabólicos comerciales.

**Figura 23.** *Tubo receptor*



Nota: Tubo receptor absorbedor para los colectores canal y cilindro parabólicos. Tubo receptor. Reproducida inTEC MOLDES Y MATICES, s.f.

### ***La estructura o soporte metálico***

El soporte metálico es el que ofrece rigidez al grupo de recursos que lo conforman. Además de ejercer como interfaz entre los reflectores y las cimentaciones de hormigón que la aguantan. Estas construcciones son comúnmente metálicas.

#### ***1.4.8 Ventajas sistemas de concentración solar***

Como principal ventaja se parte que su fuente es el sol del cual se puede decir que la radiación solar que este emite a la tierra es siete mil veces la cantidad de energía que se consume.

Este tipo de energía está disponible en la mayoría de los países, los cuales cuentan con un buen nivel de radiación solar gracias a su ubicación geográfica cerca al cinturón solar terrestre.

Este sistema hace parte de las energías renovables que han estado en busca de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>, gases invernadero y producción de energía limpia.

Una de sus características en la que más se ha trabajado es en el almacenaje de energía que con el paso de los años se ha optimizado, buscando encontrar el proceso con el cual se logre

almacenar la energía de tal manera esta se pueda generar y usar en los momentos de mayor demanda (Zarza y Fernández Reche, 2017).

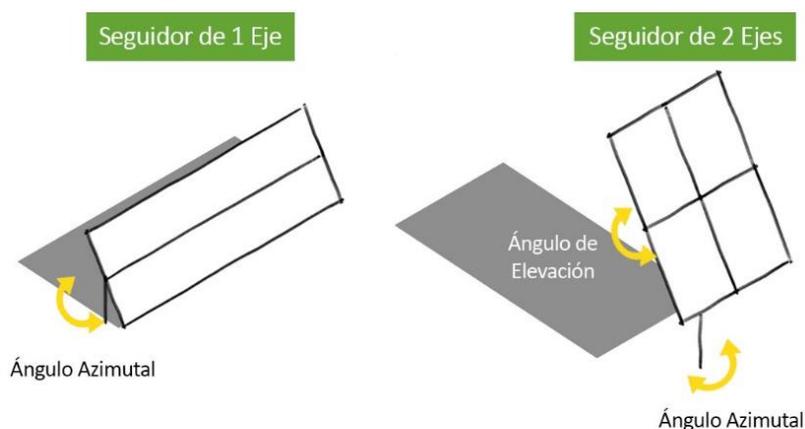
### 1.5 Seguidores solares

“Es un dispositivo mecánico capaz de orientar los paneles solares de forma que estos permanezcan aproximadamente perpendiculares a los rayos solares, siguiendo al sol desde el este en la alborada hasta el oeste en la puesta de sol” (Proyecto Wikimedia, 2019).

Cuando se habla de seguidores solares sin duda alguna se debe pensar en sistemas termo solares y fotovoltaicos autónomos, lo que quiere decir que sus sistemas que aprovechan al máximo la producción de electricidad según lo afirma (Sotysolar, 2020) es un sistema autónomo acoplado a una estructura móvil que se une a una placa solar con el suelo. Cuya función es maximizar la producción de electricidad de una instalación solar fotovoltaica, ya optimiza el ángulo con la que el área reflectante están en exposición directa al sol. Comúnmente se implementa dicho sistema en instalaciones solares de gran infraestructura.

También se afirma que cuanto más perpendicular sea el ángulo más energía puede producir el panel solar. Los seguidores solares orientan los paneles fotovoltaicos de manera que su superficie forme  $90^\circ$  con los rayos solares. Dentro de los seguidores solares se encuentran 2 tipos de seguidores solares como lo podemos ver en la **figura 24**.

**Figura 24.** *Los seguidores solares*



Nota: Seguidor de 1 eje: trabaja con Angulo azimutal. Seguidor de 2 ejes trabaja con ángulo de elevación y azimutal. Los Seguidores solares. Referida Valldoreix Greenpower, 2015.

Existen 2 tipos de seguidores de 1 eje y 2 ejes

El primer tipo de seguidor solar de 1 eje, normalmente posee solo un tipo de movimiento en una sola dirección que por lo general es alineado norte-sur. Por lo que se intuye que el panel solo podrá moverse de este a oeste, siguiendo la trayectoria del sol desde salida de sol hasta la puesta del mismo. Por ser un sistema de un solo movimiento se ve muy limitado en cuanto al seguimiento del sol, es poco preciso, y solo se puede captar los rayos solares en un solo sentido.

Seguidor solar de 2 ejes dicho sistema de seguidor podrá moverse en 2 direcciones, alineado de norte-sur y este-oeste. Dicho sistema a diferencia a el de un solo eje dicho sistema está diseñado para maximizar la producción de energía durante todo el día y todo el año. Dicho sistema se puede variar la posición según la trayectoria del sol, se puede variar la orientación según la estación, se cuenta con un seguidor más preciso, con mayor rendimiento.

Cabe resaltar que los seguidores solares se pueden controlar de forma manual y automática.

### **1.5.1 Ventajas y desventajas de los seguidores solares**

Como lo afirma la página Sotysolar (2020) es una tecnología pesada y costosa por tal motivo no es muy recomendada para el uso residencial, pero a nivel industrial esta tecnología es cada vez más implementada. Dichas ventajas se describirán a continuación:

- *Rentabilidad.* Una instalación con seguidor solar automático puede durar hasta 30 años y liquidar entre 5 y 10 años por lo que nos dará una medida de 22 años de beneficio.
- *Eficiencia.* Según Sotysolar, (2020) una instalación de paneles solares con seguimiento en un eje puede contar con un rendimiento de entre 25 y 35%. Si este sistema cuenta con un seguimiento de dos ejes, el rendimiento podrá aumentar entre 5 y 10% adicional.
- *Localización.* Si se implementa una instalación en zonas de alta latitud donde la posición del sol podrá cambiar drásticamente entre meses de invierno y verano, para poder maximizar el aprovechamiento de la instalación se podrá implementar un sistema de

seguimiento solar de dos ejes lo cual generará un gran beneficio aumentándola eficiencia generando la suficiente potencia para la casa o propiedad.

*Desventajas de los seguidores solares.* Como toda instalación se puede encontrar grandes desventajas como son las siguientes:

- *Coste.* La principal desventaja es el aumento de costo de la instalación y mantenimiento. Un seguidor solar puede costar más que un sistema solar fijo, debido a que este sistema de seguidores solares posee más partes electrónicas complejas que un sistema fijo.

- *Mantenimiento.* Según Sotysolar (2020) los mantenimientos son directamente proporcionales a la complejidad de la instalación. Cabe resaltar que los equipos por medida general empiezan a ser rentable a partir del séptimo año.

- *Peso.* Ya que son equipos pesado no se pueden instalar en cualquier sitio como por ejemplo tejados. Si se quiere instalar paneles solares con seguimiento solar, se aconseja instalar sobre terreno.

## 2. DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR CANAL PARABÓLICO

### 2.1 Requerimientos:

Los requerimientos técnicos que busca el concentrador solar cilindro-parabólico (CCP) para el desarrollo (diseño, construcción, ensayo) son:

1. El CCP debe ser más eficaz en el aprovechamiento de la energía solar, comparado con los concentradores cilindro-parabólicos comerciales.
2. Que los costos de construcción sean menores, que los gastos que conlleva obtener un CCP comercial.
3. El diseño del CCP combinado con los reflectores de espejos planos, permita y aprovechamiento máximo de la energía solar, en todas las horas del día (mañana, tarde), así mismo obtener la mayor independencia del dispositivo.
4. El diseño permita facilitar su transporte y del mismo modo su instalación, sin necesidad de maquinaria de montaje (izaje).
5. Al realizar la comparación de beneficio-costo, el CCP combinado con reflector de espejos planos, debe ser más rentable que un CCP de tipo comercial.

### 2.2 Metodología de cálculo.

Para el caso particular que se dispone de un tubo, por el cual está confinado un fluido incompresible en este caso se usaron dos variantes Agua y aceite.

Se calcula el número de Reynolds por la ecuación 0-1

Ecuación 0-1

$$R_e = \frac{V_{prom} D}{\vartheta}$$

DONDE

VProm- Velocidad del fluido dentro del tubo del receptor, que para el estudio,  $V_{prom} = 0$

D-Diámetro del conducto  $D = 12.7 \text{ mm}$

$\vartheta$ - viscosidad cinemática del fluido que se calcula por la expresión

Ecuación 0-2

$$\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$$

$\mu$  -viscosidad absoluta

$\rho$  – densidad

Debido a que la velocidad es cero el Número de Reynolds es cero por lo cual significa que no hay flujo el fluido está estacionario dentro del conducto sin movimiento. La cantidad de energía para elevar la temperatura del fluido dentro del tubo desde la temperatura ambiente  $19 \text{ }^\circ\text{C}$  hasta  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  y considerando inicialmente que no hay pérdidas por convección y radiación se puede calcular por la expresión

Ecuación 0-3

$$Q = mC_p(\Delta T)_{\text{fluido}} + mC_p(\Delta T)_{\text{conducto}}$$

$C_p$ - Calor específico

m-masa

**Estos cálculos se realizan para los dos fluidos utilizados es decir agua y aceite**

La razón de transferencia del calor de la energía solar se considera que actúa constante en la superficie del conducto y se puede calcular por la expresión

Ecuación 0-4

$$\dot{Q} = \dot{q}A_s$$

$\dot{q}$ -irradiancia solar media registrada de 570 w/m<sup>2</sup>

AS -superficie del conducto sobre el que actúa la radiación solar

Ecuación 0-5

$$A_S = \pi D L_C$$

Lc- longitud del conducto

Si no se considera las perdidas por convención natural alrededor del tubo entonces el tiempo de calentar el fluido más el tubo se puede calcular por la expresión

Ecuación 0-6

$$\Delta t = \frac{\text{la cantidad de energía necesaria}}{\text{La razón de transferencia de la energía solar en 1 segundo}}$$

$$\Delta t = \frac{Q}{qA_S}$$

Estos cálculos se realizan para los dos fluidos utilizados es decir agua y aceite

Sin embargo si se considera que alrededor del tubo se colocó un tubo de vidrio y entre el tubo de vidrio y el tubo de cobre hay aire confinado entonces se puede calcular la temperatura en el tubo cuando se estable la operación estacionaria es decir cuando la razón de la pérdida de calor del tubo es igual a la cantidad de energía solar ganada, en este calculo se desprecia las perdidas por radiación.

Ecuación 0-7

$$\dot{Q}_{\text{tubo-vidrio}} = \dot{Q}_{\text{vidrio-aire}} = \dot{Q}_{\text{ganancia solar}} = 125 \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Se toman las propiedades del aire para una temperatura media estimada inicialmente entre la exterior que es de 19 °C y la temperatura que se quiere alcanzar que es de 80 grados por lo cual la temperatura media del aire es

Ecuación 0-8

$$T_{m(\text{aire})} = \frac{19 + 80}{2} = 49.5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Para la temperatura media del aire se buscan sus propiedades por la tabla A 15 (Termodinámica, Yunus A. Cengel 3° Edición. 2002) donde

Tabla 1. Propiedades del aire

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T$ , °C	Densidad, $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Calor específico, $c_p$ , J/kg · K	Conductividad térmica, $k$ , W/m · K	Difusividad térmica, $\alpha$ , m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>	Viscosidad dinámica, $\mu$ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, $\nu$ , m <sup>2</sup> /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermanns, IFI/Plenum, NY, ISBN 0-306067020-8.

Numero de prandtl  $Pr = 0.7228$ ; viscosidad cinemática  $\nu = 0.00001798$ ; la conductividad térmica es de  $0.02735 \text{ w/m}^{\circ}\text{K}$ , la densidad

Se inicia estimando que la temperatura del tubo de vidrio será de 80 grados y se realizan interacciones hasta llegar que su temperatura debe ser 67.23 grados para tener esa razón de transferencia.

Ecuación 0-9

$$Ra_{D_o} = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})}{\nu^2}$$

Ecuación 0-10

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

Ecuación 0-11

$$h_o = \frac{k}{D_o} Nu$$

Ecuación 0-12

$$\dot{Q}_o = h_o A_o (T_o - T_{\infty})$$

Ver los cálculos

Tabla 2. Parámetros temperatura

Ta	Ts	Tm(aire)	Pr	k (w/(mk)	densidad (kg/m3)	Viscosidad cinemática	K	$\beta$	D tubo vidrio (m)	L vidrio (m)	Area (m2)	q w/m2	Dtubo cob
19	170	94.5	0.7228	0.02735	1.092	0.00001798			0.038	1	0.11938052	125	0.0127

Tabla 3. Vidrio

T vidrio	Ra	Nu	ho	Qvidrio (w)	K	$\beta$
170	494,311.76	11.97688	8.620198	155.4	367.65	0.002719978
165	481,216.06	11.88863	8.556683	149.1	365.15	0.002738601
160	467,939.81	11.79744	8.491053	142.9	362.65	0.00275748
155	454,479.25	11.70313	8.423175	136.8	360.15	0.002776621
150	440,830.50	11.6055	8.352904	130.6	357.65	0.00279603
145	426,989.60	11.50432	8.28008	124.5	355.15	0.002815712
145.4	428,104.03	11.51255	8.286004	125.0	355.35	0.002814127

3.

Es decir que la temperatura del vidrio será 145.4 grados, para una razón de transferencia solar de 125 w/m2

La temperatura del tubo de cobre se realiza de forma similar

Se calcula la longitud característica por la expresión

Ecuación 0-13

$$L_c = (D_o - D_i)/2$$

Se comienzan los cálculos suponiendo que la superficie del tubo puede alcanzar 200 oC

Ecuación 0-14

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_i - T_o)L_c^3}{\nu^2} Pr$$

Ecuación 0-15

$$F_{\text{cil}} = \frac{[\ln(D_o/D_i)]^4}{L_c^3(D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^5}$$

Ecuación 0-16

$$k_{\text{ef}} = 0.386k \left( \frac{\text{Pr}}{0.861 + \text{Pr}} \right)^{1/4} (F_{\text{cil}} \text{Ra}_L)^{1/4}$$

Ecuación 0-17

$$\dot{Q} = \frac{2\pi k_{\text{ef}}}{\ln(D_o/D_i)} (T_i - T_o)$$

Tabla 4. Cobre

Tcobre	RaL	Fcil	Kef	Qcobre (w)	K	$\beta$
400	19,981.51	0.181075	0.092531	135.1	545.85	0.001832005
350	16,057.41	0.181075	0.087609	102.8	520.85	0.001919939
380	18,411.87	0.181075	0.090658	121.9	535.85	0.001866194
385	18,804.28	0.181075	0.091137	125.2	538.35	0.001857528
384.7	18,780.73	0.181075	0.091108	125.0	538.2	0.001858045

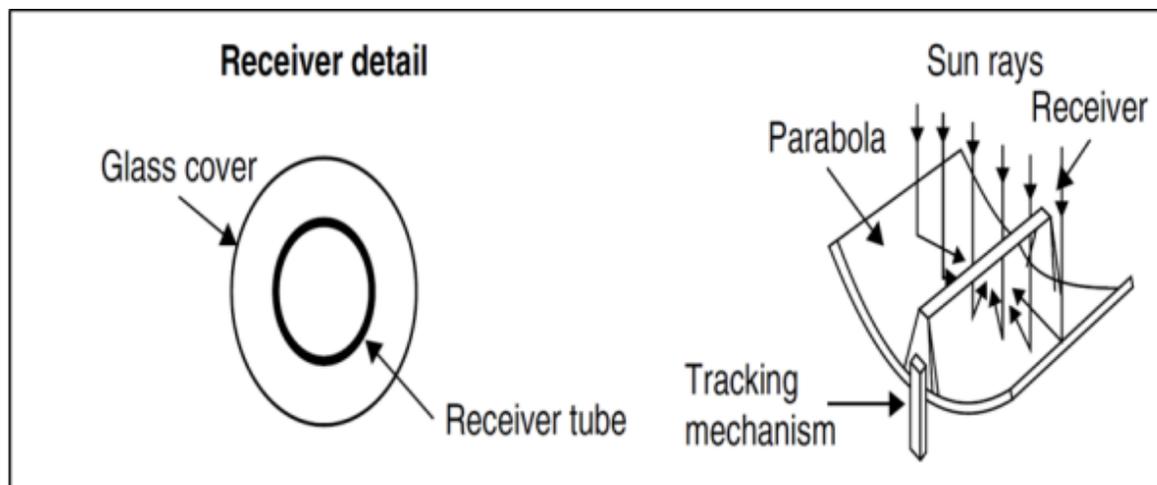
La temperatura que debe alcanzar el tubo para los 125 w/m<sup>2</sup> será de 384.5 ° C

### 2.3 Concentrador solar canal parabólico

Para obtener altas temperaturas se requiere un colector solar de alto rendimiento, con estructuras ligeras y de tecnología económica figura 25. Por lo que procesos donde se requieran hasta 400°C, la tecnología de canales parabólicos (CCP) es la adecuada, pues además de su buena eficiencia y alto rendimiento, pueden producir temperaturas desde los 50°C y hasta los 400°C, esto gracias a su configuración y diseño (Jaramillo, 2012). Las elevadas temperaturas generadas por los CCP se logran debido a la concentración de la

energía solar mediante un reflector y gracias a un fluido calo-portador. Los rayos solares se reflejan en la superficie parabólica gracias a la implementación de espejos planos en los extremos del concentrador y estos inciden a lo largo de una línea que corresponde al foco de la sección transversal del canal parabólico.

**Figura 25.** Esquema de un concentrador solar canal parabólico



Nota: Sistemas con estructura ligera y de tecnología económica para procesos de 50° C hasta 400°C. Referida de Colector solar de alto rendimiento. Jaramillo Salgado, 2012.

En los CCP, la construcción de la superficie parabólica es normalmente una lámina de metal con un perfil parabólico comúnmente reflectiva.

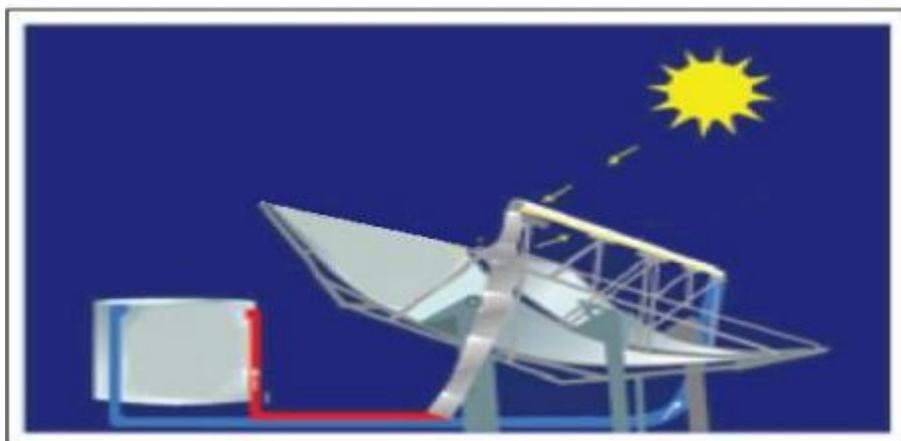
El receptor es básicamente un conducto por donde circula un fluido que transporta el calor hacia dispositivos térmicos como por ejemplo tanques de almacenamiento o intercambiadores de calor. Está localizado en la línea focal del canal parabólico. En la línea focal, se coloca un tubo que consta de una superficie absorbente que posee una cubierta selectiva que tiene alta absorción para radiación solar, pero una baja emitancia para las pérdidas térmicas por radiación.

El tubo regularmente está confinado por otro tubo de vidrio como envolvente, lo que permite reducir las pérdidas de calor por convección hacia los alrededores.

### 2.3.1 Componentes del CCP

Berumen y Ramírez (s.f.) mencionan los componentes del concentrador solar canal parabólico, siendo estos principalmente cuatro: una estructura metálica, un tubo receptor, una lámina reflejante, un sistema hidráulico (fluido calo-portador). La estructura metálica es la parte del sistema que da forma y soporte a todos los elementos que componen el CCP. El tubo receptor es un conjunto de tubos, uno de acero o cobre, y otro de vidrio que envuelve el tubo metálico, con la finalidad de evitar las pérdidas de calor, además tiene tapones y separadores de teflón que actúan como soporte del tubo reflector. Estos forman parte del sistema absorbente de calor. El sistema hidráulico está compuesto por un fluido calo-portador, para finalmente como parte de todo el sistema se incluye un tanque de almacenamiento. Como se evidencia en la figura 26.

**Figura 26.** *Componentes de un concentrador solar de canal parabólico*



Nota: componentes básicos como es la estructura metálica en forma modular y la superficie reflejante; la estructura está armada con elementos estructurales tubulares; la superficie reflejante con acabado espejo, Reproducida de Componentes concentrador solar Ramírez (s.f.).

### 2.3.2 Tubo receptor termo-solar

El tubo absorbedor es el componente encargado de recibir la radiación solar y transformarla, en energía térmica que es posteriormente transportada mediante un fluido calo-portador. Se

encuentra ubicado en la línea focal del colector canal parabólico, sujeto a la estructura mediante unos brazos soporte.

El tubo absorbedor está compuesto por dos tubos concéntricos, uno interior metálico, por el que circula el fluido calo-portador y otro exterior de cristal.

El tubo metálico lleva un recubrimiento especial de pintura tipo color negro que busca proporcionar una elevada absorción en el rango de la radiación solar y una baja emisividad. lo que le proporciona un rendimiento térmico.

Sin embargo, estos recubrimientos se degradan al contacto con el aire cuando están calientes, porque es necesario que exista un alto vacío en la cámara que queda entre el tubo metálico interior y la cubierta de cristal.

El tubo exterior que es de cristal, rodea el tubo interior metálico, de tal forma que protege el recubrimiento, de esta manera se protege el recubrimiento del tubo metálico y se reducen las pérdidas térmicas por convección.

Los tubos de vidrio van unidos para que se mantenga el vacío y no se degrade la superficie selectiva, dicha unión se realiza mediante una soldadura vidrio-metal, logrando que exista un espacio entre el tubo interior metálico y el tubo exterior de vidrio.

Para el caso de este trabajo de investigación, se utilizó un tubo de cobre de un diámetro  $\frac{1}{2}$  pulgada con un recubrimiento de pintura de alta temperatura brillante, esto debido a que se desea una disminución de costos (el recubrimiento de vidrio eleva considerablemente los costos) y la utilización de materiales disponibles localmente.

### **2.3.3 Fluidos de transferencia de calor para concentración solar**

Los colectores de canal parabólico utilizan un fluido de transferencia de calor que, al circular a través del tubo receptor, absorbe en forma de energía térmica la energía radiante procedente del Sol, y la transporta hasta su disposición final como puede ser un tanque de almacenamiento. Los fluidos usados comúnmente son el agua, aceites térmicos y aire. Para este caso se utilizó un aceite térmico de la marca Shell el cual se describe a continuación:

### Características principales del aceite utilizado en tubo receptor solar es:

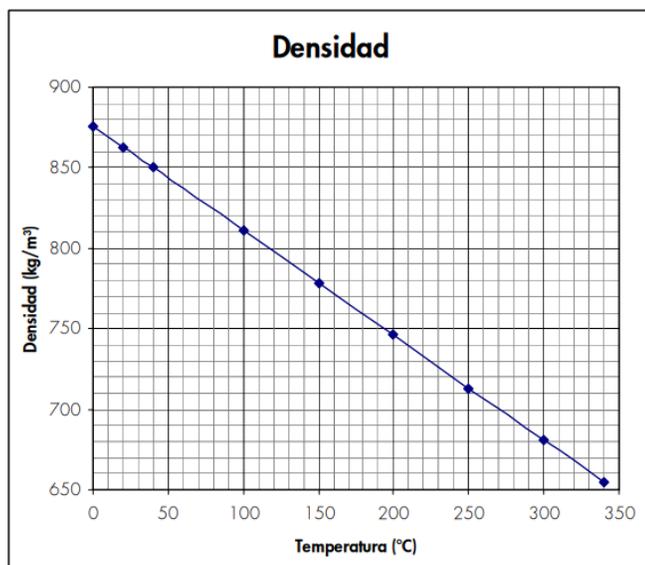
Se utiliza un aceite mineral de tipo térmico, aceite puro de baja viscosidad, baja tensión de vapor y alta resistencia a la oxidación, este tipo de aceite es utilizado en sistemas de calefacción cerrados o en tratamientos térmicos de metales.

#### Características principales:

- ✓ Alto coeficiente de transferencia de calor
- ✓ Alta estabilidad térmica y a la oxidación
- ✓ Buenas características de viscosidad/temperatura.
- ✓ Baja presión de vapor
- ✓ No corrosivo
- ✓ No toxico

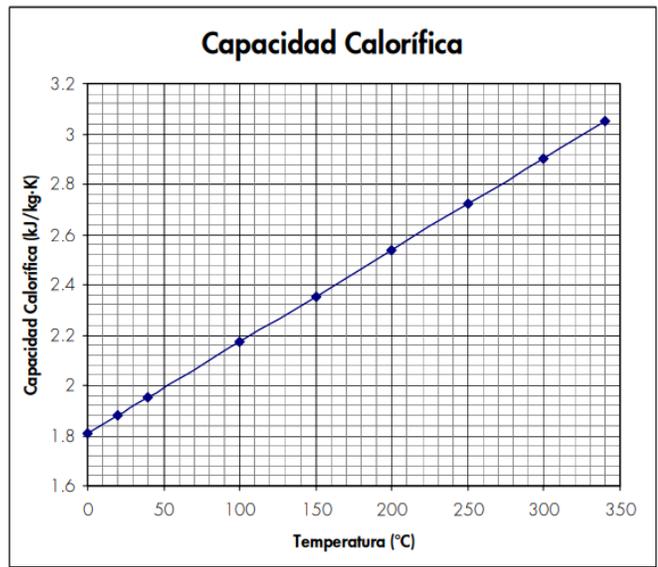
#### Estudios realizados al aceite térmico (aceite para transferencia térmica)

**Figura 27.** Prueba de densidad aceite tipo térmico



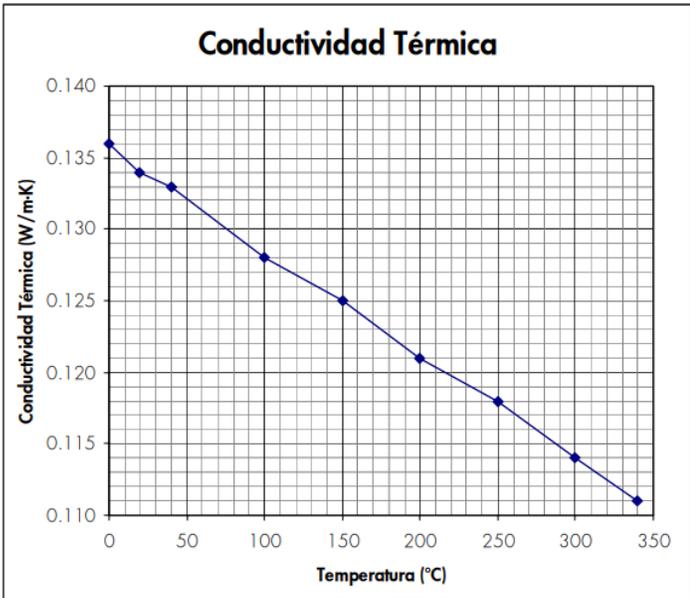
Nota: Contrastación densidad ( $\text{Kg/m}^3$ ) versus temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) prueba realizada a aceite. esta prueba indica la masa dividida por el volumen de aceite a una cierta temperatura. Adaptada *Shell Térmico Oil B: aceite para transferencia térmica*, 2005.

**Figura 28.** Prueba de capacidad calorífica aceite tipo térmico



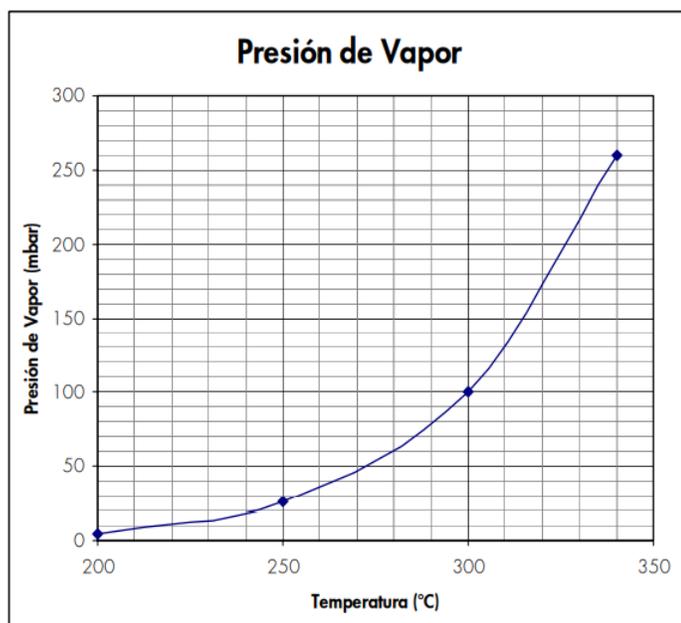
Nota: Contrastación capacidad calorífica (Kj/Kg-K) versus temperatura (°C) prueba realizada a aceite. El calor específico mide la cantidad de calor absorbido por unidad de peso cuando su temperatura aumenta un grado centígrado. Adaptada de *Shell Térmico Oil B: aceite para transferencia térmica*, 2005.

**Figura 29.** Prueba de conductividad térmica aceite tipo térmico



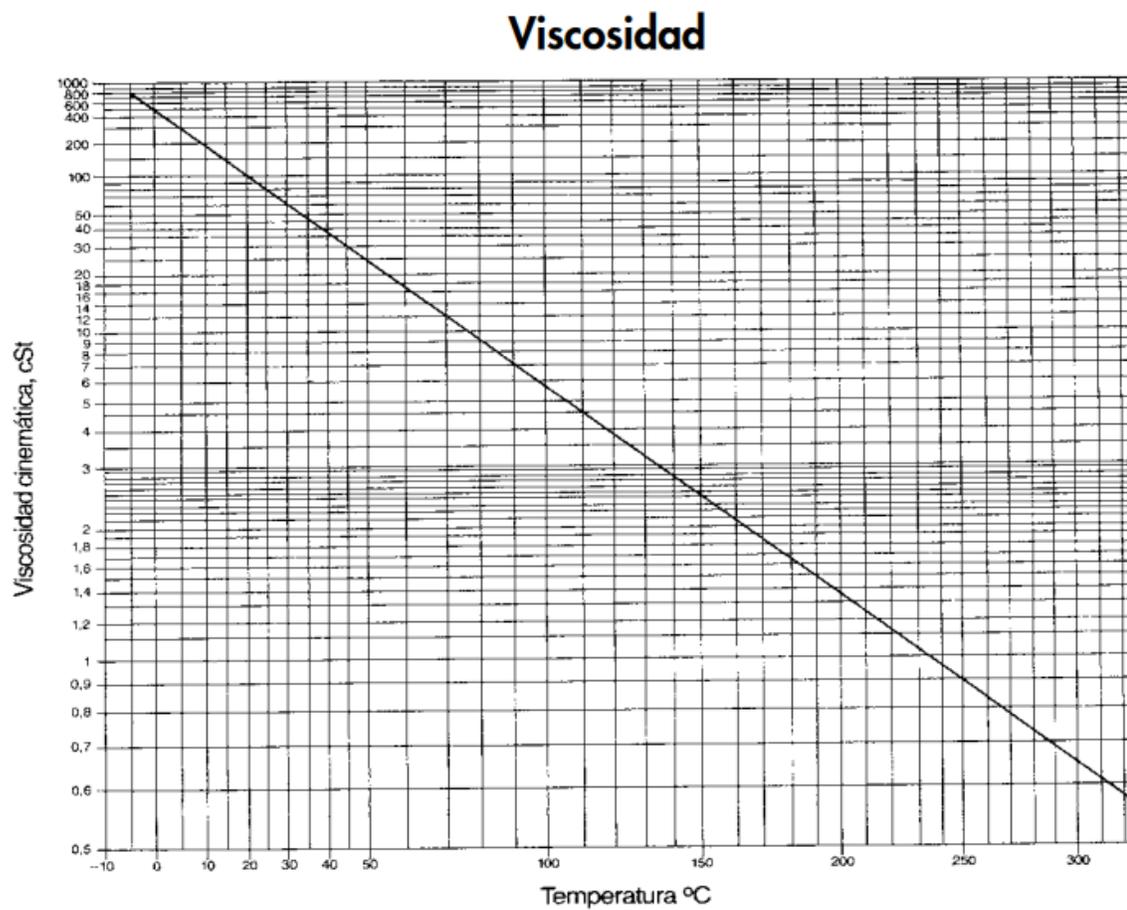
Nota: Contrastación capacidad calorífica (W/m-K) versus temperatura (°C) prueba realizada a aceite. La conductividad térmica describe la capacidad de un material para transferir calor. Adaptada de Shell Térmico Oíl B: aceite para trasferencia térmica, 2005.

**Figura 30.** Prueba de presión de vapor aceite tipo térmico



Nota: Contrastación Presión de vapor (mbar) versus temperatura (°C) prueba realizada a aceite Shell Térmico Oíl B: aceite para trasferencia térmica 2005.

**Figura 31.** Prueba de viscosidad aceite tipo térmico



Nota: Cuanto más calor es más viscoso el aceite, cada aceite cuenta con un índice de viscosidad, estipulado por la SAE (Sociedad Americana del Ingenieros del automóvil) *Shell Térmico Oíl B: aceite para trasferencia térmica, 2005.*

## 2.4 Diseño Conceptual

El diseño cuenta con un dispositivo en su mayoría sea autónomo de elevación que redirecciones los rayos solares sobre la superficie reflectante del centrador solar consta de los siguientes partes:

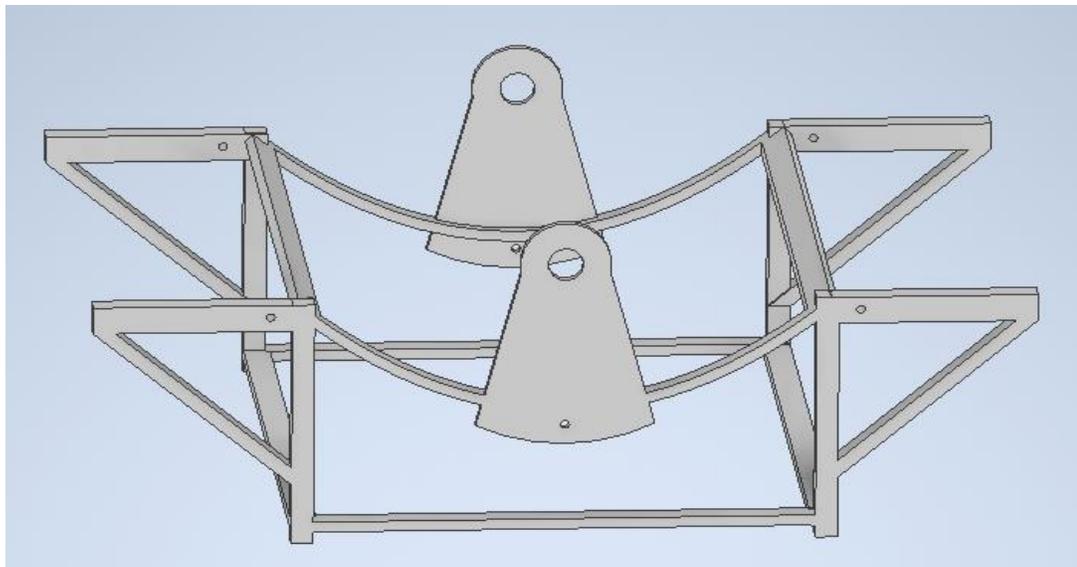
- Estructura soporte
- Sistema reflector canal-parabólico
- Sistema de redireccionamiento de rayos.
- Descripción del funcionamiento del concentrador canal- parabólico con espejos planos.

### 2.4.1 Estructura Soporte

Permite soportar todos los elementos que conforman el diseño del concentrador solar figura 32. y está compuesto por:

- Soporte para canal parabólico
- Soporte para reflector de espejos planos
- Mecanismo de graduación de inclinación de reflector

**Figura 32.** *Estructura soporte (CCP)*



Nota: Autores, 2022.

### 2.4.2 Sistema de movimiento reflector espejos planos

Este sistema permite el movimiento y ajuste del ángulo de elevación del sistema de redireccionamiento de los rayos. (reflector de espejos planos). Está formado por:

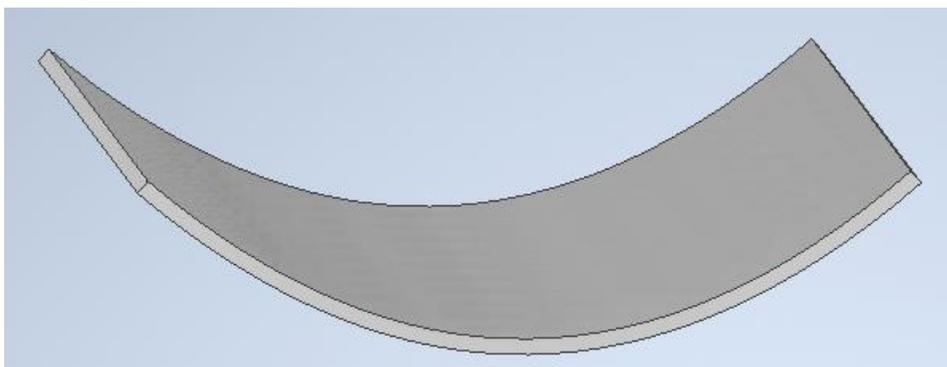
- Soporte de elementos reflectantes.
- Elementos reflectante dobles
- Eje de movimiento vertical

### 2.4.3 Sistema reflector

El sistema reflector figura 33, permite reflejar los rayos hacia el centro del sistema canal parabólico, dicho sistema está compuesto por:

- Elemento soporte del canal parabólico
- Elemento reflectante con sus respectivos dobles a determinados ángulos.

**Figura 33.** *Sistema reflector cilindro-parabólico*



Nota: Autores, 2022.

### 2.4.4 Descripción el funcionamiento concentrador solar canal parabólico combinado con reflector de espejos planos

La estructura se colocará en un lugar determinado y analizado para el aprovechamiento de la energía solar (modulo fotovoltaico). Una vez colocado el concentrador los espejos reflectantes se posicionan con el ángulo zenita correcto, correspondiente a la latitud donde

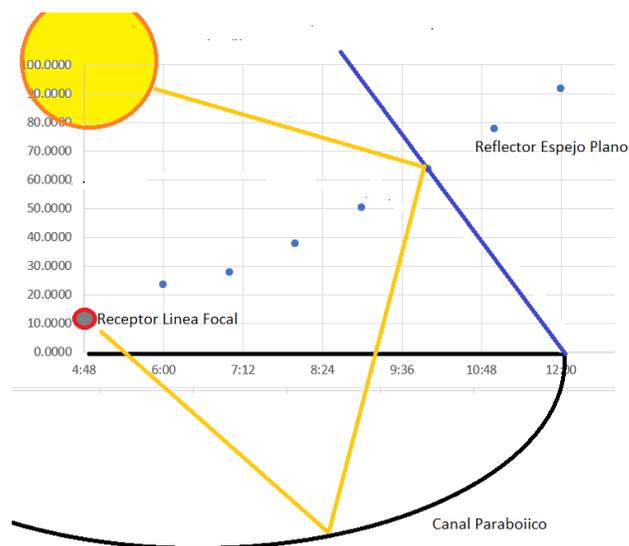
se encuentre situado el sistema, el día del año y la hora del día. Con el objetivo que los rayos solares serán dirigidos hacia el concentrador. Al contar con dos espejos planos uno para cada jornada del día (mañana, tarde) permitirá que los rayos solares pueden incidir normalmente sobre la superficie reflectante parabólica a toda hora del día.

## 2.5 Diseño en detalle del concentrador solar

La parte principal del concentrador es su estructura canal parabólica y a su vez cuenta con un sistema de redireccionamiento de los rayos solares hacia la superficie parabólica, el sistema de redireccionamiento consiste en un conjunto de superficies reflectantes montadas a cada extremo de la estructura soporte. La posición inicial de trabajo del sistema será de la siguiente forma:

- En la hora de la mañana antes de la salida del sol (6 am) (cero grados de inclinación respecto al concentrador) solo un espejo plano está en posición perpendicular a la estructura soporte, con el fin de aprovechar los primeros rayos de sol y sean dirigidos sobre la superficie parabólica.
- En la hora de la tarde (2 pm) se levantará el otro espejo plano y de inhabilitar el espejo de la mañana, dando como resultado que solo un reflector trabajará a la vez. Como se muestra en la siguiente figura.

**Figura 34.** Sistema de CCP estado inicial



Nota: Funcionamiento espejo plano en un ángulo de  $63.6^\circ$  a las 10:00 horas, proyección de rayos solares a canal parabólico y reflexión a receptor focal lineal. Autores, 2022.

Al comenzar a salir el sol y aumentar su posición angular (zenital y acimutal) el sistema reflector se moverá con el objetivo que los rayos solares incidan con determinado ángulo sobre la estructura reflectora, para así incidan sobre la superficie parabólica. Para poder cumplir con el objetivo del proyecto se procede a desarrollar el procedimiento que permita saber cada instante del día cual es el ángulo que debe rotar el sistema reflector. Es evidente que los horarios de por la mañana el movimiento será con una inclinación hacia el este (posición por donde sale el Sol) y en los horarios de por la tarde el movimiento será hacia el oeste (posición por donde se pone el Sol).

### **3. CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR CANAL PARABÓLICO**

Para la realización de la propuesta de construcción del prototipo concentrador solar mediante espejos planos móviles, fue necesario llevar a cabo una ejecución procedimental para lograr ejecutar el desarrollo de los objetivos planteados. Por lo tanto, se procedió a establecer las fases de acción enunciadas a continuación.

Como fase inicial, se tomó la ubicación del proyecto pese a que hay diferentes aspectos que pueden influir en el rendimiento del prototipo, tales como: la ubicación geográfica, el ángulo de  $10^\circ$  respecto a la línea ecuatorial, la radiación solar captada en un lugar específico y/o la temperatura ambiente. Estas fueron las especificaciones técnicas elementales para la realización del proyecto y se procedió a realizar su diseño correspondiente.

La segunda fase consistió en tomar los referentes del diseño para su construcción. La cual tuvo lugar con: selección de materiales, planos de dibujo mecánico, fabricación de la estructura, pruebas de ensayo y error, resultados de las pruebas y mejoras en caso de ser necesarias.

En la tercera fase, con el diseño previo hecho, se procedió a la construcción del concentrador solar con espejos móviles.

La cuarta fase consistió en realización de pruebas y ensayos para el concentrador solar.

#### **3.3 Fase numero 1 ubicación del proyecto**

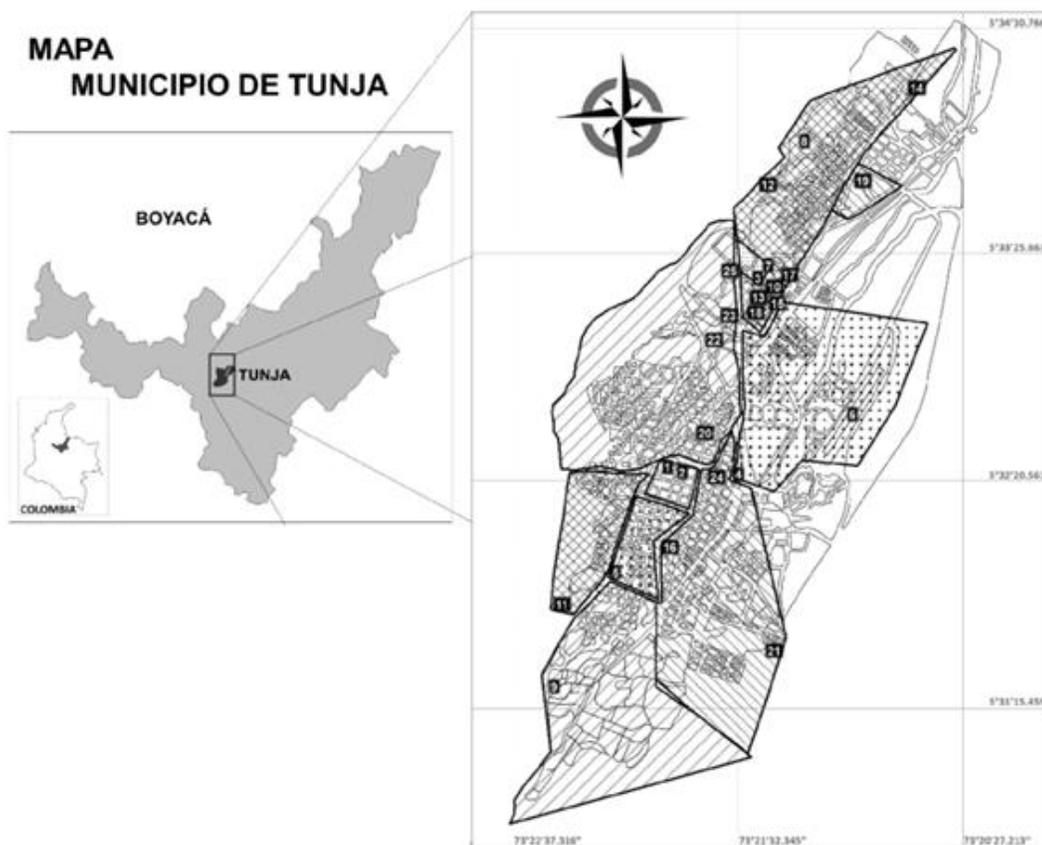
El CCP se colocará en el lugar donde se realizará el montaje del mismo situado en la ciudad de Tunja más específicamente en las instalaciones de la universidad Antonio Nariño. Una vez colocado el CCP de espejos reflectantes se posicionan con el ángulo zenital correcto, en correspondencia con la latitud donde se encuentre situado el sistema, el día del año y la hora del día. Ello permitirá que los rayos solares sean guiados hacia la superficie reflectora del

concentrador solar. El CCP al contar con el mecanismo de reflectores permite que, con giros de ángulos pequeños, tanto por la mañana como por la tarde, los rayos solares puedan incidir normalmente sobre las superficies reflectante.

#### UBICACIÓN GEOGRAFICA DEL PROYECTO

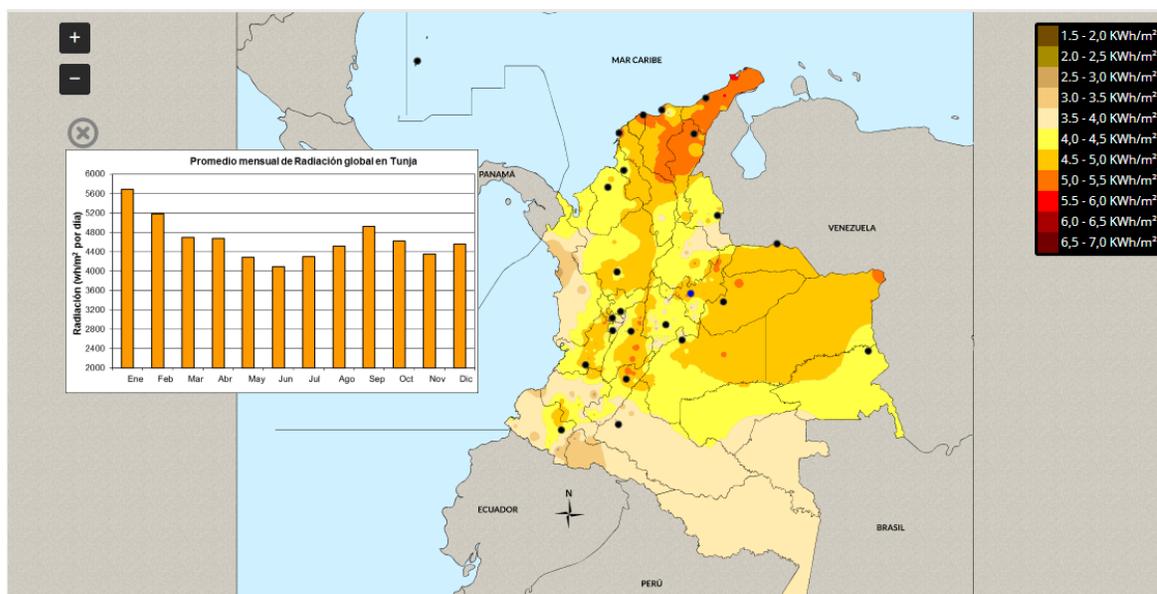
Tunja se encuentra ubicado en el departamento de Boyacá,

**Figura 35.** *Ubicación Geográfica del proyecto.*



Nota: El departamento de Boyacá posee una buena intensidad de radiación Solar. Adaptada de Mapa de Tunja 25 estaciones. (maria Eugenia Morales Puentes, s.f.)

**Figura 36.** Irradiación solar en Tunja



Nota: (IDEAM, 2020)

En la ciudad de Tunja, los meses de mayor radiación solar está en el mes de enero y septiembre, los meses de noviembre de 2021, abril y mayo de 2022 que fueron los meses donde se realizaron las pruebas se tiene una radiación promedio mensual de 4600  $\text{wh/m}^2$  por día. Figura 36.

### 3.4 Fase 2 Metodología para la construcción del concentrador solar.

Con el diseño previo hecho, se procedió a realizar la elección de materiales, usando solamente un material para evitar cadenas de corrosión. En este caso, el acero inoxidable 304 fue el principal material para construcción de las estructuras definidas. Este apartado se divide en tres secuencias para tener como fin la posible construcción del reflector solar mediante espejos planos móviles.

### **3.4.1 Estructura para sujeción canal-parabólica**

La estructura es el elemento encargado de servir como soporte a las láminas de acero inoxidable calibre 18. Dichas laminas fueron las elegidas ya que este material tiene un alto índice reflector. Además, su espesor es el indicado, evitando así que al momento de tomar las muestras con ángulos de  $90^\circ$  se haga la menor sombra posible. También son las encargadas de brindar una adecuada reflexión de la luz solar.

De acuerdo con lo anterior, se tiene en cuenta para su elaboración los siguientes pasos:

- Calcular la forma y dimensión del colector cilindro-parabólica.
- Elaborar la estructura para la sujeción del área reflectante solar. El cual consta de un tubo de cobre de 1/2 pulgada de diámetro. con material en acero compuesto por cuatro apoyos verticales que van soportados al suelo.
- Después de ello irá ensamblado a la estructura del reflector solar con espejos planos móviles. Cabe resaltar que dicha estructura es graduable en sentido horizontal.

### **3.4.2 Estructura tipo soporte para los reflectores**

Esta estructura fue la principal para el desarrollo del objetivo de este proyecto porque tiene como fin presentar la funcionalidad y mejora de la eficiencia del concentrador solar al permitir la movilidad mecánica gradual de los espejos planos.

En esta fabricación, los siguientes elementos fueron establecidos:

Elaboración de un soporte con tubo rectangular 2" \* 1 calibre 18, donde reposan los espejos la línea focal y el área reflectante. Fue necesario en primer lugar concebir un diseño previo que incluyó tomar las dimensiones respecto al soporte del área reflectante (parábola). A partir de ello, se empezó con la construcción de la estructura tipo soporte para los espejos reflectantes (ensamblado en acero para fácil mantenibilidad). Luego de ello se incluyeron láminas en su superficie para poderlas inclinar, dependiendo la hora del día. Dicha inclinación depende de dos soportes laterales que constan de orificios (Lamina gradual entre los reflectores y la estructura) para encontrar el ángulo óptimo que permita un trabajo eficiente en cuanto a la reflexión de los rayos del sol.

### **3.4.3 Tubo focal concentrador de temperatura**

- Tubo de Cobre desnudo recubrimiento de pintura negra tipo esmalte de alta temperatura.
- Tubo de Cobre con recubrimiento vidrio (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado)
- Tubo de Cobre con doble recubrimiento de vidrio diferente diámetro (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado)

### **3.4.4 Ensamble Funcional**

Después de haber elaborado las estructuras se tienen en cuenta los aspectos relacionados en las siguientes líneas: el ensamble de las piezas de la estructura se realizó según el diseño previo y la unión de estas partes metálicas se realizó con soldadura manual de metal por arco eléctrico con electrodo revestido y parte con tornillería. Cabe resaltar que, la mayor parte de la estructura es plegable, esto ayuda a poder realizar mejores pruebas, buena mantenibilidad y fácil transporte. Figura 37. El resultado final de la estructura se puede evidenciar a continuación.

**Figura 37.** Ensamble del CCP



Concentrador solar canal parabólico en estado de construcción. Autores, 2022.

### **3.4.5 Diseño y construcción del área reflectante del concentrador solar canal parabólico.**

Se utiliza la siguiente ecuación para el cálculo de la parábola:

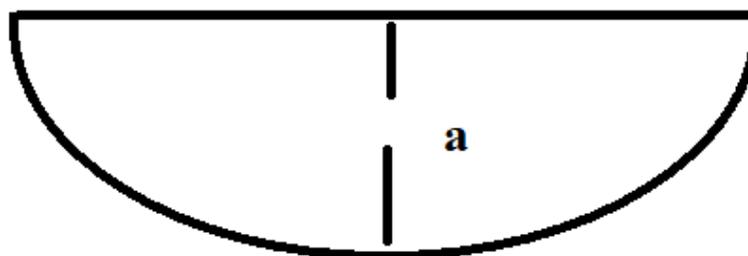
Ecuación 0-1

$$y = \frac{x^2}{4(a)}$$

Donde:

a= distancia focal desde la base de la parábola. Figura 38.

**Figura 38.** *Distancia focal parábola*



Nota: autores (2022).

El foco está a una distancia de 350 mm partir del vértice de la parábola

**Tabla 5.** *Coordenadas*

<b>x (mm)</b>	<b>y =f(x)</b>
25,0	0,45
50,0	1,79
75,0	4,02
100,0	7,14
125,0	11,16
150,0	16,07
175,0	21,88
200,0	28,57
225,0	36,16
250,0	44,64
275,0	54,02
300,0	64,29
325,0	75,45
350,0	87,50
375,0	100,45

400,0	114,29
425,0	129,02
450,0	144,64
475,0	161,16
500,0	178,57
525,0	196,88
550,0	216,07
575,0	236,16
600,0	257,14

Nota: Autores, 2022.

Las coordenadas de x, están cada (25.0 mm) o lo que es lo mismo cada 2,5 cm, para la rama positiva es decir de cero hacia la derecha. Se calculó.

$$y = \frac{650^2}{4(350)} = 257.14 \text{ mm}$$

Se traza la parábola calculada en el plano cartesiano, como se muestra en la figura 39.

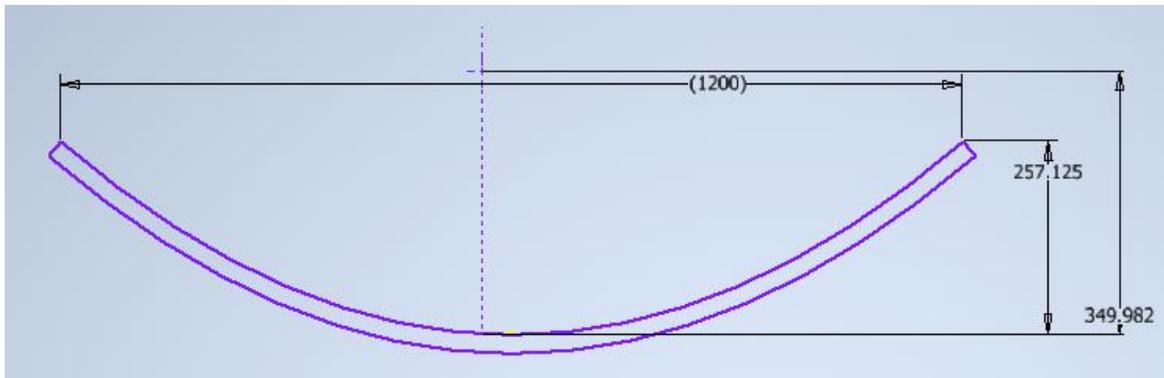
**Figura 39.** *Vértice de la parábola del área reflectante.*



Nota: Autores, 2022.

A partir de estos cálculos anteriores se establecen las dimensiones a tener en cuenta en el momento de armar el canal parabólico, estipulado en la siguiente figura 39.

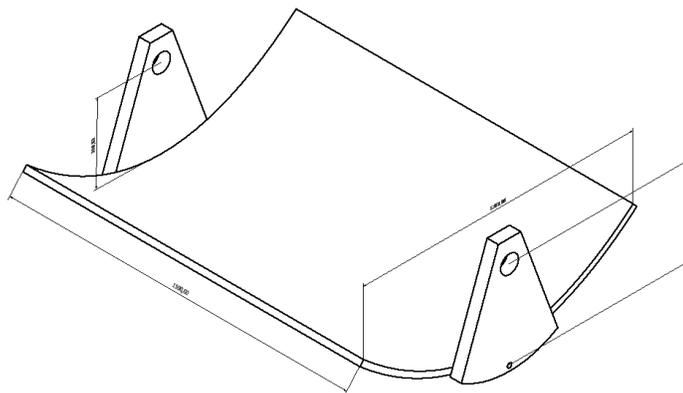
**Figura 40.** Dimensiones del diseño de la parábola.



Nota: Autores, 2022.

Se realiza diseño de soportes laterales donde se instala el tubo receptor focal a una altura de 350 mm figura 40.

**Figura 41.** Superficie reflectante (parábola)

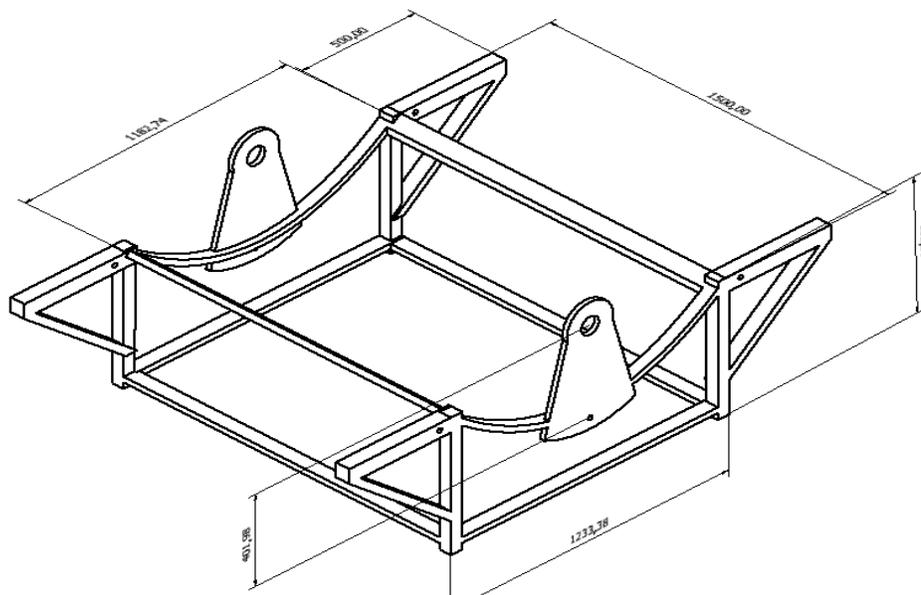


Nota: Autores, 2022.

### **Estructura soporte del concentrador solar canal-parabólico con espejos planos.**

La estructura soporte se diseñó respecto a el área de la sección reflectante (parábola). Dando como resultado las siguientes medidas mostradas en la figura 41.

**Figura 42.** *Soporte del concentrador solar canal-parabólico con espejos planos.*

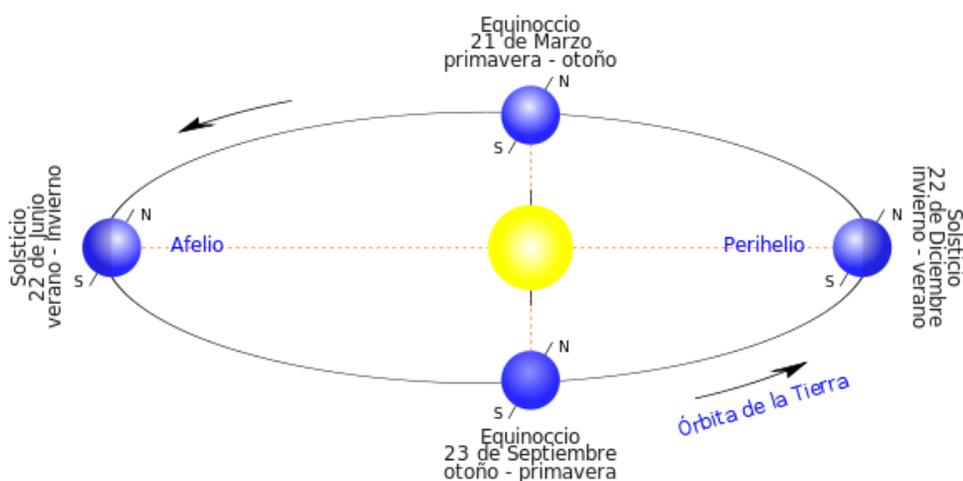


Nota: Autores, 2022.

### **3.4.6 Cálculos de ángulos de incidencia**

El movimiento de la tierra alrededor del sol describe una órbita elíptica, cuyo punto más alejado se denomina “Afelio” (unos 152.096.154 km) y el punto más cercano “perihelio” (unos 147.099.586 km). Este movimiento se realiza sobre un plano denominado “eclíptica”. Figura 43.

**Figura 43.** *Coordenadas solares*



Nota: Rotación anula de la tierra, aproximadamente para los días 21 de marzo y 23 de septiembre la tierra se encuentra más cerca del sol (equinoccio) y para los días 22 de junio y 22 de diciembre la tierra se encuentra más lejos, Solsticio. Adaptada de Coordenadas solares. Heliosfera 2021.

Fijando la tierra, el movimiento del sol se realiza sobre una superficie esférica que se denomina “esfera celeste” y formando un ángulo constante de  $23,45^\circ$ .

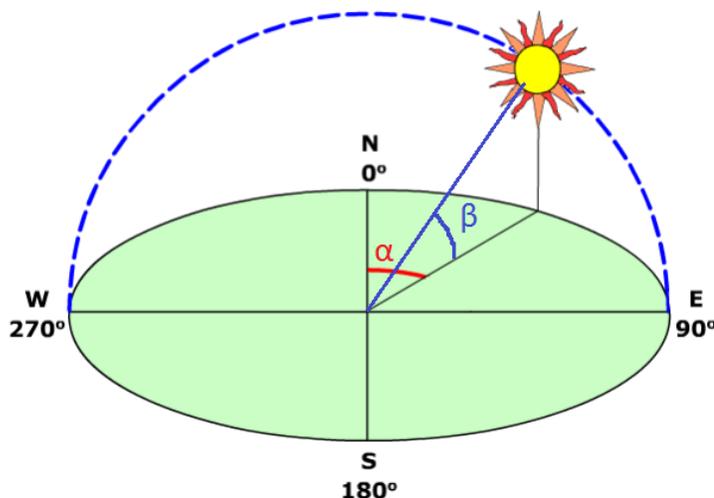
Por lo tanto, el sol siempre tendrá una posición que se define mediante las denominadas coordenadas solares, que en este caso serán dos ángulos:

Acimut ( $\alpha$ ): ángulo medido en el plano horizontal formado por el sol y la dirección sur (hemisferio norte). En el hemisferio sur la referencia se toma con la dirección norte.

Elevación ( $\beta$ ): ángulo medido en el plano vertical formado por los rayos del sol con respecto a la horizontal.

Una herramienta fundamental, aunque escasamente empleada en el sector de la energía solar, es la denominada “carta solar”, una representación bidimensional de las diferentes trayectorias recorridas por el sol vistas desde un punto fijo. En el eje horizontal se representa el acimut, y en el vertical la elevación. Por lo tanto, la carta solar es características de cada lugar.

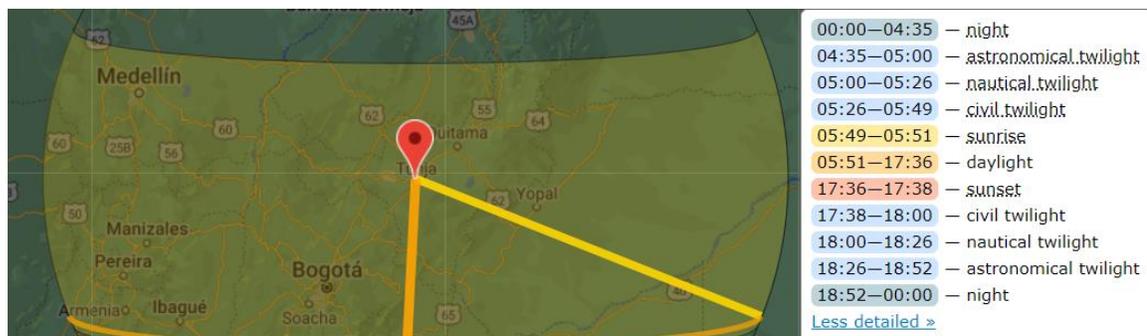
**Figura 44.** *proyección incidencia solar*



Nota: Carta Solar. Reproducida Coordenadas solares. Heliosfera 2021.

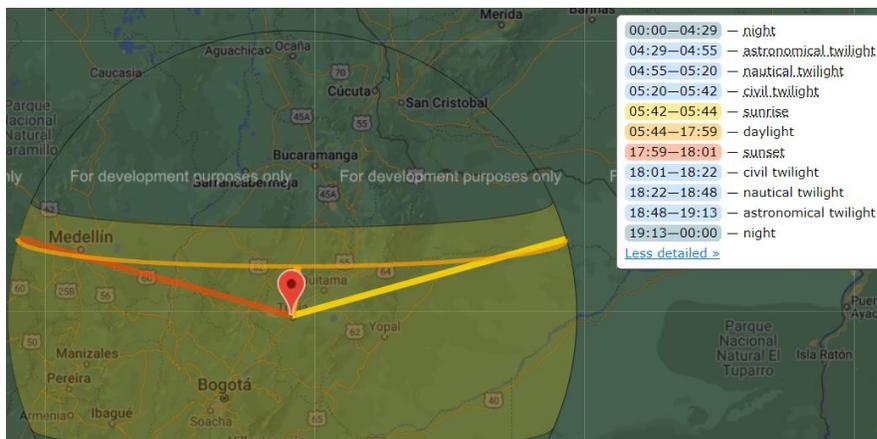
A continuación, se expone la proyección de incidencia solar según la ubicación geográfica en este caso Tunja, Boyacá, Colombia, para ello se utilizó la página Web “suncalc.net” obteniendo las siguientes proyecciones hora a hora en los días que se realizaron las pruebas.

**Figura 45.** *Proyección de incidencia solar 27-noviembre 2021*



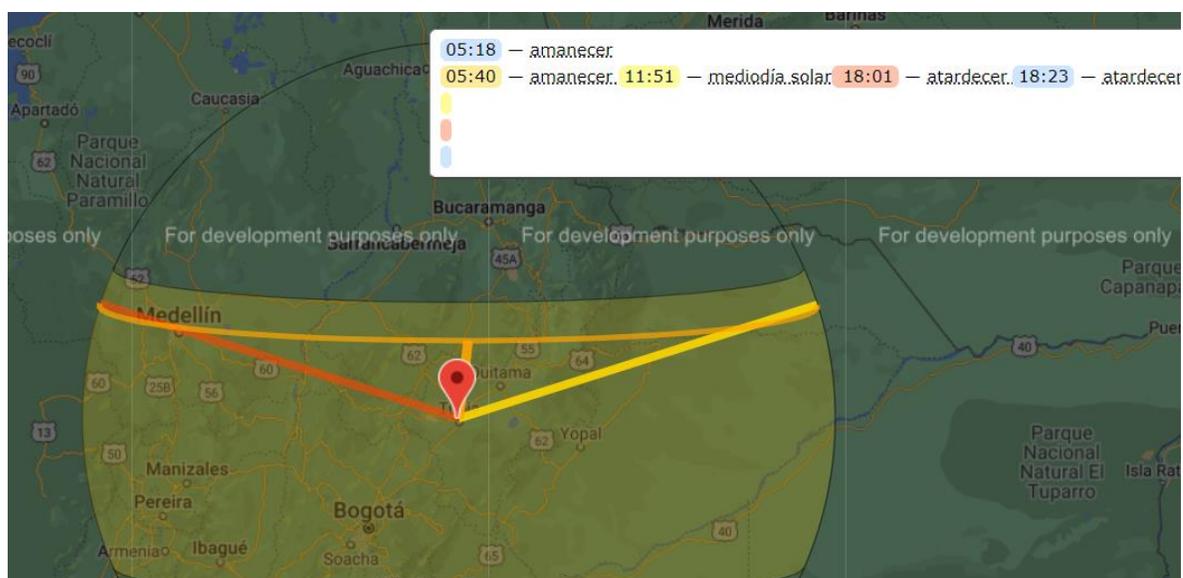
Nota: Para el 27 de noviembre de 2021 se estableció que el horario aprovechable luz estuvo entre las 5:49 y las 17:48 horas. Adaptada de Coordenadas solares. <http://suncalc.net/>.2022.

**Figura 396.** *Proyección de incidencia solar 02-mayo-2022*



Para el 2 de mayo de 2022 se estableció que el horario aprovechable luz estuvo entre las 5:42 y las 18:01 horas. Adaptada de Coordenadas solares. <http://suncalc.net/.2022>.

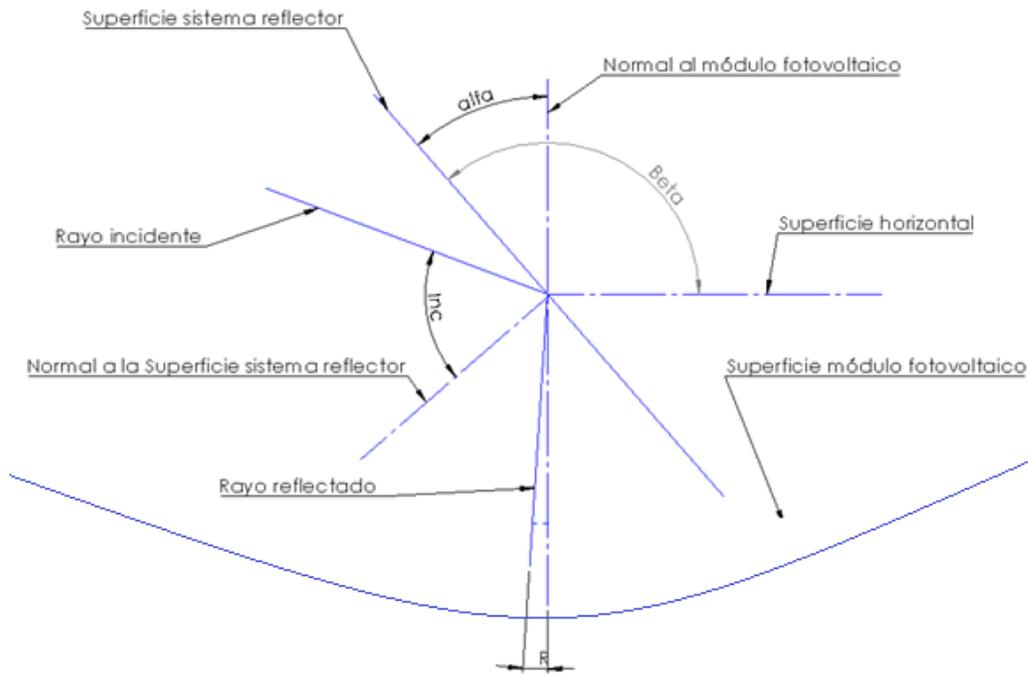
**Figura 407.** proyección de incidencia solar 09-mayo -2022



Para el 9 de mayo de 2022 se estableció que el horario aprovechable luz estuvo entre las 5:40 y las 18:01 horas. Adaptada de Coordenadas solares. <http://suncalc.net/.2022>.

**Figura 418.** *Ángulos de posicionamiento para el sistema de reflector en la mañana*

*Cálculo del ángulo de rotación (alfa) por la mañana*



Nota: Autores, 2021.

El ángulo de rotación ideal del sistema reflector sería aquel en el cual el rayo incidente sea reflejo hacia la superficie cilindro-parabólica con un ángulo igual a cero ( $R=0$ ), es decir, que los rayos incidan perpendicularmente sobre la superficie parabólica de la figura 48 y figura 49. Se puede ver que se logra cuando

$$180 - R - 2Inc - (90 - Inc) - \alpha = 0 \quad (9)$$

$$\alpha = 90 - Inc$$

Se conoce que para cualquier superficie inclinada se puede calcular el ángulo de incidencia sobre la superficie por la expresión (10) (ángulo de incidencia =  $\theta$ ).

Por otro lado, se conoce que para cualquier superficie inclinada se puede calcular el ángulo de incidencia sobre la superficie por la siguiente expresión (ángulo de incidencia= $\theta$ ).

Ecuación 0-2

$$\cos\theta = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma) \quad (10)$$

De la ecuación (9) se puede ver que

$$\beta = 90 + \alpha$$

$$\beta = 180 - \theta$$

Se sustituye en la ecuación (10) la expresión del ángulo de incidencia y se puede buscar cual es el ángulo  $\beta$  que satisface esa condición y posteriormente se calcula el ángulo  $\alpha$  de inclinación requerido para el sistema reflector.

Ecuación 0-3

$$\cos(180 - \beta) = \cos\theta_z \cos\beta + \sin\theta_z \sin\beta \cos(\gamma_s - \gamma)$$

Ecuación 0-4

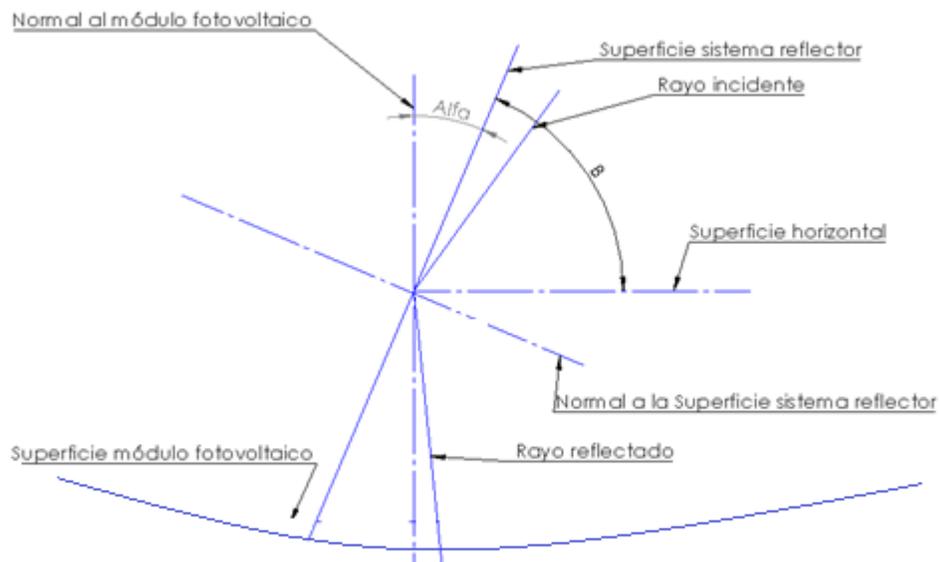
$$\beta = \tan^{-1} \frac{1 + \cos\theta}{\sin\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma)}$$

Cuando el sol se pone por la tarde se realiza un procedimiento similar y se encuentra que el ángulo  $\beta$  se calcula de la siguiente forma:

Ecuación 0-5

$$\beta = \tan^{-1} \frac{1 - \cos\theta}{\sin\theta_z \cos(\gamma_s - \gamma)}$$

**Figura 49.** *Ángulos de posicionamiento para el sistema de reflector horas de la tarde*



Nota: Autores, 2021.

A continuación, se muestra un fragmento de los cálculos realizados para los días en los que se realizaron las muestras.

**Tabla 6.** Cálculo del ángulo de inclinación Reflector espejo plano

Día 314 del año

Latitud ( $\phi$ ) 5.54Horas del día / ángulo horario ( $w$ ) 0.5402

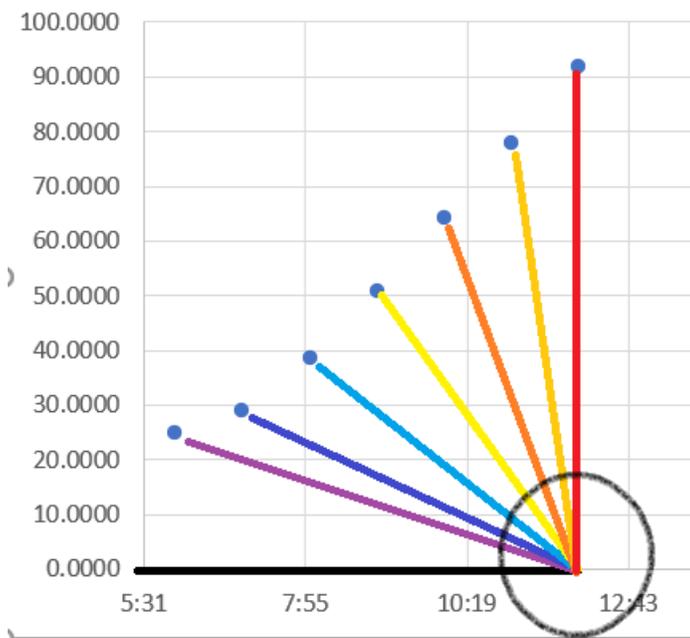
Angulo azimutal Solar máx. -70.94

Angulo Zenital máx. 91.81

<i>Fecha</i>	<i>Hora</i>	<i>Angulo Horario</i>	<i>Declinación (<math>\delta</math>)</i>	<i>Angulo de inclinación reflector espejo plano</i>	$\gamma_s$	$\gamma$	$\beta$
15/11/2021	6:00	0	-17.913	23.4532	0.000	0.000	-1.3992
15/11/2021	7:00	15	-17.913	27.7344	31.951	0.558	3.7044
15/11/2021	8:00	30	-17.913	37.7676	50.969	0.890	1.0000
15/11/2021	9:00	45	-17.913	50.2087	61.121	1.067	1.0000
15/11/2021	10:00	60	-17.913	63.6505	66.866	1.167	-1.0168
15/11/2021	11:00	75	-17.913	77.5593	70.254	1.226	2.0419
15/11/2021	12:00	90	-17.913	91.7016	72.165	1.260	1.1276
15/11/2021	13:00	-75	-17.913	77.5593	-70.254	-1.226	2.0419
15/11/2021	14:00	-60	-17.913	63.6505	-66.866	-1.167	-1.0168
15/11/2021	15:00	-45	-17.913	50.2087	-61.121	-1.067	1.0000
15/11/2021	16:00	-30	-17.913	37.7676	-50.969	-0.890	1.0000
15/11/2021	17:00	-15	-17.913	27.7344	-31.951	-0.558	3.7044
15/11/2021	18:00	0	-17.913	23.4532	0.000	0.000	-1.3992

Nota: Autores, 2022.

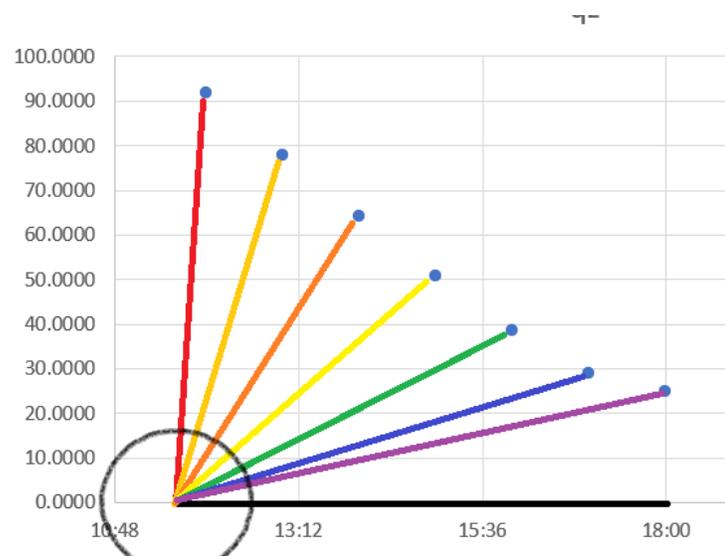
**Figura 50.** *Inclinación reflectora solar de espejo plano en la mañana*



Nota: Autores, 2022.

En la figura anterior 49 se evidencia los diferentes ángulos de inclinación del espejo desde las 6:00 AM, hasta las 12 del mediodía, en el eje de la ordenada están plasmados los diferentes grados de inclinación de los espejos, empezando desde 0° grados hasta los 90°. En el eje de la abscisa se evidencia las horas desde las 5:31 AM hasta las 12:43 PM. Los colores representan la inclinación del espejo hora a hora comenzando desde las 6AM hasta las 12 del mediodía, comenzando en la hora de las 6 AM con la línea morada con un ángulo de inclinación de 24° y finalizando a las 12 del medio día con una línea color roja con un ángulo de inclinación del espejo de 90°.

**Figura 51.** *Inclinación reflectora solar de espejo plano en la tarde*



Nota: Autores, 2022.

En la Tabla número 2 se puede observar que el *Angulo de inclinación con espejo plano reflecta* la incidencia sobre el CCP después de haber sido reflectado por los espejos móviles. Es de notar que este ángulo de incidencia sobre el canal se acerca a cero, es decir, que actúe paralelo sobre el CCP, pero no logra un valor cero porque solamente el reflector se mueve en un solo plano.

Por otro lado, la figura 50 se evidencia que a diferencia de la figura 49, esta figura el espejo plano actúa en las horas de la tarde comenzando su función al medio día con una inclinación de  $90^\circ$  con el color de la línea roja, y finalizando a las 6 PM con una inclinación de  $25^\circ$  y con una línea morada que representa la inclinación del espejo en esa hora.

### 3.4.7 Metodología de análisis de datos

#### Dimensionamiento óptico de un CCP

Para dimensionar el CCP se utilizan las medidas definidas por la lámina del material especular que son de 1,2 metros de largo por 0.349 metros de ancho, un ángulo de borde igual a  $90^\circ$ , óptimo para dar un mayor rendimiento (Vidriales, 2015), una distancia focal de 0.35 m y un ancho de apertura de 1.05 m. La longitud final del CCP es la potencia demandada entre la potencia específica del concentrador en W/m.

El diámetro mínimo del tubo absorbedor se calcula partir del ancho de abertura y un factor de corrección para los errores ópticos que de acuerdo con Duffie y Beckman es de  $1.15^\circ$ :

$$D = \frac{1.05m \sin\left(0.267^\circ + \frac{1.15^\circ}{2}\right)}{\sin 90^\circ} = 0.015 m$$

Donde  $0.267^\circ$  es la mitad del ángulo que sustenta el disco solar visto desde la Tierra. Para fines prácticos, se considera un tubo absorbedor de 1/2 pulgada de diámetro, con un diámetro exterior real de 1.58 cm (ver siguiente tabla).

**Tabla 7.** Tubería de cobre de temple rígido Tipo “M”

<b>Tubería de cobre de temple rígido Tipo “M”</b>								
<b>Medida Nominal</b>	<b>Diámetro Exterior</b>	<b>Diámetro Interior</b>	<b>Espesor de Pared</b>	<b>Peso</b>	<b>Peso por tramo</b>	<b>Presión Máxima</b>	<b>Presión Constante</b>	<b>Flujo</b>
Pulgadas milímetros	Pulgadas milímetros	Pulgadas milímetros	Pulgadas milímetros	Lb/pie kg/m	libras kilogramos	PSI kg/cm <sup>2</sup>	PSI kg/cm <sup>2</sup>	G. P. M. L. P. M.
1/4"	0.375"	0.325"	0.025"	0.107	2.132	6,133	1,226	
6.35 mm	9.525	8.255	0.635	0.159	0.968	431.15	86.18	
3/8"	0.500"	0.450"	0.025"	0.145	2.903	4,500	900	2.247
9.50 mm	12.700	11.430	0.635	0.216	1.318	316.35	63.27	8.507
1/2"	0.625"	0.569"	0.028"	0.204	4.083	4,032	806	4.064
12.7 mm	15.875	14.453	0.711	0.304	1.854	283.45	56.66	15.382
3/4"	0.875"	0.811"	0.032"	0.328	6.566	3,291	658	10.656
19 mm	22.225	20.599	0.812	0.488	2.981	231.35	46.25	40.333
1"	1.125"	1.055"	0.035"	0.465	9.310	2,800	560	21.970
25 mm	28.575	26.767	0.889	0.693	4.227	196.84	39.36	83.180
1 1/4"	1.375"	1.291"	0.042"	0.683	13.656	2,749	550	39.255
32 mm	34.925	32.791	1.067	1.016	6.200	193.25	38.66	148.580
1 1/2"	1.625"	1.527"	0.049"	0.941	18.821	2,713	542	62.335
38 mm	41.275	38.785	1.245	1.400	8.545	190.72	38.10	235.940
2"	2.125"	2.009"	0.058"	1.461	29.233	2,470	491	131.000
51 mm	53.975	51.029	1.473	2.176	13.272	173.65	34.51	495.860
2 1/2"	2.625"	2.495"	0.065"	2.032	40.647	2,228	445	231.461
64 mm	66.675	63.373	1.651	3.025	18.454	156.62	31.28	876.010
3"	3.125"	2.981"	0.072"	2.683	53.663	2,073	414	375.189
76 mm	79.375	75.718	1.889	3.994	24.363	145.73	29.10	1,420.09
4"	4.125"	3.935"	0.095"	4.665	93.310	2,072	414	799.395
102 mm	104.775	99.949	2.413	6.945	42.363	145.65	29.10	3,025.71

### Perdidas de calor en el tubo exterior

La conexión entre el tubo receptor y tubo de recubrimiento (tubo de cristal) es un material plástico de 1 pulgada de diámetro, que se utiliza como aislante entre estos dos tubos.

El coeficiente de transferencia de calor  $U_t$  está determinado por la resistencia de los materiales para la conducción de calor mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 0-6

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2}$$

**Tabla 8.** Conductividad Termica [W/m.K] diferentes materiales

<b>Materiales</b>	<b>Conductividad térmica; [W/m K]</b>
Arena seca	0.33
Corcho expandido	0.036
Goma dura	0.163
Espuma de vidrio	0.047
Fibra de vidrio	0.035
Goma esponjosa	0.055
Láminas de fibra de madera	0.047
Lana de oveja natural	0.043
Espuma de poliuretano	0.023
Espuma elastomérica	0.031
Lana de vidrio	0.032
Espuma de poliestireno	0.04

### 3.4.8 Costo de construcción del concentrador solar Canal Parabólico (CCP)

En este apartado se reportan los costos generados por la construcción del CCP.

Los recursos mencionados a continuación, pueden estar sujetos a cambios en su costo según valor comercial del momento

Es importante señalar que el costo de mano de obra no está contemplado, pues no se requirió de mano de obra especial para las fases de construcción del CCP, esperando que los costos de mano de obra, no tenga un impacto significativo.

**Tabla 9.** *Materiales y costos*

<b>Descripción Material</b>	<b>Costo</b>
Mano de Obra	\$ 200.000,00
Tubo de cobre ½ “	\$ 70.000,00
Tubo rectangular de aluminio	\$ 80.000,00
Láminas de acero inoxidable	\$ 150.000,00
Espejos acero inoxidable	\$ 80.000,00
Remaches	\$ 7.000,00
Soldadura	\$ 200.000,00
Base malla parabólica	\$ 50.000,00
brocas	\$ 10.000,00
Regletas metálicas guía	\$ 20.000,00
Pintura negra	\$ 10.000,00
<b>TOTAL</b>	\$ 877.000,00
<b>VALOR COMERCIAL</b>	\$ 950.000,00

Nota: Materiales y Costos Concentrador Solar Canal Parabólico con reflector de espejos planos Autores, 2022.

**Figura 52.** *Concentrador solar cilindro parabólico combinado con reflectores de espejos planos*



Nota: Producto final. Autores, 2022.

#### **4. ENSAYOS REALIZADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se realizan diferentes tipos de ensayos para el receptor solar de la línea focal para así poder determinar la eficacia en cada caso. Dichas pruebas se presentan a continuación:

- Prueba Receptor solar CCP con tubo de cobre al desnudo expuesto al ambiente con manejo de ángulos de inclinación de los espejos planos.
- Prueba a tubos fluorescentes (reutilizados) Ensayo destructivo para verificar temperatura máxima soportada por los mismos y prueba de vacío.
- Prueba al receptor solar con recubrimiento en tubo de cristal sometido al vacío, entre el tubo de metal y tubo de cristal.

- Prueba a tubo receptor focal con sistema de doble recubrimiento de cristal, sometidos al vacío.
- Prueba a fluido calo-portador.

#### 4.3 Ensayo realizado tubo receptor cobre al desnudo

Para llevar a cabo la realización de los ensayos se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Mantenimiento y adquisición de los dispositivos requeridos para la realización de proyecto (termocupla o termopar tipo T (cobre/cobre-níquel), multímetro digital marca EXTECH) de la siguiente manera:

- Inicialmente, se adecuó los equipos y el concentrador solar para tomar sus respectivas pruebas como se puede apreciar en la figura 46.

**Figura 53.** *Adecuación de concentrador solar para respectivas pruebas*



Nota: Autores, 2022.

Se ajustó la termocupla tipo T al multímetro para empezar las mediciones como se ilustra a continuación:

**Figura 54.** *Adecuación y conexión de la termocupla*



Nota: Autores, 2022.

- Posteriormente se da inicio a toma de temperatura el cual inicia a las 6 am se registra una temperatura inicial de  $16^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente) resaltar que la toma de temperatura se hace hora a hora. Dando inicio a las 6 am y terminando a las 6 pm. Con una duración de 12 horas que el concentrador solar está en operación.

Selección optima de posición del concentrador solar respecto a la hora del día y posición del Sol. para tomar las pruebas de la radiación solar. Es la siguiente: en los horarios de por la mañana el movimiento será con una inclinación hacia el este (posición por donde sale el Sol) y en los horarios de por la tarde el movimiento será hacia el oeste (posición por donde se pone el Sol).

**Figura 55.** *Posicionamiento del CCP*



Nota: Autores, 2022.

Toma de pruebas en horarios comprendidos entre las 6 am y 6 pm. Con el diseño de la estructura y los cálculos realizados de los ángulos requeridos de tal manera que los rayos del Sol se reflejen para que incidan de forma perpendicular a la superficie del CCP, según la hora del día y el movimiento azimutal del sol, se gradúan los reflectores para tener un ángulo de inclinación específico, que entre menor sea dicho ángulo, más aprovechamiento va a tener dado que los rayos del sol van a incidir a la superficie reflectante del CCP de forma normal a la superficie de este.

**Figura 56.** *Graduación de inclinación específica del reflector*



Nota: Autores, 2022.

**Figura 57.** CCP con tubo receptor solar de cobre al desnudo



Nota: Autores, 2022.

### 4.3.1 Resultado de ensayos

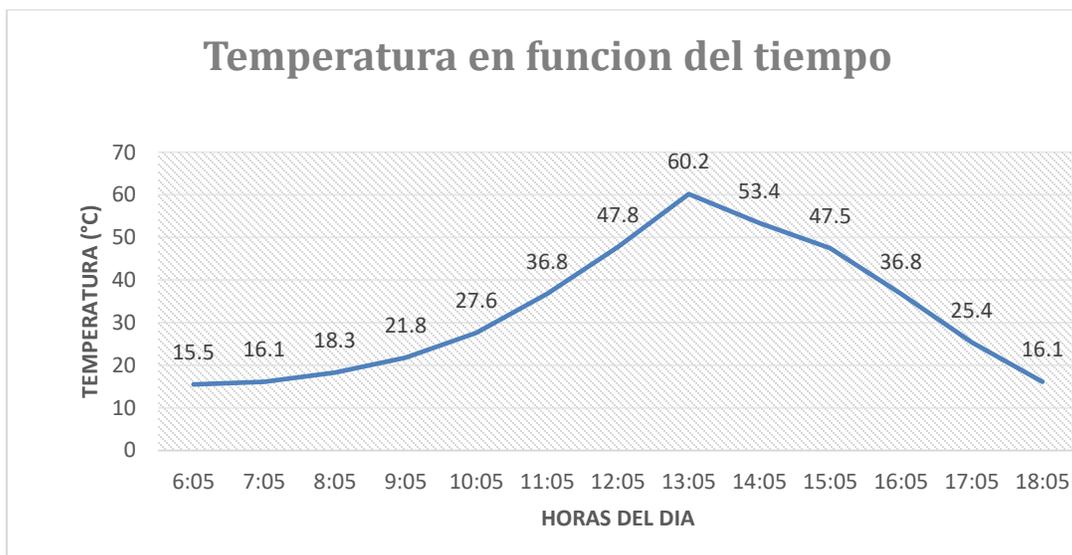
Los resultados de los ensayos realizados con el concentrador solar cilindro parabólico con espejos planos se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 10.** *Ensayos realizados*

Fecha	Hora de inicio	Hora final	$\Delta t$ (min)	T° inicial (°C)	T° final (°C)	$\Delta T^\circ$ (°C)
25/01/2022	6:05 a. m.	7:05 a. m.	60	15.5	16.1	0.6
25/01/2022	7:05 a. m.	8:05 a. m.	60	16.1	18.3	2.2
25/01/2022	8:05 a. m.	9:05 a. m.	60	18.3	21.8	3.5
25/01/2022	9:05 a. m.	10:05 a. m.	60	21.8	27.6	5.8
25/01/2022	10:05 a. m.	11:05 a. m.	60	27.6	36.8	9.2
25/01/2022	11:05 a. m.	12:05AM	60	36.8	47.8	11
25/01/2022	12:05 a. m.	1:05 p. m.	60	47.8	60.2	12.4
25/01/2022	1:05 p. m.	2:05 p. m.	60	60.2	53.4	-6.8
25/01/2022	2:05 p. m.	3:05 p. m.	60	53.4	47.5	-5.9
25/01/2022	3:05 p. m.	4:05 p. m.	60	47.5	36.8	-10.7
25/01/2022	4:05 p. m.	5:01 p. m.	60	36.8	25.4	-11.4
25/01/2022	5:05 p. m.	6:05	60	25.4	16.1	-9.3

Nota: Autores, 2022.

**Figura 42.** *Temperatura en función del tiempo*



Nota: Autores, 2022.

**Figura 43.** *Graduación de inclinación específica del reflector*



Nota: Autores, 2022.

### 4.3.2 Conclusiones sobre los ensayos

Con los ensayos realizados en el concentrador solar se puede observar, que el incremento de temperatura exponencialmente, se puede observar que las horas de mayor incremento de la temperatura es de las 10:05 AM hasta la 1:05 PM donde se pudo observar picos que estaban alrededor de los 60.2 °C, lo que se traduce a una mayor cantidad de radiación en los horarios del mediodía. Se infiere que esto ocurre debido a que el ángulo de incidencia es menor, los rayos inciden directamente tanto en el área reflectante como en el tubo receptor solar y por lo tanto se aprovecha más la energía solar.

### 4.4 Ensayo realizado CCP Tubo receptor térmico en un sistema de tubo de vidrio (tubo fluorescente reciclado) al vacío

Para este ensayo se realizó con tubos reciclados de lámparas fluorescentes de luz blanca.

**Figura 44.** *Tubo fluorescente*



Nota: Homecenter, s.f.

#### 4.4.1 Tubos fluorescentes

Los tubos fluorescentes se utilizan en instalaciones industriales, comerciales y públicas. Los tipos de tubo recto más comunes son los T5, T8 y T12. La letra T se utiliza delante del número para indicar que el foco fluorescente es de tipo tubo. Seguido de la letra, se encuentra el número que indica el diámetro del tubo medido en fracciones de 1 pulgada (2,5 cm). El diámetro de los tubos fluorescentes está medido en octavos de pulgada. Por ejemplo, un tubo T5 tiene un diámetro de 5/8 de pulgada (1,62 cm), un tubo T8 tiene 1 pulgada de diámetro, o 8/8, y un tubo T12 tiene un diámetro de 1 pulgada y media, es decir 12/8 (3,8 cm).

**Figura 45.** Clasificación de tubos fluorescentes



Nota: ap. electricistas.cl, s.f.

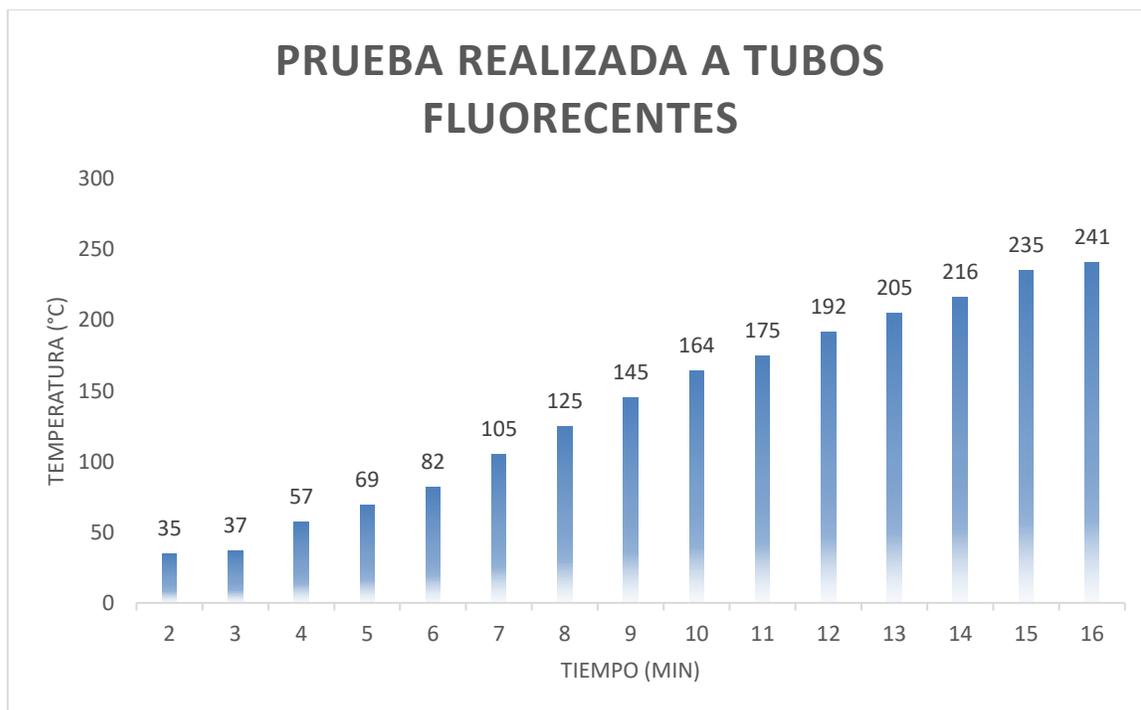
#### ***Características físicas de los tubos fluorescentes usados son de dos tipos T8 Y T 12***

A continuación, se hace la descripción de los tubos fluorescentes usados en los centros focales, además de ello se someten dichos tubos a pruebas de resistencia térmica se explicarán a continuación:

Se somete el tubo fluorescente ya limpio a una prueba térmica la cual arrojo el siguiente resultado que se ilustra a continuación:

Se somete los tubos fluorescentes a temperatura de 27 a 400 grados Celsius progresivamente, con una resistencia eléctrica durante 17 min, trascurrido este tiempo la temperatura del tubo alcanza los 241 °C y se estabiliza. este no tuvo deformación ni fracturas, siendo una prueba exitosa demostrando que es eficiente y una de las mejores opciones para ser utilizado en el proyecto. dichas pruebas se muestran a continuación.

**Figura 46.** Prueba realizada a tubos fluorescentes



#### 4.4.2 Pruebas de resistencia térmica a tubo de vidrio

**Figura 47.** Resistencia térmica a tubo de vidrio



Nota: Autores, 2022.

De la anterior prueba, se puede concluir que los tubos empleados para el receptor solar del CCP. Son de buena resistencia térmica lo cual brinda una viabilidad en la utilización de dichos tubos para el concentrador solar; al ser de buena resistencia térmica proporciona confiabilidad al mecanismo. Se puede observar que el lapso de 15 min la temperatura que logro fue 241 °C.

Son el mecanismo de aislante térmico, evitando pérdidas de temperatura por conducción y convección. Los tubos al vacío son tubos fluorescentes reciclados de las bombillas que ya no son útiles.

Dichos tubos son de vidrio que poseen una alta resistencia a la temperatura, al momento de la construcción del tubo receptor térmico el aire existente en el interior del tubo de vidrio es extraído para formar vacío. Esto con el fin de eliminar las pérdidas de calor por conducción y convección creando un excelente aislante térmico.

El tubo de vidrio al vacío es eficiente en muchos aspectos, la absorción, eficiencia térmica alta, el concentrador solar canal parabólico combinado con reflector de espejos planos aprovecha mejor la luz y los rayos solares desde la salida del sol hasta los últimos rayos solares en la hora de la tarde.

Los tubos de vidrio al vacío para el calentador solar están sometidos al vacío. Con funciones como:

- Evitar la pérdida de calor por conducción y convección
- Evita el congelamiento del fluido y evita altas temperaturas en el cristal exterior evitando accidentes.
- El vacío evita enfriamientos por climas adversos
- El recubrimiento en tubo de cristal también ayuda a mantener en buen estado de la capa de pintura aplicada en el tubo metálico.

#### 4.4.3 Pruebas de vacío a los tubos de cristal.

**Figura 48.** *Extracción del aire del tubo receptor solar.*



Nota: autores, 2022.

**Figura 49.** *Tubo receptor con sistema de tubo al vacío*



Nota: autores, 2022.

Esta configuración consiste en un tubo de cobre introducido en un tubo de vidrio, dicho tubo en los extremos estará sellado para poder someter el tubo a la extracción de aire. Dicho procedimiento se realiza con un vacuo-metro. Dichas pruebas se plasman continuación.

**Figura 50.** *Extracción del aire del centro focal sistema de tubo sencillo*



Nota: autores, 2022.

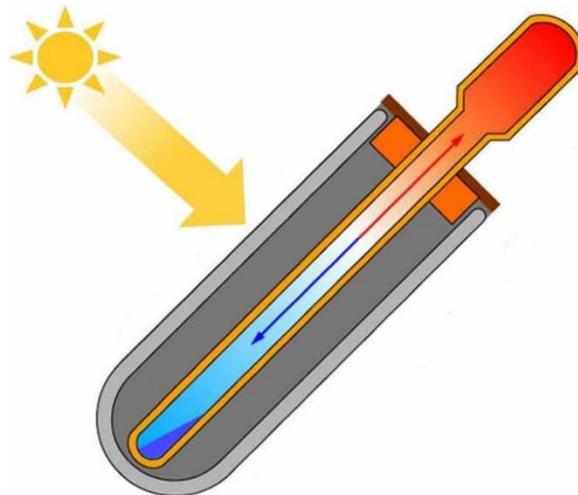
Se inició con una presión de 1014 (mbar) es la misma presión ambiental en (mbar) y logrando un resultado final de 60 (mbar). Se somete los tubos al vacío con la finalidad de la radiación solar sea mayor en el centro focal y a su vez estos rayos reflejan hacia el centro focal así:

**Figura 51.** *Extracción de aire tubo receptor solar.*



Nota: Autores, 2022.

**Figura 52.** *Radiación solar sobre centro focal*



Nota: [buildex.techinfus.com/es/](http://buildex.techinfus.com/es/), s.f.

#### 4.5 Pruebas realizadas al tubo receptor solar de la línea focal

Prueba a Tubos de cobre con los dos tipos de recubrimiento de vidrio (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado) Ensayo destructivo para verificar temperatura máxima a la cual se pueden exponer los tubos de vidrio, prueba de vacío y prueba de disipación de temperatura en el tiempo

##### 4.5.1 *Ensayo realizado al tubo receptor.*

Para el primer ensayo se somete el tubo receptor con aceite térmico en el interior y con recubrimiento de tubo de cristal sencillo, se expone a temperatura generada artificialmente con una resistencia eléctrica, con el fin de poder determinar la resistencia ultima a la cual puede llegar el recubrimiento en vidrio. y se toman las siguientes medidas con respecto al tiempo.

**Figura 53.** *Ensayo realizado al tubo receptor.*



Nota: autores, 2022.

**Tabla 11.** *Medidas de tiempo*

Fecha	Hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	17:16:37	18.58	21.26
2022/04/27	17:17:37	18.61	21.52
2022/04/27	17:18:37	18.64	21.6
2022/04/27	17:19:37	18.67	21.68
2022/04/27	17:20:37	18.69	21.87
2022/04/27	17:21:37	18.7	22.26
2022/04/27	17:22:37	18.72	22.9
2022/04/27	17:23:37	18.74	23.78
2022/04/27	17:24:37	18.75	24.92
2022/04/27	17:25:37	18.77	27.39
2022/04/27	17:26:37	18.78	29.18
2022/04/27	17:27:37	18.8	31.56
2022/04/27	17:28:37	18.81	34.72
2022/04/27	17:29:37	18.82	38.96
2022/04/27	17:30:37	18.83	44.29
2022/04/27	17:31:37	18.83	50.06
2022/04/27	17:32:37	18.85	55.72
2022/04/27	17:33:37	18.85	60.29
2022/04/27	17:34:37	18.86	64.63
2022/04/27	17:35:37	18.87	68.67
2022/04/27	17:36:37	18.87	68.3
2022/04/27	17:37:37	18.88	69.52
2022/04/27	17:38:37	18.89	70.48
2022/04/27	17:39:37	18.89	75.15
2022/04/27	17:40:37	18.9	79.84
2022/04/27	17:41:37	18.9	83.84
2022/04/27	17:42:37	18.91	83.98
2022/04/27	17:43:37	18.92	88.13

Fecha	hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	18:31:37	18.14	59.53
2022/04/27	18:32:37	18.1	58.27
2022/04/27	18:33:37	18.06	57.05
2022/04/27	18:34:37	18.02	55.87
2022/04/27	18:35:37	17.98	54.81
2022/04/27	18:36:37	17.94	53.77
2022/04/27	18:37:37	17.91	52.7
2022/04/27	18:38:37	17.87	51.8
2022/04/27	18:39:37	17.83	50.93
2022/04/27	18:40:37	17.79	50.08
2022/04/27	18:41:37	17.75	49.32
2022/04/27	18:42:37	17.72	48.58
2022/04/27	18:43:37	17.69	47.83
2022/04/27	18:44:37	17.66	47.16
2022/04/27	18:45:37	17.63	46.57
2022/04/27	18:46:37	17.6	45.94
2022/04/27	18:47:37	17.57	45.35
2022/04/27	18:48:37	17.54	44.82
2022/04/27	18:49:37	17.51	44.33
2022/04/27	18:50:37	17.48	43.8
2022/04/27	18:51:37	17.46	43.3
2022/04/27	18:52:37	17.44	42.9
2022/04/27	18:53:37	17.41	42.35
2022/04/27	18:54:37	17.39	41.8
2022/04/27	18:55:37	17.37	41.25
2022/04/27	18:56:37	17.35	40.7
2022/04/27	18:57:37	17.32	40.15
2022/04/27	18:58:37	17.31	39.6

Fecha	Hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	17:44:37	18.92	93.45
2022/04/27	17:45:37	18.94	98.28
2022/04/27	17:46:37	18.93	99.98
2022/04/27	17:47:37	18.93	101.36
2022/04/27	17:48:37	18.94	103.29
2022/04/27	17:49:37	18.94	105.04
2022/04/27	17:50:37	18.95	106.34
2022/04/27	17:51:37	18.95	107.15
2022/04/27	17:52:37	18.95	107.61
2022/04/27	17:53:37	18.95	107.61
2022/04/27	17:54:37	18.94	107.34
2022/04/27	17:55:37	18.94	107.05
2022/04/27	17:56:37	18.93	106.64
2022/04/27	17:57:37	18.92	106.45
2022/04/27	17:58:37	18.92	106.51
2022/04/27	17:59:37	18.91	107.08
2022/04/27	18:00:37	18.91	107.43
2022/04/27	18:01:37	18.9	107.64
2022/04/27	18:02:37	18.89	107.89
2022/04/27	18:03:37	18.89	108.06
2022/04/27	18:04:37	18.9	108.12
2022/04/27	18:05:37	18.9	108.27
2022/04/27	18:06:37	18.9	108.37
2022/04/27	18:07:37	18.9	108.46
2022/04/27	18:08:37	18.9	108.57
2022/04/27	18:09:37	18.91	108.37
2022/04/27	18:10:37	18.92	107.68
2022/04/27	18:11:37	18.91	105.22
2022/04/27	18:12:37	18.9	101.84

Fecha	hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	18:59:37	17.29	39.05
2022/04/27	19:00:37	17.26	38.5
2022/04/27	19:01:37	17.25	37.95
2022/04/27	19:02:37	17.23	37.4
2022/04/27	19:03:37	17.22	36.85
2022/04/27	19:04:37	17.2	36.3
2022/04/27	19:05:37	17.18	35.75
2022/04/27	19:06:37	17.17	35.2
2022/04/27	19:07:37	17.15	34.65
2022/04/27	19:08:37	17.14	34.1
2022/04/27	19:09:37	17.12	33.55
2022/04/27	19:10:37	17.12	33
2022/04/27	19:11:37	17.1	32.45
2022/04/27	19:12:37	17.09	31.9
2022/04/27	19:13:37	17.07	31.35
2022/04/27	19:14:37	17.06	30.8
2022/04/27	19:15:37	17.05	30.25
2022/04/27	19:16:37	17.04	29.7
2022/04/27	19:17:37	17.02	29.15
2022/04/27	19:18:37	17.01	28.6
2022/04/27	19:19:37	17	28.05
2022/04/27	19:20:37	16.99	27.5
2022/04/27	19:21:37	16.98	26.95
2022/04/27	19:22:37	16.97	26.4
2022/04/27	19:23:37	16.96	25.85
2022/04/27	19:24:37	16.96	25.3
2022/04/27	19:25:37	16.95	24.75
2022/04/27	19:26:37	16.95	24.2
2022/04/27	19:27:37	16.94	23.65

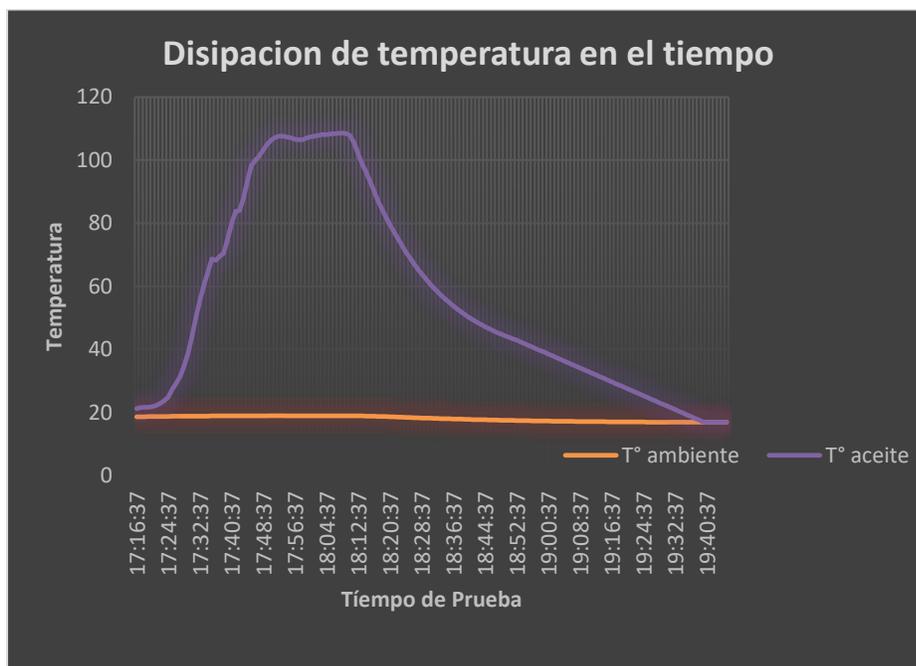
Fecha	Hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	18:13:37	18.88	98.62
2022/04/27	18:14:37	18.85	96.12
2022/04/27	18:15:37	18.83	93.01
2022/04/27	18:16:37	18.8	90.01
2022/04/27	18:17:37	18.76	87.06
2022/04/27	18:18:37	18.72	84.42
2022/04/27	18:19:37	18.68	81.9
2022/04/27	18:20:37	18.63	79.48
2022/04/27	18:21:37	18.6	77.21
2022/04/27	18:22:37	18.54	75.09
2022/04/27	18:23:37	18.49	73.01
2022/04/27	18:24:37	18.45	70.9
2022/04/27	18:25:37	18.4	69.05
2022/04/27	18:26:37	18.35	67.23
2022/04/27	18:27:37	18.31	65.45
2022/04/27	18:28:37	18.26	63.95
2022/04/27	18:29:37	18.22	62.4
2022/04/27	18:30:37	18.18	60.92

Fecha	hora	T° ambiente	T° aceite
2022/04/27	19:28:37	16.94	23.1
2022/04/27	19:29:37	16.94	22.55
2022/04/27	19:30:37	16.94	22
2022/04/27	19:31:37	16.93	21.45
2022/04/27	19:32:37	16.93	20.9
2022/04/27	19:33:37	16.93	20.35
2022/04/27	19:34:37	16.93	19.8
2022/04/27	19:35:37	16.94	19.25
2022/04/27	19:36:37	16.93	18.7
2022/04/27	19:37:37	16.93	18.15
2022/04/27	19:38:37	16.93	17.6
2022/04/27	19:39:37	16.94	17.05
2022/04/27	19:40:37	16.94	16.94
2022/04/27	19:41:37	16.94	16.94
2022/04/27	19:42:37	16.93	16.93
2022/04/27	19:43:37	16.94	16.94
2022/04/27	19:44:37	16.94	16.94
2022/04/27	19:45:37	16.95	16.95

Nota: Autores, 2022.

#### 4.5.2 Resultados de Ensayo al tubo receptor.

**Figura 54.** Disipación de temperatura en el tiempo



Nota: Autores, 2022.

Del ensayo anterior se puede concluir que en un corto periodo de tiempo la temperatura se eleva muy rápidamente llegando a un pico total de 108.57°C al llega a ese pico de temperatura se deja de suministrar calor y se apaga la resistencia eléctrica, manteniendo dicha temperatura durante 38 min, y disminuyendo la temperatura del aceite progresivamente hasta llegar a una temperatura final de 35 °C. tardando un tiempo de 90 min. Lo cual se da por entendido que el aceite es un fluido que posee una baja emisividad de temperatura. Lo cual es una buena característica del aceite térmico.

Las pérdidas térmicas se producen a lo largo del circuito por donde se mueve el fluido térmico, principalmente en los tubos absorbedores y los tramos de tuberías del campo de

colectores. En estos lugares, las pérdidas más importantes son las que se producen en el tubo absorbedor y son las siguientes:

- Conducción a través de los soportes del tubo.
- Pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo metálico a la cubierta de vidrio.
- Pérdidas por convección y radiación desde el tubo de cristal al ambiente.

Al observar la gráfica se puede evidenciar la rápida ganancia de temperatura con lo que se puede concluir que el aceite posee un alto índice de absorción y bajo nivel de emisividad.

- Prueba a Tubos de cobre con doble recubrimiento de vidrio (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado) Ensayo de exposición al ambiente y rangos máximos con radiación difusa.

#### **4.6 Prueba realizada al fluido calo-portador exposición al sol en ausencia de reflectores de espejos planos.**

Se realiza una prueba para el aceite calo-portador se expone al sol el concentrador solar canal parabólico en un lapso de 34 minutos con el fin de poder observar el comportamiento del fluido en exposición al sol, lo cuales arrojaron los siguientes resultados.

##### *4.6.1 Ensayo realizado al fluido calo-portador*

**Tabla 12.** *Ensayo realizado al fluido calo-portador*

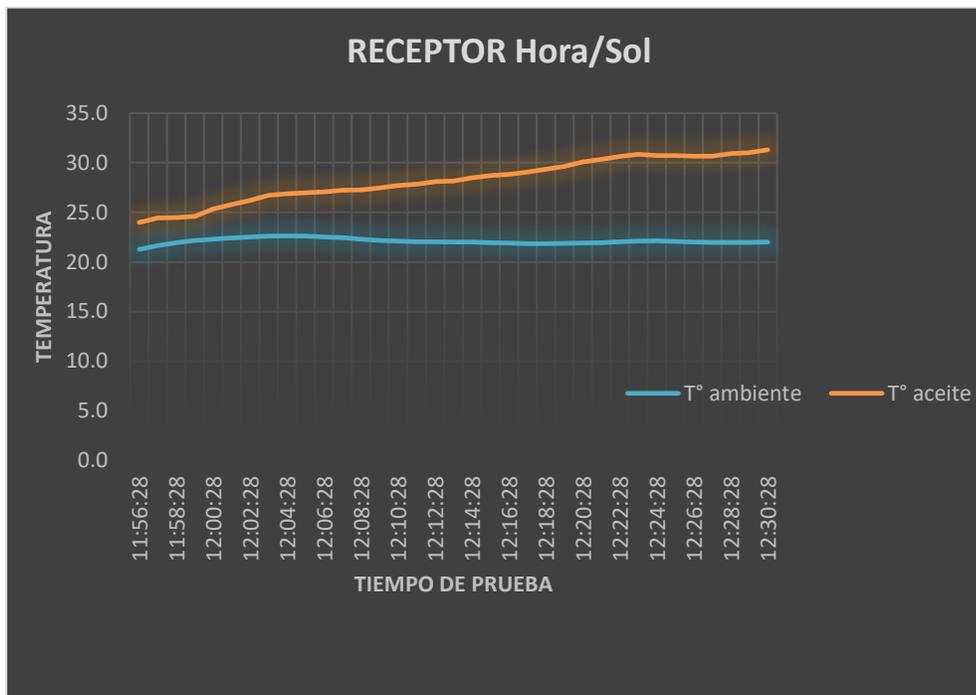
Fecha	hora	T°	
		ambiente	T° aceite
2022/04/29	11:56:28	21.3	24.0
2022/04/29	11:57:28	21.6	24.4
2022/04/29	11:58:28	21.9	24.5
2022/04/29	11:59:28	22.2	24.6
2022/04/29	12:00:28	22.3	25.3
2022/04/29	12:01:28	22.4	25.8
2022/04/29	12:02:28	22.5	26.2
2022/04/29	12:03:28	22.6	26.7

Fecha	hora	T°	
		ambiente	T° aceite
2022/04/29	12:04:28	22.6	26.9
2022/04/29	12:05:28	22.6	27.0
2022/04/29	12:06:28	22.5	27.1
2022/04/29	12:07:28	22.4	27.2
2022/04/29	12:08:28	22.3	27.3
2022/04/29	12:09:28	22.2	27.5
2022/04/29	12:10:28	22.1	27.7
2022/04/29	12:11:28	22.1	27.8
2022/04/29	12:12:28	22.0	28.1
2022/04/29	12:13:28	22.0	28.2
2022/04/29	12:14:28	22.0	28.5
2022/04/29	12:15:28	21.9	28.7
2022/04/29	12:16:28	21.9	28.8
2022/04/29	12:17:28	21.9	29.0
2022/04/29	12:18:28	21.9	29.4
2022/04/29	12:19:28	21.9	29.6
2022/04/29	12:20:28	21.9	30.1
2022/04/29	12:21:28	21.9	30.3
2022/04/29	12:22:28	22.0	30.6
2022/04/29	12:23:28	22.1	30.8
2022/04/29	12:24:28	22.1	30.7
2022/04/29	12:25:28	22.1	30.7
2022/04/29	12:26:28	22.0	30.7
2022/04/29	12:27:28	22.0	30.7
2022/04/29	12:28:28	22.0	30.9
2022/04/29	12:29:28	22.0	31.0
2022/04/29	12:30:28	22.0	31.3

Nota: Autores, 2022.

#### 4.6.2 Resultados de Ensayo al fluido calo-portador

**Figura 55.**Receptor Hora/Sol fluido calo-portador



Nota: Autores, 2022.

#### **Análisis del resultado.**

Con la prueba que se hace al fluido calo-portador se puede evidenciar figura 71 la rápida absorción que posee el aceite en exposición durante 33 min, se puede evidenciar que el aceite su temperatura inicial es de 24 °C y su temperatura máxima alcanzada es de 31.3 °C. con una temperatura ambiente de 22°C. cabe resaltar que dicha prueba solo tiene el fin de analizar el índice de absorbancia y emisividad del aceite.

Esta prueba que se realiza al fluido es en ausencia de los reflectores de espejos planos, con el fin de hacer una comparación y el papel que desempeñan los reflectores en el concentrador solar.

#### 4.7 Prueba al fluido calo-portador en tubo receptor de recubrimiento sencillo en presencia de los espejos planos.

Prueba a Tubos de cobre con los dos tipos de recubrimientos de cristal (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado) Ensayo de exposición al ambiente Tubos de vidrio montados en el Concentrador Solar Canal Parabólico y rangos máximos con radiación directa al aplicar los ángulos calculados en los Espejos planos auxiliares.

##### 4.7.1 Ensayos Realizado

**Tabla 13.** *Ensayo realizado*

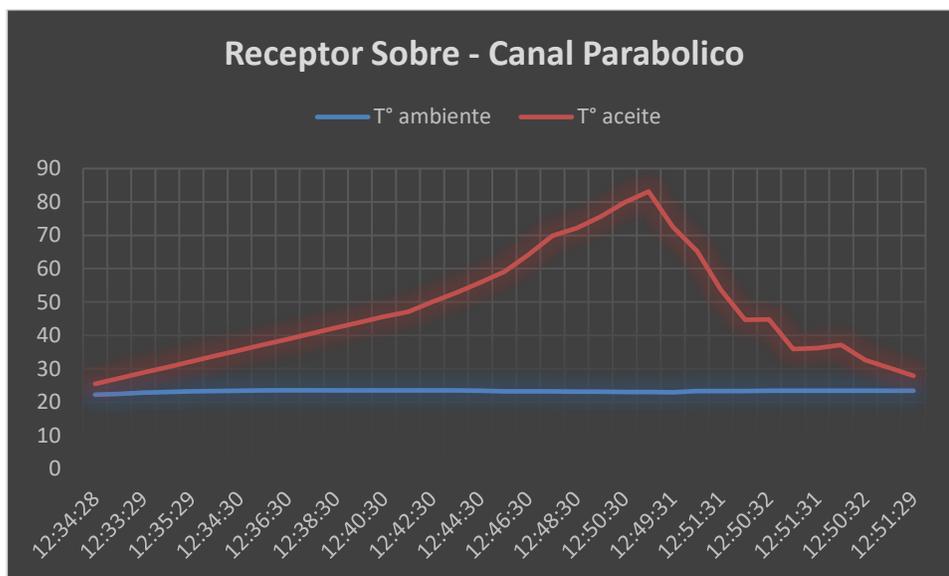
fecha	hora	T°	
		ambiente	T° aceite
2022/04/29	12:34:28	22.25	25.49
2022/04/29	12:35:28	22.53	27.17
2022/04/29	12:33:29	22.85	28.85
2022/04/29	12:34:29	23.10	30.53
2022/04/29	12:35:29	23.25	32.21
2022/04/29	12:33:30	23.38	33.89
2022/04/29	12:34:30	23.45	35.57
2022/04/29	12:35:30	23.52	37.25
2022/04/29	12:36:30	23.56	38.93
2022/04/29	12:37:30	23.56	40.61
2022/04/29	12:38:30	23.53	42.29
2022/04/29	12:39:30	23.50	43.97
2022/04/29	12:40:30	23.49	45.65
2022/04/29	12:41:30	23.49	47.12
2022/04/29	12:42:30	23.52	50.01
2022/04/29	12:43:30	23.54	52.76
2022/04/29	12:44:30	23.44	55.89
2022/04/29	12:45:30	23.26	59.13
2022/04/29	12:46:30	23.23	64.12
2022/04/29	12:47:30	23.24	69.9

fecha	hora	T°	
		ambiente	T° aceite
2022/04/29	12:48:30	23.19	72.15
2022/04/29	12:49:30	23.14	75.61
2022/04/29	12:50:30	23.09	79.89
2022/04/29	12:51:30	23.05	83.12
2022/04/29	12:49:31	23.00	72.51
2022/04/29	12:50:31	23.37	65.31
2022/04/29	12:51:31	23.38	53.63
2022/04/29	12:49:32	23.39	44.71
2022/04/29	12:50:32	23.40	44.78
2022/04/29	12:51:32	23.41	35.97
2022/04/29	12:51:31	23.42	36.21
2022/04/29	12:49:32	23.43	37.12
2022/04/29	12:50:32	23.44	32.633
2022/04/30	12:51:30	23.45	30.258
2022/04/31	12:51:29	23.46	27.883

Nota: Autores, 2022.

### 4.7.2 Resultados de Ensayo

**Figura 56.** Receptor Sobre – Canal



Nota: Autores, 2022.

De la anterior prueba se realiza con tubos receptores con recubrimiento de vidrio, de la gráfica anterior se puede concluir lo siguiente: en los 35 minutos que duró la prueba se inicia con una temperatura inicial de 25.49 °C, y termina con una temperatura final de 27.88°C.

El tope máximo de temperatura alcanzado fue de 83.12 con un tiempo transcurrido de 23 minutos desde el inicio de la prueba. De la anterior se concluye que el papel de los reflectores de espejos planos al Redireccionar los rayos solares a la superficie reflectante aporta mayor incidencia del sol y por ende una mayor eficiencia del concentrador solar.

### 4.8 Prueba realizada a fluido calo-portador en tubo receptor con doble recubrimiento en presencia de los reflectores de espejos planos

Prueba a Tubos receptor de cobre con doble recubrimiento de vidrio (Tubo de lámpara fluorescente reutilizado) como foco de colector solar de canal parabólico Ensayo de exposición al ambiente tiempo promedio 1 hora 13:15 a 14:15 uso de radiación directa con proyección de espejos planos.

4.8.1 *Ensayo realizado*

Dichos resultados se plasman a continuación:

**Tabla 14.** *Ensayo realizado*

Fecha	hora	T ambiente	T aceite	I [mv]	I w/m2
2022/05/06	13:15:01	16.3	16.7	-0.2	0.0
2022/05/06	13:16:01	16.4	16.8	0.0	0.0
2022/05/06	13:13:01	16.4	16.9	0.1	7.4
2022/05/06	13:14:01	16.5	17.1	0.2	17.8
2022/05/06	13:15:01	16.6	17.2	0.4	28.3
2022/05/06	13:16:01	16.6	17.3	0.5	38.7
2022/05/06	13:12:00	16.7	17.4	0.6	49.2
2022/05/06	13:13:00	16.8	17.6	0.8	59.6
2022/05/06	13:14:00	16.8	17.7	0.9	70.0
2022/05/06	13:15:00	16.9	17.8	1.1	80.5
2022/05/06	13:16:00	17.0	18.0	1.2	90.9
2022/05/06	13:13:00	17.0	18.1	1.3	101.4
2022/05/06	13:14:00	17.1	18.2	1.5	111.8
2022/05/06	13:15:00	17.2	18.3	1.6	122.2
2022/05/06	13:16:00	17.2	18.5	1.7	132.7
2022/05/06	13:12:01	17.3	18.6	1.9	143.1
2022/05/06	13:13:01	17.4	18.7	2.0	153.6
2022/05/06	13:14:01	17.4	18.9	2.2	164.0
2022/05/06	13:15:01	17.5	19.0	2.3	174.4
2022/05/06	13:16:01	17.6	19.1	2.4	184.9
2022/05/06	13:12:02	17.6	19.2	2.6	195.3
2022/05/06	13:13:02	17.7	19.4	2.7	205.8
2022/05/06	13:14:02	17.8	19.5	2.8	216.2
2022/05/06	13:15:02	17.8	19.6	3.0	226.6
2022/05/06	13:16:02	17.9	19.8	3.1	237.1
2022/05/06	13:12:03	18.0	19.9	3.3	247.5

Fecha	hora	T ambiente	T aceite	I [mv]	I w/m2
2022/05/06	13:13:03	18.0	20.0	3.4	258.0
2022/05/06	13:14:03	18.1	20.1	3.5	268.4
2022/05/06	13:15:03	18.2	20.3	3.7	278.8
2022/05/06	13:16:03	18.2	20.4	3.8	289.3
2022/05/06	13:12:04	18.37	20.62	3.23	245.3
2022/05/06	13:13:04	18.36	20.62	4.407	334.6
2022/05/06	13:14:04	18.38	20.7	5.181	393.4
2022/05/06	13:15:04	18.49	20.89	4.346	330.0
2022/05/06	13:16:04	18.64	21.13	3.948	299.8
2022/05/06	13:17:04	18.83	21.36	2.771	210.4
2022/05/06	13:18:04	19.04	21.53	2.827	214.7
2022/05/06	13:19:04	19.23	21.66	2.495	189.4
2022/05/06	13:20:04	19.37	21.73	1.944	147.6
2022/05/06	13:21:04	19.46	21.76	1.633	124.0
2022/05/06	13:22:04	19.53	21.78	1.574	119.5
2022/05/06	13:23:04	19.56	21.69	1.597	121.3
2022/05/06	13:24:04	19.55	21.61	1.561	118.5
2022/05/06	13:25:04	19.55	21.54	1.968	149.4
2022/05/06	13:26:04	19.55	21.49	2.123	161.2
2022/05/06	13:27:04	19.58	21.5	2.06	156.4
2022/05/06	13:28:04	19.62	21.52	1.656	125.7
2022/05/06	13:29:04	19.62	21.49	1.571	119.3
2022/05/06	13:30:04	19.66	21.43	1.608	122.1
2022/05/06	13:31:04	19.65	21.38	1.754	133.2
2022/05/06	13:32:04	19.67	21.27	2.121	161.0
2022/05/06	13:33:04	19.68	21.13	2.362	179.3
2022/05/06	13:34:04	19.68	21.03	2.675	203.1
2022/05/06	13:35:04	19.72	20.97	2.485	188.7
2022/05/06	13:36:04	19.75	20.93	2.372	180.1

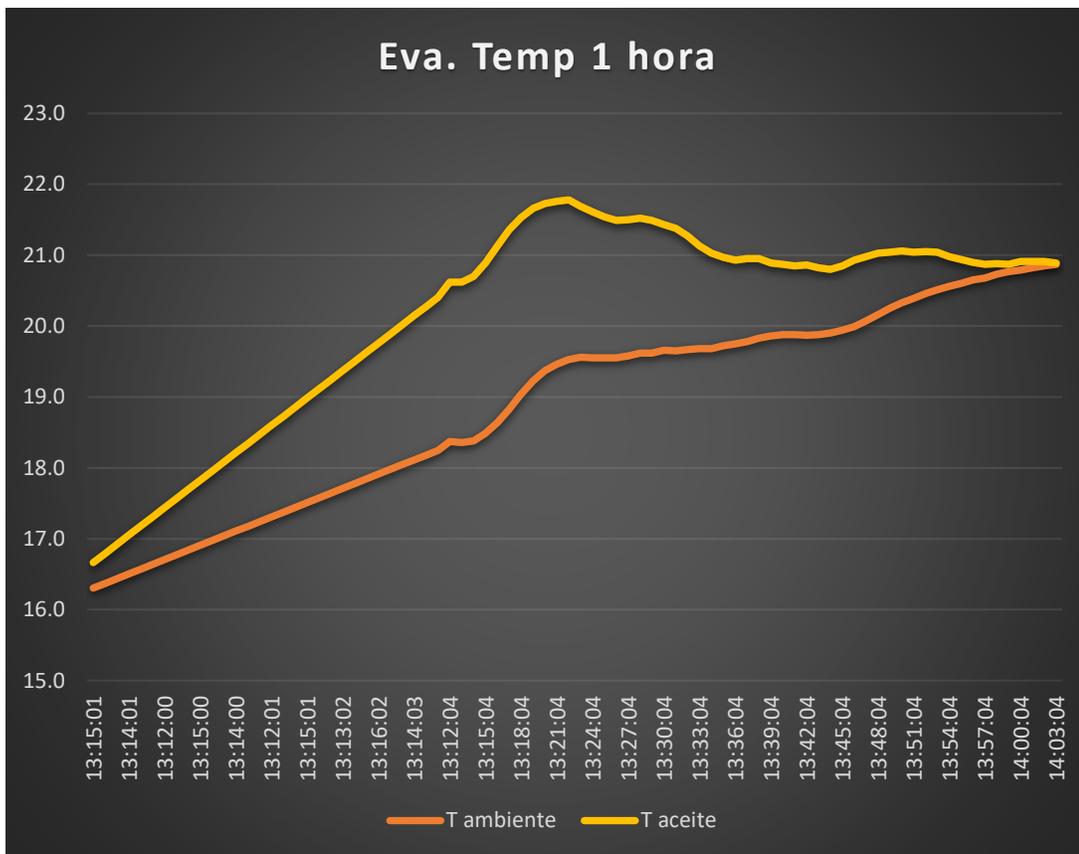
Fecha	hora	T ambiente	T aceite	I [mv]	I w/m2
2022/05/06	13:37:04	19.78	20.95	2.127	161.5
2022/05/06	13:38:04	19.83	20.95	1.834	139.3
2022/05/06	13:39:04	19.86	20.89	1.986	150.8
2022/05/06	13:40:04	19.88	20.87	2.282	173.3
2022/05/06	13:41:04	19.88	20.85	2.458	186.6
2022/05/06	13:42:04	19.87	20.86	2.373	180.2
2022/05/06	13:43:04	19.88	20.82	2.27	172.4
2022/05/06	13:44:04	19.9	20.8	2.134	162.0
2022/05/06	13:45:04	19.94	20.85	2.025	153.8
2022/05/06	13:46:04	19.99	20.93	2.027	153.9
2022/05/06	13:47:04	20.07	20.98	1.831	139.0
2022/05/06	13:48:04	20.16	21.03	2.104	159.8
2022/05/06	13:49:04	20.25	21.04	2.441	185.3
2022/05/06	13:50:04	20.33	21.06	2.402	182.4
2022/05/06	13:51:04	20.39	21.04	2.283	173.3
2022/05/06	13:52:04	20.46	21.05	2.447	185.8
2022/05/06	13:53:04	20.51	21.04	2.451	186.1
2022/05/06	13:54:04	20.56	20.98	2.335	177.3
2022/05/06	13:55:04	20.6	20.94	2.262	171.8
2022/05/06	13:56:04	20.65	20.9	2.193	166.5
2022/05/06	13:57:04	20.68	20.87	2.199	167.0
2022/05/06	13:58:04	20.73	20.88	2.327	176.7
2022/05/06	13:59:04	20.77	20.87	2.519	191.3
2022/05/06	14:00:04	20.79	20.91	2.579	195.8
2022/05/06	14:01:04	20.82	20.91	2.585	196.3
2022/05/06	14:02:04	20.85	20.91	2.21	167.8
2022/05/06	14:03:04	20.87	20.89	2.434	184.8
2022/05/06	14:04:04	20.88	20.89	2.324	176.5
2022/05/06	14:05:04	20.88	20.92	2.251	170.9

Fecha	hora	T ambiente	T aceite	I [mv]	I w/m2
2022/05/06	14:06:04	20.88	20.95	2.175	165.1
2022/05/06	14:07:04	20.91	20.96	2.116	160.7
2022/05/06	14:08:04	20.91	20.95	2.064	156.7
2022/05/06	14:09:04	20.9	20.98	2.015	153.0
2022/05/06	14:10:04	20.89	20.97	1.97	149.6
2022/05/06	14:11:04	20.85	20.94	1.929	146.5
2022/05/06	14:12:04	20.82	20.93	1.901	144.3
2022/05/06	14:13:04	20.79	20.94	1.869	141.9
2022/05/06	14:14:04	20.74	20.93	1.836	139.4
2022/05/06	14:15:04	20.68	20.87	1.831	139.0
2022/05/06	14:16:04	20.61	20.82	1.821	138.3
2022/05/06	14:17:04	20.53	20.75	1.787	135.7
2022/05/06	14:18:04	20.44	20.71	1.695	128.7
2022/05/06	14:19:04	20.35	20.65	1.584	120.3
2022/05/06	14:20:04	20.27	20.58	1.533	116.4
2022/05/06	14:21:04	20.2	20.53	1.501	114.0

Nota: Autores, 2022.

#### 4.8.2 Resultados de Ensayo

**Figura 57-** Eva. Temp 1 hora



Nota: Autores, 2022.

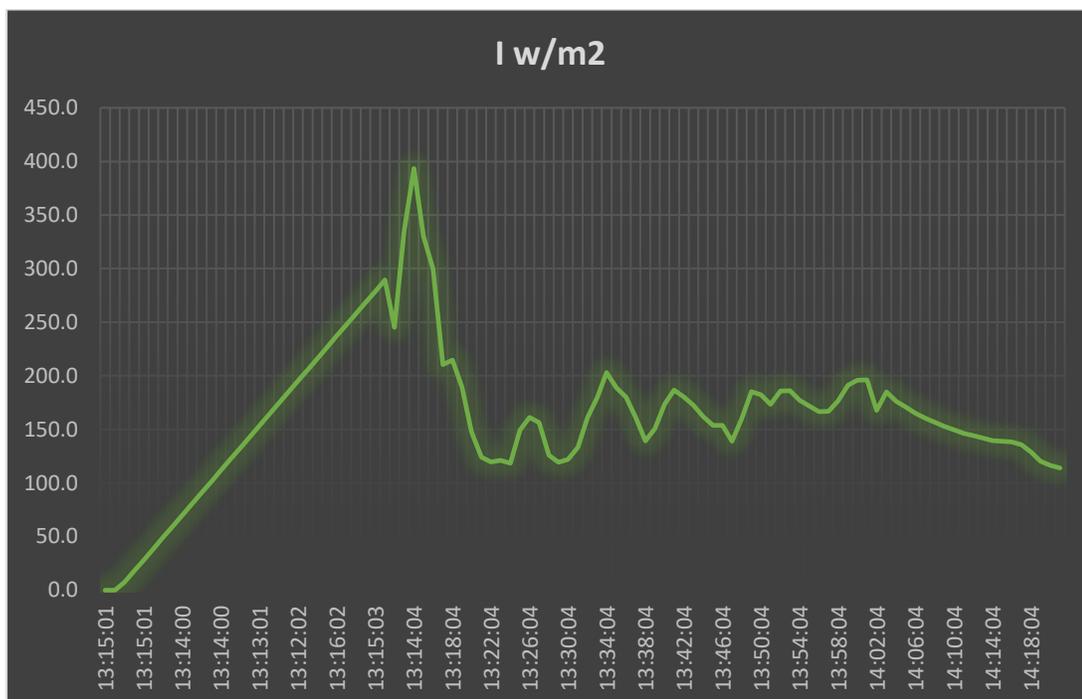
Al realizar el ensayo del concentrador solar con el sistema de tubo receptor de doble recubrimiento en vidrio se obtiene que:

La prueba comienza el día 2022/05/06 siendo la 1:12 pm con una temperatura ambiental de 16.3°C, con una temperatura inicial del aceite registrada en 16.7°C, la prueba tiene una duración de 66 minutos, pasado los 21 minutos del inicio de la prueba el aceite llega a su temperatura máxima registrada (temperatura pico) de 21.78°C, y una temperatura ambiente de 19.53°C. seguido de este la temperatura empieza a descender hasta los 20.53 trascurrido los 66 minutos.

De lo anterior se puede concluir que:

El aceite gano temperatura rápidamente solo pasado 21 min con una temperatura ambiental media de 19.53, cabe aclarar que el día de la prueba era un día de baja radiación un día nubado, pero que a pesar de ello el concentrador solar y más específicamente los reflectores cumplen con su función se refleja en los resultados obtenidos anteriormente.

**Figura 58**  $I \text{ w/m}^2$



Nota: Autores, 2022.

## 5. CUMPLIMIENTO DE REQUERIMIENTOS.

a continuación, se dará a conocer los requerimientos del proyecto de concentrador solar canal parabólico con sus respectivas soluciones a los mismos.

Los requerimientos técnicos que busca el concentrador solar cilindro-parabólico (CCP) para el desarrollo (diseño, construcción, ensayo) son:

1. El CCP debe ser más eficaz en el aprovechamiento de la energía solar, comparado con los concentradores cilindro-parabólicos comerciales.
  - Se realiza diseño y construcción de prototipo a escala de concentrador solar canal parabólico con reflector de espejos planos y se inicia pruebas donde no se logra demostrar el cumplimiento de eficacia ya que los resultados fueron variables y no concluyentes afectados por factores externos, como por ejemplo cambios climáticos que dificultaron la toma de pruebas.
2. Que los costos de construcción sean menores, que los gastos que conlleva obtener un CCP comercial.
  - Comercialmente se encuentra en el mercado concentradores solares evaluados entre US 2200 y US 5000 dólares que para ser más específicos sería entre 9 y 20 millones de pesos fuera de gastos de importación. Las características técnicas del más sencillo cuentan con un área de  $15.3 \text{ m}^2$  en un módulo con un peso de 400kg y logrando concentrar temperaturas de  $250^\circ \text{ C}$ .

**Figura 59.** Concentrador solar comercial 1

**Colectores Cilindro parabólicos colectores solares, energía solar Concentrador Parabólico**

Precio FOB de Referencia Conseguir Precio Último

**US\$ 2.750,00** / Pieza | 1 Pieza (Pedido Mínimo)

Proceso de dar un título: ISO

Concentrándose: Sí

Trabajar Rango de temperatura: Alta temperatura

Tipo: Parabolic Trough Solar Collector

Aplicación: Calentador de Agua, Energía Solar Térmica, Sistema de Aire Acondicionado, Concentrated Solar Power

Material de la tubería: Vidrio

Descripción de Producto | Información de la Compañía

**Información Básica.**

No. de Modelo	PT30	Open Distance	3m
Height	2.5m	Tube Length	2m
Paquete de Transporte	Cartons and Wooden Cases	Especificación	6*2.55m

Fuente: [https://spanish.alibaba.com/p-detail/CSP-60528384764.html?spm=a2700.7724857.normal\\_offer.d\\_image.7362307fXkfM8r](https://spanish.alibaba.com/p-detail/CSP-60528384764.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.7362307fXkfM8r)

**Figura 60** Concentrador solar comercial 2

CSP generador de vapor parabólico concentrador solar

1 - 5 juegos    6 - 59 Juegos    >= 60 juegos

**2.200,00 dóla...**    **2.000,00 dóla...**    **1.800,00 dóla...**

Beneficios: Reembolsos rápidos en pedidos de menos de 1000 USD [Reclamar ahora](#)

tipo:

uso:

Muestras: 8.000,00 US\$ / Juego | 1 Juego (Pedido mínimo) [Comprar muestras](#)

especificación: Logotipo personalizado ( Pedido mínimo: 30 Sets )  
Embalaje personalizado ( Pedido mínimo: 30 juegos )  
Más ▾

Transporte: Apoyo Transporte Marítimo

[Ver imagen más grande](#)

Fuente: [https://es.made-in-china.com/co\\_gaiasolar/product\\_Parabolic-Trough-Solar-Collector-Solar-Parabolic-Concentrator\\_esrhuyegy.html](https://es.made-in-china.com/co_gaiasolar/product_Parabolic-Trough-Solar-Collector-Solar-Parabolic-Concentrator_esrhuyegy.html)

- Al llevar el prototipo a cumplir estos parámetros se valoran costos de una unidad constructiva por 7 millones de pesos siendo esto un 40 % menor al valor de un concentrador comercial, garantizando su calidad y transporte ya que en cuanto al peso disminuiría en un 55 %

A continuación, se presenta la tabla de costos de la fabricación, materiales y mano de obra del prototipo del Concentrador solar canal parabólico con reflector de espejos planos

**Tabla 15.** Costos Prototipo

<b>Descripción Material</b>	<b>Costo</b>
Mano de Obra	\$ 200.000,00
Tubo de cobre ½ “	\$ 70.000,00
Tubo rectangular de aluminio	\$ 80.000,00
Láminas de acero inoxidable	\$ 150.000,00
Espejos acero inoxidable	\$ 80.000,00
Remaches	\$ 7.000,00
Soldadura	\$ 200.000,00
Base malla parabólica	\$ 50.000,00
brocas	\$ 10.000,00
Regletas metálicas guía	\$ 20.000,00
Pintura negra	\$ 10.000,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 877.000,00</b>
<b>VALOR COMERCIAL</b>	<b>\$ 950.000,00</b>

Nota: Autores, 2022.

3. El diseño del CCP combinado con los reflectores de espejos planos, permita y aprovechamiento máximo de la energía solar, en todas las horas del día (mañana, tarde), así mismo obtener la mayor independencia del dispositivo.

Según ensayos realizados se establece que se puede aprovechar mejor la energía generada por la luz solar, al ser proyectada por medio de los reflectores de espejo plano, al ser un diseño innovador donde el movimiento de los reflectores de espejos planos reemplaza el movimiento del área reflectante. Evitando así sistemas de gran complejidad como los seguidores que por su complejidad son mecanismos costosos, en comparación con los reflectores donde no se tendrán grandes mecanismos de movimiento.

4. El diseño permita facilitar su transporte y del mismo modo su instalación, sin necesidad de maquinaria de montaje (izaje).

En el momento del diseño del concentrador solar canal parabólico con reflector de espejo plano se estima que este pueda ser desarmable para así facilitar su transporte instalación y mantenimiento, manejando al igual materiales livianos como el aluminio y las láminas de acero inoxidable. En este proyecto se realizó un prototipo que al ser a escala no se vio la necesidad de que fuere desarmable ya que los espejos planos se pliegan a la estructura, dando así que su peso y tamaño no dificultan su transporte e instalación

5. Al realizar la comparación de beneficio-costos, el CCP combinado con reflector de espejos planos, debe ser más rentable que un CCP de tipo comercial.

se obtiene un ahorro al ya que para el movimiento de toda la estructura de un concentrador convencional son necesarios motores robustos con su respectiva tecnología para realizar el trabajo de seguidor solar, en este proyecto se reducen costos ya que no es necesario mover toda la estructura si no el trabajo lo realizaran los reflectores de espejos planos que por su peso no necesitarían motores tan grandes para realizar el trabajo de seguidor solar

## CONCLUSIONES

Con el desarrollo del proyecto se ha logrado alcanzar los objetivos propuestos en el mismo que consistió en el diseño, construcción y ensayos de un Concentrador Canal Parabólico con espejos móviles.

Se construyó este sistema mecánico del reflector solar, que es funcional y de costos accesibles.

Los ensayos ejecutados muestran que a lo largo del día la necesidad de irradiación solar varía a medida que pasa el tiempo, con ello se requerirá un sistema de seguidor solar para mejorar la eficiencia de Concentrador Canal Parabólico . y que en los horarios más alejados del mediodía se necesita una mayor cantidad de energía para lograr mantener la temperatura. Esto está dado porque el ángulo de incidencia de los rayos solares es mucho mayor que los horarios cercanos a las 12 PM. Lo anterior confirma la hipótesis que el uso de un Reflector

solar con espejos móviles, como el diseñado, se puede disminuir el ángulo de incidencia, como se demostró en los cálculos realizados y mostrados.

Al experimentar con diferentes receptores solares permite ver la eficiencia de cada uno de ellos, los tubos fluorescentes reciclados son una buena alternativa para poder reutilizar dichos desechos que aparentemente no tiene una segunda alternativa de reciclaje.

El aceite mineral es una buena alternativa para almacenar el calor que genera el concentrador solar, ya que posee características térmicas que ayudan a que el Concentrador Canal Parabólico sea más eficiente.

El sistema centro focal con doble tubo de vidrio es el más eficiente, ya que permite que el calor no se disipe con facilidad.

Al cubrir el centro focal con un tubo de vidrio y realizar vacío entre ellos las pérdidas por conducción, convección y radiación disminuye notablemente, por lo cual mejora notablemente su funcionamiento del concentrador solar.

Los rayos de sol que inciden sobre la superficie del espejo plano, se reflejan, y salen con un ángulo igual al ángulo con que habían incidido sobre el espejo. Al hacer que los rayos de varios espejos se dirijan hacia un punto, este recibirá varias veces la energía del sol y se calentará. Aumentando la eficiencia del concentrador solar.

Al incluir los espejos planos se aprovecha los rayos solares en casi todas las horas sol, ya que estos espejos planos redireccionan los rayos solares al centro focal, siendo útil en todo momento de radiación solar.

## Referencias Bibliográficas

- Acosta, A. (28 de febrero de 2014). *La mayor planta solar térmica del mundo está en el desierto de Mojave* [fotografía]. <https://www.abc.es/natural-energiasrenovables/20140228/abci-planta-solar-termica-mojave-201402281019.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>
- Amaraura. (2017). *Reflexion y refraccion de ondas*.
- Asociación de Energía Europea Solar Térmico. (13 de abril de 2016). *Flabeg fe's ultimate trough will be integrated in the first commercial solar power plant in the kingdom of saudi arabia* [Fotografía]. <https://www.estelasolar.org/flabeg-fes-ultimate-trough-will-be-integrated-in-the-first-commercial-solar-power-plant-in-the-kingdom-of-saudi-arabia/>
- Carta Gonzalez, J. A., Calero Pérez, R., Colmenares Santos, A., Castro Gil, M. A., y Collado Fernandez, E. (2012). *Centrales de energías renovables* (2° ed.)
- Certificación Energética. (04 de 04 de 2015). *Eficiencia Energética. Ahorro Energético*. <https://certificacionenergetica.info/posicionamiento-solar/>
- Diferenciador. (julio de 2015). *Ley de refracción* [esquema]. <https://www.diferenciador.com/reflexion-y-refraccion-de-la-luz/>
- Diferenciador. (julio de 2015). *Reflexión y refracción de la luz*. <https://www.diferenciador.com/reflexion-y-refraccion-de-la-luz/>
- Duffie, J. A., y Beckman, W. A. (2013). *Solar engineering of thermal processes*. Wiley & Sons, Inc.
- E+educaplus.org. (2016). *Reflexion de la luz* [esquema]. <https://www.educaplus.org/luz/reflexion.html>
- Educación bigbang. (junio de 2017). *Experimento de refracción con vaso y lapiz*. <https://educaconbigbang.com/2017/06/experimento-refraccion-vaso-lapiz/>

- Educapedia.org. (agosto de 2021). *Reflexión y refracción de luz* [esquema].  
<https://cursoparalaunam.com/reflexion-y-refraccion-de-luz>
- FISICUS. (29 de Marzo de 2016). *Principio de Huygens. Reflexión y refracción. Ley de Snell*. <https://somosfisicus.blogspot.com/2016/03/principio-de-huygens-reflexion-y.html>
- Futureenergy. (1 de marzo de 2014). *Solana, la planta termosolar de tecnología cilindro-parabólica más grande del mundo* [fotografía]. <https://futureenergyweb.es/solana-la-planta-termosolar-de-tecnologia-cilindro-parabolica-mas-grande-del-mundo/>
- Greenpeace. (febrero de 2016). *Energía solar térmica*. <http://archivo-es.greenpeace.org/espana/es/news/2016/Febrero/La-energia-solar-termoelectrica-podria-satisfacer-hasta-el-12-de-la-demanda-global-de-electricidad-en-el-ano-2050/>
- Helinoticias. (18 de junio de 2019). *La termosolar aumenta la potencia instalada acumulada en más del 11% hasta 5,5 GW en 2018* [gráfico]. <https://helinoticias.es/la-termosolar-aumenta-la-capacidad-global-acumulada-en-mas-del-11-hasta-55-gw-en-2018/>
- Hyperphysics. (2006). *Ley de reflexión*. *hyperphysics*. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/phyopt/Fermat.html>
- inTEC MOLDES Y MATICES. (s.f.). *Nuevas tecnologías para la utilización de la energía solar*. [http://www.moldesymatrices.com/Expoquimia\\_SCHOTT-Solar.htm](http://www.moldesymatrices.com/Expoquimia_SCHOTT-Solar.htm)
- Inzunza, J. C. (marzo de 2008). *Unidad 3. Radiación*. [Esquema *Distribución de la radiación en el sistema tierra – atmósfera*]. <http://www2.udec.cl/~jinzunza/biofisica/unidad3.pdf>
- Inzunza, J. C. (2003). *Radiación solar y terrestre. Ciencias integradas*.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems* (2<sup>nd</sup>.) ed. Elsevier.

- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar energy engineering: processes and Systems* (2nd ed.) Elsevier.
- Made-in-China. (julio de 2018). *Csp concentrador solar La energía solar colectores cilindro parabólicos*. [https://es.made-in-china.com/co\\_gaiasolar/product\\_Csp-Solar-Concentrator-Solar-Power-Parabolic-Trough\\_eoohryorg.html](https://es.made-in-china.com/co_gaiasolar/product_Csp-Solar-Concentrator-Solar-Power-Parabolic-Trough_eoohryorg.html)
- Roca, J. A. (13 de 06 de 2016). Las 10 plantas termosolares más grandes del mundo: EEUU y España se reparten el 90% del pastel. *El Periodico de la Energia.com*. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-plantas-termosolares-mas-grandes-del-mundo-eeuu-y-espana-se-reparten-el-90-del-pastel/>
- Sotysolar. (2020). *Seguidores solares: todo lo que necesitas saber*. <https://sotysolar.es/placas-solares/seguidores-solares>
- Toda Materia. (22 de diciembre de 2020). *Reflexión y refracción de la luz*. <https://www.todamateria.com/reflexion-y-refraccion-de-la-luz/>
- Valldoreix Greenpower. (julio de 2015). *Las ventajas de los seguidores solares*. <http://www.valldoreix-gp.com/las-ventajas-de-los-seguidores-solares/>
- Zarza, E., y Fernández Reche, J. (27 de 11 de 2017). *La emergencia de las fuentes renovables, las ventajas de la energía termo solar, la falta de decisión política y la necesidad de invertir en CyT*. (S. I. CONCENTRACIÓN, & U. D. PLATA, Entrevistadores)
- IDEAM. (2020). Radicación solar en Tunja . Obtenido de <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>.
- Valdespino—Diseño y construcción de un concentrador solar par.pdf. (s. f.-c). Recuperado 8 de junio de 2022, de <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/98807/Jessica%20Abigail%20Fern%C3%A1ndez%20Valdespino.%20Tesis%202018.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

maria Eugenia Morales Puentes. (s.f.). researchgate. Obtenido de [https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Mapa-de-isocontaminacion-de-la-ciudad-de-Tunja-con-la-ubicacion-de-las-25\\_fig3\\_274884257](https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Mapa-de-isocontaminacion-de-la-ciudad-de-Tunja-con-la-ubicacion-de-las-25_fig3_274884257)