

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL PARA LA  
GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA USANDO UN MOTOR STIRLING EN ZONAS RURALES  
DEL MUNICIPIO DE NOBSA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA

IVAN DARIO MORA PICO

ZAMIR FELIPE CABRA SANCHEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2021

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL PARA LA  
GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA USANDO UN MOTOR STIRLING EN ZONAS RURALES  
DEL MUNICIPIO DE NOBSA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA

IVAN DARIO MORA PICO  
ZAMIR FELIPE CABRA SANCHEZ

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero mecánico

Director:

YESID JAVIER RUEDA ORDOÑEZ

Ingeniero Mecánico, PhD en ingeniería Química

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE FISICOMECHANICAS

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

BUCARAMANGA

2021

## DEDICATORIA

*Al Dios todo poderoso y a la Virgen de Chiquinquirá, por iluminarme en los momentos más difíciles y por darme esperanza y felicidad en cada momento de mi vida.*

*A mis padres Yoly Fabiola Sánchez y Zamir Humberto Cabra, mis abuelos Audalinda Rodríguez, Carlos Arturo Sánchez y Betty Yolanda Norato, mi hermana Karen Natalia Cabra por su gran amor, su cariño, su apoyo incondicional, por estar en los momentos felices y difíciles y por confiar en mis capacidades.*

*A mis tías Janeth Sánchez y Martha Sánchez, mis primos Omar Caviéles, Carlos Mario Ramírez y Emília Arenas, mi sobrina Emma Romero y demás familia por creer en mí y por su gran apoyo y cariño.*

*A mis amigos y compañeros, especialmente Ivan Darío Mora, Dayan Sánchez, Jonny Sotelo y otros, por brindarme momentos felices.*

*A mi novia Laura Camila Velandia por apoyarme en los momentos más difíciles, por permitirme compartir momentos muy especiales junto a ella y por su gran amor y cariño.*

ZAMIR FELIPE CABRA SANCHEZ

## DEDICATORIA

*A Dios por guiar mi camino y darme la sabiduría, el entendimiento y el conocimiento para cumplir un anhelo más de mi corazón.*

*A mis padres Víctor Julio Mora, Ana Maylín Pico y a mi hermano Sebastián Mora por ser el apoyo incondicional y voz de aliento en todos los buenos y malos momentos.*

*A mis abuelos por darme la felicidad y la oportunidad de ser orgullo en sus corazones.*

*A mi familia por ser compañía y motivación.*

*A mi compañero Zamir Felipe Cabra por acompañarme en tantas luchas y victorias que fueron las más grandes experiencias en esta etapa.*

*A mi novia Valentina González por darme el amor, la compañía, la motivación y la felicidad en mi camino.*

*Y a cada una de las personas que hicieron parte de este bonito sueño hecho realidad, ser UIS.*

*IVAN DARIO MORA PICO*

## **AGRADECIMIENTOS**

*Al ingeniero Yesid Javier Rueda Ordoñez por su compañía, colaboración y formación en el transcurso del desarrollo del proyecto de grado*

*A la escuela de Ingeniería Mecánica por brindarnos la formación académica.*

*A todos nuestros compañeros y amigos de la Universidad, especialmente a Jonathán Jerez por su apoyo y amistad que hicieron posible este sueño.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>18</b>
<b>1 METODOLOGIA</b> .....	<b>20</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 Objetivo general.....	21
1.2.2 Objetivos específicos.....	21
1.3 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	22
<b>2 INFORMACION RECOPIADA</b> .....	<b>23</b>
2.1 CONCENTRACIÓN SOLAR.....	23
2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CONCENTRADORES SOLARES.....	23
2.2.1 Canal parabólico.....	24
2.2.2 Concentradores de fresnel.....	25
2.2.3 Sistemas de torre central.....	26
2.2.4 Concentrador solar dish stirling o tipo puntual.....	27
2.3 MOTOR STIRLING.....	28
2.3.1 Funcionamiento del motor stirling.....	28
2.3.2 Ciclo stirling.....	28
2.3.3 Clasificación de los motores stirling.....	29
2.4 GENERALIDADES TEORICAS.....	30
2.4.1 Energías alternativas.....	30
2.5 PARTES DEL CONCENTRADOR SOLAR DISH STIRLING.....	31
2.5.1 Colector.....	32
2.5.2 Receptor.....	32
2.5.3 Sistema de generación.....	33
2.6 RADIACION SOLAR.....	33
2.6.1 Aspectos básicos de la radiación solar.....	34
2.6.2 Distancia de la tierra al sol.....	35
2.6.3 Declinación solar.....	35

2.7	RADIACION EN COLOMBIA .....	36
2.7.1	Irradiación solar .....	37
2.7.2	Radiación en la zona de estudio e implementación del concentrador solar .....	37
2.8	CICLO STIRLING .....	38
2.9	PÉRDIDAS EN EL RECEPTOR .....	40
2.9.1	Pérdidas por radiación .....	41
2.9.2	Pérdidas por conveccion.....	41
2.10	EFICIENCIAS DEL SISTEMA.....	41
2.10.1	Eficiencia del colector .....	41
2.10.2	Eficiencia del receptor.....	42
2.10.3	Eficiencia del motor stirling .....	42
<b>3</b>	<b>DISEÑO METODOLOGICO .....</b>	<b>42</b>
3.1	DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD PARA EL CONCENTRADOR .....	42
3.1.1	Requerimientos del cliente.....	42
3.1.2	Requerimientos ingenieriles.....	43
3.1.3	Matriz de calidad delconcentrador solar .....	43
3.1.4	Planteamiento de alternativas.....	43
3.1.5	Evaluación de las alternativas.....	44
3.2	DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD PARA EL MOTOR.....	44
3.2.1	Requerimientos del cliente.....	44
3.2.2	Requerimientos ingenieriles.....	45
3.2.3	Matriz de calidad del motor stirling.....	45
3.2.4	Planteamiento de alternativas.....	45
3.2.5	Evaluación de alternativas .....	47
<b>4</b>	<b>GESTION DEL TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>48</b>
4.1	IDENTIFICACION DE LAS TAREAS .....	48
<b>5</b>	<b>DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL .....</b>	<b>48</b>
5.1	DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL.....	49
5.1.1	Geometría óptima del colector solar. ....	49
5.1.2	Pérdidas ópticas .....	61
5.1.3	Pérdidas térmicas en el receptor .....	67

5.2	DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA .....	80
5.2.1	Geometría óptima del colector solar a escala .....	81
5.2.2	Pérdidas ópticas en el colector solar a escala .....	81
5.2.3	Pérdidas térmicas en el receptor a escala .....	83
5.2.4	Potencia del motor stirling a escala .....	84
5.2.5	Diseño mecánico y análisis mef.....	85
5.3	CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA.....	96
5.3.1	Manufactura del paraboloide (colector).....	97
5.3.2	Manufactura del brazo base del motor.....	100
5.3.3	Manufactura de la barra soporte del colector.....	102
5.3.4	Manufactura de las articulaciones.....	102
5.3.5	Manufactura de la base del colector.....	103
<b>6</b>	<b>SELECCIÓN DEL MOTOR STIRLING.....</b>	<b>104</b>
6.1	ESPECIFICACIONES DEL MOTOR STIRLING SELECCIONADO.....	104
6.2	EFICIENCIA DEL MOTOR STIRLING SELECCIONADO.....	104
<b>7</b>	<b>COSTOS.....</b>	<b>106</b>
<b>8</b>	<b>PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>108</b>
8.1	INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA.....	108
8.1.1	Termocupla digital.....	109
8.1.2	Lubricante .....	110
8.1.3	Agua .....	110
8.1.4	Limpiador de espejos.....	111
8.2	PRUEBA CON MOTOR STIRLING .....	111
8.2.1	Procedimiento .....	111
8.2.2	De 0 al minuto 13.....	117
8.2.3	De 14 al minuto 37 .....	118
8.2.4	De 37 al minuto 38.....	118
8.3	PRUEBA CON AGUA .....	121
8.3.1	Procedimiento .....	121
8.3.2	De 0 al minuto 15.....	124
8.3.3	De 16 al minuto 23.....	124

8.4	TABLA DE COMPARACIONES DE PRUEBAS .....	126
8.5	EFICIENCIAS DEL SISTEMA A ESCALA .....	126
8.6	EFICIENCIAS DEL SISTEMA REAL .....	127
8.7	RESULTADOS TEORICOS CONTRA EXPERIMENTALES.....	127
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>128</b>
<b>10</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>130</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>132</b>
	<b>ANEXOS.....</b>	<b>134</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Concentrador Solar de canal Parabólico .....	24
Figura 2: Esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico .....	25
Figura 3: Esquema de funcionamiento de un concentrador de Fresnel .....	25
Figura 4: Concentrador Solar de Fresnel .....	26
Figura 5: Sistema de Torre Central .....	27
Figura 6: Concentrador Solar Tipo Puntual .....	27
Figura 7: Motor Stirling .....	28
Figura 8: Ciclo Stirling .....	29
Figura 9: Tipos de motor Stirling .....	30
Figura 10: Energías renovables .....	31
Figura 11: Espectro Electromagnético .....	34
Figura 12: Movimiento de la tierra alrededor del sol .....	35
Figura 13: Esfera celeste mostrando el movimiento del sol y el ángulo de declinación solar .....	36
Figura 14: Departamento de Boyacá .....	38
Figura 15: Compresión isotérmica del ciclo Stirling .....	39
Figura 16: Absorción de Calor Isocora del ciclo Stirling .....	39
Figura 17: Expansión isotérmica del ciclo Stirling .....	40
Figura 18: Cesión de calor isocora del ciclo Stirling .....	40
Figura 19: Motor Stirling Tipo Gamma. ....	46
Figura 20: Motor Stirling tipo Beta .....	46
Figura 21: Motor Stirling tipo Alfa .....	47
Figura 22: Geometría de los rayos solares respecto al concentrador solar tipo puntual .....	50
Figura 23: Trigonometría para linealizar la ecuación .....	52
Figura 24: Gráfica entre relación de concentración y temperatura recibida. ....	53
Figura 25: Gráfica del modelo matemático del colector .....	54
Figura 26: Gráfica del modelo matemático del colector con rayos solares .....	55
Figura 27: Tipo de focos .....	55
Figura 28: Modelo de la función del concentrador en Geogebra .....	56
Figura 29: Angulo de apertura de los rayos solares en el colector .....	58

Figura 30: Distribución de los rayos solares en el receptor.....	60
Figura 31: Orientación de los rayos solares en el concentrador .....	61
Figura 32: Distribución de la energía incidente para el reflector en función de la temperatura del receptor.....	61
Figura 33: Haz de luz reflejada a un determinado ángulo .....	62
Figura 34: Ángulo de incidencia.....	65
Figura 35: Corrección del ángulo de incidencia. ....	66
Figura 36: Interfaz de diseño .....	80
Figura 37: Articulación del concentrador.....	86
Figura 38: Barra soporte del colector.....	87
Figura 39: Análisis de tensiones en la barra soporte .....	87
Figura 40: Análisis de desplazamiento de la barra soporte.....	88
Figura 41: Análisis de factor de seguridad en la barra soporte .....	89
Figura 42: Brazo base del motor.....	90
Figura 43: Análisis de tensiones en el brazo base del motor .....	90
Figura 44: Análisis de desplazamientos en el brazo base motor .....	91
Figura 45: Análisis de factor de seguridad del brazo base motor .....	92
Figura 46: Base del colector .....	93
Figura 47: Análisis de tensiones de la base del colector .....	94
Figura 48: Análisis de desplazamientos de la base del colector .....	95
Figura 49: Análisis de factor de seguridad de la base del colector .....	96
Figura 50: Colector .....	97
Figura 51: Prueba de espejos .....	98
Figura 52: Proceso de pegue de espejos .....	98
Figura 53: Colector Terminado .....	99
Figura 54: Determinación del foco mediante Geogebra.....	100
Figura 55: Instalación del motor Stirling al brazo del colector .....	101
Figura 56: Instalación del motor al brazo finalizado .....	101
Figura 57: Barra soporte del colector.....	102
Figura 58: Articulación del concentrador solar .....	103
Figura 59: Base del concentrador solar .....	103

Figura 60: Base del concentrador .....	104
Figura 61: Termocupla digital.....	109
Figura 62: Multímetro .....	109
Figura 63: Lubricante .....	110
Figura 64: Prueba de Agua .....	110
Figura 65: Limpiador para espejos.....	111
Figura 66: Prueba de temperatura con Termocupla .....	112
Figura 67: Montaje del Concentrador.....	113
Figura 68: Prueba de temperatura con Termocupla .....	114
Figura 69: Radiación Incidente sobre El Receptor.....	114
Figura 70: Condiciones Ambientales .....	115
Figura 71: Radiación Solar .....	117
Figura 72: Gráfica del calentamiento del motor (Cilindro Caliente).....	119
Figura 73: Gráfica del calentamiento del motor (Diferencia de Temperaturas).....	119
Figura 74: Gráfica de arranque del Motor .....	120
Figura 75: Gráfica de frenado del Motor (Cilindro Caliente).....	120
Figura 76: Gráfica de frenado del Motor (Diferencia de temperaturas).....	121
Figura 77: Medición Temperatura del agua. ....	122
Figura 78: Prueba con recipiente y Agua.....	122
Figura 79: Gráfica de calentamiento del agua calor vs tiempo .....	124
Figura 80: Gráfica de calentamiento del agua temperatura vs tiempo.....	125
Figura 81: Gráfica de Retiro del Concentrador del Sol calor vs tiempo .....	125
Figura 82: Gráfica de Retiro del Concentrador del Sol temperatura vs tiempo.....	126
Figura 83: Eficiencias del sistema.....	128
Figura 84: Esfera Celeste .....	136
Figura 85: Eventos solares .....	136
Figura 86: Carta Solar Estereografica de 4°Latitud N.....	138
Figura 87: Posición respecto a la hora y fecha .....	139
Figura 88: Ángulo azimut del sol.....	140
Figura 89: Ángulo de altitud del sol.....	141
Figura 90: Trazos de ángulos en carta solar.....	142

Figura 91: Posición de Nobsa en Sun Surveyor Lite.....	143
Figura 92: Diagrama de posición del sol en Sun Surveyor Lite.....	143
Figura 93: Diagrama de posición del sol respecto al sur en Sun Surveyor Lite .....	144
Figura 94: Diagrama de posición del sol respecto al norte en Sun Surveyor Lite .....	144
Figura 95: Especificaciones de la posición del sol en Nobsa en Sun Surveyor Lite .....	145
Figura 96: Especificaciones de la posición del sol en Nobsa en Sun Surveyor Lite .....	145
Figura 97: Gráfica de absorptividad .....	146
Figura 98: Gráfica de la reflectancia en función del ángulo de incidencia para cada tipo de espejo	150
Figura 99: Interfaz del código del concentrador solar tipo puntual a escala.....	161
Figura 100: Interfaz del código del concentrador solar tipo puntual real .....	168

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Matriz de calidad del concentrador solar.....	43
Tabla 2: Criterios con mejor puntuación .....	44
Tabla 3: Evaluación de alternativas .....	44
Tabla 4: Matriz de calidad del Motor Stirling .....	45
Tabla 5: Criterios ganadores.....	47
Tabla 6: Evaluación de alternativas .....	48
Tabla 7: Especificaciones del motor Stirling seleccionado.....	104
Tabla 8: Costos de Construcción .....	107
Tabla 9: Costos adicionales.....	107
Tabla 10: Costo Total.....	108
Tabla 11: Condiciones iniciales para la prueba con el Motor .....	111
Tabla 12: Prueba con el motor Stirling .....	115
Tabla 13 Condiciones iniciales para la prueba con Agua .....	121
Tabla 14 Tiempos de prueba con el Agua. ....	123
Tabla 15 Comparación de pruebas.....	126
Tabla 16 Eficiencias del modelo a escala .....	126
Tabla 17 Eficiencias del sistema Real .....	127
Tabla 18 datos teóricos contra experimentales del diseño .....	128
Tabla 19 Diseño vs construcción. ....	129
Tabla 20 Recomendaciones. ....	130
Tabla 21: Comparación entre absorptividad y emisividad.....	147
Tabla 22: Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales.....	148
Tabla 23: Rango de los numeros de Reynols y Nusselt .....	149
Tabla 24: Correlaciones empíricas para Nusselt con relación al perfil del material .....	150
Tabla 25: Tabla de presiones del agua saturada .....	151
Tabla 26: Intensidad Recomendable según tipo de electrodo .....	152
Tabla 27: Especificaciones de lámina de aluminio calibre 10 .....	153
Tabla 28: Especificaciones del tubo de perfil cuadrado calibre 18.....	153
Tabla 29: Especificaciones del tubo de perfil circular calibre 18 .....	154

## LISTA DE ANEXOS

ANEXOS A. Geometría solar .....	135
ANEXOS B. Propiedades de los materiales.....	146
ANEXOS C. Propiedades térmicas (Nusselt y Reynolds).....	149
ANEXOS D. Propiedades del agua.....	151
ANEXOS E. Soldaduras .....	152
ANEXOS F. Especificaciones de los materiales .....	153
ANEXOS G. Código de diseño .....	155
ANEXOS H. Planos del concentrador solar tipo puntual a escala .....	168

## RESUMEN

**TÍTULO:** DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL PARA LA GENERACION DE ENERGIA ELECTRICA USANDO UN MOTOR STIRLING EN ZONAS RURALES DEL MUNICIPIO DE NOBSA EN EL DEPARTAMENTO DE BOYACA\*

**AUTORES:** IVAN DARIO MORA PICO, ZAMIR FELIPE CABRA SANCHEZ\*\*

**PALABRAS CLAVE:** Concentrador solar, motor Stirling, calor, potencia, temperatura, eficiencia.

### DESCRIPCIÓN:

El objetivo de este proyecto fue el diseño y construcción de un concentrador solar tipo puntual para la generación de energía eléctrica usando un motor Stirling en zonas rurales del municipio de Nobsa en el departamento de Boyacá, se construyó un modelo a escala del concentrador solar con las siguientes especificaciones: Un colector parabólico con espesor de: 3 [mm], diámetro de 60 [cm], una base de: 60x60 [cm<sup>2</sup>] y unas dimensiones generales de: 1 [m] de alto, 60 [cm] de largo, 60 [cm] de ancho.

El diseño metodológico del concentrador solar tipo puntual se realizó mediante el uso de un interfaz en EES que nos permitió obtener las dimensiones para la construcción del modelo a escala y el diseño del modelo real. Para esto, se tuvo en cuenta parámetros enfocados en la transferencia de calor, geometría y termodinámica. Estos permiten el dimensionamiento total del concentrador solar. Por otra parte se estudió el ciclo Stirling aplicado al funcionamiento del motor en donde se obtuvo la potencia presentada en los objetivos. Para comprobar los valores se realizaron dos pruebas en el lugar establecido; en la primera comprobando el funcionamiento del motor obteniendo una potencia de salida de aproximadamente 6 W y en la segunda prueba demostrando por medio de un recipiente con agua altos índices de calor. Por medio de estas pruebas se obtuvo una eficiencia suficiente para el funcionamiento del modelo real.

---

\* Trabajo de grado.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN AND CONSTRUCTION OF A POINT-TYPE SOLAR CONCENTRATOR FOR GENERATION OF ELECTRIC ENERGY USING A STIRLING ENGINE IN RURAL AREAS OF MUNICIPALITY OF NOBSA, DEPARTMENT OF BOYACÁ\*

**AUTHOR:** IVAN DARIO MORA PICO, ZAMIR FELIPE CABRA SANCHEZ\*\*

**KEY WORDS:** Solar concentrator, Stirling engine, heat, power, temperature, efficiency.

### DESCRIPTION:

The objective of this project was to design and build a point-type solar concentrator for generation of electrical energy using a Stirling engine in rural areas of the municipality of Nobsa, department of Boyacá. A scale model of the solar concentrator was built with the following specifications: A parabolic collector with a thickness of 3 mm, diameter of 60 cm, a base of 60x60 cm<sup>2</sup> and overall dimensions of 1 m high, 60 cm long, 60 cm wide.

The methodological design of the point-type solar concentrator was performed using an EES interface that allowed us to get dimensions for the construction of the scale model and the design of the real model. For this purpose, parameters focused on heat transfer, geometry and thermodynamics, these allow the total sizing of the solar concentrator. In addition, the Stirling cycle applied to the operation of the engine is studied where the power presented in the objectives was obtained. To check the values, two tests were carried out at the established location; in the first one, checking the performance of the engine, obtaining an output power of 6 W approximately, and the second test demonstrating high rates of heat in a container of water. Through these tests, sufficient efficiency was obtained for operation of the real model.

---

\* Degree work \*

\*\* Faculty of Physico-mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering. Director: PhD. Yesid Javier Rueda Ordoñez

## INTRODUCCIÓN

Con el pasar de los tiempos el desarrollo y el progreso de la humanidad han generado cambios que permiten que la calidad de vida mejore sin importar en ocasiones que tan difíciles puedan ser las consecuencias, sin embargo, la generación de nuevas formas de vida abre al ser humano la Necesidad de crear cosas nuevas día a día y así contribuir con el avance de nuevas formas de ciencia, energía, tecnología, etc.

Actualmente existen diferentes formas de extraer energía de nuestro planeta, algunas pueden generar daños irreversibles, pero hay otras que pueden contribuir mucho con la muy mínima conservación que se tiene actualmente del medio ambiente.

Es importante resaltar que las formas de energía que más se usan en la actualidad como la explotación de carbón, zonas petroleras, fuentes de generación por medio de hidroeléctricas entre otras, presentan una muy excelente eficiencia y una óptima funcionalidad en cada uno de sus usos. Por otra parte, resulta en muchas ocasiones ser mucho más económica la forma en se genera energía debido que la generación como el consumo son altos y así es posible crear una cadena económica que permite sostener las formas de producción energética.

Actualmente, se han abierto caminos que llevan a la concientización de la humanidad y así intentar de múltiples formas satisfacer sus necesidades con la creación de fuentes de energías renovables, pero, ¿cómo se definen estas energías? Como su nombre lo indica, las energías renovables son fuentes Naturales inagotables que permiten la creación de energía de forma sana, pro ambiental y segura para la sociedad. Muchas de estas formas tienen un aprovechamiento bastante alto y es ahí donde se enfoca y se orienta este proyecto con el fin demostrar el funcionamiento y aprovechamiento de una de las múltiples formas de energía aprovechable y renovable.

Con el fin de mitigar los daños ambientales que se generan diariamente en nuestro planeta, hemos incentivado en el mundo de la energía solar, fuente que día a día ha tomado mayor fuerza por la excelente eficiencia y Constancia que presenta en los últimos tiempos.

La forma en la que hemos aprovechado la energía está representada en el uso de un concentrador solar a escala que nos permitirá dirigir los rayos solares hacia un motor Stirling tipo gamma, cuya función será transformar la energía térmica o calorífica a energía eléctrica. Su objetivo es abastecer

hogares y Locales en donde se pueda realizar instalaciones de este tipo o donde la energía tradicional no ha podido llegar.

De esta manera se estará contribuyendo con el cuidado del medio ambiente y de igual forma se estará aplicando de manera objetiva y contributiva la ingeniería en procesos de generación en donde los demás Campos no han podido dar solución.

# 1 METODOLOGIA

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo se ha visto actualmente y desde hace muchos años un problema de gran magnitud, el cual consiste en la explotación de los recursos naturales para el beneficio del ser humano, pero, ¿que son los recursos naturales?, son aquellos que ofrece el planeta sin la necesidad de intervención humana y ¿Qué es la explotación de los recursos naturales?, “(...)es una serie de actividades de extracción y procesamiento de la materia prima disponible en la naturaleza por parte del ser humano, con fines de obtención de energía y de manufactura de insumos industriales” (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020).

Entre los recursos más importantes, se encuentran el agua y el carbón, la explotación de éstos se evidencia por todo el mundo, sobre todo para la generación de energía el cual se usa para los servicios básicos de las ciudades.

En la actualidad se ha implementado diversas maneras de generar energía eléctrica mediante métodos convencionales ocasionando un impacto en el medio ambiente y en la salud de quienes habitan el planeta. En este sentido, se debe promover la energía renovable para mejorar las condiciones de vida no solo para la humanidad sino para todas las especies perjudicadas.

La solución más viable a este problema es el uso de la energía solar por medio de un colector tipo puntual, que permita aprovechar las energías renovables como una alternativa más frente a las problemáticas ambientales y que a su vez, disminuya el uso de los métodos convencionales que son el factor principal del daño ambiental que se presenta actualmente.

## 1.2 OBJETIVOS

1.2.1 **Objetivo general** Contribuir con el mejoramiento, progreso y cuidado del medio ambiente aprovechando la radiación solar como fuente de energía mediante el diseño y construcción de un concentrador solar tipo puntual para la generación de energía eléctrica usando un motor Stirling para las zonas rurales del departamento de Boyacá.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- ❖ Diseñar un concentrador solar tipo puntual que genere una potencia de hasta 1.5 kW.
- ❖ Demostrar mediante un modelo funcional con una potencia de salida de hasta 6 Watts el funcionamiento del diseño en detalle del concentrador solar tipo puntual.
- ❖ Seleccionar un motor Stirling que cumpla con las especificaciones de potencia eléctrica requerida.
- ❖ Construir un colector solar funcional a escala que le suministre el calor necesario al motor Stirling para generar una potencia de salida de hasta 6 Watts.
- ❖ Validar el diseño propuesto para evaluar las variables tales como:
  - Radiación Solar recibida por el concentrador solar.
  - Temperatura máxima recibida por el motor Stirling.
  - Potencia eléctrica de salida.

Que influyen en el funcionamiento del concentrador solar a través de la construcción del dispositivo.

### **1.3 JUSTIFICACION DEL PROBLEMA**

Realizar el diseño de un concentrador solar para la generación de energía eléctrica es una alternativa que permite aprovechar la energía renovable al máximo con un costo mínimo debido a que estamos en una época donde el cuidado del medio ambiente debe ser una prioridad desde la perspectiva de la ingeniería. El dispositivo solar evita el uso de equipos tradicionales contribuyendo así con el mejoramiento y progreso de las reservas naturales.

Actualmente en las zonas rurales del municipio de Nobsa del departamento de Boyacá el consumo de energía eléctrica convencional sumado a la alta explotación minera afectan directamente la economía y la salud de la población, es por esto que la implementación del concentrador solar es una posible solución para disminuir los altos índices de contaminación en la zona.

De esta forma el uso del concentrador solar en una vivienda y en zonas aledañas al municipio puede llegar a disminuir un 0,6736% del consumo de energía eléctrica convencional por mes.

## 2 INFORMACION RECOPIADA

### 2.1 CONCENTRACIÓN SOLAR

En la actualidad existen dos maneras de aprovechar la energía solar las cuales son, de conversión fotovoltaica y de conversión fototérmica, estas tecnologías se diferencian en el método de transformación de la energía. El presente documento se enfoca en los colectores solares fototérmicos los cuales transforman la energía solar en energía térmica.

El funcionamiento de los concentradores por conversión fototérmica es similar al de un intercambiador de calor, su objetivo es incrementar el flujo de radiación solar absorbida por el colector con el fin de que el calor pase por un fluido térmico para alcanzar temperaturas de hasta 2000°C.

Los concentradores solares tienen variedad de aplicaciones y dependen del sistema de operación, por ejemplo, los colectores solares planos están adecuados para implementar temperaturas de hasta 100°C en un fluido, pero cuando se requiere una temperatura mucho mayor, la geometría de estos debe ser de forma parabólica para concentrar mayor radiación solar; comúnmente esta tecnología es usada para la producción de electricidad.

### 2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS CONCENTRADORES SOLARES.

Existen diferentes maneras de clasificar los concentradores solares, su diseño depende de dos factores principales los cuales son, la forma en la que capta la radiación solar y el uso final del calor obtenido, pero su agrupación puede ser por su tipo de enfoque ya sea puntual o lineal, también pueden depender de si son sistemas reflectores o refractores, si son con seguimiento o no y por último la temperatura de operación en las que pueden funcionar estos sistemas. En el presente documento los concentradores solares se clasificarán respecto al rango de temperaturas de operación. (Laboratorio Nacional de Sistemas de Concentración Solar y Química Solar, 2015)

A continuación, se presentarán los tres rangos de temperatura en los que pueden operar los concentradores solares.

- a. **Sistemas de baja temperatura:** Son los sistemas que operan entre 40°C y 80°C y son implementados en aplicaciones domésticas, se usa comúnmente para el calentamiento de agua.

- b. **Sistemas de media temperatura:** Su funcionamiento se centra en un rango de temperatura de entre 80°C y 400°C, tiene variedad de aplicaciones, pueden operar para sistemas de aire acondicionado, refrigeración y calentamiento de fluidos para uso industrial.
- c. **Sistemas de alta temperatura:** Se centran en la generación de energía eléctrica y operan en un rango de temperatura de más de 400°C hasta 2000°C.

Existen cuatro tipos de tecnologías que se distribuyen dentro de estos rangos de temperatura de operación las cuales son presentadas a continuación.

**2.2.1 Canal parabólico** Se conoce como colector solar cilindro parabólico (CPP), puede operar a una temperatura mayor de 100°C y tiene la capacidad de producir electricidad mediante el ciclo Rankine de agua vapor. Se divide entre 3 subsistemas: el sistema de captación o concentración, sistema de generación de vapor y el sistema de potencia y se diferencia en el diseño puesto que está conformado por un canal donde su perfil tiene forma de parábola, un eje focal extendido por todo el canal y un tubo receptor que contiene un fluido térmico, cabe resaltar que el tubo debe estar sobre la línea focal. Una desventaja que tiene esta tecnología es que no se ha podido extender comercialmente por ser bastante costoso para la producción de electricidad.

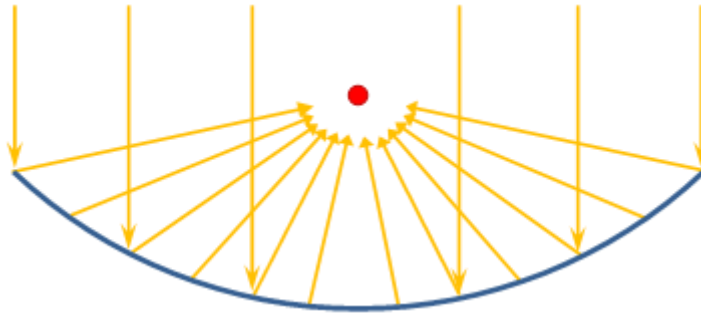
*Figura 1: Concentrador Solar de canal Parabólico*



*Fuente: Laboratorio Nacional de Sistemas de concentración Solar y Química Solar*

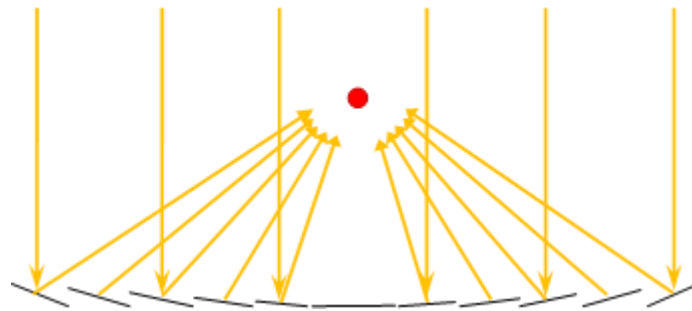
**2.2.2 Concentradores de fresnel** Es similar a un concentrador de canal parabólico, pero se diferencia en que son una serie de segmentos divididos colocados en una superficie plana con ángulos distintos para concentrar la radiación en un mismo foco.

*Figura 2: Esquema de funcionamiento de un concentrador de canal parabólico*



*Fuente: Laboratorio Nacional de Sistemas de concentración Solar y Química Solar*

*Figura 3: Esquema de funcionamiento de un concentrador de Fresnel*



*Fuente: Laboratorio Nacional de Sistemas de concentración Solar y Química Solar*

La distribución y geometría de esta planta tiene como ventaja el costo en cuanto a los motores, la construcción y el sistema mecánico puesto que es más barato en comparación con un concentrador solar con canal parabólico.

Figura 4: Concentrador Solar de Fresnel



Fuente: Laboratorio Nacional de Sistemas de concentración Solar y Química Solar

**2.2.3 Sistemas de torre central** También conocidos como CRS (Central Receiver System) es un sistema en el cual puede operar con un rango de temperatura de más de 250°C hasta 1000°C concentrando la luz solar hasta 600 veces. Es una planta que cuenta con cientos o miles de espejos que tienen un sistema de seguimiento del sol en dos ejes (heliostatos) ya que su objetivo es aprovechar la radiación solar al máximo y enfocarlo en un mismo foco que se encuentra en una torre a una altura considerable con el fin de que no haya interferencia de ninguna sombra entre heliostatos.

*Figura 5: Sistema de Torre Central*



*Fuente: Laboratorio Nacional de Sistemas de concentración Solar y Química Solar*

**2.2.4 Concentrador solar dish Stirling o tipo puntual** El Dish Stirling o concentrador de discos parabólicos, es una tecnología que comúnmente se aplica para la producción de energía eléctrica. Una de las ventajas que tiene es que en regiones donde la densidad de la población es baja y dispersa, es decir, en zonas rurales, su rentabilidad es mucho mayor que cualquier sistema de electricidad convencional gracias a su independencia, tamaño y modularidad. Esta tecnología está conformada por espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling. Estos motores deben estar situados en la zona focal del sistema con el fin de transformar la radiación solar en electricidad.

*Figura 6: Concentrador Solar Tipo Puntual*



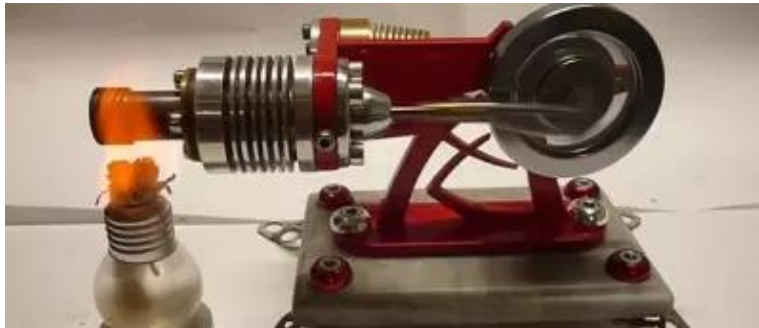
## 2.3 MOTOR STIRLING

Cuando hablamos de un motor Stirling nos referimos a un tipo de motor cuyo funcionamiento está basado en parámetros térmicos. En 1816, Su creador Robert Stirling consiguió un motor menos peligroso que la máquina de vapor, permitiendo así que su implementación en la era de la revolución industrial fuera todo un éxito.

**2.3.1 Funcionamiento del motor Stirling** El funcionamiento de un motor Stirling está basado en la compresión y expansión cíclica de un fluido de trabajo, en este caso aire, a diferentes niveles de temperatura.

Al calentar el cilindro, conseguimos que el aire contenido en este aumente su volumen y sea posible aprovechar el movimiento del pistón, de igual manera, al enfriar el aire contenido dentro del cilindro, reducirá su volumen y el pistón volverá a su posición inicial.

Figura 7: Motor Stirling



Fuente: Energía Solar

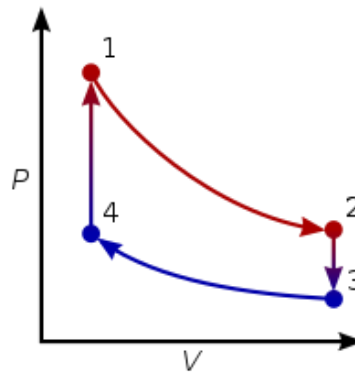
El motor Stirling se clasifica dentro de las máquinas de combustión externa ya que la transferencia de calor con el gas de trabajo, se hacen a través de la pared del motor, mientras que, en un motor de combustión interna, la entrada de calor proviene de generar una combustión dentro del cuerpo del fluido de trabajo. (Energía solar, 2016)

**2.3.2 Ciclo Stirling** El ciclo ideal del motor Stirling, consiste en 4 procesos:

- 1-2 expansión isotérmica del fluido de trabajo con el suministro de calor desde el calentador. Expansión a temperatura constante.
- 2-3 eliminación de calor isocórico del fluido de trabajo al regenerador. Proceso a volumen constante.

- 3-4 compresión isotérmica del fluido de trabajo con eliminación de calor al refrigerador.
- 4-1 calentamiento isocórico del fluido de trabajo con el suministro de calor desde el regenerador. Proceso a volumen constante. En este punto es donde el gas está a menor temperatura.

Figura 8: Ciclo Stirling

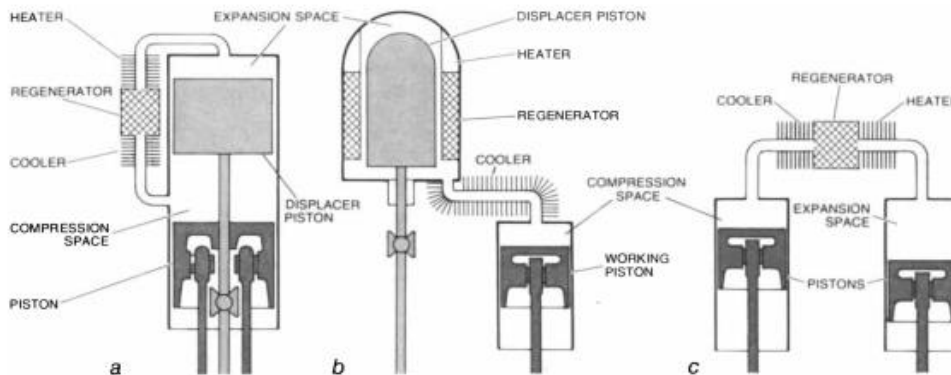


Fuente: Energía Solar

**2.3.3 Clasificación de los motores Stirling** La clasificación de los motores Stirling está basada en diferentes combinaciones que se han desarrollado con el tiempo, variantes como el número de pistones, la movilidad de estos y otras características, definen tres tipos de motores que se explicaran posteriormente, los más nombrados son los siguientes: tipo alfa, beta y gamma.

- **Motores tipo Alfa:** La principal característica que define estos motores es la relación de dos pistones en cilindros separados pero interconectados a un mismo calentador, refrigerador y regenerador. (Fig. c)
- **Motores tipo Beta:** Formado por un pistón móvil y uno fijo, permitiendo que el trabajo generado entre estos dos pistones por la compresión sea de mayor magnitud. (Fig. a)
- **Motores tipo Gamma:** La particularidad que define este tipo de motores, es la separación de dos cilindros con un pistón móvil y uno fijo, con la relación de que tanto el refrigerador, regenerador y calentador se encuentra entre ellos. (Fig. b)

Figura 9: Tipos de motor Stirling



Fuente: Cuaderno del Ingeniero

## 2.4 GENERALIDADES TEORICAS.

Para el desarrollo del diseño y construcción de un concentrador solar en una vivienda es necesario entender y comprender previamente conceptos básicos que se encuentran directamente aplicados en el campo de la termodinámica y transferencia de calor.

**2.4.1 Energías alternativas** Las energías alternativas son fuentes de energía no conectadas a la red eléctrica, hay personas que deciden en un momento dado desconectarse no solo de la red eléctrica, sino también de las redes de distribución de agua o de gas, y no emplear energía derivada de sistemas proporcionados por empresas o producidas por estas. Dicho esto, podemos definir las energías alternativas como las obtenidas de fuentes distintas a las clásicas (petróleo, carbón y gas natural) y que son: la solar (calor y luz), eólica, hidráulica, geotérmica, mareomotriz y biomasa. (Energías renovables, 2013)

Figura 10: Energías renovables



Fuente: <https://www.muycomputer.com/2017/06/16/energias-renovables/>

- **Energía solar**

Del sol obtenemos dos energías básicas para la vida en el planeta Tierra, que son el calor y la luz, ambas energías son imprescindibles no solo para la vida de las plantas, los animales y la humanidad sino para usarlas para calentar el agua, producir electricidad mediante paneles térmicos y concentradores fototérmicos y fotovoltaicos.

Existen diferentes formas de aprovechar la energía solar, por ejemplo, mediante paneles solares térmicos y fotovoltaicos, biomasa, el agua de los ríos y concentradores solares fototérmicos y fotovoltaicos, entre otros (Energías Renovables, 2013).

## **2.5 PARTES DEL CONCENTRADOR SOLAR DISH STIRLING**

El concentrador solar está compuesto por cuatro subsistemas básicos.

**2.5.1 Colector** La forma de la superficie reflectante debe ser similar a un paraboloide de revolución. Las dimensiones del concentrador dependerán de la potencia nominal y de la energía a generar en un periodo de tiempo para unas condiciones determinadas de radiación solar y rendimientos asociados de los componentes que constituyen el sistema.

Los discos parabólicos pueden ser diseñados y construidos con membrana tensionada de metal aproximando así de manera continua a la geometría buscada. La superficie reflectante se obtiene a base de espejos de vidrio o de películas reflectantes (Estudio Económico y Termo económico del Disco Solar Stirling EuroDish de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2004).

**2.5.2 Receptor** La función del receptor de un sistema Dish Stirling es absorber la radiación solar reflejada por el colector y transferir esa energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada.

Los receptores empleados en discos parabólicos son receptores de cavidad, en los que la radiación concentrada entra por una apertura situada en el foco del paraboloide, incidiendo sobre el absorbedor. Es así como se logra disminuir las pérdidas por radiación y convección, y a su vez los gradientes de flujo radiante incidente sobre el absorbedor y reducir su valor máximo.

Existen diferentes tipos de receptores para este sistema entre los que se encuentran los receptores de tubos directamente irradiados, los receptores volumétricos presurizados y los receptores de reflujos.

El concentrador refleja y concentra la radiación directa solar haciendo que incida sobre el receptor. El sistema de generación transforma la energía en forma de calor del receptor en energía mecánica (Estudio Económico y Termo económico del Disco Solar Stirling EuroDish de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2004).

**2.5.3 Sistema de generación** Los concentradores Dish Stirling tienen un sistema de generación que está constituido por un ciclo termodinámico de potencia o máquina térmica y el generador propiamente dicho, que transforma la energía mecánica en electricidad. Normalmente estos sistemas están ligados a los motores Stirling, pero en la actualidad también se han implementado turbinas de gas de tamaño reducido y alto rendimiento. Las potencias de estos motores o turbinas suelen oscilar entre los 5 y los 25 kW, con rendimientos entre el 30% y el 40% (Estudio Económico y Termo económico del Disco Solar Stirling EuroDish de la Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, 2004).

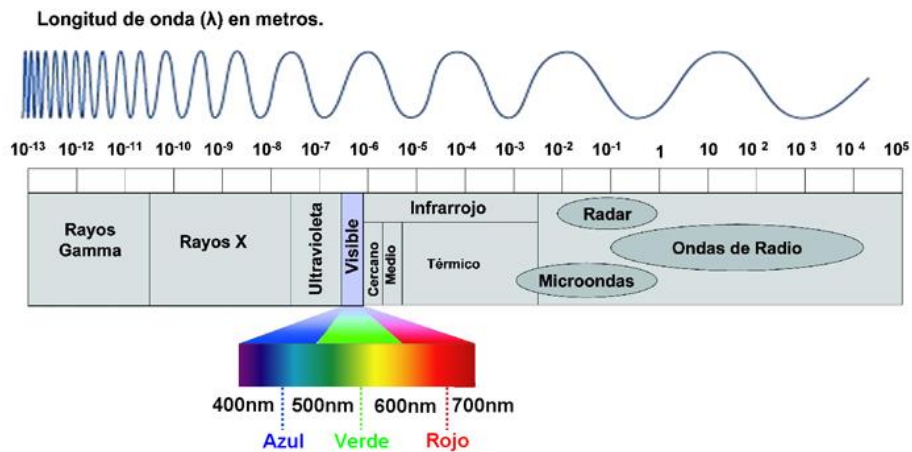
## **2.6 RADIACION SOLAR**

La radiación solar es la energía electromagnética emitida por los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el sol; dicha energía no alcanza la superficie terrestre de modo constante, su cantidad varía durante el día, de estación a estación y depende de la nubosidad, del ángulo de incidencia y de la reflectancia de las superficies.

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta. Después de pasar por la atmósfera, donde sufre un proceso de debilitamiento por la difusión, reflexión en las nubes y de absorción por las moléculas de gases (como el ozono y el vapor de agua) y por partículas en suspensión, la radiación solar alcanza la superficie terrestre oceánica y continental que la refleja o la absorbe. La cantidad de radiación absorbida por la superficie es devuelta en dirección al espacio exterior en forma de radiación de onda larga, con lo cual se transmite calor a la atmósfera.

La radiación electromagnética se puede ordenar en un espectro en diferentes longitudes de onda, como se muestra en la figura 1, que se extiende desde longitudes de onda corta de billonésimas de metro (frecuencias muy altas), como los rayos gama, hasta longitudes de onda larga de muchos kilómetros (frecuencias muy bajas) como las ondas de radio.

Figura 11: Espectro Electromagnético



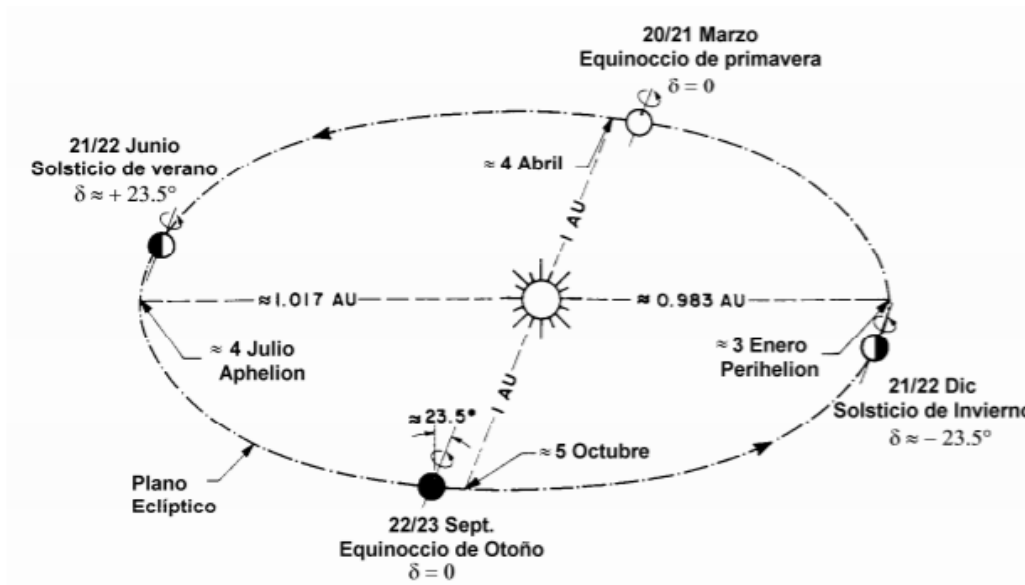
Fuente: [https://elpais.com/sociedad/2009/01/15/actualidad/1231974010\\_850215.html](https://elpais.com/sociedad/2009/01/15/actualidad/1231974010_850215.html)

**2.6.1 Aspectos básicos de la radiación solar** La literatura solar, contiene múltiples sistemas métodos y ecuaciones, que permiten establecer relaciones entre el sol y la tierra permitiendo así conocer y deducir a mayor profundidad todos los parámetros que se ven involucrados en la radiación.

Para entender y comprender a mayor profundidad estos conceptos, es necesario tener en cuenta los siguientes conceptos:

**2.6.2 Distancia de la tierra al sol** La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al sol por lo cual un valor preciso de la distancia Tierra-Sol es importante. La distancia media Tierra-Sol se denomina unidad astronómica, en que 1 AU es igual a  $1.496 \times 10^8$  km. La distancia mínima Tierra-Sol es alrededor de 0.983 AU, mientras que el máximo es aproximadamente 1.017 AU.

Figura 12: Movimiento de la tierra alrededor del sol

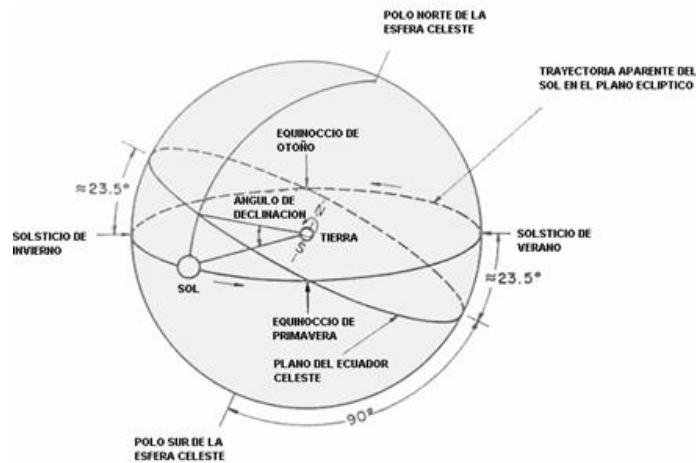


Fuente: Energía solar

**2.6.3 Declinación solar** El plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol es conocido como plano de la eclíptica. La Tierra a su vez rota sobre sí misma alrededor del eje polar, que forma  $23.5^\circ$  con la perpendicular al plano de la eclíptica durante todo el año. La rotación de la Tierra alrededor de su eje produce cambios diarios en la radiación. La posición del eje con relación al Sol produce cambios estacionales en la radiación solar. El ángulo formado por la línea que une los centros del Sol y la Tierra y el plano ecuatorial cambia constantemente. Este ángulo se llama declinación solar. En el solsticio de invierno tiene un valor de  $+23.5^\circ$  y en el solsticio de verano es de  $-23.5^\circ$ .

Otra forma de representar la declinación solar consiste en dibujar la esfera celeste con la Tierra en el centro y el Sol rotando alrededor de la Tierra (Figura 17). Los polos celestes corresponden a los puntos en los cuales el eje polar de la Tierra corta a la esfera celeste.

Figura 13: Esfera celeste mostrando el movimiento del sol y el ángulo de declinación solar



Fuente: Tesis Nelson Vera Mella

## 2.7 RADIACION EN COLOMBIA

Año tras año, IDEAM publica las últimas versiones del tiempo en Colombia, mediciones en base a la radiación, que permite determinar con una mayor aproximación los índices de energía que el sol proyecta durante cada año.

“Colombia debido a su posición geográfica es favorecida con una gran disponibilidad del recurso solar. Las zonas que reciben mayor intensidad de radiación solar global en Colombia, superiores a los 4,5 kWh/m<sup>2</sup> por día son: la región Caribe, las Islas de San Andrés y Providencia, amplios sectores de Vichada, Arauca, Casanare, Meta, el norte y oriente de Antioquia, el norte y centro de Norte de Santander, el suroriente de Santander, el centro y norte de Boyacá, el norte de Cundinamarca, el sur y oriente del Tolima, el norte del Huila, la zona que se inicia al centro del Cauca, atraviesa el Valle del Cauca de sur a norte y llega hasta el eje cafetero y el sector del norte de Nariño.

Los valores más altos (superiores a los 5,5 kWh/m<sup>2</sup> por día) se presentan en sectores de La Guajira y en el norte de Atlántico, Bolívar y Magdalena. Las zonas con menor intensidad de radiación solar global en Colombia, con promedios inferiores a los 3,5 kWh/m<sup>2</sup> por día, se presentan en amplios sectores de Chocó, occidente de Putumayo y Valle del cauca, suroriente de Cauca, oriente de

Nariño y muy pequeños sectores de Cundinamarca, Caquetá y Santander.”(Ingeniería y Construcciones S.A.S, 2020)

**2.7.1 Irradiación solar** La radiación solar extraterrestre se genera analíticamente tomando en cuenta la evolución astronómica de la radiación solar (para una latitud determinada) y representa el valor de radiación solar que recibe la tierra en el límite superior de la atmósfera.

La irradiancia (cantidad de energía)  $dG_0$  durante un período corto de tiempo  $dt$  se puede calcular mediante la siguiente expresión:

*Ecuación 1: Ecuación de la irradiancia*

$$dG_0 = \frac{I_{SC} \cos T_z}{U_2} dt$$

Dónde:  $I_{SC} = 4921$  kJ;  $U_2$  es el Factor de corrección de la distancia Tierra-Sol, y  $T_z$  es el ángulo solar cenital.

**2.7.2 Radiación en la zona de estudio e implementación del concentrador solar** El departamento de Boyacá, cuenta con una riqueza en cuanto a las condiciones climáticas, variedad de ecosistemas, permitiendo así desarrollar proyectos basados en energías renovables y específicamente en el campo de la energía Solar.

Basado en los estudios y análisis de condiciones de trabajo, el municipio elegido para la aplicación del concentrador solar, dado a que se encuentra expuesto a altos niveles de contaminación y que en algunas partes la energía solar se está aplicando, y como medida para impulsar los avances que se han hecho en la zona, se ha decidido que el municipio de Nobsa es el más oportuno en cuanto al desarrollo del proyecto.

El departamento de Boyacá se ubica en la categoría de exposición ‘Muy alta’ en el índice mundial de radiación solar, con un indicativo de radiación ultravioleta entre 9 y 10, según registra el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono del Ideam. (El Tiempo, 2020)

Figura 14: Departamento de Boyacá



Fuente: El tiempo

## 2.8 CICLO STIRLING

El motor Stirling funciona por un ciclo regenerativo termodinámicamente "cerrado", con compresión y expansión cíclica del fluido de trabajo a diferentes niveles de temperatura.

Es un ciclo de compresión y expansión de un gas. Se utilizan dos niveles de temperatura que permite que haya una conversión neta de energía térmica en trabajo mecánico.

Al igual que la máquina de vapor, el motor Stirling se clasifica tradicionalmente como un motor de combustión externa, es decir, todas las transferencias de calor con el gas de trabajo se hacen a través de la pared del motor.

A diferencia de un motor de vapor, el motor Stirling cierra una cantidad fija de fluido en estado permanentemente gaseoso como es el aire.

La variación de presión se produce en el cilindro del desplazador, el cual este elemento en la zona fría. El calor suministrado en este punto gira el volante y el cigüeñal, con ello, se convierte la energía térmica en energía mecánica.

El desplazador facilita la traslación del gas hacia las zonas deseadas de forma cíclica. Normalmente, el pistón y el desplazador están dirigidos por el acoplamiento mecánico en un cigüeñal. Estos

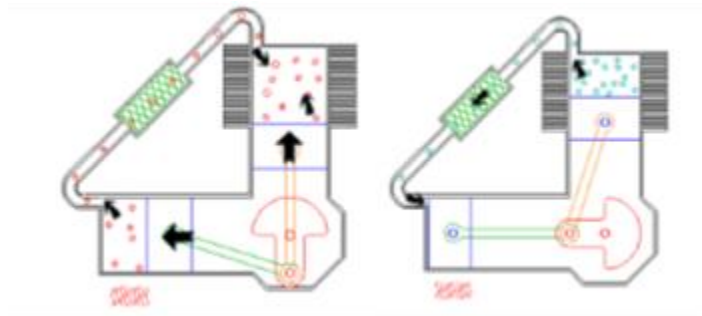
elementos suelen tener un desfase de 90 grados obligatorio para un correcto funcionamiento, de otro modo, se reduciría la eficacia (Energía Solar, 2016)

El ciclo ideal de Stirling consiste en procesos:

- 1-2 Compresión isotérmica
- 2-3 Absorción de calor isocora
- 3-4 Expansión Isotérmica
- 4-1 Cesión de calor isocora

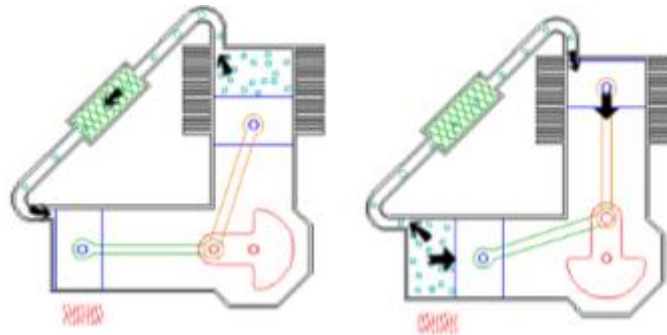
A continuación, se presenta de manera gráfica el ciclo Stirling explicado en el presente documento.

*Figura 15: Compresión isotérmica del ciclo Stirling*



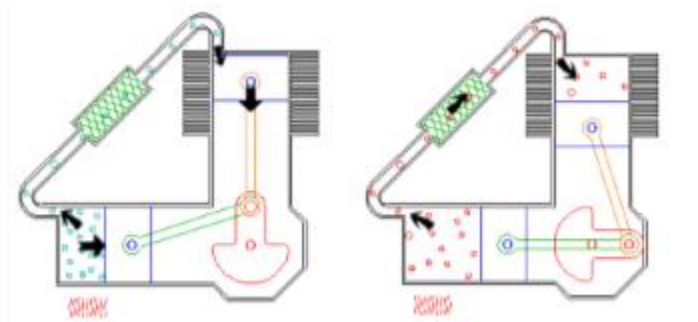
*Fuente: Lcseral*

*Figura 16: Absorción de Calor Isocora del ciclo Stirling*



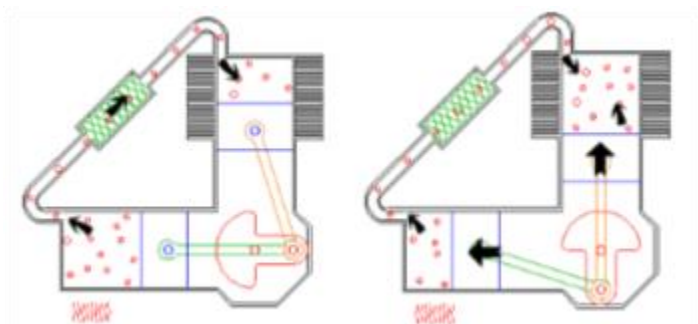
*Fuente: Lcseral*

Figura 17: Expansión isotérmica del ciclo Stirling



Fuente: Lcseral

Figura 18: Cesión de calor isocora del ciclo Stirling



Fuente: Lcseral

## 2.9 PÉRDIDAS EN EL RECEPTOR

Los receptores pueden ser convexos, planos o cóncavos y pueden ser cubiertos o no cubiertos. Muchos modos de seguimiento son posibles. Las tasas de concentración pueden variar en muchos órdenes de magnitud. Con este amplio rango de diseños, es difícil desarrollar análisis generales aplicables a todos los concentradores (Duffie & Beckman, 2013).

En estado estacionario, la energía térmica neta de un receptor, tiene como energía de entrada, la energía solar concentrada por el colector y se equilibra con la energía de salida del flujo de transferencia de calor que va directo al motor Stirling. El receptor ( $Q_{rec}$ ) o la cavidad receptora ( $Q_{cav}$ ), tiene una serie de pérdidas de energía, debido a la reflexión no deseada ( $Q_{rad, ref}$ ), la emisión de radiación ( $Q_{rad, emi}$ ), los procesos convectivos ( $Q_{conv}$ ) y conductivos ( $Q_{cond}$ ). (Daniela Carolina Trujillo L, 2017)

**2.9.1 Pérdidas por radiación** Las pérdidas por radiación en el receptor contribuyen a un porcentaje significativo de pérdidas, las cuales incluyen pérdidas por la radiación emitida en el receptor como consecuencia de su temperatura ( $Q_{rad, emi}$ ) y las pérdidas por la reflexión de la concentración incidente ( $Q_{rad, ref}$ ). (Daniela Carolina Trujillo L, 2017).

**2.9.2 Pérdidas por convección** Las pérdidas de convección representan un factor importante dentro de las pérdidas totales del sistema, teniendo un alto índice de porcentaje entre la mañana y la noche y descartando un poco en el medio día.

El receptor presenta corrientes convectivas naturales y forzadas, la primera fluye dentro del receptor de abajo a arriba, en un plano vertical. La segunda está en una dirección normal al plano de las corrientes de convección natural, por lo tanto, la convección forzada no depende de las corrientes naturales.

La convección forzada pura no debe cambiar en absoluto, ya que a cualquier ángulo de inclinación del receptor las pérdidas convectivas del viento lateral serán siempre las mismas, por lo tanto, se define el coeficiente de convectividad total del receptor como la sumatoria de cada una de las corrientes convectivas, ver ecuación 1999.

*Ecuación 2: Energías*

$$h_{total} = h_{natural} + h_{forzada}$$

## 2.10 EFICIENCIAS DEL SISTEMA

La eficiencia de cada subsistema se puede definir como la relación de la energía de salida dividida por la energía de entrada. La eficiencia total de conversión solar a eléctrica en el sistema Dish Stirling es el producto de las eficiencias de cada subsistema (Óptico/concentrador, receptor y motor Stirling).

*Ecuación 3: Eficiencia total del sistema*

$$\eta_{global} = \eta_{Concentrador} \cdot \eta_{Receptor} \cdot \eta_{Moto}$$

**2.10.1 Eficiencia del colector** La eficiencia del disco parabólico  $\eta_{concentrador}$  es equivalente a la reflectancia de la superficie del concentrador  $\rho$ , ver ecuación.

*Ecuación 4: Eficiencia total del Colector*

$$\eta_{Concentrador} = \rho$$

**2.10.2 Eficiencia del receptor** La eficiencia de la cavidad del receptor es definida como la potencia de entrada del motor Stirling dividida por la energía solar reflectada por el disco Stirling.

*Ecuación 5: Eficiencia del Receptor*

$$\eta_{receptor} = Q_{motor} / I A_{Concentrador} \rho$$

**2.10.3 Eficiencia del motor Stirling** El estudio teórico presentado muestra la temperatura óptima del absorbedor de un motor Stirling conseguida mediante un colector puntual, siendo éste una antena parabólica recubierta de papel de aluminio. De esta forma se maximiza la eficiencia total, y por tanto la energía eléctrica conseguida, del conjunto formado por el colector puntual y el motor Stirling, siendo la eficiencia total del sistema el producto de la eficiencia del colector puntual por la eficiencia del motor Stirling. La temperatura óptima del absorbedor del motor Stirling es obtenida mediante la aplicación de un modelo matemático que trabaja entre dos casos límite, garantizando que la temperatura obtenida esté entre estas dos condiciones: Eficiencia máxima conseguida y máxima potencia obtenida del motor Stirling.

*Ecuación 6: Eficiencia del motor Stirling*

$$\eta_{Motor} = P_{Bruta} / P_{Entrada}$$

*Ecuación 7: Potencia de salida del motor*

$$P_{Salida} = P_{Entrada} \cdot \eta_{motor, curva}$$

### 3 DISEÑO METODOLOGICO

#### 3.1 DESPLIEGUE DE LA FUNCIÓN CALIDAD PARA EL CONCENTRADOR

##### 3.1.1 Requerimientos del cliente

- Costo
- Seguridad
- Tamaño
- Mantenimiento
- Control
- Eficiencia

### 3.1.2 Requerimientos ingenieriles

- Potencia de salida
- Temperatura
- Fácil construcción
- Control
- Costos

**3.1.3 Matriz de calidad del concentrador solar** En la tabla 1, se muestra la matriz de calidad para la selección óptima del tipo de concentrador, teniendo en cuenta los requerimientos del cliente e ingenieriles.

Tabla 1: Matriz de calidad del concentrador solar

			Requerimientos ingenieriles					
			potencia de salida	temperatura	facil construccion	control	costos	
Requerimientos del cliente		importancia	5	4	3	1	2	
	eficiencia	1	25	12	3	1	10	51
	control	3	15	12	9	15	6	57
	costo	5	75	60	75	5	50	265
	seguridad	2	10	8	18	6	12	54
	mantenimiento	4	20	16	60	12	40	148
	tamaño	6	150	120	90	18	60	438
			295	228	255	57	180	

Fuente: Autores

### 3.1.4 Planteamiento de alternativas

#### a. Alternativa 1: Concentrador solar de Canal Parabólico

Este sistema suele trabajar a 100°C y puede producir electricidad acoplándose a un ciclo Rankine de agua vapor. El concentrador esta dividido en tres componentes, los cuales son el sistema de generación de vapor, el sistema de concentración y el sistema de potencia. Una desventaja grande de este sistema es que su costo para la generación de energía eléctrica es muy alto y es por ello que no se ha podido expandir comercialmente.

#### b. Alternativa 2: Concentrador solar tipo puntual o Dish Stirling

Estos sistemas están diseñados con espejos parabólicos de revolución y un motor de combustión externa Stirling el cual se encuentra en la zona focal del concentrador para transformar la radiación solar en energía eléctrica. Esta tecnología es capaz de alcanzar temperaturas superiores a 400°C en el flujo de salida. Para la producción de electricidad es necesario que se complemente con un ciclo termodinámico o procesos químicos.

**3.1.5 Evaluación de las alternativas** Para la evaluación de las alternativas se tienen en cuenta los 3 criterios con mayor puntuación en la matriz de calidad del tipo de concentrador.

*Tabla 2: Criterios con mejor puntuación*

Criterio	valor	%
facil construccion	255	0.3277
Temperatura	228	0.2930
potencia de salida	295	0.3791
Total	778	

*Fuente: Autores*

En la tabla 3, se presentan las alternativas y criterios antes mencionados, para escoger la mejor alternativa se le da una valoración a cada criterio del más importante (3), al menos importante (1), y este valor se multiplica por el porcentaje. La alternativa con mejor valoración será la escogida.

*Tabla 3: Evaluación de alternativas*

Criterio	%	Alternativa 1		alternativa 2	
Facil construccion	0.3277	2	0.65540	1	0.3277
Temperatura	0.2930	3	0.879	2	0.586
Potencia de salida	0.3791	1	0.3791	3	1,1373
Total			1,914		2,051

*Fuente: Autores*

La alternativa ganadora fue el número dos, ya que produce mayor potencia de salida y a su vez recibe más temperatura, además nos permite reflejar toda la radiación solar en un punto focal.

## 3.2 DESPLIEGUE DE LA FUNCION CALIDAD PARA EL MOTOR

### 3.2.1 Requerimientos del cliente

- Costos
- Eficiencia
- Tamaño
- Garantía
- Seguridad
- Vida útil

### 3.2.2 Requerimientos ingenieriles

- Potencia
- Tamaño
- Mantenimiento
- Costos
- Control
- Temperatura

**3.2.3 Matriz de calidad del motor Stirling** En la tabla 4, se muestra la matriz de calidad para la selección óptima del tipo de motor Stirling, teniendo en cuenta los requerimientos del cliente e ingenieriles.

Tabla 4: Matriz de calidad del Motor Stirling

			Requerimientos ingenieriles						
			potencia de salida	temperatura	mantenimiento	control	tamaño	costos	
Requerimientos del cliente	importancia		6	5	2	4	1	3	
	eficiencia	1	30	25	6	12	1	15	89
	vida útil	3	54	75	18	12	3	27	189
	costo	5	150	25	50	20	25	75	345
	seguridad	2	12	30	20	24	6	6	98
	garantía	4	24	20	40	48	12	60	204
	tamaño	6	108	150	12	24	30	90	414
			384	330	148	144	78	276	

Fuente: Autores

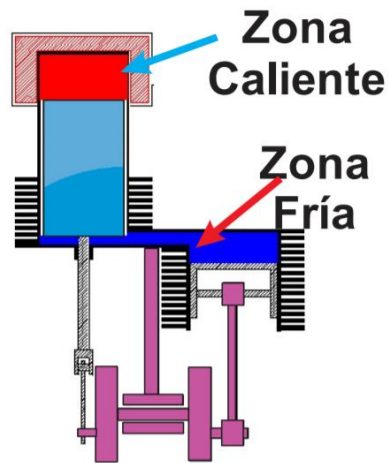
### 3.2.4 Planteamiento de alternativas

#### a. Alternativa 1: Motor Stirling Tipo Gamma

El motor Stirling tipo Gama se deriva de la configuración Beta, pero es más sencillo de construir. Consta de dos cilindros separados, en uno de los cuales se sitúa el desplazador y en el otro, el pistón de potencia.

Este tipo de motor es el de menor potencia específica, debido a su gran volumen muerto.

Figura 19: Motor Stirling Tipo Gamma.

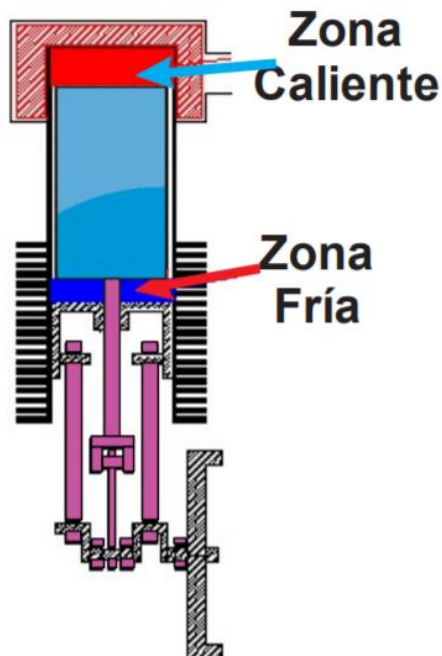


Fuente: Revista de Innovación Sistemática

### b. Alternativa 2: Motor Stirling Tipo Beta

Los motores tipo Beta tienen el pistón y el desplazador en el mismo cilindro, por eso tienen poco volumen muerto, y, por lo tanto, es el de mayor potencia específica de las tres configuraciones. Existe una holgura entre el desplazador y el cilindro para permitir el paso del gas de la zona caliente a la fría y viceversa. Su desventaja está en su fabricación, porque ésta es muy complicada y requiere de alta precisión.

Figura 20: Motor Stirling tipo Beta

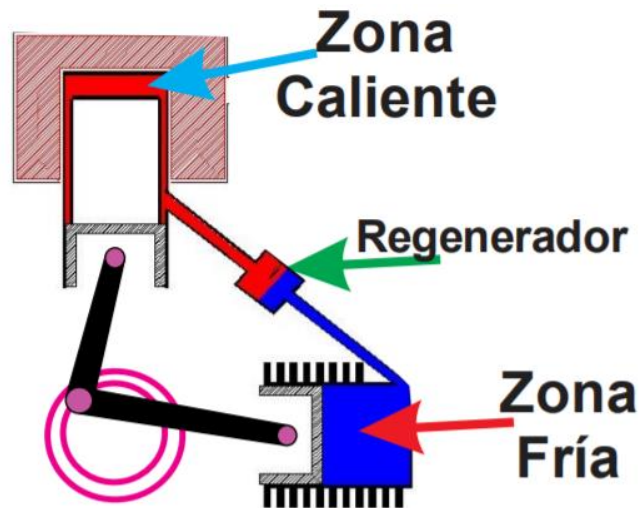


Fuente: Revista de Innovación Sistemática

**c. Alternativa 3: Motor Stirling tipo Alfa**

Este motor está compuesto por dos pistones que se encuentran en un ángulo de 90°, uno está situado en zona fría y el otro en zona caliente. Tiene dos bielas que van conectadas al mismo punto, ya que los pistones están desfasados, dado el caso de que no lo estuvieran no estarían conectados en el mismo punto del cigüeñal.

Figura 21: Motor Stirling tipo Alfa



Fuente: Revista de Innovación Sistemática

**3.2.5 Evaluación de alternativas** Para la evaluación de las alternativas se tienen en cuenta los 3 criterios con mayor puntuación en la matriz de calidad del tipo de Motor Stirling.

Tabla 5: Criterios ganadores

Criterio	valor	%
costos	276	0.278787
Temperatura	330	0.333333
potencia de salida	384	0.387878
Total	990	

Fuente: Autores

En la tabla 6, se presentan las alternativas y criterios antes mencionados, para escoger la mejor alternativa se le da una valoración a cada criterio del más importante (3), al menos importante (1), y este valor se multiplica por el porcentaje. La alternativa con mejor valoración será la escogida.

Tabla 6: Evaluación de alternativas

Criterio	%	Alternativa 1 ( $\gamma$ )		Alternativa 2 ( $\beta$ )		alternativa 3 ( $\alpha$ )	
Costos	0,3277	2	0,6554	1	0,3277	3	0,9831
Temperatura	0,293	1	0,293	3	0,879	2	0,586
Potencia de salida	0,3791	3	1,1373	2	0,7582	1	0,3791
Total			2,0857		1,9649		1,9482

Fuente: Autores

La alternativa ganadora fue el número uno, ya que produce mayor potencia de salida y a su vez permite que su receptor al recibir mayor temperatura tenga una mejor eficiencia a la hora de sacar la potencia.

## 4 GESTION DEL TRABAJO DE GRADO

### 4.1 IDENTIFICACION DE LAS TAREAS

Para realizar el proyecto de grado, se debe cumplir con una serie de pasos consecutivos el cual establecen el proceso adecuado para del diseño del equipo. Las tareas presentadas a continuación, hacen referencia al orden para llevar a cabo la elaboración del trabajo de grado:

- Elaboración del plan de proyecto.
- Diseño del Colector.
- Diseño y selección del motor.
- Construcción del Concentrador solar.
- Realización de pruebas.
- Análisis de resultados

## 5 DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL

Para el diseño del colector solar se tiene en cuenta cada característica que lo diferencia de los demás concentradores. Estos parámetros distinguen su aplicación y define su eficiencia, entre estos están su geometría, su forma de direccionar los rayos solares, la forma y posición del receptor, el rango de temperaturas de trabajo y si posee imagen o no.

El paraboloide que re-direcciona los rayos solares está diseñado de manera robusta y se encuentra ensamblado por medio de una articulación a una estructura que le permite cambiar de posición respecto al sol de manera rápida y eficiente. Debido a que es un dispositivo medianamente liviano,

se puede desplazar de un lugar a otro sin necesidad de una maquina especial. Posee una base que le permite mantenerse estable en terrenos exteriores, su altura es mediana y sus articulaciones tienen un excelente ajuste la cual evita que el viento pueda modificar su posición y a su vez disminuir su eficiencia.

## 5.1 DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL

Teniendo en cuenta las características mencionadas anteriormente, se va a definir de manera exacta el colector solar con el fin de obtener el diseño correcto.

Primeramente el colector solar es de tipo reflector, es decir, los rayos solares se reflejan en una superficie la cuál debe ser en revolución o cóncava. Segundo a tener en cuenta es que posee imagen, quiere decir que proyecta el sol sobre el absorbedor y tiene la capacidad de formar imágenes. Dicho esto, se define el concentrador como colector solar tipo puntual reflectora de superficie cóncava con imagen.

Respecto a la definición anterior se tiene en cuenta los siguientes parámetros para realizar un adecuado diseño, los cuales son:

- Geometría Óptima del Colector Solar
- Pérdidas Ópticas en el Colector Solar
- Pérdidas Térmicas en el Receptor

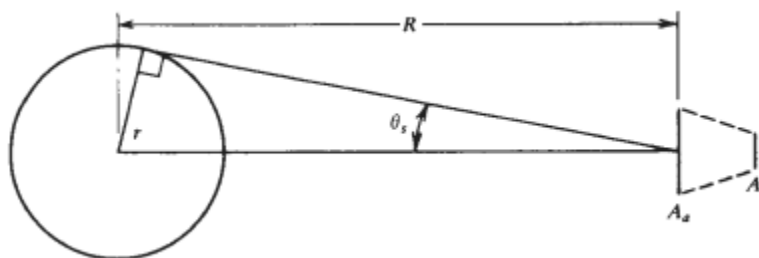
Posterior a eso se define en diseño el concentrador solar real y el concentrador solar a escala y por último se describe el diseño mecánico y análisis MEF del prototipo construido.

### 5.1.1 Geometría óptima del colector solar

**5.1.1.1 Relación de concentración** En la geometría se debe tener en cuenta primeramente una relación de concentración en el colector que se representa con la letra “ $C$ ”, ésta es una relación de áreas entre el área de apertura del colector con el área del receptor. Si la relación de concentración es alta nos indica que el área de apertura es grande a comparación con el área del receptor y si la relación es pequeña quiere decir que el área de apertura es similar al área del receptor.

La relación de concentración como resultado nos define conceptualmente el máximo ángulo que se forma entre los rayos del sol con cualquier colector y se representa con el símbolo “ $\theta_s$ ”.

Figura 22: Geometría de los rayos solares respecto al concentrador solar tipo puntual



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

Ecuación 8: Relación de concentración de área

$$C = \frac{A_a}{A_r}$$

Donde,

$A_a$ : Área de apertura del colector

$A_r$ : Área del receptor

Para llegar al resultado del ángulo  $\theta_s$  se debe considerar algunas condiciones. Entre éstas la principal debe ser la igualdad del calor del sol que incide sobre el receptor " $Q_{s \rightarrow r}$ " con el calor que emite el receptor " $Q_{r \rightarrow s}$ " por la segunda ley de la termodinámica.

Ecuación 9: Calor emitido del sol al receptor

$$Q_{s \rightarrow r} = A_a * \frac{r^2}{R^2} * \sigma * T_s^4$$

Donde,

$r$ : Radio del sol

$R$ : Distancia del sol a la Tierra

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzman

$T_s$ : Temperatura del sol

Ecuación 10: Calor emitido del receptor al sol

$$Q_{r \rightarrow s} = A_r * \sigma * E_{r \rightarrow s} * T_r^4$$

Donde,

$E_{r \rightarrow s}$ : Factor de intercambio especular

$T_r$ : Temperatura del receptor

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzman

*Ecuación 11: Igualdad de calores por segunda ley termodinámica*

$$Q_{s \rightarrow r} = Q_{r \rightarrow s}$$

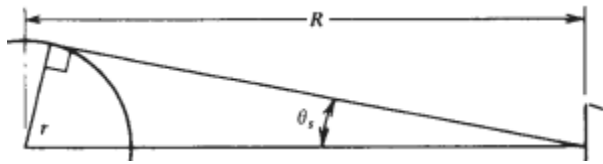
Se asume el dispositivo como colector perfecto, esto quiere decir que toda la energía emitida por los rayos del sol llega al receptor sin ningún tipo de pérdidas y en consecuencia a esto, el receptor se tomaría como un receptor perfecto y emitiría calor por radiación como un cuerpo negro. Como resultado de estas consideraciones obtenemos el ángulo máximo entre los rayos del sol con el colector, cabe resaltar que por ser un dispositivo sin pérdidas, el sistema funcionaría con la segunda ley de la termodinámica donde afirma que la energía tiene calidad, así como cantidad. Es importante aclarar que preservar la calidad de la energía es un interés principal de los ingenieros y esta ley brinda los medios necesarios para determinar la calidad, así como el nivel de degradación de la energía durante el proceso. Como conclusión la temperatura y el calor emitido del sol como del receptor se igualarían y el factor de intercambio especular se asumiría al 100% siendo su máximo valor de intercambio. El resultado final es la relación de áreas igual a la relación de distancias que existen entre el sol y la tierra, esto se observa en la figura 22.

*Ecuación 12: Relación de concentración de área con distancia del sol*

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2}$$

Finalmente se linealiza la ecuación por trigonometría para dejarlo en términos del ángulo  $\theta_s$  y así se obtiene el valor que se requiere el cuál es:

Figura 23: Trigonometría para linealizar la ecuación



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

Ecuación 13: Relación de concentración en términos de  $\theta_s$

$$C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{1}{\sin^2 \theta_s}$$

Distancia del sol a la tierra

$$R = 149600000 \text{ [Km]}$$

Radio del sol

$$r = 696340 \text{ [Km]}$$

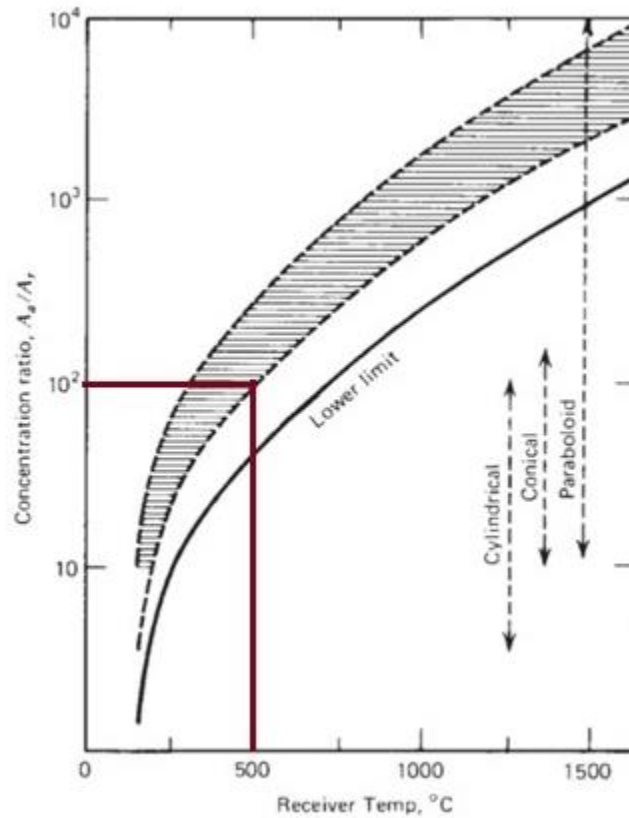
- **Resultados**

Resultado 1: Angulo máximo entre los rayos solares y el colector solar

$$\theta_{smax} = 0.27^\circ$$

Con una relación C de 1000 y con una temperatura del receptor de 500 [°C] se puede verificar por medio de la siguiente gráfica el tipo de colector que se requiere, es decir, si su forma es cilíndrica, si es paraboloide o si es plano.

Figura 24: Gráfica entre relación de concentración y temperatura recibida.



Fuente: *Solar Engineering of Thermal Processes*

**5.1.1.2 Dimensiones del colector** Se puede observar que el colector debe ser parabólico ya que las líneas rojas se cruzan dentro del área sombreada (el área sombreada indica que el colector debe ser tipo puntual), cabe resaltar que la anterior gráfica no define un parámetro de diseño, su función sirve para la verificación o guía para la selección del tipo de colector solar. (Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, 2013).

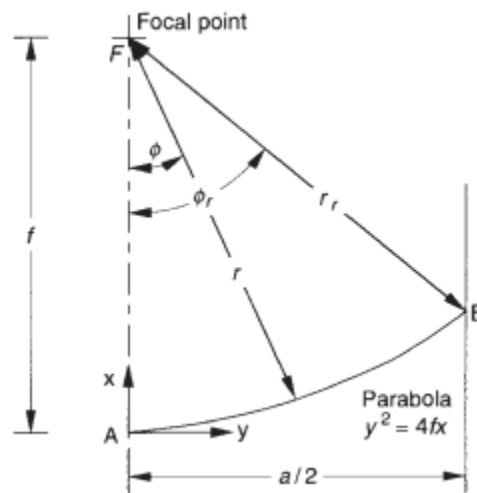
Con todas las condiciones y parámetros establecidos anteriormente se va a definir el diámetro de concentrador y una distancia focal (la distancia focal es la misma distancia que hay entre el concentrador y el receptor) con el fin de saber cuánta energía es capaz de recibir el receptor, si es poca se aumenta el diámetro.

Como primera deducción se toma un promedio de la energía del sol " $q_{sb}$ " en una zona rural del municipio de Nobsa en el departamento de Boyacá, al multiplicarlo por el área del concentrador se obtiene la energía de salida que se requiere, como son 1500[Watts] lo que se espera tener y la

energía promedio del sol en Nobsa es de 700 [Watts/m<sup>2</sup>] el área tendría como resultado 2.14[m<sup>2</sup>], pero el problema consiste en que no se tiene en cuenta las pérdidas, es por esto que el área esperada sería mayor a los 2.14[m<sup>2</sup>], entonces esta deducción simplemente funciona para tener una idea de la dimensión del concentrador solar.

Posterior a esto se debe definir el modelo del concentrador respecto a su geometría, sabiendo que el dispositivo es parabólico, la función que lo representa es:

Figura 25: Gráfica del modelo matemático del colector



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

Ecuación 14: Modelo matemático del colector solar.

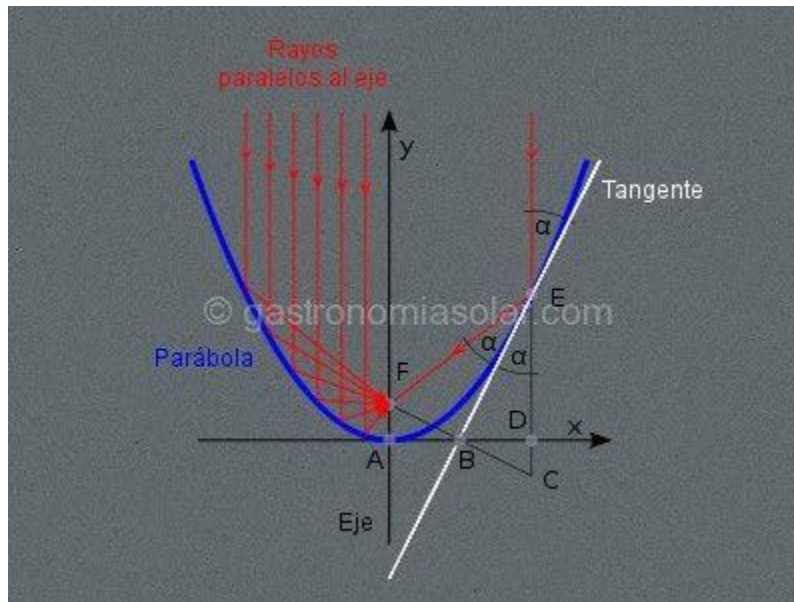
$$y^2 = 4 * f * x$$

Donde,

$f$ : Distancia focal

La función se desarrolla a partir de una parábola debido a que todos los rayos provenientes del sol que van paralelos al eje de apertura de la misma rebotan en el colector y se re-dirigen al foco, es decir, ubica el receptor en la línea axial del concentrador para recibir la energía que se refleja en el dispositivo, en la siguiente ilustración se puede apreciar esto. (Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, 2013)

Figura 26: Gráfica del modelo matemático del colector con rayos solares



Fuente: <https://gastronomiasolar.com/cocina-solar-parabolica/>

La posición del foco o del receptor es arbitraria, pero existen dos tipos de focos, el foco profundo y el foco expuesto. El foco profundo se ubica dentro del concentrador y el expuesto lo ubica fuera del mismo, debido a que se necesita que todos los rayos solares reboten al absorbedor, lo ideal es que el foco se encuentre fuera para que el receptor absorba la mayor cantidad de energía. (Cocina Solar, 2018)

Figura 27: Tipo de focos

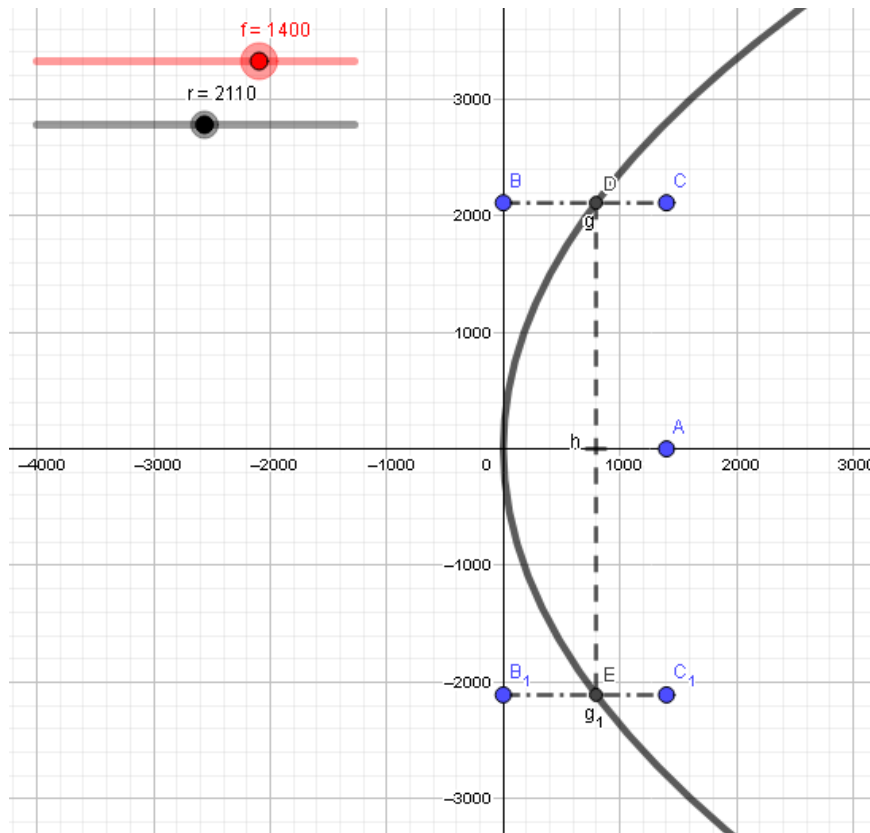


Fuente: Cocinas Solares

Por medio del programa Geogebra se modela la función del concentrador y se definen las variables de entrada las cuales son el radio de apertura y el punto focal. La ecuación depende netamente de estos parámetros, cuando el punto focal se aleja de la parábola, ésta se abre más y viceversa, pero su definición más exacta es que entre más lejos se encuentre el foco, más pequeño es el

concentrador y viceversa. El radio de apertura define el tamaño final del concentrador debido a que debe coincidir con la distancia del punto focal para recibir la energía máxima.

Figura 28: Modelo de la función del concentrador en Geogebra



Fuente: Autores

Una vez que se haya modelado la parábola del colector, se asume una distancia focal con valor de 1,4[m] y un área de apertura con un valor de 14[m<sup>2</sup>] cumpliendo la hipótesis de que el dispositivo debe ser mayor a un área de 2,14 [m<sup>2</sup>], estos parámetros de entrada son considerados iterables y tienen como fin definir el diámetro del concentrador solar puesto que esta variable es el resultado principal de la geometría del dispositivo. Cabe resaltar que los valores asumidos se deben probar en Geogebra para ver si coincide uno con el otro de acuerdo al diseño que se requiere, es decir, que todos los rayos solares lleguen al receptor correctamente, ver figura 28.

- **Resultados**

Resultado 2: Distancia focal

$$f = 1.4 [m]$$

Resultado 3: Área de apertura

$$A_a = 14 [m^2]$$

Una vez que se hayan verificado, se procede a hallar el valor del diámetro del concentrador.

*Ecuación 15: Área de apertura del concentrador.*

$$A_a = \pi * r_c^2 = \pi * \left(\frac{d_c}{2}\right)^2$$

Donde,

$r_c$ : Radio del concentrador

$d_c$ : Diámetro del concentrador

- **Resultados**

*Resultado 4: Diámetro del concentrador.*

$$d_c = 4.222 [m]$$

**5.1.1.3 Dimensiones del receptor** Luego de tener el valor del diámetro del concentrador, se requiere diseñar el receptor, la geometría de éste sistema se define con el diámetro del mismo. Es necesario conocer ciertas variables para llegar al resultado deseado y aplicarlas de manera tal que reciba toda la energía reflejada por el colector.

Primeramente se debe conocer el ángulo de aceptación real, está representado por el símbolo " $\theta$  ó  $\Omega$ " y se define como la apertura o inclinación de los rayos solares que llegan al colector y se reflejan en el receptor, su valor máximo se deduce a partir de la relación  $C$  dando como resultado un ángulo de  $16^\circ$  en ambos sentidos, cabe resaltar que la inclinación con la que llegan los rayos al colector, también se reflejan en el receptor. (Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, 2013)

*Ecuación 16: Ángulo de aceptación máximo.*

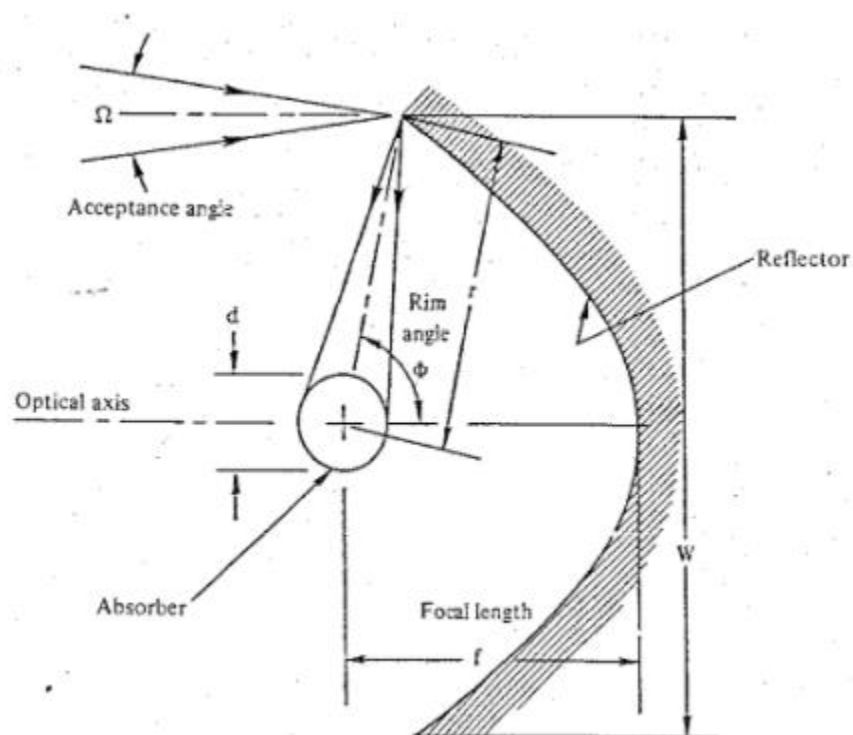
$$\theta_m = \sin^{-1}(\theta_s)$$

- **Resultados**

*Resultado 5: Ángulo de aceptación máximo.*

$$\theta_m = 16^\circ$$

Figura 29: Angulo de apertura de los rayos solares en el colector



Fuente: Solar Thermal Energy Systems

Analizando el ángulo de aceptación se puede deducir que entre más pequeño sea su valor, es más pequeño el diámetro del receptor y existe más probabilidad de tener pérdidas de energía, por ejemplo, cuando los rayos del sol llegan con un ángulo de  $5^\circ$  de inclinación al colector, éste lo refleja al receptor con el mismo valor de inclinación, por lo tanto, si el receptor es diseñado para absorber la energía proveniente de los rayos del sol con un ángulo máximo de  $5^\circ$ , cuando la inclinación aumente por cambio de posición del sol ya no estaría recibiendo la energía de los rayos reflejados y la eficiencia automáticamente disminuiría. Siendo más claro, la precisión del receptor depende directamente del ángulo de aceptación.

Sabiendo lo anterior, se asume un ángulo de aceptación intermedio el cuál su valor sería  $8^\circ$  de inclinación en ambas direcciones y al finalizar el procedimiento, se recalcula para tener el valor real. La siguiente variable por conocer es el ángulo de rin representado por el símbolo " $\phi_r$ " y se define como la orientación de los rayos solares que se reflejan del colector al receptor, se forma entre la línea óptica axial del colector con la línea de los rayos del sol reflejados al receptor, se puede observar en la figura 29, luego por la siguiente ecuación se relaciona los ángulos de aceptación real y de rin con los diámetros del concentrador y el receptor.

Ecuación 17: Ángulo de rin.

$$\sin(\phi_r) = d_c * \frac{\sin(\theta)}{D}$$

Donde,

$D$ : Diámetro del receptor

$\theta$ : Ángulo de aceptación real

Se tendrían tres variables que son el ángulo de rin, el diámetro del receptor y el ángulo de aceptación real, para ello por otra ecuación se define el ángulo rin relacionándolo con los demás parámetros de diseño que son una relación entre la distancia focal con el diámetro del concentrador. (Solar Engineering of Thermal Processes, John A. Duffie, William A. Beckman, 2013)

Ecuación 18: Ángulo de rin con relación de distancia focal y diámetro de concentrador.

$$\phi_r = \arctan \left[ \frac{8 * rel}{16 * rel^2 - 1} \right]$$

Ecuación 19: Relación de distancia focal y diámetro de concentrador.

$$rel = \frac{f}{d_c}$$

- **Resultados**

Resultado 6: Ángulo de rin.

$$\phi_r = 74.03^\circ$$

Una vez que se calcula el ángulo de rin, se empieza a hallar el valor del diámetro del receptor con el ángulo de aceptación asumido y con los demás parámetros encontrados.

Ecuación 20: Diámetro teórico del receptor.

$$D_{te} = \frac{d_c * \tan(\theta_a)}{\sin(\phi_r)}$$

Donde,

$\theta_a$ : Ángulo de aceptación asumido

Ángulo de aceptación asumido.

$$\theta_a = 8^\circ$$

- **Resultados**

*Resultado 7: Diámetro teórico del receptor.*

$$D_{te} = 0.617 [m]$$

Posterior a esto, se redondea el resultado del diámetro para obtener un valor más preciso en cuanto a diseño y finalmente se recalcula el ángulo de aceptación con la ecuación 17 para tener el valor exacto de inclinación. Cabe resaltar que las ecuaciones planteadas en este procedimiento de diseño van dirigidas a una distribución real de los rayos solares, teniendo como ventaja que los valores son más altos y en consecuencia a ello permite obtener un dispositivo preciso, la ilustración más exacta a su comportamiento sería la que se muestra a continuación.

- **Resultados**

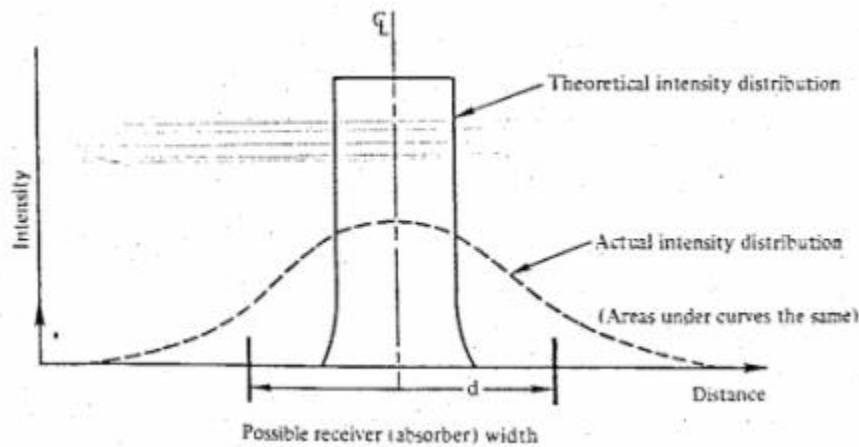
*Resultado 8: Diámetro del receptor.*

$$D = 0.6 [m]$$

*Resultado 9: Ángulo de aceptación real.*

$$\theta = 7.853^\circ$$

*Figura 30: Distribución de los rayos solares en el receptor.*

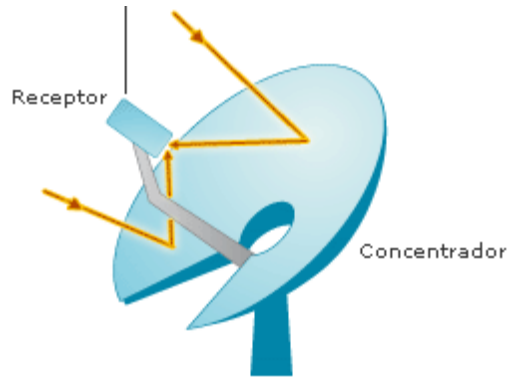


*Fuente: Solar Thermal Energy Systems*

Como se puede observar, la distribución real de los rayos solares se demuestra con el área bajo la curva de la línea intermitente siendo representada por las ecuaciones planteadas en el diseño, mientras que la distribución teórica se ilustra con el área bajo la curva de la línea continua.

**5.1.2 Pérdidas ópticas** Las pérdidas ópticas están relacionadas directamente con el haz de luz que interceptan el concentrador y que no son reflejados en el receptor, como en el concentrador no se tienen pérdidas térmicas por la baja concentración de calor y por la casi nula transferencia del mismo, entonces las pérdidas ópticas se presentan únicamente en el concentrador solar.

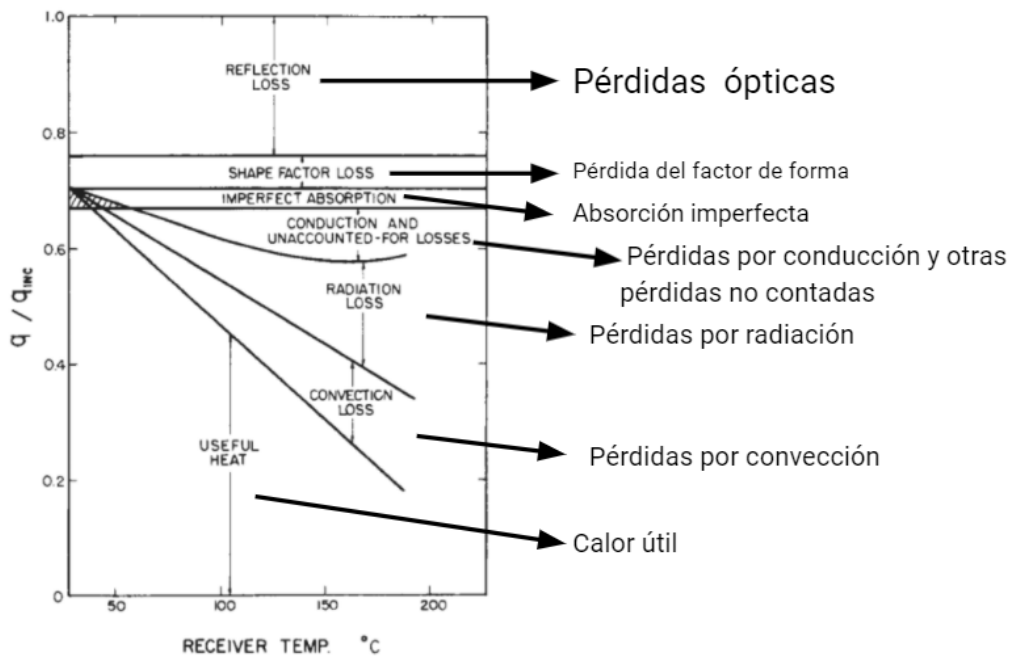
Figura 31: Orientación de los rayos solares en el concentrador



Fuente: Energía Solar

Estas pérdidas están representadas en un 25% de la totalidad que se presentan en el concentrador solar, dichos porcentajes se pueden apreciar en el siguiente esquema:

Figura 32: Distribución de la energía incidente para el reflector en función de la temperatura del receptor.

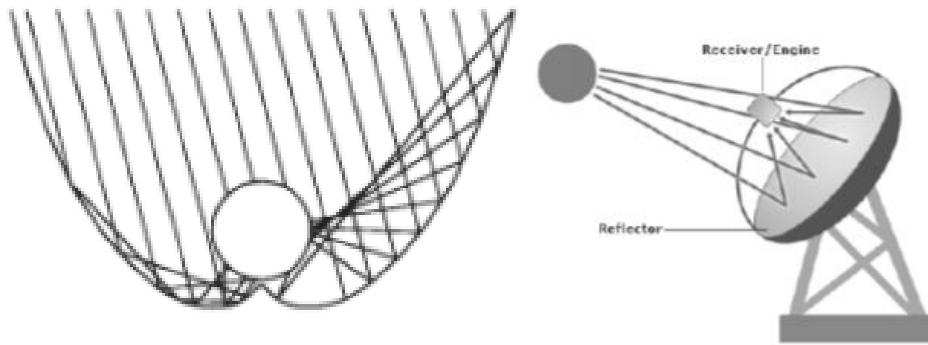


Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

**5.1.2.1 Trazado de rayos para la determinación de pérdidas ópticas** La forma más común de determinar las pérdidas ópticas en un concentrador solar se realiza mediante el trazado de rayos, el cual consiste en un estudio detallado del comportamiento del haz de rayos incidente usando métodos vectoriales.

Con este procedimiento, se determinan cuáles rayos y con qué dirección impactan el receptor y así poder determinar qué porcentaje de calor llega y es aprovechado por el motor.

Figura 33: Haz de luz reflejada a un determinado ángulo



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

**5.1.2.2 Determinación de las pérdidas ópticas** El cálculo de las pérdidas ópticas está dado por la energía que resulta luego de que los rayos incidentes chocan con el concentrador solar. A continuación, se definen cada uno de los parámetros que se involucran en la energía y que dan lugar a las pérdidas ópticas.

Ecuación 21: Pérdidas ópticas.

$$S = I_b * \rho * \tau * F_\gamma * K_\theta$$

Dónde,

S: Dado en [w/m<sup>2</sup>\*, Energía resultante luego de chocar en el concentrador puntual.

$I_b$ : Radiación solar incidente

$\rho$ : Reflectancia de la superficie

$\tau$ : Transmisividad de la cubierta del colector.

$F_\gamma$ : Factor de interceptación.

$K_\theta$ : Corrección del ángulo de incidencia con la normal del concentrador.

Para el cálculo de la energía resultante luego de chocar en el concentrador tipo puntual ya se tienen definidos algunos parámetros como la radiación solar incidente, también la reflectancia de la superficie y transmisividad de la cubierta del colector, siendo propiedades del material usado en el proyecto el cual es el espejo. Ahora, se determinan el factor de interceptación y la corrección del ángulo de incidencia, que en la ecuación se da como modificadores de eficiencia del colector dando la mayor eficiencia como uno y la menor como cero.

*Radiación solar incidente.*

$$I_b = 700 [W/m^2]$$

*Reflectancia de la superficie.*

$$\rho = 0.8$$

*Transmisividad de la cubierta del colector.*

$$\tau = 0.78$$

**5.1.2.3 Factor de interceptación** El factor de interceptación del haz solar, mide la energía que se escapa del receptor al ser reflejado, depende del tamaño del receptor, de la geometría, de sus errores ópticos y de las variaciones de la difusión de la radiación solar.

Este factor está definido por la siguiente ecuación:

*Ecuación 22: Factor de Interceptación.*

$$F_\gamma = 1 - e^{-w}$$

Dónde “e” corresponde a la constante de Euler y “w” a un parámetro conformado por el radio del concentrador, el radio máximo de la parábola del concentrador y el coeficiente normal de distribución de flujo, dado en la siguiente ecuación y que definiremos posteriormente.

*Ecuación 23: Relación de radios del concentrador.*

$$W = h * \left[\frac{r}{r_r}\right]^2$$

El radio máximo de la parábola es definido por:

*Ecuación 24: Radio máximo de la parábola del concentrador.*

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \phi_r}$$

Dónde,

$f$ : Distancia focal.

$\phi_r$ : definido en la geometría.

$r_r$ : Radio máximo de la parábola del concentrador.

El coeficiente normal de distribución definido por:

*Ecuación 25: Coeficiente normal de distribución.*

$$h = \frac{I_{max} * d_c * \sqrt{\pi}}{2}$$

Dónde,

$d_c$ : Diámetro del concentrador.

$I_{max}$ : Densidad de flujo máxima concentrada.

La máxima energía que puede recibir el concentrador definida por:

*Ecuación 26: Máxima energía recibida por el concentrador.*

$$I_{max} = \frac{I_b * \rho}{\pi}$$

Dónde,

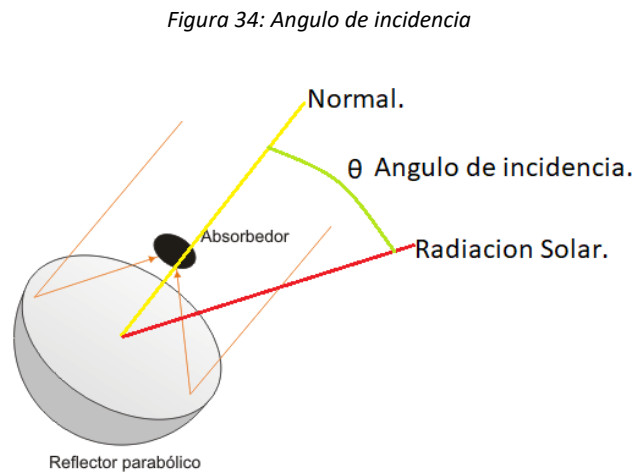
$I_b$ : Flujo de radiación promedio.

$\rho$ : Reflectividad de la cubierta reflectora.

Sin embargo, Es importante resaltar que para valores mayores a 0.85, el factor de interceptación debe tomar este valor y para valores menores se recomienda dejar dicho resultado.

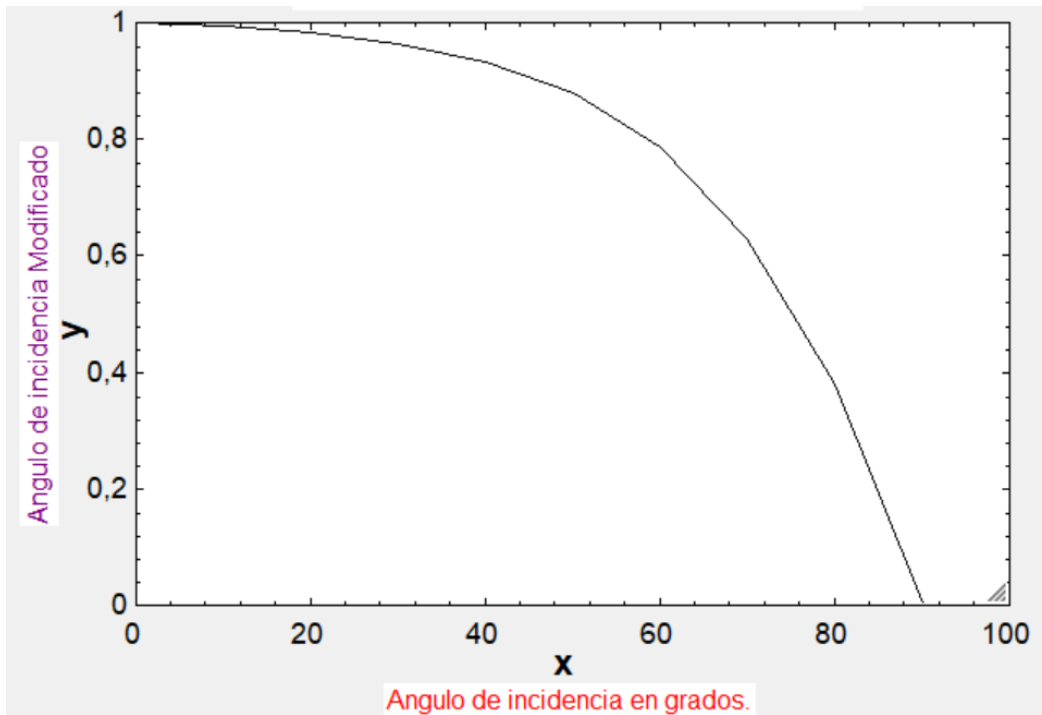
(Recomendación dada en el libro Jhon A. Duffie edición 2013). Este Valor es tomado hasta el rango de 0.85 y no hasta 1 como dato de máxima eficiencia ya que se tienen en cuenta errores de construcción o imperfecciones geométricas dadas en el concentrador.

**5.1.2.4 Corrección del ángulo de incidencia** Como ya se había descrito anteriormente, en este apartado se tendrá en cuenta la corrección del ángulo de incidencia ya que para el desarrollo de la geometría tomamos un valor de  $8^\circ$  pero como parámetro de diseño.



A continuación, observamos la gráfica que nos permite observar la modificación del ángulo de incidencia a partir de los diferentes ángulos que nos ofrece el sol en su movimiento.

Figura 35: Corrección del ángulo de incidencia.



Fuente: Solar Engineering of Thermal Processes

Ecuación 27: Corrección del ángulo de incidencia.

$$k(\theta) = 1 - 6,74 * 10^{-5} * \theta^2 + 1.64 * 10^{-6} * \theta^3 - 2.51 * 10^{-8} * \theta^4$$

Una vez que se obtienen los valores de todos estos parámetros se procede a calcular la energía perdida en el concentrador y su eficiencia óptica.

Ecuación 28: Eficiencia óptica del concentrador.

$$\eta_{optica} = \frac{S}{I_b}$$

- **Resultados**

Resultado 10: Corrección del ángulo de incidencia.

$$k(\theta) = 0.9965^\circ$$

Resultado 11: Densidad de flujo máxima concentrada.

$$I_{max} = 178.3 [W/m^2]$$

Resultado 12: Coeficiente normal de distribución.

$$h = 667$$

Resultado 13: Radio máximo de la parábola del concentrador.

$$r_r = 2.196 [m]$$

Resultado 14: Relación de radios del concentrador.

$$W = 616.5$$

Resultado 15: Factor de Interceptación.

$$F_\gamma = 0.85$$

Resultado 16: Energía resultante luego de chocar en el concentrador puntual.

$$S = 370 [W/m^2]$$

Resultado 17: Eficiencia óptica del concentrador.

$$\eta_{optica} = 0.5286 = 53\%$$

**5.1.3 Pérdidas térmicas en el receptor** Lo primero que se debe tener en cuenta en el momento de analizar las pérdidas térmicas en el sistema es dónde pueden influir en el diseño y dónde no, ya sea en el colector como en el receptor. Estas pérdidas se van a enfocar en el receptor por la razón anteriormente mencionada la cuál referencia que en el colector no existen pérdidas térmicas pero si ópticas debido a que su función es simplemente reflejar los rayos del sol, el material presentado para ello transfiere e incide poco calor de tal manera que se puede despreciar, sin embargo, en el receptor si influye mucho el calor puesto que es ahí donde se requiere acumular la energía solar para luego transformarla en energía eléctrica.

Teniendo en cuenta lo dicho anteriormente, se realiza un balance de energía en el receptor para saber cuánto calor llega al motor Stirling. Para ello se toma el calor que llega al receptor con las pérdidas ópticas ya tenidas en cuenta multiplicada por el área de apertura  $A_a$  y a esto se le resta las pérdidas de calor por convección y por radiación que existen en el receptor.

Ecuación 29: Energía total luego de chocar en el concentrador.

$$S_{total} = S * A_a$$

- **Resultados**

*Resultado 18: Energía total luego de chocar en el concentrador.*

$$S_{total} = 370 * 14 = 5180 [W]$$

### 5.1.3.1 Balance de energía

*Ecuación 30: Balance de energía en el receptor*

$$Q_{in_w} = S_{total} - Q_{ch} - Q_{rh}$$

Donde,

$Q_{in_w}$ : Calor total

$Q_{ch}$ : Pérdidas de calor por convección

$Q_{rh}$ : Pérdidas de calor por radiación

**5.1.3.2 Pérdida de calor por convección** Una vez que se tenga planteada la ecuación, se desglosa y se analiza cada pérdida por calor en el receptor. El primero a analizar es el calor por convección, se toma en cuenta la ecuación de Zhukauskas del libro Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999) donde se toma en cuenta el coeficiente de convección forzado por corrientes de aire sobre un cilindro.

*Ecuación 31: Pérdida de calor por convección*

$$Q_{ch} = h_{conv} * A_{con} * (T_h - T_f)$$

Donde,

$h_{conv}$ : Coeficiente de Convección

$A_{con}$ : Área superficial del cilindro caliente del motor Stirling

$T_h$ : Temperatura del receptor

$T_f$ : Temperatura ambiente

El valor de la temperatura ambiente es respecto a la zona rural del municipio de Nobsa,  $T_h$  es la temperatura del cilindro receptor del motor Stirling el cual es asumido y el área superficial del cilindro se define por la ecuación 32. Luego, se define el coeficiente de convección con la ecuación 33.

Ecuación 32: Área superficial del cilindro caliente del motor Stirling

$$A_{con} = L * P = L * \pi * D_{ext}$$

Dónde,

$L$ : Largo del cilindro

$P$ : Perímetro del cilindro

$D_{ext}$ : Diámetro del cilindro

- **Resultados**

Resultado 19: Área superficial del cilindro caliente del motor Stirling.

$$A_{con} = 0.056 * \pi * 0.03 = 0.005278 [m^2]$$

Temperatura del receptor.

$$T_h = 70 [^{\circ}C]$$

Temperatura ambiente.

$$T_f = 19 [^{\circ}C]$$

Ecuación 33: Coeficiente de convección externo forzado en aire.

$$h_{conv} = \frac{Nus_c * K}{D_{ext}}$$

Donde,

$Nus_c$ : Número de Nusselt

$K$ : Conductividad del aire

$D_{ext}$ : Diámetro externo del cilindro del motor

Para saber si el coeficiente de convección es externo forzado por corrientes de aire, su valor debe estar dentro de un rango de 10 a 500  $[W/m^2 \text{ } ^{\circ}K]$ . Primero se debe tener en cuenta una relación

entre el número de Grashof y el número de Reynolds para saber si es convección natural, forzado o mixto.

*Ecuación 34: Relación entre el número de Grashof y el número de Reynolds*

$$aux = \frac{Gr}{Re^2}$$

Donde,

$Gr$ : Número de Grashof

$Re$ : Número de Reynolds

Luego se debe conocer el número de Grashof, para ello se calcula con la ecuación 35 tomada del libro Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999).

*Ecuación 35: Número de Grashof.*

$$Gr = \frac{g * \beta * (T_s - T_f) * L_c^3}{\nu}$$

Donde,

$g$ : Gravedad

$\beta$ : Coeficiente de expansión volumétrica

$T_s$ : Temperatura asumida de la superficie del receptor

$L_c$ : Longitud característica de un cilindro el cual es el diámetro

$\nu$ : Viscosidad cinemática

*Ecuación 36: Longitud característica de un cilindro.*

$$L_c = D_{ext}$$

*Ecuación 37: Viscosidad cinemática.*

$$\nu = \frac{\mu}{den}$$

Dónde,

$\mu$ : Viscosidad dinámica del aire

$den$ : Densidad del aire

Las variables conocidas son: La gravedad, el coeficiente de expansión volumétrica el cual es una propiedad del aire, la longitud característica el cual es el diámetro del cilindro del motor, la viscosidad cinemática que se halla con la ecuación 37 con la viscosidad dinámica del aire y su densidad y  $T_s$  es la misma temperatura  $T_h$  por lo tanto se puede calcular Grashof.

*Gravedad*

$$g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

*Coefficiente de expansión volumétrica*

$$\beta = 0.003433$$

*Temperatura asumida del receptor*

$$T_s = 70 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

*Diámetro del cilindro del motor.*

$$D_{ext} = 0.06 \text{ [m]}$$

*Viscosidad cinemática del aire.*

$$v = 4.11 \times 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

*Viscosidad dinámica del aire.*

$$\mu = 0.0003254 \text{ [kg/m * s]}$$

*Densidad del aire.*

$$den = 791.4 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

Posterior a esto, se calcula el número de Reynolds con la ecuación 38 tomada del libro Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999).

*Ecuación 38: Número de Reynolds.*

$$Re = \frac{v_s * D_{ext}}{v}$$

Dónde,

$v_s$ : Velocidad promedio del aire en Nobsa (Weather Online)

*Velocidad del aire en Nobsa*

$$v_s = 2.6 [m/s]$$

La velocidad del aire fue tomada de la página web (Weather Online, 2021) con la ubicación del municipio de Nobsa del departamento de Boyacá.

Debido a que se conocen todas las variables presentadas en la ecuación 38 entonces se calcula el número de Reynolds.

Una vez que se haya calculado el número de Grashof y el número de Reynolds, se procede a comparar el resultado de la relación de estos valores por medio de unas condiciones presentadas por el libro Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999) para definir el tipo de convección en el sistema, se realiza esta comparación por medio del programa EES (Engineering Equation Solver) mediante funciones con sus respectivos parámetros para obtener el resultado.

Si el valor de la relación del número de Grashof y el número de Reynolds es mayor a uno, la convección es natural, si es igual a uno, la convección es mixta y si es menor que uno, la convección es forzada.

*Ecuación 39: Condiciones para relación del número de Grashof con número de Reynolds.*

*If  $aux < 1 \rightarrow$  Convección Forzada*

*If  $aux > 1 \rightarrow$  Convección Natural*

*If  $aux = 1 \rightarrow$  Convección Mixta*

El resultado de la relación es menor a uno, lo cual indica que la convección es forzada.

Una vez que se definió que es convección forzada se incorporan las ecuaciones de Zhukauskas del libro Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999) y se vuelve a calcular el número de Nusselt pero esta vez por convección forzada para un cilindro.

*Ecuación 40: Nusselt por convección forzada para un cilindro.*

$$Nus_c = C_1 * Re^{m1} * Pr^n$$

Donde,

$C_1$ : Constante C

$m1$ : Constante m

$Pr$ : Número de Prandtl

$n$ : Constante relacionada con la temperatura del cilindro

Se conoce el número de Reynolds encontrado anteriormente, la constante Prandtl es una propiedad del aire y  $n$  depende de si en el receptor se requiere calentar o enfriar siendo la primera opción la que es considerada para ese parámetro, quedaría por hallar las constantes  $C_1$  y  $m1$ .

Para hallar los valores de las constantes faltantes existen funciones donde por medio de unos parámetros se calculan y de nuevo mediante el programa EES se condiciona  $C_1$  y  $m1$  para obtener lo deseado para el sistema.

La función que se usa se llama Zhukauskas, el parámetro de entrada es el número de Reynolds y está condicionado por una serie de valores los cuales nos indica el resultado de cada constante, es decir, si el número de Reynolds es mayor a 0.85 y menor a 40 entonces la constante  $C_1$  y  $m1$  tendrían como valor respectivamente de 0.75 y 0.4. Son cuatro condiciones para cada uno y se indican a continuación. (Fundamentos de Transferencia de calor (Frank P. Incropera, David P. DeWitt, 1999))

*Ecuación 41: Condiciones para la constante C.*

$$\text{If } Re > 0.85 \text{ and } Re < 40 \rightarrow C = 0.75$$

$$\text{If } Re > 41 \text{ and } Re < 1000 \rightarrow C = 0.51$$

$$\text{If } Re > 1001 \text{ and } Re < 200000 \rightarrow C = 0.26$$

$$\text{If } Re > 200001 \text{ and } Re < 1000000 \rightarrow C = 0.076$$

*Ecuación 42: Condiciones para la constante m.*

$$\text{If } Re > 0.85 \text{ and } Re < 40 \rightarrow m = 0.4$$

$$\text{If } Re > 41 \text{ and } Re < 1000 \rightarrow m = 0.5$$

$$\text{If } Re > 1001 \text{ and } Re < 200000 \rightarrow m = 0.6$$

$$\text{If } Re > 200001 \text{ and } Re < 1000000 \rightarrow m = 0.7$$

Una vez obtenido los valores de las constantes C1 y m1 se procede a calcular la constante de Nusselt.

Posterior a esto, se calcula el coeficiente de convección forzado con el valor de la constante de Nusselt, con la conductividad del aire y el diámetro del cilindro del motor siendo este el que recibe todo el calor proveniente de los rayos solares.

Y finalmente se calcula la pérdida de calor por convección teniendo el valor de la única variable que faltaba que era el coeficiente de convección forzado.

Los valores más importantes obtenidos en este procedimiento son:

- **Resultados**

*Resultado 20: Nusselt por convección forzada para un cilindro.*

$$Nus_c = 539.8$$

*Resultado 21: Número de Reynolds.*

$$Re = 379353$$

*Resultado 22: Longitud característica de un cilindro.*

$$L_c = 0.06 [m]$$

*Resultado 23: Coeficiente de convección externo forzado en aire.*

$$h_{conv} = 232.1 [W/m^2 * ^\circ C]$$

Resultado 24: Pérdida de calor por convección.

$$Q_{ch} = 179.5 [W]$$

**5.1.3.3 Pérdida de calor por radiación** La segunda y última pérdida de calor en el receptor es por radiación. Se usa la ecuación de Stefan Boltzmann, el área a tener en cuenta es el área superficial del cilindro del motor que se expone a los rayos solares reflejados por el colector, la emisividad depende netamente del material del cilindro del receptor, la constante de Stefan Boltzmann se conoce y el delta de temperatura que se da entre la temperatura ambiente y la del cielo.

Ecuación 43: Pérdida de calor por radiación.

$$Q_{rh} = \varepsilon * \sigma * A_{con} * \left[ (T_f + 273)^4 - T_{sky}^4 \right]$$

Donde,

$\varepsilon$ : Emisividad del material del receptor

$\sigma$ : Constante de Stefan Boltzman

$T_{sky}$ : Temperatura del cielo

La emisividad depende del material del receptor donde lo ideal es que su valor sea de 0.9 (pintura negra) y la constante de Stefan Boltzman con valor de  $5.667 \times 10^{-8}$  [W/m<sup>2</sup>\*°K<sup>4</sup>].

Para determinar el valor de la temperatura del cielo se toma la ecuación (11) del proyecto de grado (Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica activado por un motor Stirling tipo Gamma, que usa como fuente la energía solar), el cual esta adecuada para hallar la perdida de calor por radiación.

Ecuación 44: Temperatura del cielo.

$$T_{sky} = 0.00552 * (T + 273)^{1.5}$$

Donde,

$T$ : Temperatura Ambiente

Una vez que se tenga el valor de la temperatura del cielo se procede a calcular la pérdida por radiación en el receptor.

- **Resultados**

*Resultado 25: Temperatura del cielo.*

$$T_{sky} = 27.54 [^{\circ}C]$$

*Resultado 26: Pérdida de calor por radiación.*

$$Q_{rh} = 1.957 [W]$$

**5.1.3.4 Calor total entregado por el concentrador** Por último se procede a realizar el balance de energía para encontrar el valor del calor total que llega al motor.

- **Resultados**

*Resultado 27: Calor Total entregado por el concentrador solar tipo puntual.*

$$Q_{in_w} = 4998 [W]$$

**5.1.3.5 Eficiencia del motor Stirling** Teniendo el valor del calor total que llega al motor se procede a calcular la potencia entregada por el motor Stirling. La eficiencia real teórica del motor se calcula asumiendo la temperatura del cilindro caliente el cual debe ser la que permite el funcionamiento del motor y la temperatura del cilindro frío el cual es la misma a la del ambiente, la ecuación que se tiene en cuenta es la de la eficiencia del ciclo Stirling ideal siendo la misma eficiencia del ciclo de Carnot.

*Ecuación 45: Eficiencia ideal del motor Stirling.*

$$efi_{ideal\ Stirling} = 1 - \frac{T_k}{T_h}$$

Dónde,

$T_k$ : Temperatura del cilindro frío del motor Stirling

$T_h$ : Temperatura del cilindro caliente del motor Stirling

Temperatura del cilindro caliente del motor Stirling

$$T_h = 723 \text{ [K]}$$

Temperatura del cilindro frío del motor Stirling

$$T_k = 292 \text{ [K]}$$

- **Resultados**

Resultado 28: Eficiencia ideal del motor Stirling.

$$efi_{ideal\ stirling} = 0.596 = 60\%$$

Por último se recomienda que el rendimiento de un motor Stirling real tenga como valor el 50% de la eficiencia de un ciclo de Carnot. (Diseño de un motor Stirling tipo Gamma, William Antony Vidal Geisel).

Ecuación 46: Eficiencia real del motor Stirling.

$$efi_{stirling} = efi_{real\ stirling} = efi_{ideal\ stirling} * 50\%$$

Este porcentaje corresponde a pérdidas en el motor tales como:

- Pérdidas por fricción de los émbolos
- Las expansiones y compresiones no son isotérmicas
- En el regenerador existen pérdidas por conducción

Cabe resaltar que este motor es el que más se acerca a la eficiencia del ciclo de Carnot. (Diseño de un motor Stirling tipo Gamma, William Antony Vidal Geisel).

- **Resultados**

Resultado 29: Eficiencia real teórica del motor Stirling.

$$efi_{stirling} = 0.3 = 30\%$$

**5.1.3.6 Potencia entregada por el motor Stirling** Por último se halla el valor de la potencia entregada por el motor Stirling.

Ecuación 47: Potencia entregada por el motor Stirling en Watts.

$$Pot_w = efi_{stirling} * Q_{in_w}$$

- **Resultados**

Resultado 30: Potencia entregada por el motor Stirling en Watts.

$$Pot_w = 1500 [W]$$

Luego se realiza la conversión de unidades para pasar de Watts a Horse Power

Ecuación 47: Potencia entregada por el motor Stirling en Horse Power.

$$Pot_{HP} = Pot_w * 0.00134102$$

- **Resultados**

Resultado 31: Potencia entregada por el motor Stirling en Horse Power.

$$Pot_{HP} = 2.011 [HP]$$

**5.1.3.7 Eficiencia total del sistema** Se debe tener en cuenta la eficiencia total del sistema el cual se puede hallar de dos formas, una de ellas es el producto de todas las eficiencias presentadas en el diseño y otra es la relación entre la energía entrante y la energía que sale.

Ecuación 48: Eficiencia total del concentrador solar tipo puntual.

$$\eta_{total} = \frac{Pot_w}{I_b * A_a}$$

Ecuación 49: Eficiencia total del concentrador solar tipo puntual.

$$\eta_{total} = \eta_{optica} * \eta_{receptor} * efi_{stirling}$$

El valor de la eficiencia total es:

- **Resultados**

*Resultado 31: Eficiencia total del concentrador solar tipo puntual*

$$\eta_{total} = 15\%$$

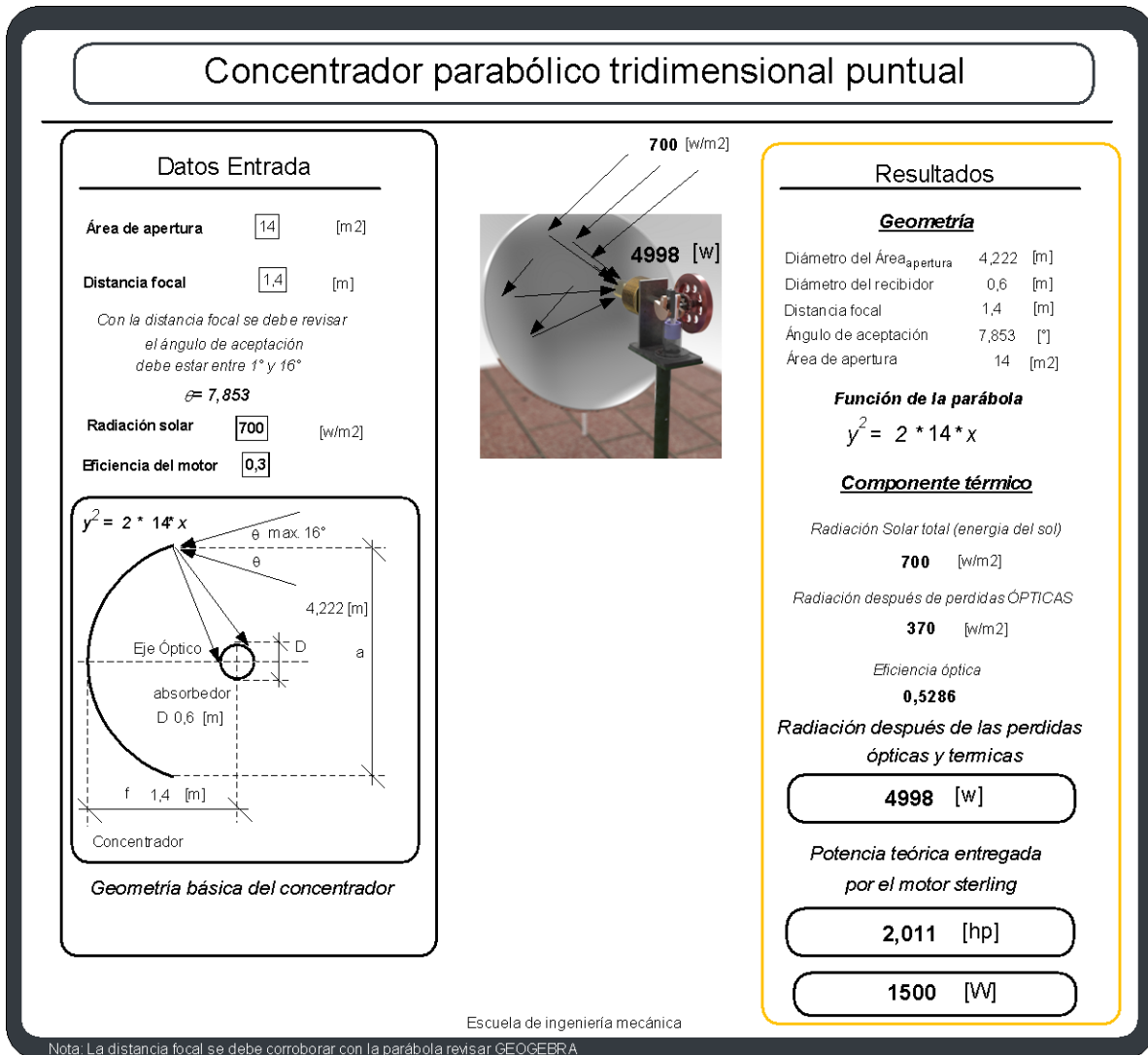
Por ultimo con la ecuación 32 se halla el valor de la eficiencia del receptor.

*Resultado 32: Eficiencia del receptor*

$$\eta_{receptor} = 94\%$$

**5.1.3.8 Interfaz de la programación del diseño** Este diseño está realizado con el fin de que el concentrador le permita al motor generar una potencia de 1500 [Watts]. Por medio del programa EES se creó una interfaz con el procedimiento de diseño anteriormente explicado, el cual permite variar los parámetros de diseño con el fin de saber que calor entrega el concentrador y a su vez la potencia que entrega el motor. A continuación se puede apreciar el interfaz.

Figura 36: Interfaz de diseño



Fuente: Autores

## 5.2 DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA

Para la demostración del diseño se construyó el concentrador a escala 1:20 que le permite al motor entregar como mínimo 6 [Watts] de potencia.

Para ello se halla el valor teórico del calor que entrega el concentrador a escala, el procedimiento para determinar ese valor es el mismo presentado para el concentrador solar real descrito anteriormente, la diferencia se encuentra en los parámetros de diseño. Por medio del interfaz creado en EES se ajustan estos parámetros para saber qué calor entrega el concentrador a escala.

Los resultados son los siguientes.

**5.2.1 Geometría óptima del colector solar a escala** A continuación se presentan los resultados obtenidos de la programación de diseño a escala, cabe resaltar que los parámetros de entrada son distintos al diseño del concentrador real. Los resultados de la geometría son los siguientes.

*Resultado 33: Área de apertura del concentrador a escala.*

$$A_{aescala} = 0.3 [m^2]$$

*Resultado 34: Diámetro del concentrador a escala.*

$$d_{cescala} = 0.618 [m]$$

*Resultado 35: Distancia focal del concentrador a escala.*

$$f_{escala} = 0.4 [m]$$

*Resultado 36: Diámetro teórico del receptor a escala.*

$$D_{teescala} = 0.1292 [m]$$

*Resultado 37: Diámetro del receptor a escala.*

$$D_{escala} = 0.1 [m]$$

*Resultado 38: Angulo de rin a escala.*

$$\phi_r = 42.24^\circ$$

*Resultado 39: Angulo de aceptación a escala.*

$$\theta_{escala} = 6.244^\circ$$

**5.2.2 Pérdidas ópticas en el colector solar a escala** A continuación se presentan los resultados de las pérdidas ópticas del colector a escala.

*Resultado 40: Radiación incidente del sol en Nobsa.*

$$I_b = 700 [W/m^2]$$

*Resultado 41: Reflectancia de la superficie del concentrador a escala.*

$$\rho = 0.8$$

Resultado 42: Transmisividad de la cubierta del colector a escala.

$$\tau = 0.78$$

Resultado 43: Corrección del ángulo de incidencia del concentrador a escala.

$$k(\theta)_{escala} = 0.9977^\circ$$

Resultado 44: Máxima energía recibida por el concentrador a escala.

$$I_{maxescala} = 178.3 [W/m^2]$$

Resultado 45: Coeficiente normal de distribución del concentrador a escala.

$$h_{escala} = 97.63$$

Resultado 46: Radio máximo de la parábola del concentrador a escala.

$$r_{rescala} = 0.4597 [m]$$

Resultado 47: Relación de radios del concentrador a escala.

$$W_{escala} = 44.12$$

Resultado 48: Factor de Interceptación.

$$F_\gamma = 0.85$$

Resultado 49: Pérdidas ópticas del concentrador a escala.

$$S_{escala} = 370.4 [W/m^2]$$

Resultado 50: Eficiencia óptica del concentrador a escala.

$$\eta_{\text{opticaescala}} = 0.5292 = 53\%$$

Resultado 51: Energía total luego de chocar en el concentrador a escala.

$$S_{\text{totalaescala}} = 111.1 [W]$$

**5.2.3 Pérdidas térmicas en el receptor a escala** A continuación se presentan los valores obtenidos de las pérdidas térmicas en el receptor a escala.

Resultado 52: Area del cilindro caliente del motor Stirling a escala

$$A_{\text{conescala}} = 0.001319 [m^2]$$

Resultado 53: Temperatura del receptor.

$$T_{\text{hescala}} = 70 [^{\circ}C]$$

Resultado 54: Temperatura ambiente.

$$T_{\text{fescala}} = 19 [^{\circ}C]$$

Resultado 55: Nusselt por convección forzada para un cilindro

$$Nus_{\text{cescala}} = 174.4$$

Resultado 56: Número de Reynolds.

$$Re_{\text{escala}} = 63226$$

Resultado 57: Longitud característica de un cilindro.

$$L_{\text{cescala}} = 0.01 [m]$$

Resultado 58: Coeficiente de convección externo forzado en aire.

$$h_{\text{convescala}} = 450 [W/m^2 * ^{\circ}C]$$

Resultado 59: Pérdida de calor por convección en el receptor a escala.

$$Q_{\text{chescala}} = 6.57 [W]$$

Resultado 60: Temperatura del cielo.

$$T_{skyescala} = 27.54 [^{\circ}C]$$

Resultado 61: Pérdida de calor por radiación en el receptor a escala.

$$Q_{rhescala} = 0.4892 [W]$$

Resultado 62: Calor Total entregado por el concentrador solar tipo puntual a escala.

$$Q_{in_{wescala}} = 104.1 [W]$$

**5.2.4 Potencia del motor Stirling a escala** A continuación se presentan los resultados relacionados con la potencia del motor Stirling del concentrador a escala.

Resultado 63: Calor recibido por el cilindro del motor a escala.

$$Q_{in_{motorescala}} = 85.36 [W]$$

Resultado 64: Temperatura funcional del cilindro caliente del motor Stirling a escala.

$$T_{hescala} = 473 [K]$$

Resultado 65: Temperatura del cilindro frío del motor Stirling a escala.

$$T_{kescala} = 292 [K]$$

Resultado 66: Eficiencia ideal del motor Stirling a escala.

$$efi_{ideal\ stirlingescala} = 0.382 = 38\%$$

Resultado 67: Eficiencia real del motor Stirling a escala.

$$efi_{stirlingescala} = 0.19 = 19\%$$

Resultado 68: Potencia entregada por el motor Stirling en Watts.

$$Pot_{wescala} = 19.77 [W]$$

Resultado 69: Potencia entregada por el motor Stirling en Horse Power.

$$Pot_{HPescala} = 0.02652 [HP]$$

Resultado 70: Potencia entregada por el generador eléctrico.

$$Pot_{wgeneradorescala} = 11.862 [W]$$

Resultado 71: Eficiencia del generador eléctrico.

$$\eta_{generadorescala} = 60 \%$$

Resultado 72: Eficiencia total del sistema a escala.

$$\eta_{totalescala} = 5 \%$$

Resultado 73: Eficiencia del receptor a escala.

$$\eta_{receptorescala} = 82 \%$$

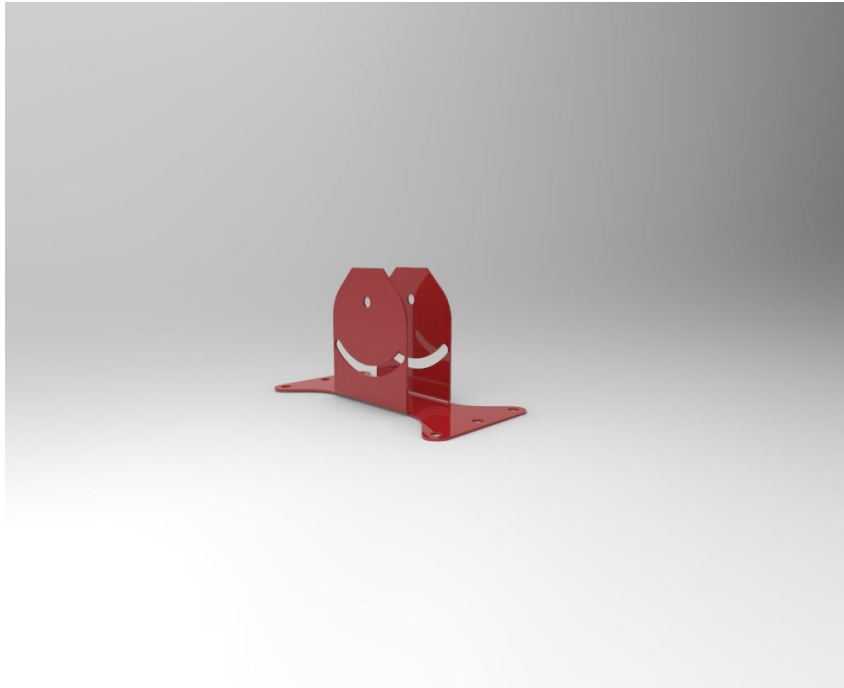
**5.2.5 Diseño mecánico y análisis MEF** La estructura del colector solar cuenta con un diseño compacto, pensado para evitar desviaciones ocasionadas por el aire y para facilitar el cambio de posición del plato reflector. La estructura del concentrador cuenta con 4 partes fundamentales:

- Articulaciones
- Barra soporte del colector
- Brazo base del motor
- Base del colector

**5.2.5.1 Articulaciones** Las articulaciones deben darle la oportunidad al colector de cambiar de posición para recibir los rayos solares directamente. Existen dos articulaciones en el sistema, una se encuentra en la unión del plato reflector con el cuerpo estructural del colector (Brazo soporte del colector) y la otra está entre el cuerpo estructural o Brazo soporte y la base.

Las dos mencionadas anteriormente tienen la misma función y cambios de dirección, cada una posee 3 tornillos con tuerca hexagonal de 3/16", 13x2. Uniendo dos láminas de Hierro mecanizadas con guías las cuales permiten el cambio de posición. La que une el brazo con la base del motor tiene como eje un tornillo con tuerca hexagonal de 3/16", 13x2 para darle la mejor posición al motor Stirling.

*Figura 37: Articulación del concentrador*



*Fuente: Autores*

**5.2.5.2 Barra soporte del colector** Esta barra desempeña una importante función en el concentrador ya que es la encargada de sostener el sistema compuesto por el colector, el motor Stirling y el brazo base del motor. Esta barra tiene un ángulo de aproximadamente  $135^\circ$  y nos permite darle al colector una mejor posición para una óptima recepción de los rayos solares. En la parte inferior se encuentra unido a la base que nos permite darle la estabilidad al concentrador en cualquiera de sus ángulos.

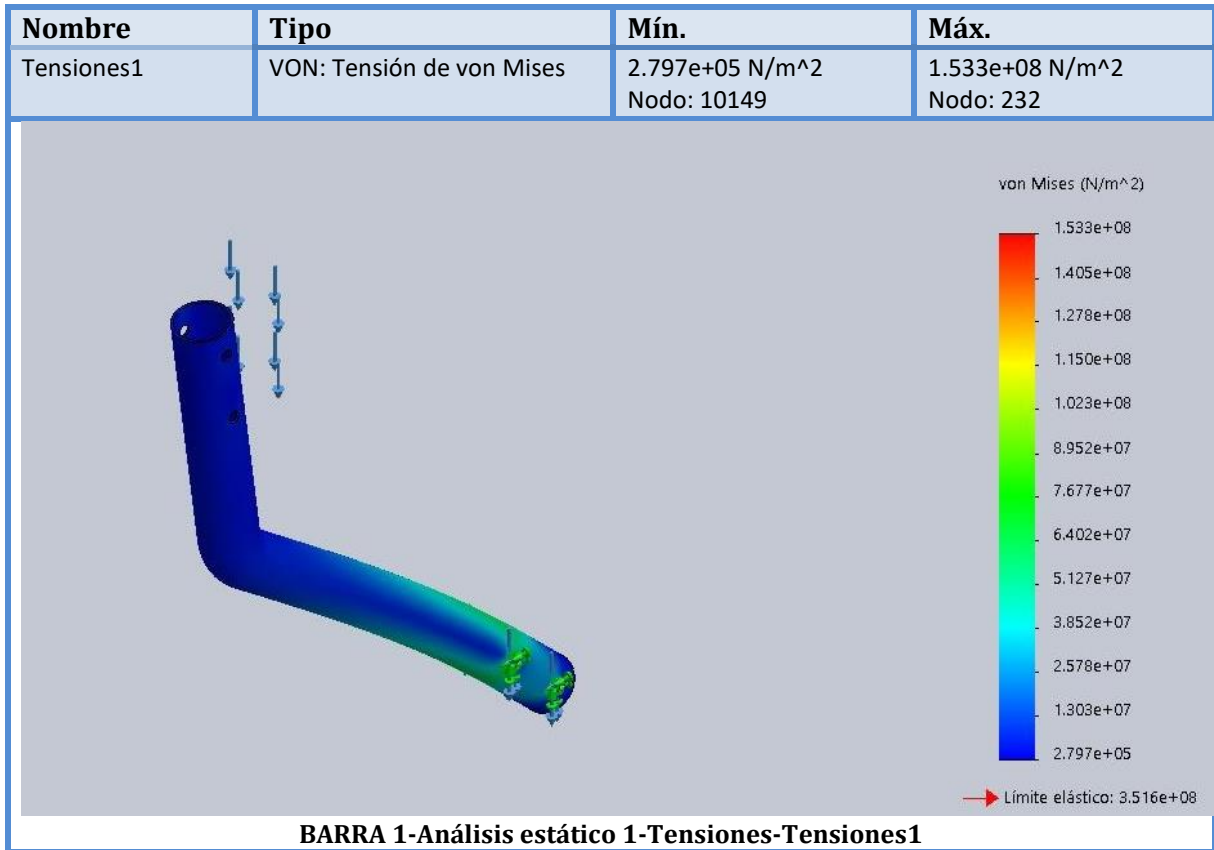
Este soporte está fabricado en tubo de hierro de  $1\frac{1}{2}$ " Calibre 18 con una longitud de aproximadamente 1 metro.

Figura 38: Barra soporte del colector



Fuente: Autores

Figura 39: Análisis de tensiones en la barra soporte



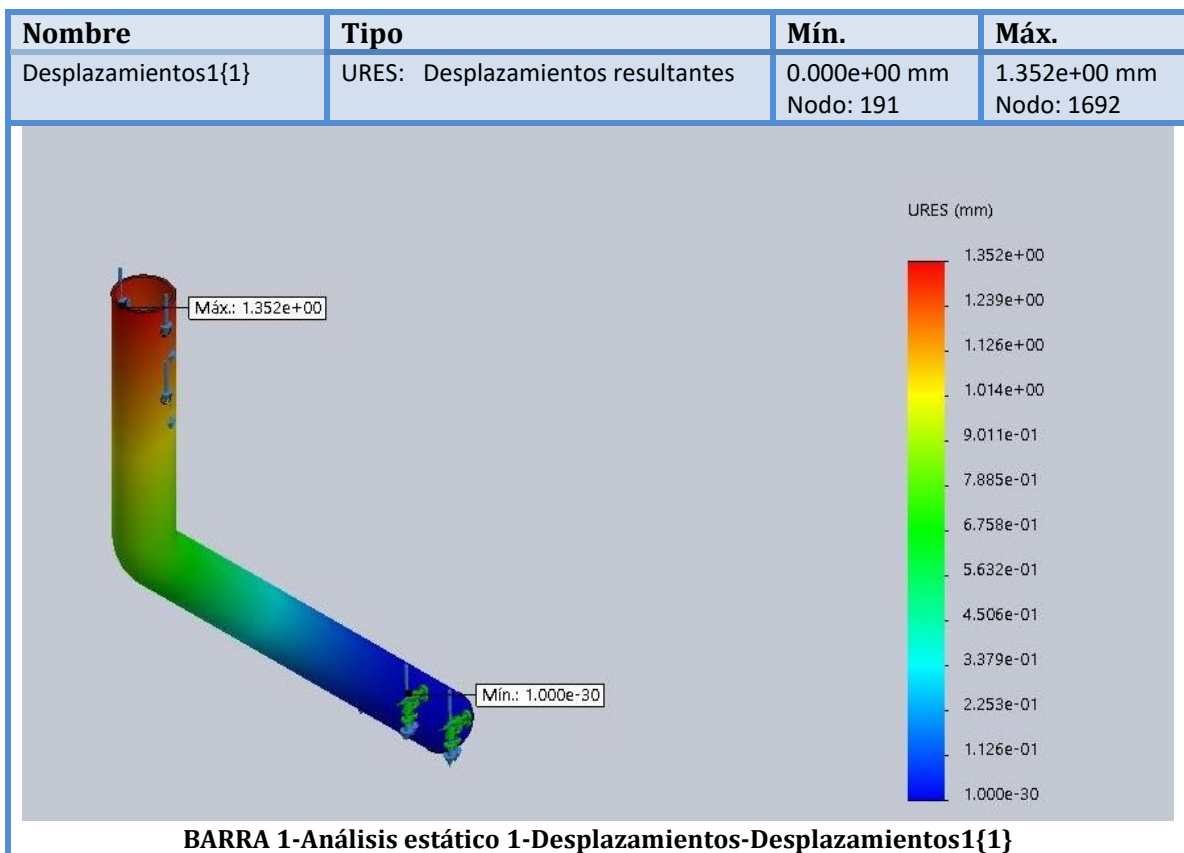
**BARRA 1-Análisis estático 1-Tensiones-Tensiones1**

Fuente: Autores

**Análisis de tensiones en la barra soporte:** Ante los resultados obtenidos, nos damos cuenta que el esfuerzo mínimo se encuentra en la parte superior de la barra, es en la zona donde se sujeta el colector con esta barra tenemos un esfuerzo de **2.79e+05 N/m<sup>2</sup>**.

En cuanto al esfuerzo máximo, y aunque no muy elevado ubicado en la zona de agarre de la barra con la base, tenemos un esfuerzo de **1.53e+08 N/m<sup>2</sup>**, como se puede apreciar en la gráfica son valores muy aceptables que no presenta falla alguna.

Figura 40: Análisis de desplazamiento de la barra soporte

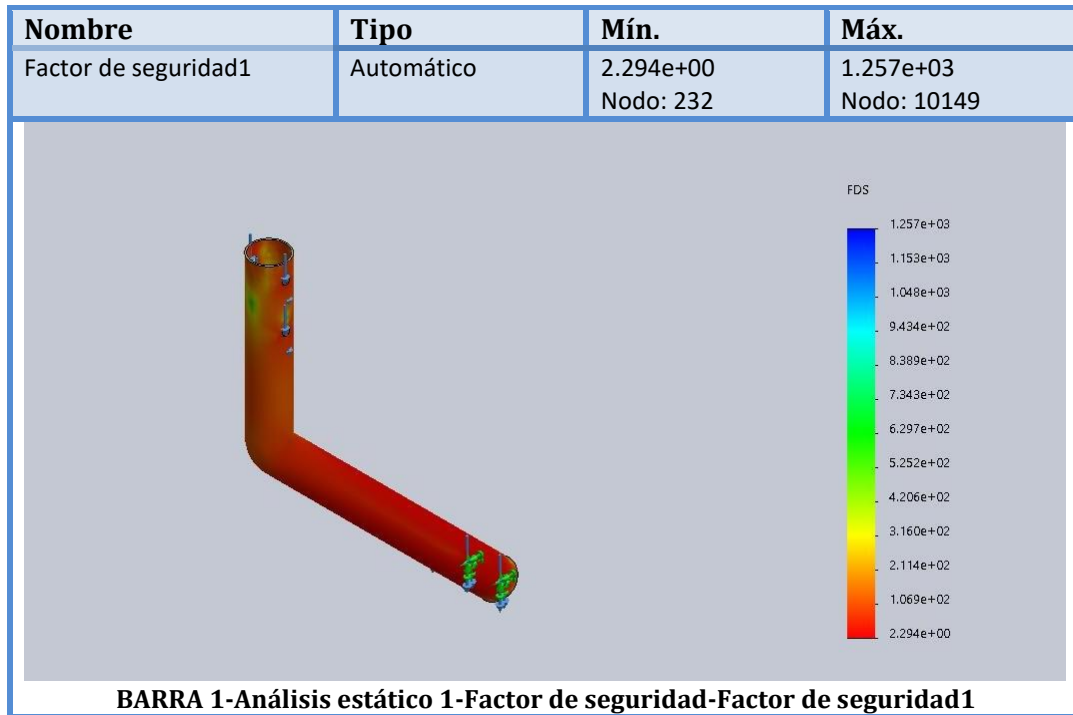


Fuente: Autores

**Análisis de desplazamiento de la barra soporte:** Es Notorio que ante la presencia de cargas sobre la barra soporte del concentrador solar hay presencia de desplazamientos que de alguna u otra forma generan deformación en el material de la pieza encargada de la sostenibilidad del colector y del motor stirling, encontramos una deformación de aproximadamente **1.35e+00 mm**, magnitud

que es considerablemente muy baja y que nos permitirá tener una pieza con excelentes prestaciones de trabajo.

Figura 41: Análisis de factor de seguridad en la barra soporte

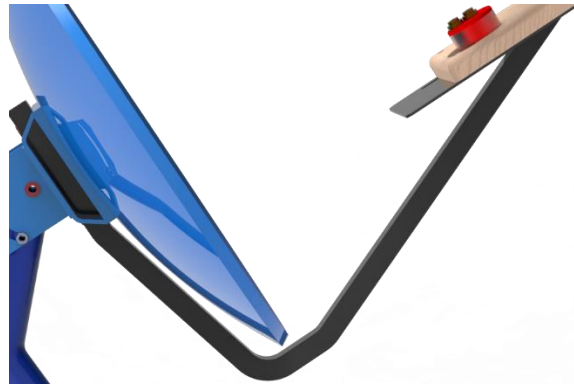


Fuente: Autores

**Análisis de factor de seguridad en la barra soporte:** En la mayor parte del cuerpo del brazo soporte, se demuestra que se encuentra un factor de seguridad mínimo evaluado en **2,294e+00**, dicha magnitud se encuentra en el rango de valores aceptables que nos permite obtener de forma confiable resultados esperados en esta pieza del concentrador solar.

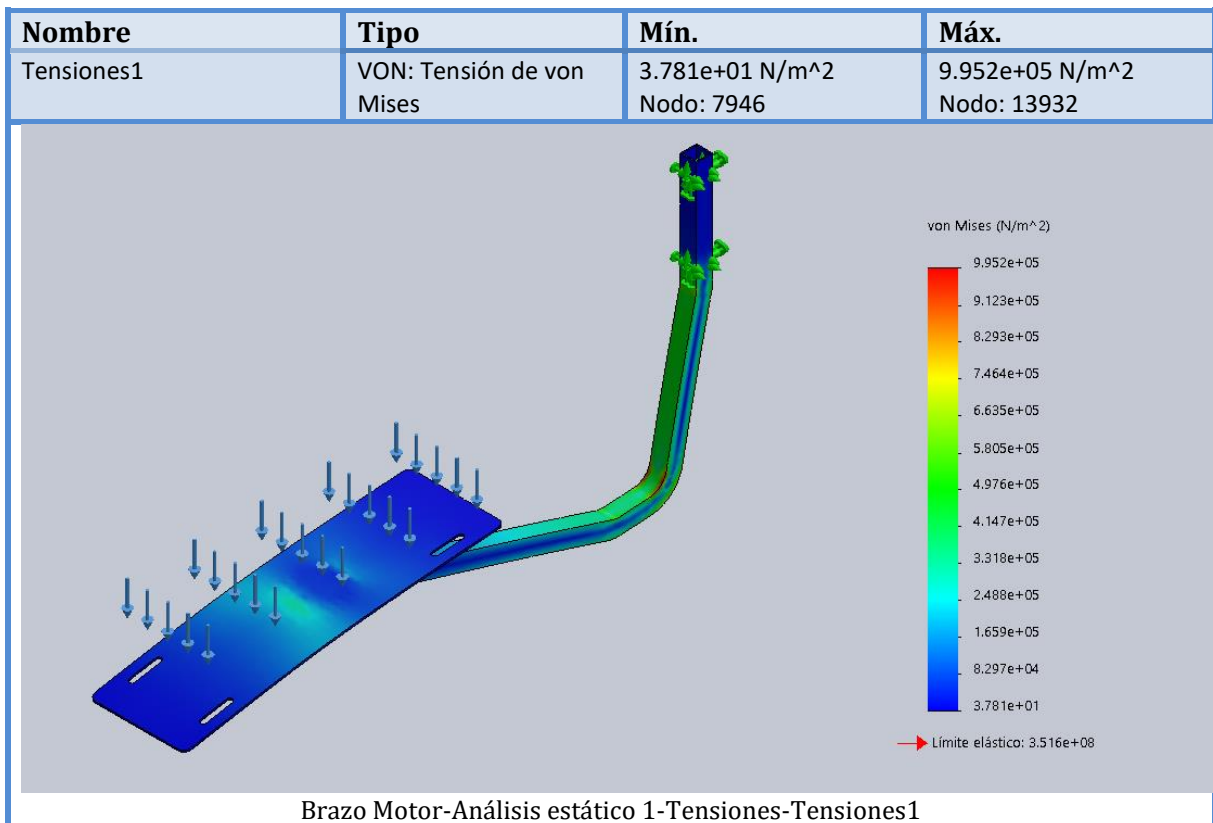
**5.2.5.3 Brazo base del motor** El brazo del concentrador solar, cuya función es servir de base al motor Stirling, está diseñado en tubo cuadrado de 1" calibre 18 y de una longitud de aproximadamente 0.8m. Este brazo se encuentra sujeto al colector por medio de unos tornillos de 3/16", 15x6, fijos.

Figura 42: Brazo base del motor



Fuente: Autores

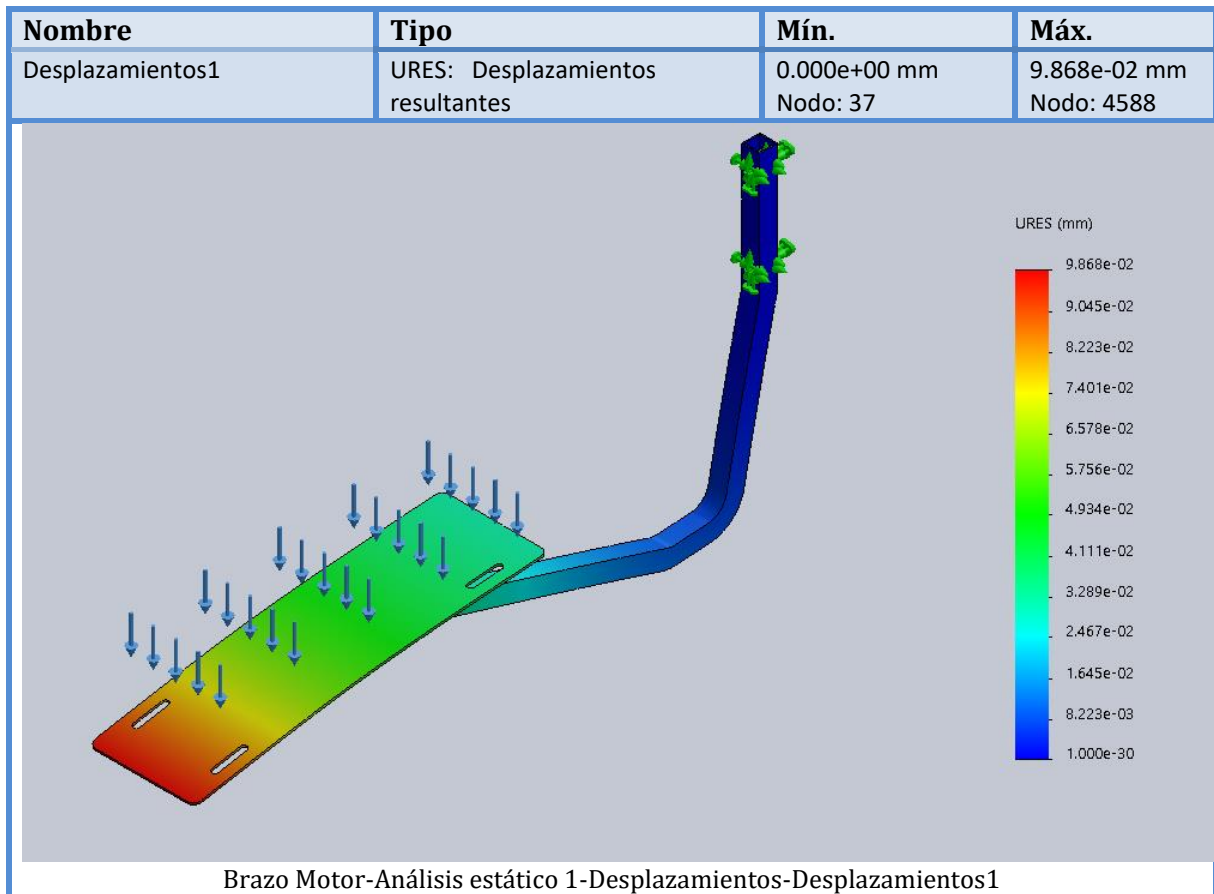
Figura 43: Análisis de tensiones en el brazo base del motor



Fuente: Autores

**Análisis de tensiones en el brazo base del motor:** El análisis de tensiones y desplazamientos corroboran la efectividad del diseño y el material a usar, los esfuerzos máximos se dan en la parte inferior de la unidad, dejando así las esquinas con esfuerzos más bajos soportados gracias a la eficacia del material seleccionado para la base y a la muy buena selección de soldaduras. Teniendo como valor máximo  $9.952e+05 \text{ N/m}^2$  nos damos cuenta que el rango aceptación es muy aceptable para el esfuerzo que se presenta ante el brazo, que aunque muy mínimo nos demuestra su efectividad.

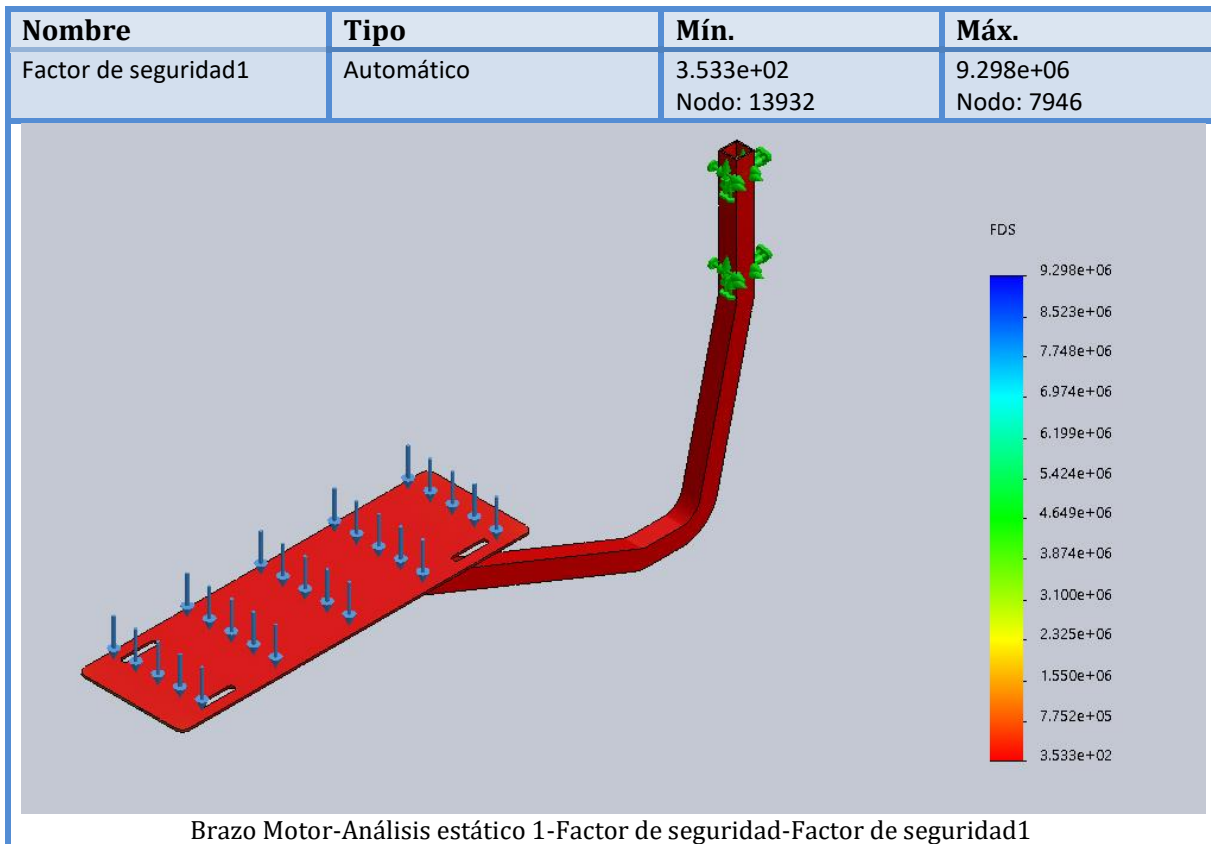
Figura 44: Análisis de desplazamientos en el brazo base motor



Fuente: Autores

**Análisis de desplazamientos en el brazo base motor:** Ante el mínimo esfuerzo que se presenta en esta pieza, es muy aceptable la deformación presentada ya que su valor se encuentra aproximado a cero. Con una magnitud de  $9.868e-02 \text{ mm}$  apreciamos que es muy aceptable y que por ningún motivo nuestro sistema presentará fallas.

Figura 45: Análisis de factor de seguridad del brazo base motor

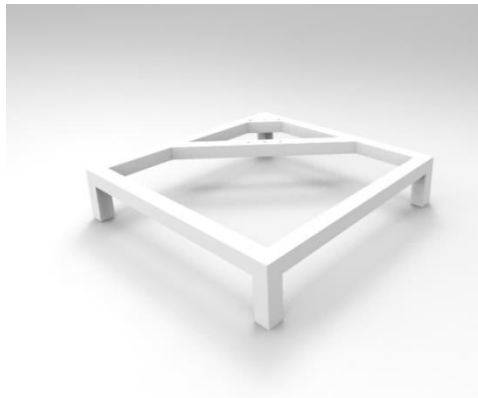


Fuente: Autores

**Análisis de factor de seguridad del brazo base motor:** Se determina mediante el software que la pieza presentada junto con los materiales asignados, presentan un excelente factor de seguridad. En la gráfica es posible apreciar que en toda la superficie de la pieza, se tiene el menor valor determinado en y que así nos permitirá tener mayor confiabilidad en el sistema.

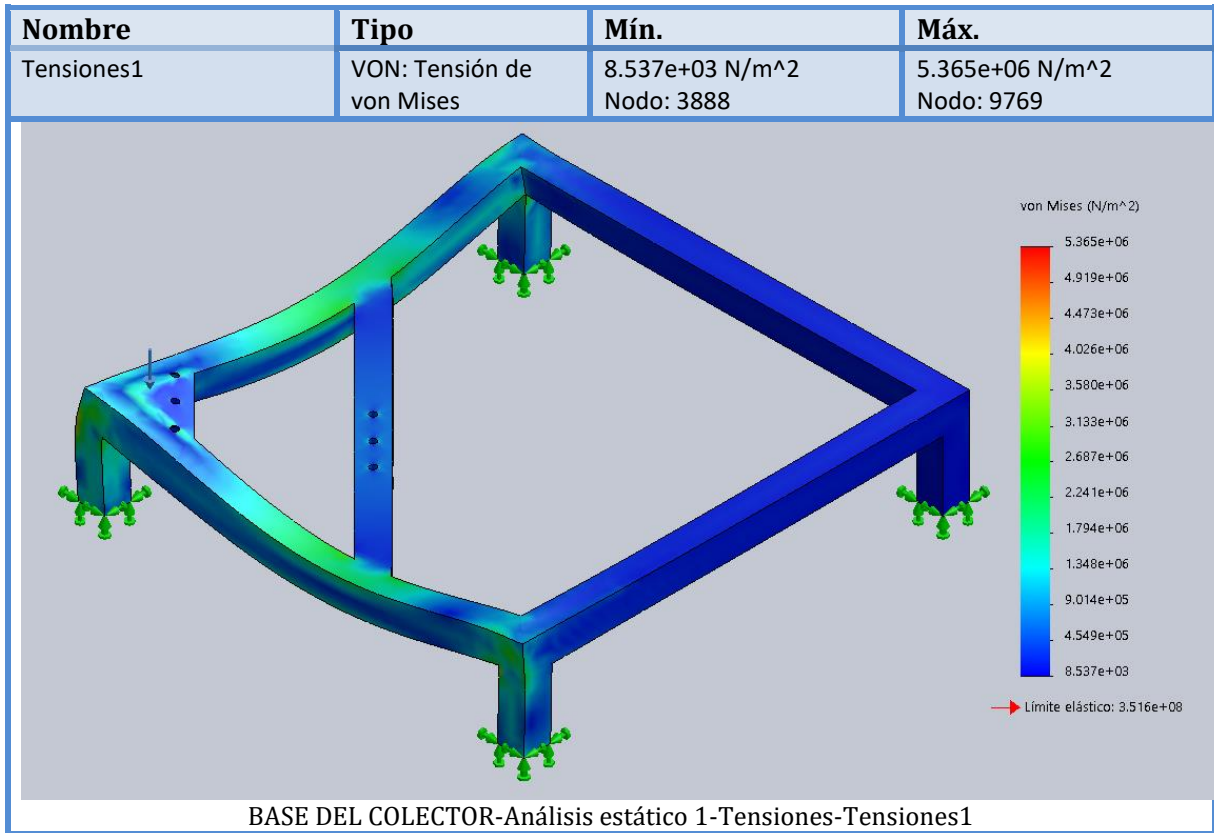
**5.2.5.4 Base del colector** Como ya se había especificado anteriormente, una de las funciones principales la tiene la base del concentrador solar, la estabilidad que proporciona ante cualquier ángulo debe ser muy alta para que las demás partes del concentrador puedan trabajar eficazmente. Conectada a una de las articulaciones mediante tornillos con cabeza hexagonal de 3/16", 13x2 esta base hecha en tubo cuadrado de hierro estructural HR50 calibre 18 tiene soldaduras en electrodo recubierto 6013 que hacen de esta una base sólida y resistente a posibles vibraciones.

*Figura 46: Base del colector*



*Fuente: Autores*

Figura 47: Análisis de tensiones de la base del colector

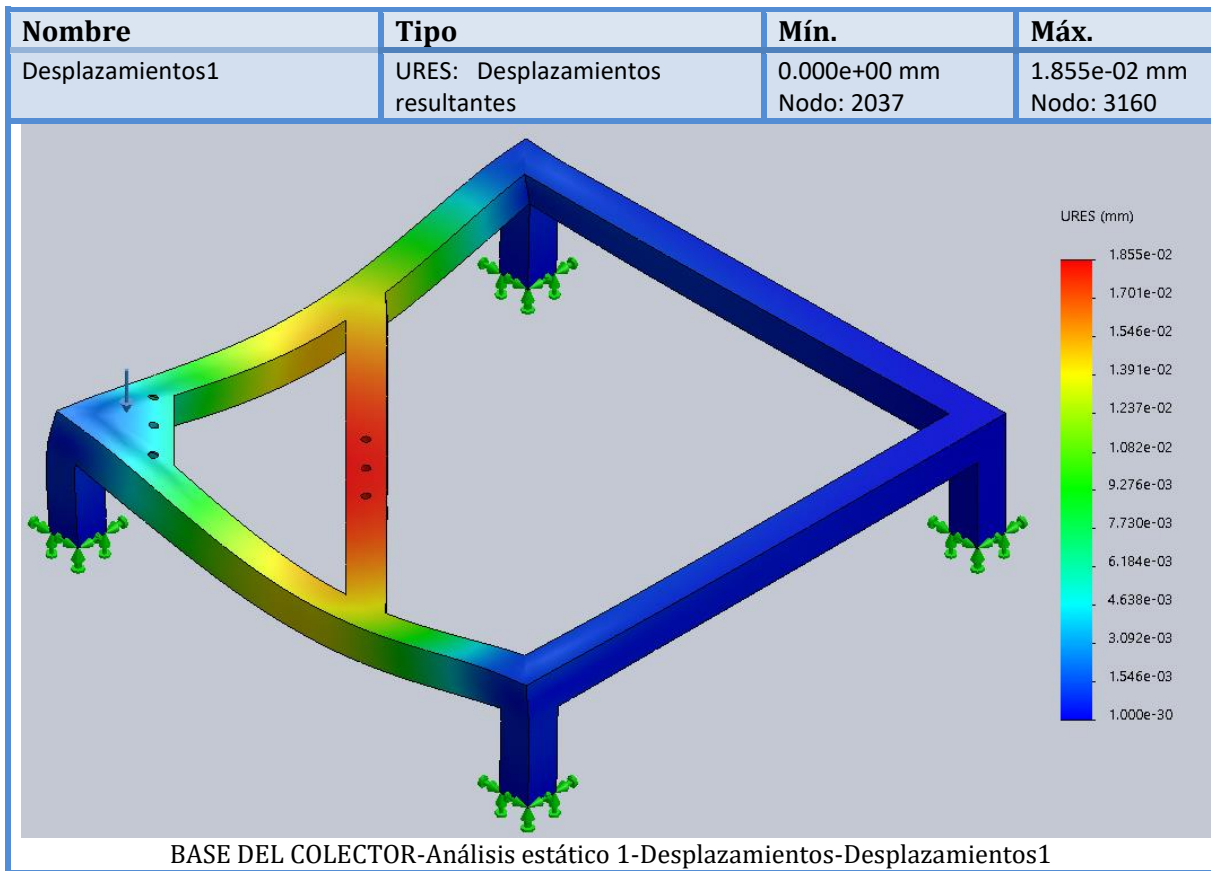


Fuente: Autores

**Análisis de tensiones de la base del colector:** Se corrobora que en el análisis de tensiones tenemos un rango de colores que nos permiten apreciar que ante las deformaciones presentadas, el sistema sigue estando completamente seguro. Como valor de Máxima aproximación tenemos **5.365e+06 N/m<sup>2</sup>**

Teniendo en cuenta que la zona de mayor esfuerzo se encuentra en uno de los vértices de la base, las demás zonas del mismo dan un factor importante al sistema, aun cuando existan fuerzas aplicadas a uno de sus lados. La estabilidad que se obtiene es óptima para su equilibrio.

Figura 48: Análisis de desplazamientos de la base del colector

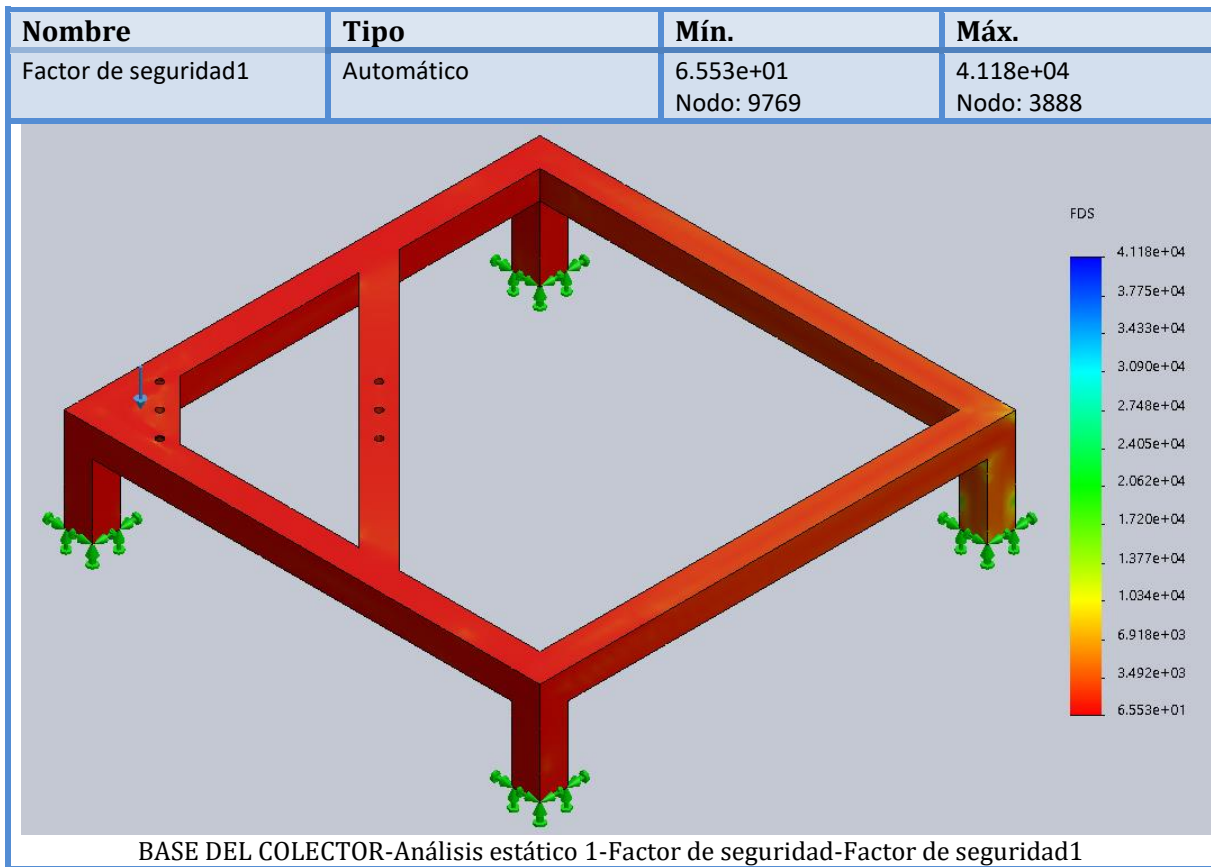


Fuente: Autores

**Análisis de desplazamientos de la base del colector:** Los desplazamientos obtenidos en el análisis son casi nulos gracias a la eficaz selección del material para la base, Tubo de perfil cuadrado calibre 18 y soldaduras en sus extremos con electrodo revestido E6013.

Con un Valor de **1.855e-02 mm**, es notorio que el peso que aunque no es muy elevado, Alcanza a flectar en una muy mínima parte el material.

Figura 49: Análisis de factor de seguridad de la base del colector



*Fuente: Autores*

**Análisis de factor de seguridad de la base del colector:** En más de un 80% de la base del colector se aprecia un Factor de seguridad muy aceptable, Ante este valor presentado se puede tener una confiabilidad alta ya que como modelo a escala es muy relevante pues a escala más alta.

### 5.3 CONSTRUCCIÓN DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA.

Luego del diseño y pruebas por medio del programa Solidworks, se procede a realizar la fabricación y construcción del concentrador solar, para ello los recursos monetarios, la selección de los materiales y algunos acabados superficiales provienen de los autores, y el mecanizado de las piezas es contratación a terceros para el uso de torno, fresadoras, cortes, dobladoras, etc.

**5.3.1 Manufactura del paraboloide (colector)** Para obtener esta pieza se seleccionó el paraboloide de una antena de televisión con las dimensiones del colector diseñado, esto permitió que los costos disminuyeran y facilitó la construcción del dispositivo, cabe resaltar que estas antenas son diseñadas con el objetivo de reflejar ondas en un mismo foco, por lo que cumple con la función de reflejar rayos provenientes del sol a un mismo punto focal, en este caso, al motor Stirling.

*Figura 50: Colector*



*Fuente: Autores*

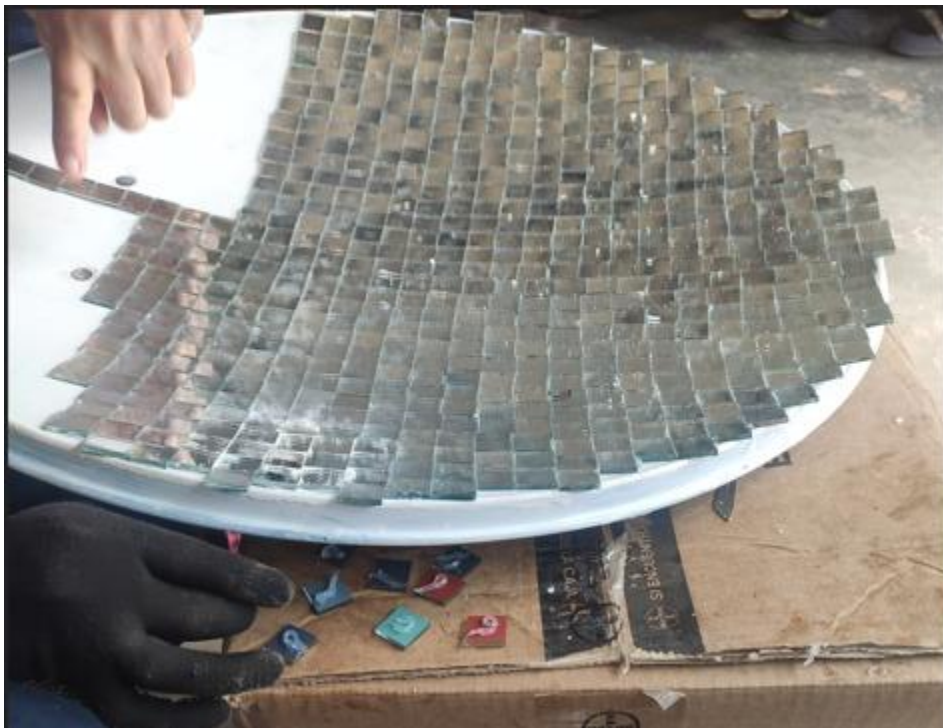
Posterior a esto se procedió a pegar espejos de 2x2 [cm] en toda la superficie de la antena con el objetivo de reflejar todos los rayos solares al foco.

Figura 51: Prueba de espejos



Fuente: Autores

Figura 52: Proceso de pegue de espejos



Fuente: Autores

Finalmente se retiró toda impureza que quedó en los espejos con un limpiador especial para esas superficies.

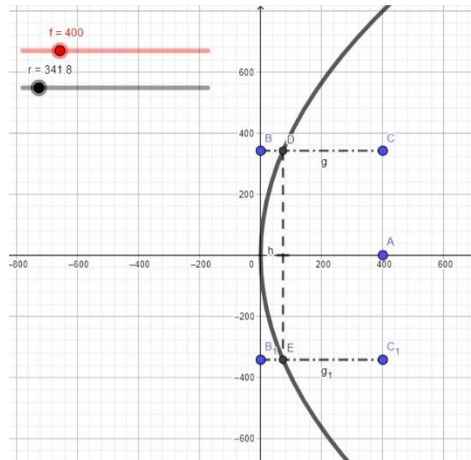
*Figura 53: Colector Terminado*



*Fuente: Autores*

**5.3.2 Manufactura del brazo base del motor** Para la fabricación de la base del motor Stirling, fue necesario el uso de un tubo de perfil cuadrado de  $\frac{1}{2} \times \frac{1}{2}$  pulgadas y un trozo de lámina de hierro calibre 12. Inicialmente se procede a doblar el tubo de hierro de perfil cuadrado en diferentes ángulos hasta encontrar el foco que se calculó en la geometría del colector. No se pudo tener en cuenta el brazo de la antena seleccionada debido a que presentaba imperfecciones que ocasionaban fallos en el montaje.

Figura 54: Determinación del foco mediante Geogebra



Fuente: Autores

Una vez obtenidos los ángulos precisos, se procede a soldar el brazo a una lámina de dimensiones 10x16 cm las cuales contiene de agujeros de 1/4 de pulgada para asegurar el motor a esta base soporte. La soldadura empleada y con la cual los análisis de falla arrojaron muy buenos resultados es la E6013. Soldadura de electrodo revestido que nos permite trabajar de forma segura. Una vez se prepara la totalidad del brazo, se asegura al colector con dos tornillos de 3/8 de pulgada con tuerca hexagonal.

*Figura 55: Instalación del motor Stirling al brazo del colector*



*Fuente: Autores*

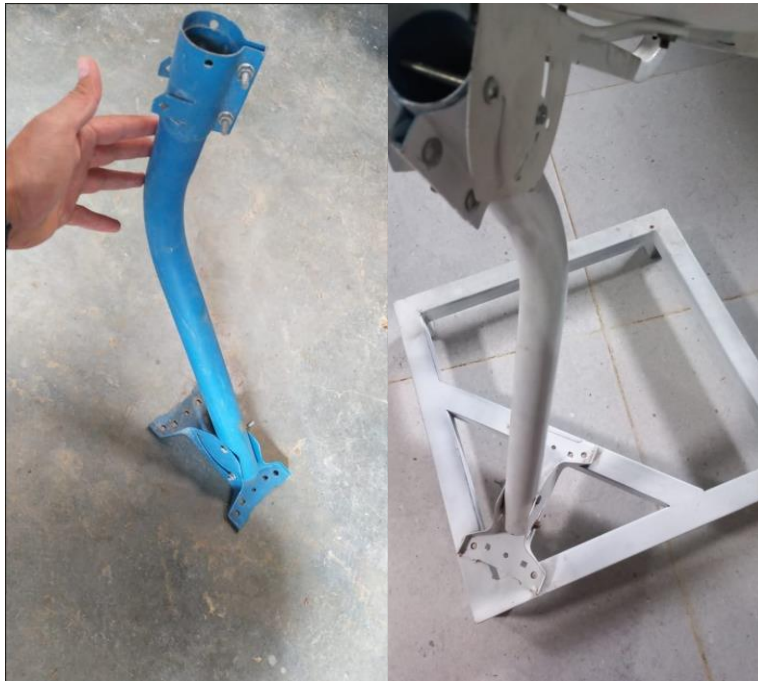
*Figura 56: Instalación del motor al brazo finalizado*



*Fuente: Autores*

**5.3.3 Manufactura de la barra soporte del colector** A un ángulo de  $135^\circ$ , se encuentra doblada nuestra barra que tiene una gran función en la estructura del concentrador solar. Con una longitud de 1m, un tubo de  $1\frac{1}{2}$  calibre 18 en hierro, conecta nuestra base soporte con el colector y con el brazo base motor gracias a dos articulaciones en hierro que se estudiarán posteriormente. Las conexiones se realizan mediante tornillos con tuerca hexagonal de  $\frac{3}{16}$  de pulgada.

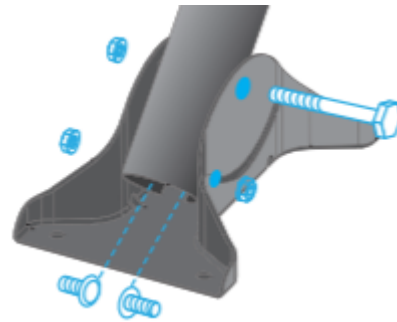
*Figura 57: Barra soporte del colector*



*Fuente: Autores*

**5.3.4 Manufactura de las articulaciones** Para la elaboración de las articulaciones empleamos lámina de hierro calibre 10. En cada extremo tiene 3 perforaciones hechas con broca de  $\frac{3}{16}$  para la sujeción con la base y el colector. Adicionalmente cuenta con guías que permiten un desplazamiento tanto de la barra como del colector y así darle una mejor orientación al concentrador solar.

Figura 58: Articulación del concentrador solar



Fuente: Autores

**5.3.5 Manufactura de la base del colector.** Mediante el uso de un tubo de perfil cuadrado de 4x4 se fabrica la base del colector. Usando una sierra se realizan cortes para darle su forma y mediante soldadura E6013 se sueldan para darle mejor sujeción. La articulación se encuentra sujeta a uno de los extremos y no en la mitad por la geometría y ubicación del colector, en vista de que por la orientación del sol el colector debe tomar diferentes posiciones, se hacen pruebas de la máxima carga en la más extrema posición y así se concluye que es la óptima posición de la articulación con relación a la base.

Figura 59: Base del concentrador solar



Fuente: Autores

Figura 60: Base del concentrador



Fuente: Autores

## 6 SELECCIÓN DEL MOTOR STIRLING

Para la selección del motor se debe tener en cuenta que su potencia de salida cumpla con el requisito del proyecto, es decir, que sea capaz de generar como mínimo 6 Watts de potencia

### 6.1 ESPECIFICACIONES DEL MOTOR STIRLING SELECCIONADO

A continuación se presenta las características del motor seleccionado para el concentrador solar.

Tabla 7: Especificaciones del motor Stirling seleccionado

Referencia.	Especificaciones.
Motor Stirling tipo Gamma	<b>Medidas:</b> 12cmx14cmx20cm <b>Peso Aprox:</b> 1.32 Lb <b>RPM Generador:</b> 2300 Base de aluminio Cepillado Varilla de rodamiento en acero Inoxidable Volante de aleación de aluminio

Fuente: Autores

### 6.2 EFICIENCIA DEL MOTOR STIRLING SELECCIONADO

Es necesario conocer la eficiencia del motor debido a que la potencia del mismo depende directamente de este parámetro. Para ello se tiene en cuenta que la eficiencia del ciclo Stirling ideal

es la misma eficiencia del ciclo de Carnot. (Diseño de un motor Stirling tipo Gamma, William Antony Vidal Geisel)

*Ecuación 49: Eficiencia ideal del motor Stirling.*

$$efi_{ideal\ stirling} = 1 - \frac{T_k}{T_h}$$

Donde,

$T_k$ : Temperatura del cilindro frío del motor Stirling

$T_h$ : Temperatura del cilindro caliente del motor Stirling

El valor de las temperaturas son obtenidas mediante las consideraciones de operación del motor en el momento en el que está expuesto a los rayos solares, sabiendo esto, el valor de la temperatura  $T_h$  sería la que permite que el motor funcione y la  $T_k$  sería la temperatura ambiente. Ver los siguientes valores

*Temperatura del cilindro caliente del motor Stirling*

$$T_h = 473 [K]$$

*Temperatura del cilindro frío del motor Stirling*

$$T_k = 292 [K]$$

- **Resultados**

*Resultado 74: Eficiencia ideal del motor Stirling.*

$$efi_{ideal\ stirling} = 0.382 = 38\%$$

Por último se recomienda que el rendimiento de un motor Stirling real tenga como valor el 50% de la eficiencia de un ciclo de Carnot. (Diseño de un motor Stirling tipo Gamma, William Antony Vidal Geisel).

*Ecuación 50: Eficiencia real del motor Stirling.*

$$efi_{stirling} = efi_{real\ stirling} = efi_{ideal\ stirling} * 50\%$$

Este porcentaje corresponde a pérdidas en el motor tales como:

- Pérdidas por fricción de los émbolos
- Las expansiones y compresiones no son isotérmicas
- En el regenerador existen pérdidas por conducción

Cabe resaltar que este motor es el que más se acerca a la eficiencia del ciclo de Carnot. (Diseño de un motor Stirling tipo Gamma, William Antony Vidal Geisel).

- **Resultados**

*Resultado 75: Eficiencia real teórica del motor Stirling.*

$$efi_{stirling} = 0.19 = 19\%$$

## 7 COSTOS

Los gastos que se involucran en la elaboración del proyecto están proyectados en la siguiente tabla. Cabe resaltar que gran parte de los materiales empleados en el proyecto, eran de segunda mano, ya los teníamos o fueron solicitados como préstamo en ciertas etapas. Otros procesos de construcción fueron orientados o realizados por personas externas que contaban con el conocimiento para su realización.

Tabla 8: Costos de Construcción

COSTOS DE CONSTRUCCION				
Pieza o Material	Cantidad	Vlr Unitario \$	Vlr Total \$	Descripcion
Antena	1	50000	50000	Antena de 2 mano comprada en marketplace.
Motor stirling	1	302000	302000	Motor importado Via Mercado libre.
Brazo motor	1	25000	25000	Manufacturado en Taller metalmeccanico.
Base motor	1	10000	10000	Manufacturado en Taller metalmeccanico.
Tubo de perfil Cuadrado	1m	20000	20000	Seleccionado según especificaciones de Diseño
Soldadura de alta Tº	1	12000	12000	Para la conexión de el receptor con el Absorbedor
Cable	0.5 m	500	500	Para la conexión del led al generador.
soldadura E6013	0.5kg	11000	11000	Para union de tubería en la Base.
Estaño	0.1 m	1000	1000	Para la conexión del led al generador.
Cautín	1	5000	5000	Para la conexión del led al generador.
Silicona fria	1	8000	8000	Empleada en el pegue de los Espejos.
Espejos	1m2	40000	40000	Usados para la reflexión de los rayos.
Lija	3 Octavos	1000	3000	Usado en la limpieza de material de impurezas.
Brocha	1	3000	3000	Para Pintar el Colector.
Aerosol	2	10000	20000	Para Pintar el Colector.
Lamina de aluminio	1	15000	15000	Material base del colector.
Termocupla	1	60000	60000	Importado Via Mercado libre.
Remache	4	500	2000	Para sujeción de receptor
Tornillo Hexagonal de 3/16	30	300	9000	Para sujeción de receptor
Total= \$596500				

Fuente: Autores

Adicional a los gastos principales, se tienen gastos secundarios o adicionales que surgen por procesos extras o acciones diferentes que de igual forman generan gastos de más en la construcción del proyecto.

Tabla 9: Costos adicionales

COSTOS ADICIONALES		
Parametro.	Valor \$	Descripcion
Transporte.	130000	Reuniones para la construcción
fotocopias.	10000	Material físico empleado.
llamadas.	10000	Comunicación de Participantes del diseño.
Alquiler de herramientas.	200000	Para la elaboración del Proyecto.
Otros.	50000	Adicionales a los gastos base del proyecto.
Total= \$400000		

Fuente: Autores

Finalmente se tienen los gastos totales que surgen como resultado de la suma de gastos por construcción y gastos adicionales.

Tabla 10: Costo Total

COSTOS TOTAL	
Parametro.	Valor \$
Costos de construccion	596500
Costos adicionales	400000
	<b>Total=\$996500</b>

Fuente: Autores

## 8 PRUEBAS Y ANALISIS DE RESULTADOS

En este apartado del proyecto se esperaba un comportamiento del concentrador solar que se construyó acorde a los cálculos que se realizaron. Un parámetro muy importante a tener en cuenta es el calor de salida que debe tener el concentrador solar, puesto que tiene que ser capaz de generar una potencia de salida de 6 [Watts] como mínimo. Para medir la potencia de salida y el calor que se puede llegar a recibir del concentrador se puede usar una variedad de fuentes, el proyecto se enfocó principalmente en usar un motor Stirling como instrumento de medición de energía, sin embargo, para la realización de pruebas se usó también un recipiente con agua. Cabe resaltar que es muy importante tener en cuenta otro parámetro el cual es la temperatura que llega al motor o a las demás fuentes, ya que se puede apreciar lo eficiente que puede llegar a ser el concentrador solar.

### 8.1 INSTRUMENTACIÓN UTILIZADA

Los instrumentos de medición son muy importantes cuando se desea medir alguna variable, en este caso se tuvieron en cuenta los instrumentos que facilitaron la toma de datos en el momento en el que se puso en funcionamiento el concentrador solar tipo puntual.

**8.1.1 Termocupla digital** La termocupla digital, ver figura 61, maneja un rango de temperatura entre 5[°C] a 400[°C], cumpliendo con el debido requerimiento de temperatura ambiente y la temperatura de la zona caliente del concentrador solar tipo puntual.

*Figura 61: Termocupla digital*



*Fuente: Autores*

**8.1.1.1 Multímetro** El multímetro, ver figura 62, mide la corriente y el voltaje del generador eléctrico del motor Stirling.

*Figura 62: Multímetro*



*Fuente: Autores*

**8.1.2 Lubricante** El lubricante, ver figura 63, se usa en los elementos donde se presenta mucha fricción en las zonas del motor durante su funcionamiento.

*Figura 63: Lubricante*



*Fuente: Autores*

**8.1.3 Agua** El agua como fuente de energía externa usada para garantizar la temperatura adecuada en la zona caliente del concentrador solar, se encuentra en un recipiente de aluminio de 0.12 [Kg]

*Figura 64: Prueba de Agua*



*Fuente: Autores*

**8.1.4 Limpiador de espejos** El limpiador de espejos, ver figura 65, se usa para tener la superficie reflectora en su máxima eficiencia.

*Figura 65: Limpiador para espejos*



*Fuente: Autores*

## 8.2 PRUEBA CON MOTOR STIRLING

Para realizar la prueba, se dispone de un motor Stirling el cual tenga la capacidad de prender un bombillo de 6[Watts], también de un día sin perturbaciones, es decir, que no sea lluvioso y tampoco nublado, con el objetivo de que el concentrador solar tipo puntual pueda reflejar todos los rayos al motor.

**8.2.1 Procedimiento** Se presentan a continuación las condiciones iniciales para la realización de la prueba con el motor Stirling, ver tabla 8

*Tabla 11: Condiciones iniciales para la prueba con el Motor*

Condiciones Iniciales
Fecha: 1 de octubre de 2021
Lugar: Nobsa (Boyacá) - Colombia 5°46'11"N 72°56'24"O
Altitud: 2593 m.s.n.m.
Hora de Inicio: 1:56 pm
Temperatura Ambiente: 19°C
Tiempo total de prueba: 30min.

*Fuente: Autores*

Primeramente se instaló la primera termocupla en el receptor y la otra en el cilindro frío del motor Stirling, como se puede observar en la figura 66

*Figura 66: Prueba de temperatura con Termocupla*



*Fuente: Autores*

En el momento de la prueba se cubrió con una tela de algodón el cilindro frío del motor para garantizar el funcionamiento del mismo. Para el montaje del concentrador solar se tuvo en cuenta la posición del sol y se hizo una debida limpieza sobre la superficie reflectora para garantizar una mayor eficiencia.

*Figura 67: Montaje del Concentrador*



*Fuente: Autores*

Se comenzó la prueba con una temperatura de 18 [°C] en el cilindro frío del motor Stirling, como se ve en la figura 68

*Figura 68: Prueba de temperatura con Termocupla*



*Fuente: Autores*

De igual manera se presentó una temperatura de 30 [°C] en el receptor, ver figura 69, su magnitud es mayor debido a que es la zona donde se reflejan todos los rayos solares y alcanza una temperatura más elevada en cuestión de segundos.

Se posicionó en el punto exacto, observando que efectivamente todos los rayos solares llegan al receptor.

*Figura 69: Radiación Incidente sobre El Receptor*



*Fuente: Autores*

Se observó que hubo una gran pérdida de temperatura en el receptor debido a que en el momento había mucho viento en la zona.

Figura 70: Condiciones Ambientales



Fuente: Autores

Se pudo notar que el receptor llegó a su temperatura máxima en un tiempo de 18 minutos lo cual indica un buen tiempo considerando que es una construcción a escala, la temperatura máxima fue de 213 [°C] y se mantuvo constante durante 1 minuto, el cilindro frío del motor llegó a una temperatura máxima de 42 [°C], el motor Stirling funcionó con una temperatura de 198[°C] durante un tiempo de 23 minutos con una ayuda el cual consistió en empujar manualmente la polea para vencer la inercia. La prueba duró 45 minutos y se obtuvieron los siguientes resultados, ver tabla 9.

Tabla 12: Prueba con el motor Stirling

TIEMPO	T CALIENTE (°C)	T FRIA (°C)	$\Delta T$ (°C)	Q RECIBIDO (Watts)
1'	30	18	12	109,2
2'	50	19	31	106,6
3'	68	20	48	104,3
4'	86	22	64	102
5'	103	26	77	99,82
6'	118	27	91	97,89
7'	133	29	104	95,96
8'	144	32	112	94,54
9'	156	33	123	92,99
10'	164	35	129	91,96

11'	176	36	140	90,42
12'	188	38	150	88,87
13'	198	41	157	87,58
<b>ARRANQUE 1</b>				
14'	200	42	158	87,33
15'	205	40	165	86,68
16'	208	40	168	86,29
17'	211	40	171	85,91
18'	213	42	171	85,65
19'	212	41	171	85,78
20'	209	42	167	86,17
21'	204	41	163	86,81
22'	200	40	160	87,33
23'	195	39	156	87,97
24'	198	39	159	87,58
25'	200	38	162	87,33
26'	204	39	165	86,81
27'	200	40	160	87,33
28'	194	40	154	88,1
29'	195	41	154	87,97
30'	196	41	155	87,84
31'	195	40	155	87,97
32'	199	41	158	87,45
33'	201	40	161	87,2
34'	202	39	163	87,07
35'	200	40	160	87,33
36'	198	41	157	87,58

37'	199	40	159	87,45
<b>FRENADO (Pasados dos minutos en que el concentrador no está expuesto al sol)</b>				
10"	140	36	104	95,05
30"	98	27	71	100,5
43"	62	21	41	105,1
1'	41	19	22	107,8

*Fuente: Autores*

Durante la prueba la incidencia solar tardó 37 minutos, ver figura 71

*Figura 71: Radiación Solar*



*Fuente: Autores*

**8.2.2 De 0 al minuto 13** Durante este tiempo el receptor va adquiriendo la temperatura que nos permite darle funcionamiento al motor Stirling, inicialmente el concentrador genera la energía suficiente para transmitir una temperatura de  $\pm 10$  [°C] por minuto.

$$T_{13'} = 198 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_{13'} = 157 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

**8.2.3 De 14 al minuto 37** Inicialmente el motor Stirling se encuentra a la temperatura funcional, aun así es necesario aplicarle una fuerza externa en la polea para vencer su inercia. Durante este periodo la temperatura varía aproximadamente  $\pm 5$  por minuto dando como resultado una temperatura máxima de 213 [°C] y mínima de 194 [°C] permitiendo durante este rango el funcionamiento del motor Stirling. Cabe resaltar que el calor máximo recibido por el motor se da en el minuto 23 con una temperatura de 211 [°C].

$$T_{m\acute{a}xima} = 213 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_{m\acute{a}xima} = 171 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{m\acute{a}ximo} = 87.97 \text{ [Watts]}$$

Mediante el uso del multímetro fue posible medir el voltaje y la corriente que circulaba por el generador eléctrico teniendo como resultado:

$$Volt = 1,8 \text{ [V]}$$

$$I = 6.56 \text{ [A]}$$

**8.2.4 De 37 al minuto 38** En este periodo de tiempo se finaliza la prueba retirando el concentrador del sol y se procede a contabilizar el tiempo en el que el motor funciona sin estar expuesto a la radiación. Una vez que se realiza el retiro del dispositivo, el receptor pierde el calor funcional pasando de 199 [°C] a 41 [°C] generando el frenado total del motor.

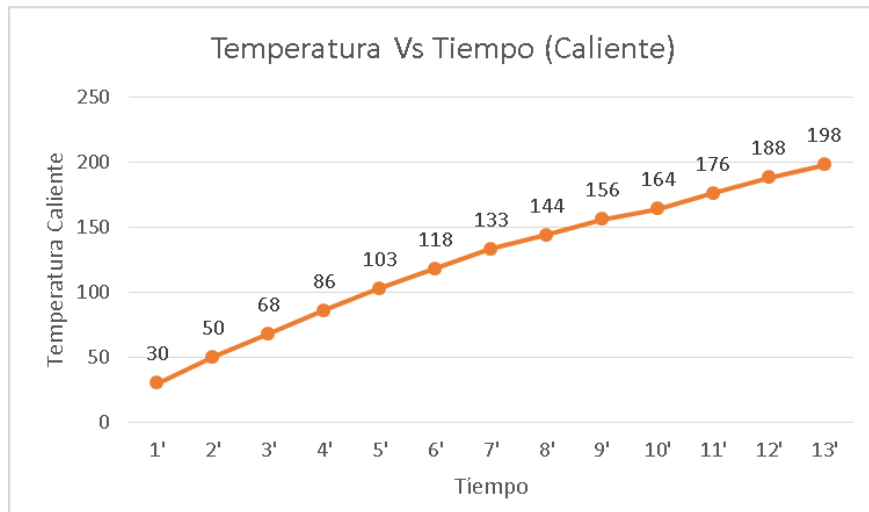
$$T_{m\acute{i}nima} = 41 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$\Delta T_{m\acute{i}nima} = 22 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

$$Q_{m\acute{i}nimo} = 95.05 \text{ [Watts]}$$

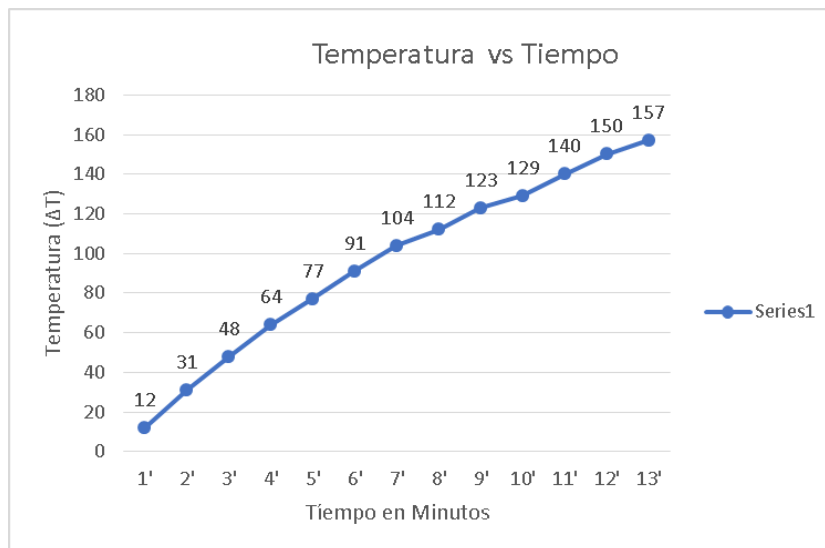
A continuación se presentan las gráficas de la prueba con el Motor en el que se aprecia de color naranja los calores obtenidos y de color azul demarcados las temperaturas que generan dichos calores.

Figura 72: Gráfica del calentamiento del motor (Cilindro Caliente)



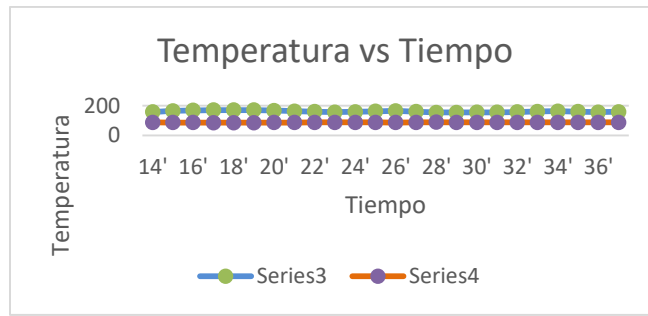
Fuente: Autores

Figura 73: Gráfica del calentamiento del motor (Diferencia de Temperaturas)



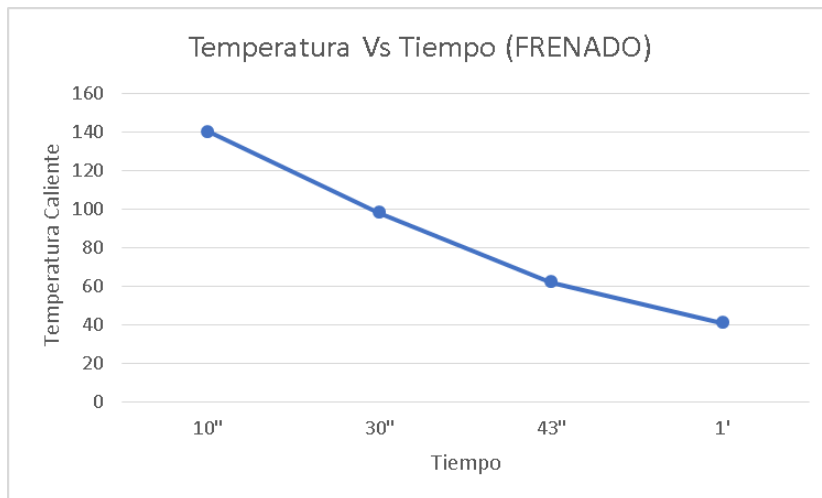
Fuente: Autores

Figura 74: Gráfica de arranque del Motor



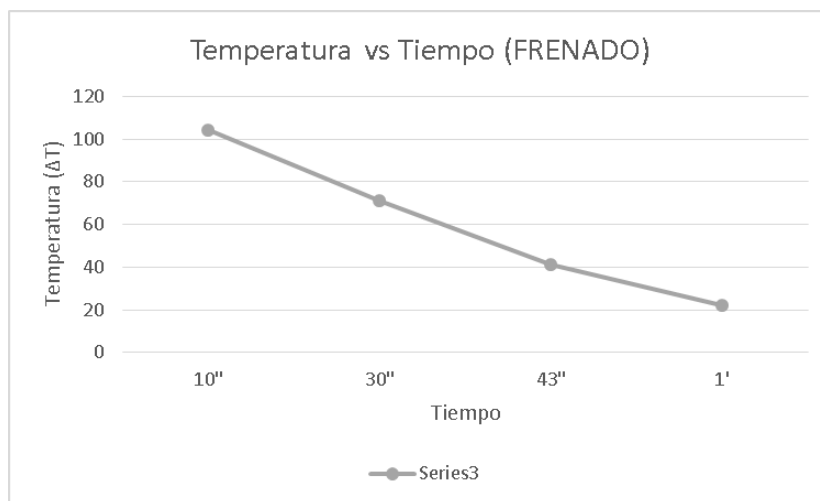
Fuente: Autores

Figura 75: Gráfica de frenado del Motor (Cilindro Caliente)



Fuente: Autores

Figura 76: Gráfica de frenado del Motor (Diferencia de temperaturas)



Fuente: Autores

### 8.3 PRUEBA CON AGUA

El agua es una fuente muy común en el momento de medir temperatura o energía, es por esto que la prueba se realiza con este fluido, facilita el procedimiento y ayuda a dimensionar mejor la efectividad del concentrador solar. Para la prueba se dispone de un recipiente con 0.12 [kg] de agua, un día sin perturbaciones, es decir, que no sea lluvioso y tampoco nublado, con el objetivo de que el concentrador solar tipo puntual pueda reflejar todos los rayos del sol al recipiente.

**8.3.1 Procedimiento** Se presentan a continuación las condiciones iniciales para la realización de la prueba con el agua, ver tabla 10.

Tabla 13 Condiciones iniciales para la prueba con Agua

Condiciones Iniciales
Fecha: 5 de octubre de 2021
Lugar: Nobsa (Boyacá) - Colombia 5°46'11"N 72°56'24"O
Altitud: 2593 m.s.n.m.
Hora de Inicio: 2:10 pm
Temperatura Ambiente: 19°C
Tiempo total de prueba: 25min.

Fuente: Autores

Se procedió a tomar la temperatura inicial del agua con la termocupla antes de someterla a los rayos solares, ver figura 19.

*Figura 77: Medición Temperatura del agua.*



*Fuente: Autores*

Se procedió a instalar el concentrador solar de acuerdo a la posición del sol y se ubicó el recipiente con agua con la misma distancia focal que tuvo el motor Stirling hundiendo la termocupla en el agua.

*Figura 78: Prueba con recipiente y Agua.*



*Fuente: Autores*

Luego a partir de que empezó a calentar el agua se sometió durante un tiempo de 15 minutos llegando a una temperatura máxima de 97 [°C], esta temperatura se mantuvo en un tiempo de 5 minutos. La temperatura fue aumentando entre 8 a 13 [°C] cada minuto. Con esta prueba se puede

apreciar con mayor facilidad el calor recibido por el concentrador solar. La prueba duró 30 minutos y se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 14 Tiempos de prueba con el Agua.

TIEMPO	T (°C)	T MINIMA (°C)	$\Delta T$ (°C)	Q RECIBIDO (Watts)
1'	22	19	3	25,08
2'	29	19	10	83,6
3'	37	19	18	150,48
4'	45	19	26	217,36
5'	56	19	37	309,32
6'	67	19	48	401,28
7'	74	19	55	459,8
8'	80	19	61	509,96
9'	88	19	69	576,84
10'	96	19	77	643,72
11'	95	19	76	635,36
12'	96	19	77	643,72
13'	97	19	78	652,08
14'	95	19	76	635,36
15'	95	19	76	635,36
<b>MOMENTO DE RETIRO DEL CONCENTRADOR DEL SOL</b>				
16'	95	19	76	635,36
17'	94	19	75	627
18'	85	19	66	551,76
19'	74	19	55	459,8
20'	65	19	46	384,56
21'	54	19	35	292,6
22'	40	19	21	175,56

23'	28	19	9	75,24
-----	----	----	---	-------

Fuente: Autores

**8.3.2 De 0 al minuto 15** En vista de que la temperatura inicial del agua en el municipio de Nobsa es bastante baja fue necesario esperar un tiempo considerado que permitiera al concentrador elevar la temperatura del agua hasta un valor aproximado al punto de ebullición.

$$T_{m\acute{a}xima} = 97 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T_{m\acute{a}xima} = 78 [^{\circ}C]$$

$$Q_{m\acute{a}ximo} = 652,08 [Watts]$$

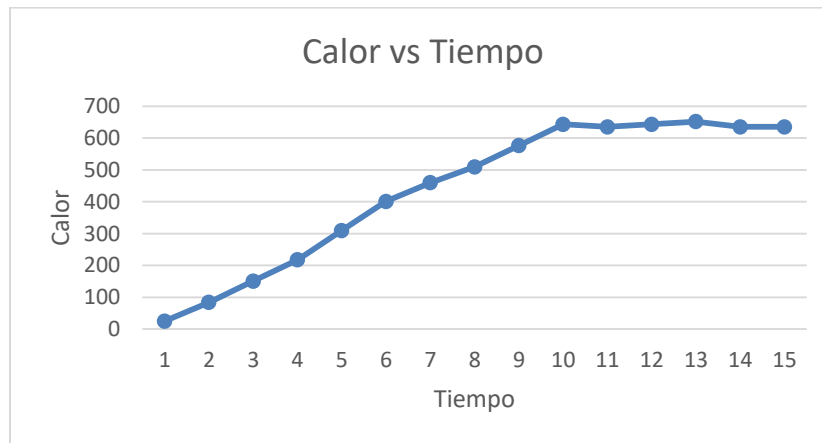
**8.3.3 De 16 al minuto 23** En este periodo de tiempo se finaliza la prueba con el agua retirando el concentrador solar del ambiente.

$$T_{m\acute{i}nima} = 19 [^{\circ}C]$$

$$\Delta T_{m\acute{i}nima} = 9 [^{\circ}C]$$

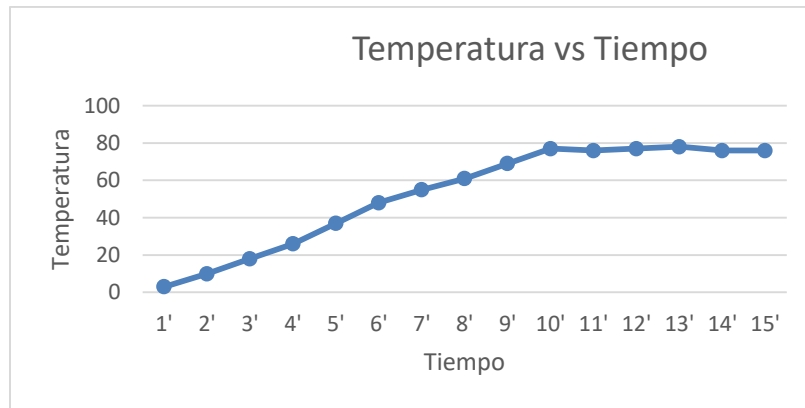
A continuación se presentan las gráficas de la prueba con el agua.

Figura 79: Gráfica de calentamiento del agua calor vs tiempo



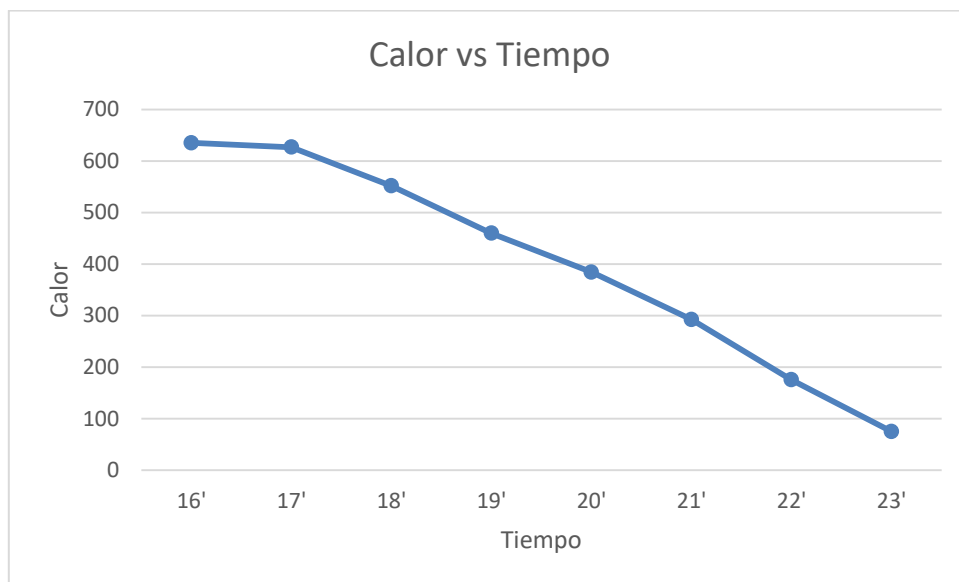
Fuente: Autores

Figura 80: Gráfica de calentamiento del agua temperatura vs tiempo



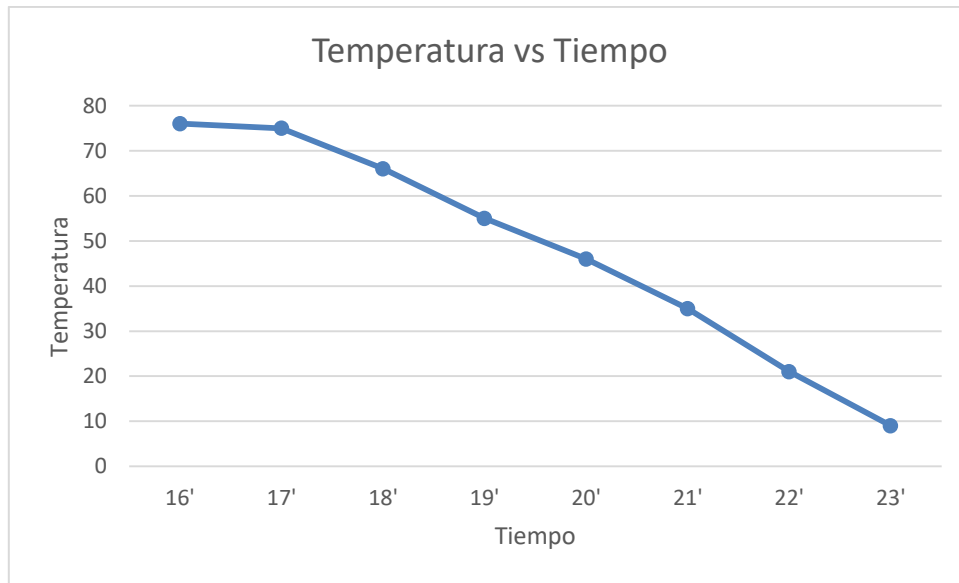
Fuente: Autores

Figura 81: Gráfica de Retiro del Concentrador del Sol calor vs tiempo



Fuente: Autores

Figura 82: Gráfica de Retiro del Concentrador del Sol temperatura vs tiempo



Fuente: Autores

#### 8.4 TABLA DE COMPARACIONES DE PRUEBAS

En la siguiente tabla se presenta la comparación de las fuentes externas usadas para el funcionamiento del concentrador solar tipo puntual.

Tabla 15 Comparación de pruebas.

FUENTE	MOTOR STIRLING	AGUA
T CALIENTE MÁXIMA [°C]	213	97
$\Delta T$ MÁXIMA [°C]	171	78
Q MÁXIMO [Watts]	543,5	652,08

Fuente: Autores

#### 8.5 EFICIENCIAS DEL SISTEMA A ESCALA

Tabla 16 Eficiencias del modelo a escala.

Eficiencias	Descripción	Valor Obtenido
Eficiencia Óptica	La eficiencia obtenida en el colector se da debido a que la superficie puede presentar suciedad, fallas geométricas y malformaciones en la superficie reflectora.	53%

<b>Eficiencia del receptor</b>	La eficiencia obtenida en el receptor es alta y aunque representa una muy buena funcionalidad, se resalta que puede mejorar haciendo cambios geométricos que están involucrados de forma directa en la redirección de los rayos incidentes.	82%
<b>Eficiencia del Motor</b>	Se obtuvo una eficiencia baja debido a la fricción que se presenta en las poleas y a que el sistema no es completamente isotérmico.	19%
<b>Eficiencia del Generador</b>	La eficiencia obtenida en el generador se da debido a que, como motor eléctrico convencional, presentara siempre eficiencias dentro de un mismo rango.	60%
<b>Eficiencia total</b>	Debido a todas las pérdidas que hay dentro del proceso, la energía que inicialmente entra al sistema se desvía y como resultado se tiene una eficiencia baja pero suficiente para generar la potencia necesaria requerida por los bombillos Led.	5%

*Fuente: Autores*

## 8.6 EFICIENCIAS DEL SISTEMA REAL

*Tabla 17 Eficiencias del sistema Real*

<b>Eficiencias del Tamaño real de 1500 W</b>	
<b>Eficiencia Óptica</b>	53%
<b>Eficiencia del Motor Stirling</b>	30%
<b>Eficiencia Del Receptor</b>	94%
<b>Eficiencia Total</b>	15%

*Fuente: Autores*

Es notorio que en el modelo real se tienen eficiencias mucho más altas Gracias a que las pérdidas que se generan en este modelo son mucho más pequeñas.

## 8.7 RESULTADOS TEORICOS CONTRA EXPERIMENTALES

Datos teóricos contra experimentales del concentrador solar tipo puntual a escala, ver tabla 15

Tabla 18 datos teóricos contra experimentales del diseño

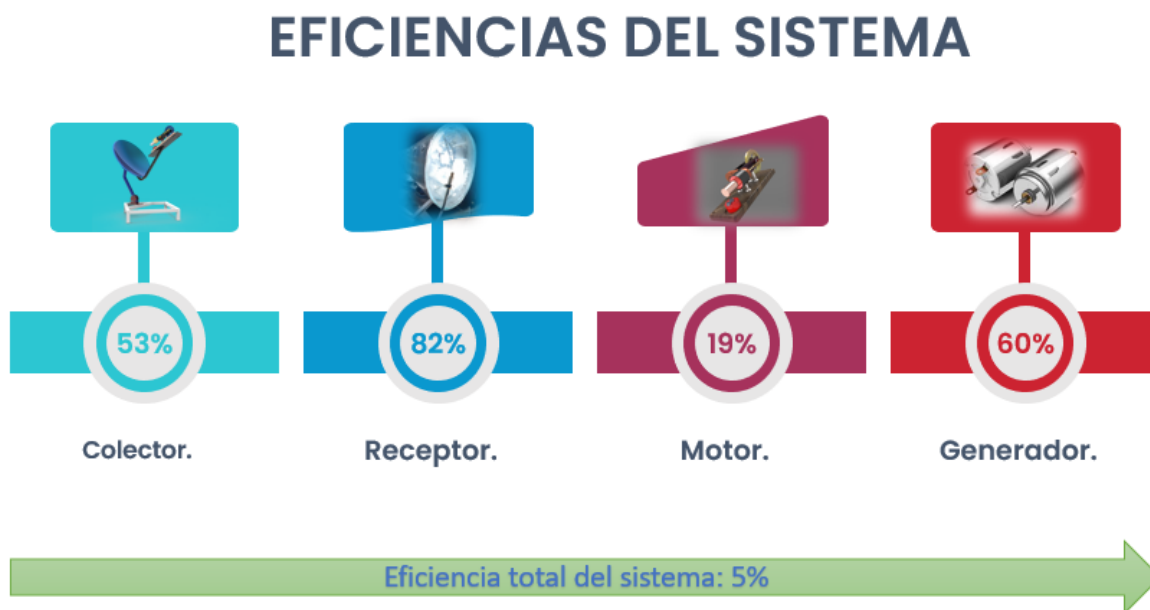
TABLA DE COMPARACION DE PRUEBAS TEORICAS VS EXPERIMENTALES		
	Experimental	Teórica
Área de Apertura [m2]	0.28	0.3
Área del receptor [m2]	0.007	0.1
Eficiencia del Motor	35%	19%
Potencia entregada por el Motor [w]	33.91	19.77
Calor de llegada al motor [w]	96.88	85.36

Fuente: Autores

## 9 CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un concentrador solar tipo puntual a escala para una potencia de salida de 6 [Watts] y se pudo observar en las pruebas que se realizaron el comportamiento energético de pérdidas ilustrado en la siguiente tabla.

Figura 83: Eficiencias del sistema



Fuente: Autores

Donde se puede observar que:

- El receptor tiene la mayor presencia de pérdidas del sistema.
- El motor Stirling presenta la menor presencia de pérdidas del sistema.

- Normalmente los generadores tienen una eficiencia estándar.
- Gran parte de la energía se pierde en el colector.

Posteriormente se realizó una comparación entre las características geométricas del prototipo que se construyó y del modelo diseñado en EES, en busca de encontrar una potencia de salida. El resultado que se acercó más al objetivo de 6 [Watts] de potencia de salida, variando las dimensiones geométricas y teniendo en cuenta la economía en cuanto a materiales y construcción. Ver tabla 16 para observar las diferencias.

*Tabla 19 Diseño vs construcción.*

<b>Modelo diseñado vs Modelo construido</b>		
<b>Parámetro</b>	<b>Teórico</b>	<b>Construido</b>
<b>Área de apertura del concentrador. [m<sup>2</sup>]</b>	0.3	0.28
<b>Diámetro del concentrador. [m]</b>	0.618	0.6
<b>Distancia focal. [m]</b>	0.4	0.4
<b>Diámetro del receptor cónico. [m]</b>	0.1	0.095

*Fuente: Autores*

En el periodo de construcción, teniendo en cuenta el tipo de material que se usó y la mano de obra en cuanto mecanizado y ensamblaje, durante las pruebas se observó:

- La importancia que tiene el tipo de material implementado en el receptor debido a que no todos soportan altas temperaturas y no encierran de la misma manera el calor necesario, en las pruebas se tuvo la necesidad de cambiar el receptor debido a que el primer material no se ajustaba bien al cilindro del motor y se despegaba fácilmente en el momento de la prueba permitiendo mayores pérdidas y desajustes focales.
- La necesidad de un sistema de seguimiento solar puesto que en un determinado tiempo los rayos solares empiezan a cambiar de rumbo tendiendo a perder todo el calor que se necesita para generar la energía requerida.
- El comportamiento del ambiente, durante las pruebas se presentaba mucho viento en el ambiente y esto generaba mayores pérdidas, aun así teniendo en cuenta que es un

prototipo a escala, se llegó a obtener temperaturas altas capaces de generar la potencia especificada.

- El comportamiento solar en el lugar es bastante bueno puesto que aun estando en temporada de lluvias, todas las mañanas presentaba clima soleado lo que indica que es una zona apta para este tipo de proyectos.
- La importancia de tener una estructura robusta puesto que evita perturbaciones en la posición del concentrador solar, cabe resaltar que es necesario que el lugar donde se va a instalar el concentrador no tenga bastante piedra o deformaciones en el suelo.
- La liga que conecta la polea del motor Stirling a la polea del motor eléctrico después de un tiempo dejó de transmitir la potencia eficientemente y se tuvo la necesidad de cambiarla.
- Se compararon los datos reales de las dos pruebas realizadas con el sistema en funcionamiento.

## 10 RECOMENDACIONES

En la construcción y manufactura del concentrador solar tipo puntual se observaron las siguientes características, las cuales son recomendaciones útiles para tener en cuenta en el momento de realizar un proyecto parecido, ver tabla 17

*Tabla 20 Recomendaciones.*

OBJETO A RECOMENDAR	DESCRIPCION
<b>Seguimiento solar</b>	Uno de los factores que nos permiten que la eficiencia del motor sea más eficaz y duradera, es la cantidad de tiempo que se exponga el concentrador solar al sol. Para esto se recomienda implementar un mecanismo de seguimiento solar que permita que autónomamente, el concentrador siga por sí mismo el sol.
<b>Absorbedor parabólico</b>	Gracias a la implementación de un absorbedor cónico en el proyecto, se obtuvo una mejor recepción de calor, sin embargo, hay otras formas

	<p>geométricas que hacen aún más eficiente el absorbedor y es en forma parabólica. Esto permite que, así como el colector, el receptor tenga como foco el cilindro del motor y re direccione mucho mejor los rayos.</p>
<p><b>Precisión en el pegado de los espejos.</b></p>	<p>En las pérdidas que se destacaron anteriormente, se resalta la construcción del concentrador y pegado de los espejos que en su lugar pudiese mejorar la funcionalidad del sí son reemplazados por heliostatos (Espejos con mejores propiedades para reflejar el sol). Como recomendación, se propone una geometría de cada espejo más pequeña con el fin de que al ser pegados con mucha exactitud, tomen mejor la forma del colector parabólico y aumente mucho mejor la eficacia del sistema.</p>
<p><b>Heliostatos externos.</b></p>	<p>Como se nombró anteriormente, los espejos son parte fundamental del funcionamiento del concentrador. Adicional a esto, existe otra forma en la que se pueden re direccionar los rayos que no son absorbidos por el colector y que se pierden en el vacío. Una alternativa propuesta es la instalación de heliostatos al rededor del colector con el fin de redirigir estos rayos que se pierden hacia el colector y así aumentar la radiación que posteriormente dará como resultado un mayor calor en el receptor del Motor.</p>

*Fuente: Autores*

## BIBLIOGRAFIA

Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises.. A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines. [Consultado en el proceso del libro] 2002

Carolina, Daniela.. Modelamiento matemático de un sistema de concentración solar con motor Stirling en Colombia. Fundación Universidad de América facultad de ingenierías programa de ingeniería mecánica Bogotá D.C. 2017 Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/6337/1/4121469-2017-1->

Felipe Cock Martínez.. Diseño mecánico de un heliostato modular. Leon, Guanajuato. [Consultado en el proceso del libro] 2018

Frank P. Incropera, David P. DeWitt..Fundamentos de Transferencia de calor. [Consultado en el proceso del libro] 1999

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Adscrito al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2014. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>.

John A. Duffie, William A. Beckman. Fourth edition Solar Engineering of Thermal Processes. [Consultado en el proceso del libro] 2013

John H. Millar.. Solar Energy Systems. [en línea]. Publicado por: by: Royal Society for the Encouragement of Arts, Manufactures and Commerce. 1980 Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/41373205>.

John R. Howell, Richard B. Bannerot, Gary V. Vliet. Solar Thermal Energy Systems-Analysis and Design [Consultado en el proceso del libro]

Juan Pablo Dominguez Arias, Diego Fernando Meneses Gonzales. Diseño y construcción de un sistema de generación eléctrica activado por un motor Stirling tipo gamma, que usa como fuente la energía solar. Bucaramanga. [Consultado en el proceso del libro] 2013

López-Xelo, Hilario, Hernández-Medina, José Juan, Pérez-Martínez, Rene y Cabrera-Pérez, José Luis. Implementación de Motor Stirling para generación de energía eléctrica limpia empleando una lente de Fresnel. Revista de Innovación Sistemática. 2019

Losada, Jorge.. Análisis de un sistema de disco parabólico con motor Stirling. Universidad Carlos iii de Madrid escuela politécnica superior. 2009 disponible en: <https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/7869/Proyecto%20Dish%20Stirling.pdf;jsessionid=E54918C0C56FCCD7827C9514F2E993E5?sequence=1>

Maradey, Jessica Gisella y Pardo, Orlando, crítico literario [en línea]. Trabajo de grado. Universidad industrial de Santander, Bucaramanga. 2005. Disponible en <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2005/118462.pdf>

Ordóñez Barreiro, Análisis de ciclo de vida de una instalación de disco parabólico. Proyecto fin de carrera. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla 2006

Sergio Perez Torres, Arquitecto. Carta Solar Estererografica de latitud 4°N. [En línea]. Santa Maria, España. [Consultado en el proceso del libro]. 2015 disponible en: <http://www.sergioperezarq.com/como-entender-una-carta-solar/>

Silva, M. A. Aprovechamiento de la energía solar en media y alta temperatura. Sistemas termo solares de concentración. Apuntes de la asignatura Energías Renovables de 5º de Ingeniería Industrial. Departamento de Ingeniería Energética y Mecánica de Fluidos. Universidad de Sevilla 2004

## **ANEXOS**

## ANEXOS A. GEOMETRIA SOLAR

- **GEOMETRIA SOLAR PARA SEGUIMIENTO SOLAR CON HELIOSTATOS MULTIPLES**

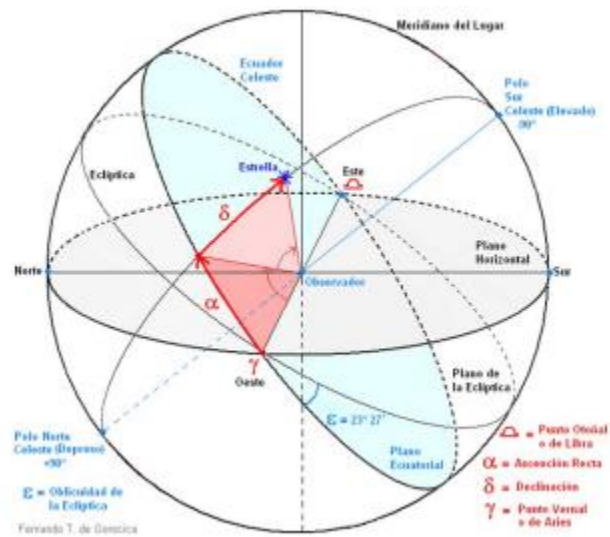
Es necesario conocer la trayectoria solar sobre la esfera celeste y las condiciones que tiene en las distintas épocas del año para conocer el comportamiento del Sol y así aprovechar la máxima radiación que se podría reflejar con cada heliostato hacia el concentrador, para ello se debe determinar la posición o región donde se encuentre.

Existen varios factores que disminuyen la intensidad de la radiación, entre estos están los atmosféricos y los geográficos. En los atmosféricos se pueden tener pérdidas que las ocasionan las nubes, partículas suspendidas y la contaminación que puede haber en el lugar y en los geográficos se presenta la rotación diaria de la Tierra, dentro de esto están las variables conocidas como latitud, longitud y traslación. (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

Existe un fenómeno conocido como la declinación solar y consiste en el comportamiento de traslación del planeta Tierra de 365 días alrededor del Sol y si se analiza detenidamente, el Sol aparenta que cambia su trayectoria diaria a lo largo de las estaciones del año. (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

La declinación solar consiste en el ángulo promedio aproximado y no constante de  $23^{\circ}27'$  que forma el plano de la eclíptica con relación al plano infinito, también conocido como plano del Ecuador o ecuatorial (ver Figura 82)

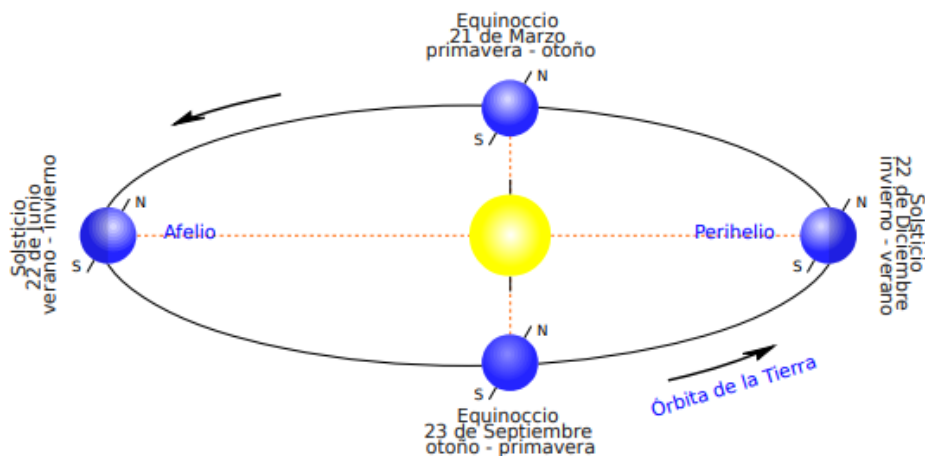
Figura 84: Esfera Celeste



Fuente: Diseño mecánico de un helióstato modular

Es bueno aclarar que a lo largo del año este ángulo oscila entre los  $-23^\circ 27'$  y  $23^\circ 27'$ , en donde estos valores se toman en los solsticios de verano-invierno (22 de junio) y de invierno-verano (22 de diciembre), conocidos también como el afelio y perihelio respectivamente; la declinación llega a tener un ángulo igual a 0 en los equinoccios de primavera-otoño (21 de marzo) y otoño-primavera (23 de septiembre). (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

Figura 85: Eventos solares



Fuente: Diseño mecánico de un helióstato modular

Cabe resaltar que es muy importante tener la declinación solar como parámetro determinante en la captación de energía solar. La idea principal es reflejar la mayor cantidad de energía solar incidente,

lo cual la relación geométrica solar entre un plano y otro llega a ser importante en la valoración y cálculo de la variación de la posición solar. (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

La siguiente ecuación permite llegar a un valor aproximado de radiación solar incidente y a la variación continua del ángulo de declinación solar en términos del día Juliano. (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

$$\delta = 23.45 * \sin\left(\frac{360}{365}(d_n + 284)\right)$$

Dónde,

$\delta$ : Inclinación de la tierra

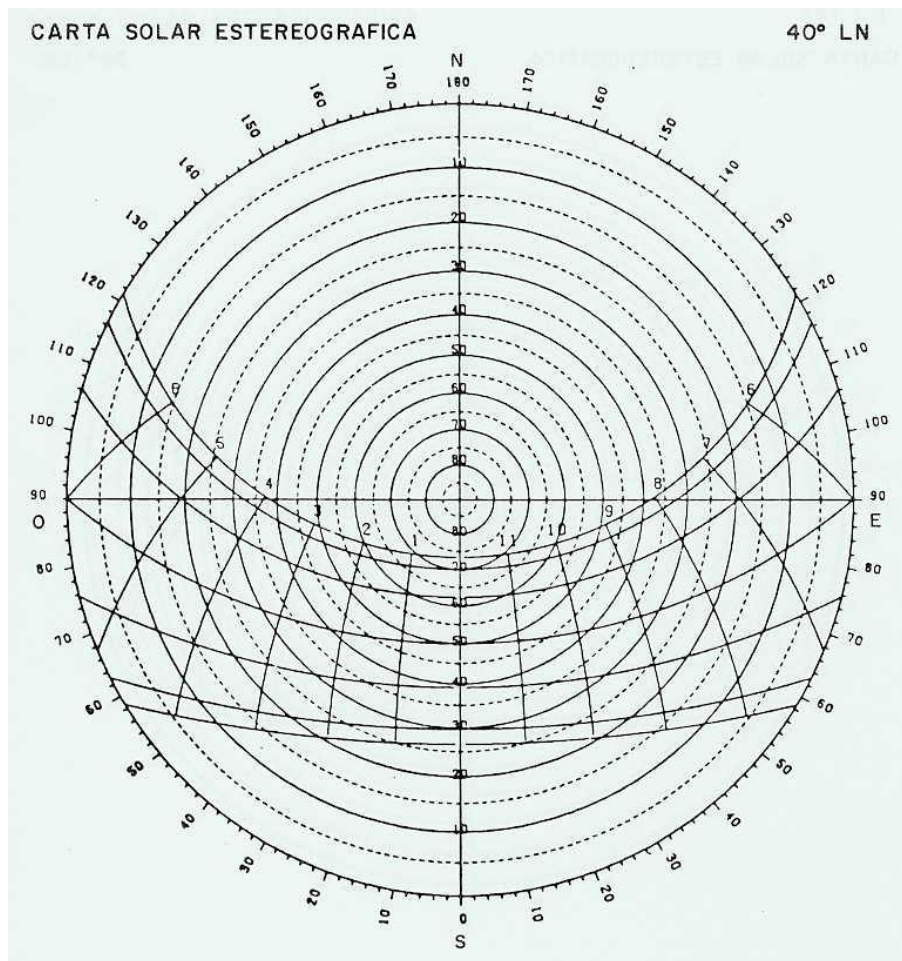
$d_n$ : Día Juliano

- **TRAYECTORIA SOLAR EN NOBSA (BOYACÁ)**
  - **CARTA SOLAR MANUAL**

Para determinar una posición aproximada del sol respecto a una específica ubicación se toma en cuenta la carta solar estereográfica de Fisher-Mattioni, más conocida como carta solar, la cual consiste en una representación gráfica del planeta Tierra, donde por medio de parámetros como la latitud del lugar escogido, una fecha y hora determinada, se obtiene el ángulo de elevación solar y ángulo de azimut. (Felipe Cock Martínez, Diseño mecánico de un helióstato modular, 2018)

La carta solar fue tomada en cuenta en el momento de posicionar el concentrador solar y de la misma manera funciona para ubicar cada Heliostato con el fin de darle seguimiento solar con estos dispositivos.

Figura 86: Carta Solar Estereografica de 4°Latitud N



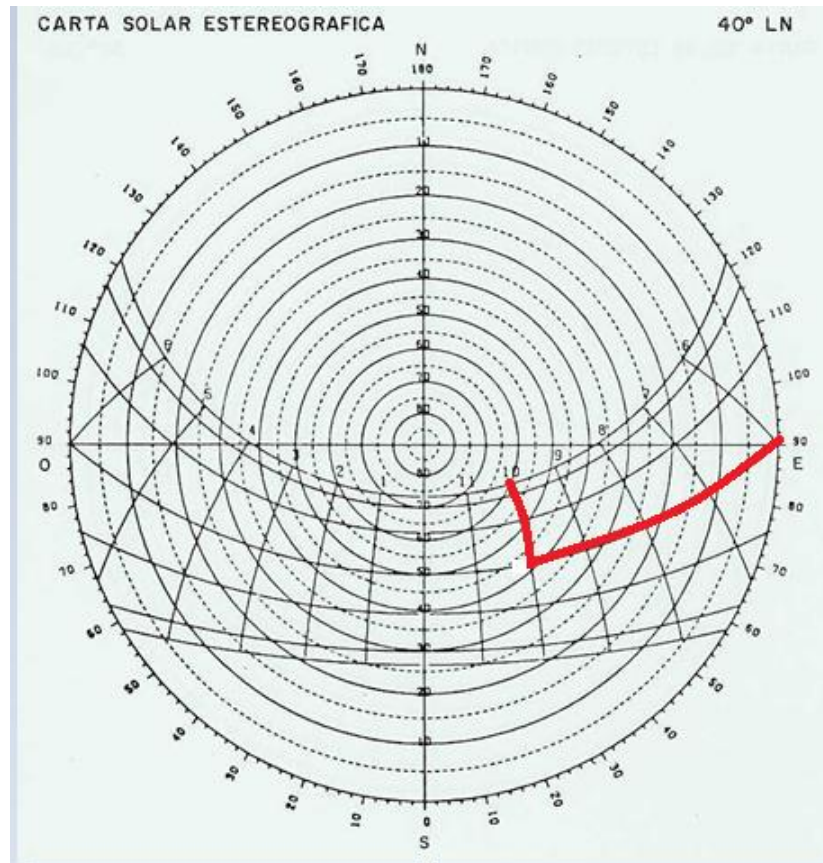
Fuente: <http://www.sergioperezarq.com/como-entender-una-carta-solar/>

Para realizar un adecuado seguimiento solar se debe tener en cuenta que los heliostatos se deben dividir por cada hora, es decir, el número máximo de horas de sol equivale al número de Heliostatos instalados.

Por medio de la carta solar se encuentra la posición del sol con los ángulos azimut y altitud para cada hora del día y se ubica cada heliostato respecto a esos parámetros. Para la ubicación del sol primeramente se ubica el punto central con la latitud del lugar establecido para obtener los trazados de desplazamiento del sol en todas las estaciones del año, en el caso del proyecto, la latitud del lugar se presenta en la tabla 11, luego se toma la carta solar con la trayectoria del sol en todas las épocas del año respecto a esa ubicación, ver figura 84. Posterior a eso, se cruza los trazos de la

fecha y la hora en la que quiere posicionar el dispositivo y se genera un punto, cabe resaltar que la línea de la hora es la que se encuentra vertical y la de la fecha es la horizontal.

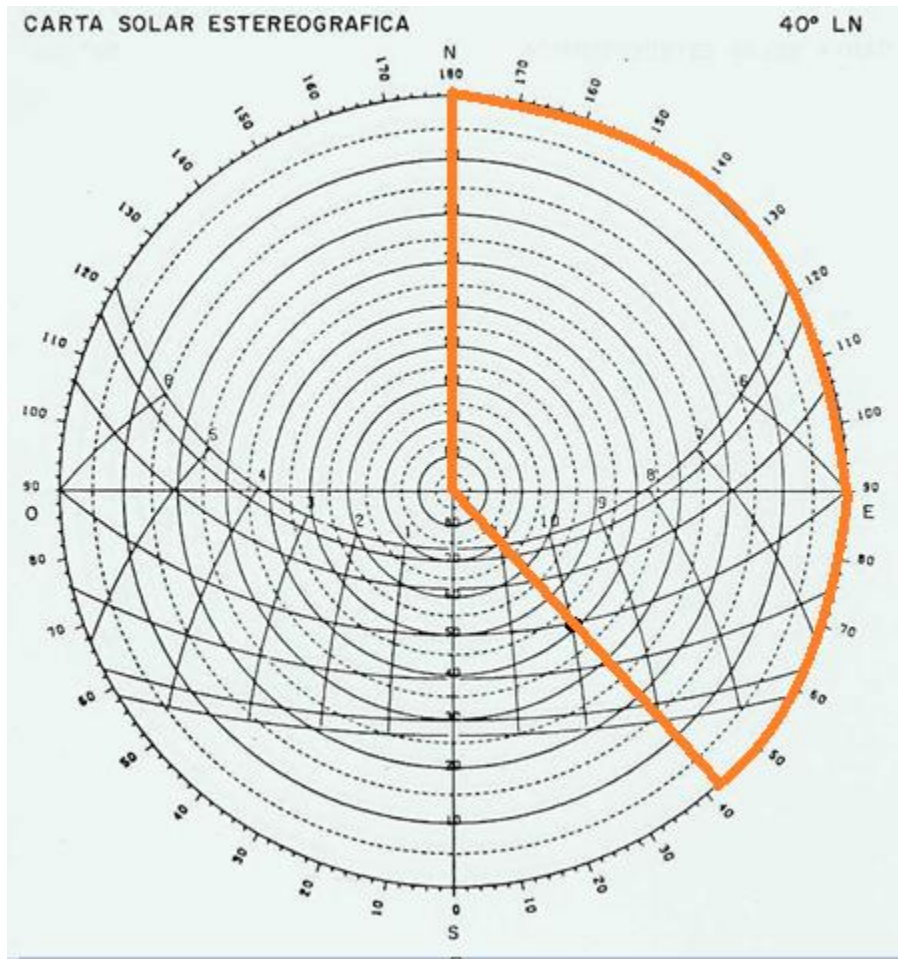
Figura 87: Posición respecto a la hora y fecha



Fuente: Autores

Luego se traza una línea recta que va desde la posición del dispositivo, que pase el punto de cruce hasta el límite del círculo para saber el ángulo azimut, es importante saber que el ángulo va desde el polo norte hasta donde llega la línea que cruza el punto.

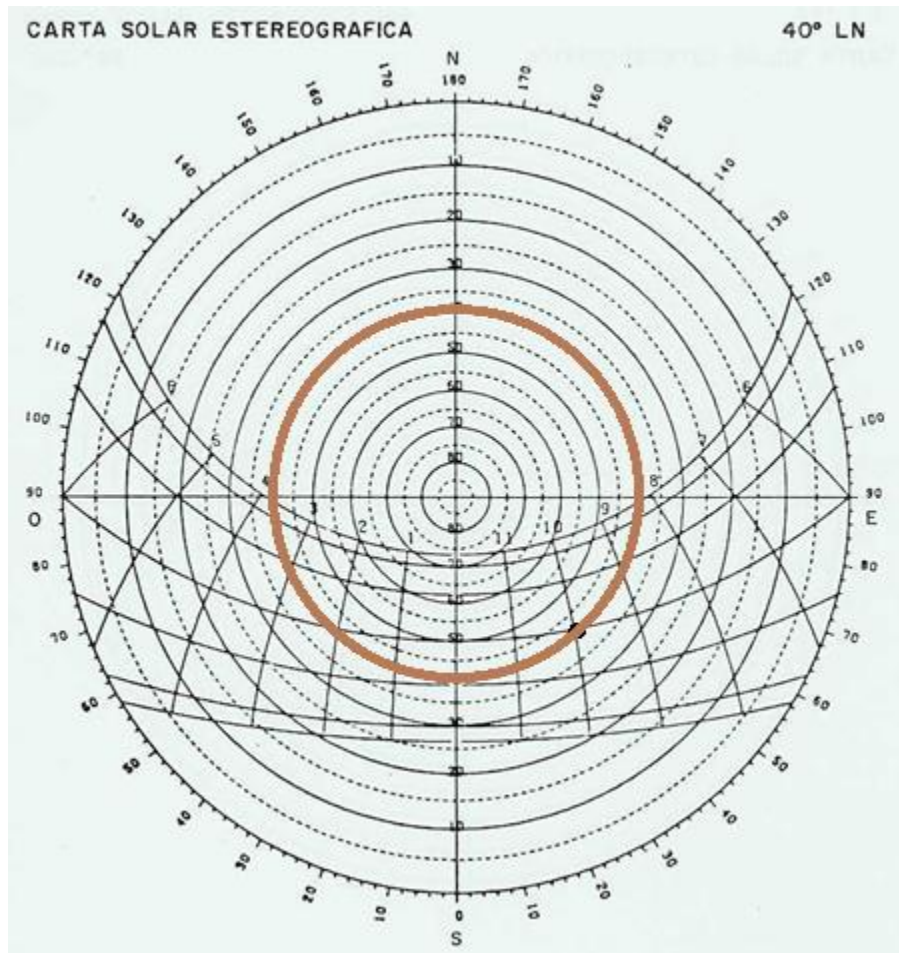
Figura 88: Ángulo azimut del sol



Fuente: Autores

El ángulo resultante es el azimut, finalmente se observa que hay unos círculos concéntricos los cuales indican los grados de altitud que tiene el sol en la fecha y hora especificada y se toma el que se cruce con el punto ubicado inicialmente.

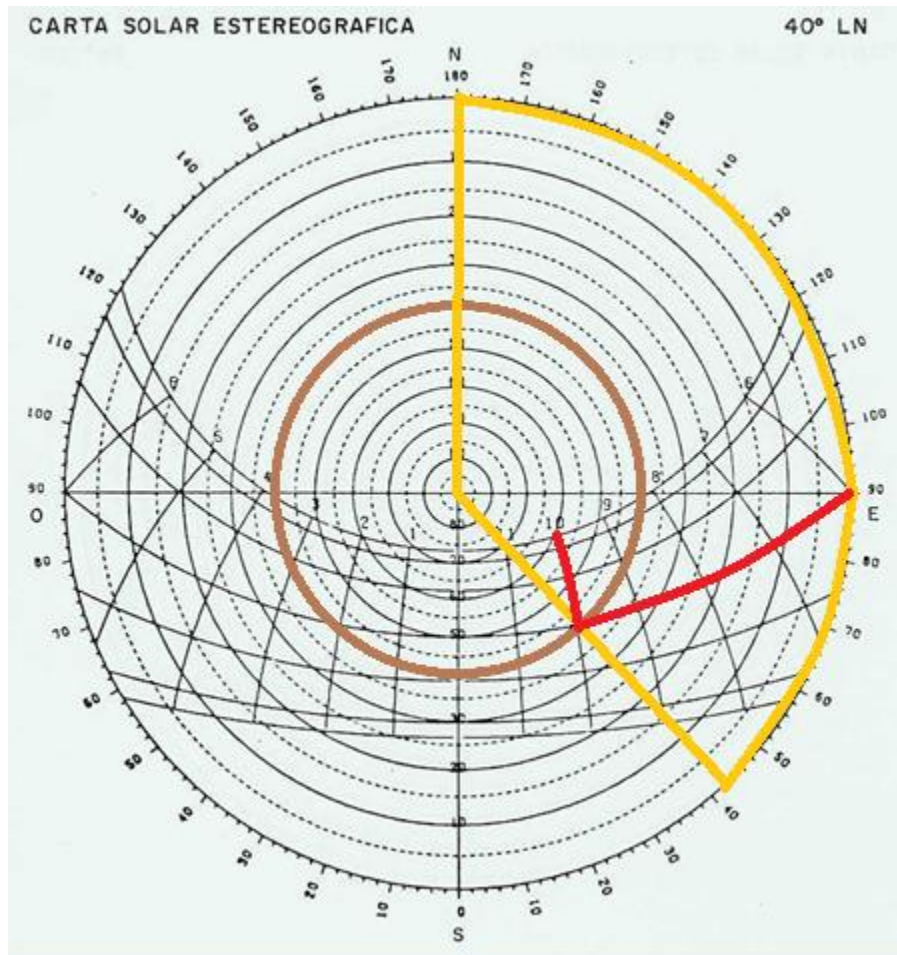
Figura 89: Ángulo de altitud del sol



Fuente: Autores

El ángulo resultante es la altitud en la que se encuentra el sol en ese momento. Las líneas trazadas dentro de la carta solar para la ubicación del sol se pueden apreciar en la siguiente figura.

Figura 90: Trazos de ángulos en carta solar



Fuente: Autores

### ○ APLICACIÓN CARTA SOLAR

Existe una variedad de procedimientos para determinar la ubicación del sol en un determinado momento, en el apartado anterior se describió una de las formas más comunes, pero en la investigación se descubrió que existe una aplicación llamada Sun Surveyor Lite el cual no solo indica tu posición en tiempo real sino también proyecta los trazos la posición del sol tanto en tiempo real como en la fecha y hora que tu desees con los respectivos ángulos.

Inicialmente se desconfió de la aplicación y se procedió a realizarse una prueba con una carta solar manualmente y se compararon los resultados obteniendo gran similitud en los valores de los ángulos indicando que la aplicación realmente funciona.

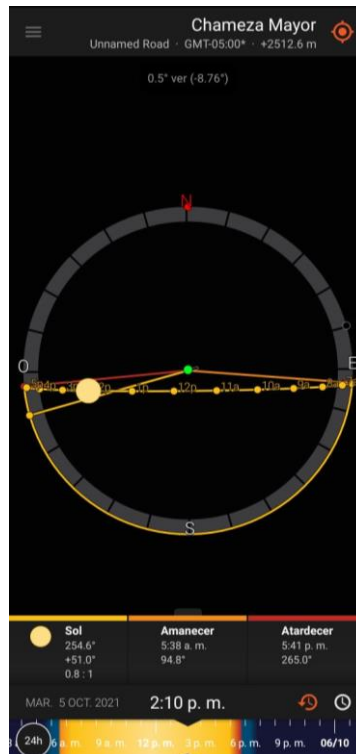
A continuación se mostrará el interfaz de la aplicación con la ubicación del proyecto.

Figura 91: Posición de Nobsa en Sun Surveyor Lite



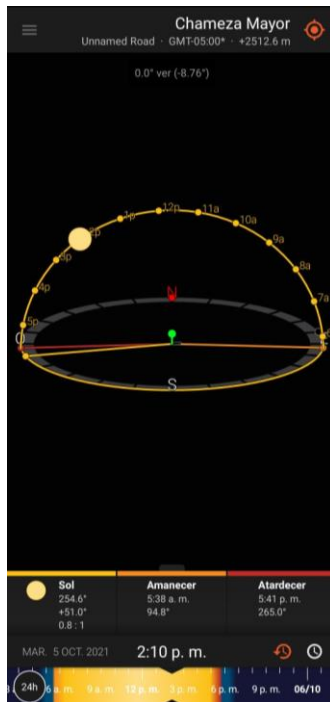
Fuente: Sun Surveyor Lite

Figura 92: Diagrama de posición del sol en Sun Surveyor Lite



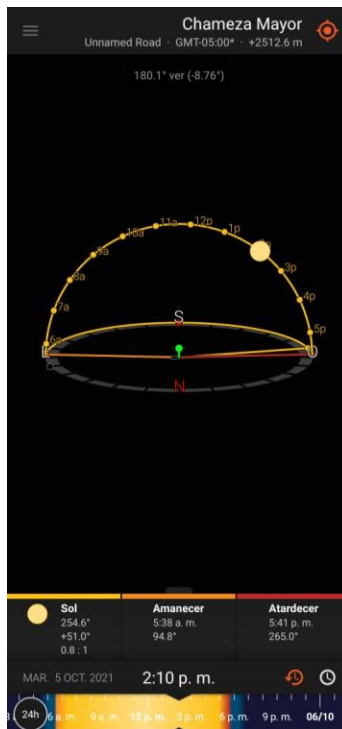
Fuente: Sun Surveyor Lite

Figura 93: Diagrama de posición del sol respecto al sur en Sun Surveyor Lite



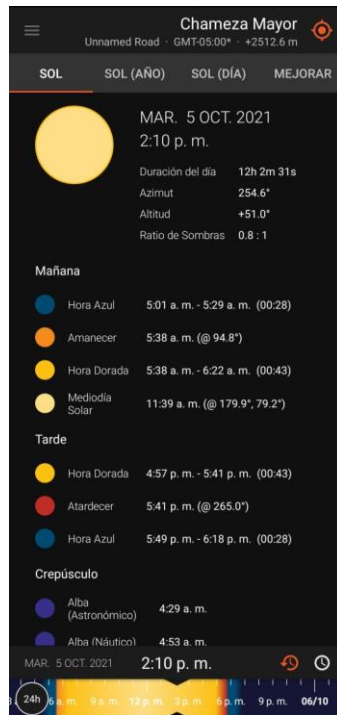
Fuente: Sun Surveyor Lite

Figura 94: Diagrama de posición del sol respecto al norte en Sun Surveyor Lite



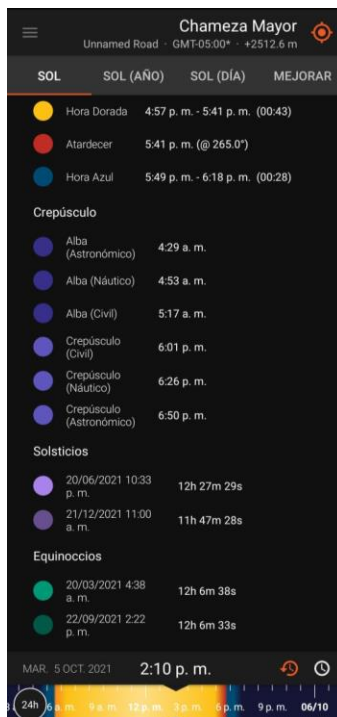
Fuente: Sun Surveyor Lite

Figura 95: Especificaciones de la posición del sol en Nobsa en Sun Surveyor Lite



Fuente: Sun Surveyor Lite

Figura 96: Especificaciones de la posición del sol en Nobsa en Sun Surveyor Lite



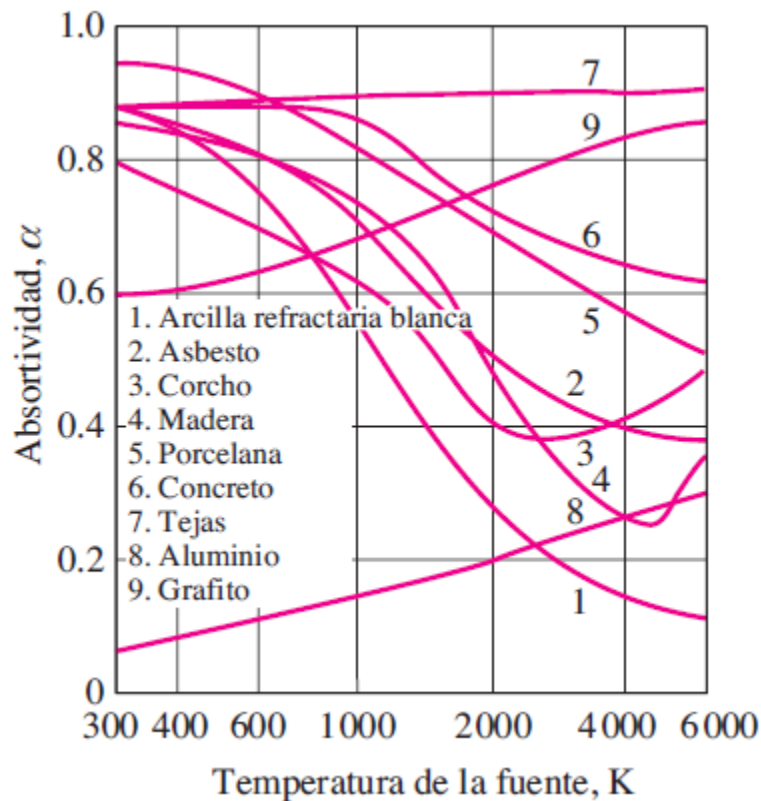
Fuente: Sun Surveyor Lite

## ANEXOS B. PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Mediante la aplicación de fundamentos térmicos y de transferencia de calor, se han determinado parámetros que para el diseño del concentrador han sido de gran relevancia. Variables como los calores ( $q$ ), temperaturas ( $t$ ) y demás factores se han determinado mediante la ayuda de tablas que se han obtenido de distintas fuentes. Se tiene que diferentes propiedades como la absorptividad  $\alpha$ , transmisividad  $\tau$  y emisividad  $\epsilon$ .

A continuación, se definen las tablas que permiten extraer estos parámetros.

Figura 97: Gráfica de absorptividad



Fuente: Sun Surveyor Lite

En esta tabla se puede apreciar que, frente a la variación de temperaturas generada por la radiación, se definen directamente valores de absorptividad de materiales comunes a temperatura ambiente.

A continuación se presenta una comparación de absorptividad contra emisividad a temperatura Ambiente.

Tabla 21: Comparación entre absorptividad y emisividad

Superficie	$\alpha_s$	$\varepsilon$
Aluminio		
Pulido	0.09	0.03
Anodizado	0.14	0.84
Hoja	0.15	0.05
Cobre		
Pulido	0.18	0.03
Deslustrado	0.65	0.75
Acero inoxidable		
Pulido	0.37	0.60
Opaco	0.50	0.21
Metales plateados		
Óxido negro de níquel	0.92	0.08
Cromo negro	0.87	0.09
Concreto	0.60	0.88
Mármol blanco	0.46	0.95
Ladrillo rojo	0.63	0.93
Asfalto	0.90	0.90
Pintura negra	0.97	0.97
Pintura blanca	0.14	0.93
Nieve	0.28	0.97
Piel humana (caucásica)	0.62	0.97

Fuente: Sun Surveyor Lite

Finalmente se tiene una tabla en la que podemos apreciar una comparación y a su vez una relación entre estos parámetros para diferentes Materiales que se empleó, en este caso el aluminio.

Tabla 22: Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales

Propiedades relativas a la radiación solar de los materiales				
Descripción/composición	Absortividad solar, $\alpha_s$	Emisividad, $\epsilon$ , a 300 K	Relación, $\alpha_s/\epsilon$	Transmisividad solar, $\tau_s$
<b>Aluminio</b>				
Pulido	0.09	0.03	3.0	
Anodizado	0.14	0.84	0.17	
Con capa adicional de cuarzo	0.11	0.37	0.30	
Hoja	0.15	0.05	3.0	
Ladrillo rojo (Purdue)	0.63	0.93	0.68	
Concreto	0.60	0.88	0.68	
<b>Lámina metálica galvanizada</b>				
Limpia, nueva	0.65	0.13	5.0	
Oxidada, con acción de la intemperie	0.80	0.28	2.9	
<b>Vidrio, espesor de 3.2 mm</b>				
Flotado o templado				0.79
Tipo al bajo óxido de hierro				0.88
Mármol, ligeramente blanquizco (no reflector)	0.40	0.88	0.45	
<b>Metal, con chapa</b>				
Sulfuro negro	0.92	0.10	9.2	
Oxido negro de cobalto	0.93	0.30	3.1	
Oxido negro de níquel	0.92	0.08	11	
Cromo negro	0.87	0.09	9.7	
Mylar, espesor de 0.13 mm				0.87
<b>Pinturas</b>				
Negra (Parsons)	0.98	0.98	1.0	
Blanca, acrílica	0.26	0.90	0.29	
Blanca, óxido de zinc	0.16	0.93	0.17	
Papel blanco	0.27	0.83	0.32	
<b>Plexiglás, espesor de 3.2 mm</b>				0.90
Porcelana, losetas de porcelana, blancas (superficie vidriada reflectora)	0.26	0.85	0.30	
<b>Tejas para techo, rojo brillante</b>				
Superficie seca	0.65	0.85	0.76	
Superficie mojada	0.88	0.91	0.96	
<b>Arena seca</b>				
Blanquizca	0.52	0.82	0.63	
Roja mate	0.73	0.86	0.82	
<b>Nieve</b>				
Partículas finas, recién caídas	0.13	0.82	0.16	
Gránulos de hielo	0.33	0.89	0.37	
<b>Acero</b>				
Acabado de espejo	0.41	0.05	8.2	
Intensamente herrumbroso	0.89	0.92	0.96	
Piedra (rosa claro)	0.65	0.87	0.74	
Tedlar, espesor de 0.10 mm				0.92
Teflón, espesor de 0.13 mm				0.92
Madera	0.59	0.90	0.66	

Fuente: V. C. Sharma y A. Sharma, "Solar Properties of Some Building Elements", *Energy* 14 (1989), págs. 805-810, y otras fuentes.

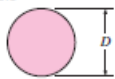
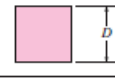
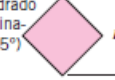
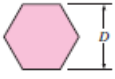
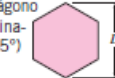
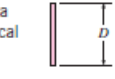

Fuente: Sun Surveyor Lite

## ANEXOS C. PROPIEDADES TERMICAS (NUSELT Y REYNOLDS)

Para la determinación del coeficiente de convección es necesario conocer dos términos que son de gran relevancia, Nusselt y Reynolds. Estos parámetros se definen según el tipo de convección presentada en el sistema, del material y de algunas condiciones ambientales que se presenten en el sitio. Estos números adimensionales definen características importantes a la hora de analizar un fluido o un material. Reynolds, nos define la forma en que se mueve un fluido, es decir, el comportamiento y su relación con el movimiento y el número de Nusselt nos define el aumento de la transferencia de calor de un material respecto a un fluido.

A continuación, se presentan las tablas que nos permiten definir estos valores.

*Tabla 23: Rango de los numeros de Reynolds y Nusselt*

Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
 Círculo	Gas o líquido	0.4-4 4-40 40-4 000 4 000-40 000 40 000-400 000	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$
 Cuadrado	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.102Re^{0.675} Pr^{1/3}$
 Cuadrado (inclinado 45°)	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.246Re^{0.588} Pr^{1/3}$
 Hexágono	Gas	5 000-100 000	$Nu = 0.153Re^{0.638} Pr^{1/3}$
 Hexágono (inclinado 45°)	Gas	5 000-19 500 19 500-100 000	$Nu = 0.160Re^{0.638} Pr^{1/3}$ $Nu = 0.0385Re^{0.782} Pr^{1/3}$
 Placa vertical	Gas	4 000-15 000	$Nu = 0.228Re^{0.731} Pr^{1/3}$
 Elipse	Gas	2 500-15 000	$Nu = 0.248Re^{0.612} Pr^{1/3}$

*Fuente: Sun Surveyor Lite*

En la tabla se puede observar las correlaciones empíricas para el Nusselt promedio teniendo en cuenta el perfil del Material.

Tabla 24: Correlaciones empíricas para Nusselt con relación al perfil del material

Configuración	Rango de $Re_D$	Correlación
Alineados	0-100	$Nu_D = 0.9 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	100-1 000	$Nu_D = 0.52 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.27 Re_D^{0.63} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.033 Re_D^{0.8} Pr^{0.4} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
Escalonados	0-500	$Nu_D = 1.04 Re_D^{0.4} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	500-1 000	$Nu_D = 0.71 Re_D^{0.5} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	1 000- $2 \times 10^5$	$Nu_D = 0.35 (S_f/S_s)^{0.2} Re_D^{0.6} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$
	$2 \times 10^5$ - $2 \times 10^6$	$Nu_D = 0.031 (S_f/S_s)^{0.2} Re_D^{0.8} Pr^{0.36} (Pr/Pr_s)^{0.25}$

\*Todas las propiedades, excepto  $Pr_s$ , se deben evaluar a la media aritmética de las temperaturas de admisión y de salida del fluido ( $Pr_s$  se debe evaluar a  $T_s$ ).

**TABLA 7-3**

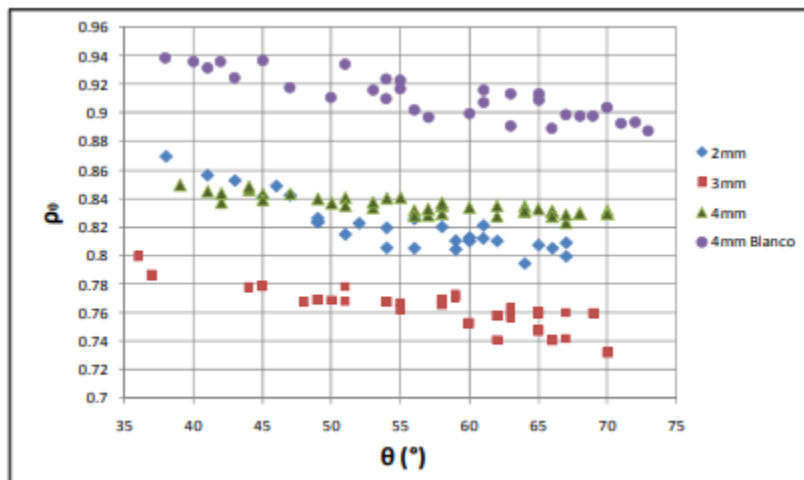
Factor de corrección  $F$  que debe usarse en  $Nu_D, N_{s-c16} = F Nu_D$  para  $N_L > 16$  y  $Re_D > 1 000$  (tomado de Zukauskas, 1987)

$N_L$	1	2	3	4	5	7	10	13
Alineados	0.70	0.80	0.86	0.90	0.93	0.96	0.98	0.99
Escalonados	0.64	0.76	0.84	0.89	0.93	0.96	0.98	0.99

Fuente: Sun Surveyor Lite

Por último, se observa la tabla de reflectancia en función del Angulo de incidencia para cada tipo de espejo.

Figura 98: Gráfica de la reflectancia en función del ángulo de incidencia para cada tipo de espejo



Fuente: Sun Surveyor Lite

## ANEXOS D. PROPIEDADES DEL AGUA

Las propiedades del agua son de gran importancia en una de las pruebas que se realizan con el concentrador. Mediante la siguiente tabla se aprecia todas las condiciones necesarias para la obtención de resultados.

*Tabla 25: Tabla de presiones del agua saturada*

Agua saturada. Tabla de presiones (conclusión)

Pres., P kPa	Temp. sat., T <sub>sat</sub> °C	Volumen específico, m <sup>3</sup> /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpia, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., v <sub>l</sub>	Vapor sat., v <sub>g</sub>	Liq. sat., u <sub>l</sub>	Evap., u <sub>fg</sub>	Vapor sat., u <sub>g</sub>	Liq. sat., h <sub>l</sub>	Evap., h <sub>fg</sub>	Vapor sat., h <sub>g</sub>	Liq. sat., s <sub>l</sub>	Evap., s <sub>fg</sub>	Vapor sat., s <sub>g</sub>
800	170.41	0.001115	0.24035	719.97	1856.1	2576.0	720.87	2047.5	2768.3	2.0457	4.6160	6.6616
850	172.94	0.001118	0.22690	731.00	1846.9	2577.9	731.95	2038.8	2770.8	2.0705	4.5705	6.6409
900	175.35	0.001121	0.21489	741.55	1838.1	2579.6	742.56	2030.5	2773.0	2.0941	4.5273	6.6213
950	177.66	0.001124	0.20411	751.67	1829.6	2581.3	752.74	2022.4	2775.2	2.1166	4.4862	6.6027
1000	179.88	0.001127	0.19436	761.39	1821.4	2582.8	762.51	2014.6	2777.1	2.1381	4.4470	6.5850
1100	184.06	0.001133	0.17745	779.78	1805.7	2585.5	781.03	1999.6	2780.7	2.1785	4.3735	6.5520
1200	187.96	0.001138	0.16326	796.96	1790.9	2587.8	798.33	1985.4	2783.8	2.2159	4.3058	6.5217
1300	191.60	0.001144	0.15119	813.10	1776.8	2589.9	814.59	1971.9	2786.5	2.2508	4.2428	6.4936
1400	195.04	0.001149	0.14078	828.35	1763.4	2591.8	829.96	1958.9	2788.9	2.2835	4.1840	6.4675
1500	198.29	0.001154	0.13171	842.82	1750.6	2593.4	844.55	1946.4	2791.0	2.3143	4.1287	6.4430
1750	205.72	0.001166	0.11344	876.12	1720.6	2596.7	878.16	1917.1	2795.2	2.3844	4.0033	6.3877
2000	212.38	0.001177	0.099587	906.12	1693.0	2599.1	908.47	1889.8	2798.3	2.4467	3.8923	6.3390
2250	218.41	0.001187	0.088717	933.54	1667.3	2600.9	936.21	1864.3	2800.5	2.5029	3.7926	6.2954
2500	223.95	0.001197	0.079952	958.87	1643.2	2602.1	961.87	1840.1	2801.9	2.5542	3.7016	6.2558
3000	233.85	0.001217	0.066667	1004.6	1598.5	2603.2	1008.3	1794.9	2803.2	2.6454	3.5402	6.1856
3500	242.56	0.001235	0.057061	1045.4	1557.6	2603.0	1049.7	1753.0	2802.7	2.7253	3.3991	6.1244
4000	250.35	0.001252	0.049779	1082.4	1519.3	2601.7	1087.4	1713.5	2800.8	2.7966	3.2731	6.0696
5000	263.94	0.001286	0.039448	1148.1	1448.9	2597.0	1154.5	1639.7	2794.2	2.9207	3.0530	5.9737
6000	275.59	0.001319	0.032449	1205.8	1384.1	2589.9	1213.8	1570.9	2784.6	3.0275	2.8627	5.8902
7000	285.83	0.001352	0.027378	1258.0	1323.0	2581.0	1267.5	1505.2	2772.6	3.1220	2.6927	5.8148
8000	295.01	0.001384	0.023525	1306.0	1264.5	2570.5	1317.1	1441.6	2758.7	3.2077	2.5373	5.7450
9000	303.35	0.001418	0.020489	1350.9	1207.6	2558.5	1363.7	1379.3	2742.9	3.2866	2.3925	5.6791
10,000	311.00	0.001452	0.018028	1393.3	1151.8	2545.2	1407.8	1317.6	2725.5	3.3603	2.2556	5.6159
11,000	318.08	0.001488	0.015988	1433.9	1096.6	2530.4	1450.2	1256.1	2706.3	3.4299	2.1245	5.5544
12,000	324.68	0.001526	0.014264	1473.0	1041.3	2514.3	1491.3	1194.1	2685.4	3.4964	1.9975	5.4939
13,000	330.85	0.001566	0.012781	1511.0	985.5	2496.6	1531.4	1131.3	2662.7	3.5606	1.8730	5.4336
14,000	336.67	0.001610	0.011487	1548.4	928.7	2477.1	1571.0	1067.0	2637.9	3.6232	1.7497	5.3728
15,000	342.16	0.001657	0.010341	1585.5	870.3	2455.7	1610.3	1000.5	2610.8	3.6848	1.6261	5.3108
16,000	347.36	0.001710	0.009312	1622.6	809.4	2432.0	1649.9	931.1	2581.0	3.7461	1.5005	5.2466
17,000	352.29	0.001770	0.008374	1660.2	745.1	2405.4	1690.3	857.4	2547.7	3.8082	1.3709	5.1791
18,000	356.99	0.001840	0.007504	1699.1	675.9	2375.0	1732.2	777.8	2510.0	3.8720	1.2343	5.1064
19,000	361.47	0.001926	0.006677	1740.3	598.9	2339.2	1776.8	689.2	2466.0	3.9396	1.0860	5.0256
20,000	365.75	0.002038	0.005862	1785.8	509.0	2294.8	1826.6	585.5	2412.1	4.0146	0.9164	4.9310
21,000	369.83	0.002207	0.004994	1841.6	391.9	2233.5	1888.0	450.4	2338.4	4.1071	0.7005	4.8076
22,000	373.71	0.002703	0.003644	1951.7	140.8	2092.4	2011.1	161.5	2172.6	4.2942	0.2496	4.5439
22,064	373.95	0.003106	0.003106	2015.7	0	2015.7	2084.3	0	2084.3	4.4070	0	4.4070

Fuente: Sun Surveyor Lite

## ANEXOS E. SOLDADURAS

En cuanto a la unión de las piezas del sistema, se emplea soldadura en electrodo revestido E6013, dándonos así las propiedades óptimas y seguras obtenidas anteriormente.

A continuación, se Denota las diferentes soldaduras y sus propiedades.

*Tabla 26: Intensidad Recomendable según tipo de electrodo*

INTENSIDAD RECOMENDABLE SEGÚN TIPO DE ELECTRODO							
ELECTRODO	DIÁMETRO	AMPERIOS		ELECTRODO	DIÁMETRO	AMPERIOS	
		min	max			min	max
E6010	2,5	60	90	E7014	2,5	80	110
	3,25	80	120		3,25	110	150
	4	120	160		4	140	190
	5	150	200		5	180	260
	6	225	300		6	300	400
E6011	2,5	50	90	E7024	2,5	90	120
	3,25	80	130		3,25	120	150
	4	120	180		4	180	230
	5	140	220		5	250	300
	6	225	325		6	350	400
E6012	2,5	40	90	E7016	8	400	500
	3,25	80	120		2,5	75	105
	4	120	190		3,25	100	150
	5	140	240		4	140	190
E6013	6	225	350	5	190	250	
	1,5	20	40	6	300	375	
	2	25	50	E7018	2,5	70	120
	2,5	30	80		3,25	100	150
	3,25	80	120		4	120	200
	4	120	190		5	200	275
E6027	5	140	240	6	300	400	
	6	250	350	E7028	4	175	250
	5	200	300		5	250	325
5,5	275	375	6		375	475	
	6	350	450				


*Fuente: Sun Surveyor Lite*

## ANEXOS F. ESPECIFICACIONES DE LOS MATERIALES

Es de vital importancia conocer las características que nos ofrecen los materiales tanto internos como externos. Un Factor que nos presentan a continuación y que es de gran objeto para el concentrador es el calibre que nos ofrece los materiales que se usan en su construcción. Lamina de aluminio, tubo de perfil cuadrado y circular son mostrados a continuación.

- Selección de lámina de aluminio Calibre 10.

Tabla 27: Especificaciones de lámina de aluminio calibre 10



Calibre	mm	Pulgadas	Anchos ft	Largos ft
C4	6.045	0.238"	3 o 4	8 o 10
C6	5.156	0.203"	3 o 4	8 o 10
C8	4.191	0.165"	3 o 4	8 o 10
C10	3.404	0.134"	3 o 4	8 o 10
C12	2.769	0.109"	3 o 4	8 o 10
C14	2.108	0.083"	3 o 4	8 o 10
C16	1.651	0.065"	3 o 4	8 o 10
C18	1.245	0.049"	3 o 4	8 o 10
C20	0.889	0.035"	3 o 4	8 o 10
C22	0.711	0.028"	3 o 4	8 o 10
C24	0.559	0.022"	3 o 4	8 o 10
C26	0.457	0.018"	3 o 4	8 o 10
C28	0.356	0.014"	3 o 4	8 o 10
C30	0.305	0.012"	3 o 4	8 o 10

Fuente: Sun Surveyor Lite

- Selección del Tubo de perfil cuadrado Calibre 18.

Tabla 28: Especificaciones del tubo de perfil cuadrado calibre 18

MEDIDA Pulg	(A x A) mm	C22 0.030"	C20 0.036"	C18 0.048"	C16 0.060"	C14 0.075"
1/2 X 1/2	12.7 x 12.7	---	0.345	0.460	0.570	---
5/8 x 5/8	15.9 x 15.9	---	0.435	0.565	---	---
3/4 x 3/4	19.0 x 19.0	0.447	0.500	0.670	0.820	1.042
7/8 x 7/8	22.2 x 22.2	---	0.625	0.825	1.044	1.190
1 x 1	25.4 x 25.4	---	0.690	0.920	1.130	1.430
1 1/4 x 1 1/4	31.7 x 31.7	---	0.890	1.190	1.450	1.800
1 1/2 x 1 1/2	38.1 x 38.1	0.894	1.070	1.370	1.750	2.160
2 x 2	50.8 x 50.8	---	1.460	1.840	2.430	2.900

Fuente: Sun Surveyor Lite

- Selección del Tubo de perfil circular Calibre 18.

Tabla 29: Especificaciones del tubo de perfil circular calibre 18

DIAMETRO Pulg	(D) mm	C23 0.027"	C22 0.030"	C20 0.036"	C18 0.048"	C16 0.060"	C14 0.075"	C13 0.013"
3/8	9.5	---	---	---	0.272	0.340	---	---
1/2	12.70	0.206	0.250	0.280	0.360	0.450	---	---
5/8	15.88	---	0.300	0.365	0.460	0.570	0.680	---
3/4	19.05	---	0.370	0.435	0.565	0.690	0.825	1.000
---	21.00	---	0.400	0.480	0.595	0.745	0.910	---
---	22.00	---	0.425	0.500	0.650	0.790	0.970	---
7/8	22.23	0.370	0.425	0.500	0.650	0.790	0.970	---
15/16	23.81	---	0.470	0.530	0.700	0.850	1.060	---
1	25.40	0.430	0.485	0.570	0.750	0.910	1.110	1.365
1 1/8	28.58	---	0.545	0.640	0.830	1.020	1.265	1.560
1 1/4	31.75	---	0.600	0.720	0.930	1.150	1.440	1.750
1 3/8	34.93	---	0.660	0.790	1.010	1.290	1.600	1.860
1 1/2	38.10	---	0.730	0.860	1.130	1.390	1.740	2.080
1 5/8	41.28	---	---	0.960	1.260	1.590	1.950	2.340
1 3/4	44.45	---	---	1.020	1.330	1.630	2.030	2.400
1 7/8	47.63	---	---	1.100	1.450	1.770	2.200	---
2	50.80	---	---	1.175	1.540	1.890	2.360	2.875

Fuente: Sun Surveyor Lite

## ANEXOS G. CODIGO DE DISEÑO

- **CODIGO EES DEL DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA**

El programa se encuentra realizado en el programa EES, con el nombre de DishStirlingEscala.EES, en el código se encuentran el interfaz y todas las funciones explicadas en el apartado de diseño de un concentrador solar tipo puntual a escala.

- **INICIO CODIGO DishStirlingEscala.EES**

"Función para el F\_gamma"

```
FUNCTION funF_gamma(X)
```

```
IF(X>0,85) THEN
```

```
F_gamma=0,85
```

```
ELSE
```

```
F_gamma=X
```

```
ENDIF
```

```
funF_gamma:=F_gamma
```

```
END
```

"Funcion de ZHUKAUSCA Para las constastes C y m"

```
FUNCTION zhu(X_Z)
```

```
IF(X_Z>0,85) and (X_z<40) THEN
```

```
C=0,75
```

```
ENDIF
```

```
IF(X_z>41) and (X_z<1000) THEN
```

```
C=0,51
```

```
ENDIF
```

```
IF(X_z>1001) and (X_z<200000) THEN
```

```
C=0,26
```

```
ENDIF
```

```
IF(X_z>200001) and (X_z<1000000) THEN
```

C=0,076

ENDIF

zhu:=C

END

FUNCTION zhu1(X\_z)

IF(X\_z>0,85) and (X\_z<40) THEN

m=0,4

ENDIF

IF(X\_z>41) and (X\_z<1000) THEN

m=0,5

ENDIF

IF(X\_z>1001) and (X\_z<200000) THEN

m=0,6

ENDIF

IF(X\_z>200001) and (X\_z<1000000) THEN

m=0,7

ENDIF

zhu1:=m

END

"Función para definir el tipo de convección"

FUNCTION conv(aux1)

IF(aux1<1) THEN

A\$='Convección forzada'

ENDIF

```

IF(aux1>1) THEN
A$='Convección natural'
ENDIF
IF(aux1=1) THEN
A$='Convección mixta'

ENDIF
conv:=A$
END

```

- **GEOMETRIA DEL CONCENTRADOR**

```

Aa=Pi*r**2 "Area de apertura [m2]"
"Aa=0.3 "
a=2*r "Diametro del concentrador [m]"
"La parabola que describe el concentrador, esta dada por la ecuacion y**2=4*f*x donde f es el foco"
"f=0.4 " "Distancia focal [m]"
sin(phi_r)=a*sin(theta)/D "Angulo de aceptacion que depende de angulo de rin"
"Calculo de phi_r"
phi_r=arctan((8*(rel))/((16*(rel)**2)-1)) "Angulo del rin"
rel=f/a "Relacion entre foco y diametro de apertura del concentrador"

```

```

"Calculo del diametro del absorbedor"
D_teorico=(a*tan(theta_a))/(sin(phi_r)) "Diametro del absorbedor teórico"
theta_a=8 "Angulo de aceptación asumido"
D_aprox=round(D_teorico*10)
D=D_aprox/10 "Diametro del absorbedor aproximado"

```

- **PERDIDAS OPTICAS DEL CONCENTRADOR**

```

e=2,71828 "cte valor de euler"
"Energia modificada S [w/m2]"
S=I_b*rho*tau*F_gamma*K_theta "[w/m2]"

```

"Donde:"

" $I_b=700$ " "[w/m<sup>2</sup>] radiacion total promedio en Nobsa"

$\rho=0,8$  "Reflectancia del espejo comercial de 3 mm o 3 lineas"

$\tau=0,78$  "Transmisividad de la cubierta colectora"

$x=1-(e^{(-w)})$  "Factor de intercepcion del haz solar"

$w=h*(r/r_r)**2$

$r_r=(2*f)/(1+(\cos(\phi_r)))$  "radio maximo de la parabola del concnetrador [m]"

$h=(I_{max}*a*\sqrt{\pi})/(2)$  "Coeficiente normal de distribución de flujo en el foco del concentrador"

$I_{max}=(I_b*\rho)/(\pi)$  "Densidad de flujo maxima concentrada"

"Funcion  $funF_\gamma(x)$  para evaluar la condicion anteriormente postulada"

$F_\gamma=funF_\gamma(x)$

$K_\theta=1-(6,74*(10^{(-5)})*\theta^{(2)})+(1,64*(10^{(-6)})*\theta^{(3)})-(2,51*(10^{(-8)})*\theta^{(4)})$

"Corrección para el angulo de incidencia con la normal del concentrador solar"

$\eta=S/I_b$  "Eficiencia optica del concentrador"

$S_{total}=S*A_a$  "Energia total por unidad de area despues de las perdidas opticas"

- **PERDIDAS EN EL ABSORBEDOR**

$C=(A_a/0,09)$  "Relacion de concentracion"

"Analisis del concentrador"

$Q_{in_w}=S_{total}-Q_{ch}-Q_{rh}$  "Calor total"

"Perdidas de calor por conveccion"

$Q_{ch}=h*A_{con}*(T_h-T_f)$  "[w] Donde: h coeficiente de convección [w/m<sup>2</sup>\*C],  $A_{con}$  Area del concentrador [m<sup>2</sup>],  $T_h$  temperatura del receptor (°C),  $T_f$  Temperatura ambiente [°C]"

"coeficiente de conveccion forzado con corrientes de aire sobre un cilindro, uso de las formulas de Zhukauskas"

"Saber si es conveccion mixta, natural o forzada"

$$\text{aux}=\text{Gr}/(\text{Re}^{**2})$$

$$\text{Gr}=(\text{g}*\text{beta}*(\text{Ts}-\text{Tf})*\text{Lc}^{**3})/(\text{nu}) \quad \text{"El número de Grashof (Gr)"}$$

$$\text{g}=9,8 \quad \text{"[m/s2] gravedad"}$$

$$\text{beta}=\text{VolExpCoef}(\text{Air\_ha};\text{T}=\text{T};\text{P}=\text{P}) \quad \text{"Coeficiente de expansion volumetrica"}$$

$$\text{Lc}=\text{D\_ext} \quad \text{"Longitud caracteristica de un cilinedo es el diametro"}$$

$$\text{Ts}=70 \quad \text{"Temperatura de superfice"}$$

$$\text{Tf}=\text{T} \quad \text{"Temperatura del fluido libre aire"}$$

$$\text{Ts}=\text{T\_h} \quad \text{"Temperatura de superfice para la Ec. de convección"}$$

"Define el tipo de convección"

$$\text{Tipconv}=\text{conv}(\text{aux})$$

"coeficiente de conveccion forzado con corrientes de aire sobre un cilindro, uso de las formulas de Zhukauskas"

"Calcular el numero de reynolds"

$$\{\text{D}=0.03\}$$

$$\text{Re}=(\text{vs}*\text{D\_ext})/\text{nu} \quad \text{"Calculo del Reynolds para calcular el coeficiente externo forzado por convección"}$$

$$\text{vs}=2,6 \quad \text{"m/s promedio"}$$

$$\text{D\_ext}=\text{D}/10 \quad \text{"Diametro externo del receptor del motor sterling"}$$

$$\text{nu}=\text{mu}/\text{den} \quad \text{"Viscosidad cinemática"}$$

$$\text{T}=19 \quad \text{"°C"}$$

$$\text{P}=101 \quad \text{"Kpa"}$$

$$\text{den}=\text{Density}(\text{Acetone};\text{T}=\text{T};\text{P}=\text{P}) \quad \text{"[Kg/m3]"}$$

$$\text{mu}=\text{Viscosity}(\text{Acetone};\text{T}=\text{T};\text{P}=\text{P}) \quad \text{"[Kg/m*s]"}$$

$$\text{x\_z}=\text{Re} \quad \text{"Parametro de entrada a la función ZHU"}$$

$$\text{C1}=\text{zhu}(\text{X\_z}) \quad \text{"valor de la constante C"}$$

$$\text{m1}=\text{zhu1}(\text{X\_z}) \quad \text{"valor de la constante m"}$$

$$\text{Pr}=\text{Prandtl}(\text{Air\_ha};\text{T}=\text{T};\text{P}=\text{P}) \quad \text{"Prant del aire"}$$

$$\text{Nus\_c}=\text{C1}*(\text{Re}^{**\text{m1}})*(\text{Pr}^{**\text{n}}) \quad \text{"Nussel para un cilindro conveccion forzada"}$$

$$\text{n}=0,36 \quad \text{"cte"}$$

$h_{conv}=(Nus_c \cdot K)/(D_{ext})$  "[W/m<sup>2</sup>°C] Coeficiente de convección externo forzado en aire"

$K=Conductivity(Air_{ha};T=T;P=P)$  "[W/m<sup>2</sup>°C] Conductividad del fluido"

"A<sub>con</sub> Area del cilindro caliente del motor Stirling"

$A_{con}=Largo \cdot perimetro$  "Area del cilindro caliente del motor sterling"

$perimetro=PI \cdot D_{1ext}$  "Perimetro del circulo absorbedor"

$Largo=0,028$  "Largo del cilindro"

$D_{1ext}=0,015$  "Diametro del cilindro caliente del motor sterling"

"Perdidas con Radiacion con el cielo q<sub>rh</sub>"

$q_{rh}=\epsilon \cdot \sigma \cdot A_{con} \cdot ((T_f+273)^4 - (T_{sky})^4)$  "[w] Calor perdido por radiacion"

$\epsilon=0,9$  "Emisividad del plato absorbedor"

$\sigma=5,667 \cdot 10^{-8}$  "[w/m<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>]Constante de Stefan Boltzmann"

$T_{sky}=0,00552 \cdot (T+273)^{1,5}$  "[°K] Temperatura del cielo"

- **POTENCIA ENTREGADA POR EL MOTOR STIRLING**

"Potencia entregada por el motor sterling"

$Pot_w=efi_{sterling} \cdot Qin_w$

$Pot_{hp}=Pot_w \cdot 0,00134102$

○ INTERFAZ DEL CODIGO DEL DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA.

Figura 99: Interfaz del código del concentrador solar tipo puntual a escala

## Concentrador parabólico tridimensional puntual

### Datos Entrada

---

Área de apertura  [m<sup>2</sup>]

Distancia focal  [m]

Con la distancia focal se debe revisar el ángulo de aceptación debe estar entre 1° y 16°

$\epsilon = 6,244$

Radiación solar  [w/m<sup>2</sup>]

Eficiencia del motor

$y^2 = 2 * 0,3 * x$

Concentrador

Geometría básica del concentrador

### Resultados

---

Geometría

Diámetro del Área <sub>apertura</sub>	0,618 [m]
Diámetro del receptor	0,1 [m]
Distancia focal	0,4 [m]
Ángulo de aceptación	6,244 [°]
Área de apertura	0,3 [m <sup>2</sup> ]

Función de la parábola

$y^2 = 2 * 0,3 * x$

Componente térmico

Radiación Solar total (energía del sol)

700 [w/m<sup>2</sup>]

Radiación después de pérdidas ÓPTICAS

370,4 [w/m<sup>2</sup>]

Eficiencia óptica

0,5292

Radiación después de las pérdidas ópticas y térmicas

104,1 [w]

Potencia teórica entregada por el motor sterling

0,02652[hp]

19,77 [W]

Escuela de ingeniería mecánica

Nota: La distancia focal se debe corroborar con la parábola revisar GEOGEBRA

Fuente: Sun Surveyor Lite

- **CODIGO EES DEL DISEÑO DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL REAL**

El programa se encuentra realizado en el programa EES, con el nombre de DishStirlingReal.EES, en el código se encuentran el interfaz y todas las funciones explicadas en el apartado de diseño de un concentrador solar tipo puntual real.

- **INICIO CODIGO DishStirlingReal.EES**

"Función para el F\_gamma"

```
FUNCTION funF_gamma(X)
IF(X>0,85) THEN
F_gamma=0,85
ELSE
F_gamma=X
ENDIF
funF_gamma:=F_gamma
END
```

"Funcion de ZHUKAUSCA Para las constastes C y m"

```
FUNCTION zhu(X_Z)
IF(X_Z>0,85) and (X_z<40) THEN
C=0,75
ENDIF
```

```
IF(X_z>41) and (X_z<1000) THEN
C=0,51
ENDIF
```

```
IF(X_z>1001) and (X_z<200000) THEN
C=0,26
ENDIF
```

```
IF(X_z>200001) and (X_z<1000000) THEN
C=0,076
```

ENDIF

zhu:=C

END

FUNCTION zhu1(X\_z)

IF(X\_z>0,85) and (X\_z<40) THEN

m=0,4

ENDIF

IF(X\_z>41) and (X\_z<1000) THEN

m=0,5

ENDIF

IF(X\_z>1001) and (X\_z<200000) THEN

m=0,6

ENDIF

IF(X\_z>200001) and (X\_z<1000000) THEN

m=0,7

ENDIF

zhu1:=m

END

"Función para definir el tipo de convección"

FUNCTION conv(aux1)

IF(aux1<1) THEN

A\$='Convección forzada'

```

ENDIF
IF(aux1>1) THEN
A$='Convección natural'

```

```

ENDIF
IF(aux1=1) THEN
A$='Convección mixta'
ENDIF
conv:=A$
END

```

- **GEOMETRIA INICIAL DEL CONCENTRADOR**

"Area de aceptacion"

$Aa = \pi \cdot r^2$  "Area de apertura [m2]"

"Aa=14 "

$a = 2 \cdot r$  "Diametro del concentrador [m]"

"La parabola que describe el concentrador, esta dada por la ecuacion  $y^2 = 4 \cdot f \cdot x$  donde f es el foco"

"f=1,4 " "Distancia focal [m]"

$\sin(\phi_r) = a \cdot \sin(\theta) / D$  "Angulo de aceptacion que depende de angulo de rin"

"Calculo de  $\phi_r$ "

$\phi_r = \arctan\left(\frac{8 \cdot (\text{rel})}{(16 \cdot (\text{rel})^2 - 1)}\right)$  "Angulo del rin"

$\text{rel} = f/a$  "Relacion entre foco y diametro de apertura del concentrador"

"Calculo del diametro del absorbedor"

$D_{\text{teorico}} = (a \cdot \tan(\theta_a)) / (\sin(\phi_r))$  "Diametro del absorbedor teórico"

$\theta_a = 8$  "Angulo de aceptación asumido"

$D_{\text{aprox}} = \text{round}(D_{\text{teorico}} \cdot 10)$

$D = D_{\text{aprox}} / 10$  "Diametro del absorbedor aproximado"

- **PERDIDAS OPTICAS DEL CONCENTRADOR**

$e = 2,71828$  "cte valor de euler"

"Energia modificada S [w/m2]"

$$S = I_b \cdot \rho \cdot \tau \cdot F_{\gamma} \cdot K_{\theta} \quad "[w/m2]"$$

"Donde:"

" $I_b = 700$ " "[w/m2] radiacion total promedio en Nobsa"

$\rho = 0,8$  "Reflectancia del espejo comercial de 3 mm o 3 lineas"

$\tau = 0,78$  "Transmisividad de la cubierta colectora"

$x = 1 - (e^{-w})$  "Factor de intercepcion del haz solar"

$$w = h \cdot (r/r_r)^2$$

$r_r = (2 \cdot f) / (1 + (\cos(\phi_r)))$  "radio maximo de la parabola del concnetrador [m]"

$h = (I_{\max} \cdot a \cdot \sqrt{\pi}) / (2)$  "Coeficiente normal de distribución de flujo en el foco del concentrador"

$I_{\max} = (I_b \cdot \rho) / (\pi)$  "Densidad de flujo maxima concentrada"

"Funcion  $\text{fun}F_{\gamma}(x)$  para evaluar la condicion anteriormente postulada"

$$F_{\gamma} = \text{fun}F_{\gamma}(x)$$

$$K_{\theta} = 1 - (6,74 \cdot (10^{-5}) \cdot \theta^2) + (1,64 \cdot (10^{-6}) \cdot \theta^3) - (2,51 \cdot (10^{-8}) \cdot \theta^4)$$

"Corrección para el angulo de incidencia con la normal del concentrador solar"

$\eta = S / I_b$  "Eficiencia optica del concentrador"

$S_{\text{total}} = S \cdot A_a$  "Energia total por unidad de area despues de las perdidas opticas"

#### ○ PERDIDAS EN EL ABSORBEDOR

$C = (A_a / 0,09)$  "Relacion de concentracion"

"Analisis del concentrador"

$Q_{in_w} = S_{\text{total}} - Q_{ch} - Q_{rh}$  "Calor total"

"Perdidas de calor por conveccion"

$Q_{ch} = h \cdot A_{con} \cdot (T_h - T_f)$  "[w] Donde: h coeficiente de convección [w/m2°C],  $A_{con}$  Area del concentrador [m2],  $T_h$  temperatura del receptor (°C),  $T_f$  Temperatura ambiente [°C]"

"coeficiente de conveccion forzado con corrientes de aire sobre un cilindro, uso de las formulas de Zhukauskas"

"Saber si es conveccion mixta, natural o forzada"

$$\text{aux} = Gr / (Re^2)$$

$Gr = (g \cdot \beta \cdot (T_s - T_f) \cdot L_c^3) / (\nu)$  "El número de Grashof (Gr)"

$g=9,8$  "[m/s<sup>2</sup>] gravedad"

$\beta = \text{VolExpCoef}(\text{Air\_ha}; T=T; P=P)$  "Coeficiente de expansion volumetrica"

$L_c = D_{\text{ext}}$  "Longitud caracteristica de un cilinedo es el diametro"

$T_s = 70$  "Temperatura de superfice"

$T_f = T$  "Temperatura del fluido libre aire"

$T_s = T_h$  "Temperatura de superfice para la Ec. de convección"

"Define el tipo de convección"

$\text{Tipconv} = \text{conv}(\text{aux})$

"coeficiente de conveccion forzado con corrientes de aire sobre un cilindro, uso de las formulas de Zhukauskas"

"1. Calcular el numero de reynolds"

{D=0.03}

$\text{Re} = (v_s * D_{\text{ext}}) / \nu$  "Calculo del Reynolds para calcular el coeficiente externo forzado por convección"

$v_s = 2,6$  "m/s promedio"

$D_{\text{ext}} = D / 10$  "Diametro externo del receptor del motor sterling"

$\nu = \mu / \rho$  "Viscosidad cinemática"

$T = 19$  "°C"

$P = 101$  "Kpa"

$\rho = \text{Density}(\text{Acetone}; T=T; P=P)$  "[Kg/m<sup>3</sup>]"

$\mu = \text{Viscosity}(\text{Acetone}; T=T; P=P)$  "[Kg/m\*s]"

$x_z = \text{Re}$  "Parametro de entrada a la función ZHU"

$C_1 = \text{zhu}(X_z)$  "valor de la constante C"

$m_1 = \text{zhu1}(X_z)$  "valor de la constante m"

$\text{Pr} = \text{Prandtl}(\text{Air\_ha}; T=T; P=P)$  "Prant del aire"

$\text{Nus}_c = C_1 * (\text{Re}^{m_1}) * (\text{Pr}^n)$  "Nussel para un cilindro conveccion forzada"

$n = 0,36$  "cte"

$h_{\text{conv}} = (\text{Nus}_c * K) / (D_{\text{ext}})$  "[W/m\*°C] Coeficiente de convección externo forzado en aire"

$K = \text{Conductivity}(\text{Air\_ha}; T=T; P=P)$  "[W/m\*°C] Conductividad del fluido"

"A\_con Area del cilindro caliente del motor Stirling"

$A_{con} = \text{Largo} * \text{perimetro}$  "Area del cilindro caliente del motor sterling"

$\text{perimetro} = \pi * D_{1ext}$  "Perimetro del circulo absorbedor"

$\text{Largo} = 0,056$  "Largo del cilindro"

$D_{1ext} = 0,03$  "Diametro del cilindro caliente del motor sterling"

"Perdidas con Radiacion con el cielo q\_rh"

$q_{rh} = \epsilon * \sigma * A_{con} * ((T_f + 273)^4 - (T_{sky})^4)$  "[w] Calor perdido por radiacion"

$\epsilon = 0,9$  "Emisividad del plato absorbedor"

$\sigma = 5,667 * 10^{-8}$  "[w/m<sup>2</sup> °K<sup>4</sup>] Constante de Stefan Boltzmann"

$T_{sky} = 0,00552 * (T + 273)^{1,5}$  "[°K] Temperatura del cielo"

- **POTENCIA ENTREGADA POR EL MOTOR STIRLING**

$Pot_w = \epsilon_{fi\_sterling} * Q_{in\_w}$

$Pot_{hp} = Pot_w * 0,00134102$

○ INTERFAZ DEL CODIGO DEL DISEÑO DE UN CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA.

Figura 100: Interfaz del código del concentrador solar tipo puntual real

### Concentrador parabólico tridimensional puntual

**Datos Entrada**

---

Área de apertura  [m<sup>2</sup>]

Distancia focal  [m]

Con la distancia focal se debe revisar el ángulo de aceptación debe estar entre 1° y 16°

$\theta = 7,853$

Radiación solar  [w/m<sup>2</sup>]

Eficiencia del motor

$y^2 = 2 * 14 * x$

Concentrador

**Geometría básica del concentrador**

**Resultados**

---

**Geometría**

Diámetro del Área<sub>apertura</sub> 4,222 [m]

Diámetro del receptor 0,6 [m]

Distancia focal 1,4 [m]

Ángulo de aceptación 7,853 [°]

Área de apertura 14 [m<sup>2</sup>]

**Función de la parábola**

$y^2 = 2 * 14 * x$

**Componente térmico**

Radiación Solar total (energía del sol)

**700** [w/m<sup>2</sup>]

Radiación después de pérdidas ÓPTICAS

**370** [w/m<sup>2</sup>]

Eficiencia óptica

**0,5286**

Radiación después de las pérdidas ópticas y térmicas

**4998** [w]

Potencia teórica entregada por el motor sterling

**2,011** [hp]

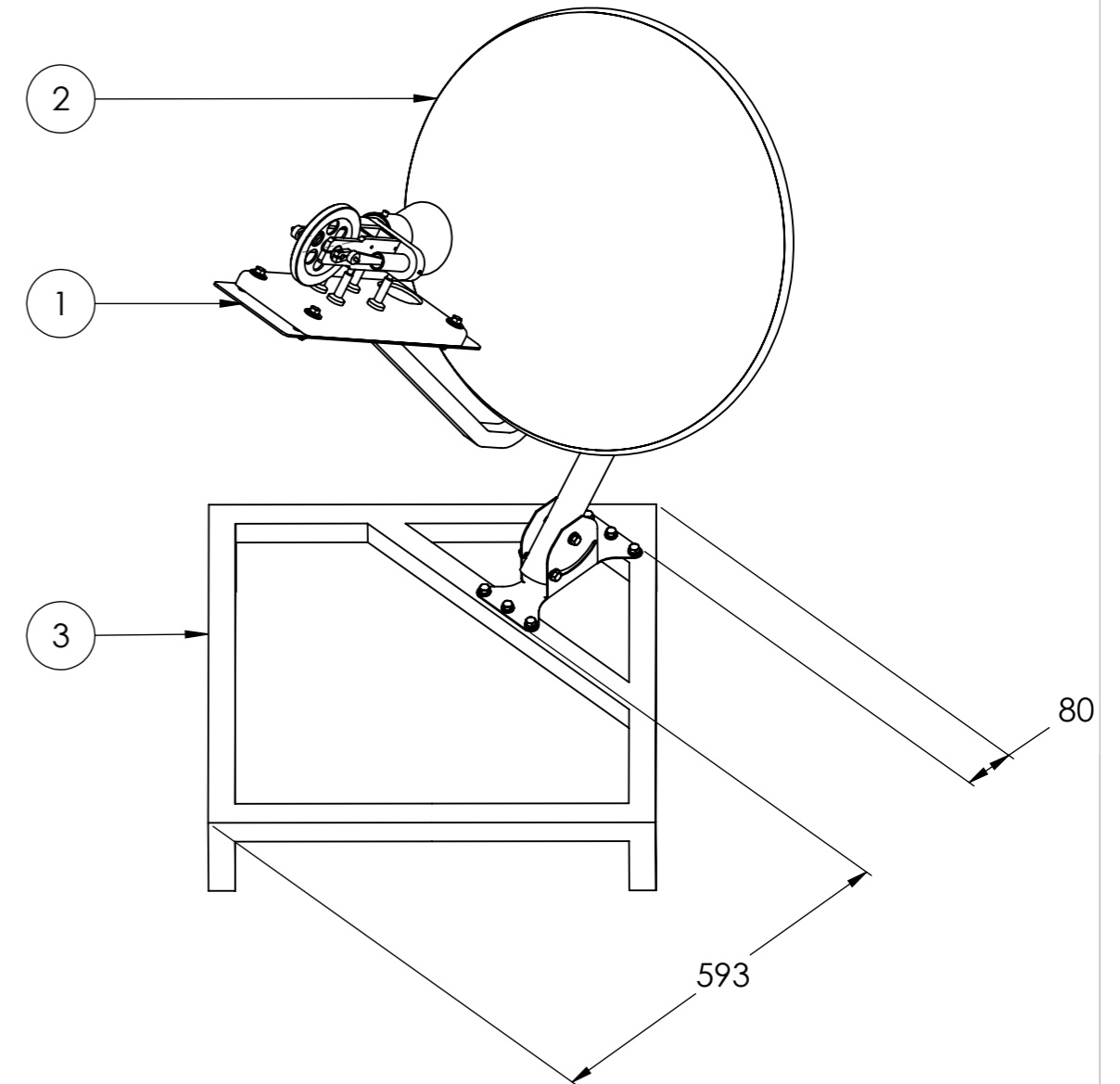
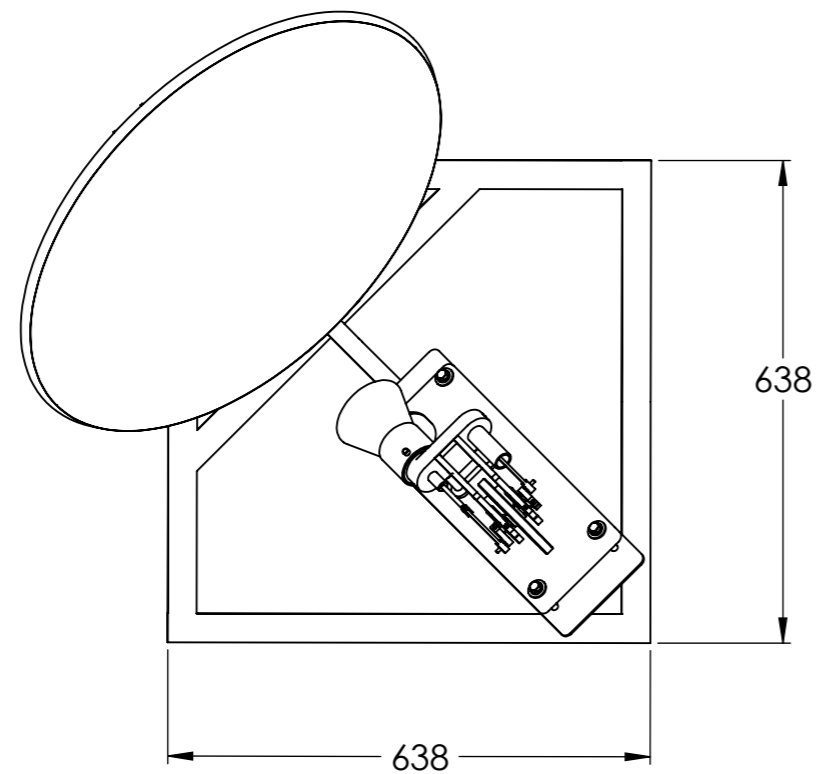
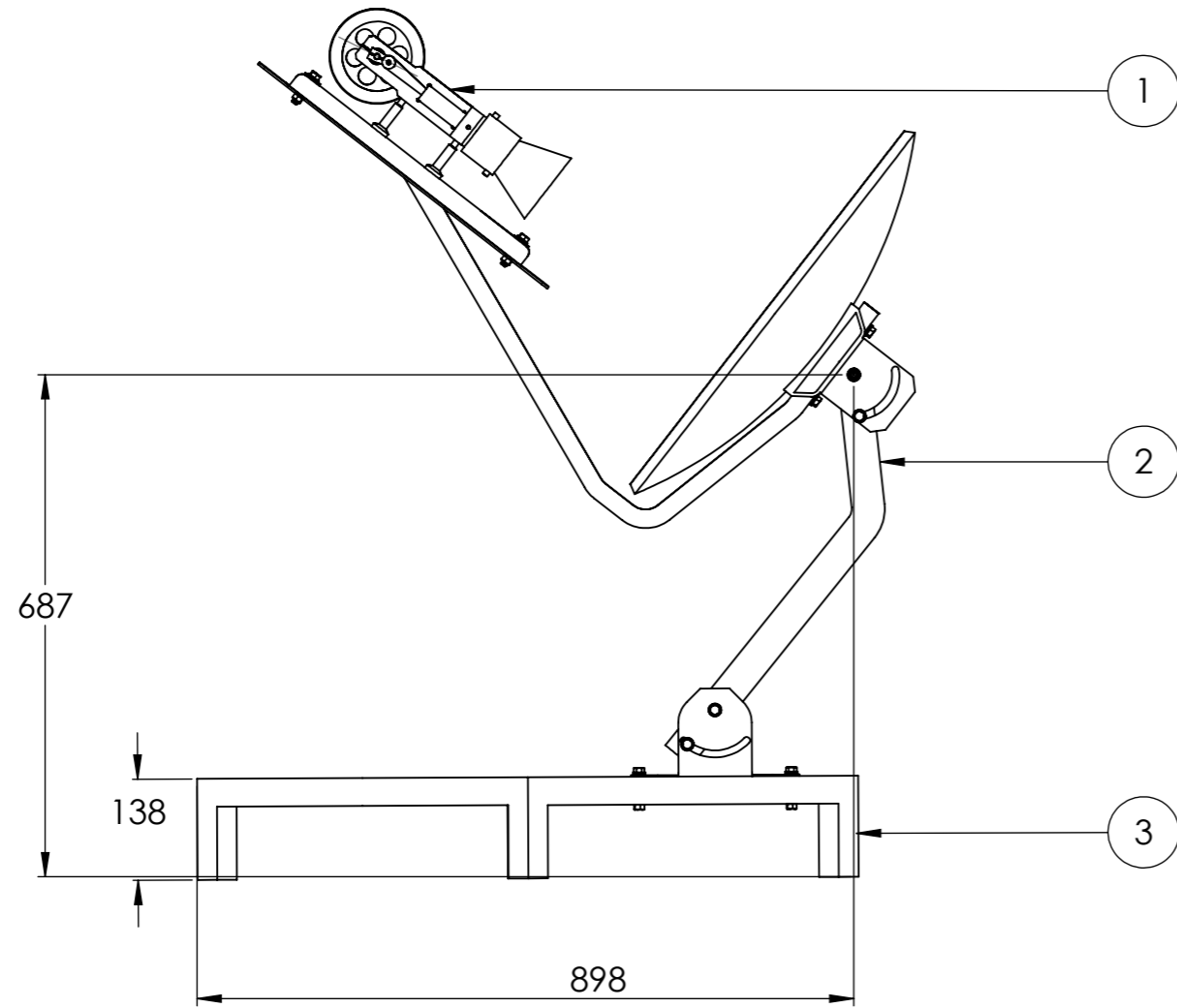
**1500** [W]

Escuela de ingeniería mecánica

Nota: La distancia focal se debe corroborar con la parábola revisar GEOGEBRA

Fuente: Sun Surveyor Lite

**ANEXOS H. PLANOS DEL CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL A ESCALA**



3	BASE CON ARTICULACIÓN	1	PLN° 03-00-00
2	PARABOLOIDE (COLECTOR)	1	PLN° 02-00-00
1	MOTOR STIRLING	1	PLN° 01-00-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACIÓN



Universidad  
Industrial de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:10

CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL



DIBUJADO POR:  
IVAN MORA Y ZAMIR CABRA

PIEZA N° 1

FORMATO  
A3

REVISADO POR:  
YESID RUEDA

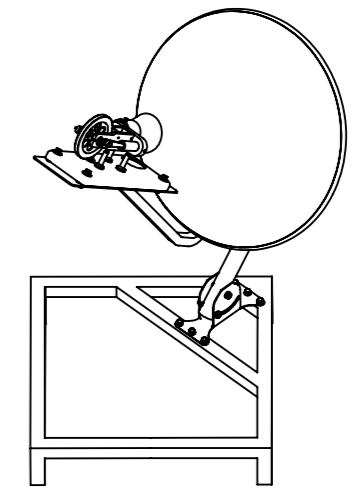
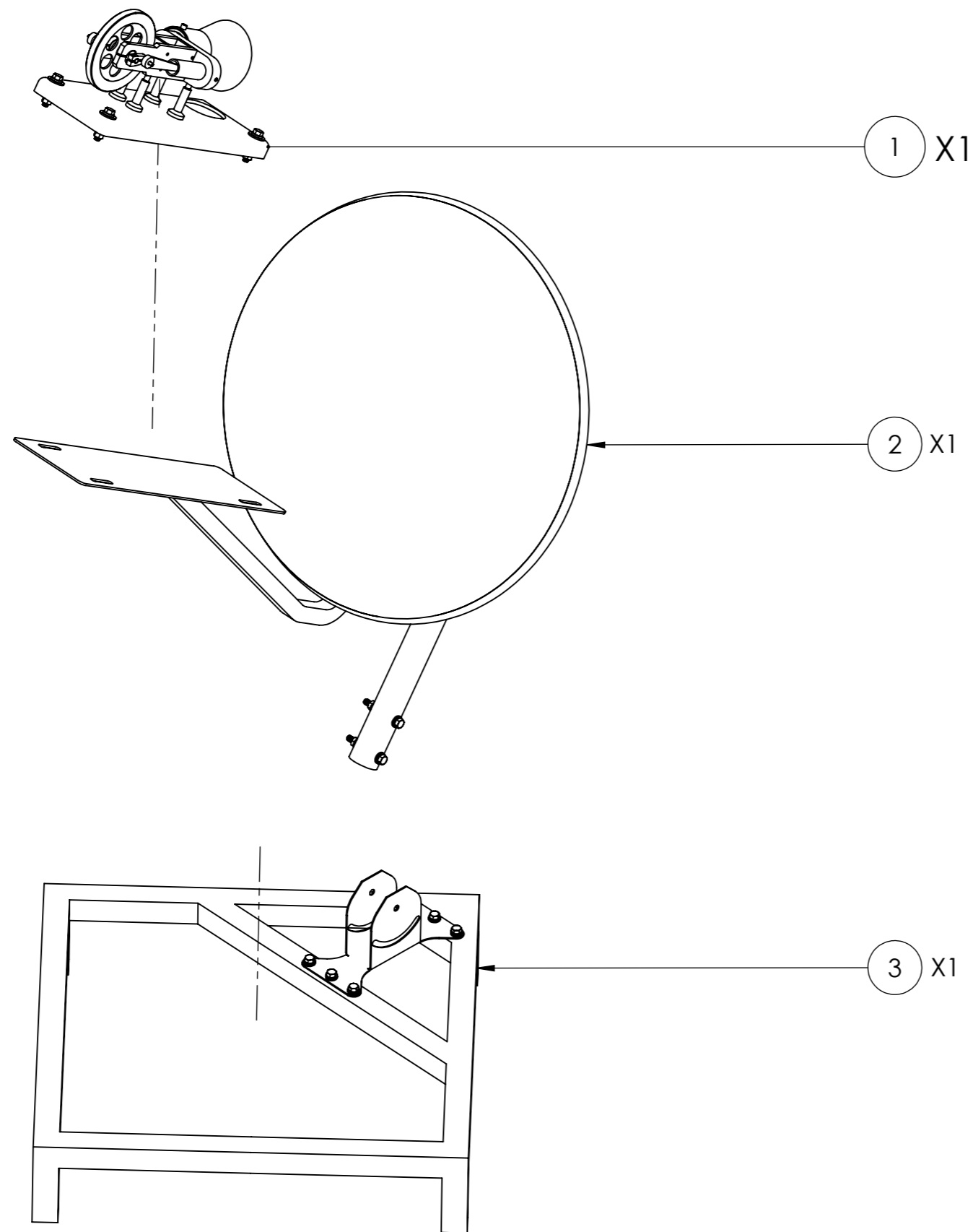
2021-11-09

HOJA 1/15



MEDIDAS EN:  
mm

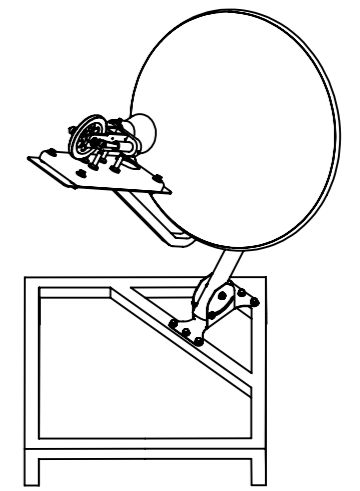
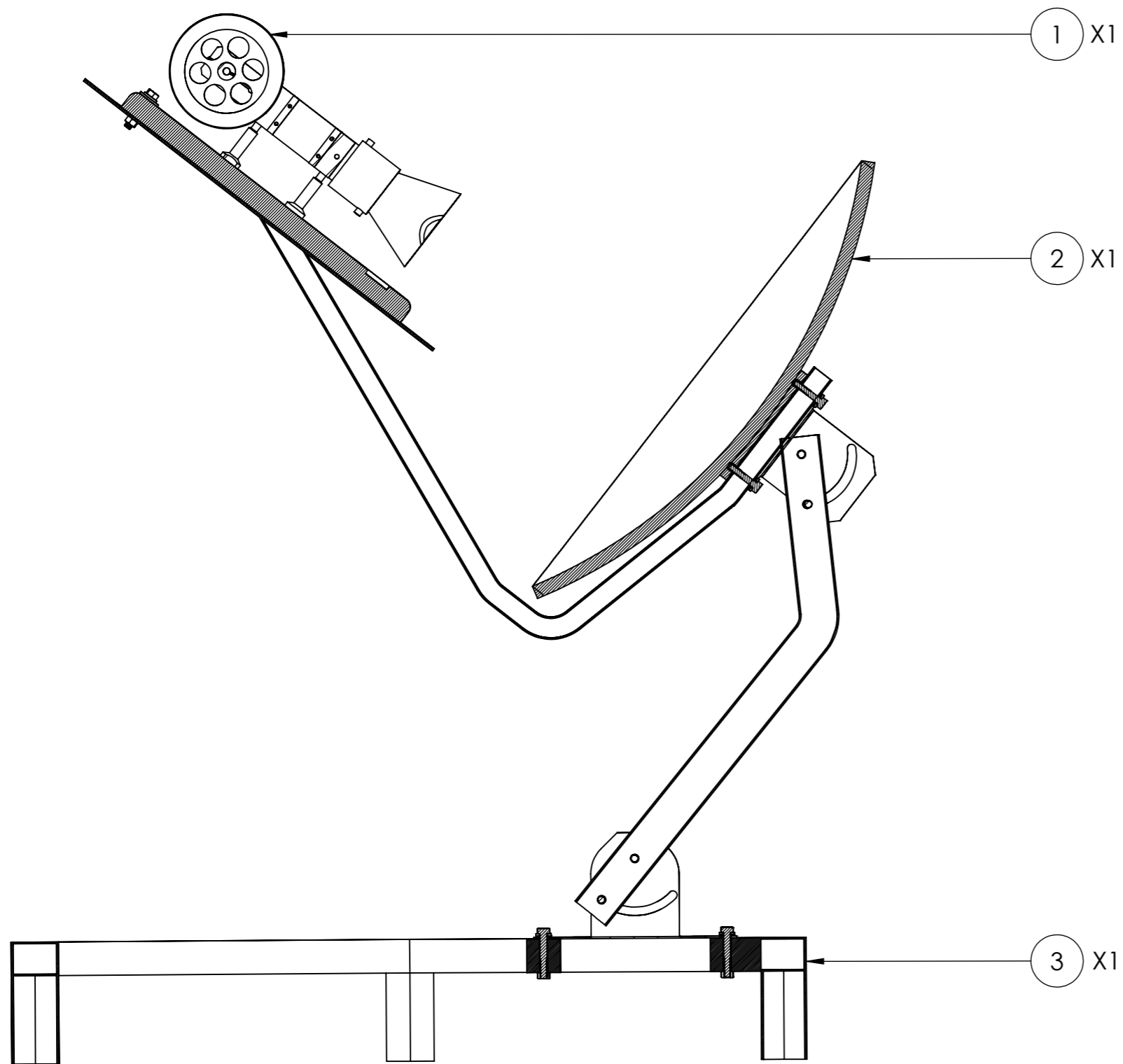
MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO

PL N° 00-00-00


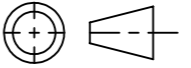


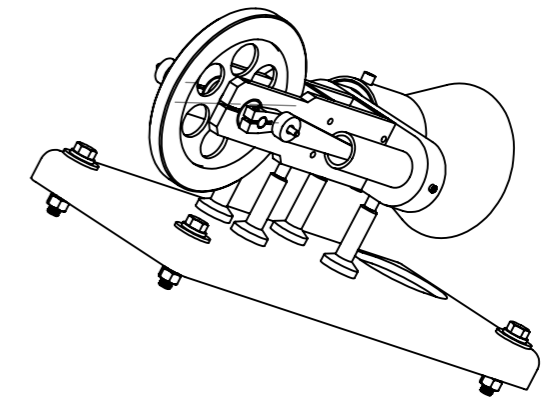
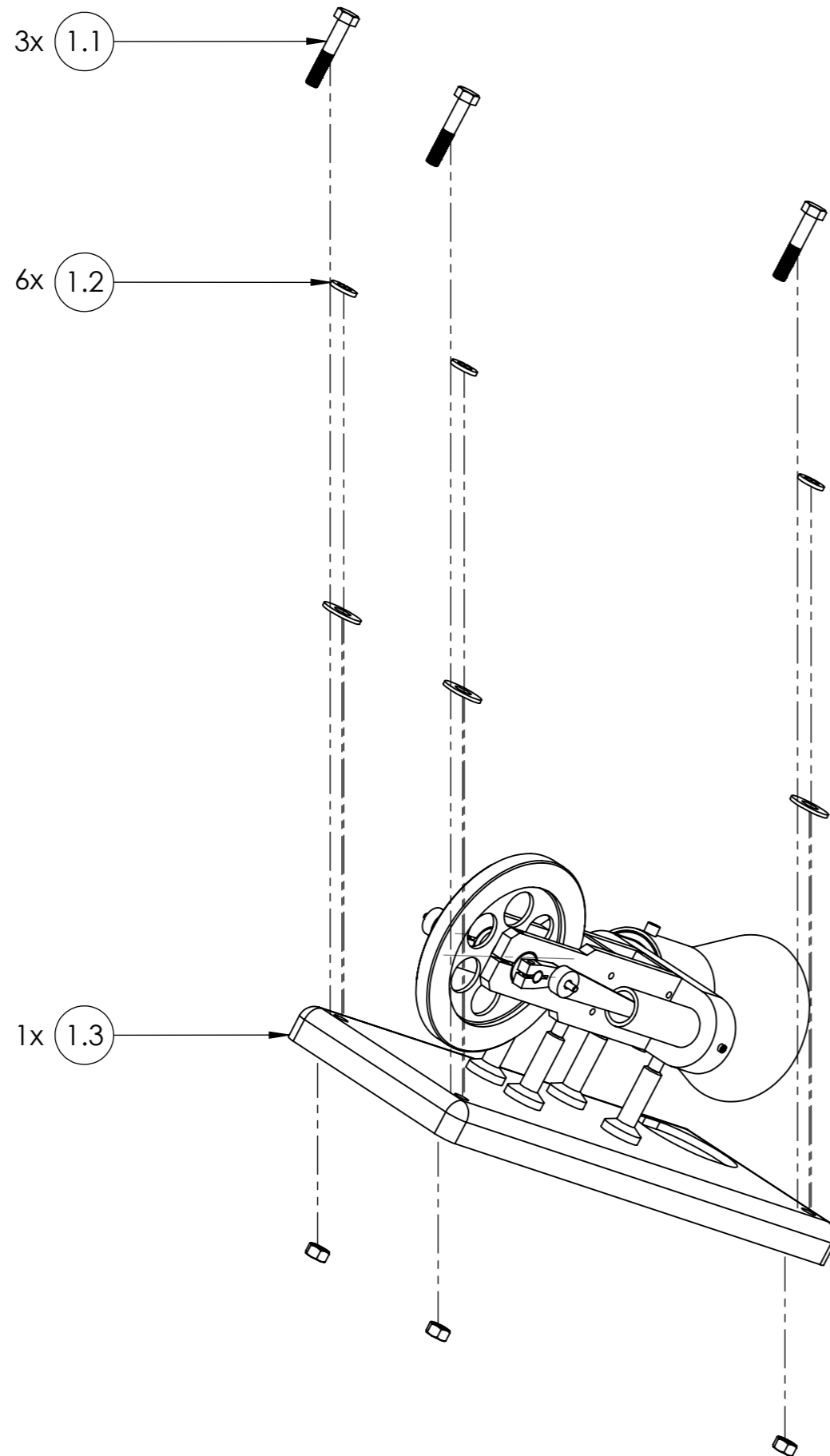
**ESCALA 1:20**

3	BASE CON ARTICULACION	1	PLN° 03-00-00
2	PARABOLOIDE (COLECTOR)	1	PLN° 02-00-00
1	MOTOR STIRLING	1	PLN° 01-00-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACION
 <b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>			
ESCALA: 1:8		<b>CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL VISTA EXPLOSIONADA</b>	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	
FORMATO A3 MEDIDAS EN: mm		REVISADO POR: YESID RUEDA 2021-11-09	PIEZA N° 2 HOJA 2/15 PLN° 00-00-00



**ESCALA 1:20**

3	BASE CON ARTICULACION	1	PL N° 03-00-00
2	PARBOLOIDE (COLECTOR)	1	PL N° 02-00-00
1	MOTOR STIRLING	1	PL N° 01-00-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACION
 <b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>			
ESCALA: 1:6		CONCENTRADOR SOLAR TIPO PUNTUAL VISTA DE CORTE LATERAL	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	
FORMATO A3		REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09
MEDIDAS EN: mm		MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO	HOJA 3/15
			PL N° 00-00-00



ESCALA 1:5

1.3	MOTOR STIRLING TIPO GAMMA	1	PIEZA ESTANDAR
1.2	ARANDELA DE PRESIÓN DIN 127	6	PIEZA ESTANDAR
1.1	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13x2"	3	PIEZA ESTANDAR
Nº	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACION



Universidad  
Industrial de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:3.7

MOTOR STIRLING VISTA EXPLOSIONADA



DIBUJADO POR:  
IVAN MORA Y ZAMIR CABRA

PIEZA Nº 4

FORMATO  
A3

REVISADO POR:  
YESID RUEDA

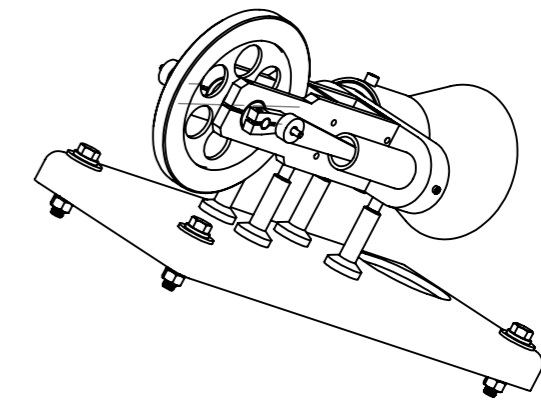
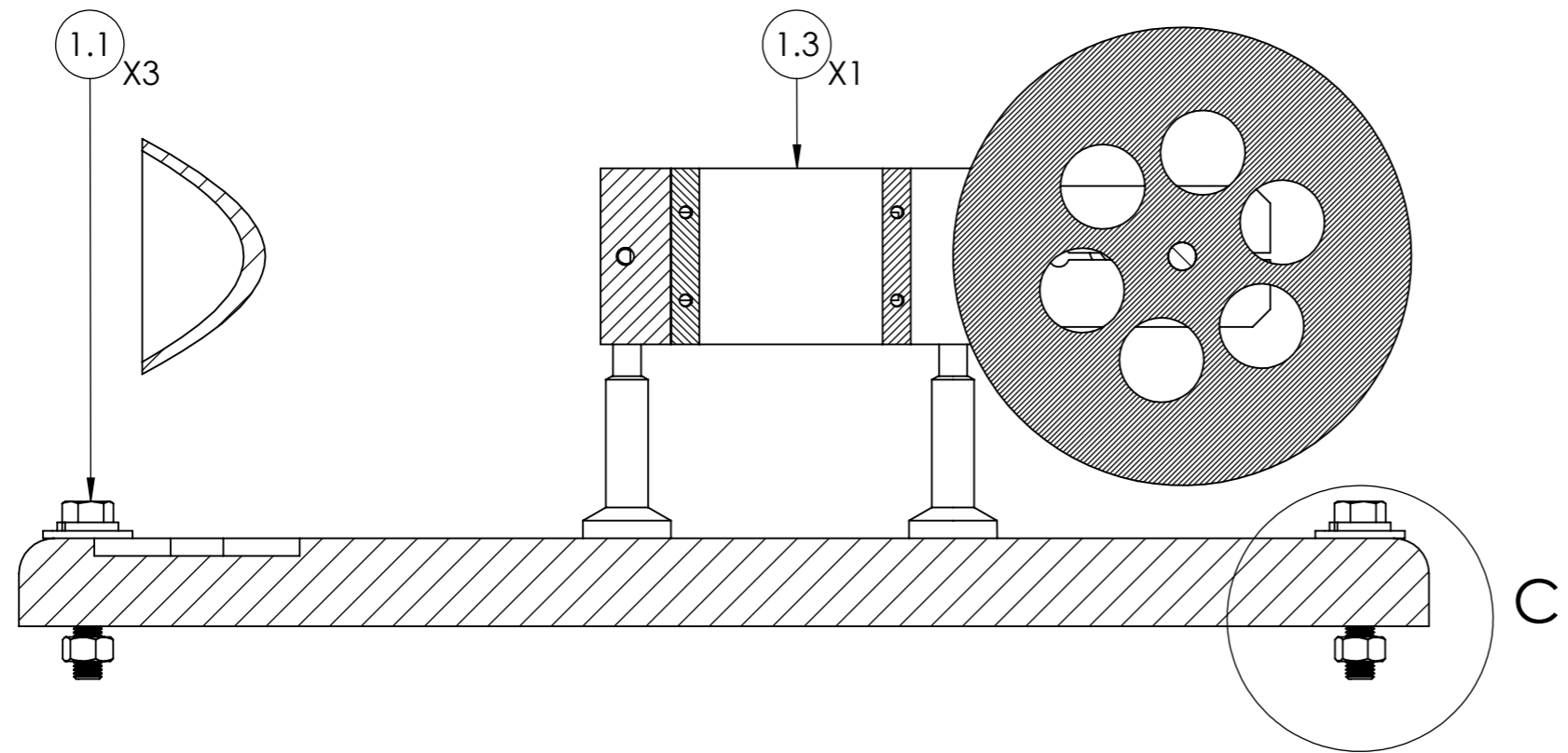
2021-11-09

HOJA 4/15

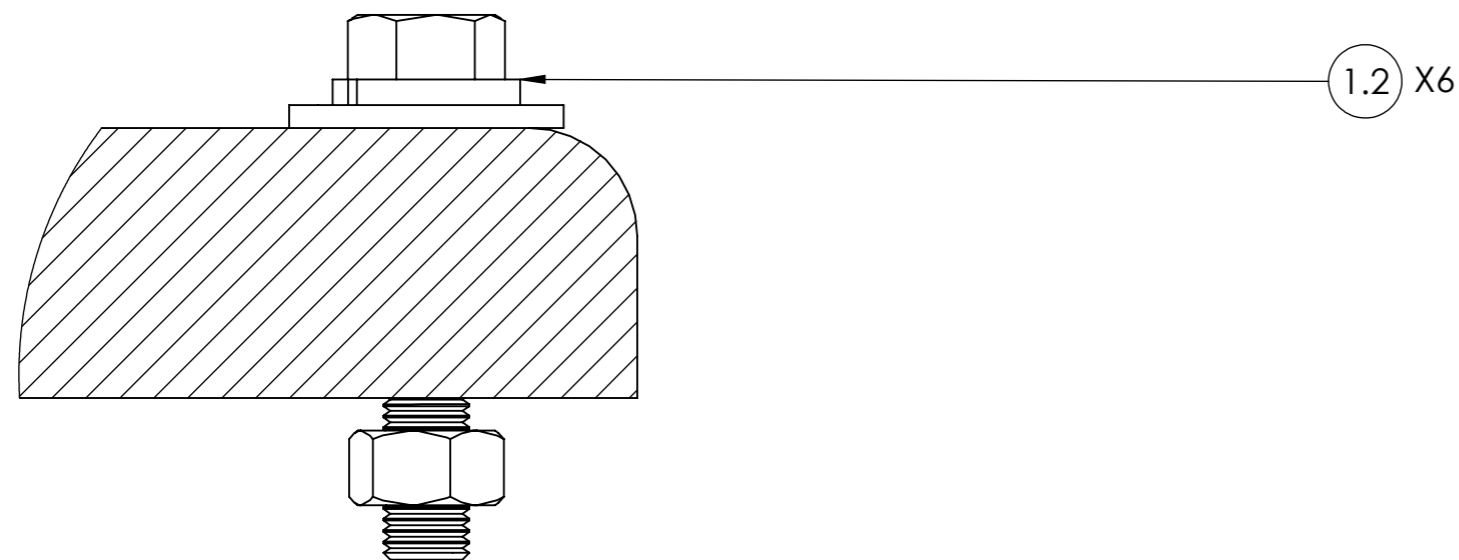
MEDIDAS EN:  
mm

MATERIAL: ESTANDAR



PL Nº 01-00-00

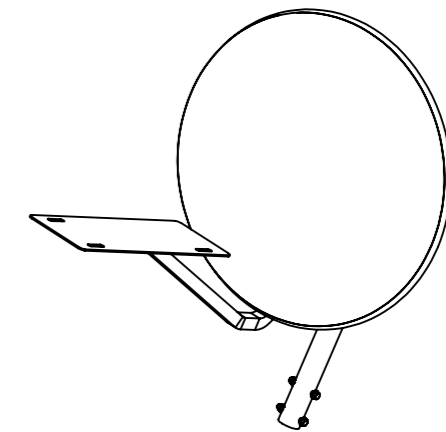
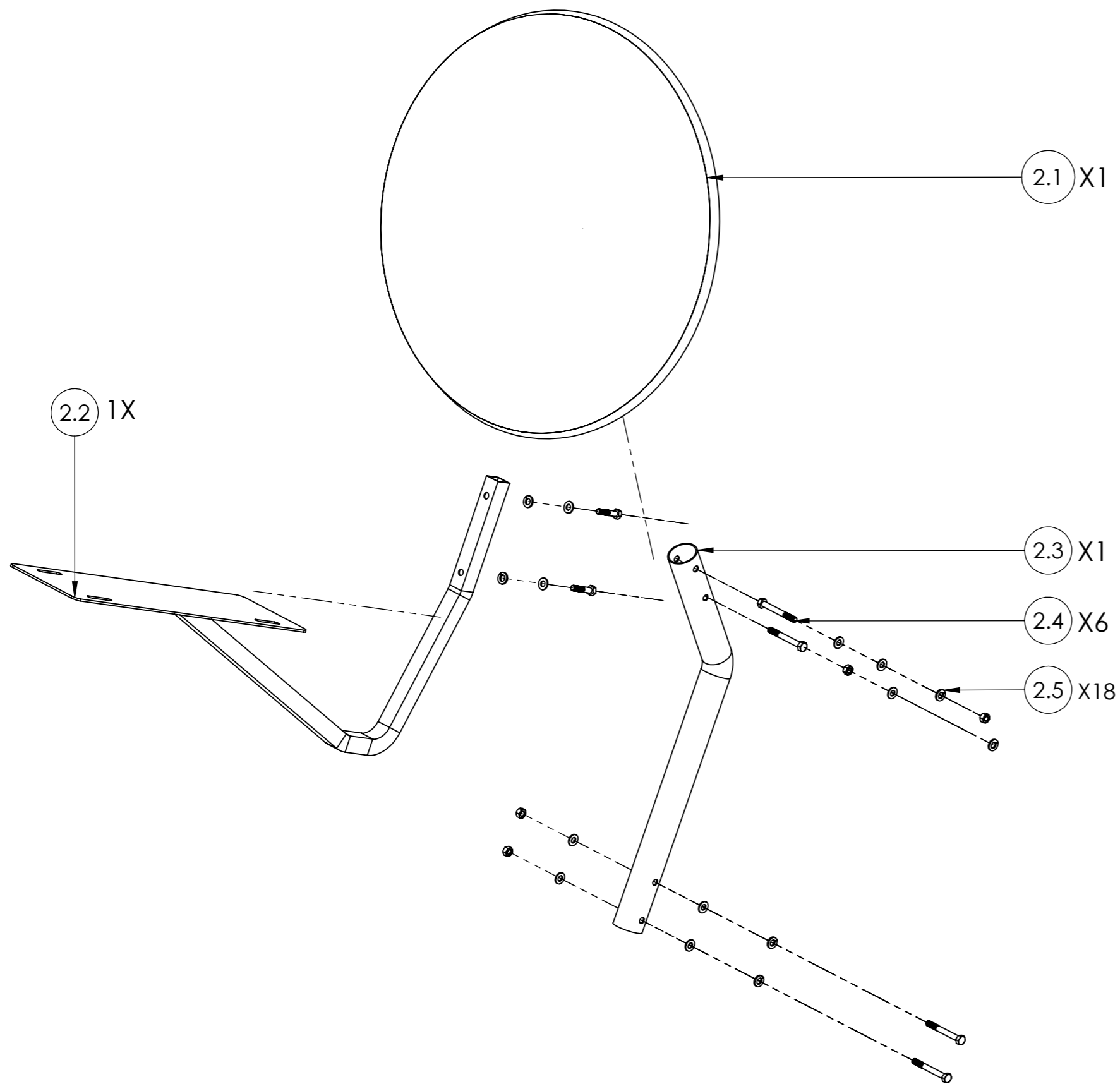


ESCALA 1:5



DETALLE C  
ESCALA 1:0.7

1.3	MOTOR STIRLING TIPO GAMMA	1	PIEZA ESTANDAR
1.2	ARANDELA DE PRESIÓN DIN 127	6	PIEZA ESTANDAR
1.1	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13x2"	3	PIEZA ESTANDAR
Nº	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACIÓN
 <b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>			
ESCALA: 1:2		MOTOR STIRLING VISTA DE CORTE	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	
FORMATO A3		REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09
MEDIDAS EN: mm		MATERIAL: ESTANDAR	PIEZA Nº 5 HOJA 5/15 PL Nº 01-00-00



**ESCALA 1:15**

2.5	ARANDELA DE PRESION DIN 127	18	PIEZA ESTANDAR
2.4	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13X 2"	1	PIEZA ESTANDAR
2.3	BARRA SOPORTE COLECTOR	1	PL N° 02-03-00
2.2	BRAZO BASE MOTOR	1	PL N° 02-02-00
2.1	COLECTOR PARABOLIDE	1	PL N° 02-01-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACION



Universidad  
Tecnológica de  
Santander

**ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA**

ESCALA: 1:7

PARABOLOIDE COLECTOR VISTA EXPLOSIONADA



DIBUJADO POR:  
IVAN MORA Y ZAMIR CABRA

PIEZA N° 6

FORMATO  
A3

REVISADO POR:  
YESID RUEDA

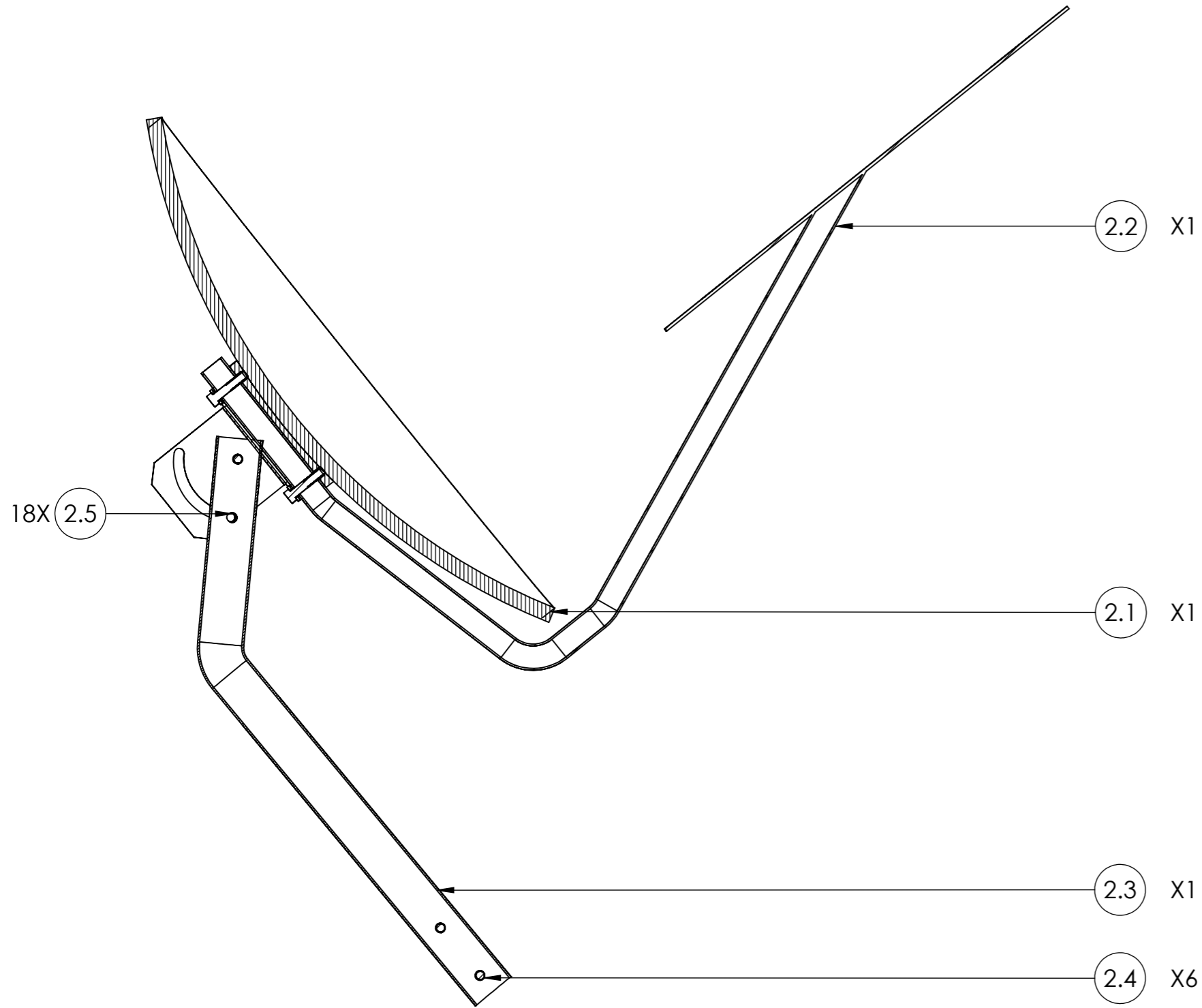
2021-11-09

HOJA 6/15

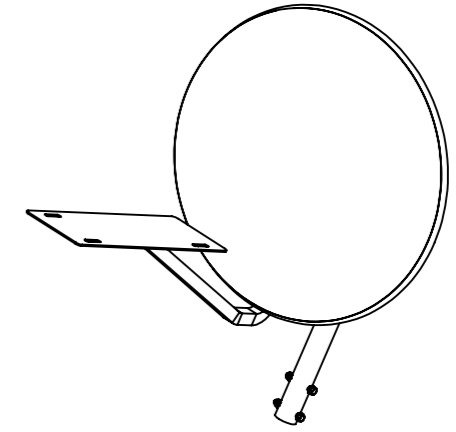
MEDIDAS EN:  
mm

MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 10

PL N° 02-00-00



SECCIÓN A-A  
ESCALA 1 : 5



ESCALA 1:15

2.5	ARANDELA DE PRESION DIN 127	18	PIEZA ESTANDAR
2.4	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13X2"	6	PIEZA ESTANDAR
2.3	BARRA SOPORTE COLECTOR	1	PLN° 02-03-00
2.2	BRAZO BASE MOTOR	1	PLN° 02-02-00
2.1	COLECTOR PARABOLOIDE	1	PLN° 02-01-00
N°	NOMBRE	CANT	MATERIAL



Universidad  
Tecnológica de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:5

PARABOLOIDE COLECTOR VISTA DE CORTE



DIBUJADO POR:  
IVAN MORA Y ZAMIR CABRA

PIEZA N° 7

FORMATO  
A3

REVISADO POR:  
YESID RUEDA

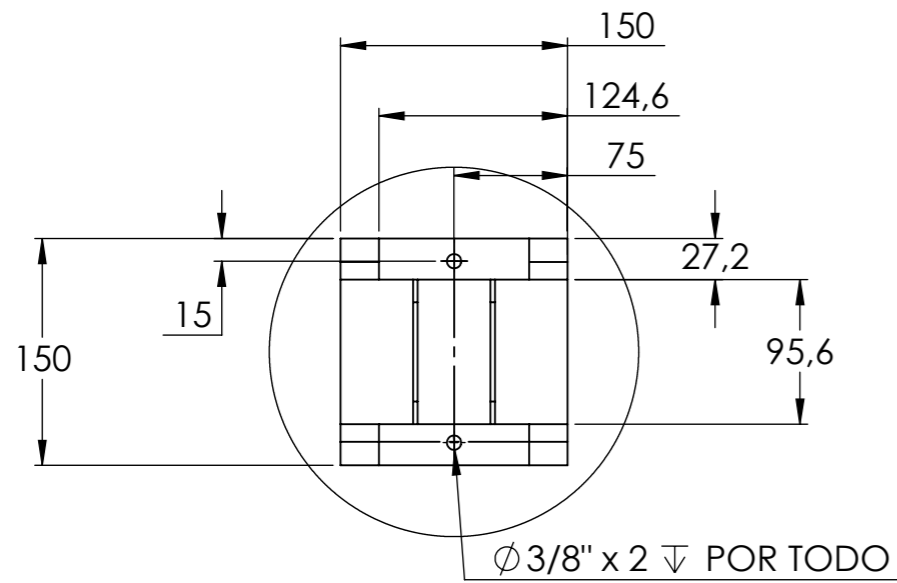
2021-11-09

HOJA 7/15

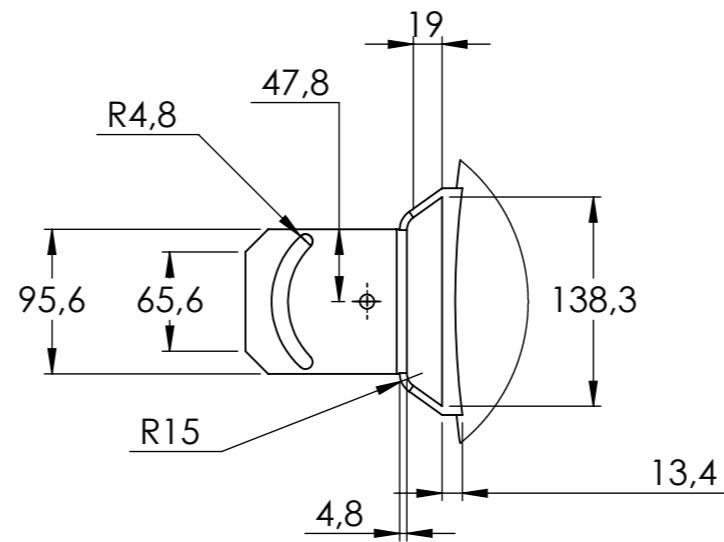
MEDIDAS EN:  
mm

MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 10

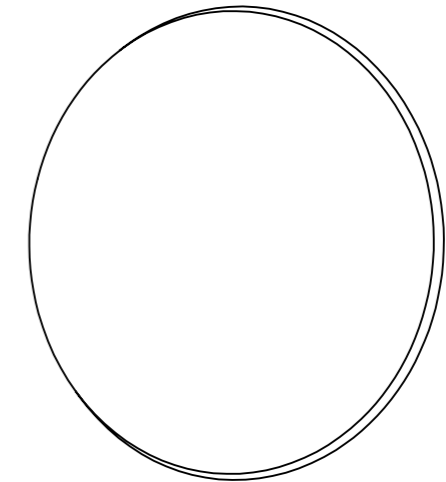
PL N° 02-00-00



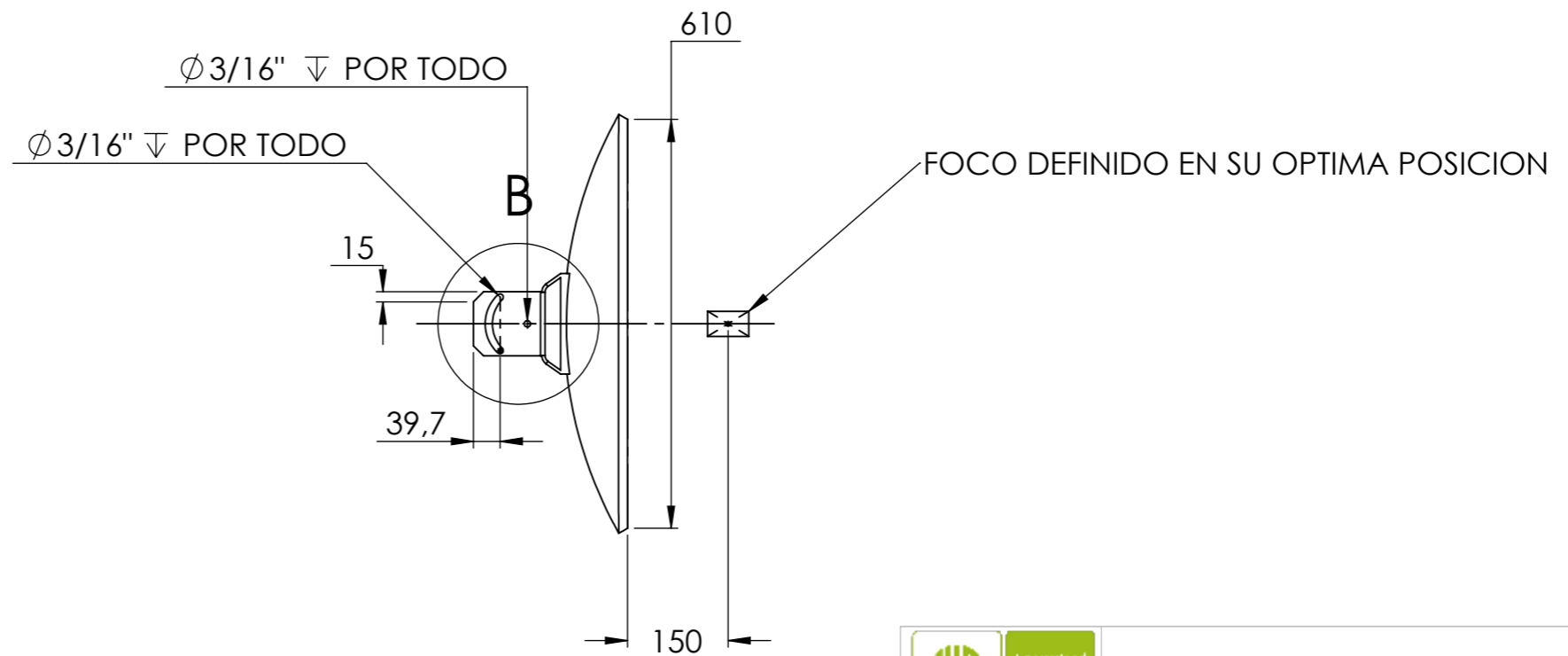
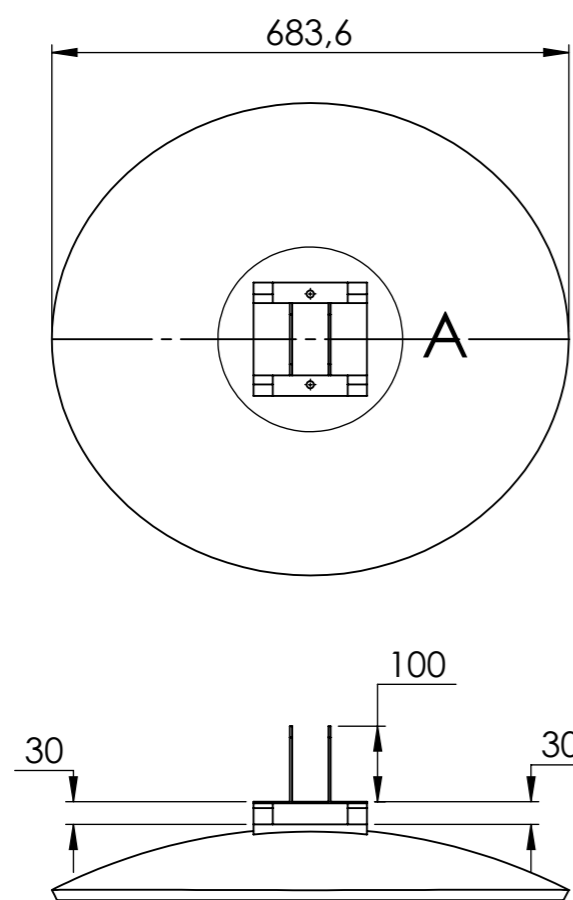
**DETALLE A**  
ESCALA 1 : 5





**DETALLE B**  
ESCALA 1 : 5

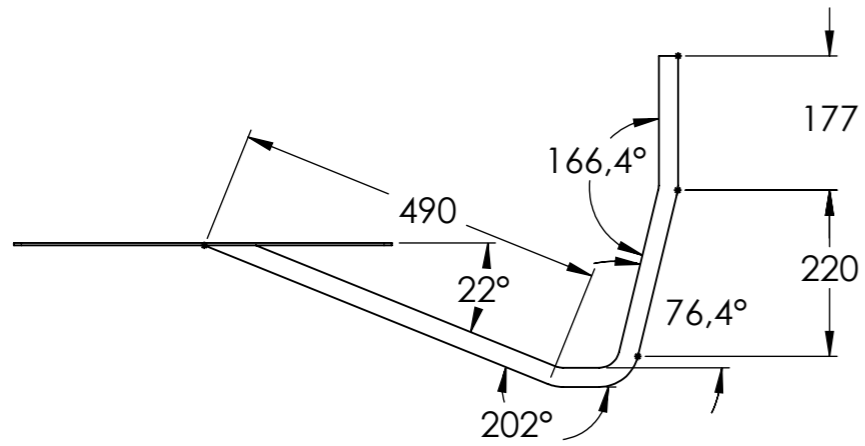


**ESCALA 1:20**

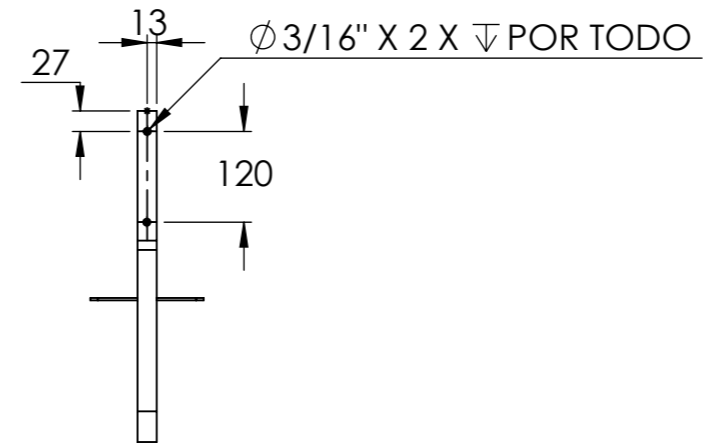


**NOTA:** COLECTOR EN LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 10

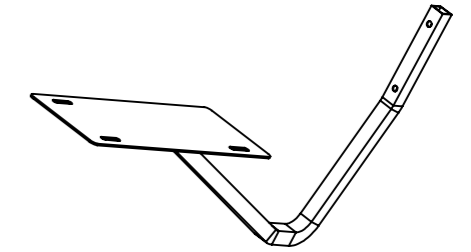
		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
ESCALA: 1:10		COLECTOR PARABOLOIDE	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	
FORMATO A3		REVISADO POR: 2021-11-09	
MEDIDAS EN: mm		MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 10	
		PIEZA N° 8	
		HOJA 8/15	
		PL N° 02-01-00	



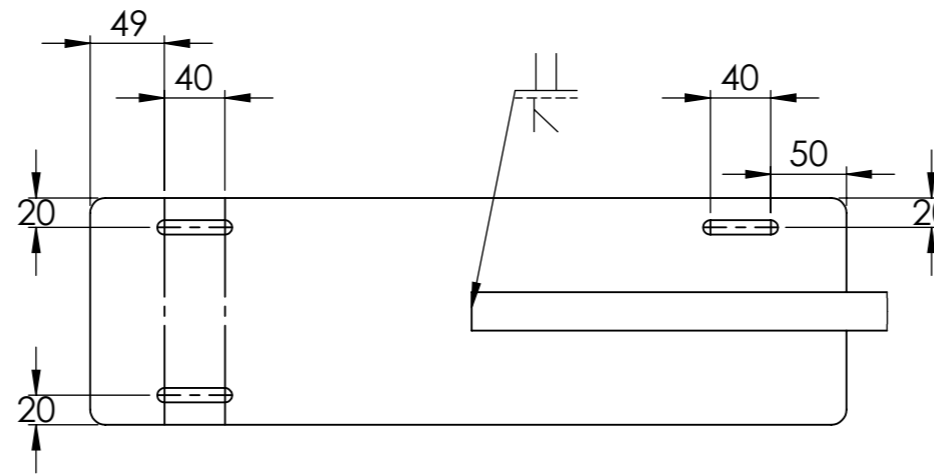
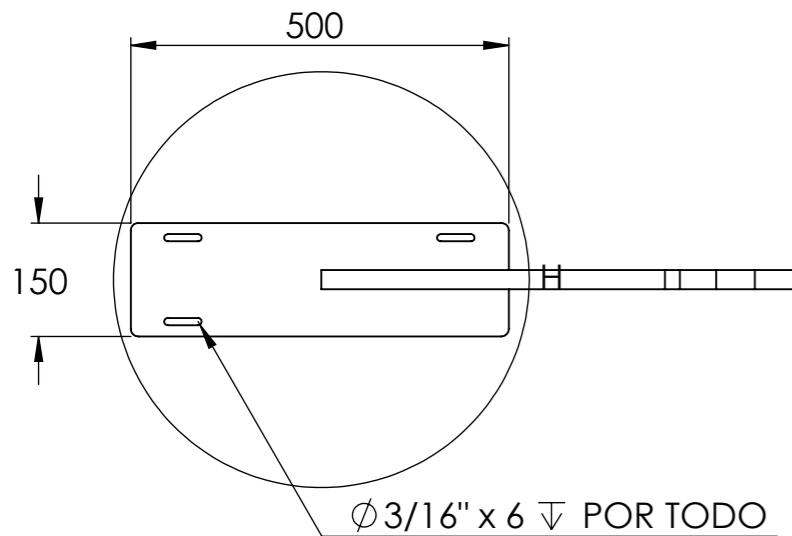
**NOTA:** -Tubo cuadrado de 1" Calibre 18  
 -Largo del tubo 1m



**NOTA:** Soldadura con arco electrico **E6013**



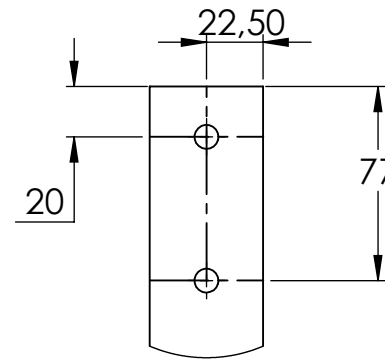
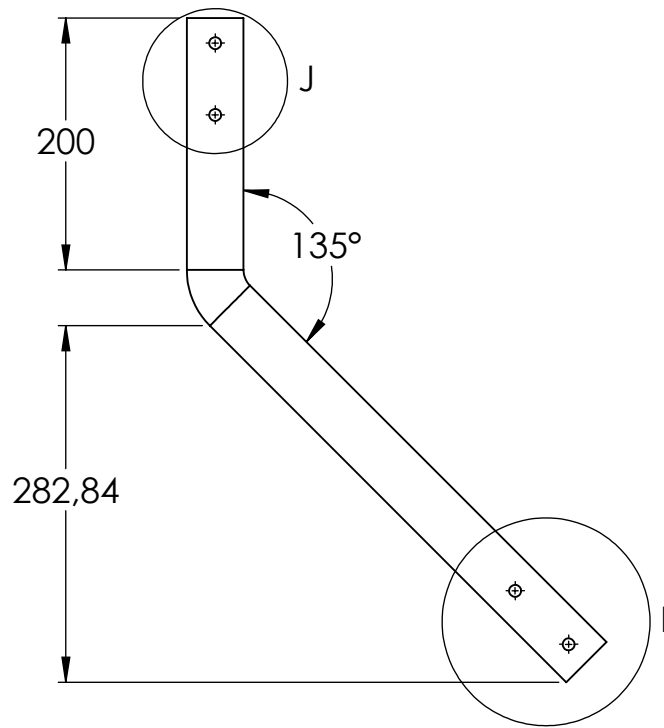
**ESCALA 1:12**



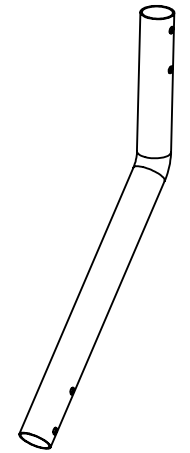
DETALLE H  
 ESCALA 1 : 5

**NOTA:** Lamina metalica Coled Rolled calibre 18

		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
ESCALA: 1:10		<b>BRAZO MOTOR</b>	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	
FORMATO A3		REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09 HOJA 9/15
MEDIDAS EN: mm		MATERIAL: Colled rolled calibre 18 PL N° 02-02-00	

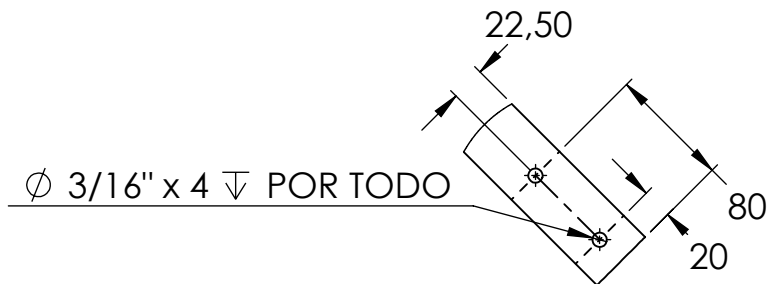


DETALLE J  
ESCALA 1 : 3



ESCALA: 1:20

**NOTA:** TUBO DE 1 1/2" EN HIERRO CALIBRE 18.



DETALLE I  
ESCALA 1 : 5



Universidad  
Industrial de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

BARRA SOPORTE COLECTOR

PIEZA N° 10

ESCALA: 1:6

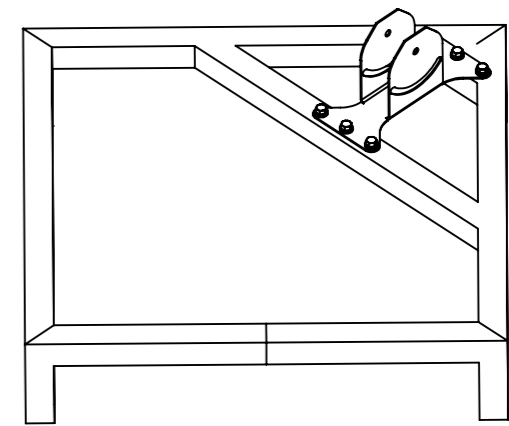
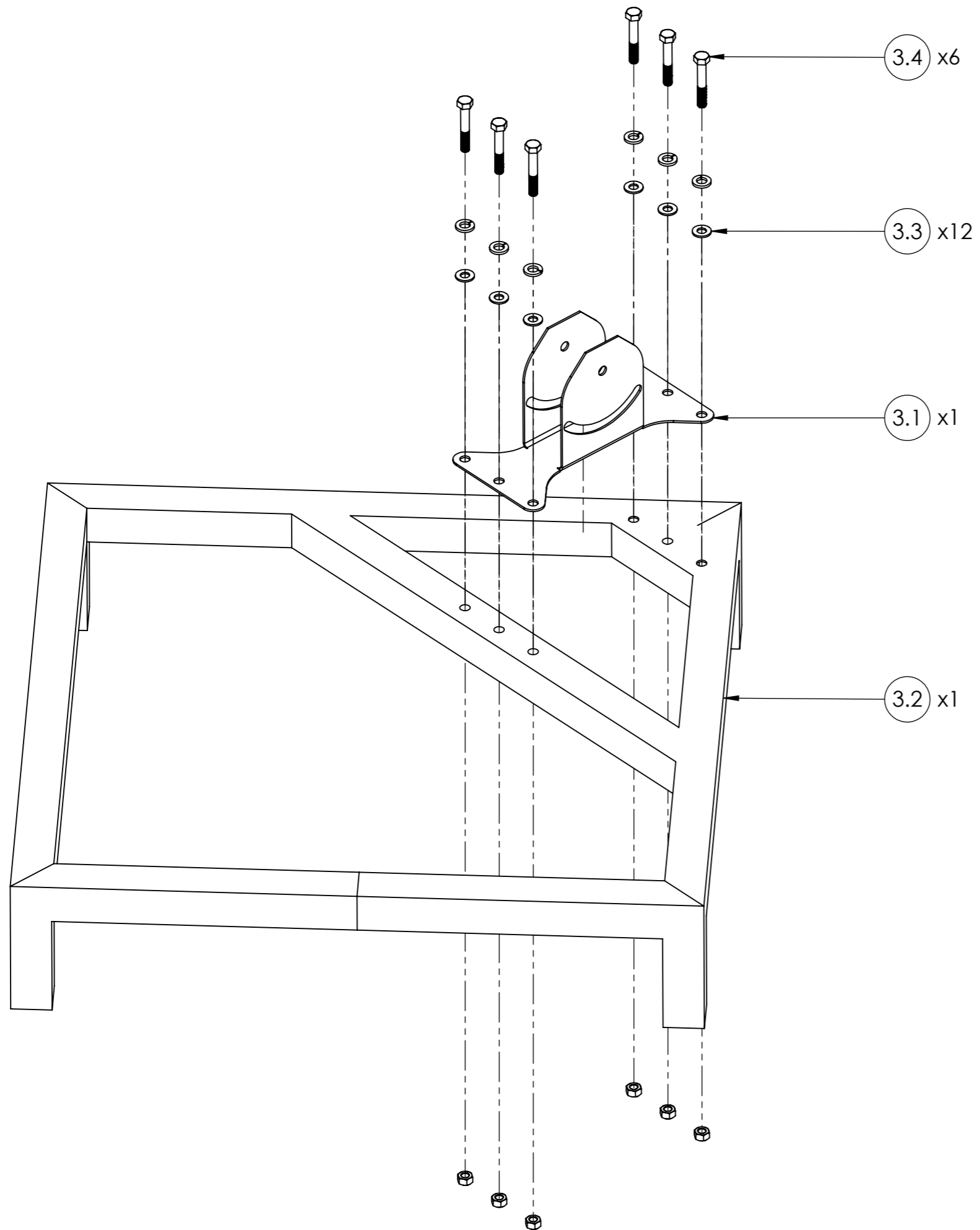
MEDIDAS EN:mm FECHA:11/09/21

DIBUJADO POR:  
IVAN M. Y ZAMIR C.





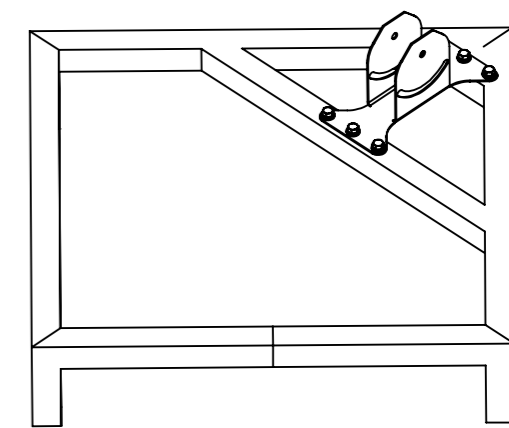
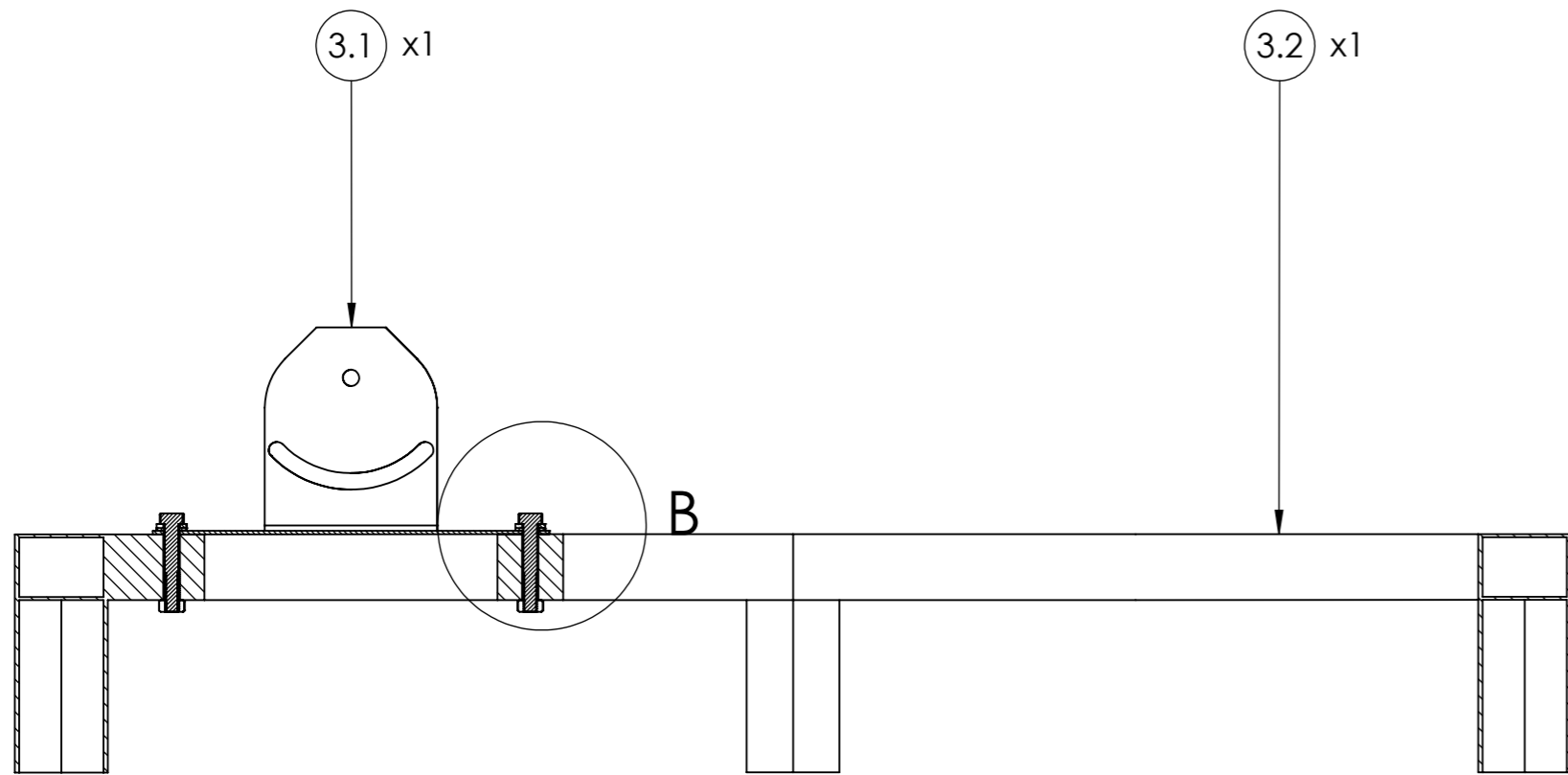
HOJA: 10/15

PL N° 02-03-00

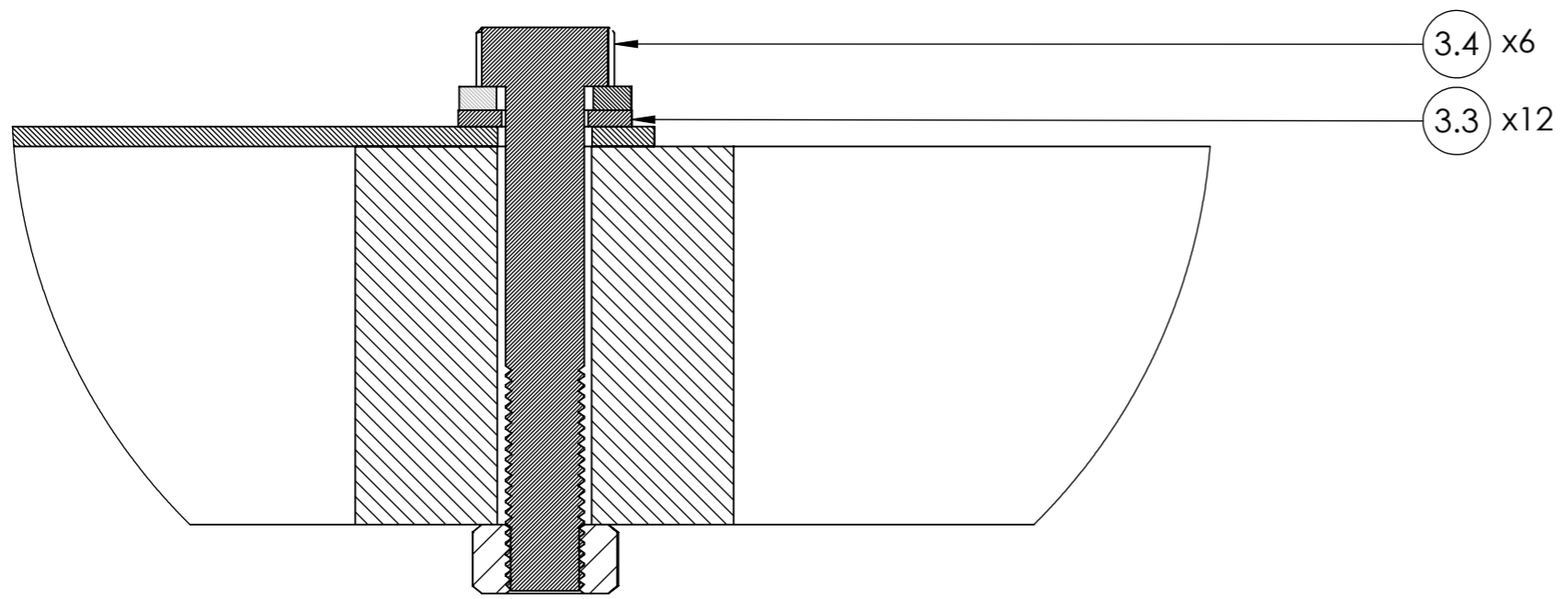


ESCALA: 1:10

3.4	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13x2"	6	PIEZA ESTANDAR
3.3	ARANDELA DE PRESIÓN DIN 127	12	PIEZA ESTANDAR
3.2	BASE DEL COLECTOR	1	PLN° 03-02-00
3.1	ARTICULACIÓN DE COLECTOR	1	PLN° 03-01-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACIÓN
 <b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>			
ESCALA: 1:4.3	BASE CON ARTICULACIÓN VISTA EXPLOSIONADA		
 DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA		PIEZA N° 11	
FORMATO A3	REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09	HOJA 11/15
MEDIDAS EN: mm	MATERIAL: TUBO CUADRADO 50x50x1,5 mm ESTRUCTURAL HR50		PL N° 03-00-00



ESCALA 1:10



DETALLE B  
ESCALA 1 : 0.7

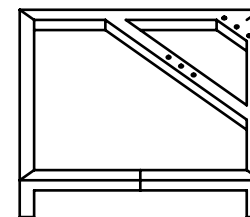
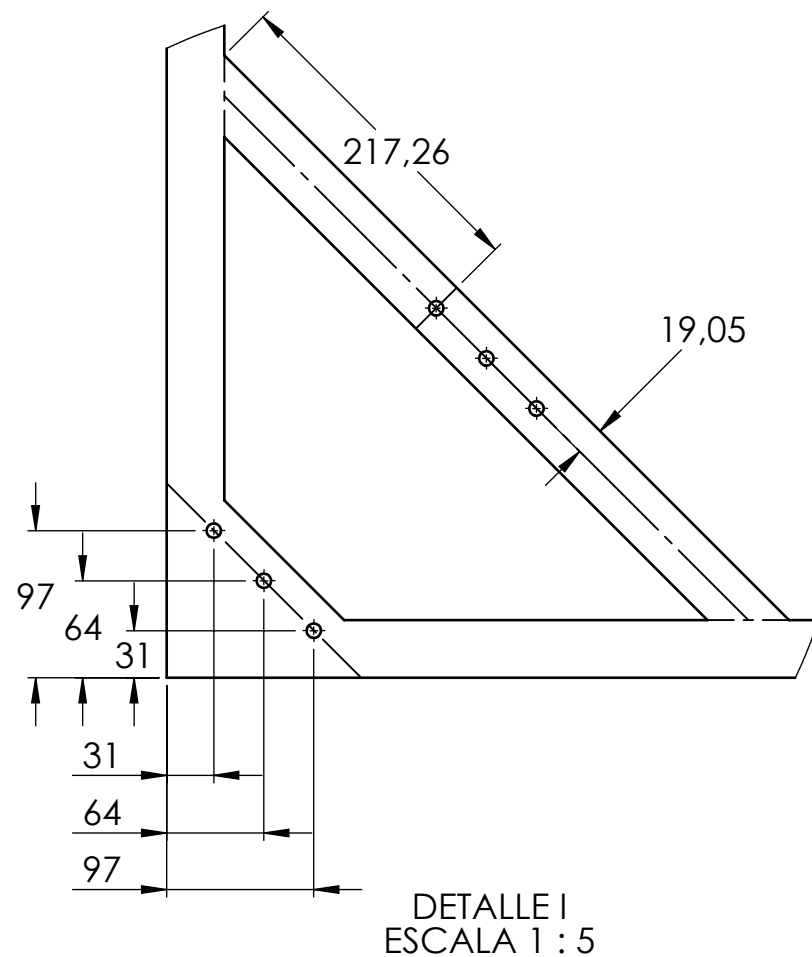
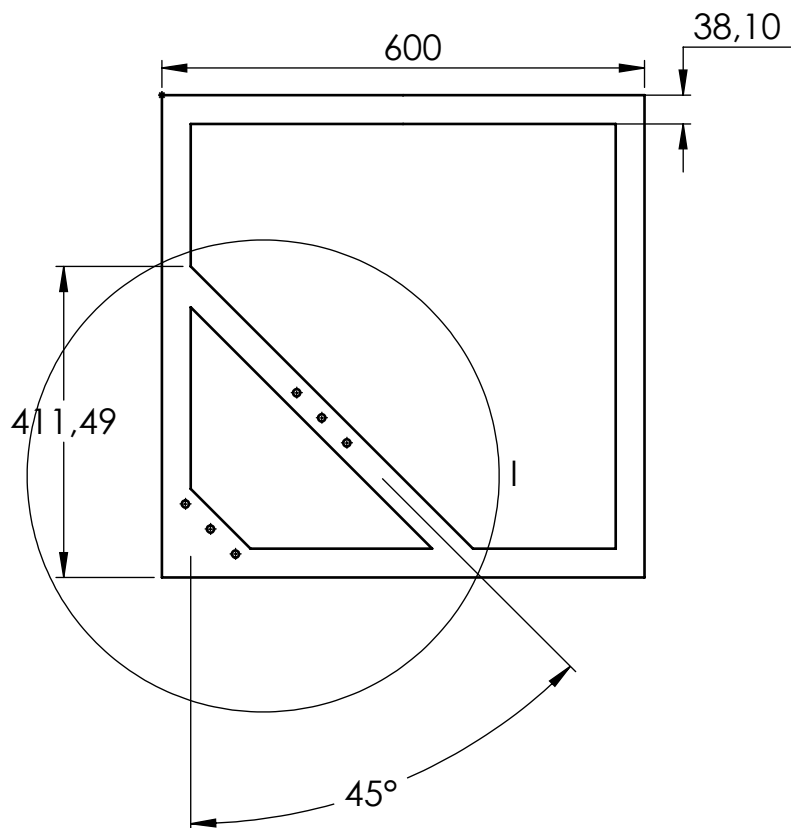
3.4	TORNILLO CON TUERCA HEXAGONAL DE 3/16", 13x2"	6	PIEZA ESTANDAR
3.3	ARANDELA DE PRESIÓN DIN 127	12	PIEZA ESTANDAR
3.2	BASE DE COLECTOR	1	PLN° 03-02-00
3.1	ARTICULACIÓN DE COLECTOR	1	PLN° 03-01-00
N°	NOMBRE	CANT	IDENTIFICACIÓN



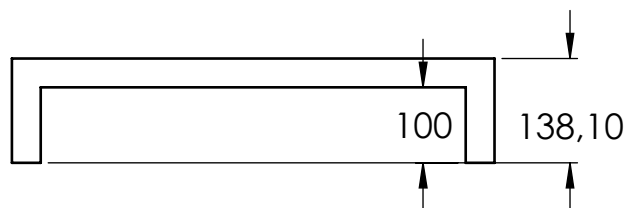
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:4.2 BASE CON ARTICULACIÓN VISTA DE CORTE

	DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA		PIEZA N° 12
	FORMATO A3	REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09
MEDIDAS EN: mm	MATERIAL: LAMINA DE ALUMINIO CALIBRE 10		PL N° 03-00-00



ESCALA 1:20



Universidad  
Industrial de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:10

MEDIDAS EN: mm

FECHA: 11/09/21

BASE DEL COLECTOR

DIBUJADO POR:  
IVAN MORA  
ZAMIR CABRA

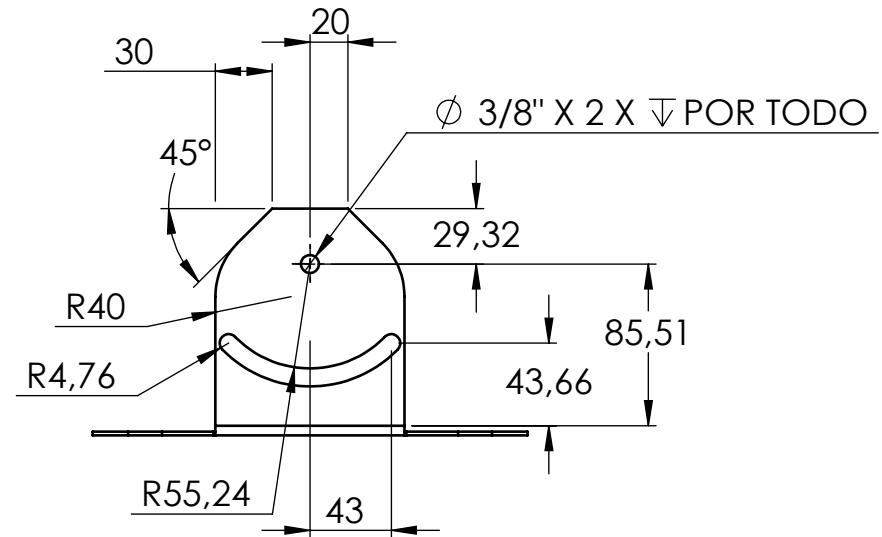
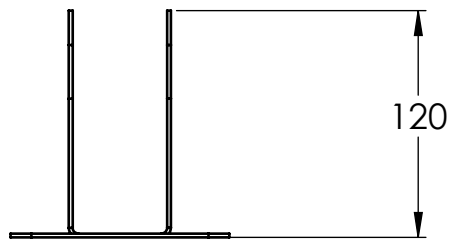
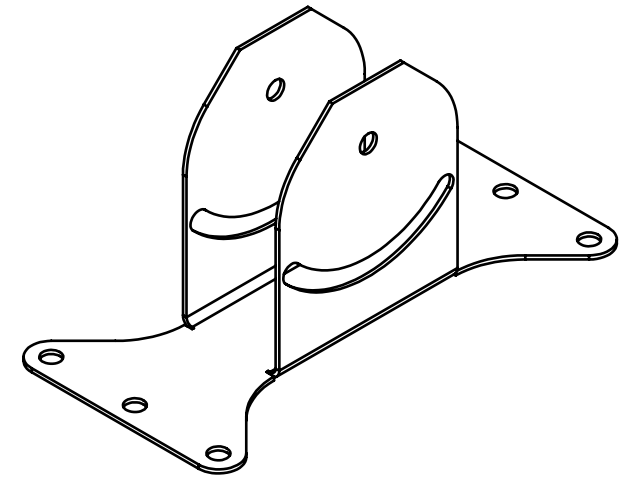
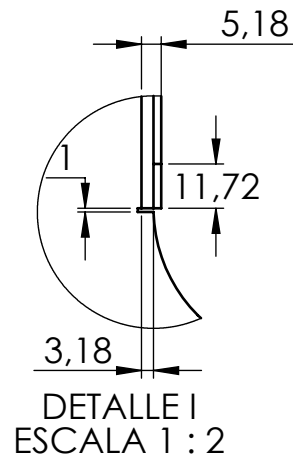
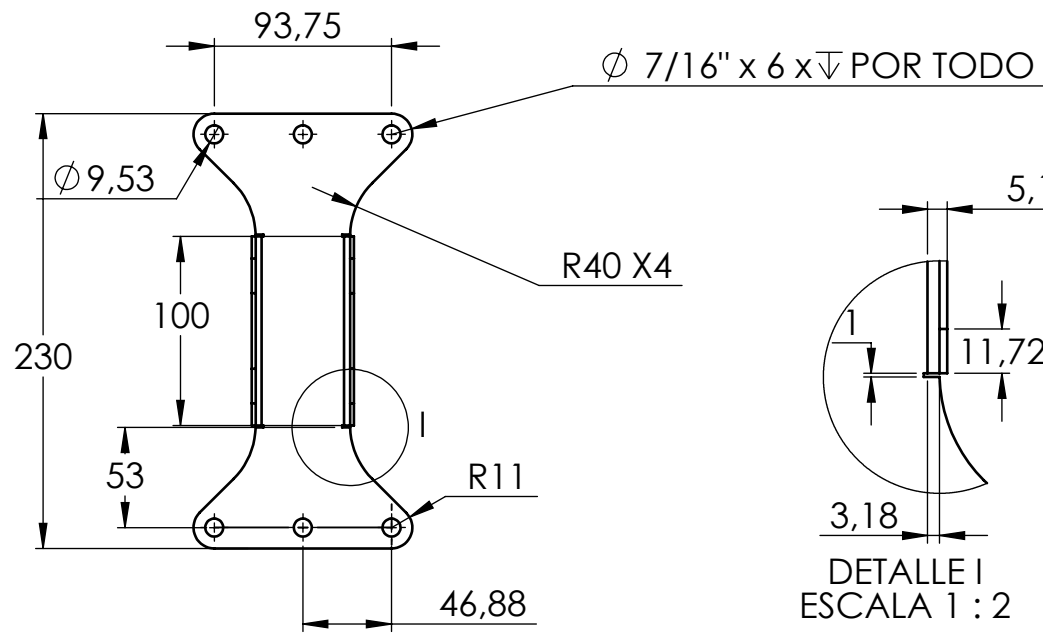


PIEZA N° 13

HOJA: 13/15

MATERIAL:  
ESTRUCTURAL HR50

PLN° 03-01-00



**NOTA:** Lamina Hn 1.20 X 2.40 X 3mm



Universidad  
Industrial de  
Santander

ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA

ESCALA: 1:10

MEDIDAS EN: mm

FECHA: 11/09/21

ARTICULACION DEL COLECTOR

DIBUJADO POR:  
IVAN MORA  
ZAMIR CABRA

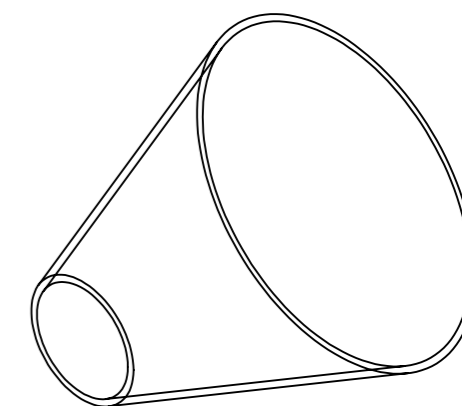
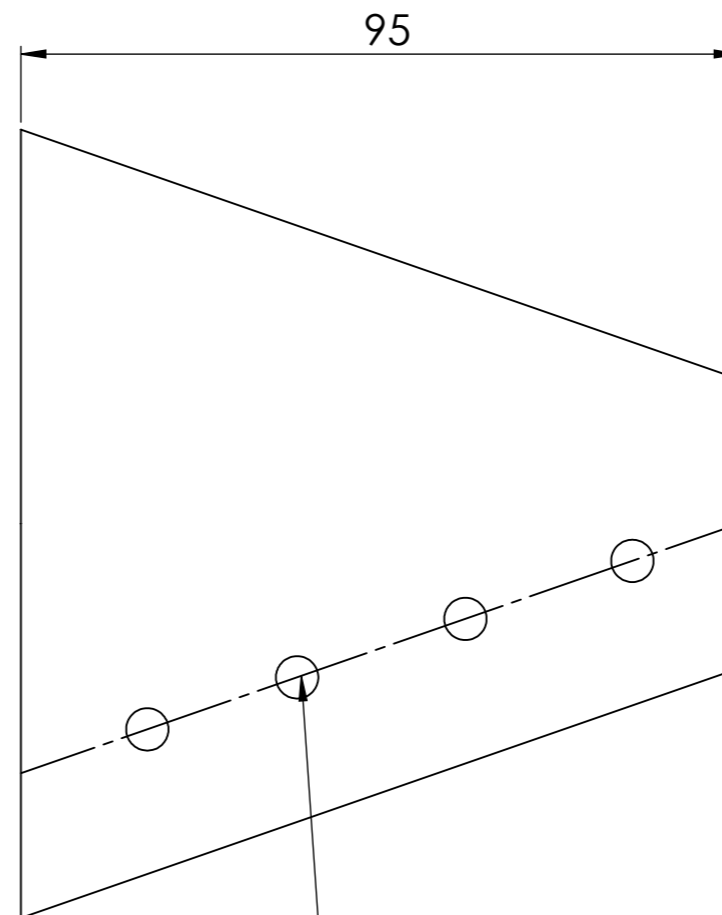
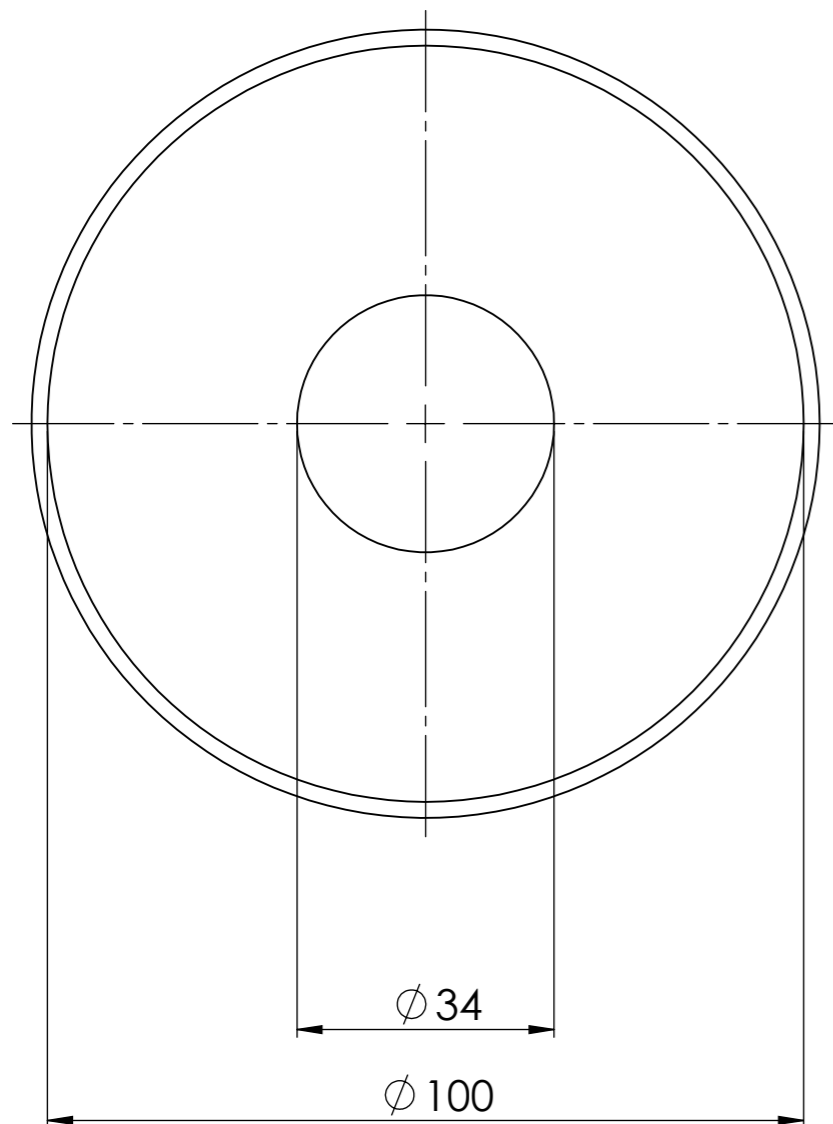


PIEZA N° 14

HOJA: 14/15

MATERIAL:  
Lamina de hierro



PLN° 03-02-00



**ESCALA 1:2**

**NOTA:** Remache de aluminio pop de 1/8\*1/4

**NOTA:** Lamina de aluminio calibre 13

		<b>ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA</b>	
ESCALA: 1:1		CONO RECEPTOR	
		DIBUJADO POR: IVAN MORA Y ZAMIR CABRA	PIEZA N° 15
FORMATO A3	REVISADO POR: YESID RUEDA	2021-11-09	HOJA 15/15
MEDIDAS EN: mm	MATERIAL: ALUMINIO		PL N° 02-04-00