



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**TESIS PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE  
CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DE MEDIA  
TEMPERATURA CON CCP PARA GENERACIÓN DE UNA  
POTENCIA INSTALADA DE 16000 KCAL/HR**

**AUTORES:**

**QUINTANA NOROÑA, CHRISTIAN EMILIO  
YÉPEZ GOMEZJURADO, DAVID ISRAEL**

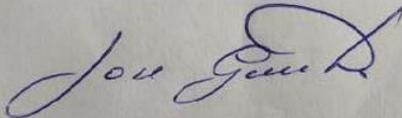
**DIRECTOR: MSc. JOSÉ GUASUMBA  
CODIRECTOR: MSc. XAVIER RODRÍGUEZ**

**SANGOLQUÍ**

**2015**

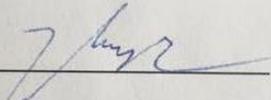
## CERTIFICADO

Certificamos que el presente proyecto titulado “DISEÑO, Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DE MEDIA TEMPERATURA CON CCP PARA GENERACIÓN DE UNA POTENCIA INSTALADA DE 16000 KCAL/HR”, fue desarrollado en su totalidad por Christian Emilio Quintana Noroña y David Israel Yépez Gomezjurado, bajo nuestra dirección.



---

Ing. José Guasumba  
DIRECTOR



---

Ing. Xavier Rodríguez  
CODIRECTOR

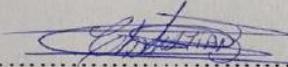
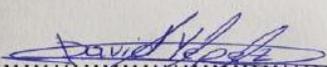
Sangolquí, 2015

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

El presente proyecto titulado “DISEÑO, Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DE MEDIA TEMPERATURA CON CCP PARA GENERACIÓN DE UNA POTENCIA INSTALADA DE 16000 KCAL/HR”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado el derecho intelectual de terceros considerándose en citas a pie de página y como fuentes en el registro bibliográfico.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance del proyecto en mención.

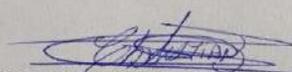
Sangolquí, 2015

	
.....	.....
Christian Emilio Quintana Noroña	David Israel Yépez Gomezjurado
CI: 171797972-6	CI: 100356819-1

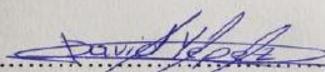
## AUTORIZACIÓN

Nosotros, Christian Emilio Quintana Noroña y David Israel Yépez Gomezjurado, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE a publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo “DISEÑO, Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR DE MEDIA TEMPERATURA CON CCP PARA GENERACIÓN DE UNA POTENCIA INSTALADA DE 16000 KCAL/HR”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 2015



Christian Emilio Quintana Noroña  
CI: 171797972-6



David Israel Yépez Gomezjurado  
CI: 100356819-1

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a las personas más importantes en mi vida, a mis Padres, Inés y Hernán por ser los pilares fundamentales, porque han sabido inculcarme buenos valores; por su apoyo incondicional, quienes con sus consejos, cariño y comprensión me han guiado por el sendero del bien y han sido la base esencial para cumplir con este objetivo tan importante en mi formación profesional. A mi querido hermano José Luis y cuñada Gabriela quienes también fueron un impulso para mi superación personal.

Éste esfuerzo también lo dedico a mi hermano Darwin, a pesar de no estar en cuerpo presente, siempre estás en mi mente y corazón. Fuiste un gran ejemplo de superación, siento que nos faltaron muchas cosas por vivir y estoy seguro que este momento hubiera sido tan especial para ti como para mí.

A mis estimados sobrinos José Gabriel y Andrea, que han sido mi inspiración y felicidad. Espero que esta meta alcanzada sea de motivación para que sigan adelante con sus estudios y se formen como buenos profesionales.

Christian E. Quintana N.

## DEDICATORIA

La presente tesis recoge mis constantes esfuerzos pensamientos, aspiraciones y sentimientos, dedico este proyecto primeramente a Dios, por haberme permitido llegar a esta etapa muy importante en mi vida y ayudado a superar los momentos difíciles y darme fortaleza para poder cumplir con esta meta.

A mi madre que ha sabido formarme con buenos sentimientos, hábitos y valores, por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

A mi padre a pesar de nuestra distancia física, siento que estas siempre conmigo y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, yo sé que este logro en esta etapa de mi vida te llena de mucha felicidad.

A mis hermanos y hermanas que siempre me han apoyado y me han incentivado para seguir adelante con este objetivo.

A todas y cada una de las personas que han estado en mi formación académica de todos estos años.

David Israel Yépez Gomezjurado

## AGRADECIMIENTO

A mi madre, por ser una persona ejemplar, por el esfuerzo incondicional durante estos años, buscando siempre lo mejor para mí.

A mi padre, por su esfuerzo y apoyo durante mi formación profesional, por ser una motivación para formar en mí el hábito de superación.

A mi hermano José Luis, que con sus consejos me ha ayudado a afrontar los retos que se me han presentado en la vida.

A mi cuñada Gabriela, por estar siempre presente, acompañándome para poder realizarme.

A mis sobrinos José Gabriel y Andrea, por ser la motivación y alegría de mi vida.

A nuestro director de tesis el Ingeniero José Guasumba por guiarnos en nuestro proyecto de grado.

Al Ingeniero Xavier Rodríguez, codirector de tesis por su valiosa guía en la realización de la misma.

A una persona muy especial en mi vida, quien me brinda su apoyo, cariño, comprensión y amor todos los días. Por apoyarme cuando más la necesito.

A mis amigos y a quienes de una u otra manera aportaron en el desarrollo de este proyecto.

Christian E. Quintana N.

## AGRADECIMIENTO

A Dios por acompañarme todos los días y protegerme durante todo mi camino y darme fuerzas para superar los obstáculos y dificultades a lo largo de toda mi vida.

A mi madre Cecilia por ser el apoyo en toda mi carrera por su confianza y amor, gracias por ayudarme a cumplir mis objetivos como persona.

A mis hermanos Patricio y Edison, a mis hermanas Mónica y Liliana por el apoyo incondicional y por sus consejos que me han ayudado afrontar los retos que se me han presentado a lo largo de mi vida.

Al Ing. José Guasumba, director de tesis, por todo el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

Al Ing. Xavier Rodríguez, codirector de tesis, por su acertada guía y asesoramiento para la culminación de este proyecto.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, especialmente a los profesores del Departamento de la Carrera de Ingeniería Mecánica por todos los conocimientos aportados para poder desarrollar este presente trabajo.

A esa persona muy importante en mi vida por acompañarme durante todo este arduo camino y compartir conmigo alegrías y fracasos.

A mis amigos quienes me acompañaron en esta trayectoria de aprendizaje y conocimientos.

David Israel Yépez Gomezjurado

## ÍNDICE GENERAL

CERTIFICADO .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTO .....	vii
ÍNDICE GENERAL .....	ix
TABLAS .....	xvi
FIGURAS.....	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiii
NOMENCLATURA .....	xxiv
RESUMEN.....	xxxiii
ABSTRACT .....	xxxiv
CAPITULO I.....	1
DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO .....	1
1.1 <b>Antecedentes</b> .....	1
1.2 <b>Definición del Problema</b> .....	2
1.3 <b>Objetivos</b> .....	2
1.3.1      General .....	2
1.3.2      Específicos.....	2
1.4 <b>Alcance</b> .....	3
1.5 <b>Justificación e Importancia</b> .....	3
CAPITULO II.....	5
FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	5
TÉCNICAS DE CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR .....	5
2.1 <b>Introducción</b> .....	5
2.2 <b>Clasificación de los Colectores Solares</b> .....	7
2.2.1      En función del aprovechamiento solar .....	7

2.2.2	En Función de la Temperatura Del Fluido.....	8
2.2.3	En Función de la Razón De Concentración .....	9
2.2.4	Colectores no Concentradores .....	11
2.2.4.1	Captador Plano para Agua.....	11
2.2.4.2	Captador Plano de Aire.....	12
2.2.4.3	Tubos de Vacío.....	12
2.2.5	Colectores Concentradores .....	12
2.2.5.1	Canal Parabólico.....	13
2.2.5.1.1	Componentes.....	14
2.2.5.1.1.1	El concentrador de canal Parabólico.....	14
2.2.5.1.1.2	El tubo absorbedor .....	14
2.2.6	Sistema de Disco Parabólico .....	15
2.2.6.1	Componentes.....	16
2.2.6.1.1	Concentrador .....	16
2.2.6.1.2	Receptor .....	16
2.2.6.1.3	Sistema Generador.....	17
2.2.7	Sistema de Receptor Central (Rc) .....	18
2.2.7.1	Componentes.....	18
2.2.7.1.1	El heliostato .....	18
2.2.7.1.2	La torre.....	19
2.2.7.2.3	El receptor.....	20
2.2.8	Concentradores Lineales de Fresnel .....	21
<b>2.3</b>	<b>Control manual y sistema de seguimiento de los CCP .....</b>	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Análisis Geométrico .....</b>	<b>23</b>
2.4.1	Ecuación de la parábola.....	24
2.4.2	Geometría del colector cilíndrico parabólico .....	27
<b>2.5</b>	<b>Balance Energético de los CCP .....</b>	<b>31</b>
2.5.1	Pérdidas por sombras debido a la geometría de los CCP .....	31
2.5.2	Perdidas por imperfecciones de elementos del sistema CCP..	32
2.5.2.1	Reflectancia .....	33
2.5.2.2	Factor de intercepción.....	33
2.5.2.3	Transmitancia de la cubierta de vidrio.....	33

2.5.2.4	Absortancia .....	34
2.5.3	Pérdidas térmicas .....	34
2.5.4	Rendimiento de un canal parabólico .....	35
2.5.4.1	Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de $0^\circ$ .....	35
2.5.4.2	Rendimiento térmico .....	35
2.5.4.3	Rendimiento global .....	35
<b>CAPITULO III.....</b>		<b>37</b>
<b>ESTUDIO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN SANGOLQUÍ.....</b>		<b>37</b>
<b>3.1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>37</b>
3.1.1	Relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra.....	38
3.1.1.1	Latitud ( $\varnothing$ ).....	38
3.1.1.2	Declinación ( $\delta$ ).....	38
3.1.1.3	Ángulo Horario ( $\omega$ ).....	38
3.1.1.4	Ángulo de Incidencia ( $\theta$ ) .....	38
3.1.1.5	Ángulo Zanith ( $\theta_z$ ) .....	38
3.1.1.6	Ángulo altitud solar ( $\alpha_s$ ).....	39
3.1.1.7	Ángulo Azimuth en una superficie ( $\gamma$ ) .....	39
<b>3.2</b>	<b>Radiación Solar .....</b>	<b>40</b>
3.2.1	Radiación Solar en la Ciudad de Sangolquí.....	41
3.2.2	Radiación Solar Extraterrestre .....	43
<b>3.3</b>	<b>Técnicas de Estimación de la Radiación Solar .....</b>	<b>44</b>
3.3.1	Método de Armstrong Page .....	44
<b>CAPITULO IV .....</b>		<b>52</b>
<b>DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓN .....</b>		<b>52</b>
<b>4.1</b>	<b>Diseño Térmico .....</b>	<b>52</b>
4.1.1	Geometría del Concentrador.....	52
4.1.1.1	Análisis Térmico del Reflector.....	53
4.1.2	Geometría del Absorvedor .....	55
4.1.3	Resistencias del coeficiente global de transferencia de calor ...	57
4.1.3.1	Análisis de las Resistencias y Pérdidas Térmicas .....	60

4.1.3.1.1	Pérdidas térmicas .....	60
4.1.3.1.2	Cálculo de resistencias .....	63
4.1.3.1.2.1	Resistencia de convección externa, vidrio – medio ambiente..	63
4.1.3.1.2.2	Resistencia de radiación externa, vidrio - medio ambiente .....	65
4.1.3.1.2.3	Resistencia de radiación externa Vidrio – Parábola.....	66
4.1.3.1.2.4	Resistencia de radiación Cobre – Vidrio .....	67
4.1.3.1.2.5	Resistencia de convección Cobre – Vidrio.....	69
4.1.3.1.2.6	Resistencia de conducción de Cobre.....	71
4.1.3.1.2.7	Resistencia de conducción Vidrio .....	71
4.1.3.1.2.8	Resistencia de convección aceite .....	71
4.1.4	Balance de Energía.....	73
4.1.4.1	Balance energético de la cubierta .....	73
4.1.4.2	Balance energético del absorvedor.....	74
4.1.4.3	Análisis de convección forzada en tubos .....	75
4.1.4.3.1	Coeficiente de convección interno .....	75
4.1.4.3.2	Temperatura del Aceite Térmico .....	77
4.1.4.3.3	Coeficiente global de transferencia de calor interno $U_i$ .....	81
4.1.4.3.4	Pérdidas de Calor en el Sistema de Concentración.....	83
4.1.4.3.5	Coeficiente de Convección del Viento $h_e$ .....	86
4.1.4.3.6	Coeficiente de convección $h_o$ .....	86
4.1.5	Análisis de transferencia de calor en el absorvedor.....	89
4.1.5.1	Coeficiente global de transferencia de calor externo $U_o$ .....	91
<b>4.2</b>	<b>Análisis del Fluido Térmico .....</b>	<b>93</b>
4.2.1	Selección del Aceite Térmico .....	93
4.2.1.1	Criterios para la selección del aceite térmico.....	93
4.2.1.1.1	Estabilidad térmica.....	93
4.2.1.1.2	Conductividad térmica.....	94
4.2.1.1.3	Temperatura de operación.....	94
4.2.1.1.4	Resistencia a la oxidación.....	94
4.2.1.1.5	Riesgo de incendio.....	94
4.2.1.1.6	Viscosidad.....	94
4.2.1.1.7	Costo.....	94

4.2.1.1.8	Economía.....	94
4.2.1.1.9	Amigable con el medio ambiente .....	95
4.2.2	Evaluación del aceite para cada criterio.....	95
4.2.2.1	Evaluación del criterio estabilidad térmica .....	96
4.2.2.2	Evaluación del criterio conductividad térmica .....	96
4.2.2.3	Evaluación del criterio temperatura de operación .....	96
4.2.2.4	Evaluación del criterio resistencia a la oxidación .....	97
4.2.2.5	Evaluación del criterio riesgo de incendio .....	97
4.2.2.6	Evaluación del criterio viscosidad .....	97
4.2.2.7	Evaluación del criterio costo .....	98
4.2.2.8	Evaluación del criterio economía .....	98
4.2.2.9	Evaluación del criterio amigable con el medio ambiente.....	98
4.2.3	Cálculo de la tabla de conclusiones.....	99
<b>4.3</b>	<b>Diseño Mecánico y Estructural .....</b>	<b>99</b>
4.3.1	Determinación de cargas .....	101
4.3.1.1	Carga generada por el viento.....	101
4.3.1.2	Cargas generadas en posiciones críticas del concentrador...	105
4.3.1.3	Parámetros de Masas, centro de gravedad y torques.....	107
4.3.2	Eje de Transmisión .....	109
4.3.3	Diseño Estático del Eje de Transmisión.....	118
4.3.4	Selección de Cojinetes.....	123
4.3.5	Diseño y Selección de Pernos .....	126
4.3.5.1	Tensión simple.....	126
4.3.5.2	Corte Puro.....	129
4.3.6	Diseño de Juntas Soldadas .....	130
4.3.6.1	Tracción .....	130
4.3.6.2	Corte .....	131
4.3.7	Estructura Soporte .....	133
4.3.8	Diseño del Reservorio de Aceite.....	135
4.3.8.1	Tapa de Venteo.....	135
4.3.8.2	Tapa de Drenaje .....	138
4.3.8.3	Medidor de Nivel de Aceite .....	139

4.3.8.4	Bafle.....	139
4.3.8.5	Materiales del Recipiente.....	139
4.3.8.6	Presión de diseño del sistema .....	141
4.3.8.7	Espesor de las paredes del recipiente .....	141
4.3.8.8	Alojamientos y accesorios del recipiente .....	147
4.3.8.9	Calculo del volumen del reservorio .....	149
4.3.9	Selección de tuberías.....	151
4.3.9.1	Línea de Aspiración .....	159
4.3.9.2	Línea de Trabajo .....	165
4.3.9.3	Línea de Retorno .....	167
4.3.10	Selección de Bomba de Aceite .....	170
<b>4.4</b>	<b>Construcción y Montaje .....</b>	<b>172</b>
4.4.1	Construcción de la estructura soporte del CCP. ....	172
4.4.2	Construcción de la estructura del CCP .....	175
4.4.3	Construcción del Recipiente de Aceite.....	180
4.4.4	Hoja de Procesos Tecnológicos.....	181
4.4.5	Planos .....	181
4.4.5.1	Plano de conjunto .....	181
4.4.5.2	Plano de la estructura .....	181
4.4.5.3	Plano del Eje de Transmisión .....	181
4.4.5.4	Plano de la Parábola.....	181
4.4.5.5	Plano de Ensamblaje de los CCP .....	181
4.4.5.6	Plano de Ensamblaje del tanque de aceite .....	181
4.4.5.7	Plano de la Placa barolada de aluminio .....	181
<b>CAPITULO V</b>	<b>.....</b>	<b>182</b>
<b>IMPLEMENTACIÓN Y ENSAYOS DEL CCP</b>	<b>.....</b>	<b>182</b>
<b>5.1</b>	<b>Implementación de la solar térmica .....</b>	<b>182</b>
5.1.1.1	Implementación de la cimentación de los CCP.....	182
5.1.2	Implementación de los concentradores cilíndrico parabólicos.	186
<b>5.2</b>	<b>Pruebas de Operación .....</b>	<b>202</b>
<b>5.3</b>	<b>Levantamiento de Información .....</b>	<b>202</b>

<b>5.4</b>	<b>Análisis de Resultados.....</b>	<b>204</b>
	<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>213</b>
	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO.....</b>	<b>213</b>
<b>6.1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>213</b>
6.1.1	Parámetros y herramientas.....	213
6.1.1.1	Valor de reventa.....	213
6.1.1.2	Fabricación.....	215
6.1.1.3	Instalación.....	217
<b>6.2</b>	<b>Costos de operación y mantenimiento.....</b>	<b>218</b>
6.2.1	Costos Directos.....	220
6.2.2	Costos Indirectos.....	220
	<b>CAPITULO VII.....</b>	<b>221</b>
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>221</b>
<b>7.1</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>221</b>
<b>7.2</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>222</b>
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....</b>	<b>224</b>

## TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Radiación media diaria mensual de la ciudad de Quito. ....	42
<b>Tabla 2</b>	Radiación extraterrestre media diaria mensual, ( $H_o$ ) ( $MJ/m^2$ )....	43
<b>Tabla 3</b>	Valores de $\left(\frac{n}{N}\right)$ para la ciudad de Quito. ....	45
<b>Tabla 4</b>	Comparación de la radiación del CONELEC y Armstrong Page. ....	46
<b>Tabla 5</b>	Comparación de la radiación de la NASA y Armstrong Page. ....	48
<b>Tabla 6</b>	Comparación de la radiación de ISOCAD y Armstrong Page. ....	50
<b>Tabla 7</b>	Propiedades del Aceite Térmico Shell Heat Transfer Oil S <sub>2</sub> . ....	57
<b>Tabla 8</b>	Temperaturas y propiedades del aceite térmico. ....	80
<b>Tabla 9</b>	Propiedades de materiales sólidos y líquidos. ....	82
<b>Tabla 10</b>	Propiedades del Aire. ....	84
<b>Tabla 11</b>	Criterios de evaluación para la selección de aceite. ....	95
<b>Tabla 12</b>	Evaluación criterio Estabilidad térmica. ....	96
<b>Tabla 13</b>	Evaluación criterio Conductividad térmica. ....	96
<b>Tabla 14</b>	Evaluación criterio Temperatura de operación. ....	96
<b>Tabla 15</b>	Evaluación criterio Resistencia a la oxidación. ....	97
<b>Tabla 16</b>	Evaluación criterio Riesgo de Incendio. ....	97
<b>Tabla 17</b>	Evaluación criterio viscosidad. ....	97
<b>Tabla 18</b>	Evaluación criterio Costo. ....	98
<b>Tabla 19</b>	Evaluación criterio Economía. ....	98
<b>Tabla 20</b>	Evaluación criterio Amigable con el medio ambiente. ....	98
<b>Tabla 21</b>	Conclusión selección de aceite. ....	99
<b>Tabla 22</b>	Altura combinada, factor de exposición y venteo ( $C_e$ ). ....	102
<b>Tabla 23</b>	Coeficiente de presión para la estructura ( $C_q$ ). ....	103
<b>Tabla 24</b>	Coeficiente de presión del viento estancado ( $q_s$ ). ....	104
<b>Tabla 25</b>	Categoría de ocupación. ....	104
<b>Tabla 26</b>	Aceros comerciales en Quito. ....	121
<b>Tabla 27</b>	Esfuerzo admisible y factor de seguridad. ....	121
<b>Tabla 28</b>	Diámetro del eje caso 1. ....	122
<b>Tabla 29</b>	Diámetro del eje caso 2. ....	123
<b>Tabla 30</b>	Esfuerzo permisible de las juntas soldadas. ....	132
<b>Tabla 31</b>	Esfuerzos Permisibles. ....	132

<b>Tabla 32</b>	Espesor para soldaduras de canal cuadrado, junta T.....	133
<b>Tabla 33</b>	Requisitos para la capacidad térmica de ventilación. ....	136
<b>Tabla 34</b>	Extracción de Caudal en el Reservorio.....	137
<b>Tabla 35</b>	Presión máxima del sistema. ....	141
<b>Tabla 36</b>	Espesor recomendado para recipientes. ....	142
<b>Tabla 37</b>	Esfuerzo Admisible del Acero A36. ....	143
<b>Tabla 38</b>	Espesores del Recipiente de Aceite. ....	144
<b>Tabla 39</b>	Condiciones para la soldadura de accesorios del reservorio....	146
<b>Tabla 40</b>	Determinación de perforaciones en la parte inferior del tanque.	147
<b>Tabla 41</b>	Hazen-Williams factor C. ....	157
<b>Tabla 42</b>	Dimensiones y Pesos de las tuberías.....	157
<b>Tabla 43</b>	Longitud equivalente para tubería recta, válvulas y accesorios.	160
<b>Tabla 44</b>	Datos de la longitud de accesorios en la línea de aspiración. ..	164
<b>Tabla 45</b>	Datos de la longitud de accesorios en la línea de trabajo.....	167
<b>Tabla 46</b>	Datos de la longitud de accesorios en la línea de retorno. ....	168
<b>Tabla 47</b>	Requerimientos de Bomba. ....	170
<b>Tabla 48</b>	Instrumentos de medición para la toma de datos del sistema. .	203
<b>Tabla 49</b>	Propiedades del tubo de vidrio. ....	209
<b>Tabla 50</b>	Propiedades del aire.....	209
<b>Tabla 51</b>	Valor de reventa de los materiales del proyecto. ....	214
<b>Tabla 52</b>	Materiales para la fabricación de los concentradores.....	215
<b>Tabla 53</b>	Costos de Materiales para la cimentación. ....	216
<b>Tabla 54</b>	Costos de transporte. ....	217
<b>Tabla 55</b>	Costos de mano de obra para la fabricación de los colectores.	217
<b>Tabla 56</b>	Costo de mano de obra para la fabricación del reservorio. ....	218
<b>Tabla 57</b>	Costos de mano de obra de instalación.....	218
<b>Tabla 58</b>	Costos del aceite térmico Shell Transfer Oil S2. ....	218
<b>Tabla 59</b>	Costos de Operación y Mantenimiento de la Bomba.....	219
<b>Tabla 60</b>	Costos de Mantenimiento del aceite térmico. ....	219
<b>Tabla 61</b>	Costos directos de fabricación.....	220
<b>Tabla 62</b>	Costos indirectos de fabricación.....	220

## FIGURAS

<b>Figura 1.</b>	Ejemplo de Sistemas Termosolar de Concentración (STSC) ...	5
<b>Figura 2.</b>	Esquema básico del colector .....	6
<b>Figura 3.</b>	Concentración Geométrica .....	7
<b>Figura 4.</b>	Esquema básico del colector plano para agua. ....	11
<b>Figura 5.</b>	Configuración de un campo de canales parabólicos.....	13
<b>Figura 6.</b>	Colector de Plato Parabólico.....	15
<b>Figura 7.</b>	Receptor de tubos del Sistema Eurodish. ....	17
<b>Figura 8.</b>	Planta de Receptor central Solar Two, Estados Unidos.....	18
<b>Figura 9.</b>	Distintos tipos de heliostatos y campos de heliostatos. ....	19
<b>Figura 10.</b>	Plataforma Solar Almería y torre de la PS 10. ....	20
<b>Figura 11.</b>	Distintos tipos de receptores.....	20
<b>Figura 12.</b>	Concentrador Lineal Fresnel.....	21
<b>Figura 13.</b>	Receptor de un Concentrador lineal Fresnel.....	22
<b>Figura 14.</b>	Elementos de la parábola. ....	24
<b>Figura 15.</b>	Geometría de la Parábola. ....	24
<b>Figura 16.</b>	Parámetros dimensionales de la Parábola.....	27
<b>Figura 17.</b>	Factores que intervienen en el diámetro del tubo receptor. ....	28
<b>Figura 18.</b>	Varios ángulos de borde para una apertura fija. ....	28
<b>Figura 19.</b>	Igualdad de Parámetros de la Parábola $F = c$ .....	29
<b>Figura 20.</b>	Gráfico de la ecuación de la parábola.....	30
<b>Figura 21.</b>	Distancia tierra - sol y ángulo de aceptación.....	30
<b>Figura 22.</b>	Perdidas geométricas por sombra, en perfil y en planta. ....	31
<b>Figura 23.</b>	Perdidas geométricas por no intercepción. ....	32
<b>Figura 24.</b>	Resumen de pérdidas por los elementos del sistema CCP. ...	33
<b>Figura 25.</b>	Perdidas térmicas. ....	34
<b>Figura 26.</b>	Balance energético de un canal parabólico. ....	36
<b>Figura 27.</b>	Esquema de conceptos geométricos Sol - Tierra.....	39
<b>Figura 28.</b>	Espectro de Radiación Solar.....	41
<b>Figura 29.</b>	Radiación media diaria mensual de la Ciudad de Quito.....	42
<b>Figura 30.</b>	Comparación de la Radiación del Conelec vs Armstrong Page.	46
<b>Figura 31.</b>	Mapa de Insolación global del Ecuador para el mes de enero.	47
<b>Figura 32.</b>	Datos de la Radiación diaria mensual por la NASA. ....	48

<b>Figura 33.</b>	Comparación de la Radiación de la NASA vs Armstrong Page.	49
<b>Figura 34.</b>	Radiación diaria mensual por el programa ISOCAD.....	49
<b>Figura 35.</b>	Comparación de la Radiación de ISOCAD vs Armstrong Page.	50
<b>Figura 36.</b>	Geometría del Concentrador.....	52
<b>Figura 37.</b>	Partes de un Concentrador Cilíndrico Parabólico. ....	56
<b>Figura 38.</b>	Resistencias térmicas en el tubo de cobre y cubierta de vidrio.	56
<b>Figura 39.</b>	Resistencias y pérdidas térmicas.....	61
<b>Figura 40.</b>	Balance de Energía en el tubo de vidrio y el tubo absorbedor. .	73
<b>Figura 41.</b>	Determinación del Número Nusselt para regimen laminar.....	76
<b>Figura 42.</b>	Variación de la temperatura del fluido con respecto a un sólido.	78
<b>Figura 43.</b>	Variación de temperatura de un sólido y fluido en movimiento.	79
<b>Figura 44.</b>	Análisis de Perdidas Térmicas en forma longitudinal.....	84
<b>Figura 45.</b>	Análisis de transferencia de calor en el absorbedor.....	89
<b>Figura 46.</b>	Modelado del sistema de radiación de media temperatura.....	100
<b>Figura 47.</b>	Fuerzas externas que inciden sobre el sistema colector.....	100
<b>Figura 48.</b>	Cargas en la parábola cuando está en posición horizontal.....	105
<b>Figura 49.</b>	Cargas en la parábola cuando está en posición vertical.....	106
<b>Figura 50.</b>	Masa de la estructura que soporta la parábola. ....	107
<b>Figura 51.</b>	Diagrama de Cuerpo Libre del eje caso 1.....	109
<b>Figura 52.</b>	Caso 1, Diagrama de Momentos y fuerzas cortantes eje Y. ...	112
<b>Figura 53.</b>	Caso 1, Carga Máxima soportada por el eje Y. ....	112
<b>Figura 54.</b>	Caso 1, Diagrama de momentos y fuerza cortante eje Z.....	113
<b>Figura 55.</b>	Caso 1, Carga Máxima soportado por el eje caso 1 eje Z. ....	113
<b>Figura 56.</b>	Diagrama de Cuerpo libre del eje caso 2.....	114
<b>Figura 57.</b>	Caso 2, Diagrama de momentos y fuerza cortante eje Y.....	116
<b>Figura 58.</b>	Caso 2, Carga Máxima soportada por el eje Y. ....	117
<b>Figura 59.</b>	Caso 2, Diagrama de momentos y fuerza cortante en el eje Z.	117
<b>Figura 60.</b>	Caso 2, Carga Máxima soportada por el eje Z.....	118
<b>Figura 61.</b>	Soldadura de canal cuadrado, junta T y junta de esquina. ....	133
<b>Figura 62.</b>	Extracción de caudal a la entrada del reservorio vs volumen.	137
<b>Figura 63.</b>	Extracción de caudal a la salida del reservorio vs volumen. ...	138
<b>Figura 64.</b>	Determinación de perforaciones en los accesorios del tanque.	145

<b>Figura 65.</b>	Vista frontal del Recipiente del Aceite.....	150
<b>Figura 66.</b>	Corte B-B del Reservorio de Aceite. ....	151
<b>Figura 67.</b>	Tuberías en Paralelo.....	153
<b>Figura 68.</b>	Longitud de accesorios en diferentes tramos de las tuberías. ....	159
<b>Figura 69.</b>	Curvas Característica de la Bomba CM 3 50Hz.....	170
<b>Figura 70.</b>	Curva de Caudal vs Potencia.....	171
<b>Figura 71.</b>	Curva característica individual .....	171
<b>Figura 72.</b>	Cortado de los tubos cuadrados en diferentes medidas. ....	172
<b>Figura 73.</b>	Tubos cuadrados biselados listos para soldar. ....	173
<b>Figura 74.</b>	Estructura base parcialmente ensamblada. ....	174
<b>Figura 75.</b>	Estructura base totalmente ensamblada.....	174
<b>Figura 76.</b>	Soldado de platinas en las patas de la estructura base.....	175
<b>Figura 77.</b>	Soldado de piezas de la estructura de la lámina de aluminio. ....	176
<b>Figura 78.</b>	Cortado y Perforado de placas de medida 73 x 110 x 6 mm. .	176
<b>Figura 79.</b>	Cortado y Perforado de placas de medida 473 x 73 x 6 mm. .	177
<b>Figura 80.</b>	Cortado y Perforado de medias lunas de radio de 25 cm. ....	177
<b>Figura 81.</b>	Perforación de agujeros de 10 mm de diámetro cada 15°. ....	178
<b>Figura 82.</b>	Soldadura de platinas y refuerzos de la estructura - parábola. ....	178
<b>Figura 83.</b>	Barolado de la lámina de aluminio. ....	179
<b>Figura 84.</b>	Doblado de 20 cm en los extremos de la lámina de aluminio. ....	179
<b>Figura 85.</b>	Perforación de las aberturas de entrada y salida del tanque. .	180
<b>Figura 86.</b>	Soldadura de las patas del reservorio de aceite. ....	180
<b>Figura 87.</b>	Ubicación del norte geográfico.....	182
<b>Figura 88.</b>	Delimitación de las bases de los CCP. ....	183
<b>Figura 89.</b>	Corte de la hierba para poder cimentar los espacios limitados. ....	183
<b>Figura 90.</b>	Encofrado de madera para rellenarlo con lastre. ....	184
<b>Figura 91.</b>	Refuerzo de la cimentación con la malla electrosoldada. ....	184
<b>Figura 92.</b>	Mezcla de materiales para la fundición del hormigón. ....	185
<b>Figura 93.</b>	Alisamiento de los bordillos donde se ubicaran los colectores. ....	185
<b>Figura 94.</b>	Secado del hormigón de los bordillos. ....	186
<b>Figura 95.</b>	Ubicación de las estructuras bases de los concentradores. ...	186
<b>Figura 96.</b>	Centrado se la chumacera con respecto a la estructura base. ....	187

<b>Figura 97.</b> Alineado y perforación de las estructuras base. ....	188
<b>Figura 98.</b> Colocación de los tacos fischer sobre las perforaciones.....	188
<b>Figura 99.</b> Colocación de los tirafondos sobre los tacos fischer.....	189
<b>Figura 100.</b> Soldado de los matrimonios para unir los ejes de los CCP....	190
<b>Figura 101.</b> Soldado de la parte trasera del matrimonio. ....	190
<b>Figura 102.</b> Soldado y cortado de los perfiles tipo L de 25 x 25 x 4 mm. ...	191
<b>Figura 103.</b> Perfoación de los perfiles tipo L. ....	191
<b>Figura 104.</b> Ubicación de los pernos en los agujeros del perfil tipo L. ....	192
<b>Figura 105.</b> Montaje del tubo de cobre sobre el bocín y el tubo de vidrio. ....	192
<b>Figura 106.</b> Ingreso del tubo de cobre sobre al tubo de vidrio. ....	193
<b>Figura 107.</b> Colocación del acople de grilón en los concentradores. ....	193
<b>Figura 108.</b> Sujetación de los acoples de grilón por medio de tornillos.....	194
<b>Figura 109.</b> Unión de los tubos de cobre por medio de acoples. ....	194
<b>Figura 110.</b> Cortado de las rieles de longitud 20 centímetros. ....	195
<b>Figura 111.</b> Ubicación de la riel sobre un tubo de la estructura base.....	195
<b>Figura 112.</b> Doblado de platinas. ....	196
<b>Figura 113.</b> Sujetación de la tubería de acero galvanizado. ....	196
<b>Figura 114.</b> Sellado de los accesorios de la tubería galvanizada.....	197
<b>Figura 115.</b> Colocación de accesorios en la tubería galvanizada. ....	197
<b>Figura 116.</b> Instalación de las válvulas esféricas sobre los CCP. ....	198
<b>Figura 117.</b> Instalación de las mangueras hidráulicas. ....	198
<b>Figura 118.</b> Roscado de la tubería de acero galvanizado. ....	199
<b>Figura 119.</b> Instalación de la bomba centrífuga para aceite térmico. ....	200
<b>Figura 120.</b> Montaje de las válvulas de compuerta y la check. ....	200
<b>Figura 121.</b> Sellado de los instrumentos de medición.....	201
<b>Figura 122.</b> Instalación de los instrumentos de medición.....	201
<b>Figura 123.</b> Variación de la Radiación vs Tiempo del día 1. ....	204
<b>Figura 124.</b> Variación de la Radiación vs Tiempo del día 2. ....	204
<b>Figura 125.</b> Variación de la Radiación vs Tiempo del día 3. ....	205
<b>Figura 126.</b> Variación de la Temperatura del Aceite vs Radiación.....	205
<b>Figura 127.</b> Variación de la Temperatura del Aceite vs Tiempo.....	206
<b>Figura 128.</b> Identificación de pérdidas en el sistema colector.....	207

<b>Figura 129.</b> Geometría de la Parábola de aluminio.....	207
<b>Figura 130.</b> Tubo de vidrio del sistema colector.....	208
<b>Figura 131.</b> Tubería de Cobre.....	208
<b>Figura 132.</b> Aire en reposo en el tubo de vidrio.....	210

**ÍNDICE DE ANEXOS**

<b>Anexo 1.</b> Calculo de la temperatura del Aceite Térmico.....	58
<b>Anexo 2.</b> Ficha Técnica Aceite Shell Heat Transfer Oil S2.....	93
<b>Anexo 3.</b> Ficha Técnica del Aceite Repsol 5W30.....	93
<b>Anexo 4.</b> Ficha Técnica del Aceite Repsol 4 5W30.....	93
<b>Anexo 5.</b> Acero Grado Maquinaria SUMITEC.....	121
<b>Anexo 6.</b> Coeficiente $C_q$ y $C_H$ para corrección por viscosidad.....	169
<b>Anexo 7.</b> Hoja de Procesos Tecnológicos.....	181
<b>Anexo 8.</b> Plano de Conjunto.....	181
<b>Anexo 9.</b> Plano de la Estructura.....	181
<b>Anexo 10.</b> Plano del eje de transmisión.....	181
<b>Anexo 11.</b> Plano de la parábola.....	181
<b>Anexo 12.</b> Plano de Ensamblaje de los CCP.....	181
<b>Anexo 13.</b> Plano de Ensamblaje del tanque de aceite.....	181
<b>Anexo 14.</b> Plano de la placa barolada de aluminio.....	181
<b>Anexo 15.</b> Protocolo de Pruebas.....	201
<b>Anexo 16.</b> Datos obtenidos del sistema.....	202
<b>Anexo 17.</b> Ficha Técnica de los termómetros bimetálicos.....	202
<b>Anexo 18.</b> Ficha Técnica de los manómetros standart uso general.....	202

## NOMENCLATURA

$C$	Razón de concentración superficial
$d$	Directriz
$F$	Distancia focal
$M$	Punto arbitrario sobre la parábola
$B$	Boca de la parábola
$p$	Distancia entre la directriz y el foco
$c$	Profundidad de la parábola en el centro
$dS$	Longitud de la curvatura $S$ de la parábola
$Q_{sol}$	Energía solar incidente sobre el captador (W)
$S_c$	Área de apertura de la superficie reflectiva del captador (m <sup>2</sup> )
$I$	Radiación solar directa (W/m <sup>2</sup> )
$\emptyset$	Latitud
$q_m$	Caudal másico del flujo de trabajo (kg/s)
$h_{sal}$	Entalpía específica del fluido de trabajo a la salida del captador (J/kg)
$h_{ent}$	Entalpía específica del fluido de trabajo al ingreso del captador (J/kg)
$\eta_{global}$	Rendimiento global del captador
$\theta$	Angulo de incidencia
$\delta$	Declinación
$\omega$	Angulo horario
$\theta_z$	Angulo Zanith
$\alpha_s$	Angulo altitud solar
$\gamma$	Angulo Azimuth en una superficie
$E$	Energía de los fotones
$h$	Constante de Planck (Js)
$\nu$	Frecuencia de oscilación de los fotones
$\lambda$	Longitud de onda
$G_{on}$	Dirección extraterrestre en el enésimo día del año
$G_{sc}$	Constante solar

$\overline{H}_o$	Radiación extraterrestre media diaria mensual (MJ/m <sup>2</sup> )
$\overline{H}$	Radiación terrestre
$\bar{n}$	Número de horas con sol brillante en el mes
$\overline{N}$	Número total de horas con luz de día en el mes
$D$	Diámetro de la parábola (m)
$x$	Boca de la parábola (m)
$L$	Longitud de la parábola (m)
$Q_{util}$	Calor útil que absorbe el fluido de trabajo (W)
$Q_{abs}$	Calor efectivo que llega al tubo absorbedor (W)
$\eta_o$	Rendimiento óptico
$\rho_R$	Reflectividad del espejo
$\tau$	Transmitancia del vidrio
$\alpha$	Absortancia del tubo de cobre
$\gamma$	Factor de forma
$F$	Error de seguimiento
$F_t$	Fracción de apertura no sombreada
$A_a$	Área de apertura(m <sup>2</sup> )
$G_d$	Irradiancia media medida en la Espe (W/m <sup>2</sup> )
$Q_p$	Calor total por pérdidas(W)
$U_c$	Coeficiente global por pérdidas en el sistema de concentración
$T_c$	Temperatura del fluido de trabajo (°K)
$T_o$	Temperatura Ambiente(°K)
$Pr$	Numero de Prandtl
$k_{aceite}$	Coeficiente de conductividad térmica del aceite (W/m°K)
$k_{cobre}$	Coeficiente de conductividad térmica del cobre (W/m°K)
$k_{aire}$	Coeficiente de conductividad térmica del aire (W/m°K)
$\nu_{aceite}$	Viscosidad cinemática del aceite (m <sup>2</sup> /s)
$c_p$	Calor específico(KJ/kg°K)
$Q$	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
$A$	Área de la pared interna del tubo de cobre (m <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	Flujo másico (kg/s)

$V_f$	Velocidad de flujo (m/s)
$Re_{yDI}$	Numero de Reynolds
$Q_{perd}$	Perdida de calor sufrida por el CCP
$T_{aceite}$	Temperatura del aceite
$T_{vidrio}$	Temperatura del tubo vidrio
$T_{amb}$	Temperatura del medio ambiente
$T_{alr}$	Temperatura cercana al concentrador
$R_{conv\ acei}$	Resistencia de convección del aceite
$R_{cond\ Cu}$	Resistencia de conducción del cobre
$R_{vacio}$	Resistencia del vacío
$R_{cond\ vid}$	Resistencia de conducción del vidrio
$R_{conv\ ext}$	Resistencia de convección externo
$R_{rad\ ext}$	Resistencia de radiación externo
$R_{equiv\ int}$	Resistencia equivalente interna
$T_{Cu\ int}$	Temperatura del tubo cobre interno
$T_{Cu\ ext}$	Temperatura del tubo de cobre externo
$T_{vidrio\ int}$	Temperatura del tubo de vidrio interior
$T_{vidrio\ ext}$	Temperatura del tubo de vidrio exterior
$Nu$	Numero de Nusselt
$Re_{ext}$	Numero de Reynolds externo
$Pr_{ext}$	Numero de Prandtl externo
$q_{conv\ vid/amb}$	Calor en relación a las condiciones exteriores
$R_{conv\ vid/amb}$	Resistencia de convección externa vidrio medio ambiente
$q''$	Velocidad de transferencia de calor por radiación
$R_{vid/amb}$	Resistencia de radiación externa, vidrio medio ambiente
$R_{rad\ vid/par}$	Resistencia de radiación externa, vidrio – parábola
$A_{vid}$	Área del tubo de vidrio (m <sup>2</sup> )
$A_{parab}$	Área de la parábola (m <sup>2</sup> )
$R_{rad\ Cu/vi}$	Resistencia de radiación cobre-vidrio

$D_{ext\ Cu}$	Diámetro externo del tubo de cobre
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman
$\varepsilon_1$	Emisividad del tubo de cobre
$\varepsilon_2$	Emisividad del tubo de vidrio
$R_{conv\ Cu/vi}$	Resistencia de convección cobre-vidrio
$k_{ef}$	Conductividad efectiva del aire
$Ra'$	Número de Rayleigh modificado del aire
$Ra_{Cu}$	Número de Rayleigh en el cobre
$g$	Aceleración de la gravedad (m <sup>2</sup> /s)
$\beta_{air}$	Coefficiente de expansión térmica del aire
$\gamma_{air}$	Viscosidad cinemática del aire
$\alpha$	Difusividad térmica
$R_{conv\ acei}$	Resistencia de convección del aceite
$Nu_{int}$	Número de Nusselt interno
$Re_{int}$	Número de Reynolds interno
$Pr_{int}$	Número de Prandtl interno
$\alpha_c$	Absortancia de la cubierta
$\varepsilon_{sky}$	Emisividad del cielo
$T_{sky}$	Temperatura del cielo
$\varepsilon_p$	Emisividad del tubo de cobre
$T_p$	Temperatura del tubo de cobre
$T_c$	Temperatura de la cubierta
$T_a$	Temperatura ambiente
$\varepsilon_c$	Emisividad de la cubierta
$h_o$	Coefficiente de convección externo (W/m <sup>2</sup> °C)
$h_e$	Coefficiente de convección del aire (W/m <sup>2</sup> °C)
$D_i$	Diámetro interno del tubo de cobre(m)
$L$	Longitud tubos de cobre primera generación (m)
$h_i$	Coefficiente de convección interno en tubo de cobre (W/m <sup>2</sup> °C)
$A_s$	Área de la superficie

$T_{faceite}$	Temperatura final del Aceite Térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )
$D$	Diámetro interior del tubo de cobre. ( $m$ )
$T_{cobre}$	Temperatura constante del tubo de cobre ( $^{\circ}\text{C}$ )
$c_p$	Calor Específico del Aceite Térmico $\left(\frac{KJ}{Kg^{\circ}K}\right)$
$T_{iaceite}$	Temperatura inicial del Aceite Térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )
$U_i$	Coeficiente global de transferencia de calor interno ( $W/m^2^{\circ}\text{C}$ )
$r_o$	Radio externo del tubo absorvedor
$r_i$	Radio interno del tubo absorvedor
$T_{bairre}$	Temperatura media de la película del aire
$D_H$	Diámetro hidráulico
$P$	Perímetro de la región anular
$D_I$	Diámetro interno del tubo de vidrio
$d_o$	Diámetro externo del tubo de cobre
$G_{rb}$	Numero de Grashof
$\beta$	Coeficiente de expansión volumétrico de expansión térmica
$T_{ref}$	Temperatura media de la película de aire en ( $^{\circ}\text{K}$ )
$b$	Longitud característica
$R_i$	Radio interno del tubo de vidrio
$r_o$	Radio externo del tubo de cobre
$\nu$	Viscosidad cinemática del aire en el absorvedor ( $m^2/s$ )
$R_{iconv\ acei/c}$	Resistencia térmica por convección en el tubo de cobre
$R_{icond\ Cu}$	Resistencia térmica por conducción en el tubo de cobre
$R_{iconv\ anular}$	Resistencia térmica por convección en la región anular
$R_{icond\ vid}$	Resistencia térmica por conducción en el tubo de vidrio
$R_{iconv\ vid/ar}$	Resistencia térmica por convección vidrio – ambiente
$A_o$	Área lateral de la cubierta de vidrio ( $m^2$ )
$U_o$	Coeficiente global por pérdidas en el sistema ( $W/m^2^{\circ}\text{C}$ )
$A_r$	Área lateral del tubo absorvedor ( $m^2$ )
$\Delta T$	Diferencia temperatura inicial y final

$P$	Presión de diseño del viento ( $\text{kN/m}^2$ )
$C_e$	Altura combianada, factor de exposición y venteo
$C_q$	Coeficiente de presión para la estructura
$q_s$	Coeficiente de presión para la estructura ( $\text{kN/m}^2$ )
$I_w$	Coeficiente de importancia
$P_{air}$	Fuerza ejercida por el aire
$F_z$	Fuerza equivalente de $P$ sobre área lateral caso 1(N)
$A$	Área de la parábola caso 1
$F_z'$	Fuerza equivalente de $P$ sobre área lateral caso 2(N)
$A'$	Área de la parábola caso 2
$V$	Volumen de aceite en un concentrador ( $\text{m}^3$ )
$m$	Masa de aceite en el tubo de un concentrador (kg)
$T_g$	Torque caso 1 por $F_z$ actúa en 5 colectores restantes (Nm)
$T_g'$	Torque caso 2 por $F_z$ actúa en 5 colectores restantes (Nm)
$A_z$	Reacción cojinete A en eje z (N)
$A_y$	Reacción cojinete A en eje y (N)
$B_z$	Reacción cojinete B en eje z (N)
$B_y$	Reacción cojinete B en eje y (N)
$W_c$	Mitad del peso de la estructura izquierda (N)
$W_d$	Mitad del peso de la estructura derecha (N)
$F_z$	Fuerza aplicada por el viento caso 1(N)
$F_z'$	Fuerza aplicada por el viento caso 2(N)
$R_y$	Reacción Posicionador (N)
$M_z$	Momento en el eje z (Nm)
$F_y$	Fuerzas en el eje y (N)
$d$	Diámetro del eje (m)
$S_y$	Resistencia a fluencia (Mpa)
$S_{ut}$	Resistencia a la tensión (Mpa)
$S_p$	Resistencia a la prueba (Mpa)

$n$	Factor de seguridad
$C_R$	Capacidad básica de carga del cojinete
$L_R$	Horas de vida
$n_R$	Velocidad en rpm recomendado por técnica de selección
$F$	Carga real del cojinete
$n_D$	Velocidad en rpm valor de diseño
$a$	Constante para cojinetes de bolas es 3
$C$	Carga dinámica del rodamiento(N)
$P$	Carga aplicada al rodamiento (N)
$f_L$	Factor de desgaste
$f_n$	Factor de velocidad
$f_h$	Factor de dureza
$A_t$	Área de esfuerzo de tensión
$k_b$	Constante de rigidez del perno (N/m)
$k_m$	Constante de rigidez de los elementos (N/m)
$E$	Módulo de elasticidad del perno
$d_{pern}$	Diámetro del perno
$l_{pern}$	Longitud del perno
$E_{chu}$	Módulo de elasticidad chumacera
$\tau$	Esfuerzo cortante
$F$	Fuerza cortante
$A_{tr}$	Área transversal del perno
$S_{x/x}$	Esfuerzo a lo largo del eje x
$I$	Inercia
$C$	Constante para fibra neutra
$\sigma_{adm}$	Esfuerzo admisible
$V$	Volumen del reservorio de aceite
$Pot$	Potencia (Hp)
$P$	Presión del sistema (psi)
$P_{sist}$	Presión del sistema más el diez por ciento
$t$	Espesor mínimo requerido tanque de aceite (pulgadas)

$P_{int}$	Presión interna de diseño (psi)
$R$	Radio interno de la carcaza a ser considerada(pulgadas)
$S$	Esfuerzo máximo admisible (psi)
$E$	Eficiencia de junta
$t_d$	Espesor mínimo de diseño(mm)
$t_t$	Espesor de prueba hidrostática (mm)
$D$	Diámetro nominal del tanque (m)
$H$	Altura del nivel del líquido contenido.
$CA$	Tolerancia a la corrosión (mm)
$S_d$	Esfuerzo de diseño (Mpa)
$S_t$	Esfuerzo para prueba hidrostática (Mpa)
$G$	Gravedad específica
$C$	Factor que indica el método de junta de tapa con el cuerpo
$V_{cu}$	Volumen de la tubería de cobre (m <sup>3</sup> )
$V_{galv}$	Volumen de la tubería galvanizada (m <sup>3</sup> )
$V_{cald}$	Volumen del caldero (m <sup>3</sup> )
$V_f$	Volumen final (m <sup>3</sup> )
$Q$	Caudal de entrada a la salida de B
$Q_{BCF}$	Caudal en el tramo BCF
$Q_{BDF}$	Caudal en el tramo BDF
$Q_{BEF}$	Caudal en el tramo BEF
$D_e$	Diámetro equivalente
$S_g$	Gravedad específica del aceite
$P_m$	Caída de presión por fricción (kPa/km)
$C$	Factor C de Hazen-Williams
$\Delta P_a$	Caída de presión en la sección AB (kPa)
$\Delta P_b$	Caída de presión en la sección BF (kPa)
$\Delta P_c$	Caída de presión en la sección FG (kPa)
$\Delta P_{total}$	Caída de presión en las secciones A, B y C
$f$	Factor de fricción Darcy
$\emptyset$	Diámetro de tubería galvanizada según catalogo

$h_L$	Pérdidas de presión por fricción (m)
$k$	Coefficiente de pérdida por carga
$h_{asp}$	Pérdidas de presión en línea de aspiración (m)
$h_{trabajo}$	Pérdidas de presión en línea de trabajo (m)
$Tub_{hor}$	Pérdidas de presión en tuberías horizontales (m)
$Tub_{ver}$	Pérdidas de presión en tuberías verticales (m)
$Tub_{des}$	Pérdidas de presión en tubería de descarga (m)
$Tub_{taotaldes}$	Pérdidas de presión en línea de retorno (m)
$Total_{perdid}$	Pérdidas de presión totales (m)
$P_{diseño}$	Presión de diseño del caldero (psi)
$Q_{real}$	Caudal real de la Bomba (gal/min)
$H_{real}$	Altura real de la Bomba (gal/min)
$CCP$	Concentrador cilíndrico parabólico
$DCL$	Diagrama de cuerpo libre

## RESUMEN

La energía solar es una energía renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación procedente del sol. Los Concentradores Cilíndrico Parabólicos (CCP) usan esta radiación para el calentamiento de un fluido térmico y consta de tres generaciones de seis concentradores conectados en serie. El reflector, parte principal del sistema de concentración, usa la geometría de la parábola para poder reflejar los rayos solares a un punto focal, el tubo de cobre, también llamado tubo absorbedor el cual debe tener un alto coeficiente de conductividad térmica. Dentro de éste circula aceite térmico, puesto que tiene un alto punto de ebullición, excelente conductividad térmica y su ventaja frente al agua es evitar que se produzca vapor para posteriormente aprovecharlo. El sistema de concentración también consta de un tanque de aceite que alimentara al sistema, posee tomas de aspiración, descarga, tapa de drenaje, medidor de nivel de aceite. Con la finalidad de verificar las formulas desarrolladas en el diseño térmico, se realizaron distintas pruebas al sistema tomando datos de temperaturas y presiones a la entrada, en medio y a la salida de los concentradores, temperatura ambiente, velocidad del viento, radiación, etc. El sistema de concentración de CCP se encuentra instalado en la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE al lado derecho del Laboratorio de Procesos de Manufactura.

### **PALABRAS CLAVE:**

- **CCP**
- **ACEITE TÉRMICO**
- **ANULAR**
- **RADIACIÓN**

## **ABSTRACT**

The solar energy is a renewable energy, obtained from the use of radiation from the Sun. The parabolic cylinder collectors (CCP) use this radiation to heat a thermal fluid consist of three generations of six parabolic cylindrical hubs each connected in series. Reflector is one of the main concentration system parts, used the geometry of the parable to be able to reflect the Sun's rays a focal point, the cooper tubing, also called absorber tube which must have a high coefficient of thermal conductivity. The fluid that circulates is an oil heat, since it has a high boiling point and its advantage over the water is that it prevents steam and thus the subsequent use. The system of concentration also consists of an oil tank which feeds the system, with shots of suction, discharge, drain cap and oil level gauge. In order to verify the formulas developed in thermal design, were performed various tests the system taking data of temperatures and pressures at the entrance, in the middle and at the exit of the concentrators, ambient temperature, speed of the wind, radiation, etc. Concentration of CCP system is housed in the University of the armed forces - ESPE to the right side of the laboratory of manufacturing processes.

### **KEYWORDS:**

- **CCP**
- **HEAT OIL**
- **ANNULAR**
- **RADIATION**

## CAPITULO I

### DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO

#### 1.1 Antecedentes

Actualmente en el Ecuador, las Energías Renovables no tienen aplicaciones importantes, en vista de la ausencia de políticas que fortalezcan su aprovechamiento. Las empresas que se dedican a la producción de energía limpias son limitadas y los proyectos realizados en este campo son de poco aporte científico, por este motivo es que los proyectos que se tienen en el Ecuador son de bajo impacto social y tecnológico.

Existen diversas fuentes de energías renovables que pueden ser utilizadas para generación eléctrica o térmica, como es el caso de la energía solar de media y alta temperatura. Estos recursos energéticos, se han constituido como una alternativa para un futuro no muy lejano, un ejemplo de esto es la energía solar que en las últimas décadas ha tenido un auge en su desarrollo y se ha hecho a su vez una energía competitiva y viable para cualquier medio y condición.

Debido a que el Ecuador dispone de recursos petroleros, el tema de las Energías Renovables no ha sido de gran interés, por tal motivo no se impulsa como política de estado el uso común de estas alternativas. Sin embargo, existe una razón por la cual se tiene la necesidad de desarrollar proyectos energéticos de menor impacto ambiental, reduciendo la contaminación que producen los combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural), así como también los costos de producción de energía térmica.

El agotamiento de los combustibles fósiles, que es una realidad no muy lejana, debe concientizar a la sociedad para el cambio radical, en busca de

un modelo energético sostenido y sustentable donde se tenga una mayor aplicación de fuentes renovables.

## **1.2 Definición del Problema**

Dentro de las tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de la radiación solar directa en aplicaciones de media y alta temperatura, se encuentran diferentes tipos de métodos, entre estos se tienen los sistemas de receptor central, concentradores parabólicos, lentes. En el presente proyecto el problema a abordar consiste en diseñar el subsistema de captación que debe conseguir factores de concentración  $RC > 10$ , utilizando concentradores cilíndrico parabólicos, para concentrar la mayor cantidad de radiación, en el absorbedor donde el fluido de proceso, que en este caso es el aceite térmico alcance una temperatura promedio de  $73^{\circ} C$ .

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 General**

- Diseñar y construir un sistema de concentración de radiación solar térmica utilizando concentradores cilíndricos parabólicos para obtener una potencia instalada de 16000 Kcal/hr.

### **1.3.2 Específicos**

- Analizar las variables de la radiación solar directa que inciden sobre los concentradores.
- Diseñar y construir los soportes del sistema de concentración de radiación solar térmica.
- Diseñar y construir el sistema colector del aceite térmico, que permita aprovechar la radiación solar directa.
- Realizar un balance energético del sistema, teniendo en cuenta el coeficiente global de transferencia, flujos de calor y pérdidas.
- Realizar pruebas de funcionamiento a todos los elementos del sistema de concentración de radiación solar de media temperatura con CCP.

#### **1.4 Alcance**

Diseño y construcción de un sistema de concentración de la radiación solar para generación de una potencia instalada de 16000 Kcal, de calor útil para ser utilizado en proyectos de calentamiento de fluidos de proceso.

La radiación obtenida por el sol va a calentar el fluido de trabajo que en este caso es el aceite térmico hasta alcanzar una temperatura de 73 °C, por lo tanto al realizar el diseño de este proyecto podríamos transferir el calor entre fluidos.

#### **1.5 Justificación e Importancia**

El aprovechamiento de las energías renovables, como es el caso de la energía solar térmica se considera como una alternativa factible para contribuir en el mediano y largo plazo con el fortalecimiento con la matriz energética internacional. Sin embargo, se puede indicar que en el Ecuador existen serias dificultades en el desarrollo de tecnologías que permitan aprovechar estos recursos, de manera eficiente.

El 80% de la matriz energética nacional, se sustenta en el uso del petróleo, que es un recurso deficitario y contaminante. Ante esta situación, es necesario buscar nuevas fuentes de energías alternativas, con el propósito de reducir el uso indiscriminado y extensivo de los combustibles fósiles que originan los gases de efecto invernadero. Además, si se toma como referencia la energía solar el Ecuador al encontrarse atravesado por la línea equinoccial, recibe una radiación con ángulo de dirección de 23,35° Norte y 23,35° Sur. Es decir, los rayos de luz caen casi perpendiculares a la superficie, aumentando el nivel de radiación debido a que el espesor de la atmósfera  $M = 1$ ; esta situación da la posibilidad de implementar sistemas de captación de la radiación solar para aplicaciones de media y alta temperatura. Es necesario indicar que hasta la actualidad el país no cuenta con este tipo de tecnologías para la generación térmica de media o alta temperatura.

En la presente investigación e implementación de los concentradores cilíndricos parabólicos se pretende convertir radiación solar en energía térmica, la misma que es reflejada por los espejos hacia el absorvedor, sin emitir sustancias contaminantes. El calor útil, será aprovechado para el calentamiento de aceite térmico, como fluido de proceso que puede ser utilizado para evaporar fluidos de bajo punto de ebullición como es el caso del agua.

Una de las principales ventajas del desarrollo de este proyecto es que por medio de la utilización de concentradores cilíndricos parabólicos dependiendo de la ubicación del sol durante todo el año se va a calentar aceite térmico hasta llegar a una temperatura de 73° C.

El proyecto va a estar compuesto por 3 etapas que van a estar conectadas en serie para poder obtener una energía de 16000 kcal/hr, una de las limitaciones puede ser que se requiere de un gran espacio físico para su desarrollo y que también en cada etapa puede haber una cierta pérdida de energía y que no se pueda llegar a calentar el aceite térmico hasta 73° C, pero esto se puede mejorar mediante el diseño adecuado de cada una de las conexiones en serie del sistema colector.

Para su implementación se utiliza una energía limpia que es la solar y no se requiere la utilización de combustibles fósiles.

## CAPITULO II

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

#### TÉCNICAS DE CONCENTRACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR

##### 2.1 Introducción

Los sistemas termo solares de concentración (STSC) transforman la componente directa de la radiación solar en energía térmica. El aprovechamiento de esta energía puede ser directa en forma de calor o indirecta utilizando este calor para obtener un trabajo mecánico (a través de un eje) y posteriormente electricidad. El principal componente de cualquier sistema solar es el colector solar. Este es un dispositivo que absorbe la radiación solar entrante, la convierte en calor, y transfiere el calor a un fluido (normalmente aire, agua o aceite) que fluye a través del colector. La energía solar recogida se la puede usar de forma inmediata, o bien como energía almacenable en forma de calor o en forma química.

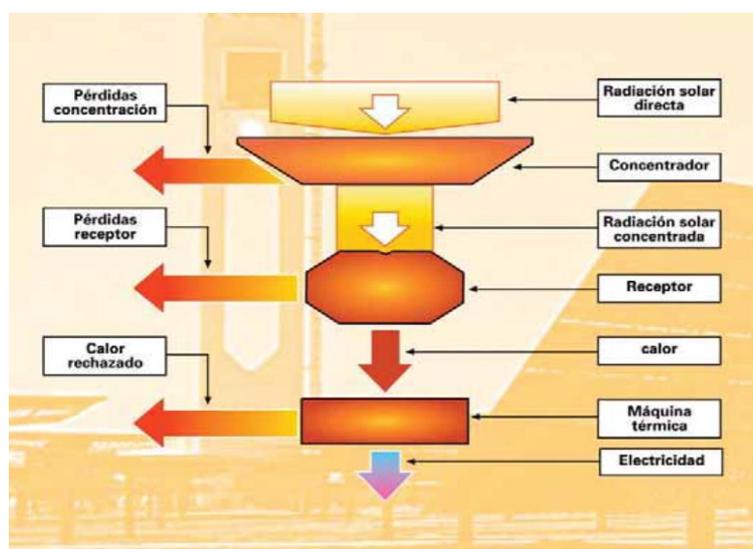
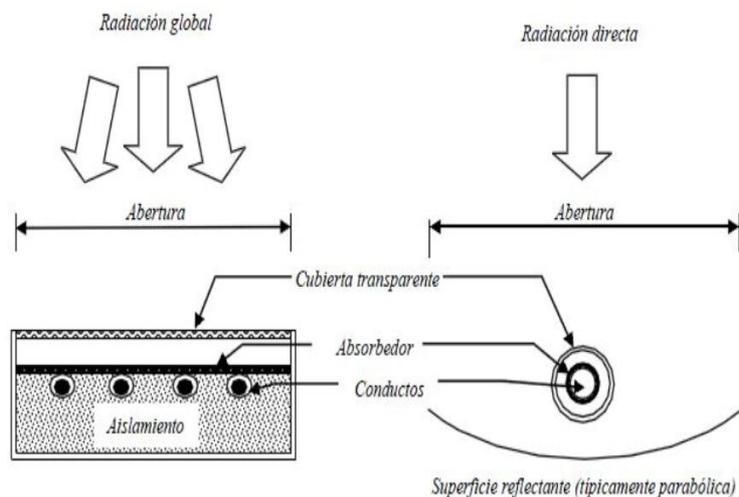


Figura 1. Ejemplo de Sistemas Termosolar de Concentración (STSC)

Fuente: (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Los captadores solares de manera general están constituidos por (Velasco, 2012):

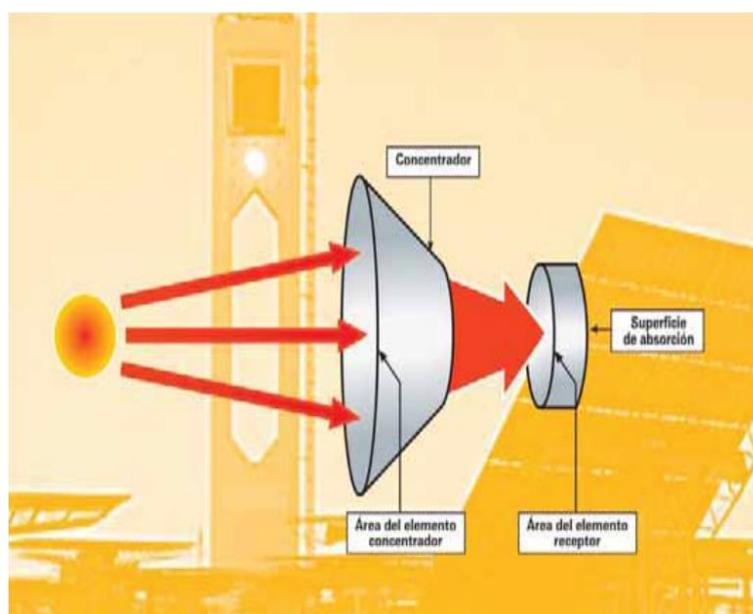
- **Captador.**- recibe y concentra la radiación solar sobre el absorvedor.
- **El absorvedor.**- encargado de recibir y absorber la radiación solar y transformarla en radiación térmica.
- **Cubierta transparente.**- evita en gran parte, la emisión calorífica por convección desde el absorvedor al ambiente, así también protege de agentes externos.



**Figura 2. Esquema básico del colector**

**Fuente:** (Velasco, 2012)

Estos dispositivos STSC redireccionan la componente directa de la radiación solar que llega a la superficie de captación,  $A_c$  para que llegue a otra superficie de menos tamaño, que se llama superficie de absorción,  $A_{abs}$ , donde se sitúa el absorvedor. El cociente entre las áreas de estas dos superficies es uno de los indicadores más representativos del sistema; se llama razón de concentración geométrica,  $C_g$ . ver figura 3. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 3. Concentración Geométrica**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Los sistemas solares de concentración permiten un aprovechamiento más eficiente de la radiación solar que los sistemas sin concentración. Sobre todo porque, al alcanzar temperaturas más elevadas, el rendimiento termodinámico que se puede obtener es superior. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

## 2.2 Clasificación de los Colectores Solares

Existen muchos tipos de colectores solares térmicos que, aunque en base tengan el mismo principio, tienen características diferentes. Por ello se pueden clasificar de muchas formas.

### 2.2.1 En función del aprovechamiento solar

De forma muy general, se puede realizar una primera clasificación de los colectores que pueden funcionar con energía solar global, que son en consecuencia “estacionarios”, y los colectores que únicamente funcionan con radiación solar directa, y que necesitan un sistema de seguimiento del

recorrido del Sol a lo largo del día. A su vez, estos últimos colectores “seguidores” se subdividen en los que disponen de un único grado de libertad (absorvedores tubulares) y los que disponen de dos grados de libertad (absorvedores puntuales). (Velasco, 2012)

## **2.2.2 En Función de la Temperatura Del Fluido**

Esta división tiene en cuenta las temperaturas a las que puede llegar el fluido transportador, y en consecuencia, las posibles aplicaciones que pueden aprovecharse de dichas temperaturas. Además, el tipo de fluido que se utilice determina el rango de temperaturas de operación del campo solar, lo que acaba por influir en la obtención del rendimiento del ciclo de potencia. (Velasco, 2012)

- Temperatura baja ( $30\text{ }^{\circ}\text{C} - 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Este rango se consigue con colectores planos. Entre sus aplicaciones están las de calentamiento de aguas sanitarias y de piscinas, calefacción, secado, desalinización y destilación. Estos sistemas son en general híbridos ya que casi siempre son usados con apoyo de otros tipos de energía como la eléctrica, pues que la energía solar no siempre está disponible, lo que puede ocasionar un paro en el servicio que se ofrece. (Velasco, 2012)
- Temperatura media ( $100\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Se alcanzan con concentradores lineales o esféricos y se usan en procesos industriales (Industria láctea, procesamiento de residuos, etc.), así como en refrigeración, en procesos químicos (Producción de acetona) y de desalinización. (Velasco, 2012)
- Temperatura alta ( $400\text{ }^{\circ}\text{C} - 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Estas altas temperaturas se alcanzan gracias a los concentradores puntuales como los de discos parabólicos y los campos de heliostatos o centrales de torre. Se utilizan en centrales solares fotos térmicas, fotovoltaicas y

fotoquímicas, también en hornos solares para tratamientos térmicos e investigación de materiales. (Velasco, 2012)

### 2.2.3 En Función de la Razón De Concentración

Para esta clasificación, hay que introducir un nuevo parámetro, el factor o razón de concentración, denotado por la letra "C".

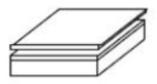
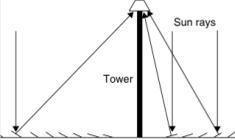
Antes de definirlo, hay que tener claros los dos elementos básicos dentro del colector, el concentrador y el receptor. El primero constituye el sistema óptico, y es la parte del colector que dirige la radiación sobre el receptor. Éste es el elemento del sistema donde la radiación es absorbida y se convierte en otro tipo de energía. (Velasco, 2012)

Por tanto, la razón de concentración superficial se define como el cociente del área de apertura del concentrador entre el área de absorción del receptor:

$$C = \frac{\text{Área de apertura}}{\text{Área de absorcion}} \quad (2.1)$$

## Cuadro 1

## Clasificación de colectores solares.

Movimiento	Colector	Croquis	Absorbe -dor	Razón concentración "C"	Rango Temperatura alcanzada [°C]
Estacionario	Colector de placa plana		Plano	1	30-80
	Colector de tubos de vacío		Plano	1	50-200
	Colector parabólico compuesto		Tubular	1-5 5-15	60-240 60-300
Seguimiento a un eje	Reflector lineal Fresnel (LFR)		Tubular	10-40	60-250
	Colector de canal cilíndrico		Tubular	15-50	60-300
Seguimiento a dos ejes	Colector cilíndrico parabólico CCP		Tubular	10-85	60-400
	Reflector de disco parabólico		Punto	600-2000	100-1500
	Torre Central		Punto	300-1500	150-2000

Fuente: (Kalogirou, 2009)

## 2.2.4 Colectores no Concentradores

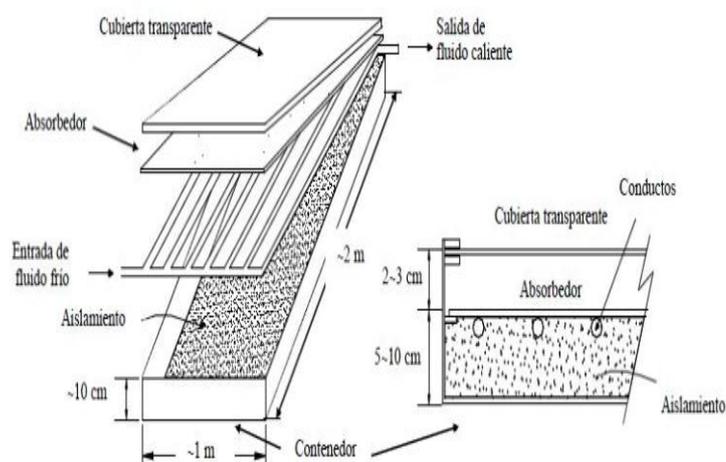
Para las aplicaciones de baja temperatura se emplean siempre colectores solares sin concentración, donde  $C = 1$ . Esto se debe a que la superficies de apertura y absorción son iguales, es decir, todos los elementos del subsistema solar tiene el mismo emplazamiento físico.

Este tipo de captadores no concentradores son, sin duda, los más utilizados en aplicaciones térmicas domésticas. Ya que su coste y régimen de temperaturas permiten su adaptación a las necesidades del usuario de a pie.

A su vez, se puede hacer una distinción dentro de los colectores no concentradores, atendiendo al fluido que circula por los tubos:

### 2.2.4.1 Captador Plano para Agua

En el ámbito doméstico y de bajas temperaturas, es el más utilizado para, por ejemplo, calentamiento de agua sanitaria.



**Figura 4. Esquema básico del colector plano para agua.**

**Fuente:** (Velasco, 2012)

#### **2.2.4.2 Captador Plano de Aire**

Tienen una respuesta rápida a la radiación, y no presentan problemas de congelación ni de corrosión. Por lo que el proceso constructivo se simplifica, pues la estanqueidad del sistema para evitar cualquier fuga de fluido no supone una exigencia. Aun así, el aire tiene una clara desventaja en comparación con el agua, pues el primero tiene una capacidad calorífica cuatro veces menor a la del agua.

Una de las aplicaciones más usuales en este tipo de captadores es la de su integración en las fachadas y techos de los edificios con objetivos energéticos. (Velasco, 2012)

#### **2.2.4.3 Tubos de Vacío**

Aprovechan el vacío creado en su interior para eliminar las pérdidas por convección y aumentar así la temperatura del fluido portador de calor con menos necesidad de superficie de captación efectiva. Estos captadores se utilizan de forma individual, en grupos, en haces o en sistemas de concentración lineal. (Velasco, 2012)

#### **2.2.5 Colectores Concentradores**

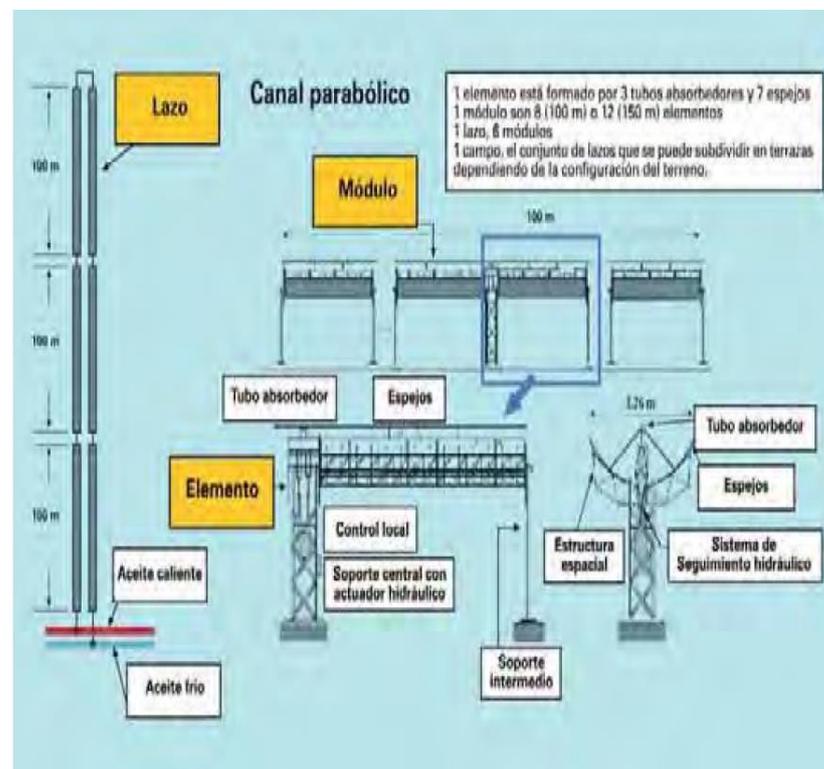
Para poder alcanzar mayores temperaturas en un colector, es necesario modificar el sistema de captación, de forma que se aumente la concentración. Esto se consigue en los colectores concentradores, que se pueden clasificar según dos características básicas: la geometría del absorbedor (concentración lineal o puntual) y la forma de la concentración (reflexión o refracción).

Aun teniendo en cuenta esta primera clasificación, todos ellos pueden concentrar la energía solar en un punto específico para conseguir

temperaturas muy elevadas que pueden cubrir las aplicaciones industriales, tales como generación de electricidad.

### 2.2.5.1 Canal Parabólico

Este tipo de concentrador está constituido por un espejo cilíndrico parabólico que refleja la radiación solar directa y posteriormente la concentra en el tubo receptor ubicado en la línea focal de la parábola. La radiación solar calienta al fluido que se encuentra en el interior del tubo absorbedor, estos concentradores pueden operar eficientemente hasta temperaturas de 400 °C. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 5. Configuración de un campo de canales parabólicos.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### **2.2.5.1.1 Componentes**

#### **2.2.5.1.1.1 El concentrador de canal Parabólico**

La función del concentrador es reflejar la radiación solar directa hacia la superficie del tubo absorbedor para que esta se transforme en energía térmica. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

La superficie del espejo cilíndrico parabólico se lo puede construir con chapas de aluminio pulido que tiene una alta reflectancia y ayuda a obtener una mejor radiación solar. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### **2.2.5.1.1.2 El tubo absorbedor**

Es el encargado de convertir la radiación solar concentrada en aumento de energía térmica del fluido de trabajo. Por lo general el tubo absorbedor puede ser un tubo de acero con recubrimiento superficial adecuado para aplicarlo hasta temperaturas por debajo de los 300 °C. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El tubo de vidrio que es el que rodea al tubo metálico esto se hace para que exista mayor concentración de la radiación solar y evitar pérdidas por convección en el tubo metálico. Además de aprovechar las propiedades transmisivas típicas de los vidrios, como la alta transmitancia de longitudes de onda corta del absorbedor para esto se realiza un tratamiento antirreflectante en las dos caras del vidrio y de esta forma conseguir una mayor transmitancia de la radiación solar y así obteniéndose el rendimiento óptico esperado del conjunto. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

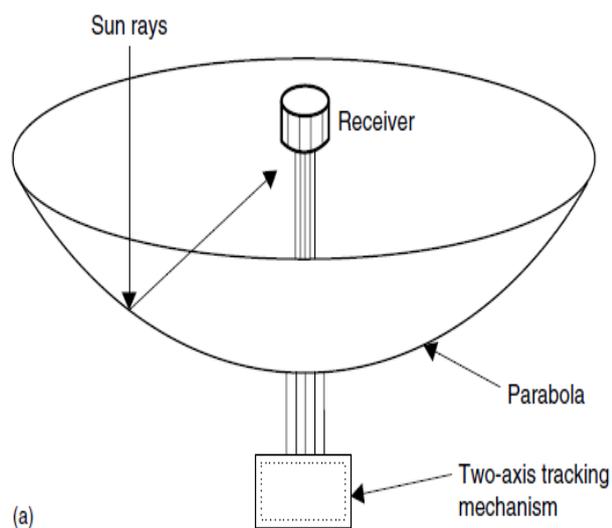
Por el interior del tubo absorbedor circula el fluido de trabajo. Existe una amplia variedad de fluidos térmicos para canales parabólicos, siendo los principales: (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

- Aceites o siliconas sintéticos.
- Aceites minerales.

- Sales Fundidas.
- Agua.
- Líquidos iónicos.
- Aire u otro gas.

### 2.2.6 Sistema de Disco Parabólico

El disco parabólico (DP), es un colector que su punto de enfoque sigue el sol en dos ejes, concentrar la energía solar en un receptor situado en el punto focal del disco. La estructura del disco debe rastrear completamente el sol para reflejar el haz en el receptor térmico. (Kalogirou, 2009)



**Figura 6. Colector de Plato Parabólico**

**Fuente:** (Kalogirou, 2009)

El receptor absorbe la energía solar radiante, convirtiéndola en energía térmica en el fluido en circulación. La energía térmica puede ser entonces convertida en electricidad mediante un motor-generador acoplado directamente al receptor o transportado a través de tuberías a un sistema de conversión de energía central. Sistemas de disco parabólico puede alcanzar temperaturas superiores a los 1500 °C. (Kalogirou, 2009)

### **2.2.6.1 Componentes**

#### **2.2.6.1.1 Concentrador**

La superficie de este concentrador tiene la forma de paraboloides de revolución. Su tamaño depende tanto de la potencia nominal y de la energía a generar en un cierto periodo de tiempo para unas determinadas condiciones de radiación solar y, también de los rendimientos asociados de los elementos que constituyen el sistema. La superficie reflectante se consigue a base de espejos de vidrio o de películas reflectante. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El sistema parabólico de este concentrador de estar constituido de un soporte y un mecanismo de seguimiento a los rayos del sol en dos ejes. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### **2.2.6.1.2 Receptor**

El receptor de un sistema de discos parabólicos tiene dos funciones fundamentales:

- a) Absorber la radiación solar reflejada por el concentrador.
- b) Transferir la energía absorbida al fluido de trabajo de la máquina térmica asociada. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

*Receptores de tubos directamente iluminados*, que permiten una adaptación directa del calentador de los motores Stirling convencionales. En estos receptores, el absorbedor está formado por un haz de tubos por donde circula el fluido de trabajo del motor. La radiación concentrada incide directamente sobre estos tubos y se transforma en energía térmica transmitiéndose al fluido de trabajo. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

*Receptores de reflujo.* Este tipo de receptores emplea un metal líquido (normalmente sodio), como fluido intermedio para la transmisión del calor por medio de su evaporación en la superficie del absorvedor y su condensación en los tubos por donde circula el fluido de trabajo. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 7. Receptor de tubos del Sistema Eurodish.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Se distinguen dos tipos de receptores de reflujo: uno es el receptor tipo pool boiler, donde una poza de metal líquido está siempre en contacto con el absorvedor y allí el líquido se evapora dirigiéndose hacia el calentador del motor. El segundo es el receptor tipo tubo de calor, en este caso el líquido metálico asciende por fuerzas de capilaridad a través de unas mechas situadas en la parte posterior del absorvedor, de donde se evapora para ir a condensar en el calentador del motor. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

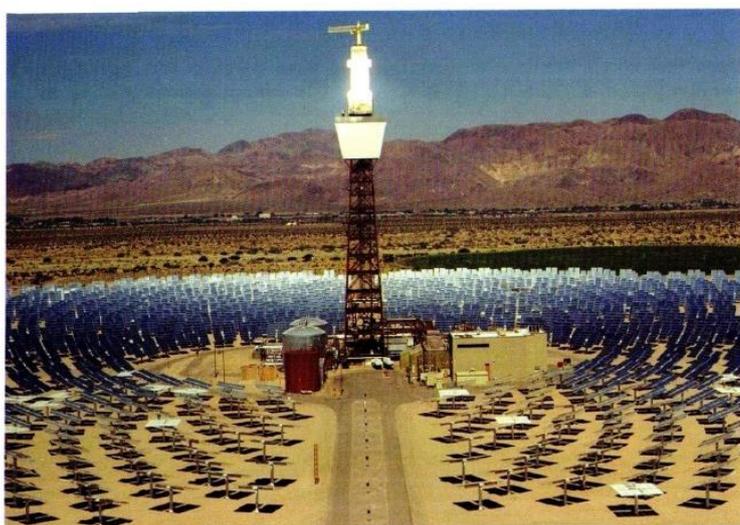
### **2.2.6.1.3 Sistema Generador**

El sistema generador está constituido por una máquina térmica, que sigue el ciclo termodinámico de potencia, y el generador propiamente dicho,

que transforma la energía mecánica en electricidad. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.2.7 Sistema de Receptor Central (Rc)

Es un conjunto de espejos móviles que están constituidos por un lente tipo Fresnel que concentra la radiación a un absorbedor que por lo general se encuentra colocado en una torre en su parte más alta, aquí se produce la transformación deseada de la radiación solar concentrada a energía térmica de un fluido de transporte. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 8. Planta de Receptor central Solar Two, Estados Unidos.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

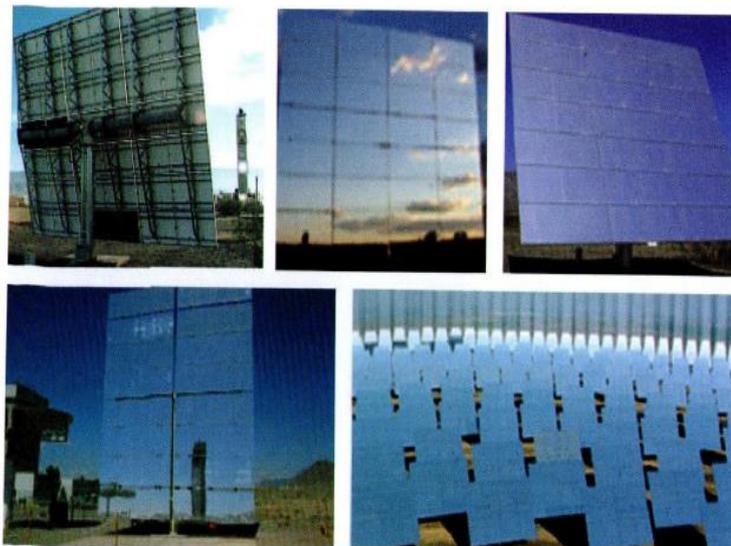
#### 2.2.7.1 Componentes

##### 2.2.7.1.1 El heliostato

Este instrumento sirve para hacer señales a larga distancia, reflejando un rayo de luz solar siempre en dirección fija, por medio de un espejo que, regido por un mecanismo sigue el movimiento aparente del sol. Un heliostato está compuesto básicamente por una superficie reflectante, una estructura soporte, mecanismos de movimiento y un sistema de control. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

La distribución de los heliostatos sobre el terreno responde a criterios de optimización técnico – económica que tiene en cuenta algunos parámetros tales como las sombras que se dan unos a otros, los bloqueos, interrupción de la radiación, la altura de la torre, los costes del terreno y de los distintos elementos que integran el sistema. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El campo de heliostatos puede ser campo norte o campo circular, según la latitud y tamaño de la planta. En general, en latitudes bajas y, dado que el sol esta mucho tiempo muy alto en la bóveda celeste, es mejor un campo circular que un norte. Por el contrario, en latitudes más altas son más adecuados los campos norte. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

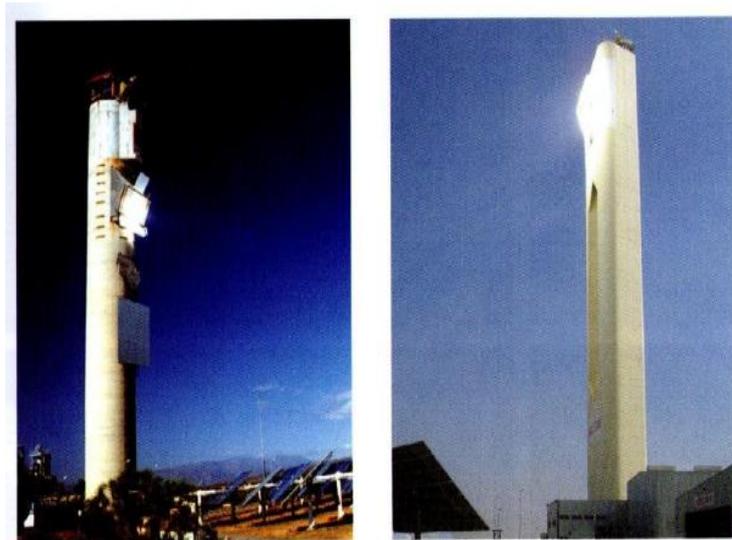


**Figura 9. Distintos tipos de heliostatos y campos de heliostatos.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### **2.2.7.1.2 La torre**

Es un elemento que sirve de soporte al receptor, que por lo general se debe ubicar a una altura sobre el nivel de los heliostatos para así evitar las sombras y bloqueos entre estos. El material más común para su construcción es el de hormigón y acero. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 10. Plataforma Solar Almería y torre de la PS 10.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.2.7.2.3 El receptor

Es el dispositivo donde se produce la transformación de la radiación solar concentrada en energía térmica. En cuanto a la geometría se pueden distinguir receptores de cavidad y externos. A su vez estos dos se pueden clasificar en planos, cilíndricos y semicilíndricos. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 11. Distintos tipos de receptores.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

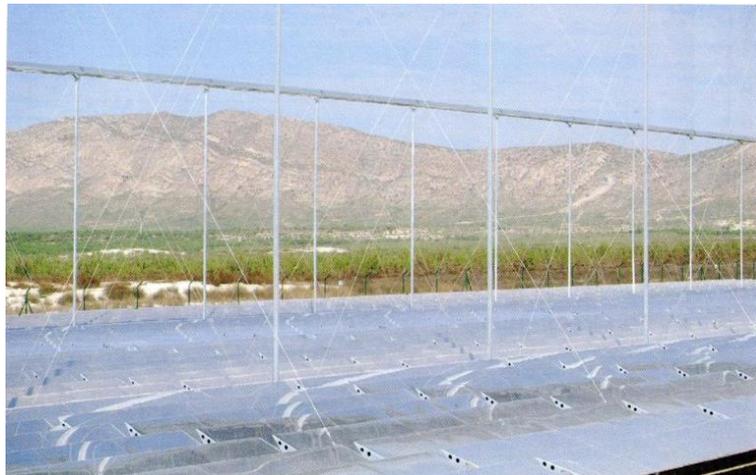
Para la transferencia de calor, podemos distinguir entre receptores de absorción directa y absorción indirecta. En cuanto a fluido de trabajo existen receptores de agua – vapor, ya sea con evaporación y sobrecalentamiento o

solo con evaporación, aire sales fundidas, sodio fundido. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.2.8 Concentradores Lineales de Fresnel

Estos concentradores al igual que los sistemas de receptor central, pero simulando un concentrador continuo es decir: Un canal parabólico, por medio de un conjunto de elementos filas de espejos ordenados de forma adecuada sobre un plano. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Por consiguiente, los Concentradores de Fresnel lineales son una alternativa de bajo coste a los sistemas de canal parabólico. Este sistema está compuesto por largas filas paralelas de espejos de anchura relativamente pequeña que giran alrededor de su eje longitudinal. Estos espejos pueden ser planos o estar curvados elásticamente, concentran la radiación solar sobre un receptor central fijo, suspendido a cierta distancia sobre el plano de los espejos en dirección del eje de rotación de los espejos, a diferencia de los sistemas de canal parabólico, que se mueve con el concentrador, haciendo necesario uso de tuberías flexibles o conexiones rotatorias. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 12. Concentrador Lineal Fresnel**

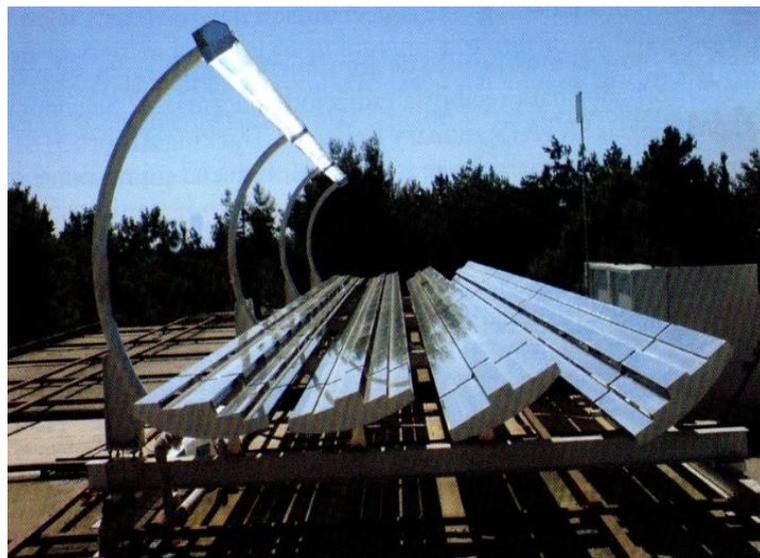
**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Esta geometría permite disponer dos o más receptores en paralelo, próximos entre sí, posibilitando así que parte de las filas de espejos sean

compartidas por dos receptores, de esta forma se optimiza el aprovechamiento del terreno y se reduce los bloqueos entre filas de espejos. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El campo solar puede desplegarse sobre un plano horizontal con seguimiento este-oeste o norte-sur, o sobre un plano inclinado en la dirección del eje polar, por lo tanto mejoramos el rendimiento geométrico. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El tubo absorbedor es el elemento más importante del receptor, la relación de concentración que se puede alcanzar con esta geometría es relativamente baja, del orden de 20 y no es necesario que el tubo de vidrio envolvente y recubrimientos costosos. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 13. Receptor de un Concentrador lineal Fresnel.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Uno de los puntos a destacar de estos sistemas es que son muy adecuados para la generación directa de vapor saturado en los tubos y este puede ser usado para una máquina de absorción, generación de electricidad o como aporte de calor a un proceso industrial. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.3 Control manual y sistema de seguimiento de los CCP

El sistema de seguimiento solar más común consiste en un dispositivo que gira los reflectores cilíndricos parabólicos alrededor de un solo eje. Para realizar la rotación se requiere un mecanismo de accionamiento automático que lo mueva de acuerdo con la posición del sol o también se lo puede realizar manualmente teniendo en cuenta que por cada hora el concentrador cilíndrico parabólico tiene que girar  $15^\circ$ . (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El control electrónico o manual será el encargado de mover al canal parabólico en dirección a donde se encuentra ubicado el sol. Los canales parabólicos que se encuentran conectados en serie forman un lazo y que a su vez se conectan en paralelo hasta conseguir la potencia térmica deseada. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.4 Análisis Geométrico

Dados en un plano una recta y un punto exterior, se llama parábola al lugar geométrico de los puntos del plano que equidistan de la recta y del punto.

El punto recibe el nombre de foco de la parábola y se le llamará F. La recta recibe el nombre de directriz.

Se llama eje de simetría de la parábola a la recta perpendicular a la directriz que pasa por el foco. Se denomina vértice de la parábola al punto donde la curva corta al eje; dicho punto se encuentra a igual distancia de la directriz y del foco, se designará al vértice con V. (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

Según la definición para cualquier punto M de la parábola se tiene: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$\overline{FM} = \overline{MQ} \tag{2.2}$$

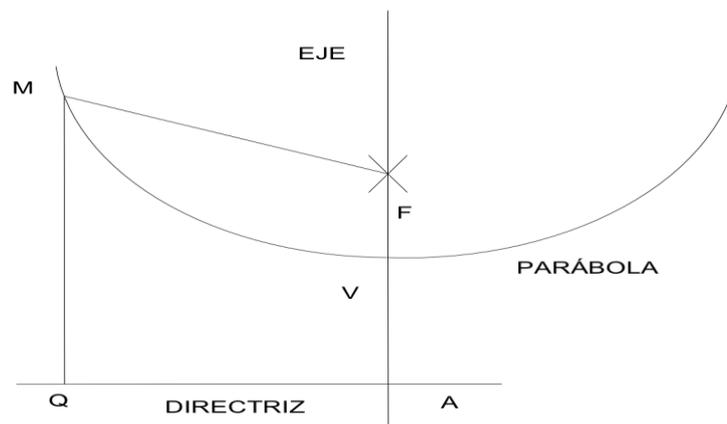
En particular, para el vértice V resulta:

$$\overline{AV} = \overline{VF}$$

(2.3)

Es decir,  $V$  es el punto medio del segmento  $\overline{AF}$ .

El segmento  $\overline{FM}$  que une un punto de la parábola con el foco de la parábola se denomina radio correspondiente a dicho punto. Véase la figura 14.



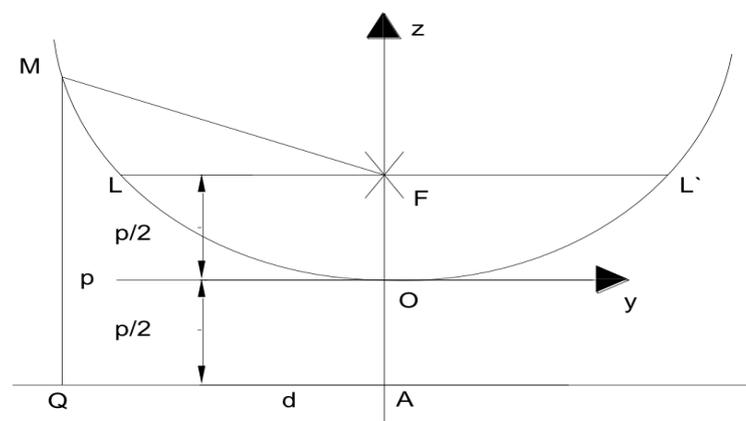
**Figura 14. Elementos de la parábola.**

**Fuente:** (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

#### 2.4.1 Ecuación de la parábola

Para llegar a la ecuación, se anexa a la figura 15 el sistema de ejes coordenados.

Conviene tomar como eje "z" el eje de la parábola, y como eje "y" la perpendicular a aquél trazada por el vértice de la curva es decir que  $V = O$ , es el origen de coordenadas. Véase la figura 16.



**Figura 15. Geometría de la Parábola.**

**Fuente:** (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

Sea  $d$  la directriz,  $F$  el foco,  $M \equiv (y, z)$  un punto arbitrario sobre la parábola y  $\overline{QM}$  la perpendicular a la directriz que contiene al punto  $M$ , que es paralela a  $\overline{FA}$ . (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$\overline{OA} = \overline{OF} = \frac{p}{2}$ ; siendo  $\frac{p}{2}$  la semidistancia de  $\overline{FA}$ . Las coordenadas de los puntos  $F$  y  $A$  son entonces  $(0, \frac{p}{2})$  para  $F$ ; y  $(0, -\frac{p}{2})$  para  $A$  respectivamente. (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

Tomando el punto genérico  $M \equiv (y, z)$  y recordando que:  $\overline{FM} = \overline{MQ}$

La distancia entre los puntos  $F$  y  $M$  es: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$\sqrt{y^2 + (z - \frac{p}{2})^2} \tag{2.4}$$

$$\overline{MQ} = z + \frac{p}{2} \tag{2.5}$$

Igualando, se tiene: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$\sqrt{y^2 + (z - \frac{p}{2})^2} = z + \frac{p}{2} \tag{2.6}$$

Elevando al cuadrado los miembros: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$y^2 + (z - \frac{p}{2})^2 = (z + \frac{p}{2})^2 \tag{2.7}$$

$$y^2 + z^2 - pz + \frac{p^2}{4} = z^2 + pz + \frac{p^2}{4} \tag{2.8}$$

$$y^2 = 2pz \tag{2.9}$$

La ecuación 2.9 es la ecuación de la parábola referida a su eje de simetría como eje  $z$  y a la tangente en el vértice como eje  $y$  y de las abscisas. (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$2p$ : es el doble de la distancia entre la directriz y el foco, y se llama parámetro.

También: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$p = 2F \tag{2.10}$$

Entonces: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$y^2 = 4Fz \tag{2.11}$$

Dada una parábola de boca  $B$  y distancia focal  $F$  véase figura 16. Se tiene las siguientes ecuaciones: (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

$$y^2 = \frac{F}{B} 4Bz \tag{2.12}$$

Como:

$$z = \frac{y^2}{4F} \tag{2.13}$$

En la boca de la parábola es:  $y = \frac{B}{2}$

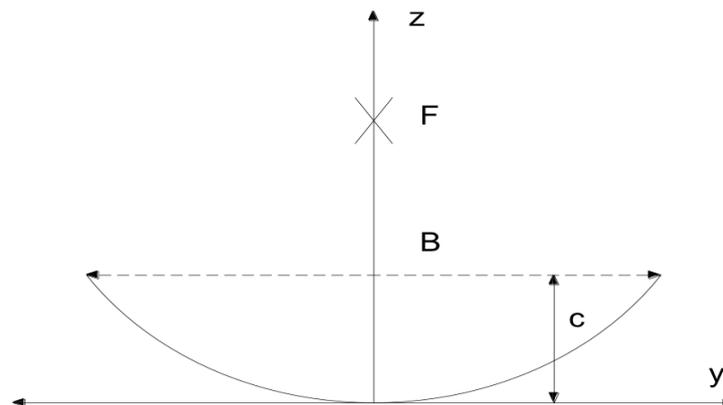
$$\text{Entonces } c = \frac{B^2}{16F} \quad \text{o, también} \quad c = \frac{B}{16\left(\frac{F}{B}\right)} \tag{2.14}$$

En donde:

$B$  = Boca de la parábola

$F$  = Distancia focal

$c$  = Profundidad de la parábola en el centro



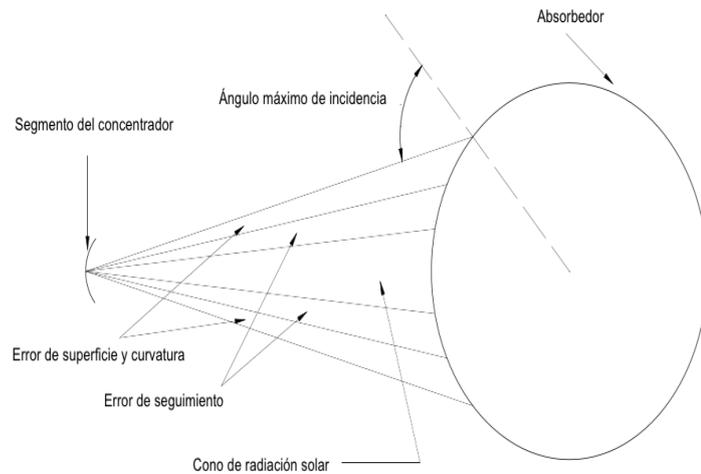
**Figura 16. Parámetros dimensionales de la Parábola.**

**Fuente:** (Barbieri, A. & Sodre , 2001)

Debe advertirse que en las ecuaciones (2.11) y (2.12), se han acomodado los términos para agrupar una relación de foco a boca ( $F/B$ ). Se verá más adelante la importancia de esta relación para el diseño de un reflector parabólico.

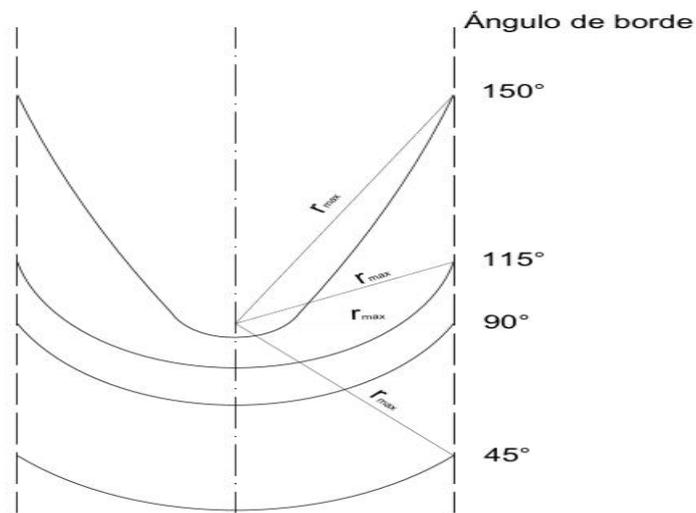
#### **2.4.2 Geometría del colector cilíndrico parabólico**

Las pérdidas térmicas son directamente proporcionales al diámetro del tubo receptor, para tener un receptor con el menor diámetro posible y así reducir las pérdidas térmicas, es necesario seleccionar un ángulo de borde para el reflector de tal forma que se logre minimizar la distancia máxima ( $r_{max}$ ) del reflector al foco, el cono de radiación aumenta su sección circular conforme se incrementa la distancia reflector - absorvedor, véase en la figura 18, ya que esta aumenta al irse alejando del foco; es por esto que se requiere reducir la distancia reflector - absorvedor. Un ángulo de borde de  $90^\circ$  reducirá dicha distancia- Véase la figura 17 (Almanza & Muñoz, 1993)



**Figura 17. Factores que intervienen en el diámetro del tubo receptor.**

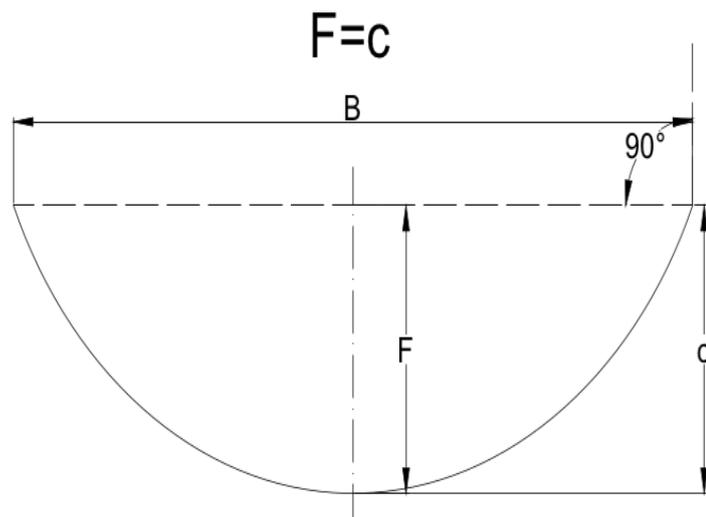
**Fuente:** (Almanza & Muñoz, 1993)



**Figura 18. Varios ángulos de borde para una apertura fija.**

**Fuente:** (Almanza & Muñoz, 1993)

Para que el ángulo de borde sea igual a  $90^\circ$ , véase la figura 19, la distancia focal  $F$  tiene que ser igual a la profundidad de la parábola  $c$ .



**Figura 19. Igualdad de Parámetros de la Parábola  $F = c$ .**

**Fuente:** (Almanza & Muñoz, 1993)

Reemplazando  $F$  en la ecuación (2.16) se puede calcular la profundidad de la parábola. (Barbieri, A. & Sodre, 2001)

$$c = \frac{B}{16\left(\frac{F}{B}\right)} \quad (2.15)$$

Si

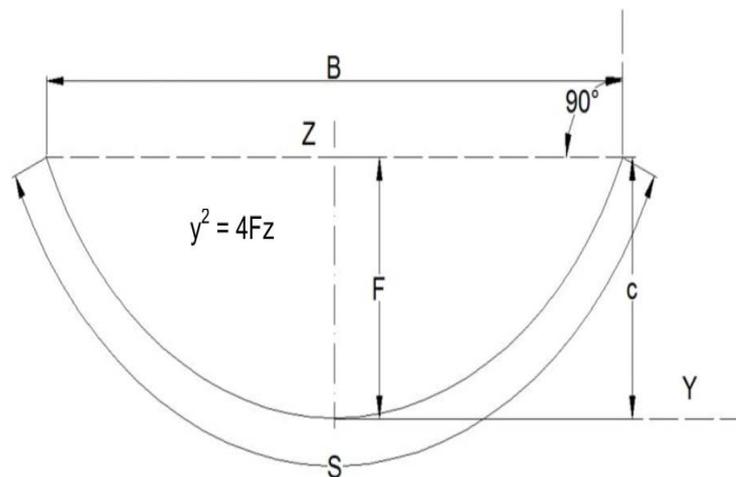
$$F = C \quad (2.16)$$

$$c = \frac{B}{16\left(\frac{c}{B}\right)} \quad (2.17)$$

Entonces

$$c = \frac{B}{4} \quad (2.18)$$

Encontrando el valor de “ $c$ ” se puede encontrar el valor de “ $F$ ” y este se reemplaza en la ecuación (2.11) para la ecuación de la parábola con su eje de simetría en el eje  $z$  y tangente en el vértice de las ordenadas. Véase la figura 20.



**Figura 20. Gráfico de la ecuación de la parábola.**

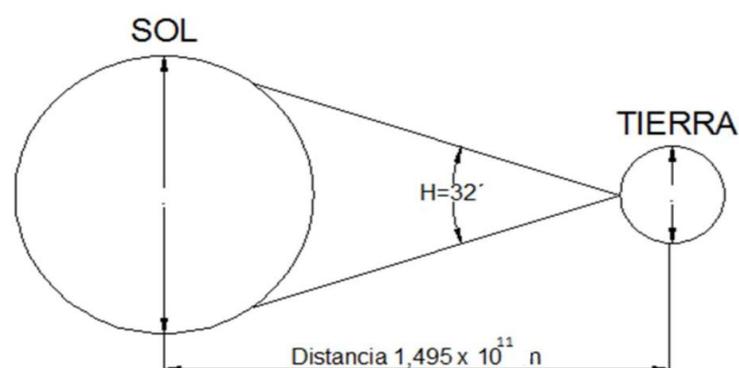
**Fuente:** (Almanza & Muñoz, 1993)

El cálculo de la longitud de curvatura  $S$  de la parábola, se realiza utilizando la ecuación diferencial para obtener la longitud de una curva (Gieck, 1975)

$$dS = \sqrt{1 + z'^2} * dy$$

(2.19)

El sol es asumido como una fuente de luz puntual pero esto no es cierto, los rayos de Sol no son paralelos, convergen en un punto de la superficie de la tierra formando un ángulo de  $32^\circ$  o  $0.00931$  rad. Véase la figura 21.



**Figura 21. Distancia tierra - sol y ángulo de aceptación.**

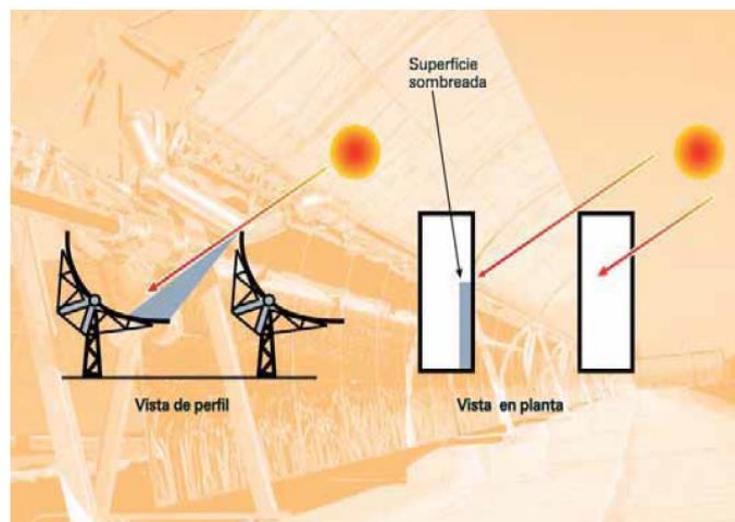
**Fuente:** (Duffie & Beckman, 1974)

## 2.5 Balance Energético de los CCP

La transformación de la radiación solar en energía térmica que se produce en el canal parabólico comporta una serie de procesos que conllevan unas pérdidas o rendimientos asociados. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.1 Pérdidas por sombras debido a la geometría de los CCP

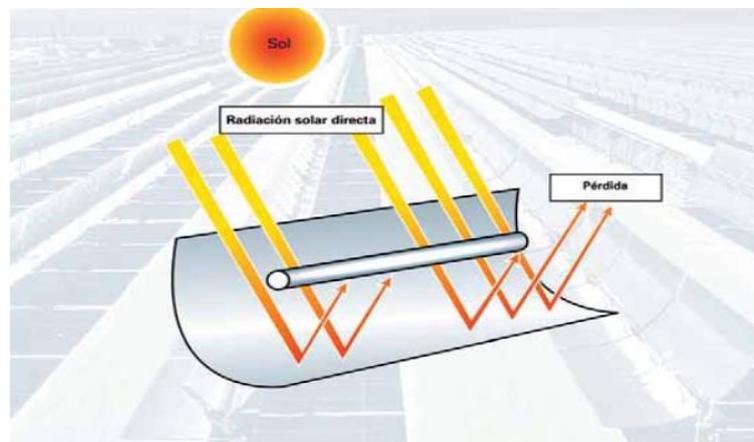
La geometría de los concentradores cilíndricos parabólicos lleva asociada una disminución de su área efectiva de captación. Existen pérdidas debidas a la posición relativa de los canales entre si también conocidas como pérdidas por sombras y están causadas por la sombra parcial que algunos canales pueden proyectar en los adyacentes. Obviamente, cuanto mayor distancia exista entre las filas paralelas de captadores, menor será la sombra que unos provocan sobre otros. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 22. Pérdidas geométricas por sombra, en perfil y en planta.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Las pérdidas geométricas inherentes a cada canal parabólico (CP) están causadas por el hecho de que estos dispositivos tienen un sistema de seguimiento en un solo eje y, por tanto, solo pueden girar alrededor de él. Esto da lugar a la existencia del llamado *ángulo de incidente*, que es el ángulo formado por la radiación solar directa que incide sobre el plano de apertura del captador y la normal a dicho plano. Este ángulo de incidencia depende de la hora y el día del año, en función de la posición del sol respecto del canal, y provoca que en sus extremos haya una pérdida de superficie reflectante útil. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



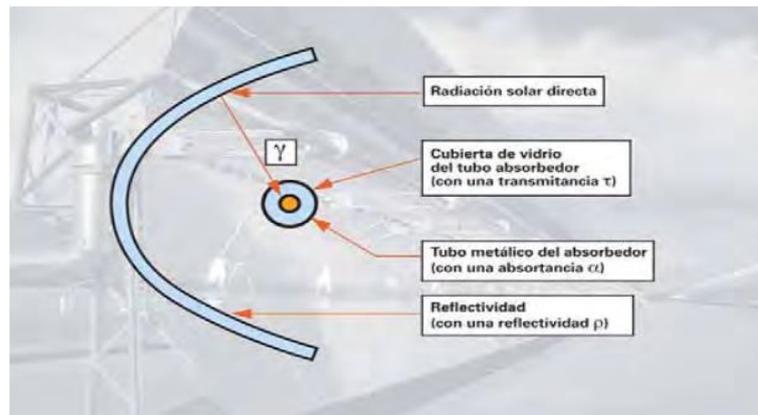
**Figura 23. Pérdidas geométricas por no intercepción.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### **2.5.2 Pérdidas por imperfecciones de elementos del sistema CCP**

Las imperfecciones de los diversos elementos que constituyen el sistema – superficie reflectante, tubo de vidrio, superficie del absorvedor, provocan que solo una parte de la radiación solar directa que incide sobre la superficie del concentrador parabólico llegue al fluido que circula por el interior del tubo absorvedor. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Parámetros que intervienen en las pérdidas de un concentrador cilíndrico parabólico. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 24. Resumen de pérdidas por los elementos del sistema CCP.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.2.1 Reflectancia

Las superficies reflectantes de los espejos no son perfectas, por lo que solo parte de la radiación incidente se refleja. Los valores típicos de la reflectancia están alrededor del 90%, que disminuyen al aumentar la suciedad de la superficie reflectora. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.2.2 Factor de intercepción

Una fracción de la radiación solar reflejada por los espejos no alcanza la cubierta de vidrio del tubo absorbedor debido a diversas causas, como imperfecciones microscópicas o macroscópicas de los espejos, errores de posicionamiento del canal o, incluso, el bloqueo que pueden suponer los soportes del tubo absorbente. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.2.3 Transmitancia de la cubierta de vidrio

El tubo absorbedor metálico está situado dentro de una cubierta tubular de vidrio para disminuir las pérdidas térmicas y proteger la superficie absorbente selectiva. Una fracción de la radiación solar reflejada por los espejos y que alcanza la cubierta de vidrio del tubo absorbedor no es capaz de atravesarlo. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.2.4 Absortancia

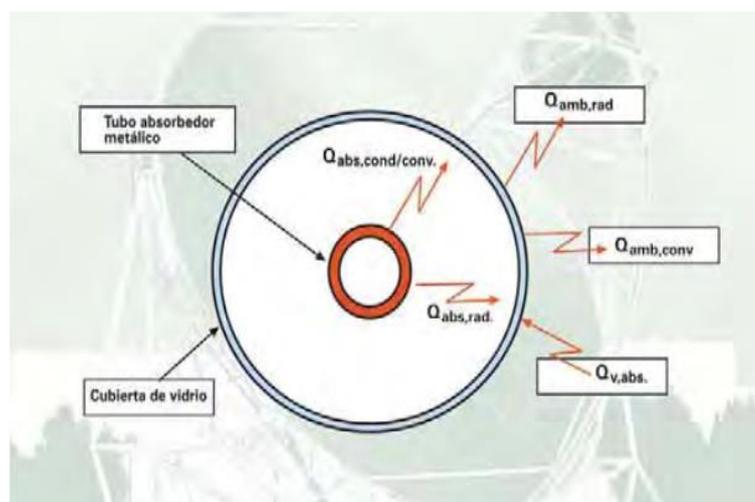
Este parámetro cuantifica la cantidad de radiación incidente sobre la superficie selectiva que ésta puede absorber. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El rendimiento óptico se calcula mediante el producto de la reflectancia, absortancia, transmitancia y factor de interceptación. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

$$\eta_{opt} = \rho \cdot \alpha \cdot \tau \cdot \gamma \quad (2.20)$$

### 2.5.3 Pérdidas térmicas

Se producen principalmente en dos lugares: en el tubo absorbedor y en las tuberías de fluido térmico, siendo bastante más importantes las del absorbedor. Las pérdidas térmicas asociadas al tubo absorbedor pueden ser: pérdidas de calor por conducción a través de los soportes de los tubos absorbedores; pérdidas por radiación, convección y conducción desde el tubo absorbedor hacia la cubierta de vidrio, y pérdidas por convección y radiación desde el tubo de vidrio al ambiente. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)



**Figura 25. Pérdidas térmicas.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

### 2.5.4 Rendimiento de un canal parabólico

La energía térmica útil que se obtiene es menor que la que daría en condiciones ideales si no existieran dichas pérdidas. Al cociente entre esos dos valores se le puede llamar eficiencia del dispositivo. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### 2.5.4.1 Rendimiento óptico con un ángulo de incidencia de 0°

Tiene en cuenta todas las pérdidas ópticas que tienen lugar en el captador con un ángulo de incidencia de 0°. Su valor viene dado por el producto de estos cuatro factores: reflectancia de los espejos, transmitancia del tubo de vidrio, factor de interceptación y absortancia de la superficie selectiva que recubre el tubo metálico absorbedor. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### 2.5.4.2 Rendimiento térmico

Considera todas las pérdidas térmicas que tienen lugar en el captador. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

#### 2.5.4.3 Rendimiento global

El rendimiento global o eficiencia de un concentrador solar se define como la relación entre la energía útil absorbida por el fluido portador del calor y la energía solar captada sobre su superficie. Considera todas las pérdidas, tanto ópticas como geométricas y térmicas, que tienen lugar en el captador. (Almanza & Muñoz, 1993)

$$\eta_c = \frac{\text{Energía útil que absorbe el fluido de trabajo}}{\text{Energía captada}}$$

$$\eta_c = \frac{Q_{ut}}{G_b \cdot A_a}$$

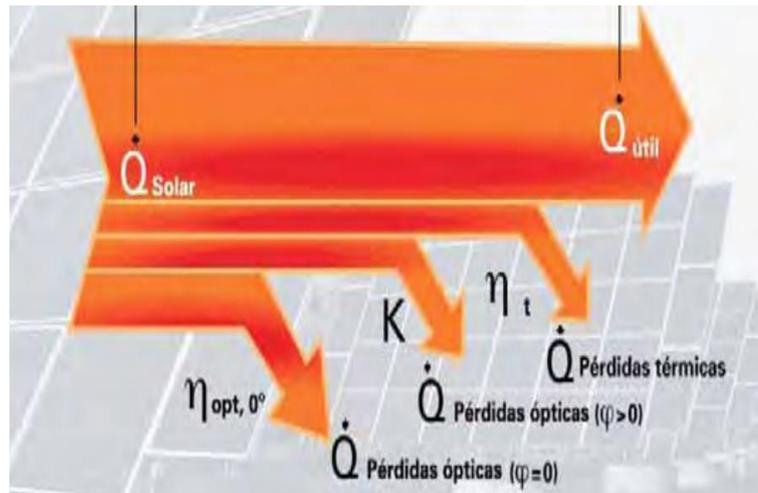
(2.21)

Donde:

$Q_{ut}$  Calor útil que absorbe el fluido de trabajo ( W ).

$G_b$  Radiación solar directa incidente sobre el concentrador ( W/m<sup>2</sup> ).

$A_a$  Área de apertura del concentrador ( m<sup>2</sup> ).



**Figura 26. Balance energético de un canal parabólico.**

**Fuente:** (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

El rendimiento óptico no depende de la radiación solar ni de la temperatura de trabajo del fluido, pero sí del grado de ensuciamiento del reflector, ya que afecta a la reflectancia de los espejos y a la transmitancia de la cubierta de vidrio del tubo absorbedor. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

Un valor típico aproximado del rendimiento óptico pico es 0,75, para un grado de limpieza del 100%. (Ruiz Hernández, Silva Pérez, & Bravo, 2009)

## CAPITULO III

### ESTUDIO DE LA RADIACIÓN SOLAR EN SANGOLQUÍ

#### 3.1 Introducción

Uno de los recursos que disponemos es el sol que es una estrella enorme, es un reactor nuclear, cuando su masa está trabajando se genera grandes fuentes de energía, que son destinadas hacia el planeta Tierra, algunas personas utilizan este recurso para varias aplicaciones en su diario vivir. Aproximadamente se tiene estimado que esta estrella 4.3 millones de toneladas de su masa por segundo entonces se podría decir que para quemar solo el 10% de su masa necesita 6000 millones de años, la energía solar es una fuente de energía renovable, en los últimos años ha estado cogido fuerza para la realización de proyectos. (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

La energía solar es una energía limpia que no contamina al medio ambiente, se la puede explotar de varias maneras tanto directa como indirectamente. (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

Para la explotación de la energía solar de forma indirecta se la realiza mediante la transformación de la atmosfera e hidrosfera, a comparación de la energía del viento que es explotada con sistemas eólicos y de las olas que se en centrales mareomotrices (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

Para la explotación de la energía solar de forma directa, se la puede clasificar por sus efectos tanto térmicos como fotonicos. La explotación por efectos térmicos se la utiliza para producir en los colectores solares y así calentar el agua, para la producción de vapor de agua y así generar energía eléctrica por medio de centrales termosolares, también se utiliza en la aclimatación de edificaciones, encambio la explotación para sistema fotonicos esto se da por el movimiento de los electrones en la capa del

último elemento semiconductor y producto de esto hay un impacto de los fotones provenientes del rayo solar. (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

Algunos de los factores que inciden en la radiación solar en la tierra y en determinadas superficies se los nombra y conceptualiza a continuación: (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

### **3.1.1 Relaciones geométricas entre el Sol y la Tierra**

#### **3.1.1.1 Latitud ( $\varnothing$ )**

Es la localización angular entre la línea Ecuador y un punto determinado de la tierra.  $-90^{\circ} \leq \varnothing \leq 90^{\circ}$ .

#### **3.1.1.2 Declinación ( $\delta$ )**

Es la variación angular del sol al medio día con respecto al plano Ecuador -  $23.45^{\circ} \leq \delta \leq 23.45^{\circ}$ .

#### **3.1.1.3 Ángulo Horario ( $\omega$ )**

Es el desplazamiento angular del Sol con respecto al meridiano local por la rotación de la Tierra en el eje en  $15^{\circ}$  por hora.

#### **3.1.1.4 Ángulo de Incidencia ( $\theta$ )**

Ángulo entre la radiación directa en una superficie y la recta normal a dicha superficie.

#### **3.1.1.5 Ángulo Zanith ( $\theta_z$ )**

Ángulo entre la recta vertical o normal y la línea del Sol a la Tierra. Representa el ángulo de incidencia de la radiación directa en un plano horizontal.

### 3.1.1.6 Ángulo altitud solar ( $\alpha_s$ )

Ángulo entre la línea horizontal y la línea del Sol a la Tierra. Es el complemento del ángulo Zenith.

### 3.1.1.7 Ángulo Azimuth en una superficie ( $\gamma$ )

Es la desviación de la proyección en un plano horizontal de la normal a la superficie del meridiano local  $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ .

Para el estudio en generación eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos; se aclaran algunos conceptos geométricos en la figura 27.

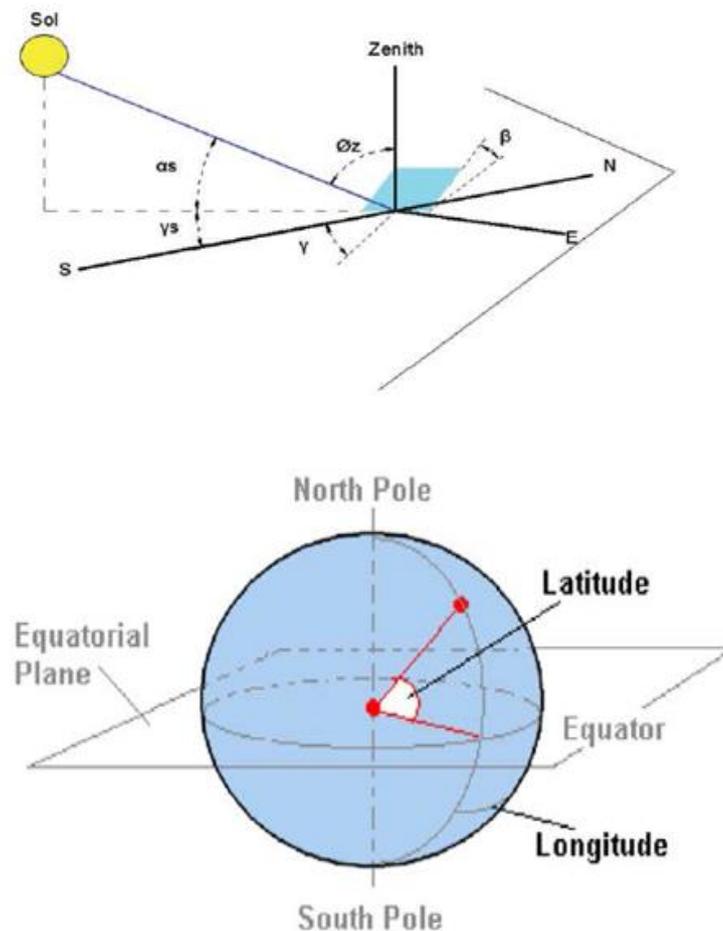


Figura 27. Esquema de conceptos geométricos Sol - Tierra.

Fuente: (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

### 3.2 Radiación Solar

La energía de la radiación solar, que es diferente en la parte exterior de la atmosfera que sobre la superficie de la tierra esta compuesta de un conjunto de frecuencias y longitudes de onda distintas, las cuales forman el espectro de la radiación solar incidente en la tierra presentando cada una un distinto nivel de energía. (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

La energía de los rayos solares se pueden calcular por la fomula de Planck, referente a la radiación emitida por un cuerpo negro ideal. (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014, pág. 24)

$$E = h * \nu \tag{3.1}$$

Donde:

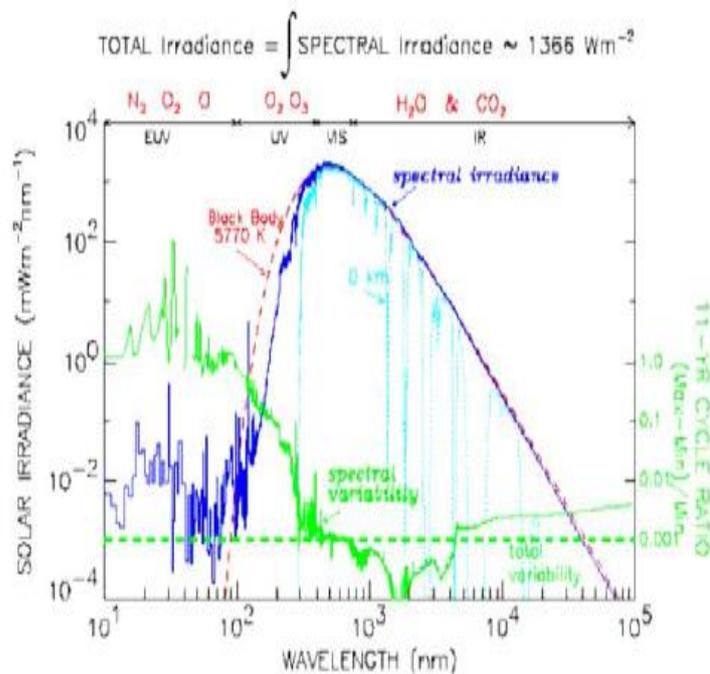
E: Energía de los fotones.

h: Constante de Planck,  $6.625 * 10^{-34} Js$ .

$\nu$ : Frecuencia de oscilación de los fotones.

La longitud de onda ( $\lambda$ ) y la frecuencia (f) de las ondas se relacionan por la ecuación: (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014, pág. 25)

$$\lambda = \frac{c}{f} \tag{3.2}$$



**Figura 28. Espectro de Radiación Solar.**

**Fuente:** (Constante Segura & Palacios Chacón, 2014)

De lo anterior, se puede concluir que algunos fotones de poca energía no pueden penetrar la atmosfera siendo este un componente de la diferencia entre la radiación solar presente en la parte exterior de la Tierra y en su superficie.

### 3.2.1 Radiación Solar en la Ciudad de Sangolquí

El atlas solar del Ecuador de donde se va a sacar algunos datos de la Radiación Solar de la ciudad de Quito fue elaborado hace algún tiempo por la Corporación para la Investigación Energética (CIE) y el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC). En este atlas se encuentra valores de radiación global, directa y difusa para todos los meses del año y provincias del país, exceptuando Galápagos.

Tabla 1

## Radiación media diaria mensual de la ciudad de Quito.

MES	RADIACIÓN GLOBAL (Wh/m <sup>2</sup> /dia)
Enero	4950
Febrero	4950
Marzo	4950
Abril	4800
Mayo	4800
Junio	4800
Julio	5100
Agosto	5400
Septiembre	5400
Octubre	5100
Noviembre	5250
Diciembre	5100
Promedio	5050

Fuente: (CONELEC, 2008)

El promedio de la Radiación diaria mensual en la ciudad de Sangolquí según los datos del atlas solar (CONELEC) es de 5050 W/h/m<sup>2</sup>/día.

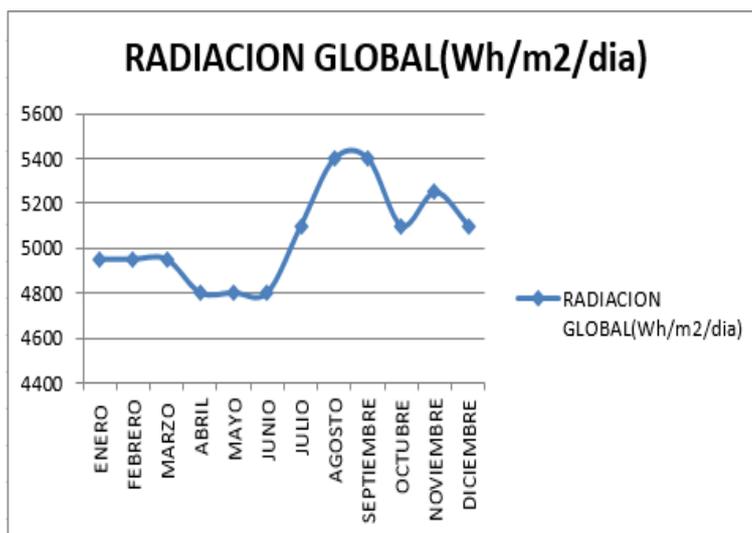


Figura 29. Radiación media diaria mensual de la Ciudad de Quito.

### 3.2.2 Radiación Solar Extraterrestre

En distintas fechas del año, es decir al comienzo del año por el 3 de Enero cuando el sol se encuentra más cerca de la tierra un valor aproximado es de 1400 (W/m<sup>2</sup>); y el 4 de Julio cuando el sol está más alejado de la tierra un valor es de 1330 (W/m<sup>2</sup>). En el transcurso del año, la radiación extraterrestre medida en un plano normal a su dirección, varía dentro de estos dos límites. Su valor, con un error del 3.3 % se puede calcular con la ecuación. (Kalogirou, 2009)

$$G_{on} = G_{sc} \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \quad (3.3)$$

Donde  $G_{on}$  es la dirección extraterrestre en el enésimo día del año, medida en un plano normal a su dirección, y  $G_{sc}$  es la constante solar.

La radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal.  $\overline{H}_o$ , se utiliza para determinar a su equivalente terrestre,  $\overline{H}$ . Su valor para cada mes en función de la latitud se expone en la tabla 2.

**Tabla 2**

**Radiación extraterrestre media diaria mensual, ( $\overline{H}_o$ ) (MJ/m<sup>2</sup>).**

Latitud	0
Enero	36.2
Febrero	37.4
Marzo	37.9
Abril	36.8
Mayo	34.8
Junio	33.5
Julio	33.9
Agosto	35.7
Septiembre	37.2
Octubre	37.3
Noviembre	36.4
Diciembre	35.6

Fuente: (Kalogirou, 2009)

### 3.3 Técnicas de Estimación de la Radiación Solar

#### 3.3.1 Método de Armstrong Page

Este método relaciona ciertas variables para determinar el recurso solar, mediante el cual se determina el aporte solar en una determinada superficie terrestre y que va a ser variante de acuerdo al mes que nos encontremos. (Mena Coba, 2013)

Para la utilización de este método es necesario que conozcamos la latitud a la que se encuentra nuestra localidad de estudio, el ángulo de inclinación en el que se encuentra ubicado el colector solar, factor climático y factor albedo, estos factores oscilan entre 0 y 1 de acuerdo a las características de la ubicación del colector. (Mena Coba, 2013)

Para nuestro estudio los datos de la localidad son los siguientes: (Mena Coba, 2013)

- **Lugar:** Escuela Politécnica del Ejercito.
- **Ciudad:** Sangolquí.
- **Cantón:** Rumiñahui.
- **Provincia:** Pichincha.
- **Latitud:** S 0° 18' 37"
- **Longitud:** W 78° 26' 28,1"

La radiación media diaria mensual, de la ciudad de Quito. Es oportuno comparar los valores de esta tabla con los obtenidos por la Ecuación 3.4, que como se recuerda es de la forma: (Mena Coba, 2013)

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_o} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}}$$

(3.4)

Donde  $\bar{H}_o$  es la radiación extraterrestre media diaria mensual sobre una superficie horizontal,  $\bar{n}$  el número de horas con sol brillante en el mes y  $\bar{N}$  el número total de horas con luz de día en el mes. En el atlas solar publicado

por la OLADE en 1987 (OLADE, 1987) se confirió a las constantes  $a$  y  $b$  los valores de 0.29 y 0.42 para la región Sierra, respectivamente. En este atlas también se indican los valores mensuales de  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$  para la ciudad de Quito.

**Tabla 3**

**Valores de  $\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$  para la ciudad de Quito.**

Mes	$\frac{\bar{n}}{\bar{N}}$
Enero	0.54
Febrero	0.43
Marzo	0.4
Abril	0.41
Mayo	0.49
Junio	0.52
Julio	0.64
Agosto	0.59
Septiembre	0.48
Octubre	0.53
Noviembre	0.52
Diciembre	0.55

Fuente: (OLADE, 1987)

Ejemplo de cálculo para el mes de enero:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}}$$

$$H = \bar{H}_0 \left( a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right)$$

$$\bar{H}_0 = 36.2 \times 10^6 \frac{J}{m^2} \times \frac{1 h}{3600 s} = 10055.55 \frac{W \cdot h}{m^2}$$

$$H = 10055.55 \times (0.29 + 0.42(0.54))$$

$$H = 5197 \frac{W \cdot h}{m^2 \text{ día}}$$

Tabla 4

## Comparación de la radiación del CONELEC y Armstrong Page.

MES	Radiación Global (Wh/m <sup>2</sup> /día)		Error (%)
	Atlas Solar	Método de Armstrong Page (Ec 3.4)	
Enero	4950	5197	4.98
Febrero	4950	4889	-1.23
Marzo	4950	4822	-2.58
Abril	4800	4725	-1.56
Mayo	4800	4725	-0.14
Junio	4800	4731	-1.43
Julio	5100	5262	3.17
Agosto	5400	5333	-1.24
Septiembre	5400	5080	-5.92
Octubre	5100	5311	4.13
Noviembre	5250	5140	-2.09
Diciembre	5100	5152	1.01

Fuente: (CONELEC, 2008)

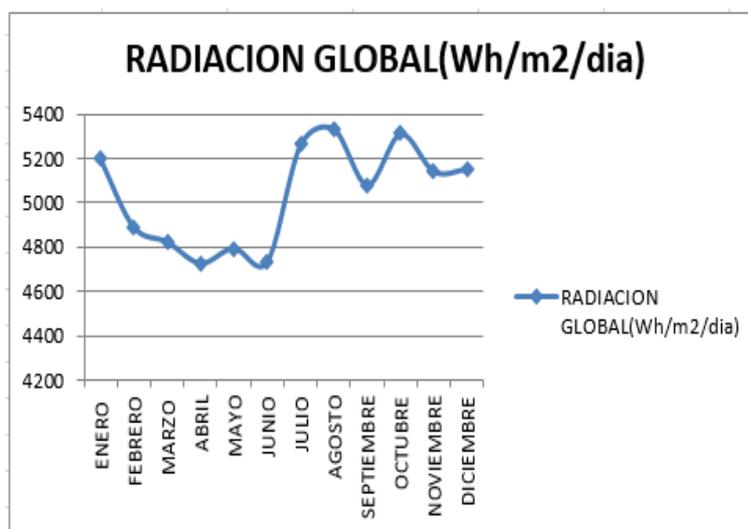
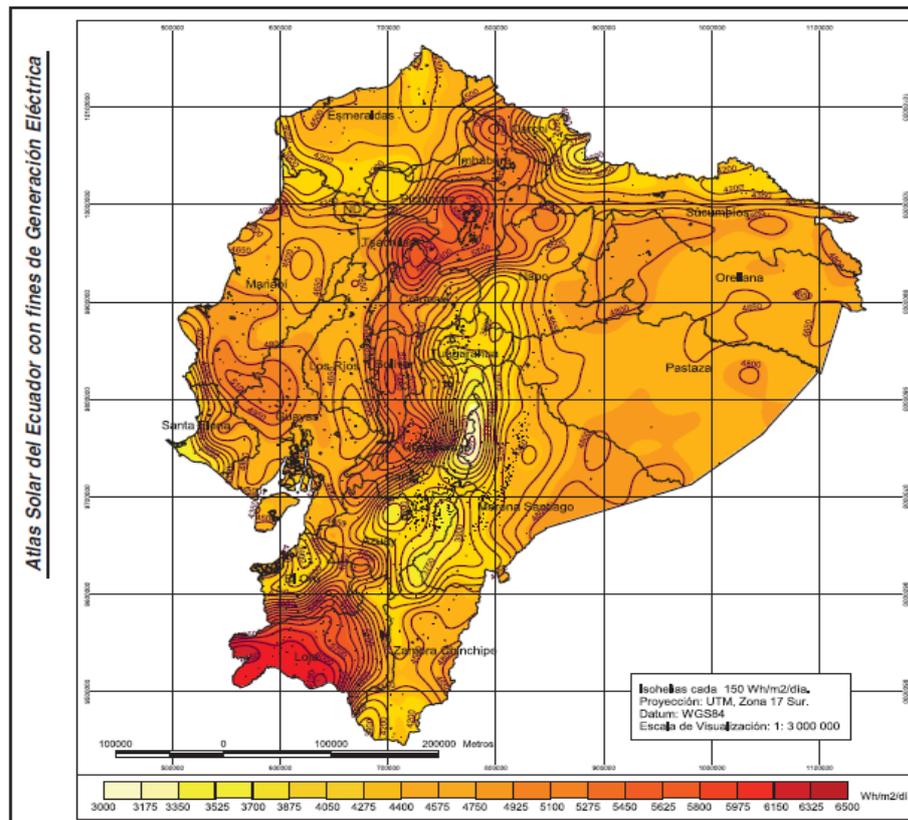


Figura 30. Comparación de la Radiación del Conelec vs Armstrong Page.

En el siguiente mapa proporcionado por el CONELEC se puede observar los datos de la radiación global para el mes de Agosto.

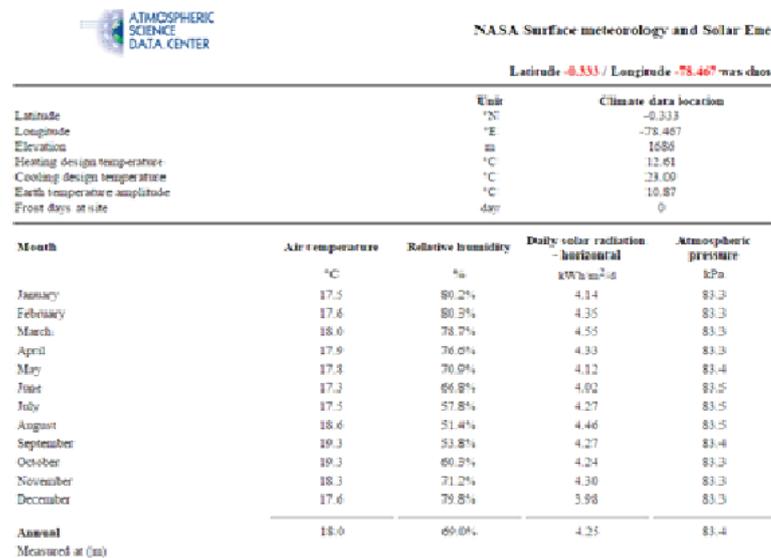


**Figura 31. Mapa de Insolación global del Ecuador para el mes de enero.**

**Fuente:** (CONELEC, 2008)

Según datos estudiados por el CONELEC nos indica que la radiación diaria más alta es en los meses de Agosto y Septiembre con un valor de  $5.4 \frac{KWh}{m^2 d}$  respectivamente y la menor en los meses de Abril, Mayo, Junio con un valor de  $4.8 \frac{KWh}{m^2 d}$  respectivamente, esto se hizo en comparación a los otros meses del año 2015.

En la NASA Surface meteorology and Solar Energy para poder obtener las horas de sol pico anuales se procede a ingresar los valores de latitud de -0.33 y de longitud -78.45 de la ciudad de Sangolquí



ATMOSPHERIC SCIENCE DATA CENTER		NASA Surface meteorology and Solar Energy	
Latitude -0.333 / Longitude -78.467 mas datos			
	Unit	Climate data location	
Latitude	°N	-0.333	
Longitude	°E	-78.467	
Elevation	m	1686	
Heating design temperature	°C	12.65	
Cooling design temperature	°C	23.00	
Earth temperature amplitude	°C	10.87	
Frost days at site	day	0	

Month	Air temperature °C	Relative humidity %	Daily solar radiation - horizontal kWh/m <sup>2</sup> -d	Atmospheric pressure kPa
January	17.5	80.2%	4.14	83.3
February	17.6	80.3%	4.35	83.3
March	18.0	78.7%	4.55	83.3
April	17.9	76.0%	4.33	83.3
May	17.8	70.0%	4.12	83.4
June	17.2	66.8%	4.02	83.5
July	17.5	57.8%	4.27	83.5
August	18.6	51.4%	4.46	83.5
September	19.3	53.8%	4.27	83.4
October	19.3	60.3%	4.24	83.3
November	18.3	71.2%	4.30	83.3
December	17.6	79.8%	3.98	83.3
<b>Annual</b>	<b>18.0</b>	<b>69.0%</b>	<b>4.25</b>	<b>83.4</b>

Measured at (m)

Figura 32. Datos de la Radiación diaria mensual por la NASA.

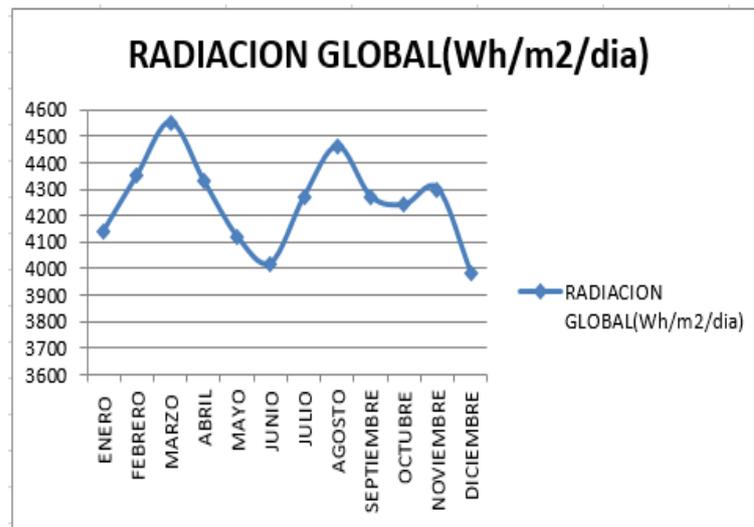
Fuente: (NASA)

Tabla 5

Comparación de la radiación de la NASA y Armstrong Page.

MES	Radiación Global (Wh/m <sup>2</sup> /día) NASA	Método de Armstrong Page (Ec 3.4)	Error (%)
Enero	4140	5197	25.53
Febrero	4320	4889	12.39
Marzo	4550	4822	5.97
Abril	4330	4725	9.12
Mayo	4120	4793	16.33
Junio	4020	4731	17.68
Julio	4270	5262	23.23
Agosto	4460	5333	19.57
Septiembre	4270	5080	18.96
Octubre	4240	5311	25.25
Noviembre	4300	5140	19.53
Diciembre	3980	5152	29.44

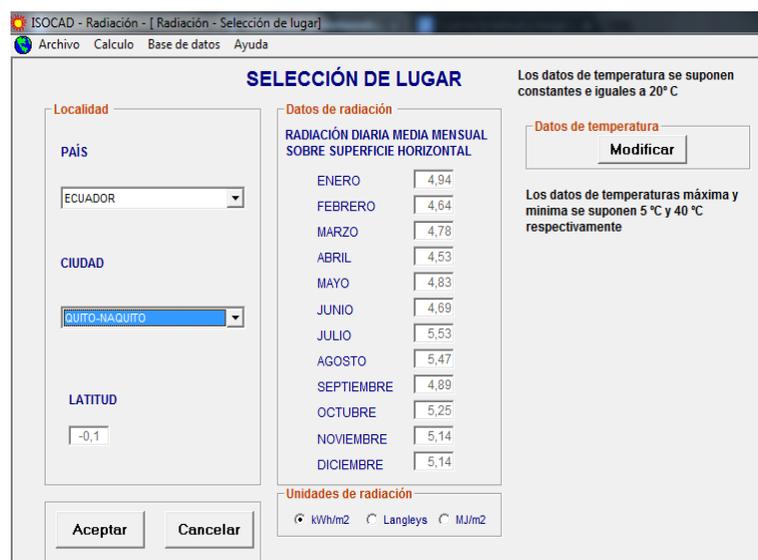
Fuente: (NASA)



**Figura 33. Comparación de la Radiación de la NASA vs Armstrong Page.**

Según datos estudiados por la NASA nos indica que la radiación diaria del mes de Marzo es la más alta con un valor de  $4.55 \frac{KWh}{m^2d}$  y la del mes de Diciembre es la menor con un valor de  $3.98 \frac{KWh}{m^2d}$  en comparación a los otros meses del año 2015.

En el programa de Isocad al Ingresa la Latitud de 0.1 y señalando que el País es Ecuador nos da los datos de la radiación diaria mensual.



**Figura 34. Radiación diaria mensual por el programa ISOCAD.**

Tabla 6

## Comparación de la radiación de ISOCAD y Armstrong Page.

MES	Radiación Global (Wh/m <sup>2</sup> /día)		Error (%)
	ISOCAD	Método de Armstrong Page (Ec 3.4)	
Enero	4940	5197	5.20
Febrero	4640	4889	5.36
Marzo	4780	4822	0.87
Abril	4530	4725	4.30
Mayo	4830	4793	-0.76
Junio	4690	4731	0.87
Julio	5530	5262	-4.84
Agosto	5470	5333	-2.50
Septiembre	5890	5080	-13.75
Octubre	5250	5311	1.16
Noviembre	5140	5140	0
Diciembre	5140	5152	0.233

Fuente: (ISOCAD)

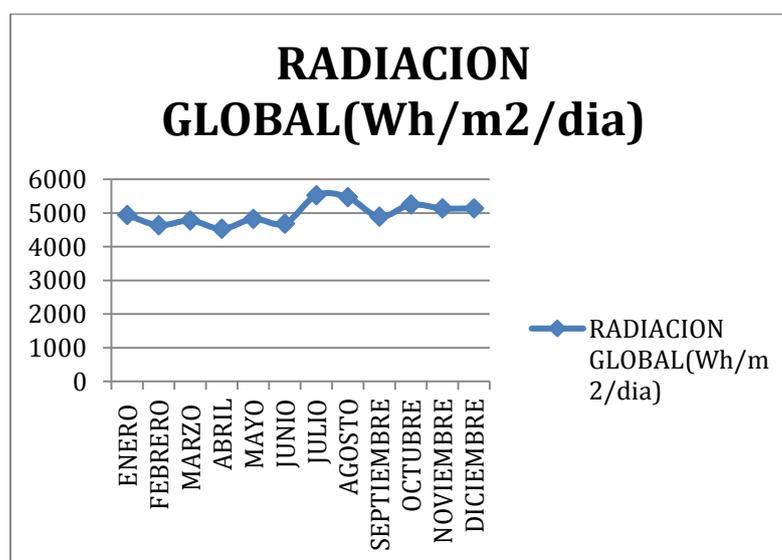


Figura 35. Comparación de la Radiación de ISOCAD vs Armstrong Page.

Según datos estudiados por el programa ISOCAD nos indica que la radiación diaria del mes de Septiembre es la más alta con un valor de 5.89  $\frac{KWh}{m^2 d}$  y la del mes de Abril es la menor con un valor de 4.53  $\frac{KWh}{m^2 d}$  en comparación a los otros meses del año 2015.

En conclusión los valores de radiación media diaria mensual calculados con el método de Armstrong Page tienen una buena aproximación con los datos suministrados por el atlas solar del Ecuador. Sin embargo, es necesario indicar que la información en la que se basa este atlas no proviene de mediciones directas, sino de un modelo que estima la radiación solar sobre una superficie horizontal en cualquier lugar de la Tierra. Según el CONELEC, el error generado por este modelo es bajo, afirmando que esta situación ha sido verificada con mediciones realizadas por estaciones meteorológicas.

## CAPITULO IV

### DISEÑO Y SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONCENTRACIÓN

#### 4.1 Diseño Térmico

##### 4.1.1 Geometría del Concentrador

Para el diseño del canal parabólico, se cuenta con una plancha de aluminio cuyas dimensiones son de 3 x 1.20 m. Se toma el lado de 1.20 m como lado curvo de parábola puesto que estructuralmente es más sencillo un soporte para una abertura menor.

Si sabemos que el diámetro de la parábola es de 1.20 m entonces se procede a determinar la distancia focal que debe estar en el rango de  $0.25 \leq \frac{f}{D} \leq 0.6$ , recomendado para el diseño de la geometría de los concentradores cilíndricos parabólicos.

Escogiendo:

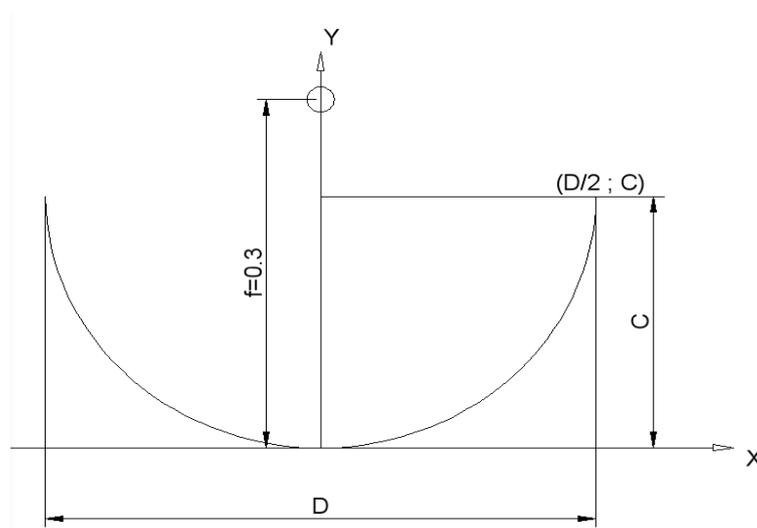
$$\frac{f}{D} = 0.25 \quad (4.1)$$

$$f = 0.25 \times D$$

$$f = 0.25 \times 1.2$$

$$f = 0.30 \text{ m}$$

Teniendo una parábola de boca  $D$  y distancia focal  $f$  véase figura 35.



**Figura 36. Geometría del Concentrador.**

Con la ecuación de la parábola:

$$x^2 = 4fy \tag{4.2}$$

Donde:

$$y = c$$

Profundidad de la parábola en el centro  $c = \frac{x^2}{4f}$

La boca de la parábola es:  $x = \frac{D}{2}$

Reemplazando los parámetros en la ecuación general de la parábola se tiene:

$$\frac{D^2}{4} = 4fc \tag{4.3}$$

$$c = \frac{D}{16\left(\frac{f}{D}\right)}$$

$$c = \frac{1.2}{16(0.25)}$$

$$c = 0.30 \text{ m}$$

Entonces las dimensiones de la parábola quedarían así: Foco = 0.30 m, Diámetro = 1.2 m, Profundidad en el centro = 0.30 m, Longitud = 1.5 m

#### 4.1.1.1 Análisis Térmico del Reflector

El calor útil es el que se tendrá en cada uno de los reflectores y se lo representa por la siguiente formula. (Almanza, 1993, pág. 80)

$$Q_u = Q_{abs} - Q_p \tag{4.4}$$

Donde:

$Q_u$  Calor útil que absorbe el fluido de trabajo (W).

$Q_{abs}$  Calor efectivo que llega al tubo absorvedor (W).

$Q_p$  Calor total de pérdidas (W).

Cabe mencionar que el calor perdido están incluidas las pérdidas por conducción y convección que se obtiene desde el tubo absorbedor. (Almanza, 1993, pág. 80)

Entonces:

$$Qp = Uc[Tc - To]Ar \quad (4.5)$$

Uc Coeficiente global de transferencia de calor por pérdidas en el sistema de concentración ( $W/m^2K$ ).

Tc Temperatura del Fluido de Trabajo ( $^{\circ}K$ )

To Temperatura Ambiente ( $^{\circ}K$ )

El calor absorbido por la cubierta de vidrio viene dado por la siguiente ecuación en la que intervienen los factores como el rendimiento óptico, área de apertura e irradiancia. (Almanza, 1993, pág. 80).

$$Qabs = \eta_o AaGd \quad (4.6)$$

El rendimiento óptico en el tubo absorbedor se obtiene: (Almanza, 1993, pág. 91)

$$\eta_o = \rho_R \tau \alpha \gamma F F_t \quad (4.7)$$

Este rendimiento óptico está compuesto por algunos coeficientes que se mencionan a continuación.

$\rho_R$  : Reflectividad del espejo  $0.75 \leq \rho_R \leq 0.85$

$\tau$  : Transmitancia del vidrio  $0.9 \leq \rho_R \leq 0.95$

$\alpha$ : absortancia del tubo de cobre, pintura mate  $0.9 \leq \rho_R \leq 0.95$

$\gamma$ : Factor de forma que depende de los errores en la pendiente del espejo, dispersion que sufre la radiacion  $0.9 \leq \rho_R \leq 0.95$

$F$  : Error de seguimiento  $0.9 \leq \rho_R \leq 0.95$

$F_t$  = Fraccion de apertura no sombreada  $0.9 \leq \rho_R \leq 0.95$

Remplazando la ecuación 4.5 en la 4.4 se obtiene que calor útil es:  
(Almanza, 1993, pág. 80)

$$Q_u = Q_{abs} - U_c[T_c - T_o]A_r \quad (4.8)$$

Reemplazando todos los valores mencionados anteriormente se obtiene un rendimiento óptico de 0.66 como se puede observar.

$$\begin{aligned} \eta_o &= \rho_R \tau \alpha \gamma F F_t \\ \eta_o &= (0.85)(0.95)(0.95)(0.95)(0.95)(0.95) \\ \eta_o &= 0.66 \end{aligned}$$

El área de apertura corresponde al reflector esta es igual a:

$$\begin{aligned} A_a &= L \times D \quad (4.9) \\ A_a &= (1.5)(1.2) \\ A_a &= 1.8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Gd Corresponde a la media de la Irradiancia medida en la ESPE. (Laboratorio de Energías Renovables)

$$G_d = 834 \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

Reemplazando los datos de rendimiento óptico, área de apertura del reflector y la media irradiancia mundial en la ecuación (4.6) se obtiene un calor absorbido de 990.79 W.

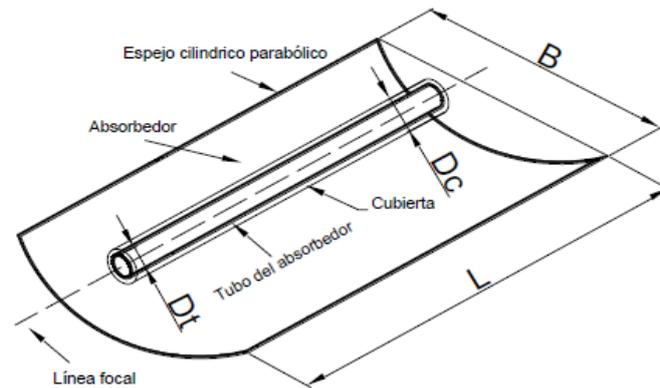
$$\begin{aligned} Q_{abs} &= \eta_o A_a G_d \\ Q_{abs} &= (0.66)(1.8)(834) \\ Q_{abs} &= 990.79 \text{ W} \end{aligned}$$

#### 4.1.2 Geometría del Absorvedor

El tubo absorvedor está compuesto de cobre, envuelto por la cubierta que es un tubo de vidrio, entre la separación de tubo absorvedor y la cubierta no hay ningún tipo de aislante ya que las pérdidas térmicas en esta región anular donde va a estar atrapado el aire son mínimas.

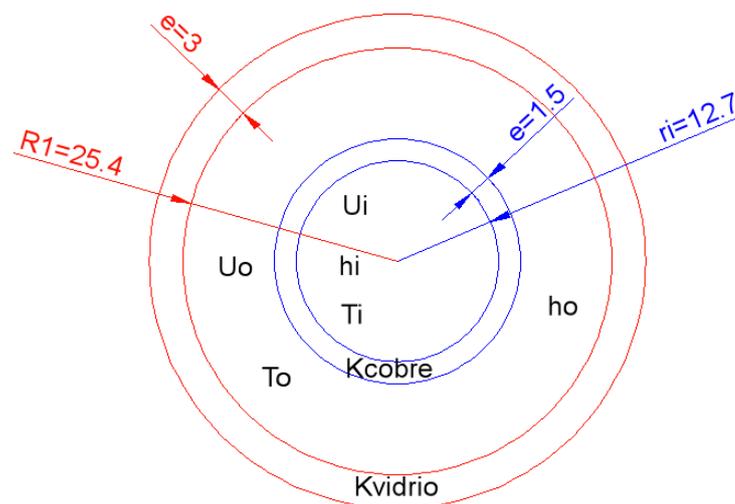
El tubo de cobre tiene un diámetro interior de 25.4 mm y un exterior de 28.4 mm, a su vez el tubo de vidrio tiene un diámetro interior de 50.8 mm y un exterior de 56.8 mm.

Mediante la siguiente figura se puede observar cómo está ubicado el tubo absorbedor en el espejo cilindro parabólico con cada una de sus partes.



**Figura 37. Partes de un Concentrador Cilíndrico Parabólico.**

**Fuente:** (Benavides E. , 2006)



**Figura 38. Resistencias térmicas en el tubo de cobre y cubierta de vidrio.**

### 4.1.3 Resistencias del coeficiente global de transferencia de calor

Si se considera que la temperatura estimada de otros proyectos realizados con concentradores cilíndricos parabólicos, el tubo absorvedor se mantendrá constante a 73 °C y conforme a esto la temperatura del aceite térmico y sus diferentes propiedades irán variando hasta que llegue a un punto en el que se estabilizara.

Por lo general el diseño de estos concentradores cilíndricos parabólicos son sistemas de concentración de media temperatura y el rango de oscilación de temperaturas es de 100 – 400 °C.

El aceite en la mañana antes de poner en funcionamiento el sistema se encuentra a una temperatura de 15 °C, luego de un determinado tiempo el tubo concentrador llega a 73 °C, se debe tener en cuenta que cada tubo absorvedor mide 1.5 m y que la primera generación tiene 6 tubos entonces la longitud por la que se transportara el aceite es de 9 m.

**Tabla 7**

#### Propiedades del Aceite Térmico Shell Heat Transfer Oil S<sub>2</sub>.

Temperatura °C	0	20	40	100	150	200	250	300	340
Densidad, Kg/m <sup>3</sup>	876	863	850	811	778	746	713	681	655
Capacidad calorífica, KJ/KgK	1.809	1.88	1.954	2.173	2.355	2.538	2.72	2.902	3.048
Conductividad Térmica, W/mK	0.136	0.13	0.133	0.128	0.125	0.121	0.118	0.114	0.111
Numero de Prandtl	3375	919	375	69	32	20	14	11	9
Viscosidad cinemática	151	-	25	4.7	-	1.1	-	-	-

Fuente: (Shell Lubricants, 2011)

Luego de 144 veces que ha circulado el aceite entre los tubos concentradores y el reservorio la temperatura final del aceite es de 73°C (ver Anexo 1), se procede a ingresar a la tabla 7 para obtener las propiedades del aceite que se va a utilizar en el diseño tales como el número de Prandtl, conductividad térmica, viscosidad, calor específico y densidad como no hay este valor de temperatura se debe proceder a interpolar para poder conseguir los valores más precisos de las propiedades mencionadas.

### Numero de Prandtl

40	-	375
72.678	-	Pr
100	-	69

$$\frac{72.678 - 40}{100 - 40} = \frac{Pr - 375}{69 - 375}$$

$$Pr = 208.342$$

### Coeficiente k del aceite

40	-	0.133
72.678	-	k
100	-	0.128

$$\frac{72.678 - 40}{100 - 40} = \frac{k - 0.133}{0.128 - 0.133}$$

$$k_{aceite} = 0.13 \left( \frac{W}{m^2K} \right)$$

### Viscosidad

40	-	25
72.678	-	$\nu$
100	-	4.7

$$\frac{72.678 - 40}{100 - 40} = \frac{v - 25}{4.7 - 25}$$

$$v = 13.944 \left( \frac{mm^2}{s} \right)$$

$$v = 13.944 * 10^{-6} \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

### Densidad

40 - 850

72.678 -  $\rho$

100 - 811

$$\frac{72.678 - 40}{100 - 40} = \frac{\rho - 850}{811 - 850}$$

$$\rho = 828.759 \left( \frac{kg}{m^3} \right)$$

### Calor específico

40 - 1.954

72.678 -  $C_p$

100 - 2.173

$$\frac{72.678 - 40}{100 - 40} = \frac{C_p - 1.954}{2.173 - 1.954}$$

$$C_p = 2.073 \left( \frac{KJ}{Kg \cdot K} \right)$$

Para saber en qué régimen se encuentra el fluido se debe calcular el número de Reynolds en este caso se usando una velocidad de  $1 \left( \frac{m}{s} \right)$  que es recomendada para sistemas donde se va a utilizar un fluido como aceite. (Pérez Remesal & Renedo Estebanez, pág. 21)

Caudal de la bomba: (White, 2004, pág. 397).

$$Q = A.V \quad (4.10)$$

$$Q = \pi * r^2.V$$

$$Q = \pi(0.0127)^2.1$$

$$Q = 5.067 * 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Flujo Másico: (White, 2004, pág. 398)

$$\dot{m} = Q.\rho \quad (4.11)$$

$$\dot{m} = 5.067 * 10^{-4} * 828.759$$

$$\dot{m} = 0.42 \frac{Kg}{s}$$

Numero de Reynolds (Kothandaraman, 2006, pág. 388)

$$Rey_{DI} = \frac{V_f \cdot D_I}{\nu} \quad (4.12)$$

$$Rey_{DI} = \frac{(1)(0.0254)}{(13.944 * 10^{-6})}$$

$$Rey_{DI} = 1822$$

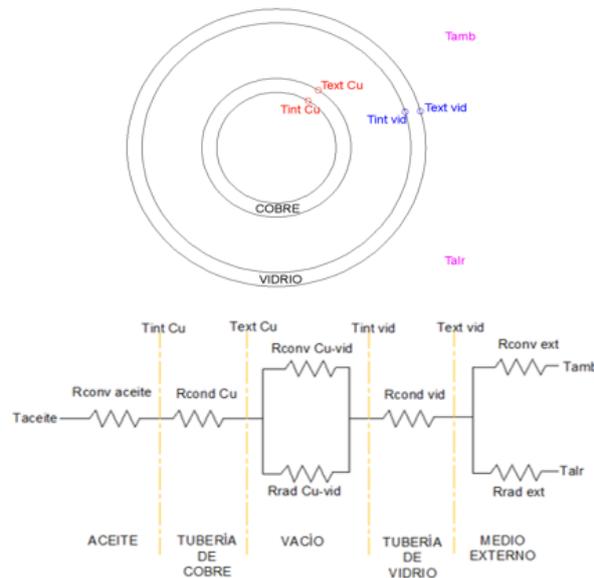
#### 4.1.3.1 Análisis de las Resistencias y Pérdidas Térmicas

##### 4.1.3.1.1 Pérdidas térmicas

El análisis a continuación descrito corresponde a la analogía con un sistema eléctrico. En el mismo la energía es aportada por el sol sobre la superficie parabólica y por ende sobre el tubo colector. Los medios de transferencia de calor son varios: conducción, convección y radiación, estos

modos son relacionados con eficiencias y pérdidas implicadas durante el proceso de transferencia de calor.

El objetivo de la configuración del mecanismo implica el aumento de temperatura del aceite contenido, ideal 73 °C, y considerando la temperatura exterior/ambiente similar a los 25 °C, existirá una pérdida de calor, por lo tanto deben ser tabuladas y comprendidas los modos de pérdidas de calor, ver figura 39.



**Figura 39. Resistencias y pérdidas térmicas.**

**Fuente:** (Incropera & De Witt, 1999)

La pérdida de calor sufrida por el concentrador cilíndrico Parabólico de calor puede ser expresado: (Incropera & De Witt, 1999)

$$q_{perd} = q_{conv\ ext} + q_{rad\ ext} \quad (4.13)$$

O lo que equivale a expresar en función de temperaturas y resistencias: (Incropera & De Witt, 1999, p. 92)

$$q = \frac{\Delta T}{R} \quad (4.14)$$

$$\frac{T_{aceite} - T_{vidrio}}{R_{conv\ acei} + R_{cond\ Cu} + R_{vacio} + R_{cond\ vid}} = \frac{T_{vidrio} - T_{amb}}{R_{conv\ ext}} + \frac{T_{vidrio} - T_{alr}}{R_{rad\ ext}} \quad (4.15)$$

En la expresión anterior puede reducirse agrupando la resistencia interna:

$$R_{equiv\ int} = R_{conv\ acei} + R_{cond\ Cu} + R_{vacio} + R_{cond\ vid}$$

Por lo que la expresión modificada sería:

$$\frac{T_{aceite} - T_{vidrio}}{R_{equiv\ int}} = \frac{T_{vidrio} - T_{amb}}{R_{conv\ ext}} + \frac{T_{vidrio} - T_{alr}}{R_{rad\ ext}}$$

De la misma despejando la temperatura externa del vidrio puede calcularse:

$$\begin{aligned} T_{vidrio} \\ = \frac{(T_{aceite})(R_{conv\ ext})(R_{rad\ ext}) + (T_{amb})(R_{equiv\ int})(R_{rad\ ext}) + (T_{alr})(R_{equiv\ int})(R_{conv\ ext})}{(R_{rad\ ext})(R_{equiv\ int}) + (R_{conv\ ext})(R_{equiv\ int}) + (R_{conv\ ext})(R_{rad\ ext})} \end{aligned} \quad (4.16)$$

De la misma forma al tener ya calculadas las resistencias podría llegarse a la obtención de las pérdidas de calor, misma que puede ser expresada: (Incropera & De Witt, 1999, p. 92)

$$q_{perd} = \frac{T_{aceite} - T_{vidrio}}{R_{int}} \quad (4.17)$$

En consideración del comportamiento al que estará expuesto el aceite se pretende plantear el concepto que mejor describa dichos efectos.

Mismo podría ser:

- Temperatura superficial constante, este experimenta un comportamiento similar al flujo de calor.

Para el planteamiento se considera que la temperatura exterior del tubo concentrador experimentará una temperatura relativamente constante, esto

advierde a la vez la necesidad de tabular dimensiones por tramos del colector total

Con la consecuente obtención del valor de las pérdidas experimentadas y del valor de la temperatura inicial del aceite, se obtienen también:

$$T_{Cu\ int} = T_{aceite} - q_{perd}(R_{conv\ acei}) \quad (4.18)$$

$$T_{Cu\ ext} = T_{aceite} - (q_{perd})(R_{conv\ acei} + R_{cond\ Cu}) \quad (4.19)$$

$$T_{vidrio\ int} = T_{aceite} - (q_{perd})(R_{conv\ acei} + R_{cond\ Cu} + R_{equiv\ int}) \quad (4.20)$$

$$T_{vidrio\ ext} = T_{aceite} - (q_{perd})(R_{conv\ acei} + R_{cond\ Cu} + R_{equiv\ int} + R_{cond\ vid}) \quad (4.21)$$

#### 4.1.3.1.2 Cálculo de resistencias

##### 4.1.3.1.2.1 Resistencia de convección externa, vidrio – medio ambiente

Considerando que este corresponde a un flujo alrededor de un cilindro y que desde el punto de vista de los cálculos de ingeniería se pretende encontrar los promedios globales, podría usarse la correlación empírica de Hilpert. (Incropera & De Witt, 1999, p. 369)

$$Nu = (C)(Re_{ext})^m(Pr_{ext})^{\frac{1}{3}} = \frac{hD}{k} \quad (4.22)$$

De donde C y m son constantes que pueden ser obtenidas de la tabla 7.2 (Incropera & De Witt, 1999, p. 370).

Re: Número de Reynolds,

Pr: Número de Prandtl.

En donde:

$$Re_{ext} = \frac{(d_{aire})(v_{aire})(diam_{vidrio})}{\mu_{aire}} \quad (4.23)$$

$$Pr_{ext} = \frac{(Cp_{aire})(\mu_{aire})}{k_{aire}} \quad (4.24)$$

El calor en relación a las condicionantes exteriores se tiene que:

$$q_{conv\ vidrio/amb} = \frac{T_{vid} - T_{amb}}{R_{conv\ vid/amb}} \quad (4.25)$$

En tanto que:

$$Nu = \frac{hD}{k}; \text{ de donde } h = Nu\ k/D \quad (4.26)$$

Y el calor expresado (Incropera & De Witt, 1999, p. 285)

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_\alpha)$$

$$q_{conv\ \frac{vid}{amb}} = \pi D_{vid} h_{air}(T_{vid} - T_{amb}) \quad (4.27)$$

Igualando las expresiones q

$$\frac{T_{vid} - T_{amb}}{R_{conv\ vid/amb}} = \pi D_{vid} h_{air}(T_{vid} - T_{amb}) \quad (4.28)$$

$$\frac{T_{vid} - T_{amb}}{R_{conv\ vid/amb}} = \pi D_{vid} \left( \frac{Nu\ k}{D_{vid}} \right) (T_{vid} - T_{amb}) \quad (4.29)$$

De donde se despeja la resistencia inmiscuida, quedando:

$$R_{conv\ vid/amb} = \frac{1}{\pi Nu\ k} \quad (4.30)$$

#### 4.1.3.1.2.2 Resistencia de radiación externa, vidrio - medio ambiente

La velocidad de transferencia de calor por radiación desde la superficie, expresada por unidad de área es (Incropera & De Witt, 1999, p. 10).

$$q'' = \frac{q}{A}$$

$$q'' = \varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4)$$
(4.31)

Por lo que el calor:

$$q = A_{vid}\varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4) = (\pi D_{vid})L\varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4)$$
(4.32)

Siendo

$$\frac{q}{L} = q_{vid/amb} = (\pi D_{vid})\varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4)$$
(4.33)

Pudiendo ser expresado

$$q_{vid/amb} = \frac{T_{vid} - T_{amb}}{R_{vid/amb}}$$
(4.34)

Al igualarlas

$$\frac{T_{vid} - T_{amb}}{R_{vid/amb}} = (\pi D_{vid})\varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4)$$
(4.35)

Despejando la resistencia involucrada

$$R_{vid/amb} = \frac{T_{vid} - T_{amb}}{(\pi D_{vid})\varepsilon\sigma(T_{vid}^4 - T_{amb}^4)}$$

$$= \frac{T_{vid} - T_{amb}}{(\pi D_{vid})\varepsilon\sigma(T_{vid}^2 + T_{amb}^2)(T_{vid} + T_{amb})(T_{vid} - T_{amb})}$$

$$R_{vid/amb} = \frac{1}{(\pi D_{vid})\varepsilon\sigma(T_{vid}^2 + T_{amb}^2)(T_{vid} + T_{amb})}$$
(4.36)

#### 4.1.3.1.2.3 Resistencia de radiación externa Vidrio – Parábola

Se emplea la siguiente ecuación: (Incropera & De Witt, 1999, p. 738).

$$Q = \frac{\sigma(T_{\text{vidrio}}^4 - T_{\text{parab}}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{vid}} A_{\text{vid}}} + \frac{1}{A_{\text{vid}} F_{\text{vidrio/parabola}}} + \frac{1 - \varepsilon_{\text{parab}}}{\varepsilon_{\text{parab}} A_{\text{parab}}}} \quad (4.37)$$

Donde:

$A_{\text{vid}}$  Área del tubo de vidrio.

$A_{\text{parab}}$  Área de la Parábola.

$$A_{\text{vid}} = \pi * D * L \quad (4.38)$$

$$A_{\text{parab}} = \text{arc perimetro} * L \quad (4.39)$$

Reduciendo términos y agrupando,  $Q/L=q$

$$q_{\text{rad vid/par}} = \frac{\pi D_{\text{vid}} \sigma (T_{\text{vidrio}}^4 - T_{\text{parab}}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{vid}}} + \frac{1}{F_{\text{vidrio/parabola}}} + \frac{(1 - \varepsilon_{\text{parab}}) \pi D_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{parab}} \text{Arco perim}}}$$

$F_{\text{vidrio/parabola}} = 1$  para cilindros concéntricos

$$q_{\text{rad vid/par}} = \frac{\pi D_{\text{vid}} \sigma (T_{\text{vidrio}}^4 - T_{\text{parab}}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{vid}}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{\text{parab}}) \pi D_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{parab}} \text{Arco perim}}} \quad (4.40)$$

De la misma similitud al evaluar condiciones externas

$$q_{\text{rad vid/par}} = \frac{T_{\text{vid}} - T_{\text{para}}}{R_{\text{rad vid/par}}} \quad (4.41)$$

Igualando los valores

$$\frac{T_{\text{vid}} - T_{\text{para}}}{R_{\text{rad vid/par}}} = \frac{\pi D_{\text{vid}} \sigma (T_{\text{vidrio}}^4 - T_{\text{parab}}^4)}{\frac{1 - \varepsilon_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{vid}}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{\text{parab}}) \pi D_{\text{vid}}}{\varepsilon_{\text{parab}} \text{Arco perim}}}$$

$$R_{rad\ vid/par} = \frac{(T_{vid} - T_{para}) \left( \frac{1 - \varepsilon_{vid}}{\varepsilon_{vid}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{parab})\pi D_{vid}}{\varepsilon_{parab} Arco\ perim} \right)}{\pi D_{vid} \sigma (T_{vidrio}^4 - T_{parab}^4)}$$

$$R_{rad\ vid/par} = \frac{(T_{vid} - T_{para}) \left( \frac{1 - \varepsilon_{vid}}{\varepsilon_{vid}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{parab})\pi D_{vid}}{\varepsilon_{parab} Arco\ perim} \right)}{\pi D_{vid} \sigma (T_{vidrio}^2 + T_{parab}^2) (T_{vidrio} + T_{parab}) (T_{vidrio} - T_{parab})}$$

$$R_{rad\ vid/par} = \frac{\left( \frac{1 - \varepsilon_{vid}}{\varepsilon_{vid}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{parab})\pi D_{vid}}{\varepsilon_{parab} Arco\ perim} \right)}{\pi D_{vid} \sigma (T_{vidrio}^2 + T_{parab}^2) (T_{vidrio} + T_{parab})}$$

$$R_{rad\ vid/par} = \frac{\left( \frac{1 - \varepsilon_{vid}}{\varepsilon_{vid}} + 1 + \frac{(1 - \varepsilon_{parab})\pi D_{vid}}{\varepsilon_{parab} Arco\ perim} \right)}{\pi D_{vid} \sigma (T_{vidrio}^2 + T_{parab}^2) (T_{vidrio} + T_{parab})}$$
(4.42)

#### 4.1.3.1.2.4 Resistencia de radiación Cobre – Vidrio

Para determinar la resistencia de la cubierta de radiación, por lo que se emplea la fórmula de recintos de dos superficies cuando se tiene cilindros concéntricos: (Incropera & De Witt, 1999, p. 739)

$$Q = \frac{\sigma A (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)}$$
(4.43)

Donde A corresponde al área del tubo de Cobre.

$$A = \pi D_{ext\ Cu} L$$
(4.44)

Por lo que

$$Q = \frac{\sigma (\pi D_{ext\ Cu} L) (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left( \frac{r_1}{r_2} \right)}$$
(4.45)

Se obtienen

$$\frac{Q}{L} = \frac{\sigma(\pi D_{ext\ Cu})(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} = q_{rad\ Cu/vi} \left(\frac{W}{m}\right) \quad (4.46)$$

Donde:

$\sigma$  Constante de Stefan Boltzman.

$\varepsilon_1$  Emisividad del Cobre.

$\varepsilon_2$  Emisividad del vidrio.

Evaluando condiciones exteriores

$$q_{rad\ Cu/vi} = \frac{T_{Cu} - T_{vid}}{R_{rad\ Cu/vi}} \quad (4.47)$$

Al igualar los términos

$$\frac{T_{Cu} - T_{vid}}{R_{rad\ Cu/vi}} = \frac{\sigma(\pi D_{ext\ Cu})(T_{Cu}^4 - T_{Vi}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \quad (4.48)$$

Despejando la resistencia en estudio se tiene:

$$R_{rad\ Cu/vi} = \frac{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)\right] (T_{Cu} - T_{vid})}{\sigma(\pi D_{ext\ Cu})(T_{Cu}^4 - T_{Vi}^4)}$$

$$R_{rad\ Cu/vi} = \frac{\left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} \left(\frac{r_1}{r_2}\right)\right] (T_{Cu} - T_{vid})}{\sigma(\pi D_{ext\ Cu})(T_{Cu}^2 + T_{Vi}^2)(T_{Cu} + T_{Vi})(T_{Cu} - T_{vid})}$$

$$R_{rad\ Cu/vi} = \frac{\left[\frac{1}{\varepsilon_{Cu}} + \frac{1 - \varepsilon_{Vi}}{\varepsilon_{Vi}} \left(\frac{r_{Cu}}{r_{Vi}}\right)\right]}{\sigma(\pi D_{ext\ Cu})(T_{Cu}^2 + T_{Vi}^2)(T_{Cu} + T_{Vi})} \quad (4.49)$$

#### 4.1.3.1.2.5 Resistencia de convección Cobre – Vidrio

La transferencia de calor por convección libre en el espacio anular entre espacios cilindros concéntricos horizontales largos, ha sido considerada por Raithby y Hollands.

La transferencia de calor por unidad de longitud de cilindro en W/m se puede expresar como: (Incropera & De Witt, 1999, p. 512)

$$q = \frac{2\pi k_{ef}}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} (T_{Cu} - T_{Vi}) \quad (4.50)$$

El mismo calor puede ser expresado en versión de sus componentes externos

$$q = \frac{T_{Cu} - T_{Vi}}{R_{conv\ Cu/Vi}} \quad (4.51)$$

Igualando

$$\frac{2\pi k_{ef}}{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)} (T_{Cu} - T_{Vi}) = \frac{T_{Cu} - T_{Vi}}{R_{conv\ Cu/Vi}} \quad (4.52)$$

Al despejar la resistencia a ser estudiada

$$R_{conv\ Cu/Vi} = \frac{(T_{Cu} - T_{Vi}) \ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k_{ef} (T_{Cu} - T_{Vi})}$$

$$R_{conv\ Cu/Vi} = \frac{\ln\left(\frac{D_{vid}}{D_{Cu}}\right)}{2\pi k_{ef}} \quad (4.53)$$

Donde:

$k_{ef}$  conductividad efectiva del aire.

Por lo que es necesario encontrar la relación de  $k_{ef}$  (Incropera & De Witt, 1999, p. 512)

$$\frac{k_{ef}}{k} = 0,386 \left( \frac{Pr}{0,861 + Pr} \right)^{1/4} (Ra_c')^{1/4} \quad (4.54)$$

Donde:

$k$  Conductividad térmica del Cobre.

$Pr$  Número de Prandtl del Cobre.

$Ra'$  Número de Rayleigh modificado del aire.

Para determinar el número de Rayleigh modificado del aire se emplea la siguiente formula. (Incropera & De Witt, 1999, p. 512)

$$Ra' = \frac{\left[ \ln \left( \frac{D_{vid}}{D_{cu}} \right) \right]^4}{L^3 (D_{cu}^{-3/5} + D_{vi}^{-3/5})^5} Ra_{cu} \quad (4.55)$$

Donde:

$Ra_{cu}$  Número de Rayleigh en el cobre.

En tanto que el número de Rayleigh puede ser descrito como: (Incropera & De Witt, 1999, p. 490).

$$Gr = \frac{g\beta(T_{cu} - T_{vi})L^3}{\gamma^2}$$

$$Ra_{cu} = Gr_l Pr \quad (4.56)$$

Donde:

$g$  Aceleración de la gravedad.

$\beta$  Coeficiente de expansión térmica del aire.

$\gamma$  Viscosidad cinemática de aire.

$\alpha$  Difusividad térmica.

Por lo que la resistencia a ser calculada:

$$R_{conv\ Cu/vi} = \frac{\ln\left(\frac{D_{vid}}{D_{Cu}}\right)}{2\pi k_{ef}} \quad (4.57)$$

#### 4.1.3.1.2.6 Resistencia de conducción de Cobre

Se emplea la siguiente ecuación (Incropera & De Witt, 1999, p. 92).

$$R_{cond\ Cu} = \frac{\ln\left(\frac{Diam_{ext\ Cu}}{Diam_{int\ Cu}}\right)}{2\pi L(k_{Cu})} \quad (4.58)$$

#### 4.1.3.1.2.7 Resistencia de conducción Vidrio

Se emplea la siguiente ecuación (Incropera & De Witt, 1999, p. 92).

$$R_{cond\ vid} = \frac{\ln\left(\frac{Diam_{ext\ vid}}{Diam_{int\ vid}}\right)}{2\pi L(k_{vid})} \quad (4.59)$$

#### 4.1.3.1.2.8 Resistencia de convección aceite

La temperatura del aceite es una temperatura de referencia conveniente para flujos internos, en consecuencia la ley de enfriamiento de Newton se puede aplicar. Donde el valor de la temperatura del aceite aumenta a medida que circula por la longitud L de la tubería de cobre, siempre y cuando la transferencia de calor va de la superficie de cobre al fluido o disminuye en caso contrario. (Incropera & De Witt, 1999, p. 427)

$$q'' = h_{acei}(T_{Cu} - T_{aceit}) \quad (4.60)$$

Mismo que puede ser expresado por unidad de área

$$Q = A_{int\ Cu} h_{acei}(T_{Cu} - T_{aceit}) = \pi D_{int\ Cu} L h_{acei}(T_{Cu} - T_{aceit}) \quad (4.61)$$

Por lo que el calor expresado por unidad de longitud

$$\frac{Q}{L} = q = \pi D_{int\ Cu} h_{acei} (T_{Cu} - T_{aceit}) \quad (4.62)$$

Como el análisis de condiciones de flujo turbulento es mucho más complejo, se hace más énfasis en la determinación de las correlaciones empíricas.

Se utiliza la siguiente correlación en tubos circulares para la transferencia de calor por convección y flujo turbulento. (Incropera & De Witt, 1999, p. 445).

La ecuación de Dittus Boelter es una versión preferida para este asunto y se denota: (Incropera & De Witt, 1999)

$$Nu_{int} = 0,023(Re_{int}^{0,8})(Pr_{int}^n) \quad (4.63)$$

Donde:

$n=0,4$  para calentamiento.

Tanto Reynolds como Prandtl pueden ser obtenidos:

$$Re_{int} = \frac{\rho_{aceite} v_{aceite} Diam\ int}{\mu_{aceite}} \quad (4.64)$$

$$Pr_{int} = \frac{Cp_{aceite} \mu_{aceite}}{k_{aceite}} \quad (4.65)$$

El mismo calor puede ser expresado en versión de sus componentes externos

$$q = \frac{T_{Cu} - T_{Vi}}{R_{conv\ Cu/Vi}}$$

Igualando

$$\pi D_{intCu} \left( \frac{Nu k_{aceite}}{D_{intCu}} \right) (T_{Cu} - T_{aceit}) = \frac{T_{Cu} - T_{aceit}}{R_{conv\ Cu/aceit}}$$

Al despejar la resistencia a ser estudiada

$$R_{conv\ aceite} = \frac{1}{(Nu_{int})(k_{aceite})\pi} \quad (4.66)$$

En razón de que las resistencias se encuentran en función de las temperaturas del vidrio, de la tubería de cobre, se debe seguir un proceso de iteración para su solución de estas temperaturas. Con eso hacer la sumatoria de pérdidas e identificar la pérdida térmica.

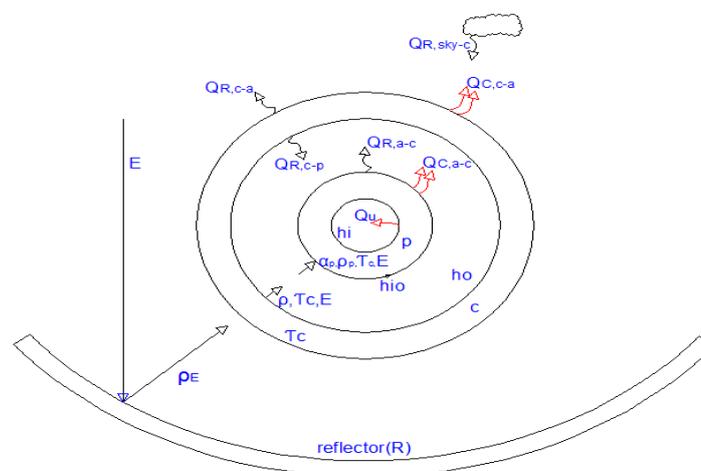
Primero se deben obtener todas las resistencias, se asumen las temperaturas sobre las cuales va a oscilar los valores y se escogen las más altas para los cálculos.

#### 4.1.4 Balance de Energía

##### 4.1.4.1 Balance energético de la cubierta

El calor que entra que es lo que se gana de energía, la radiación que recibe la cubierta del medio exterior, la radiación que se emite del tubo de cobre cuando se enfría hacia la cubierta y el calor por convección que existe en la región anular por la transferencia de calor entre el aire y la cubierta de vidrio, toda esta energía es absorbida.

El calor que sale es la energía que se pierde, la radiación que emite la cubierta hacia el medio ambiente, el calor por convección en el medio exterior que se produce por la transferencia de calor entre el cubierta y el aire, la radiación que emite la cubierta de vidrio hacia el tubo absorbedor.



**Figura 40. Balance de Energía en el tubo de vidrio y el tubo absorbedor.**

*Calor que entra = Calor que sale*

$$Q_{R,sky-c} + Q_{R,p-c} + Q_{c,p-c} = Q_{R,c-a} + Q_{c-c-a} + Q_{R,c-p} \quad (4.67)$$

$$\begin{aligned} \alpha_c [\varepsilon_{sky} * \sigma * A_c * T_{sky}^4 + \varepsilon_p * A_c * \sigma * T_p^4] + A_c * h_o (T_p - T_c) \\ = \varepsilon_c * A_c * \sigma * T_c^4 + \varepsilon_c * A_c * \sigma * T_c^4 + A_c * h_e (T_c - T_a) \end{aligned}$$

*Simplificando  $A_c$*

$$\alpha_c [\varepsilon_{sky} * \sigma * T_{sky}^4 + \varepsilon_p * \sigma * T_p^4] + h_o (T_p - T_c) = 2\varepsilon_c * \sigma * T_c^4 + h_e (T_c - T_a) \quad (4.68)$$

Donde:

$\alpha_c$  = Absortancia de la cubierta

$\varepsilon_{sky}$  = Emisividad del cielo

$\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzman

$T_{sky}$  = Temperatura del cielo

$\varepsilon_p$  = Emisividad del tubo

$T_p$  = Temperatura del tubo

$T_c$  = Temperatura de la cubierta

$T_a$  = Temperatura ambiente

$\varepsilon_c$  = Emisividad de la cubierta

$h_o$  = coeficiente de conveccion externo

$h_e$  = coeficiente de conveccion del aire

#### 4.1.4.2 Balance energético del absorvedor

*Calor que entra = Calor que sale + Calor util*

$$\alpha_p * \tau_c * \rho_R * A_p * E + Q_{R,c-p} = Q_{R,p-c} + Q_{c,p-c} + Q_u \quad (4.69)$$

$$\begin{aligned} \alpha_p * \tau_c * \rho_R * A_p * E + \alpha_p * A_p * \varepsilon_c * \sigma * T_c^4 \\ = \varepsilon_p * A_p * \sigma * T_p^4 + h_o * A_p (T_p - T_c) + Q_u \end{aligned} \quad (4.70)$$

El tubo absorvedor va a estar expuesto a varios factores como la absortancia del cobre, transmitancia del tubo de vidrio, la reflectancia del

espejo y la irradiancia medida en la ESPE, también el calor por radiación que se produce entre la pared interna de la cubierta de vidrio hacia la pared externa del tubo de cobre, toda esta energía es la que entra al absorvedor.

El tubo absorvedor también transfiere calor desde su pared externa hacia la pared interna de la cubierta, el calor por convección que se produce en la región anular entre el tubo absorvedor y la cubierta, esta transferencia se da entre el aire atrapado en este pequeño espacio y la pared interna de la cubierta de vidrio toda esta energía es la que sale del absorvedor.

*Ley de enfriamiento o calentamiento de Newton*

$$Q_u = h_i * A_{interiorp}(T_p - T_i) \quad (4.71)$$

*Como el espesor del tubo se considera despreciable segun KERN  $A_{interior} = A_p$*

$$Q_u = h_i * A_p(T_p - T_i) \quad (4.72)$$

El calor útil es el que queda en el tubo absorvedor después de ver que calor entra y que calor sale, este calor es la energía que se obtendrá en todo el sistema de concentración de la radiación solar.

$$\begin{aligned} & \alpha_p [\tau_c * \rho_R * A_p * E + \varepsilon_{cubierta} * \sigma * A_p * T_c^4] \\ & = \varepsilon_p * A_p * \sigma * T_p^4 + h_o * A_p(T_p - T_c) + h_i * A_p(T_p - T_i) \\ \alpha_p [\tau_c * \rho_R * E + \varepsilon_{cubierta} * \sigma * T_c^4] & = \varepsilon_p * \sigma * T_p^4 + h_o * (T_p - T_c) + h_i * (T_p - T_i) \end{aligned} \quad (4.73)$$

#### **4.1.4.3 Análisis de convección forzada en tubos**

##### **4.1.4.3.1 Coeficiente de convección interno**

El fluido se encuentra en régimen laminar debido a que  $Re_{y_{DI}} < 2300$  y existe convección forzada, para calcular el coeficiente de convección interno en el tubo de cobre se procede a aplicar la fórmula de Hassen ya que cumple con esta condición que  $Pr > 0.7$ . (Kothandaraman, 2006, pág. 389)

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 * \left(\frac{D_i}{L}\right) * Rey_{DI} * Pr}{1 + 0.04 * \left(\left(\frac{D_i}{L}\right) * Rey_{DI} * Pr\right)^{0.67}}$$

(4.74)

$$Nu = 3.66 + \frac{0.0668 * \left(\frac{0.0254}{9}\right) * (1822) * (208.342)}{1 + 0.04 * \left(\left(\frac{0.0254}{9}\right) * (1822) * (208.342)\right)^{0.67}}$$

$$Nu = 17.196$$

Donde:

$Nu$  Número de Nusselt

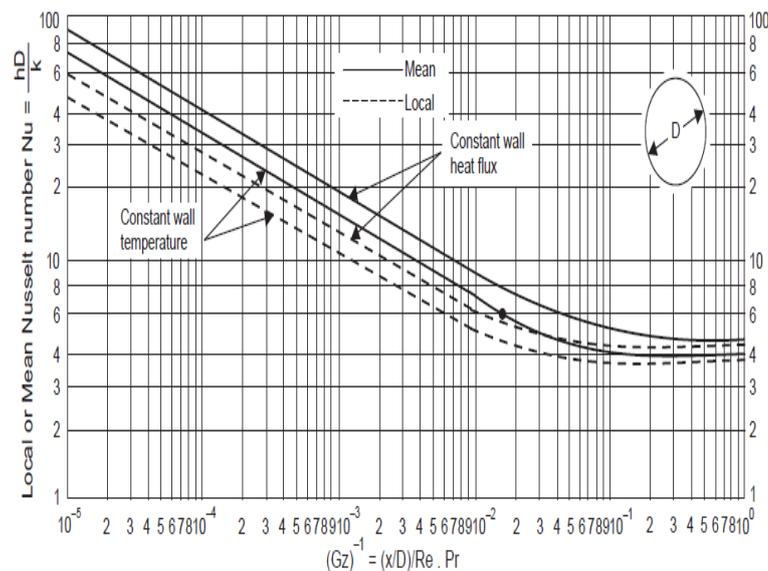
$D_i$  Diámetro interior del tubo de cobre. (m)

$Rey_{DI}$  Número de Reynolds

$Pr$  Número de Prandtl

$L$  Longitud de los tubos absorbedores de cobre de la primera generación.

En la figura 41 se presentan algunos números Nusselt cuando el fluido se encuentra en régimen laminar.



**Figura 41. Determinación del Número Nusselt para régimen laminar.**

**Fuente:** (Kothandaraman, 2006)

Calculo del Coeficiente de Convección

$$N_u = \frac{h_i D_i}{K_{aceite}} \quad (4.75)$$

Donde:

$h_i$  Coeficiente de convección interno en el tubo de cobre  $\left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$

$K_{aceite}$  Conductividad térmica del aceite  $\left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$

$$h_i = \frac{N_u \cdot K_{aceite}}{D_i}$$

$$h_i = \frac{(17.196) \cdot (0.13)}{(0.0254)}$$

$$h_i = 88.01 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$$

#### 4.1.4.3.2 Temperatura del Aceite Térmico

##### Variación de la Temperatura a lo largo de la dirección de flujo

Cuando la temperatura permanece constante en una pared. El cambio de temperatura del fluido a lo largo de su longitud  $dx$  es igual es igual al calor por convección en la sección dividida por la capacidad de calor. (Kothandaraman, 2006)

Esto se puede escribir como: (Kothandaraman, 2006, pág. 406)

$$mc(dT_b) = Pdxh(T_s - T_b) \quad (4.76)$$

Donde:

P: Perímetro, para temperatura de la superficie constante, ( $T_w =$  constante), esto conduce a: (Kothandaraman, 2006, pág. 406)

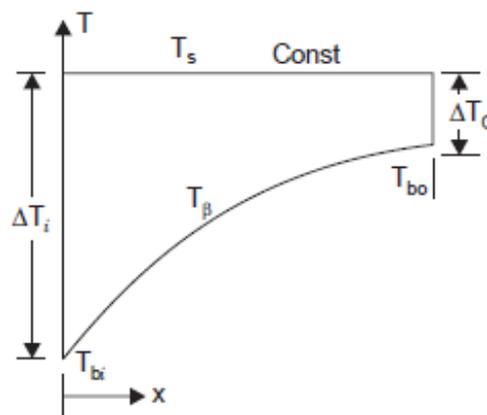
$$\frac{(T_s - T_{bo})}{(T_s - T_{bi})} = \exp \left[ -\frac{hA_s}{mC_p} \right] \quad (4.77)$$

Dónde:

$A_s$ : Área de la superficie.

$T_{bo}$ ,  $T_{bi}$ : Temperatura mayor.

En la figura 42 se muestra la variación de las temperaturas



**Figura 42. Variación de la temperatura del fluido con respecto a un sólido.**

**Fuente:** (Kothandaraman, 2006)

El flujo de calor se puede calcular mediante la siguiente fórmula:  
(Kothandaraman, 2006, pág. 407)

$$q = hA_s \left[ \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln \left( \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o} \right)} \right] \quad (4.78)$$

Donde:

$A_s = \pi DL$ . La longitud  $L$  puede calcular con mayor precisión utilizando la siguiente ecuación: (Kothandaraman, 2006, pág. 407)

$$q = hA_s \left[ T_s - \frac{T_{bi} + T_{bo}}{2} \right] \quad (4.79)$$

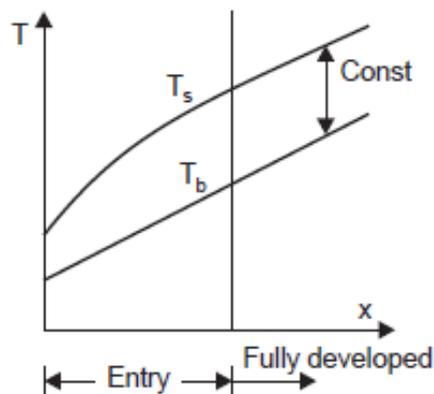
**Flujo de calor constante, ( $q$  w/m<sup>2</sup>):** La temperatura de la masa del fluido varía linealmente como cantidades iguales de calor que se añade a lo largo de la longitud. (Kothandaraman, 2006, pág. 407)

$$T_{mx} = T_{mi} + \frac{q A_s}{m C_p} \quad (4.80)$$

La temperatura de la superficie se calcula utilizando el flujo de calor por convección en la ubicación. (Kothandaraman, 2006, pág. 407)

$$T_s = T_{mi} + \frac{4qD}{k} \left[ \frac{1}{4Nu} + \frac{x}{RePr} \right] \quad (4.81)$$

La variación de las temperaturas en la superficie de un sólido y de fluidos a lo largo de la dirección del flujo se muestra en la figura 43.



**Figura 43. Variación de temperatura de un sólido y fluido en movimiento.**

**Fuente:** (Kothandaraman, 2006)

La variación de temperatura de la superficie se convierte en  $T_s$  en la región lineal completamente desarrollada como en la ecuación 4.82,  $h$  y  $q$  son constantes. (Kothandaraman, 2006, pág. 407)

$$(T_s - T_b)hA_s = qA_s \quad (4.82)$$

En tubos con aletas internamente, tubos enrollados es muy importante la determinación del coeficiente de convección interno.

A continuación se presenta en la tabla 8, la primera y las últimas 22 iteraciones que se realizó para obtener las temperaturas del aceite térmico, en este análisis hay que tener en cuenta que el tubo absorbedor se mantiene a temperatura constante y la longitud de la tubería de cobre por donde se calienta el fluido es 9 m.

**Tabla 8**

**Temperaturas y propiedades del aceite térmico.**

No	$T_{i\text{aceite}}$ (°C)	$\rho$ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$	$\nu \times 10^{-6}$ $\left(\frac{m^2}{s}\right)$	$k$ $\left(\frac{W}{m^{\circ}K}\right)$	$Pr$	$C_p$ $\left(\frac{KJ}{Kg^{\circ}K}\right)$	$\dot{m}$ $\left(\frac{Kg}{s}\right)$	$Rey$	$Nu$	$h_i$ $\left(\frac{W}{m^2^{\circ}C}\right)$	$T_{f\text{aceite}}$ (°C)
1	15	866.25	103.75	0.135	1553	1.864	0.439	244.81	17.20	91.454	17.23
123	72.29	829.00	14.07	0.13	210.30	2.072	0.42	1805	17.19	88.011	72.31
124	72.31	828.99	14.06	0.13	210.17	2.072	0.42	1806	17.19	88.012	72.34
125	72.34	828.97	14.05	0.13	210.05	2.072	0.42	1807	17.19	88.012	72.36
126	72.36	828.96	14.05	0.13	209.93	2.072	0.42	1808	17.19	88.011	72.38
127	72.38	828.94	14.04	0.13	209.82	2.072	0.42	1809	17.19	88.011	72.40
128	72.40	828.93	14.03	0.13	209.71	2.072	0.42	1810	17.19	88.010	72.45
129	72.45	828.90	14.02	0.13	209.50	2.072	0.42	1812	17.19	88.011	72.46
130	72.46	828.89	14.01	0.13	209.40	2.073	0.42	1812	17.19	88.010	72.48
131	72.48	828.88	14.00	0.13	209.31	2.073	0.42	1813	17.19	88.011	72.50
132	72.50	828.87	14.00	0.13	209.21	2.073	0.42	1814	17.19	88.010	72.52
133	72.52	828.86	13.99	0.13	209.13	2.073	0.42	1815	17.19	88.011	72.54
134	72.54	828.84	13.99	0.13	209.04	2.073	0.42	1815	17.19	88.009	72.55
135	72.55	828.83	13.98	0.13	208.96	2.073	0.42	1.816	17.19	88.010	72.57
136	72.57	828.82	13.98	0.13	208.88	2.073	0.42	1.817	17.19	88.009	72.58
137	72.58	828.81	13.97	0.13	208.80	2.073	0.42	1818	17.19	88.009	72.60
138	72.60	828.60	13.97	0.13	208.73	2.073	0.42	1818	17.19	88.010	72.61
139	72.61	828.80	13.96	0.13	208.66	2.073	0.42	1819	17.19	88.010	72.62
140	72.62	828.79	13.96	0.13	208.59	2.073	0.42	1819	17.19	88.009	72.64
141	72.64	828.78	13.95	0.13	208.53	2.073	0.42	1820	17.19	88.010	72.65
142	72.65	828.77	13.95	0.13	208.46	2.073	0.42	1821	17.19	88.009	72.66
143	72.66	828.76	13.94	0.13	208.40	2.073	0.42	1821	17.19	88.009	72.67
144	72.67	828.75	13.94	0.13	208.34	2.073	0.42	1822	17.19	88.009	72.68

Para obtener la temperatura final del aceite se aplica la teoría de temperaturas medias logarítmicas. (Kothandaraman, 2006, pág. 411)

$$mC_p(T_{f\text{aceite}} - T_{i\text{aceite}}) = h\pi DL\left(T_{cobre} - \frac{T_{f\text{aceite}} + T_{i\text{aceite}}}{2}\right) \quad (4.83)$$

$$T_{faceite} = \frac{2T_{cobre}h_i\pi DL + T_{iaceite}(2mC_p - h_i\pi DL)}{(2mC_p + h_i\pi DL)} \quad (4.84)$$

Donde:

$T_{faceite}$  Temperatura final del Aceite Térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h_i$  Coeficiente de convección interno en el tubo de cobre ( $\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$ )

$D$  Diámetro interior del tubo de cobre. ( $m$ )

$L$  Longitud de los tubos absorbedores de cobre de la primera generación. ( $m$ )

$T_{cobre}$  Temperatura constante del tubo de cobre ( $^{\circ}\text{C}$ )

$C_p$  Calor Específico del Aceite Térmico ( $\frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{K}}$ )

$T_{iaceite}$  Temperatura inicial del Aceite Térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )

$$T_{faceite} = \frac{2(73)(88.01)(\pi)(0.0254)(9) + 72.678(2(0.42)(2.073 * 10^3) - (88.01)(\pi)(0.0254)(9))}{(2(0.42)(2.073 * 10^3) + (88.01)(\pi)(0.0254)(9))}$$

$$T_{faceite} = 72.701 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

$$T_{maceite} = \frac{T_{iaceite} + T_{faceite}}{2}$$

(4.85)

$$T_{maceite} = \frac{72.678 + 72.701}{2}$$

$$T_{maceite} = 72.689 \text{ } ^{\circ}\text{C} \approx 73^{\circ}\text{C}$$

#### 4.1.4.3.3 Coeficiente global de transferencia de calor interno $U_i$

Para calcular el coeficiente global de transferencia de calor interno se procede a realizar el análisis de las resistencias térmicas que se encuentran presentes en el tubo de cobre.

Resistencia térmica por convección en el tubo de cobre. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$R_c = \frac{1}{h_i 2\pi r_i L} \quad (4.86)$$

Resistencia térmica por conducción en el tubo de cobre. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$R_{conduc} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_{cobre} L} \quad (4.87)$$

Conductividad térmica del cobre

**Tabla 9**

**Propiedades de materiales sólidos y líquidos.**

Sustancia	Densidad $\rho$ (Kg/dm <sup>3</sup> )	Punto de fusión (°C)	Punto de ebullición (°C)	Conductividad térmica k (W/(m °K))	Calor Especifico cp (KJ/(Kg °K))
<b>Cobre</b>	8.93	1083	2310	372.1	0.394

Fuente: (Griek)

$$k_{cobre} = 372.1 \left( \frac{W}{m \cdot ^\circ C} \right)$$

Coeficiente global de transferencia de calor ( $U_i$ ) en el tubo de cobre. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$U_i = \frac{1}{A \sum R_t} \quad (4.88)$$

En el coeficiente global de transferencia de calor interno está toda la energía que se ha ganado tanto por conducción y convección en el tubo

absorvedor para calentar el aceite térmico que se encuentra en el interior del mismo reemplazando las ecuaciones 4.86 y 4.87 se obtiene:

$$U_i = \frac{1}{2\pi r_o L \left[ \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k_{\text{cobre}} L} + \frac{1}{2\pi r_i L h_i} \right]} \quad (4.89)$$

Los radios que intervienen en las resistencias térmicas por conducción y por convección son los siguientes:

$r_o$  radio exterior del tubo absorvedor

$r_i$  radio interior del tubo absorvedor

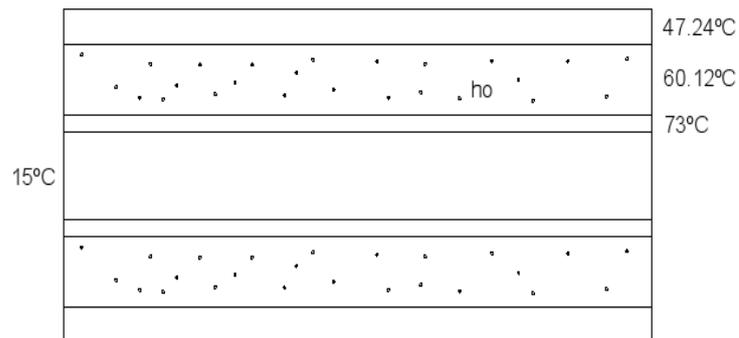
$$U_i = \frac{1}{\left[ \frac{r_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{k_{\text{cobre}}} + \frac{r_o}{r_i h_i} \right]} \quad (4.90)$$

$$U_i = \frac{1}{\left[ \frac{0.0142 \ln\left(\frac{14.2}{12.7}\right)}{372.1} + \frac{14.2}{(12.7)(88.01)} \right]}$$

$$U_i = 78.68 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

#### 4.1.4.3.4 Pérdidas de Calor en el Sistema de Concentración

Para realizar el análisis de las pérdidas de calor se debe tener en cuenta las temperaturas a la que va a estar la cubierta y el aire que se encuentra reposado en la región anular, la temperatura de la cubierta de vidrio es 47.24 °C este valor se ha obtenido de la tesis realizada con concentradores cilíndricos parabólicos en la ESPE.



**Figura 44. Análisis de Perdidas Térmicas en forma longitudinal.**

Para determinar a qué temperatura se encuentra el aire, se hace un promedio de temperaturas superficiales a las que se encuentran el tubo absorbedor y la cubierta de vidrio debido a que en el medio de estos dos tubos se encuentra este gas retenido. Entonces ahí obtendremos que su temperatura es de 60.12 °C

La temperatura promedio de película del aire es: (Kothandaraman, 2006, pág. 469)

$$T_{b\text{aire}} = \frac{47.24 + 73}{2}$$

$$T_{b\text{aire}} = 60.12 \text{ °C}$$

La temperatura promedio de película del aire se debe transformar a grados Kelvin para que con este valor ingresar a la tabla 10

$$^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273 \quad (4.91)$$

$$^{\circ}\text{K} = 60.12 + 273$$

$$^{\circ}\text{K} = 333.12$$

### Tabla 10

#### Propiedades del Aire.

T (K)	$\rho \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)$	Cp (KJ/Kg.K)	$u \cdot 10^{-7}$ (N.s/m <sup>3</sup> )	$v \cdot 10^{-6}$ (m <sup>2</sup> /s)	$k \cdot 10^{-3}$ (W/m.K)	$\alpha$ $\cdot 10^{-6} \left( \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$	Pr
300	1.1614	1.007	184.6	15.89	26.3	22.5	0.707
350	0.9950	1.009	208.2	20.92	30.0	29.9	0.700

Fuente: (Incropera & De Witt, 1999)

Ingresando a la tabla 10, con la temperatura de referencia de  $333.12^\circ K$  se procede a tomar los valores de las propiedades del aire, el Numero de Prandtl, la conductividad térmica, viscosidad y densidad, como no hay este valor de temperatura se debe proceder a interpolar para poder conseguir los valores más precisos de las propiedades mencionadas.

#### Numero de Prandtl

300 - 0.707

333.12 - Pr

350 - 0.700

$$\frac{333.12 - 300}{350 - 300} = \frac{Pr - 0.707}{0.700 - 0.707}$$

$$Pr = 0.702$$

#### Coefficiente k del aire

300 -  $26.3 * 10^{-3}$

333.12 - k

350 -  $30 * 10^{-3}$

$$\frac{333.12 - 300}{350 - 300} = \frac{k - 26.3 * 10^{-3}}{30 * 10^{-3} - 26.3 * 10^{-3}}$$

$$k_{aire} = 0.0287 \left( \frac{W}{m^{\circ}K} \right)$$

#### Viscosidad

300 -  $15.89 * 10^{-6}$

333.12 -  $\nu$

350 -  $20.92 * 10^{-6}$

$$\frac{333.12 - 300}{350 - 300} = \frac{\nu - 15.89 * 10^{-6}}{20.92 * 10^{-6} - 15.89 * 10^{-6}}$$

$$\nu = 1.92 * 10^{-5} \left( \frac{m^2}{s} \right)$$

**Densidad**

300 - 1.1614

333.12 -  $\rho$ 

350 - 0.9950

$$\frac{333.12 - 300}{350 - 300} = \frac{\rho - 1.1614}{0.9950 - 1.1614}$$

$$\rho = 1.05 \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

**4.1.4.3.5 Coeficiente de Convección del Viento  $h_e$** 

El valor de la velocidad del viento se a tomado de datos medidos en la ESPE y es de 1.2 m/s. (Laboratorio de Energias Renovables)

Para determinar el coeficiente de convección del aire se utiliza la ecuación de Jurges. (IJETA, 2012)

$$h_e = 2.8 + 3V_{viento} \tag{4.92}$$

$$h_e = 2.8 + 3(1.2)$$

$$h_e = 6.4 \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

**4.1.4.3.6 Coeficiente de convección  $h_o$** 

Por convección natural

Para hallar este coeficiente de convección se debe hallar el diámetro hidráulico. (Incropera & De Witt, 1999, p. 449)

$$D_H = \frac{4 * A}{P} \tag{4.93}$$

Perímetro de la región anular

$$P = \pi * D_o + \pi * D_1 \tag{4.94}$$

Área de la Región Anular

$$A = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_o^2) \quad (4.95)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.94) y (4.95) en la ecuación (4.96) obtenemos

$$D_H = \frac{4 * \left[ \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_o^2) \right]}{\pi (D_o + D_1)} \quad (4.96)$$

$$D_H = \frac{(D_1 - D_o)(D_1 + D_o)}{(D_o + D_1)} \quad (4.97)$$

Simplificando la ecuación (4.97) el diámetro equivalente nos queda como:

$$D_H = D_1 - D_o \quad (4.98)$$

Para hallar el coeficiente de convección externo se debe saber el número de Grashoft. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 196)

$$G_{RL} = \frac{g * \beta (T_s - T_{\infty}) * L^3}{\nu^2} \quad (4.99)$$

Coeficiente de Expansión Volumétrica. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 196)

$$\beta = \frac{1}{T} \quad (4.100)$$

Para poder determinar el coeficiente de expansión volumétrica del aire en el absorvedor debemos utilizar la temperatura promedio de película a la que se encuentra el aire en la región anular que en este caso es  $60.12 \text{ } ^\circ\text{C} = 333.12 \text{ } ^\circ\text{K}$ .

$$\beta = \frac{1}{T(^{\circ}\text{K})}$$

$$\beta = \frac{1}{333.12}$$

$$\beta = 3.001 * 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$$

El diámetro hidráulico en la región anular es la que permite saber todo el contorno de aire que está rodeando al tubo absorvedor de cobre para determinar esta se lo hace mediante la resta del diámetro interior de la cubierta de vidrio y el diámetro exterior del tubo absorvedor.

$$D_H = D_I - d_o \quad (4.101)$$

$$D_H = 0.0508 - 0.0284$$

$$D_H = 0.0224 \text{ mm}$$

El número de Grashof se calcula mediante la siguiente formula: (Kothandaraman, 2006, pág. 469)

$$Grb = \frac{g\beta \cdot T_{aire}L^3}{\nu^2} \quad (4.102)$$

Donde:

$g$  aceleración de la gravedad ( $m^2/s$ )

$\beta$  Coeficiente volumétrico de expansión térmica del aire en el absorvedor ( $^{\circ}K^{-1}$ )

$\nu$  viscosidad cinemática del aire en el absorvedor ( $m^2/s$ )

$$Grb = \frac{(9,8)(3.001 * 10^{-3})(60.12)(0.0224)^3}{(1.92 * 10^{-5})^2}$$

$$Grb = 53907.92$$

Si se cumple esta la condición de que Grashof x Prandtl está en el rango  $Gr.Pr < 10^9$ .

$$Grb.Pr = 53907.92 * 0.702 \quad (4.103)$$

$$Grb.Pr = 3.784 * 10^4$$

Como si se encuentra en el rango mencionado se utiliza la siguiente correlación para régimen laminar: (Kothandaraman, 2006, pág. 454)

$$Nu = 0.36 + \frac{0.518 (GrPr)^{0.25}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

(4.104)

$$Nu = 0.36 + \frac{0.518 (GrPr)^{0.25}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{0.702}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}}$$

$$Nu = 5.82$$

El coeficiente de calor externo  $h_o$  es: (Kothandaraman, 2006, pág. 469)

$$h_o = \frac{Nu \cdot k_{aire}}{b}$$

(4.105)

$$h_o = \frac{5.82 * 0.0287}{0.0224}$$

$$h_o = 7.46 \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$$

#### 4.1.5 Análisis de transferencia de calor en el absorvedor

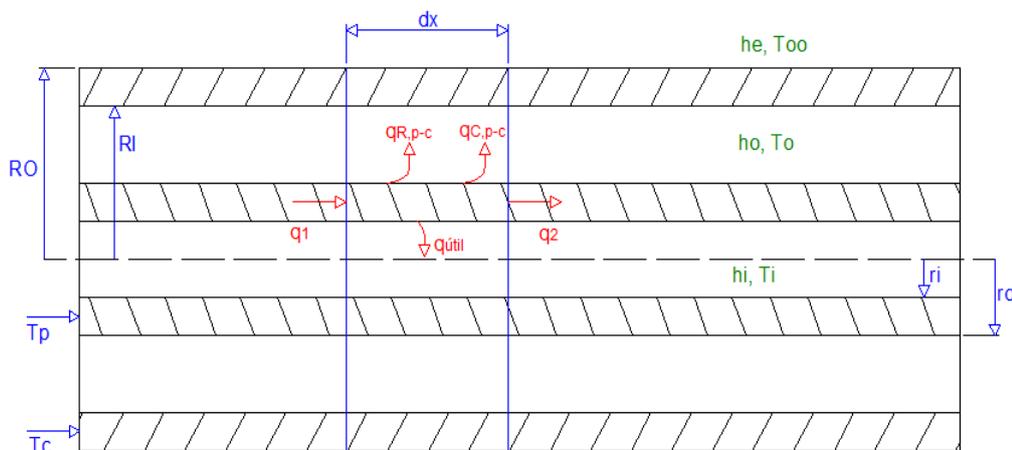


Figura 45. Análisis de transferencia de calor en el absorvedor

Resistencia térmica por convección en el tubo de cobre. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$Ri = \frac{1}{2. \pi. ri. hi. L} \quad (4.106)$$

Resistencia térmica por conducción en el tubo de cobre. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$Ri = \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2. \pi. Kp. L} \quad (4.107)$$

Radio equivalente de la región anular

$$re = RI - ro \quad (4.108)$$

Resistencia térmica por convección en la región anular. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$Ri = \frac{1}{2. \pi. re. ho. L} \quad (4.109)$$

Resistencia térmica por conducción en la región anular. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$Ri = \frac{\ln\left(\frac{R_o}{RI}\right)}{2. \pi. Kc. L} \quad (4.110)$$

Resistencia térmica por convección en la cubierta de vidrio. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$Ri = \frac{1}{2. \pi. he. Ro. L} \quad (4.111)$$

Área lateral de la cubierta de vidrio

$$Ao = 2. \pi. Ro. L \quad (4.112)$$

#### 4.1.5.1 Coeficiente global de transferencia de calor externo $U_o$

El coeficiente global de transferencia de calor externo es la sumatoria de todas las resistencias que actúan en tubo absorvedor y la cubierta de vidrio. (Pitts & Sissom, 1980, pág. 22)

$$U_o = \frac{1}{A_o \cdot \sum R_T}$$

$$U_o$$

$$= \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_o \cdot L \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_i \cdot h_i \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_p \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_e \cdot h_o \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{R_o}{R_I}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_c \cdot L} + \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_o \cdot h_e \cdot L} \right]}$$

(4.113)

$$U_o = \frac{1}{\left[ \frac{R_o}{r_i \cdot h_i} + \frac{R_o \cdot \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{K_p} + \frac{R_o}{(R_I - r_o) \cdot h_o} + \frac{R_o \cdot \ln\left(\frac{R_o}{R_I}\right)}{k_c} + \frac{1}{h_e} \right]}$$

(4.114)

$$U_o$$

$$= \frac{1}{\left[ \frac{0.0284}{0.0127 \cdot 88.01} + \frac{0.0284 \cdot \ln\left(\frac{0.0142}{0.0127}\right)}{372.1} + \frac{0.0284}{(0.0254 - 0.0142) \cdot 7.46} + \frac{0.0284 \cdot \ln\left(\frac{0.0284}{0.0254}\right)}{0.6} + \frac{1}{6.4} \right]}$$

$$U_o = U_c = 1.89 \left( \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$$

Para determinar las pérdidas en la región anular se debe tener el área en el tubo de cobre ya que las paredes de este son las que se encuentran en contacto con el aire.

El área lateral del tubo absorvedor de cobre se la obtiene por la siguiente fórmula:

$$A_r = \pi d_o L$$

(4.115)

$$A_r = \pi(0.0284)(1.5)$$

$$A_r = 0.13 \text{ m}^2$$

El calor útil es el que se obtiene por cada concentrador cilíndrico parabólico, este calor viene dado por la captación de la radiación del tubo absorvedor es decir toda la energía que se encuentra alrededor en la parte interna y externa del tubo de cobre, y las pérdidas que se producen a partir de la pared externa del absorvedor hasta el medio exterior. (Almanza, 1993, pág. 80)

$$Q_{util} = Q_{abs} - U_c [T_c - T_o] Ar \quad (4.116)$$

$$Q_{util} = 990.79 - 1.89 [73 - 15] (0.13)$$

$$Q_{util} = 976.54 \text{ w}$$

La potencia útil obtenida por cada reflector es de 976.54 w si tenemos en cuenta que son 18 entonces la potencia total será:

$$Q_{util} = 976.54 * 18$$

$$Q_{util} = 17577.72 \text{ w}$$

El incremento de temperatura por cada tubo sería: (Incropera & De Witt, 1999)

$$Q = m C_p \Delta T \quad (4.117)$$

$$Q = \frac{M}{\text{tiempo}} C_p (T_{iaceite} - T_{faceite}) \quad (4.118)$$

$$976.54 = 0.42 (2.073 * 10^3) (T_{iaceite} - T_{faceite})$$

$$T_{iaceite} - T_{faceite} = 1.12 \text{ °C}$$

La distribución de los concentradores cilíndricos parabólicos va a ser en paralelo y mediante tres generaciones de 6 tubos cada una, el aceite va a estar reposado en un recipiente, el tubo absorvedor conectado por medio de mangueras y tuberías, el incremento de temperatura es de 1.12 °C por cada 9 m, aproximadamente son 4 horas de sol pico las que se puede aprovechar entonces luego de algunas pasadas por todo el circuito tomando en cuenta

que el aceite entra a 15 °C este después de un determinado tiempo saldrá a 73 °C.

## **4.2 Análisis del Fluido Térmico**

### **4.2.1 Selección del Aceite Térmico**

Las temperaturas bajo las cuales va a trabajar el colector oscilan entre la temperatura ambiental, similar a 15 °C, y la temperatura esperada a 73 °C.

El tipo de aceite a ser seleccionado depende en gran manera de: estabilidad térmica, resistencia a la oxidación, temperaturas de operación, transmisión de calor, viscosidad, circulación forzada y otros.

Por la configuración propia de funcionamiento del colector, la selección del tipo de aceite a ser utilizado descarta los aceites monogradados, mismos que han sido sustituidos por los aceites multigrados, ya que estos últimos tienen la capacidad de combinar prestaciones óptimas tanto a baja como a alta temperatura, condiciones bajo las cuales pretende entrar en funcionamiento el equipo.

A continuación se presentan las alternativas a ser evaluadas.

- ✓ **Alternativa A:** Aceite Shell Heat Transfer Oil S2. (Ver Anexo 2)
- ✓ **Alternativa B:** Aceite Repsol 5W30. (Ver Anexo 3)
- ✓ **Alternativa C:** Aceite Repsol 4 5W30. (Ver Anexo 4)

#### **4.2.1.1 Criterios para la selección del aceite térmico**

##### **4.2.1.1.1 Estabilidad térmica**

Sus propiedades no difieran en gran manera en cuanto a cambios bruscos de temperatura.

#### **4.2.1.1.2 Conductividad térmica**

Fluido que pueda ser empleado como agente de transmisión de calor, mismo que se traduce a un bajo número de Pr.

#### **4.2.1.1.3 Temperatura de operación**

Que la temperatura de operación se encuentre dentro del rango de temperaturas recomendables.

#### **4.2.1.1.4 Resistencia a la oxidación**

Capacidad de mantener sus características inalterables durante un cierto periodo de tiempo.

#### **4.2.1.1.5 Riesgo de incendio**

Indica un punto de inflamación superior a la temperatura máxima de trabajo, 73 °C.

#### **4.2.1.1.6 Viscosidad**

Propiedad de los fluidos definida como la oposición a deformaciones tangenciales, movimiento.

#### **4.2.1.1.7 Costo**

Dinero por unidad de volumen del aceite.

#### **4.2.1.1.8 Economía**

Costo de elementos funcionales para el objetivo final afectados por el aceite seleccionado. (bomba, tuberías, válvulas).

#### 4.2.1.1.9 Amigable con el medio ambiente

Capacidad de ser reutilizados.

Los criterios serán evaluados mediante el método ordinal corregido de criterios ponderados, de la siguiente forma:

#### 4.2.2 Evaluación del aceite para cada criterio

Tabla 11

Criterios de evaluación para la selección de aceite.

CRITERIO	Estabilidad térmica	Conductividad térmica	Temperatura de operación	Resistencia a la oxidación	Riesgo de incendio	Viscosidad	Costo	Economía	Amigable	$\Sigma+1$	Ponderación	
Estabilidad térmica		0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	2,5	0,07	
Conductividad térmica	1		1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	5,5	0,15	
Temperatura de operación	0	0,5		0,5	0	0,5	0	0	0,5	2	0,05	
Resistencia a la oxidación	0,5	0	0,5		0	0,5	0	0	0,5	2	0,05	
Riesgo de incendio	0,5	1	1	1		1	1	1	1	7,5	0,20	
Viscosidad	1	0,5	1	0,5	0,5		0,5	0,5	0,5	5	0,13	
Costo	1	0,5	1	1	0	0,5		0,5	0,5	5	0,13	
Economía	0,5	1	1	1	0	0,5	0,5		0,5	5	0,13	
Amigable	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0,5	0,5		3	0,08	
										<b>SUMA</b>	<b>37,5</b>	<b>1,00</b>
<u>Riesgo de incendio &gt; Conductividad térmica &gt; (Viscosidad = Costo = Economía) &gt; Amigable &gt; Estabilidad térmica &gt; (Temperatura de operación = Resistencia a la oxidación)</u>												

#### 4.2.2.1 Evaluación del criterio estabilidad térmica

Tabla 12

##### Evaluación criterio Estabilidad térmica.

ESTABILIDAD TÉRMICA	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,5	0,5	2	0,33
Alternativa B	0,5		0,5	2	0,33
Alternativa C	0,5	0,5		2	0,33
			<b>SUMA</b>	6	1
<b><u>Alternativa A = Alternativa B = Alternativa C</u></b>					

#### 4.2.2.2 Evaluación del criterio conductividad térmica

Tabla 13

##### Evaluación criterio Conductividad térmica.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,50
Alternativa B	0		1	2	0,33
Alternativa C	0	0		1	0,17
			<b>SUMA</b>	6	1
<b><u>Alternativa A &gt; Alternativa B &gt; Alternativa C</u></b>					

#### 4.2.2.3 Evaluación del criterio temperatura de operación

Tabla 14

##### Evaluación criterio Temperatura de operación.

TEMPERATURA DE OPERACIÓN	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,5	0,5	2	0,33
Alternativa B	0,5		0,5	2	0,33
Alternativa C	0,5	0,5		2	0,33
			<b>SUMA</b>	6	1
<b><u>Alternativa A = Alternativa B = Alternativa C</u></b>					

#### 4.2.2.4 Evaluación del criterio resistencia a la oxidación

Tabla 15

Evaluación criterio Resistencia a la oxidación.

RESISTENCIA OXIDACIÓN	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		0,5	0	1,5	0,25
Alternativa B	1		0	2	0,33
Alternativa C	1	1		3	0,50
				<b>SUMA</b>	6,5
					1,083333333
<b><u>Alternativa C &gt; Alternativa B &gt; Alternativa A</u></b>					

#### 4.2.2.5 Evaluación del criterio riesgo de incendio

Tabla 16

Evaluación criterio Riesgo de Incendio.

RIESGO INCENDIO	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,50
Alternativa B	0		0	1	0,17
Alternativa C	0	1		2	0,33
				<b>SUMA</b>	6
					1
<b><u>Alternativa A &gt; Alternativa C &gt; Alternativa B</u></b>					

#### 4.2.2.6 Evaluación del criterio viscosidad

Tabla 17

Evaluación criterio viscosidad.

VISCOSIDAD	Alternativa A	Alternativa B	Alternativa C	$\Sigma+1$	Ponderación
Alternativa A		1	1	3	0,50
Alternativa B	0		1	2	0,33
Alternativa C	0	0		1	0,17
				<b>SUMA</b>	6
					1
<b><u>Alternativa A &gt; Alternativa B &gt; Alternativa C</u></b>					

#### 4.2.2.7 Evaluación del criterio costo

Tabla 18

Evaluación criterio Costo.

COSTO	Alternativa	Alternativa	Alternativa	$\sum+1$	Ponderación
	A	B	C		
Alternativa A		0	0	1	0,17
Alternativa B	1		1	3	0,50
Alternativa C	1	0		2	0,33
			<b>SUMA</b>	6	1
<u>Alternativa B&gt;Alternativa C&gt;Alternativa A</u>					

#### 4.2.2.8 Evaluación del criterio economía

Tabla 19

Evaluación criterio Economía.

ECONOMÍA	Alternativa	Alternativa	Alternativa	$\sum+1$	Ponderación
	A	B	C		
Alternativa A		0	0	1	0,17
Alternativa B	1		1	3	0,50
Alternativa C	1	0		2	0,33
			<b>SUMA</b>	6	1
<u>Alternativa B&gt;Alternativa C&gt;Alternativa A</u>					

#### 4.2.2.9 Evaluación del criterio amigable con el medio ambiente

Tabla 20

Evaluación criterio Amigable con el medio ambiente.

AMIGABLE	Alternativa	Alternativa	Alternativa	$\sum+1$	Ponderación
	A	B	C		
Alternativa A		0	0,5	1,5	0,25
Alternativa B	1		1	3	0,50
Alternativa C	0,5	0		1,5	0,25
			<b>SUMA</b>	6	1
<u>Alternativa B &gt; (Alternativa C = Alternativa A)</u>					

### 4.2.3 Cálculo de la tabla de conclusiones

Tabla 21

#### Conclusión selección de aceite.

CRITERIO	Estabilidad térmica	Conductividad térmica	Temperatura de operación	Resistencia a la oxidación	Riesgo de incendio	Viscosidad	Costo	Economía	Amigable	$\Sigma$	Ponderación
Alternativa A	0.0231	0.075	0.0165	0.0125	0.1	0.065	0.0221	0.0221	0.02	0.356	1
Alternativa B	0.0231	0.0495	0.0165	0.0165	0.034	0.0429	0.065	0.065	0.04	0.353	2
Alternativa C	0.0231	0.0255	0.0165	0.025	0.066	0.0221	0.0429	0.0429	0.02	0,284	3

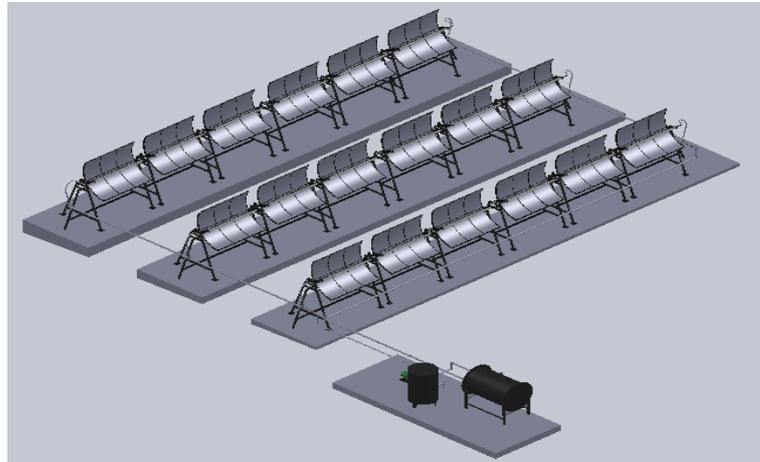
La alternativa A es la ganadora según el análisis de criterios ponderados. A continuación se enlistan los parámetros generales: (ver anexo 2).

- Densidad a 15°C = 866.25 Kg/m<sup>3</sup>
- Viscosidad a 40 °C = 25 mm<sup>2</sup>/s
- Punto de inflamación = 220 °C
- Evita la formación de lodos y de depósitos producidos por el hollín a altas temperaturas.
- Excelente resistencia a la pérdida de viscosidad.
- Alta resistencia a la oxidación.
- Reducido contenido en cenizas.
- Mayor conservación del medio ambiente que lubricantes convencionales.

### 4.3 Diseño Mecánico y Estructural

Antes de empezar a realizar el diseño de cada uno de los elementos del sistema se debe usar algunas herramientas como programas CAD, libros para el diseño de maquinaria aplicando la teoría de estos ir dimensionando, seleccionando materiales y la geometría de cada una de las piezas para ir viendo la rigidez y la resistencia de todo el conjunto mecánico.

El modelo a ser analizado se lo puede observar en la figura 46.

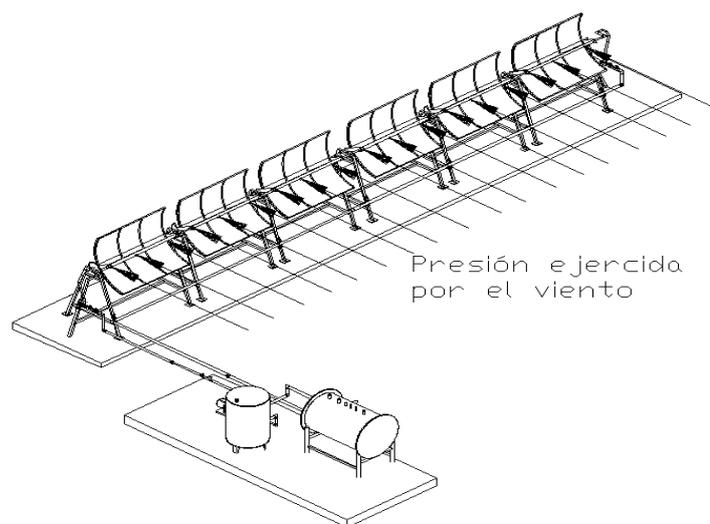


**Figura 46. Modelado del sistema de radiación de media temperatura.**

**Fuente:** (MER, Guasumba, Quintana, & Yépez, 2014)

El análisis de todo este sistema se debe realizar considerando que va existir una fuerza y presión ejercida por la velocidad del viento y el torque que genera se genera por el movimiento del eje de la parábola, el peso propio de la estructura con todos estos parámetros se puede empezar a realizar el diseño mecánico y estructural del sistema.

En la figura 47 se observa como las fuerzas externas actúan sobre los componentes de todo el sistema.



**Figura 47. Fuerzas externas que inciden sobre el sistema colector.**

**Fuente:** (MER, Guasumba, Quintana, & Yépez, 2014)

El diseño se lo realizado a cada elemento independientemente, se lo aísla de los otros elementos que lo rodean esto nos permite identificar en qué punto actúan las cargas y los apoyos.

En el sistema actúan algunas cargas:

**Cargas muertas:** Son las cargas propias del sistema que permanecen en el mismo lugar y mantienen su magnitud constante, dentro de estas se consideran:

- ✓ Peso propio de los elementos.

**Cargas vivas:** Son las que pueden cambiar de lugar y magnitud dependiendo de la utilización del equipo.

- ✓ Cargas debido al viento.
- ✓ Peso de personas.

#### 4.3.1 Determinación de cargas

##### 4.3.1.1 Carga generada por el viento

Los CCP van a estar sometidos a determinada presión generada por el viento principalmente a la estructura que sostiene la parábola, ésta se la puede considerar como una pared. Donde la presión ejercida por el viento se determina de acuerdo a la siguiente ecuación. (Consejo Internacional de la Construcción, 1997, pág. 7):

$$P = C_e C_q q_s I_w \quad (4.119)$$

Donde:

$P$  = Presión de diseño del viento ( $\text{kN/m}^2$ )

$C_e$  = Altura combinada, factor de exposición y venteo.

$C_q$  = Coeficiente de presión para la estructura.

$q_s$  = Coeficiente de presión del viento estancado

$I_w$  = Coeficiente de importancia.

### Altura combinada, factor de exposición y venteo ( $C_e$ ).

La altura sobre el nivel promedio de tierra a la que se encuentran los CCP es de 3 metros (9.84 pies). La exposición corresponde a la B porque el terreno tiene irregularidades y cerca de los CCP existen edificios y arboles; por lo que se obtiene un factor de  $C_e$  de 0.62 en la tabla 22. (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

**Tabla 22**

### Altura combinada, factor de exposición y venteo ( $C_e$ ).

Altura sobre el nivel promedio de tierra(pies) x 304.8 para milímetros.	EXPOSICIÓN D	EXPOSICIÓN C	EXPOSICIÓN B
0-15	1.39	1.06	0.62
20	1.45	1.13	0.67
25	1.50	1.19	0.72
30	1.54	1.23	0.76
40	1.62	1.31	0.84
60	1.73	1.43	0.95
80	1.81	1.53	1.04
100	1.88	1.61	1.13
120	1.93	1.67	1.20
160	2.02	1.79	1.31
200	2.10	1.87	1.42
300	2.22	2.05	1.63
400	2.34	2.19	1.80

Fuente: (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

### Coficiente de presión para la estructura ( $C_q$ )

La estructura de la parábola corresponde a una estructura de marcos y sistemas primarios y al método uno de paredes barlovento puesto que el viento va ir dirigido hacia dentro de la parábola; por lo que corresponde al

factor  $C_q$  de 0,8 en la tabla 23. (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

**Tabla 23**

**Coeficiente de presión para la estructura ( $C_q$ ).**

ESTRUCTURA	DESCRIPCIÓN	FACTOR $C_q$
1. Marcos y sistemas primarios	<b>Método 1</b> (método de fuerza normal)	
	Paredes:	
	Pared Barlovento	0.8 hacia dentro
	Pared Sotavento	0.5 hacia fuera
	Cubiertas:	
	Viento perpendicular a la cresta	
	Techo de Sotavento o techo plano	0.7 hacia fuera
	Menor a 2:12 (16.7 %)	
	Pendiente 2:12 (16.7%) hasta menos de 9:12 (75%)	0.7 hacia fuera
	Pendiente 9:12 (75%) hasta 12:12 (100%)	0.9 hacia fuera o 0.3 hacia dentro
	Pendiente > 12:12 (100%)	0.4 hacia dentro
	Viento paralelo al canto y techos planos	0.7 hacia dentro
	<b>Método 2</b> (método de área protegida)	
	En área proyectada vertical:	
Estructuras de 40 pies (12192 mm) o menor altura	1.3 cualquier dirección horizontal	
Estructuras sobre 40 pies (12192 mm) de altura	1.4 cualquier dirección horizontal	
Área proyectada horizontal	0.7 hacia arriba	

Fuente: (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

**Coeficiente de presión del viento estancado ( $q_s$ )**

El valor de la velocidad es de 30 m/s medido en la ESPE (Laboratorio de Energías Renovables), transformado a millas por hora se obtiene 67,1. Aproximadamente 70 mph y corresponde a un factor de presión del viento estancado de 12,6 psf que transformado se obtiene  $q_s = 0,6 \text{ KN/m}^2$ .

**Tabla 24****Coefficiente de presión del viento estancado ( $q_s$ ).**

Velocidad del viento Básica (mph) (x 1.61 por Km/h)	70	80	90	100	110	120	130
Presión $q_s$ (psf) (x 0.0479 for KN/m <sup>2</sup> )	12.6	16.4	20.8	25.6	31.0	36.9	43.3

Fuente: (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

**Factor de importancia del viento ( $I_w$ )**

Corresponde a diversas estructuras que no se mencionan en la categoría de ocupación 1, 2, 3 y 4. El factor de importancia del viento corresponde a  $I_w = 1.00$ .

**Tabla 25****Categoría de ocupación.**

CATEGORIA DE OCUPACION	OCUPACION O FUNCION DE LA ESTRUCTURA	FACTOR DE IMPORTANCIA SÍSMICA, $I$	FACTOR DE IMPORTANCIA SÍSMICA, $I_p$	FACTOR DE IMPORTANCIA DEL VIENTO, $I_w$
<b>1. Instalaciones esenciales</b>	Grupo I, División 1 Ocupaciones que tienen áreas de cirugía y tratamiento de emergencia. Estaciones de bomberos y policía. Garajes y refugios para los vehículos y aeronaves de emergencia. Estructuras y refugios de emergencia—centros de preparación. Torres de control de aviación. Estructuras y equipos de comunicación del gobierno y otras instalaciones necesarias para respuesta de emergencia. Equipos para la generación de energía por Categoría 1 instalaciones. Tanques u otras estructuras que contienen vivienda o de apoyo, agua u otro material de supresión de incendios o equipo requerido para la protección de estructuras categoría de 1,2 o 3.	1.25	1.50	1.15
<b>2. Diversas estructuras</b>	Grupo U Ocupaciones no mencionadas a excepción de torres.	1.00	1.00	1.00

Fuente: (Consejo Internacional de la Construcción, 1997)

Por lo que:

$$C_e = 0.62$$

$$C_q = 0.8$$

$$q_s = 0.6 \text{ kN/m}^2$$

$$I_w = 1.00$$

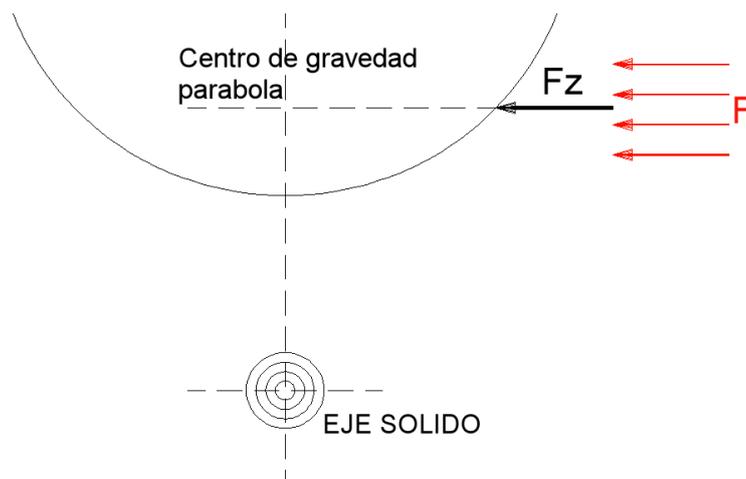
Reemplazando en la ecuación de presión de diseño del viento se obtiene:

$$P = (0.62)(0.8) \left( \frac{0.6 \text{ kN}}{\text{m}^2} \right) (1)$$

$$P = 0.2976 \text{ kN/m}^2$$

#### 4.3.1.2 Cargas generadas en posiciones críticas del concentrador

**Caso 1:** El concentrador parabólico se encuentra en posición horizontal, en donde la fuerza que generaría torsión será aquella aplicada sobre la cara lateral, como indica la figura 48.



**Figura 48. Cargas en la parábola cuando está en posición horizontal.**

La fuerza equivalente de  $F$  sobre el área lateral de la parábola es (Caudillo, 2005)

$$P = \frac{F}{A}$$

(4.120)

$$F_z = P * A$$

(4.121)

Donde:

P = Presión ejercida por el aire.

$F_z$  = Fuerza equivalente de P sobre el área lateral.

El área de la parábola sobre la que actúa la carga es únicamente la mitad del área total de la parábola y es de  $1.042 \text{ m}^2$

$$A = 1500\text{mm} * 1390\text{mm}$$

$$A = 2085000\text{mm}^2$$

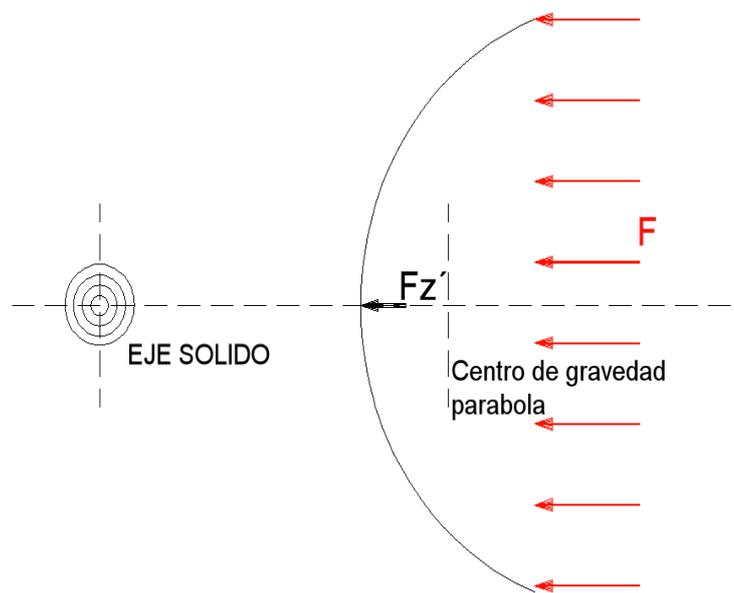
$$A = 2.085\text{m}^2$$

quedando la fuerza  $F_z$ .

$$F_z = PA = \left(297.6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) (1.042 \text{ m}^2)$$

$$F_z = 310.1\text{N}$$

**Caso 2:** El concentrador parabólico se encuentra en posición vertical, la fuerza actuaría como se muestra en la figura 49.



**Figura 49. Cargas en la parábola cuando está en posición vertical.**

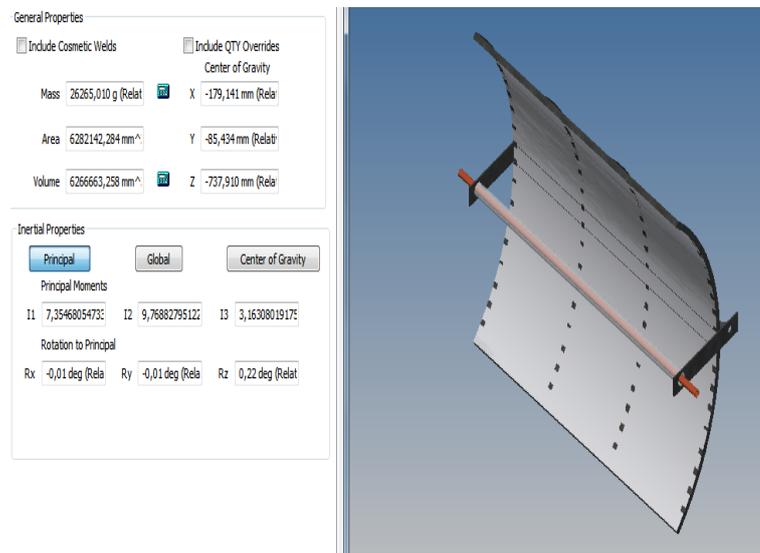
El área de la parábola influenciada por la carga es de  $2.085 \text{ m}^2$ , y la fuerza equivalente de P sobre el área completa de la parábola es:

$$F_z' = PA' = \left(297.6 \frac{N}{m^2}\right) (2.085 m^2)$$

$$F_z' = 620.49N$$

#### 4.3.1.3 Parámetros de Masas, centro de gravedad y torques

El cálculo de la masa de la estructura soporte de la parábola se encuentra con un programa de modelamiento llamado Solid Works. Y se obtiene un valor de 26.2 kg.



**Figura 50. Masa de la estructura que soporta la parábola.**

Al mismo se anexó el valor de la masa del aceite contenido en el tramo de 1.5 m.

$$V = \pi * r^2 * L \tag{4.122}$$

$$V = \pi * (0.0127m)^2 * 1.5m$$

$$V = 7.6 * 10^{-4}m^3$$

La densidad del aceite de transferencia de calor Shell S<sub>2</sub> es 866 kg/m<sup>3</sup>. (Shell Lubricants, 2011)

$$\delta = \frac{m}{V} \tag{4.123}$$

$$m = \delta * V$$

(4.124)

$$m = \left(866 \frac{kg}{m^3}\right) * (7.6 * 10^{-4} m^3)$$

$$m = 0.67 kg$$

Concluyéndose que la masa a considerar en los cálculos es de 26.2 kg más la masa del aceite 0.67 kg. dando un total de 26.87 kg, masa que generará las fuerzas de peso  $W_c$  y  $W_d$  más adelante usadas.

$$W_c \text{ y } W_d = \frac{26.87 kg}{2} * 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$W_c \text{ y } W_d = 131.6 N$$

En consideración de la geometría 3d se obtuvo las coordenadas del centro de gravedad de este elemento, mismo punto que será por el cual actúen las fuerzas generadas por el viento y el peso de la estructura en mención. Obteniéndose un valor de 210 mm desde la perforación para el eje sólido.

Para considerar los torques generados o a ser vencidos al momento de rotar todos los colectores debe ser analizado por cada uno de los casos arriba descritos.

**Torque Caso 1:** Este es generado por la fuerza  $F_z$  que pudiera actuar sobre los 5 colectores restantes, fuerza que actuaría sobre el centro de gravedad.

$$T_g = (F_z)(\text{Núm colectores})(\text{distancia})$$

(4.125)

$$T_g = (310.1N)(5)(0.21m)$$

$$T_g = 325.6 Nm$$

**Torque Caso 2:** Generado exclusivamente por la masa de la estructura de la parábola.

$$T_g = mg(\text{núm colectores})(\text{distancia})$$

(4.126)

$$T_g = (26.87) \left( \frac{9.8m}{s^2} \right) (5)(0.21m)$$

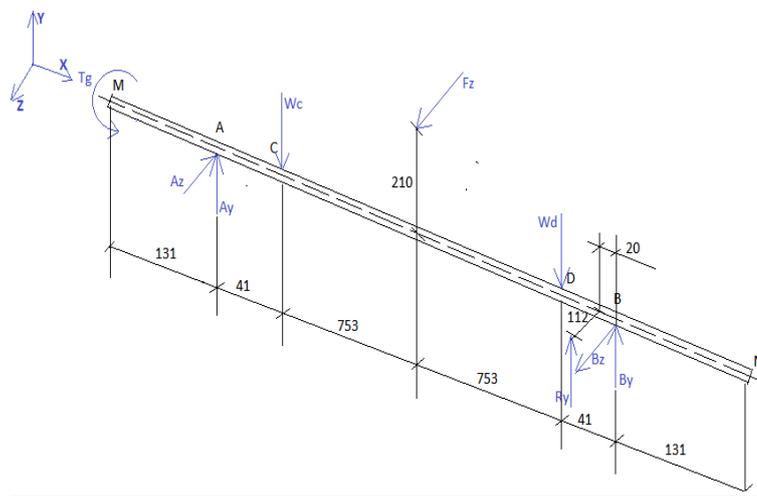
$$T_g = 276.5Nm$$

### 4.3.2 Eje de Transmisión

Un eje de transmisión es un elemento cilíndrico de sección circular, que puede estar fijo o girando, sobre el que se montan engranes, poleas, volantes, ruedas de cadena, manivelas o manubrios, así como otros elementos mecánicos de transmisión de fuerza o potencia. Los ejes de transmisión o simplemente ejes, son barras sometidas a cargas de flexión, tensión, compresión o torsión que actúan individualmente o combinadas. (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 729)

A continuación el análisis de diagrama de cuerpo libre para cada uno de los casos arriba mencionados.

#### Caso 1 DCL:



**Figura 51. Diagrama de Cuerpo Libre del eje caso 1.**

Donde:

$A_z, A_y$  = Reacción cojinete A.

$B_y, B_z$  = Reacción cojinete B.

$W_c, W_d$  = mitad del peso,  $m = 26.87 \text{ kg} = 131.6 \text{ N}$

$F_z$  = Fuerza aplicada por el viento = 310.1 N

$R_y$  = Reacción posicionador.

$T_g$  = Torque aplicable a caso 1 = 325.6 N.m

A continuación se calculan los valores para las incógnitas del diagrama.

$$\downarrow + \sum M_x = 0$$

$$T_g + F_z(0.21m) - R_y(0.112m) = 0$$

$$(325.6Nm) + (310.1N)(0.21m) - R_y(0.112m) = 0$$

$$R_y = 3488.58N$$

$$\downarrow + \sum M_y = 0 \text{ (M)}$$

$$A_z(0.131m) - F_z(0.925m) - B_z(1.719m) = 0$$

$$A_z(0.131m) - (310.1N)(0.925m) - B_z(1.719m) = 0$$

$$A_z = \frac{286.84 + 1.719B_z}{0.131}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$-A_z + F_z + B_z = 0$$

$$A_z = 310.1 + B_z$$

Por lo que

$$\frac{286.84 + 1.719B_z}{0.131} = 310.1 + B_z$$

$$B_z = -155.05N$$

$$A_z = 155.05N$$

$$\downarrow + \sum M_z = 0 \quad (M)$$

$$A_y(0.131m) - W_c(0.172m) - W_d(1.678m) + R_y(1.699m) + B_y(1.719m) = 0$$

$$A_y(0.131m) - (131.6N)(0.172m) - (131.6N)(1.678m)$$

$$+ (3488.58N)(1.699m) + B_y(1.719m) = 0$$

$$A_y = \frac{-5683.64 - 1.719B_y}{0.131}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - W_c - W_d + R_y + B_y = 0$$

$$A_y = -3225.38 - B_y$$

$$\frac{-5683.64 - 1.719B_y}{0.131} = -3225.38 - B_y$$

$$B_y = -3313.04N$$

$$A_y = 87.66N$$

Resumen de fuerzas calculadas:

$$A_y = 87.66 \text{ N}; A_z = 155.05 \text{ N}; A = 178.11 \text{ N.}$$

$$B_y = -3313.04 \text{ N}; B_z = -155.05 \text{ N}; B = 3316.67 \text{ N}$$

$$R_y = 3488.58 \text{ N}$$

Los signos negativos significan que la dirección asumida en el DCL fue erróneo.

A continuación se obtienen los diagramas de Momentos flectores y fuerzas cortantes con un programa demostrativo llamado Md Solids.

## V y M respecto a eje Y

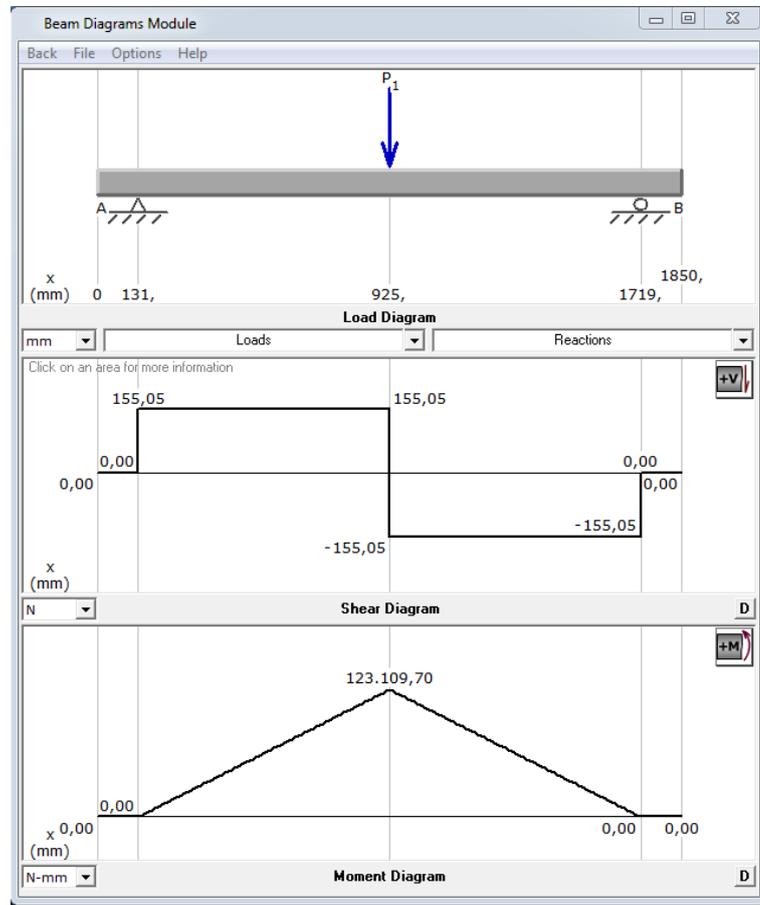


Figura 52. Caso 1, Diagrama de Momentos y fuerzas cortantes eje Y.

## Ubicación de carga máxima

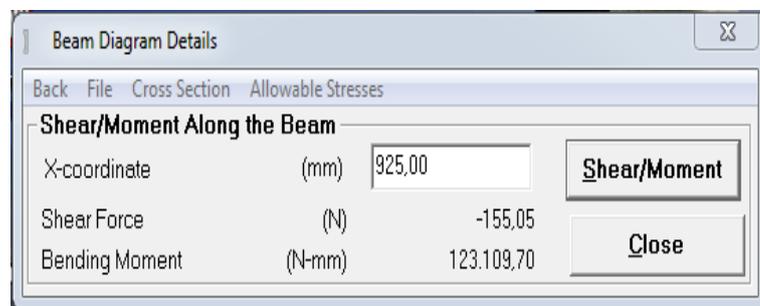


Figura 53. Caso 1, Carga Máxima soportada por el eje Y.

## V y M respecto a eje Z

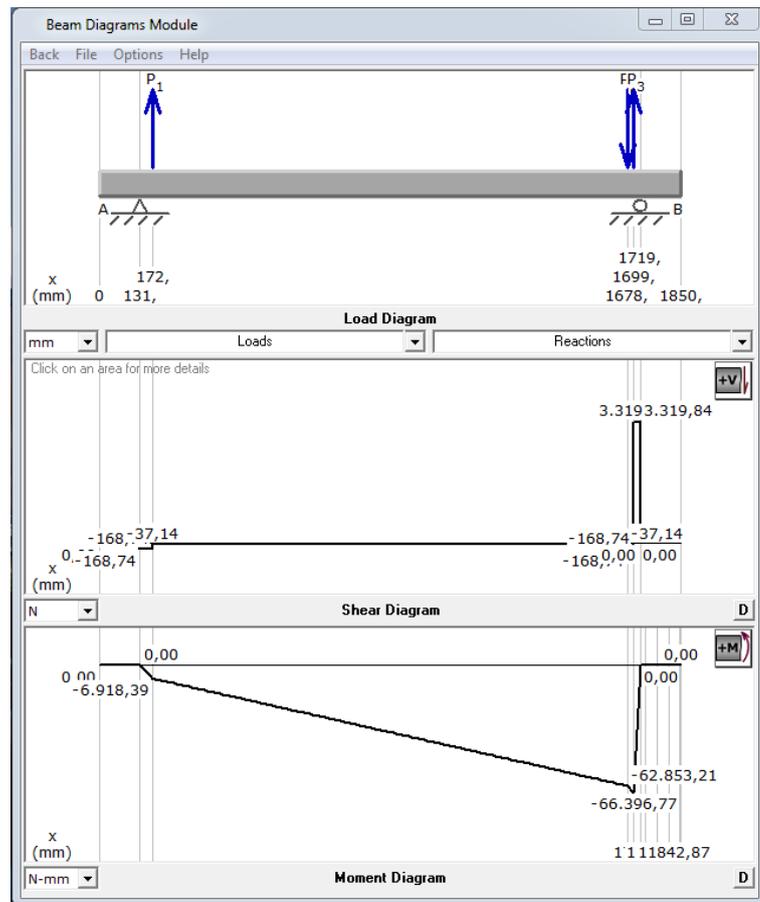


Figura 54. Caso 1, Diagrama de momentos y fuerza cortante eje Z.

## Ubicación de carga máxima

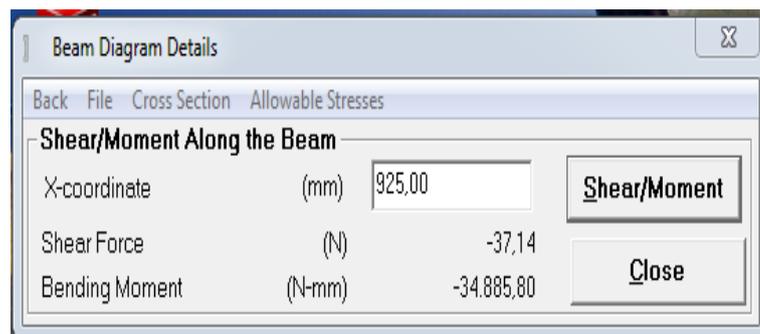


Figura 55. Caso 1, Carga Máxima soportado por el eje caso 1 eje Z.

La sección crítica según los diagramas radica en la sección media:

$$M_y = 123.1Nm$$

$$M_z = 34.88Nm$$

Por lo que el momento total:

$$M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

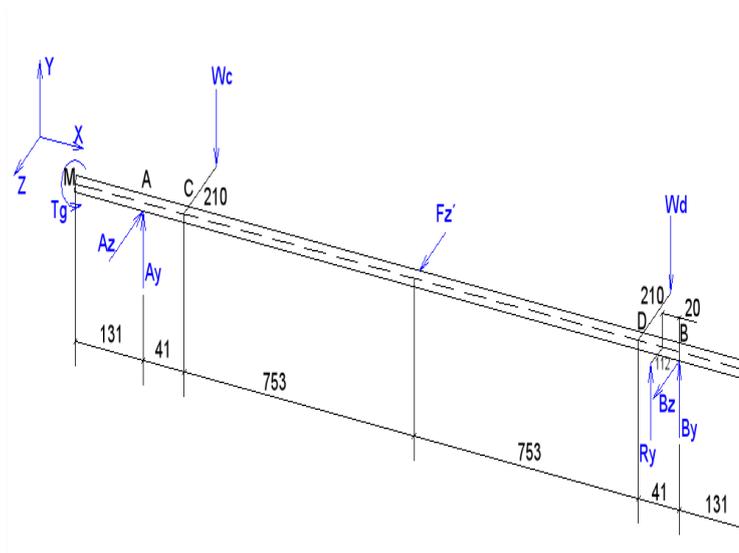
(4.127)

$$M = 127.94 \text{ Nm}$$

El torque máximo:

$$\text{Torq} = T_g = 325.6 \text{ Nm}$$

**Caso 2 DCL:**



**Figura 56. Diagrama de Cuerpo libre del eje caso 2.**

Donde:

$A_z, A_y$  = Reacción cojinete A.

$B_y, B_z$  = Reacción cojinete B.

$W_c, W_d$  = mitad del peso,  $m = 26.87 \text{ kg} = 131.6 \text{ N}$

$F_z'$  = Fuerza aplicada por el viento = 620.49 N

$R_y$  = Reacción posicionador.

$T_g$  = Torque aplicable a caso 2 = 276.5 N.m

A continuación se calculan los valores para las incógnitas del diagrama.

$$\downarrow + \sum M_x = 0$$

$$T_g - W_c(0.21m) - W_d(0.21m) - R_y(0.112) = 0$$

$$276.5Nm - (131.6N)(0.21m) - (131.6N)(0.21m) - R_y(0.112) = 0$$

$$R_y = 1975.25N$$

$$\downarrow + \sum M_y = 0 \text{ (M)}$$

$$A_z(0.131m) - F'_z(0.925m) - B_z(1.719m) = 0$$

$$A_z(0.131m) - (620.49N)(0.925m) - B_z(1.719m) = 0$$

$$A_z = \frac{573.95 + 1.719B_z}{0.131}$$

$$\sum F_z = 0$$

$$-A_z + F'_z + B_z = 0$$

$$A_z = 620.49 + B_z$$

$$\frac{573.95 + 1.719B_z}{0.131} = 620.49 + B_z$$

$$B_z = -310.24N$$

$$A_z = 310.25N$$

$$\downarrow + \sum M_z = 0 \text{ (M)}$$

$$A_y(0.131m) - W_c(0.172m) - W_d(1.678m) + R_y(1.699m) + B_y(1.719m) = 0$$

$$A_y(0.131m) - (131.6N)(0.172m) - (131.6N)(1.678m)$$

$$+ (1975.25N)(1.699m) + B_y(1.719m) = 0$$

$$A_y = \frac{-1.719B_y - 3112.49}{0.131}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$A_y - W_c - W_d + R_y + B_y = 0$$

$$A_y - (131.6N) - (131.6N) + 1975.25N + B_y = 0$$

$$A_y = -B_y - 1712.05$$

$$\frac{-1.719B_y - 3112.49}{0.131} = -B_y - 1712.05$$

$$B_y = -1818.77N$$

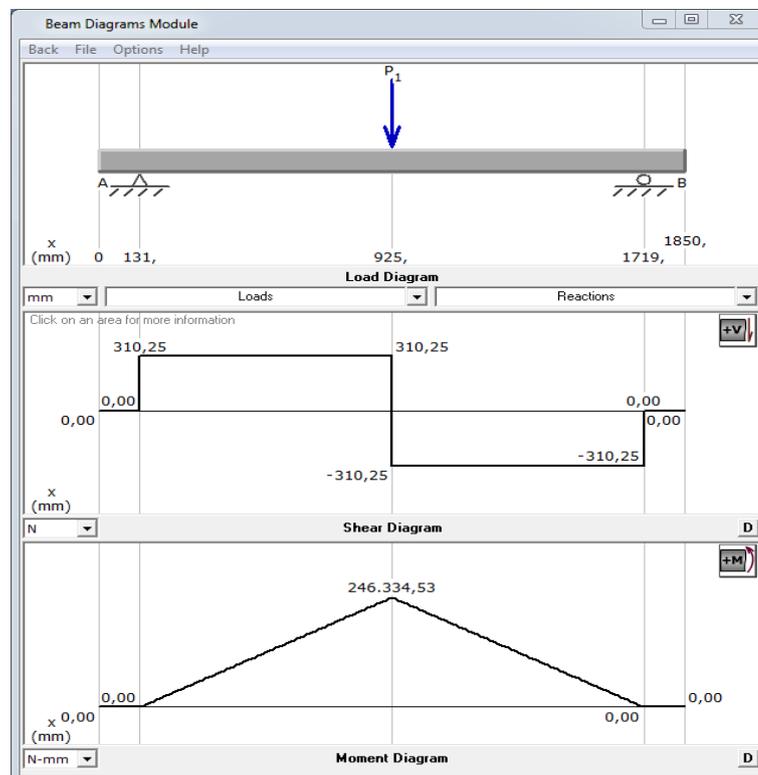
$$A_y = 106.72N$$

Los signos negativos significan que la dirección asumida en el DCL fue erróneo.

A continuación se obtienen los diagramas de Momentos flectores y fuerzas cortantes con un programa demostrativo llamado Md Solids.

Diagramas de momentos y fuerzas cortantes.

**V y M respecto a eje Y.**



**Figura 57. Caso 2, Diagrama de momentos y fuerza cortante eje Y.**

Ubicación de carga máxima.

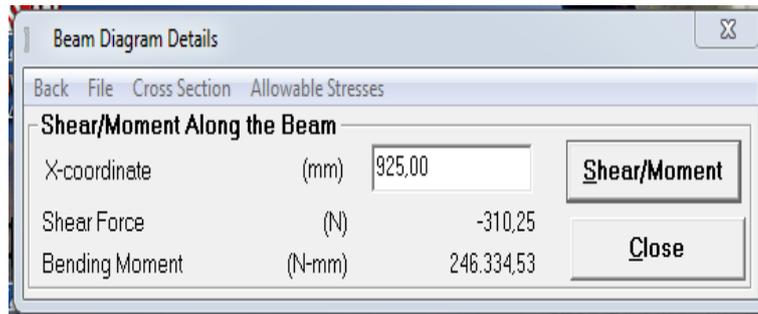


Figura 58. Caso 2, Carga Máxima soportada por el eje Y.

V y M respecto a eje Z.

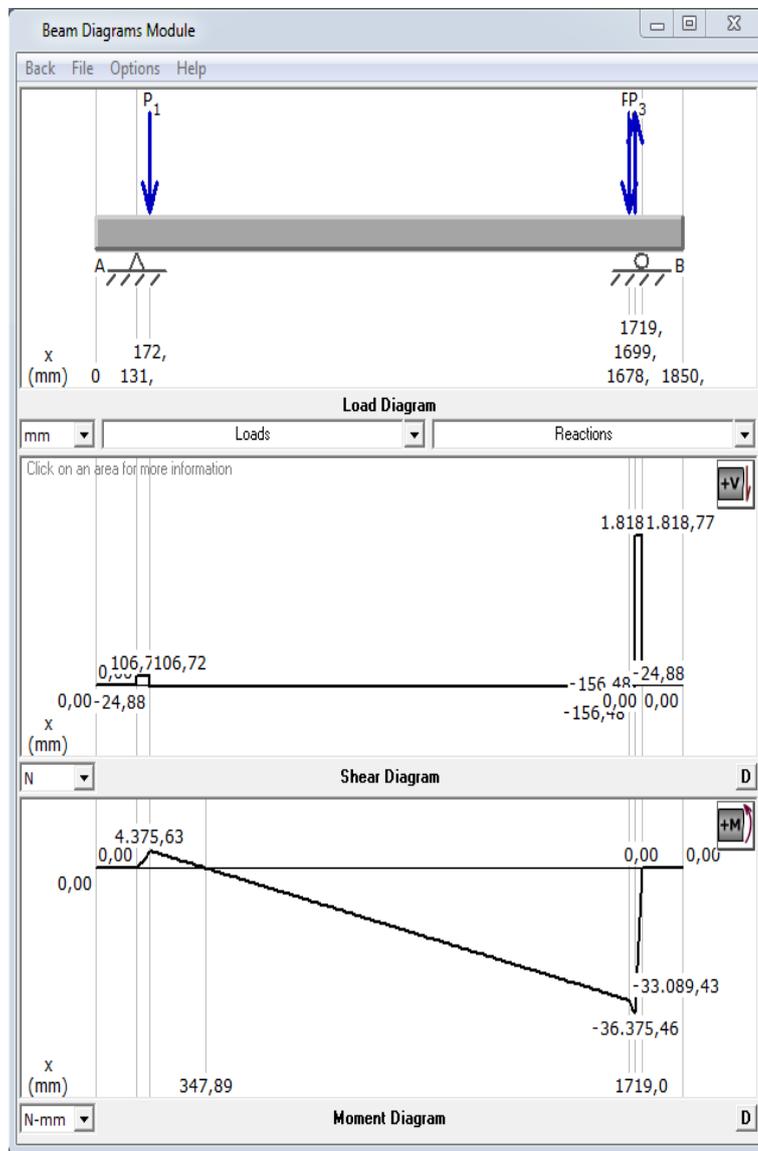
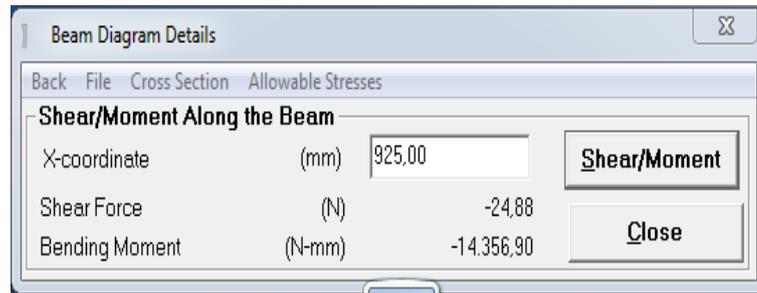


Figura 59. Caso 2, Diagrama de momentos y fuerza cortante en el eje Z.

Ubicación de carga máxima.



**Figura 60. Caso 2, Carga Máxima soportada por el eje Z.**

La sección crítica según los diagramas radica en la sección media:

$$M_y = 246.33Nm$$

$$M_z = 14.36Nm$$

Por lo que el momento total:

$$M = \sqrt{M_y^2 + M_z^2}$$

$$M = 246.75Nm$$

El torque máximo:

$$Torq = T_g = 276.5Nm$$

### 4.3.3 Diseño Estático del Eje de Transmisión

El eje no va a estar sometido a cargas cíclicas, vibraciones ni altas revoluciones, únicamente tendrá un movimiento parcial cada hora dependiendo de la posición del sol, es decir que el eje en un día no va estar sometido a más de una revolución por minuto. Por lo que se hace innecesario realizar el diseño dinámico del mismo.

Se deberá tener en cuenta también que el eje forma un solo cuerpo y no posee muescas o cuñas que podrían ser causantes de concentradores de esfuerzos. Por lo tanto lo que se debería diseñar es el diseño estático del eje de transmisión.

Para el diseño estático se empleó las siguientes relaciones:

Los esfuerzos en la superficie de un eje macizo de sección circular, sometido a cargas combinadas de flexión y torsión, son: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 729)

$$\sigma_x = \frac{32M}{\pi d^3} \quad (4.128)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16T}{\pi d^3} \quad (4.129)$$

Donde:

$\sigma_x$  = esfuerzo de flexión.

$\tau_{xy}$  = esfuerzo de torsión.

d = diámetro del eje.

M = momento flexionante en la sección crítica.

T = momento torsionante en la sección crítica.

Mediante el círculo de Mohr se halla que el esfuerzo cortante máximo es: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 730)

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (4.130)$$

Reemplazando las ecuaciones (4.128) y (4.129) en la ecuación (4.130) se tiene que:

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\frac{32M}{\pi d^3}}{2}\right)^2 + \left(\frac{16T}{\pi d^3}\right)^2}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{1024M^2}{4\pi^2 d^6}\right) + \left(\frac{256T^2}{\pi^2 d^6}\right)}$$

$$\begin{aligned}\tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{256M^2}{\pi^2 d^6}\right) + \left(\frac{256T^2}{\pi^2 d^6}\right)} \\ \tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{256M^2 + 256T^2}{\pi^2 d^6}\right)} \\ \tau_{\max} &= \sqrt{\left(\frac{256(M^2 + T^2)}{\pi^2 d^6}\right)} \\ \tau_{\max} &= \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2}\end{aligned}\tag{4.131}$$

La teoría del esfuerzo cortante máximo para la falla estática expresa que  $S_{sy} = \frac{S_y}{2}$ . Empleando un factor de seguridad  $n$  la ecuación (4.131) puede escribirse como:

$$\frac{S_y}{2n} = \frac{16}{\pi d^3} \sqrt{M^2 + T^2}$$

o bien

$$d = \left[ \frac{32n}{\pi S_y} (M^2 + T^2)^{1/2} \right]^{1/3}\tag{4.132}$$

Aplicando un enfoque similar en que se utiliza la teoría de la energía de distorsión da: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 730)

$$d = \left[ \frac{32n}{\pi S_y} \left( M^2 + \frac{3T^2}{4} \right)^{1/2} \right]^{1/3}\tag{4.133}$$

Donde:

$d$  : Diámetro del eje.

$M$ : Momento flexionante de la sección crítica.

$T$ : Momento torsionante en la sección crítica.

$n$ : Factor de Seguridad.

$S_y$ : Limite de fluencia del material.

De acuerdo a la definición de coeficiente de seguridad en el que, indica que el grado o coeficiente de seguridad, es la relación entre la tensión límite y la máxima admisible de un cuerpo sometido a la acción de fuerzas externas. En donde la tensión máxima admisible será inferior al coeficiente de elasticidad, para evitar que las deformaciones sean permanentes. Con las cargas mayores por los coeficientes de ponderación, la tensión admisible puede alcanzar la del coeficiente de elasticidad, resultando así la barra o pieza calculada. (Larburu, 2001, pág. 187)

Los factores de seguridad implícitos se calculan fácilmente. Para la tensión,  $n = 1 / 0,60 = 1,67$ . Para cizallamiento,  $n = 0,577 / 0,40 = 1,44$ , utilizando la teoría de la distorsión de energía como el criterio de fallo. (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008)

Por lo que aplicando lo citado en el libro podemos emplear lo siguiente:

$$n \geq 1.67$$

Al consultar aceros de transmisión que se puedan encontrar en el mercado local por lo que se encontró un proveedor con los siguientes valores de esfuerzos. (Ver Anexo 5) (SUMITEC)

**Tabla 26**

**Aceros comerciales en Quito.**

Proveedor	Especificación aceros para eje	Límite de fluencia Sy (MPa)	Diámetro (pulgadas)
Iván Bohman	AISI 1018	304.1	1
SUMITEC	AISI 1018	370	1

**Tabla 27**

**Esfuerzo admisible y factor de seguridad.**

Constante	Valor	Unidad
Sy	370000000	N/m <sup>2</sup>
n	1.8	

Caso 1:

$$d = \left[ \frac{32n}{\pi S_y} \left( M^2 + \frac{3T^2}{4} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = \left[ \frac{32(1.8)}{\pi(370 \times 10^6)} \left( (127.94)^2 + \frac{3(325.6)^2}{4} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = 0.024 \text{ m}$$

Caso 2:

$$d = \left[ \frac{32n}{\pi S_y} \left( M^2 + \frac{3T^2}{4} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = \left[ \frac{32(1.8)}{\pi(370 \times 10^6)} \left( (246.75)^2 + \frac{3(276.5)^2}{4} \right)^{1/2} \right]^{1/3}$$

$$d = 0.025 \text{ m}$$

Caso 1:

**Tabla 28**

**Diámetro del eje caso 1.**

CASO 1		
	Valor	Unidad
<b>M<sub>1</sub></b>	127.94	N.m
<b>T<sub>1</sub></b>	325.6	N.m
<b>d</b>	0.024	m

Caso 2:

**Tabla 29**

**Diámetro del eje caso 2.**

CASO 2		
	Valor	Unidad
M1	246.75	N.m
T1	276.5	N.m
d	0.025	m

Por lo que el análisis para cada caso arrojó un diámetro medio entre 0.024 y 0.025 m. Pero para poder seleccionar el diámetro final hay que considerar los siguientes puntos:

- Su funcionamiento será restringido a condiciones estáticas, nunca experimentará cargas críticas.
- Acero comercial
- El acero AISI 1018 del proveedor Ivan Bohman, posee un límite de fluencia muy bajo y no cumple con el requerimiento del diseño del eje.

Por lo que se procede a escoger la barra de acero comercial a continuación detallado:

- Material: AISI 1018.
- Diámetro comercial: 25.4 mm.
- Proveedor: SUMITEC

#### **4.3.4 Selección de Cojinetes**

La vida de un cojinete sujeto a cualquier fuerza será: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 522)

$$C = FL^{\frac{1}{a}}$$

(4.134)

Donde  $L$  está en millones de revoluciones, en la que  $a=3$  para cojinetes de bolas y  $a=10/3$  para cojinetes de rodillos.

Los fabricantes de cojinetes acostumbran especificar la carga radial nominal de un cojinete en correspondencia con cierta velocidad en rpm y cierta vida  $L_{10}$  en horas. Así, en la publicación Timken Engineering Journal se tabulan las capacidades de carga a 3000 horas de vida  $L_{10}$  y a 500 rpm. Si se utilizan el subíndice D para los valores de diseño o requeridos y el R para los valores de catálogo o nominal, entonces la ecuación anterior queda: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 522)

$$C_R = F \left[ \left( \frac{L_D}{L_R} \right) \left( \frac{n_D}{n_R} \right) \right]^{\frac{1}{a}} \quad (4.135)$$

Donde:

$C_R$  es la capacidad básica de carga

$L_R$ ,  $L_{10}$  horas de vida

$n_R$  la velocidad rpm.

$F$  es la carga radial real del cojinete

$L_D$ ,  $L_{10}$  horas de vida nominal.

$n_D$  la velocidad rpm.

$a = 3$  para cojinetes de bolas. (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 521)

Estos quedarían determinados:

- $F = 3316.67$  N, siendo la mayor fuerza en el soporte B.
- $L_R = 3000$  h, siendo el valor recomendado por la técnica de selección.
- $L_D = 26400$  h, valor de diseño para vida.
- $n_D = 1$  rpm, velocidad máxima para diseño.
- $n_R = 500$  rpm, velocidad recomendado por la técnica de selección.

Reemplazando quedaría:

$$C_R = (3316.67 \text{ N}) \left[ \left( \frac{26400 \text{ h}}{3000 \text{ h}} \right) \left( \frac{1}{500} \right) \right]^{\frac{1}{3}} = 862.73 \text{ N} = 0.86 \text{ KN}$$

De la tabla 11-3 de Shigley y con el diámetro de 25 mm se tienen: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 526)

- DI = 25 mm
- DE = 52 mm
- Ancho = 15 mm
- Capacidad de carga = 10.8 kN

Pero el propósito del diseño corresponde el seleccionar elementos existentes en el mercado mediante la designación técnica de los mismos, por lo que: (FAG, pág. 248)

$$C = \frac{f_L}{f_n f_H} P \quad (4.136)$$

Donde:

C: Carga dinámica del rodamiento. (N)

P: Carga aplicada. (N)

$f_L$ : Factor de desgaste

$f_n$ : Factor de velocidad

$f_H$ : Factor de dureza

Estos quedarían determinados:

$f_L = 2.5$  Maquinaria en general. (FAG, pág. 262)

$f_n = 1.494$ , con la velocidad inferior de la tabla de 10 rpm. (FAG, pág. 264)

$f_H = 1$ , temperatura de servicio es menor a 150 °C. (FAG, pág. 249)

$P = 3316.67$  N.

Reemplazando:

$$C = \frac{2.5}{(1.494)(1)} (3316.67 \text{ N}) = 5549.98 \text{ N} \approx 566.32 \text{ kg}$$

Se procede a seleccionar un rodamiento que cumpla con esas especificaciones: (FAG)

- $d = 25 \text{ mm}$
- $D = 62 \text{ mm}$
- Carga dinámica = 1760 kg
- Carga estática = 1160 kg
- Rodamiento en ejecución normal 6305.

Misma descripción que es la misma en relación a la chumacera seleccionada FK P205.

#### 4.3.5 Diseño y Selección de Pernos

A continuación se detalla la selección de pernos considerando la configuración para alojamientos de los mismos presentes en las chumaceras.

Consideraciones previas: Las chumaceras seleccionadas tienen perforaciones para sujeción de diámetro 11 mm, por lo que para empezar con la selección de los mismos se usará uno de diámetro 9.5 mm, con un grado de dureza SAE 5.2, y con 2 pernos por chumacera.

##### 4.3.5.1 Tensión simple

Se determina las máximas fuerzas soportantes:

**Caso 1:**  $A_y = 87.66 \text{ N}$ ,  $A_z = 155.05 \text{ N}$ ;  $B_y = -3313.04 \text{ N}$ ,  $B_z = -155.05 \text{ N}$ .

**Caso 2:**  $A_y = 106.72 \text{ N}$ ,  $A_z = 310.25 \text{ N}$ ;  $B_y = -1878.77 \text{ N}$ ,  $B_z = -310.24 \text{ N}$

En este caso a tensión consideraremos el mayor valor de la reacción en el eje Y.

$$F_y' = 3313.04 \text{ N}$$

Al ser dos pernos que soportarían esta carga, entonces:

$$F_y = 1656.52 \text{ N}$$

De la tabla 8.5 de Shigley se obtienen las propiedades del perno con el grado SAE 5.2: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 403)

- Resistencia a la tensión  $S_{ut} = 120 \text{ kpsi}$
- Resistencia a la prueba  $S_p = 85 \text{ kpsi}$
- Resistencia a la fluencia  $S_y = 92 \text{ kpsi}$

En tanto que de la tabla 8.1 (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 382)

### Área de Esfuerzo de tensión

Diámetro del Perno (mm)	At (mm <sup>2</sup> )
8	39.2
9.5	A <sub>t</sub>
10	61.2

$$\frac{9.5 - 8}{10 - 8} = \frac{A_t - 39.2}{61.2 - 39.2}$$

$$A_t = 55.7 \text{ mm}^2$$

Las constantes de rigidez del perno y de los elementos responde a:  
(Shigley & Mitchell, 1985, pág. 402)

$$C = \frac{K_b}{K_b + k_m} \quad (4.137)$$

Donde:

$k_b$  = Constante de rigidez del perno. [N/m]

$k_m$  = Constante de rigidez de los elementos. [N/m]

La constante de rigidez viene dada por la fórmula: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 392)

$$k_b = \frac{AE}{l} = \frac{\pi d^2 E}{4l} \quad (4.138)$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad del perno.  $2.07 \times 10^{11}$  [Pa] (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 416)

$d$  = Diámetro del perno. 0.0095 [m]

$l$  = Longitud del perno.  $2 \frac{1}{2}$  pulg= 0.0635 [m]

$$k_b = \frac{\pi(0.0095)^2(2.07 \times 10^{11})}{4(0.0635)} = 2.31 \times 10^8 \frac{N}{m}$$

La constante de rigidez de los elementos responde a: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 398)

$$k_m = \frac{\pi E d}{2 \ln \left[ 5 \frac{(l + 0.5d)}{(l + 2.5d)} \right]} \quad (4.139)$$

Donde:

$E$  = Módulo de elasticidad de la chumacera, fundición.  $10 \times 10^{10}$  [Pa].  
(Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 416)

$$k_m = \frac{\pi(10 \times 10^{10})(0.0095)}{2 \ln \left[ 5 \frac{((0.0635) + 0.5(0.0095))}{((0.0635) + 2.5(0.0095))} \right]} = 1.09 \times 10^9 \frac{N}{m}$$

Reemplazando ambas constantes para encontrar la rigidez del conjunto se tiene:

$$C = \frac{2.31 \times 10^8}{2.31 \times 10^8 + 1.09 \times 10^9} = 0.17$$

Empleando la precarga recomendada por shigley (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 405)

$$0.6F_p \leq F_i \leq 0.9F_p$$

Y que esta es:

$$F_p = A_t S_p = (55.7 \text{ mm}^2) \left( \frac{1}{1000 \text{ mm}} \right)^2 \left( \frac{5.86 \times 10^8 \text{ N}}{\text{m}^2} \right) = 32640.2 \text{ N} \quad (4.140)$$

Y el intervalo quedaría:

$$19584.12 \text{ N} \leq F_i \leq 29376.18 \text{ N}$$

Escogiendo para cálculos 29376.18 N.

Pudiendo de esta forma despejar el factor de seguridad: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 404)

$$F_i = A_t S_y - C n P$$

$$n = \frac{(A_t S_y - F_i)}{CP}$$

(4.141)

$$n = \frac{\left(\left(\frac{55.7 \text{ mm}^2}{1000^2}\right)(634.32 \times 10^6 \text{ Pa}) - 29376.18 \text{ N}\right)}{0.17 (1656.52 \text{ N})} = 21.15$$

Factor de seguridad a tensión que asegura en exceso la junta.

#### 4.3.5.2 Corte Puro

En este caso se considera la carga mayor en el eje z 310.25 N, pero esta fuerza debe ser soportada por dos pernos, por lo que la fuerza por unidad será de 155.125 N. (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 436)

$$\tau = \frac{F}{A}$$

(4.142)

Donde:

F: fuerza cortante

A: Área transversal del perno

T: esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{155.125 \text{ N}}{\pi(0.0095 \text{ m})^2} \times 4 = 2.18 \text{ MPa}$$

Y el factor de seguridad por corte es: (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 439)

$$n = \frac{0.577 S_y}{\tau_{xy}} = \frac{0.577(634.32 \text{ MPa})}{2.18 \text{ MPa}} = 167.9$$

(4.143)

Los factores de seguridad a corte puro y a tensión simple indican que es factible el uso de estos pernos:

- Diámetro comercial 3/8" = 9.5 mm
- Longitud 63.5 mm
- Dureza Grado SAE 5.2
- 2 unidades por chumacera.

### 4.3.6 Diseño de Juntas Soldadas

La soldadura a ser analizada corresponde a una soldadura de filete, mismo principio con el que se ha soldado en su totalidad la estructura.

La sección a considerar es la parte de la estructura que soporta las chumaceras, y a estas se consideran los mayores valores tanto en el eje y como en el eje z, por lo que:

$$F_y = 1656.52 \text{ N}, \quad \text{provoca corte en el cordón}$$

$$F_z = 155.125 \text{ N}, \quad \text{provoca tracción en el cordón.}$$

#### 4.3.6.1 Tracción

Para cargas de tensión o de compresión el esfuerzo normal medio es: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 439)

$$\sigma = \frac{F}{hl}$$

Donde:

h: medida de la garganta.

l: longitud de la soldadura.

F: carga de tensión

El área del cordón de soldadura viene dada por el perímetro del tubo de 40 x 40 x 2 mm.

Por lo que:

$$\sigma = \frac{F}{4hl} = \frac{155.125 \text{ N}}{4(0,002\text{m})(0.04\text{m})} = 0.48 \text{ MPa} \quad (4.144)$$

En tanto que el factor de seguridad: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 459)

El esfuerzo de fluencia del acero A36 es 36000 *psi* = 248.20 *MPa*

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{248.2}{0.48} = 517.08 \quad (4.145)$$

#### 4.3.6.2 Corte

El esfuerzo en una soldadura sometida a cortante viene dada por: (Shigley & Mitchell, 1985, pág. 440)

$$\tau = \frac{F}{hl}$$

$$\tau = \frac{F}{4hl} = \frac{1656.52 \text{ N}}{4(0,002\text{m})(0.04\text{m})} = 5.18 \text{ MPa}$$
(4.146)

En tanto que el factor de seguridad (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 477)

El esfuerzo de fluencia del acero A36 es  $36000 \text{ psi} = 248.20 \text{ MPa}$

$$n = \frac{0.5S_y}{\tau} = \frac{0.5(248.2)}{5.18} = 23.95$$
(4.147)

Como puede observarse el diseño de soldadura si es el correcto, por lo que se aseguran las uniones de este tipo en toda la estructura.

Realizando la comparación con la norma AWS D1.1 en la sección 2.6 (Requerimientos Específicos para el diseño de conexiones tubulares cargadas estática o cíclicamente), el esfuerzo permisible, para una sola soldadura de filete lineal o grupos de soldaduras de filete que consistan de soldaduras de filete paralelas lineales todas cargadas al mismo ángulo y cargadas en el plano a través del centroide del grupo de soldadura, el esfuerzo permisible puede determinarse por medio: (American Welding Society, 2010, pág. 8)

$$F_v = 0,3F_{e_{xx}} (1.0 + 0.5\sin^{1.5}\theta)$$
(4.148)

Donde:

$F_v$  = esfuerzo unitario permisible

$F_{e_{xx}}$  = número de clasificación del electrodo y resistencia del electrodo.

$\theta$  = ángulo entre la dirección de la fuerza y el eje del elemento de soldadura, en grados.

En el proceso de soldadura por arco eléctrico se empleo un electrodo 6011.

$$F_v = 0,3(413685438) (1.0 + 0.5\sin^{1.5}(90))$$

$$F_v = 186158439 \text{ Pa} \approx 186.15 \text{ MPa}$$

**Tabla 30****Esfuerzo permisible de las juntas soldadas.**

Variabes	Valor	Unidad
<b>F<sub>exx</sub></b>	60	Kpsi
<b>F<sub>exx</sub></b>	413685438	Pa
<b>θ</b>	90	grados
<b>F<sub>v</sub></b>	186158439	Pa

Fuente: (American Welding Society, 2010)

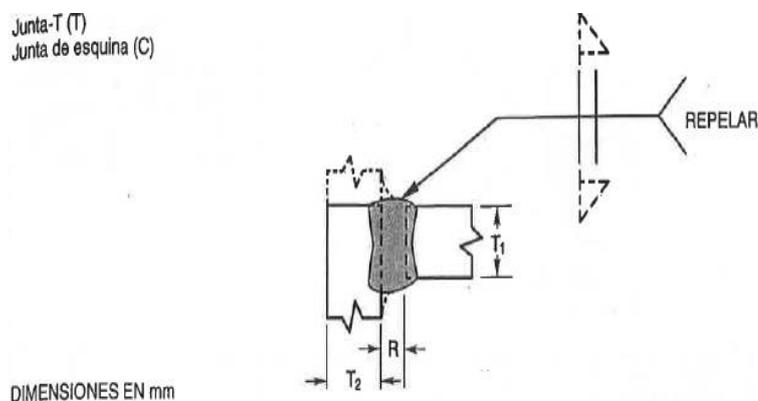
Los esfuerzos calculados del metal base no excede el esfuerzo permisible en las especificaciones aplicables del diseño.

A continuación se indican ciertas consideraciones recomendadas en cuanto a los esfuerzos permisibles y a las configuraciones geométricas recomendadas por la norma AWS D1.1 (American Welding Society, 2010)

**Tabla 31****Esfuerzos Permisibles.**

Tipo de Esfuerzo Aplicado	Esfuerzo Permisible	Nivel de Resistencia Requerido para el Metal de Aporte
<b>Soldadura de Filete</b>		
<b>Corte en el área efectiva</b>	0.30 x clasificación de resistencia de tracción del metal de aporte excepto el corte en el metal de base que el esfuerzo de la sección neta de área de corte no exceda 0.40 x rendimiento de resistencia del metal de base.	Puede usarse metal de aporte con un nivel de resistencia igual o menor al metal base.
<b>Tracción o compresión paralela al eje de la soldadura</b>	No es una consideración de diseño de una junta soldada.	

Fuente: (American Welding Society, 2010, pág. 29)



**Figura 61. Soldadura de canal cuadrado, junta T y junta de esquina.**

**Fuente:** (American Welding Society, 2010)

**Tabla 32**

**Espesor para soldaduras de canal cuadrado, junta T.**

Proceso de Soldadura	Designación de Junta	Espesor de Base de Metal (U = limitado)		Preparación de Canal		Posiciones de Soldar Permisibles	Gas de Protección para FCAW	
		T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	Abertura de Raíz	Tolerancias			
					Como detallado			Como ajustado
SMAW	TC-L1b	6 max	U	$R = \frac{T_1}{2}$	+ 2, - 0	+2,-3	Todas	-

Fuente: (American Welding Society, 2010, pág. 113)

#### 4.3.7 Estructura Soporte

La zona con mayor tendencia al fallo es aquella donde se ensamblan los soportes, por lo que se ha seleccionado esta para comprobar el factor de seguridad.

Se considera esta sección como se indica en la tabla A-9, Doblemente empotrada/carga intermedia, en donde la carga actúa en la mitad, la fuerza considerada es 3313.04 N y la longitud de ese tramo es de 300 mm. (Budynas & J. Keith Nisbett, 2008, pág. 1000)

$$R_1 = R_2 = \frac{Fb^2}{l^3}(3a + b)$$

(4.149)

$$= \frac{(3313.04 \text{ N})(0.15 \text{ m})^2}{(0.300 \text{ m})^3} (3(0.15 \text{ m}) + 0.15 \text{ m}) = 1656.52 \text{ N}$$

$$M_1 = M_2 = \frac{Fa^2b}{l^2}$$

(4.150)

$$= -\frac{(3313.04 \text{ N})(0.15 \text{ m})^2(0.15 \text{ m})}{(0.300 \text{ m})^2} = 124.24 \text{ Nm}$$

$$V_{AB} = R_1 = 1656.52 \text{ N}$$

$$V_{BC} = -R_2 = -1656.52 \text{ N}$$

Considerando el esfuerzo a lo largo del eje x.

$$S_{x/x} = \frac{I}{c}$$

(4.151)

Donde:

$I = 6.6 \text{ cm}^4$ , inercia (Larburu, 2001, pág. 198)

$C = 0.02 \text{ m}$  fibra neutra

$$S_{\frac{x}{x}} = \frac{6.6 \text{ cm}^4}{\frac{(100)^4 \text{ cm}^4}{0.02 \text{ m}}} = 3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Por lo que el esfuerzo admisible es:

$$\sigma_{adm} = \frac{M_{max}}{S_{x/x}} = \frac{124.24 \text{ Nm}}{3.3 \times 10^{-6} \text{ m}^3} = 37.65 \text{ MPa}$$

(4.152)

El  $S_y$  para acero dulce es semejante a 248.2 MPa

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{adm}} = \frac{248.2}{37.58} = 6.59$$

(4.153)

El factor calculado nos da un factor de seguridad de 6.59. Y tomando en cuenta que esta sección es la más afectada y arroja un factor de seguridad superior a 2, por lo que se asume como correcta la configuración de la estructura.

#### **4.3.8 Diseño del Reservorio de Aceite**

Siendo un recipiente a presión cualquier vasija cerrada que sea capaz de almacenar un fluido a presión, independientemente de su forma y dimensiones.

##### **Dimensiones**

Siempre es deseable un depósito grande para promover la separación de contaminantes. Como mínimo, el tanque debe almacenar todo el fluido que el sistema pueda requerir y mantener un nivel de fluido lo suficientemente elevado para impedir el efecto de torbellino a la entrada de la bomba y la consiguiente entrada de aire con el fluido. (VYCMEX , pág. 5)

Para determinar el tamaño del depósito es importante considerar los factores siguientes:

- Dilatación del fluido debido a temperaturas elevadas.
- Variación del nivel del fluido debido al funcionamiento del sistema
- Exposición del interior del depósito a una condensación excesiva.
- Cantidad de calor generado en el sistema.

##### **4.3.8.1 Tapa de Venteo**

En base a la norma API 650 en su sección C.3.9. se determina que para evitar una sobrecarga de la cubierta se debe proveer rejillas de ventilación automática de purga. (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 195)

Esta proveerá ventilación de aire hacia o desde la parte inferior de la cubierta para cuando el tanque se llene o en su defecto se vacíe. (Americam Petroleum Institute, 2007)

El fabricante debe determinar y recomendar el número y tamaño de las rejillas de purga. (Americam Petroleum Institute, 2007)

Estos respiraderos deben estar cerrados en todo momento, excepto cuando sea necesaria su apertura con el fin de aliviar el exceso de presión o de vacío. (Americam Petroleum Institute, 2007)

A razón de lo especificado en la norma se determina que la tapa de venteo solo entrara en funcionamiento cuando el tanque de almacenamiento

se llene o por el otro lado se vacíe. Este permite dar movilidad al producto almacenado. (Americam Petroleum Institute, 2007)

Durante el vaciado o uso del aceite este facilita el ingreso del aire, ya que este último ocupará el espacio entre el techo del tanque y la superficie del aceite, esto evita que se genere vacío. (Americam Petroleum Institute, 2007)

Durante el ingreso del aceite, llenado, permite que el aire bajo el techo pueda ser expulsado desde el interior del tanque, evitando el aumento de presión interna. (Americam Petroleum Institute, 2007)

La capacidad de ventilación para cualquiera de los casos, vaciado y llenado, se determinará bajo los parámetros de la norma API 2000. (Americam Petroleum Institute, 1998)

Haciendo referencia a la capacidad de ventilación indicada en la tabla 34, se determina que la extracción en Nm<sup>3</sup>/h para las dimensiones del tanque es mínima. (Americam Petroleum Institute, 1998, pág. 7)

### Tabla 33

#### Requisitos para la capacidad térmica de ventilación.

Capacidad del tanque	Inhalación (vacío)	Exhalación	
Columna 1 <sup>d</sup>	Columna 2 <sup>a</sup>	Columna 3 <sup>b</sup> Punto de inflamabilidad $\geq$ 37.8 °C o punto normal de ebullición $\geq$ 148.9 °C	Columna 4 <sup>c</sup> Punto de inflamabilidad $<$ 37.8 °C o punto normal de ebullición $<$ 148.9 °C
Metros Cúbicos	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h	Nm <sup>3</sup> /h
10	1.69	1.01	1.69
20	3.37	2.02	3.37
100	16.9	10.1	16.9
200	33.7	20.2	33.7
300	50.6	30.3	50.6

Fuente: (Americam Petroleum Institute, 1998)

**Tabla 34****Extracción de Caudal en el Reservorio.**

$V_{\text{tanque}}$	Entrada	Salida
$\text{m}^3$	$\text{Nm}^3/\text{h}$	$\text{Nm}^3/\text{h}$
10	1,69	1,01
20	3,37	2,02
100	16,9	10,1
200	33,7	20,2
0,26	0,0439	0,02626

Volumen del reservorio de aceite:

$$V = \pi \cdot r^2 \cdot h$$

$$V = \pi \cdot (0.0127)^2 \cdot 1 = 0.26 \text{ m}^3$$

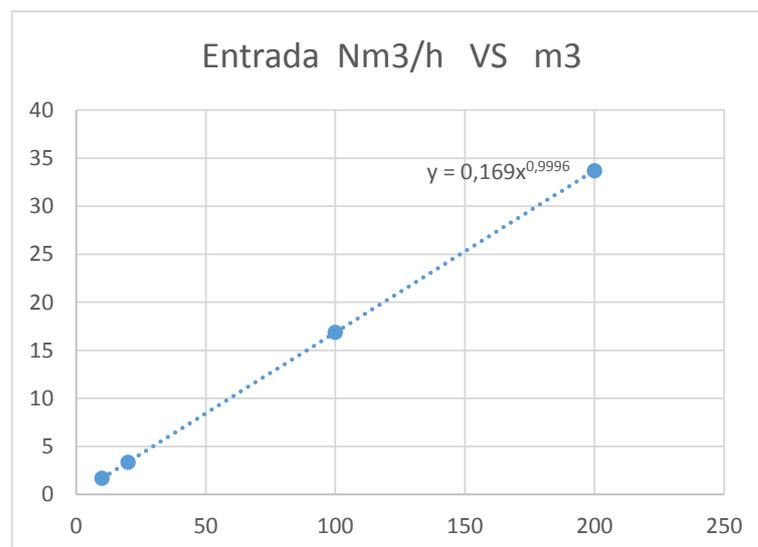
Caudal de inhalación requerida:

$$\text{Caudal de inhalación requerida} = 0.169V^{0.9996}$$

$$\text{Caudal de inhalación requerida} = 0.169 \times (0.26)^{0.9996}$$

$$\text{Caudal de inhalación requerida} = 0.0439 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{Caudal de inhalación requerida} = 0.00001221 \text{ Nm}^3/\text{s}$$



**Figura 62. Extracción de caudal a la entrada del reservorio vs volumen.**

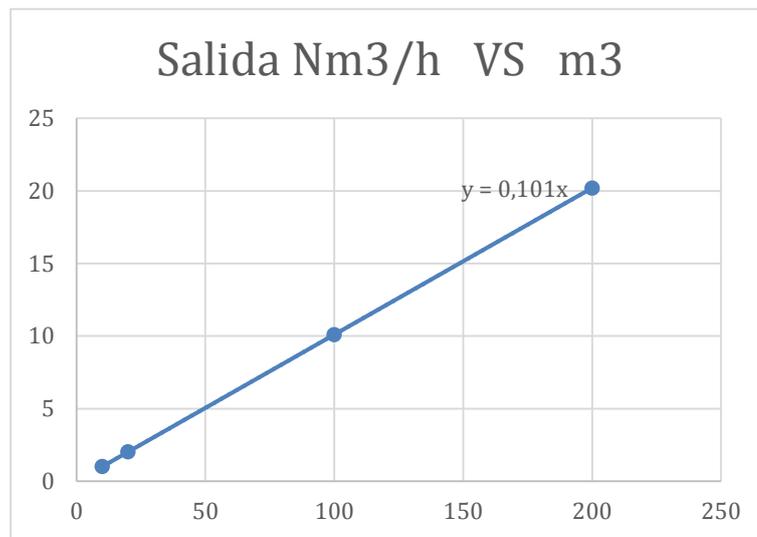
Caudal de exhalación requerida:

$$\text{Caudal de exhalación requerida} = 0.101 \times V$$

$$\text{Caudal de exhalación requerida} = 0.101 \times (0.26)$$

$$\text{Caudal de exhalación requerida} = 0.02626 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\text{Caudal de exhalación requerida} = 0,000007294 \text{ Nm}^3/\text{s}$$



**Figura 63. Extracción de caudal a la salida del reservorio vs volumen.**

Estas dimensiones en relación al volumen del tanque de almacenamiento ( $0,26 \text{ m}^3$ ) implican que la ventilación necesaria es mínima, por lo tanto no es necesario que se lo implemente en el diseño del recipiente.

#### 4.3.8.2 Tapa de Drenaje

Esta tapa es ubicada en la parte inferior del recipiente de aceite, el drenaje permite sacar el aceite cuando se requiera hacerlo, también se la utiliza para retirar el aceite contaminado por otro tipo de sustancias tales como agua y sedimentos. Este elemento permite realizar el mantenimiento del tanque. (VYCMEX)

El recipiente tiene un fondo en forma de plato que permite tener una caída correcta del aceite. Las válvulas de drenaje siempre están localizadas en la parte más baja del recipiente, este dispositivo de conexión debe estar conectado con el interior del tanque para permitir el drenaje completo. (VYCMEX )

#### **4.3.8.3 Medidor de Nivel de Aceite**

Para comprobar el nivel de fluido en el depósito se instala una abertura de vidrio o dos orificios en las tapas, lo que permite comprobar los niveles superior e inferior del fluido sin exponer el depósito a la contaminación que puede ocurrir si se utiliza una varilla de nivel. (VYCMEX , págs. 5-1)

#### **4.3.8.4 Baffle**

El Baffle es una placa separadora tanto de la línea de succión como de la línea de retorno, tiene forma de paleta y es utilizado en intercambiadores de calor. Este elemento hace que el aceite térmico que retorna al reservorio circule alrededor de su pared exterior para ayudar a su enfriamiento antes de que ingrese nuevamente a la bomba. La placa separadora debe ser de aproximadamente de dos tercios la altura del tanque. El nivel de aceite en la línea de retorno y el de la salida deben ser desiguales. Por lo general muchos tanques son provistos con separadores transversales para proporcionar enfriamiento y evitar movimientos excesivos del líquido. (VYCMEX )

#### **4.3.8.5 Materiales del Recipiente**

Con la finalidad de construir el recipiente de almacenamiento se escoge un material con un aceptable comportamiento y que sea comercial. En la etapa de diseño la selección de materiales de construcción es de relevante importancia, este tema es muy amplio y complejo, por lo que no existen indicaciones para la selección en recipientes a presión.

Algunas de las propiedades a ser consideradas son:

- Propiedades mecánicas, es deseable que tenga buena resistencia a la tensión, un alto punto de cedencia, alto porcentaje de alargamiento.
- Propiedades físicas, bajo coeficiente de dilatación térmica.
- Propiedades químicas, resistencia a la corrosión, este factor es de muchísima importancia, ya que un material mal seleccionado reflejará múltiples problemas: reposición del equipo corroído, sobre diseño de espesores, mantenimiento, paros, contaminación producto contenido.

En cuanto a la evaluación de los materiales también hay que considerar aspectos relacionados con la vida útil: vida estimada del proyecto, duración estimada del material, confiabilidad del material, disponibilidad, tiempo de entrega del material, costo del material, costo de fabricación, costo de mantenimiento e inspección.

En cuanto a la decisión final de selección se consideran los requisitos técnicos a la par de requisitos económicos. Los técnicos son importantes ya que de estos depende el correcto funcionamiento y el dar seguridad al sistema. Y los requisitos económicos, lo que equivale a menores gastos (iniciales, de operación y mantenimiento).

Según la norma API 650 en su sección de materiales para tanques 4.2.2 indica que el material que se ajustan a las siguientes especificaciones de la ASTM son aceptables, siempre y cuando estén dentro de las limitaciones indicadas: (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 29)

- ASTM A36, para las placas con un espesor máximo de 40 mm.

Para tuberías y refuerzos, API 650 4.5, indica que son aceptables para estos elementos: ASTM A53/A106/A234/A333/A334/A420/A524/A671. (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 39)

A nivel local se puede encontrar planchas de acero laminadas en caliente, desde espesores de 1,2 mm a 100 mm, en dimensiones externas de 4 x 8 pies.

Siendo el acero escogido el A36, con una fluencia mínima de 250 MPa, el esfuerzo máximo 400 mín a 550 máx MPa y un alargamiento del 20%. (DIPAC, pág. 19)

#### 4.3.8.6 Presión de diseño del sistema

La *presión interna*  $P$  del sistema está en relación directa de la potencia de la bomba a emplearse.

El valor de la presión requerido por el caldero es de 55 psi.

**Tabla 35**

#### **Presión máxima del sistema.**

Parámetro	Cantidad	Unidad
<b>Radio Cu</b>	0,0127	m
<b>V</b>	1	m/s
<b>A</b>	0.00050671	m <sup>2</sup>
<b>Q</b>	8	gpm
<b>P bomba</b>	1	hp
<b>p</b>	55	psi

#### 4.3.8.7 Espesor de las paredes del recipiente

##### **Espesor del recipiente.**

Los tanques de almacenamiento de materias primas y productos se diseñan según el código API 650. El código API 650 sección 5.6.1, establece los requerimientos mínimos para el diseño y fabricación de recipientes a Presión.

En base a esta norma según la sección 5.6.1 se observan premisas recomendadas en relación a los diámetros de dicho tanque. El espesor requerido podría ser mayor a los indicados, considerando a la corrosión,

pero el espesor seleccionado no podrá ser inferior a los tabulados. (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 55)

**Tabla 36**

**Espesor recomendado para recipientes.**

Diámetro nominal del tanque		Espesor nominal de la placa	
(m)	(ft)	(mm)	(in)
< 15	< 50	5	3/16
15 to < 36	50 to < 120	6	1/4

Fuente: (Americam Petroleum Institute, 2007)

Según la tabla 36, dimensionalmente el espesor deberá ser inferior a 5 mm, ya que el tanque tiene un diámetro de 0.68 m.

Aplicando las relaciones recomendadas por la norma en la sección 5.6.3 se usará el cálculo de espesor por el método de 1 pie. (recomendado para tanques con diámetro inferior a 61 m). (Americam Petroleum Institute, 2007)

El valor del espesor será el mayor valor de las siguientes expresiones: (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 58)

$$t_d = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_d} + CA \quad (4.154)$$

$$t_t = \frac{4.9D(H - 0.3)G}{S_t} \quad (4.155)$$

Donde:

$t_d$  = espesor de diseño, mm.

$t_t$  = espesor de prueba hidrostática, mm

D = diámetro nominal del tanque, m.

H = altura del nivel del líquido contenido, m.

G = gravedad específica del líquido contenido.

CA = tolerancia de corrosión, mm.

$S_d$  = esfuerzo de diseño, MPa.

$S_t$  = esfuerzo para prueba hidrostática, MPa.

Diámetro nominal del tanque, D = 0.58 m.

Altura del nivel del líquido, H = 1 m. (se considera la condición extrema de que se llene en su totalidad).

Gravedad específica, G = 0,83.

Tolerancia de corrosión CA = 1 mm. (en base a requerimiento propio)

Esfuerzo de diseño,  $S_d$  = 160 MPa. (tabla 37) (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 56)

### Tabla 37

#### Esfuerzo Admisible del Acero A36.

Material	Grado	Límite de elástico mínimo (Mpa)	Resistencia mínima a la tracción (Mpa)	Esfuerzo de Diseño $S_d$ (Mpa)	Prueba Hidrostática $S_t$ (Mpa)
<b>Especificaciones ASTM</b>					
<b>A 36 M</b>	-	250	400	160	171

Fuente: (Americam Petroleum Institute, 2007)

Esfuerzo prueba hidrostática,  $S_t$  = 171 MPa.

Quedando los espesores:

Espesor de diseño:

$$t_d = \frac{4.9(0.58)(1 - 0.3)(0.83)}{(160)} + 1$$

$$t_d = 1.01 \text{ mm}$$

Espesor de prueba hidrostática:

$$t_t = \frac{4.9(0.58)(1 - 0.3)(0.83)}{(171)}$$

$$t_t = 0.0097 \text{ mm}$$

**Tabla 38**

**Espesores del Recipiente de Aceite.**

Parámetro	Cant	Unid
<b>D</b>	0,58	m
<b>H</b>	1	m
<b>G</b>	0,83	-
<b>CA</b>	1	mm
<b>S<sub>d</sub></b>	160	Mpa
<b>S<sub>t</sub></b>	171	MPa
<b>t<sub>d</sub></b>	<b>1,01</b>	<b>mm</b>
<b>t<sub>t</sub></b>	<b>0,0097</b>	<b>mm</b>

Por lo tanto se concluye que el espesor mínimo a ser considerado para la fabricación del recipiente no puede ser inferior a 1,01 mm, quedando la selección a nivel comercial y de acuerdo al mercado interno se ha encontrado un acero de espesor 2 mm, siendo este el empleado para la fabricación del elemento en cuestión.

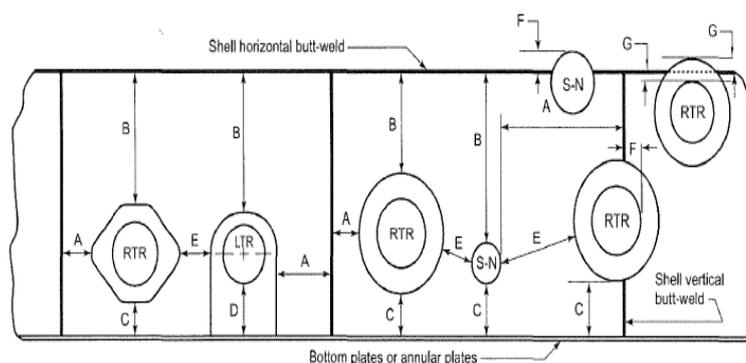
**Recomendaciones para aperturas y perforaciones.**

En base a la sección UG-36 del código ASME VIII div1 menciona que las aberturas deben ser preferentemente circulares, elípticas u oblongas. (The American Society of Mechanical Engineers, 2004, pág. 82)

Pero para mejor comprensión y dimensionamiento de las perforaciones que deben ser hechas para los temas arriba citados se emplea la

información de la norma API 650, sección 5.7. (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 62)

La que menciona que los recomendaciones hechas por la misma tienen la intención de restringir el uso de accesorios que van ensamblados al cuerpo del tanque. Esta restringe la ubicación en relación a los cordones de soldadura así como a las perforaciones ubicadas en cualquier parte del tanque. Ver figura 64.



**Figura 64. Determinación de perforaciones en los accesorios del tanque.**

**Fuente:** (Americam Petroleum Institute, 2007)

Nota:

RTR = Tipo Regular Apertura armado de boquilla o boca con placa de diamante o de forma circular de refuerzo o insertar la placa que no se extiende a la parte inferior.

LTR = Tipo Apertura armado de boquilla o boca utilizando el tipo de lápida placa de refuerzo o insertar la placa que se extiende a la parte inferior.

S-N = Aberturas con ninguna placa de refuerzo ni con una placa de inserción engrosada, es decir aberturas reforzadas integralmente; o aberturas que no requieren de refuerzo.

**Tabla 39 Condiciones para la soldadura de accesorios del reservorio.**

Variables		Referencia	Dimensión mínima de soldadura en la línea central (1) (3)						
Espesor $t$	Condición	Número de Párrafo	A (2)	B (2)	C (2)	D (3)	E (2)	F (4)	G (4)
$t \leq 12.5 \text{ mm}$  $(t \leq \frac{1}{2}) \text{ in}$	Como soldado o PWHT	5.7.3.2	150 mm (6 in)	75 mm (3 in) or 2 $\frac{1}{2} t$			75 mm (3 in) or 2 $\frac{1}{2} t$		
		5.7.3.3			75 mm (3 in) or 2 $\frac{1}{2} t$				
		5.7.3.3			75 mm (3 in) for S-N				
		5.7.3.3							
		5.7.3.4					Table 5- 6A and Table 5- 6b	8t or $\frac{1}{2} t$	
		5.7.3.4							8t

Fuente: (Americam Petroleum Institute, 2007)

Estas recomendaciones serán consideradas durante la configuración geométrica de las perforaciones para los diversos accesorios del tanque.

En cuanto a las perforaciones ubicadas en la parte inferior del tanque se tiene que ver tabla 40, estas tenderán a girar con flexión vertical de la parte del cuerpo del tanque. Generalmente a esta área se adhieren tuberías u otros extremos mismas que podrán generar dichas flexiones.

Con la finalidad de determinar si estas condicionantes aplican o no para el diseño se revisa la tabla 40, misma que menciona que para bridas inferiores o iguales a 2 NPS no requieren placas de refuerzo para su instalación, por lo que de ser el caso cualquier perforación dimensionalmente parecida no implica complicación en cuanto a su realización. (Americam Petroleum Institute, 2007, pág. 71)

Tabla 40

## Determinación de perforaciones en la parte inferior del tanque.

NPS (Tamaño de la boquilla)	Diámetro exterior de tubería OD	Espesor nominal de la boquilla $t_n$	Diámetro del agujero en la placa de refuerzo DR	Longitud del lado de la placa de refuerzo $L$ $= D_o$	Anchura de la placa de refuerzo $W$	Distancia mínima a la brida	Distancia mínima desde el fondo del tanque hasta el centro de la boquilla	
							Tipo Regular $H_N$	Tipo Bajo $C$
2 <sup>f</sup>	60.3	5.54	63	-	-	150	175	h
1 1/2 <sup>f</sup>	48.3	5.08	51	-	-	150	150	h
1 <sup>f</sup>	33.4	6.35	-	-	-	150	150	h
3/4 <sup>f</sup>	26.7	5.54	-	-	-	150	150	h

Fuente: (Americam Petroleum Institute, 2007)

#### 4.3.8.8 Alojamiento y accesorios del recipiente

Un depósito industrial se construye con chapas de acero soldadas y chapas terminales para soportar la unidad. Para reducir la posibilidad de oxidación debida a la condensación del vapor de agua dentro del depósito, su interior se pinta con una capa que sea compatible con el fluido que se utiliza. Puesto que el depósito se diseña para un fácil mantenimiento del fluido, se instala un tapón en su parte inferior que permita un vaciado completo. (VYCMEX , pág. 5)

Los diversos elementos que componen el depósito son:

##### Filtro de aire.

Se instala un tapón de llenado con filtro de aire incorporado para permitir el intercambio de aire debido al cambio constante de presión y temperatura dentro del depósito. Cuando los vástagos de los cilindros hidráulicos salen y entran, el aire es atraído o expulsado a través de este filtro. Generalmente, debe ser lo suficientemente grande para que pueda circular el caudal de aire requerido para mantener la presión, tanto si el depósito está lleno o vacío. En un depósito presurizado, se reemplaza el filtro de aire por una válvula neumática que regula la presión del tanque entre unos límites

predeterminados. En atmosferas excepcionalmente sucias se utiliza algunas veces filtro de aire bañado en aceite. (VYCMEX )

#### **Perforación llenado aceite.**

Este agujero forma frecuentemente parte del conjunto del filtro y lleva una tela metálica removible que mantiene los contaminantes fuera del depósito cuando se añade fluido al tanque. Un tapón unido a este mediante una cadena, proporciona un cierre hermético.

Otro tipo de agujero de llenado es un racor de desconexión rápida atornillado a una tubería a unas pocas pulgadas del fondo del depósito. (VYCMEX )

#### **Línea de conexiones.**

La mayoría de las líneas que llegan al depósito terminan por debajo del nivel de aceite. Las conexiones de las líneas a la tapa del tanque se realizan frecuentemente mediante bridas estancadas con juntas de dilatación. Este diseño impide que los contaminantes penetren a través de estas aberturas y facilita el desmontaje de los coladores para su limpieza. (VYCMEX )

Las conexiones que se efectúan sobre la tapa del depósito utilizan frecuentemente elevadores para que queden encima de la suciedad y otros contaminantes que pueden haber encima del tanque. (VYCMEX )

Para impedir que se forme espuma y aireación en el flujo hidráulico, las líneas de entrada de las bombas deben terminar debajo del nivel del fluido, generalmente a dos pulgadas del fondo del depósito. (VYCMEX )

Las líneas de drenaje de las válvulas pueden terminar por encima del nivel del fluido, pero generalmente es mejor introducirlas aproximadamente dos pulgadas por debajo. En todos los casos, las líneas de drenaje de las bombas y motores deben acabar por debajo del nivel más bajo del fluido. (VYCMEX )

Las líneas que terminan cerca del fondo del depósito y no llevan coladores deben cortarse con un ángulo de 45 para impedir que el extremo de la línea se apoye en el fondo y corte el caudal del fluido. En la línea de retorno, la abertura en ángulo se posiciona de forma que el caudal se dirija a

las paredes del depósito y lejos de la línea de entrada a la bomba.  
(VYCMEX )

#### 4.3.8.9 Cálculo del volumen del reservorio

Se considerará como parámetros decisivos las longitudes de las tuberías por las cuales se transportará el aceite. Estas están comprendidas de:

Volumen de la tubería de Cobre

Tubería de Cu = 36 m.

Diámetro = 25,4 mm.

$$V_{cu} = \pi r^2 L \quad (4.156)$$

$$V_{cu} = \pi(0.0127)^2(36)$$

$$V_{cu} = 0.018 \text{ m}^3$$

Volumen de la tubería Galvanizada

Tubería Galvanizada = 36,4 m.

Diámetro = 40.94 mm.

$$V_{gal} = \pi r^2 L$$

$$V_{gal} = \pi(0.02047)^2(36.4)$$

$$V_{gal} = 0.0479 \text{ m}^3$$

Caldero

Diámetro de las tapas = 0.8 m

Altura de las cámaras = 0.2 m

Numero de tubos = 28

Diámetro de los tubos = 0.0254 m

Altura de los tubos = 1.02 m

$$V_{cal} = 2\pi r^2 h + 28\pi r^2 L \quad (4.157)$$

$$V_{cal} = 2\pi(0.4)^2(0.2) + 28\pi(0.0127)^2(1.02)$$

$$V_{cal} = 0.215 \text{ m}^3$$

Constituyéndose como volumen final:

$$V_f = V_{cu} + V_{gal} + V_{cal}$$

(4.158)

$$V_f = 0.018 \text{ m}^3 + 0.0479 \text{ m}^3 + 0.215 \text{ m}^3$$

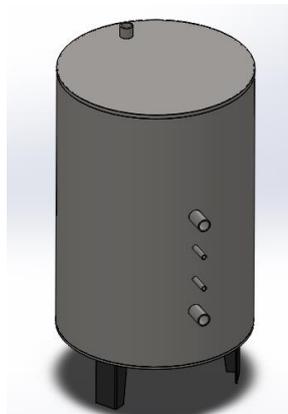
$$V_f = 0.28 \text{ m}^3$$

Volumen total en galones:

$$V_f = 0.28 \text{ m}^3 \times \frac{100^3 \text{ cm}^3}{1 \text{ m}^3} \times \frac{1 \text{ lt}}{1000 \text{ cm}^3} \times \frac{1 \text{ galon}}{3.785 \text{ lt}}$$

$$V_f = 73.97 \text{ galones m}^3$$

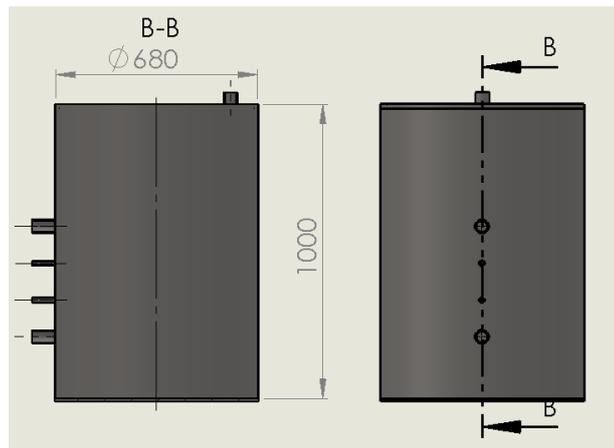
Por razones de seguridad en los recipientes, este será lleno a un máximo del 80%, esta consideración se toma en cuenta a la hora de determinar las dimensiones.



**Figura 65. Vista frontal del Recipiente del Aceite.**

**Fuente:** (MER, Guasumba, Quintana, & Yépez, 2014)

Garantizando todo lo anteriormente mencionado las siguientes dimensiones:



**Figura 66. Corte B-B del Reservorio de Aceite.**

- El diámetro es 58 cm debido a que en su interior hay del recipiente hay un aislante que es la lana de vidrio de 5 cm de espesor.

Entonces el diámetro queda así:

$$D = 68 \text{ cm} - 2(\text{espesor}_{\text{lana de vidrio}}) \quad (4.159)$$

$$D = 68 \text{ cm} - 2(5)$$

$$D = 58 \text{ cm} = 580 \text{ mm}$$

- Altura = 1000 mm.
- Volumen tanque = 0,26 m<sup>3</sup>.
- No aplica porcentaje de sobredimensionamiento ya que el volumen final requerido es mayor al volumen propio del tanque.

#### 4.3.9 Selección de tuberías

##### Tuberías en Paralelo

Las tuberías en paralelo están compuestas por múltiples tubos que están conectados de manera que el flujo se divide entre el número de tubos que tenga al principio y las corrientes de flujo separadas que se terminan uniéndose en un solo punto. (Shashi Menon, 2005, pág. 36)

En la figura 67 se puede observar un sistema de tuberías en paralelo en el plano horizontal sin cambio en las elevaciones de la tubería. El fluido fluye

a través de un solo tubo AB, y en la unión B el flujo se divide en tres ramas de tubería BCF, BDF, BEF. (Shashi Menon, 2005, pág. 36)

En la tubería FG los flujos del fluido se reincorporan y fluyen hasta obtener el caudal inicial del sistema y comenzar nuevamente el ciclo. (Shashi Menon, 2005, pág. 36)

Para calcular las tasas de flujo y caída de presión debido a la fricción en el sistema de tuberías en paralelo en la figura 67 se muestra dos principios fundamentales de paralelo la tubería debe ser seguido. Estos son la conservación de flujo en cualquier unión punto y caída de presión común en cada ramal de tubería paralela. (Shashi Menon, 2005, pág. 36)

Sobre la base de la conservación de flujo, en cada punto de la tubería de unión, el flujo de entrada debe ser igual a exactamente la salida total. Por lo tanto, en unión B, el caudal  $Q$  de entrada debe ser igual a la suma de los caudales en las ramas que se divide. (Shashi Menon, 2005, pág. 36)

Por lo tanto:

$$Q = Q_{BCF} + Q_{BDF} + Q_{BEF} \quad (4.160)$$

Donde:

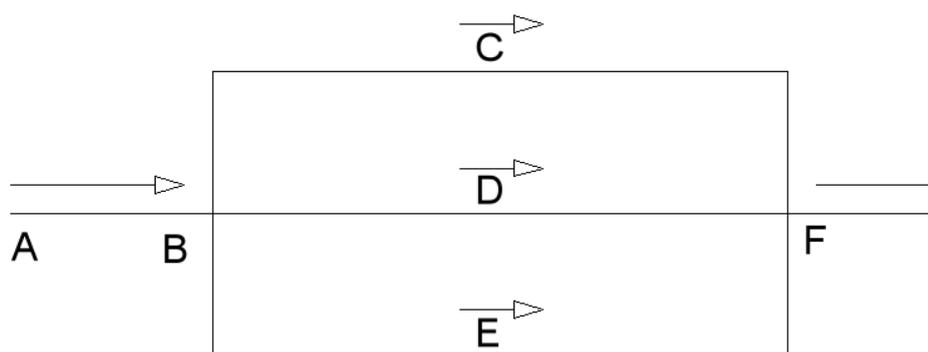
$Q_{BCF}$  = Caudal en el tramo BCF

$Q_{BDF}$  = Caudal en el tramo BDF

$Q_{BEF}$  = Caudal en el tramo BEF

$Q$  = Caudal de entrada a la salida B

El otro requisito en tuberías paralelas se refiere a la caída de presión en cada tubería de rama. Sobre la base de esta caída de la presión debido a la fricción.



**Figura 67. Tuberías en Paralelo.**

El tramo  $BCF = BDF = BEF$ . Esto es porque en los tres tramos tienen un punto de partida común B y un final común punto F. Puesto que la presión en cada uno de estos tres puntos es un único valor, podemos concluir que la caída de presión en estas tuberías es la misma. (Shashi Menon, 2005, pág. 37)

Otro enfoque para el cálculo de la caída de presión en la tubería paralela es el uso de un diámetro equivalente para las tuberías paralelas. Es decir si en la figura 69 en el tramo AB se tiene una tubería de acero galvanizado de cedula 40 y 1 pulgada de diámetro interior, en los tramos BCF, BDF, BEF la tubería es de cobre y tiene un diámetro interior de 1 pulgada se pueden encontrar algunos diámetros equivalentes especialmente en los tramos mencionados ya que tendrá la misma caída de presión en los puntos B y C y en el tramo FG tenemos una tubería de acero galvanizado cedula 40 y un diámetro interior de 1 ½ pulgada. (Shashi Menon, 2005, pág. 37)

El diámetro equivalente se puede calcular usando la Ecuación de Darcy: (Shashi Menon, 2005, pág. 38)

$$D_e = D_1 \left( \frac{Q}{Q_1} \right)^{0.4} \quad (4.161)$$

### Cálculos de la Pérdidas en Tuberías

#### Para la Sección A

Caudal de toda la tubería en (gal/min)

$$Q = 8 \frac{gal}{min}$$

Caudal de toda la tubería en (m<sup>3</sup>/h)

$$Q = 8 \frac{gal}{min} * \frac{3.785 \text{ lt}}{1 \text{ gal}} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ lt}} * \frac{60 \text{ min}}{1 \text{ h}} = 1.82 \frac{\text{m}^3}{h}$$

Gravedad Específica: (Shashi Menon, 2005, pág. 3)

$$S_g = \frac{\rho_{aceite}}{\rho_{agua}}$$

(4.162)

$$S_g = \frac{828.759}{1000}$$

$$S_g = 0.83$$

Determinación del caudal en cada una de las tuberías. (Shashi Menon, 2005, pág. 40)

$$\frac{Q_e^{1.852}}{D_e^{4.87}} = \frac{Q_1^{1.852}}{D_1^{4.87}} = \frac{Q_2^{1.852}}{D_2^{4.87}} = \frac{Q_3^{1.852}}{D_3^{4.87}}$$

(4.163)

$$\frac{D_e}{D_1} = \left( \frac{Q_e}{Q_1} \right)^{0.3803}$$

(4.164)

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

(4.165)

Utilizando las ecuaciones anteriores los caudales por cada sección serian:

Relación 1:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2.63} \quad (4.166)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{25.4}{25.4}\right)^{2.63}$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = 1$$

$$Q_1 = Q_2$$

Relación 2:

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \left(\frac{D_2}{D_3}\right)^{2.63} \quad (4.167)$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = \left(\frac{25.4}{25.4}\right)^{2.63}$$

$$\frac{Q_2}{Q_3} = 1$$

$$Q_2 = Q_3$$

Relación 3:

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \left(\frac{D_1}{D_3}\right)^{2.63} \quad (4.168)$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = \left(\frac{25.4}{25.4}\right)^{2.63}$$

$$\frac{Q_1}{Q_3} = 1$$

$$Q_1 = Q_3$$

Usando la Ecuación (4.165)

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$8 = Q_1 + Q_1 + Q_1$$

$$8 = 3Q_1$$

$$Q_1 = 2.67 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

$$Q_2 = 2.67 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

$$Q_3 = 2.67 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

Utilizando la Ecuación (4.164)

$$D_e = D_1 \left( \frac{Q_e}{Q_1} \right)^{0.3803}$$

$$D_e = 25.4 \left( \frac{8}{2.67} \right)^{0.3803}$$

$$D_e = 38.55 \text{ m}$$

La caída de presión se puede calcular mediante la ecuación de Hazen – Williams. (Shashi Menon, 2005, pág. 21)

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} * \frac{S_g}{(D)^{4.87}}$$

(4.169)

Donde:

$$Q = \text{caudal} \left( \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right)$$

$D = \text{diametro interno del tubo}(\text{mm})$

$P_m = \text{caída de presión por fricción} \left( \frac{kPa}{km} \right)$

$S_g = \text{gravedad específica del aceite.}$

$C = \text{factor } C \text{ de Hazen – Williams}$

**Tabla 41**

**Hazen-Williams factor C.**

Material de tubos	Factor C
<b>Tubos lisos(Todos los metales)</b>	130-140
<b>Hierro fundido(antiguo)</b>	100
<b>Acero</b>	60-80
<b>Cloruro de polivinilo</b>	150
<b>Ladrillo</b>	100
<b>Madera lisa</b>	120
<b>Mampostería lisa</b>	120
<b>Arcilla vitrificada</b>	110

Fuente: (Shashi Menon, 2005)

A continuación se mencionan los diámetros de las tuberías de acero galvanizado.

**Tabla 42**

**Dimensiones y Pesos de las tuberías.**

NPS	Diámetro Ext. (mm)	Espesor / Masa
		40S
1	33.4	3.38
		2.50
1 1/2	48.3	3.68
		4.05

Fuente: (Tubacero, S.A)

- ✓ La caída de presión en la sección AB, usando la ecuación de Hazen-Williams con longitud de tubo galvanizado de 4730 mm es:

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} * \frac{S_g}{(D)^{4.87}}$$

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left( \frac{1.82}{130} \right)^{1.852} * \frac{0.83}{(26.64)^{4.87}}$$

$$Pm = 387.9 \text{ kPa/km}$$

$$\Delta P_a = 387.9 \frac{\text{kPa}}{\text{km}} * 4.73 * 10^{-3} \text{ km}$$

$$\Delta P_a = 1.834 \text{ kPa}$$

- ✓ La caída de presión en la sección BF, usando la ecuación de Hazen-Williams con longitud de tubo de cobre de 11230 mm es:

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left( \frac{Q}{C} \right)^{1.852} * \frac{S_g}{(D)^{4.87}}$$

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left( \frac{1.82}{130} \right)^{1.852} * \frac{0.83}{(38.55)^{4.87}}$$

$$Pm = 64.14 \text{ kPa/km}$$

$$\Delta P_b = 64.14 \frac{\text{kPa}}{\text{km}} * 0.011230 \text{ km}$$

$$\Delta P_b = 0.72 \text{ kPa}$$

- ✓ La caída de presión en la sección FG, usando la ecuación de Hazen-Williams con longitud de tubo galvanizado de 26660 mm es:

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left(\frac{Q}{C}\right)^{1.852} * \frac{S_g}{(D)^{4.87}}$$

$$Pm = 1.1101 * 10^{13} \left(\frac{1.68}{130}\right)^{1.852} * \frac{0.83}{(40.94)^{4.87}}$$

$$Pm = 47.85 \text{ kPa/km}$$

$$\Delta P_c = 47.85 \frac{\text{kPa}}{\text{km}} * 0.02666 \text{ km}$$

$$\Delta P_c = 1.275 \text{ kPa}$$

Caída de presión en las secciones AB, BF, y FG:

$$\Delta P_{total} = \Delta P_a + \Delta P_b + \Delta P_c$$

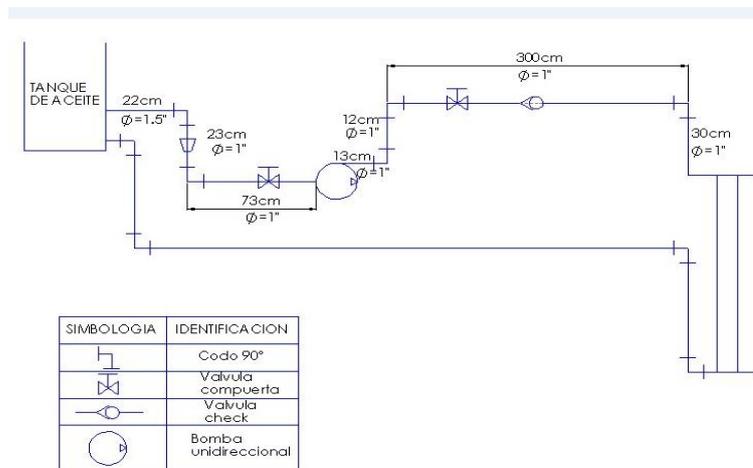
(4.170)

$$\Delta P_{total} = 1.834 + 0.72 + 1.275$$

$$\Delta P_{total} = 3.829 \text{ kPa}$$

#### 4.3.9.1 Línea de Aspiración

##### Análisis de accesorios en la línea de aspiración



**Figura 68. Longitud de accesorios en diferentes tramos de las tuberías.**

Tabla 43

## Longitud equivalente para tubería recta, válvulas y accesorios.

Longitud equivalente de tubería recta de Válvulas y Conexiones (pies)												
		Pipe Size										
		1/4	3/8	1/2	3/4	1	1 ¼	1 ½	2	2 ½	3	4
Herrajes atornillados	Regular 90 grados	2.3	3.1	3.6	4.4	5.2	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13
	Radio largo 90 grados	1.5	2	2.2	2.3	2.7	3.2	3.4	3.6	3.6	4	4.6
Codos	Regular 45 grados	0.3	0.5	0.7	0.9	1.3	1.7	2.1	2.7	3.2	4	5.5
	Flujo de línea	0.8	1.2	1.7	2.4	3.2	4.6	5.6	7.7	9.3	12	17
Tees	Flujo derivado	2.4	3.5	4.2	5.3	6.6	8.7	9.9	12	13	17	21
	Regular 180 grados	2.3	3.1	3.6	4.4	5.5	6.6	7.4	8.5	9.3	11	13
Válvulas	Globo	21	22	22	24	29	37	42	54	62	79	110
	Compuerta	0.3	0.5	0.6	0.7	0.8	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.5
	Angulo	12.8	15	15	15	17	18	18	18	18	18	18
	Check	7.2	7.3	8.0	8.8	11	13	15	19	27	27	38
Colador		4.6	5.0	6.6	7.7	18	20	27	34	34	42	

Fuente: (The Engineering ToolBox)

Tubería Horizontal:

$$\varnothing = 0.04094 \text{ m}$$

$$L = 22 \text{ cm} = 0.22 \text{ m}$$

$$Q = 8 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 5.067 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Área:

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi \cdot (0.02047)^2$$

$$A = 1.32 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Velocidad:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{(5.067 \times 10^{-4})}{(1.32 \times 10^{-3})}$$

$$V = 0.38 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{(0.38)(0.04094)}{(13.944 \times 10^{-6})}$$

$$Re = 1115.69$$

Factor de fricción: (Shashi Menon, 2005, pág. 15)

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{(1115.69)}$$

$$f = 0.057$$

Caída de Presión viene por la ecuación de Darcy: (Shashi Menon, 2005, pág. 13)

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

(4.171)

$$h_L = \frac{(0.057)(0.22)(0.38)^2}{2(9.8)(0.04094)}$$

$$h_L = 0.0023 \text{ m}$$

Longitud de los accesorios:

$$1 \text{ codo } 90^\circ (1 \frac{1}{2}'') = \frac{7.4 \text{ ft}}{3.28 \text{ m}}$$

$$1 \text{ codo } 90^\circ (1 \frac{1}{2}'') = 2.25 \text{ m}$$

Reducción:

Coefficiente de Resistencia K: (Shashi Menon, 2005, pág. 26)

$$K = f \frac{L}{D}$$

$$K = (0.057) \frac{(0.22)}{(0.04094)}$$

$$K = 0.31$$

$$1 \text{ real } \left(1\frac{1}{2} - 1\right): \quad K = 0.31$$

La pérdida mínima por la reducción es: (Shashi Menon, 2005, pág. 26)

$$h = \frac{Kv^2}{2g} = \frac{(0.31)(0.38)^2}{2(9.8)} = 0.0023 \text{ m}$$

Tubería Vertical:

$$\emptyset = 1'' = 0.02664 \text{ m}$$

$$L = 23 \text{ cm} = 0.23 \text{ m}$$

$$Q = 8 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 5.067 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Área:

$$A = \pi \cdot r^2$$

$$A = \pi \cdot (0.01332)^2$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Velocidad:

$$V = \frac{Q}{A}$$

$$V = \frac{(5.067 \times 10^{-3})}{(5.57 \times 10^{-4})}$$

$$V = 0.91 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds:

$$Re = \frac{VD}{\nu}$$

$$Re = \frac{(0.91)(0.02664)}{(13.944 * 10^{-6})}$$

$$Re = 1738.55$$

Factor de fricción:

$$f = \frac{64}{Re}$$

$$f = \frac{64}{(1738.55)}$$

$$f = 0.037$$

Caída de Presión

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

$$h_L = \frac{(0.037)(0.23)(0.91)^2}{2(9.8)(0.02664)}$$

$$h_L = 0.014 \text{ m}$$

Longitud de los accesorios:

$$1 \text{ codo } 90^\circ (1'') = \frac{5.2 \text{ ft}}{3.28 \text{ m}}$$

$$1 \text{ codo } 90^\circ (1'') = 1.58 \text{ m}$$

Tubería Horizontal:

$$\phi = 1'' = 0.02664 \text{ m}$$

$$L = 73 \text{ cm} = 0.73 \text{ m}$$

$$f = 0.037$$

$$V = 0.91 \text{ m/s}$$

$$Re = 1738.55$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Caída de Presión:

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

$$h_L = \frac{(0.037)(0.73)(0.91)^2}{2(9.8)(0.02664)}$$

$$h_L = 0.043 \text{ m}$$

Longitud de los accesorios:

$$1 \text{ valvula de compuerta (1'')} = \frac{0.8 \text{ ft}}{3.28 \text{ m}} = 0.24 \text{ m}$$

Total línea de aspiración

$$\sum h_{\text{aspiración}} = 0.0023 + 2.25 + 0.0028 + 0.014 + 1.58 + 0.043 + 0.24$$

$$\sum h_{\text{aspiración}} = 4.13 \text{ m}$$

**Tabla 44**

**Datos de la longitud de accesorios en la línea de aspiración.**

Parámetro	Tubería Horizontal	Tubería Vertical	Tubería Horizontal
$\phi$ (m)	0.04094	0.02664	0.02664
L(m)	0.22	0.23	0.73
f	0.057	0.037	0.037
Q (m <sup>3</sup> /s)	$5.067 \times 10^{-4}$	$5.067 \times 10^{-4}$	$5.067 \times 10^{-4}$
A (m <sup>2</sup> )	$1.32 \times 10^{-3}$	$5.57 \times 10^{-4}$	$5.57 \times 10^{-4}$
V(m/s)	0.38	0.91	0.91
Re	1115.69	1738.55	1738.55
$h_L$ (m)	0.0023	0.014	0.043
1 codo 1" x 90° (m)	-	1.58	-
1 codo 1 1/2" x 90° (m)	2.25		
1 válvula compuerta 1"	-	-	0.24
Reductor 1 1/2" a 1"	0.0028	-	-

#### 4.3.9.2 Línea de Trabajo

##### Análisis de accesorios en la línea de trabajo hasta los concentradores

Tubería Vertical:

$$\emptyset = 1'' = 0.02664 \text{ m}$$

$$L = 0.13 + 0.12 = 0.25 \text{ m}$$

$$f = 0.037$$

$$V = 0.91 \text{ m/s}$$

$$Re = 1738.55$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Caída de Presión:

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

$$h_L = \frac{(0.037)(0.25)(0.91)^2}{2(9.8)(0.02664)}$$

$$h_L = 0.015 \text{ m}$$

Longitud de accesorios:

$$2 \text{ codos } 90^\circ (1'') = \frac{2(5.2)}{3.28 \text{ m}} = 3.17 \text{ m}$$

$$\sum Tub_{vert} = 0.015 + 3.17$$

$$\sum Tub_{ver} = 3.19 \text{ m}$$

Tubería Horizontal:

$$\emptyset = 1'' = 0.02664 \text{ m}$$

$$L = 3 + 0.3 = 3.3 \text{ m}$$

$$f = 0.037$$

$$V = 0.91 \text{ m/s}$$

$$Re = 1738.55$$

$$A = 5.57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

## Caída de Presión

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

$$h_L = \frac{(0.037)(3.3)(0.91)^2}{2(9.8)(0.02664)}$$

$$h_L = 0.19 \text{ m}$$

Longitud de accesorios:

$$2 \text{ codos } 90^\circ (1'') = \frac{2(5.2 \text{ ft})}{3.28 \text{ m}} = 3.17 \text{ m}$$

$$1 \text{ valvula compuerta } (1'') = \frac{0.8 \text{ ft}}{3.28 \text{ m}} = 0.243 \text{ m}$$

$$1 \text{ valvula check}(1'') = \frac{11 \text{ ft}}{3.28 \text{ m}} = 3.35 \text{ m}$$

$$\sum Tub_{hor} = 0.19 + 3.17 + 0.243 + 3.35$$

$$\sum Tub_{hor} = 6.95 \text{ m}$$

Total línea de trabajo:

$$\sum h_{trabajo} = \sum Tub_{ver} + \sum Tub_{hor}$$

$$\sum h_{trabajo} = 3.19 + 6.95$$

$$\sum h_{trabajo} = 10.14 \text{ m}$$

Tabla 45

Datos de la longitud de accesorios en la línea de trabajo.

Parámetro	Tubería Vertical	Tubería Horizontal
$\phi$ (m)	0.02664	0.02664
L(m)	0.25	3.3
f	0.037	0.037
Q (m <sup>3</sup> /s)	45.067 x 10 <sup>-4</sup>	4.678 x 10 <sup>-4</sup>
A (m <sup>2</sup> )	5.57 x 10 <sup>-4</sup>	5.57 x 10 <sup>-4</sup>
V(m/s)	0.91	0.91
Re	1738.55	1738.55
$h_L$ (m)	0.015	0.19
2 codos de 90° (1") (m)	3.17	3.17
1 válvula compuerta	-	0.243
1 válvula Check	-	3.35

#### 4.3.9.3 Línea de Retorno

Descarga Retorno

$$\phi = 1.5'' = 0.04094 \text{ m}$$

$$L = 26.66 \text{ m}$$

$$Q = 8 \frac{\text{gal}}{\text{min}} = 5.067 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$f = 0.057$$

$$V = 0.38 \text{ m/s}$$

$$Re = 1115.69$$

Caída de Presión:

$$h_L = \frac{fLv^2}{2gD}$$

$$h_L = \frac{(0.057)(26.66)(0.38)^2}{2(9.8)(0.04094)}$$

$$h_L = 0.27 \text{ m}$$

Longitud de accesorios:

$$4 \text{ codos } 90^\circ (1 \frac{1}{2}'') = \frac{(4)(7.4)}{3.28}$$

$$4 \text{ codos } 90^\circ (1 \frac{1}{2}'') = 9.02 \text{ m}$$

3 aumentos de tubería: (Shashi Menon, 2005, pág. 28)

$$h_f = \frac{(v_1 - v_2)^2}{2g}$$

$$h_f = \frac{(0.38 - 0.91)^2}{2(9.8)}$$

$$h_f = 0.014 \text{ m}$$

$$h_f = 0.014 \times 3 \text{ m}$$

$$h_f = 0.04 \text{ m}$$

$$\sum h_{retorno} = 0.27 + 9.02 + 0.04$$

$$\sum h_{retorno} = 9.33 \text{ m}$$

**Tabla 46**

**Datos de la longitud de accesorios en la línea de retorno.**

Parámetro	Tubería Horizontal
$\emptyset$ (m)	0.04094
L(m)	26.66
f	0.057
Q (m <sup>3</sup> /s)	5.067 x 10 <sup>-4</sup>
A (m <sup>2</sup> )	1.32 x 10 <sup>-3</sup>
V(m/s)	0.38
Re	1115.69
h <sub>L</sub> (m)	0.27
4 codos de 90° (1 ½ ") (m)	9.02
3 aumentos (1" a 1 ½") (m)	0.04

Presión de Diseño en el Caldero

$$P_{diseño} = 55 \text{ psi} * \frac{1 \text{ bar}}{14.5 \text{ psi}} * \frac{100000 \text{ Pa}}{1 \text{ bar}}$$

$$P_{diseño} = 379.31 * 10^3 \text{ Pa}$$

$$P = \rho gh$$

$$379.31 * 10^3 = 828.759(9.8)h_{caldero}$$

$$h_{caldero} = 46.70 \text{ m}$$

Perdidas en el sistema en paralelo = 3.829 KPa = 3829 Pa

$$P = \rho gh$$

$$3829 = 828.759(9.8)h_{sistema \text{ en paralelo}}$$

$$h_{sistema \text{ en paralelo}} = 0.47 \text{ m}$$

Total pérdidas y presión necesarias

$$\sum total_{pérdidas} = \sum h_{aspiración} + \sum h_{trabajo} + \sum h_{retorno} + h_{caldero} + h_{sistema \text{ en paralelo}}$$

$$\sum total_{pérdidas} = 4.13 + 10.14 + 9.33 + 46.70 + 0.47$$

$$\sum total_{pérdidas} = 70.77 \text{ m} \approx 70 \text{ m}$$

Corrección por viscosidad

$$v = 13.944 \text{ cst} \approx 14 \text{ cst}$$

Caudal Real de la Bomba

Los factores  $C_q$  y  $C_H$  permiten realizar la corrección por viscosidad, la gráfica se puede observar en el Anexo 6.

$$Q_{real} = \frac{Q}{C_q}$$

$$Q_{real} = \frac{8}{1}$$

$$Q_{real} = 8 \frac{\text{gal}}{\text{min}}$$

Altura Real de la Bomba

$$H_{real} = \frac{H}{C_H} = \frac{70}{1} = 70 \text{ m}$$

#### 4.3.10 Selección de Bomba de Aceite

Teniendo en cuenta los requerimientos y cálculos previamente realizados, se procede a seleccionar la bomba.

Caudal Real de la bomba

$$Q_{real} = \frac{gal}{min} = 1.82 \frac{m^3}{hr}$$

Altura real de la bomba

$$H_{real} = 70 \text{ m}$$

#### Tabla 47

#### Requerimientos de Bomba.

Fluido a circular	Aceite mineral
Caudal Q	1.82 m <sup>3</sup> /hr
Altura bomba	70 m

Se busca una bomba que cumpla con estos requerimientos de fluido a circular, caudal y altura, y se obtiene del catálogo de Grundfos la figura 69 con sus respectivas curvas.

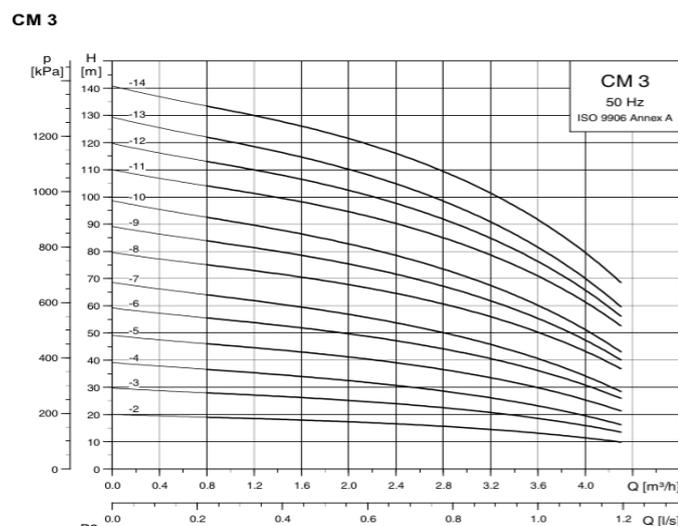
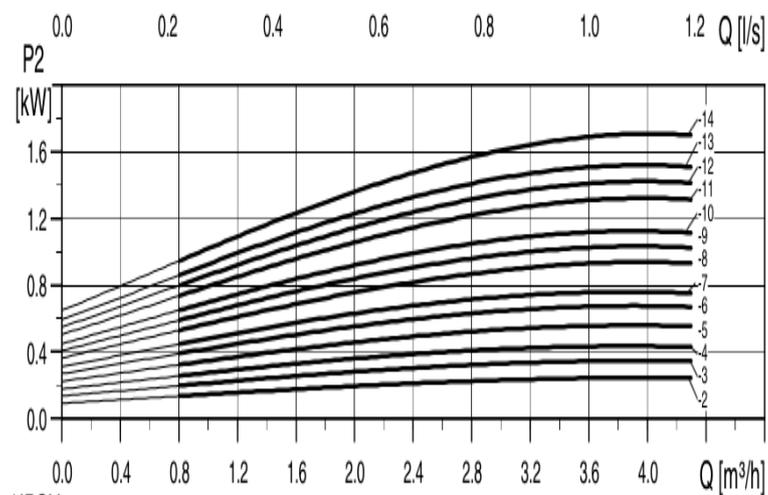


Figura 69. Curvas Característica de la Bomba CM 3 50Hz

Fuente: (Grundfos)

La curva más cercana al caudal y altura mencionados es la curva número 8.

Para hallar la potencia de la bomba que se requiere para pedir al proveedor, se deberá ingresar con el caudal de  $1.82 \text{ m}^3/\text{h}$  y el número de curva obtenido anteriormente que en este caso es la número 8. (Ver figura 70)

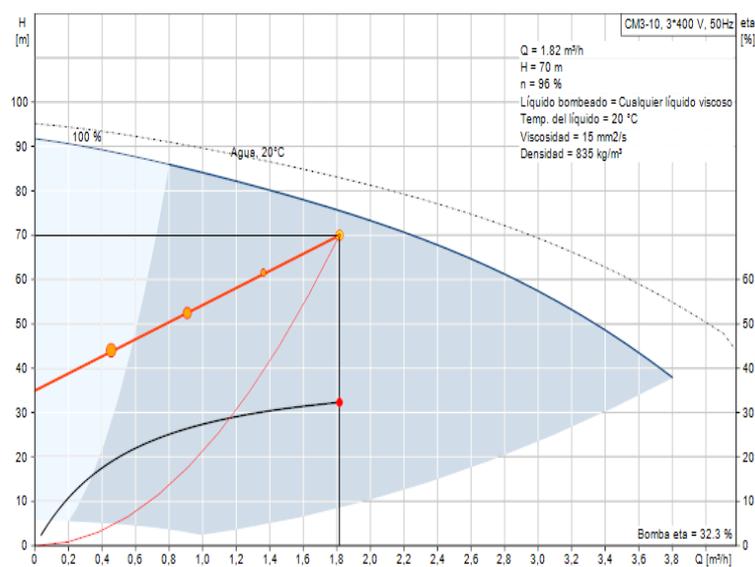


**Figura 70. Curva de Caudal vs Potencia**

**Fuente:** (Grundfos)

Se obtiene una potencia de 0.80 kW.

Para verificar si la bomba seleccionada es eficiente se ingresa a la revisar la figura 71:



**Figura 71. Curva característica individual**

Según esta grafica podemos darnos cuenta que la bomba seleccionada es la más óptima para nuestra aplicación puesto que se obtiene una eficiencia del 96%.

#### **4.4 Construcción y Montaje**

##### **4.4.1 Construcción de la estructura soporte del CCP.**

Cortar el tubo de acero negro cuadrado de 40 x 40 x 2 mm con cierra circular con dimensiones de:

- 72 tubos con largo de 1400 mm.
- 36 tubos con largo de 1550 mm.
- 36 tubos con largo de 300 mm.
- 36 tubos con largo de 380 mm.
- 36 tubos con largo de 950 mm.



**Figura 72. Cortado de los tubos cuadrados en diferentes medidas.**

Biselar los tubos que se cortaron anteriormente con las siguientes dimensiones:

- 72 tubos de 1400 mm con ángulo de  $55^\circ$  y  $70^\circ$  en los extremos.
- 36 tubos de 300 mm con ángulo de  $55^\circ$  y  $70^\circ$  en los extremos.
- 36 tubos de 380 mm con ángulo de  $70^\circ$  ambos lados.
- 36 tubos de 950 m con ángulo de  $70^\circ$  ambos lados.



**Figura 73. Tubos cuadrados biselados listos para soldar.**

Soldar con el proceso de soldadura SMAW las piezas cortadas, para los extremos de la estructura base, para esto se necesita:

- 2 tubos de 1400 mm
- 1 tubo de 300 mm

- 1 tubo de 380 mm
- 1 tubo de 950 mm



**Figura 74. Estructura base parcialmente ensamblada.**

- Limpiar las salpicaduras de los tubos soldados con la ayuda de una grata.
- Soldar con el proceso de soldadura SMAW los 2 largeros de 40 x 40 x 1550 mm a la estructura anteriormente soldada.



**Figura 75. Estructura base totalmente ensamblada.**

- Cortar con la guillotina 72 platinas de 10 x 10 x 2 mm de la Plancha de acero de 1.22 x 2.44 x 2 mm.
- Perforar las 72 platinas de 10 x 10 x 2 mm con una broca de 10 mm.
- Soldar con el proceso de la soldadura SMAW las 72 platinas de 10 x 10 x 2 mm en los tubos 1400 mm.



**Figura 76. Soldado de platinas en las patas de la estructura base.**

#### **4.4.2 Construcción de la estructura del CCP**

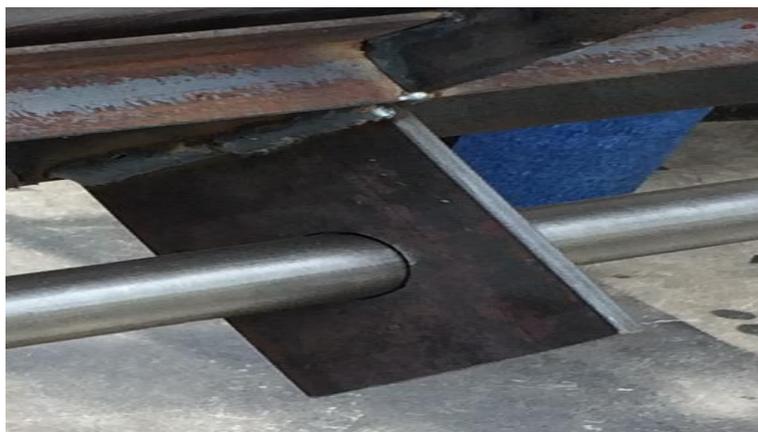
1. Cortar 72 pedazos de 1500 mm de largo del perfil tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo 6000 mm.
2. Biselar 36 pedazos de medida del perfil de tubo tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo de 1500 mm a un ángulo de 45° a los dos extremos.
3. Realizar una muesca en 36 pedazos de medida del perfil de tubo tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo 1500 mm en una de las caras a ambos extremos con medida de 25 mm.
4. Cortar 72 pedazos de 1400 mm de largo del perfil tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo 6000 mm.
5. Barolar 72 pedazos del perfil tipo L 25 x 25 x 2 mm de largo 1400 mm con la forma de la superficie exterior del concentrador.
6. Biselar 36 pedazos del perfil tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo 1400 mm a un ángulo de 45° a los dos extremos.
7. Realizar una muesca en 36 pedazos del perfil tipo L de 25 x 25 x 2 mm de largo 1400 mm en una de las caras a ambos extremos con medida de 25 mm.

8. Soldar las piezas de la estructura soporte de la lámina de aluminio con proceso de soldadura SMAW como se muestra en la figura 77.



**Figura 77. Soldado de piezas de la estructura de la lámina de aluminio.**

- Cortar con la guillotina 36 platinas de 73 x 110 x 6 mm de la Plancha de acero de 1.22 x 2.44 x 2 mm y perforar en un extremo con una broca de 1 pulgada.



**Figura 78. Cortado y Perforado de placas de medida 73 x 110 x 6 mm.**

- Cortar con la guillotina 36 platinas de 473 x 73 x 6 mm de la Plancha de acero de 1.22 x 2.44 x 2 mm y perforar en un extremo con una broca de 1  $\frac{3}{4}$  de pulgada.



**Figura 79. Cortado y Perforado de placas de medida 473 x 73 x 6 mm.**

- Cortar con cortadora de disco 12 ejes de 1850 mm de largo y diámetro 25.4 mm
- Cortar con cortadora de disco 6 ejes de 2000 mm de largo y diámetro 25.4 mm
- Cortar con plasma medias lunas con radio de 25 centímetros y en el centro un agujero de 1 pulgada.



**Figura 80. Cortado y Perforado de medias lunas de radio de 25 cm.**

- Perforar cada 15° con broca de diámetro 10 mm.



**Figura 81. Perforación de agujeros de 10 mm de diámetro cada 15°.**

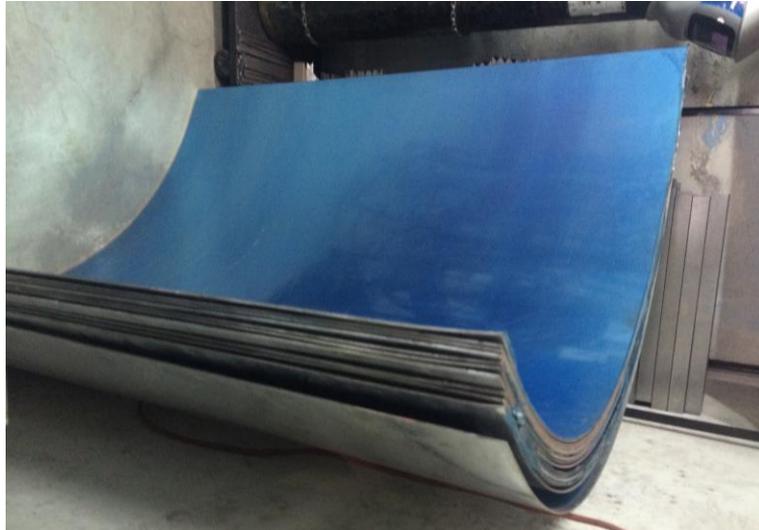
- Soldar con proceso de soldadura SMAW todas las piezas como se muestra en la figura 82.



**Figura 82. Soldadura de platinas y refuerzos de la estructura - parábola.**

- Cortar de la plancha de aluminio, una lámina de 1500 mm de largo y 1400 mm de ancho.

- Barolar la lámina de aluminio de 1500 mm de largo y 1400 mm de ancho.



**Figura 83. Barolado de la lámina de aluminio.**

- Doblar 20 cm en los extremos de la lámina de aluminio para colocar en la estructura del concentrador cilíndrico parabólico con la ayuda de remaches de 1/8”.



**Figura 84. Doblado de 20 cm en los extremos de la lámina de aluminio.**

#### 4.4.3 Construcción del Recipiente de Aceite

1. Cortar con guillotina una plancha de acero de 2140 x 1000 x 1.5 mm.
2. Barolar la plancha de acero de 2140 x 1000 x 1.5 mm.
3. Cortar con plasma dos círculos de 680 milímetros de diámetro y 1,5 mm de espesor.
4. Soldar con proceso de soldadura SMAW las tres partes.
5. Perforar cuatro agujeros con broca de 1 ½" y dos huecos de ½". Soldar con procesos de soldadura SMAW a estos agujeros cuatro neoplos de 1 ½" x 8 centímetros y dos neoplos de ½" x 8 centímetros.



**Figura 85. Perforación de las aberturas de entrada y salida del tanque.**

6. Cortar un trapecio de dimensiones 204 x 120 x 145 x 205.5 x 1.5 mm..
7. Doblar a 80 milímetros del lado más largo recto del trapecio.
8. Soldar con proceso de soldadura SMAW las patas dobladas al tanque.



**Figura 86. Soldadura de las patas del reservorio de aceite.**

#### **4.4.4 Hoja de Procesos Tecnológicos**

La hoja de procesos se muestra en el (Anexo 7).

#### **4.4.5 Planos**

##### **4.4.5.1 Plano de conjunto**

El plano de conjunto del sistema de concentración de la radiación solar de media temperatura se muestra en el (Anexo 8).

##### **4.4.5.2 Plano de la estructura**

El plano de la estructura base de los concentradores cilíndricos parabólicos se muestra en el (Anexo 9).

##### **4.4.5.3 Plano del Eje de Transmisión**

El plano del eje de transmisión se muestra en el (Anexo 10).

##### **4.4.5.4 Plano de la Parábola**

El plano de la estructura de la parábola se muestra en el (Anexo 11).

##### **4.4.5.5 Plano de Ensamblaje de los CCP**

El plano de fabricación del eje de transmisión se muestra en el (Anexo 12).

##### **4.4.5.6 Plano de Ensamblaje del tanque de aceite**

El plano de fabricación de la estructura base se muestra en el (Anexo 13).

##### **4.4.5.7 Plano de la Placa barolada de aluminio**

El plano de la placa barolada de aluminio se muestra en el (Anexo 14).

## CAPITULO V

### IMPLEMENTACIÓN Y ENSAYOS DEL CCP

#### 5.1 Implementación de la solar térmica

##### 5.1.1.1 Implementación de la cimentación de los CCP.

Es necesario construir tres bases para los CCP en paralelo y una base para el tanque de aceite y el caldero. Las bases de los CCP deben tener 15 metros de largo y 2 metros de ancho; mientras que la base para el tanque de aceite debe tener un ancho de 2 metros y un largo de 5 metros. Para empezar la implementación de los CCP, se debe tener en cuenta que la superficie sea lo más plana posible, puesto que los ejes de los CCP deben estar totalmente alineados y concéntricos. Teniendo en cuenta este punto, se procede a realizar la cimentación para los CCP y para la base del tanque de aceite.

La cimentación comprende los siguientes pasos:

1. Para obtener el norte geográfico, se toma el eje norte-sur de los laboratorios de Energía y Mecánica, para lo cual requerimos una cuerda plástica y estacas de madera.



**Figura 87. Ubicación del norte geográfico.**

2. Ya obtenida la referencia del norte geográfico se toman paralelas para proceder a delimitar las bases de los CCP, con un largo y ancho de 15 y 2 metros respectivamente, separados 1,50 metros entre cada uno de estos.



**Figura 88. Delimitación de las bases de los CCP.**

3. Se retira la hierba por los límites delineados con la ayuda de un azadón.



**Figura 89. Corte de la hierba para poder cimentar los espacios limitados.**

4. En los huecos realizados se construye el encofrado de madera para rellenarlo posteriormente con material de lastre hasta la altura requerida. El punto más alto del terreno corresponde a 15 centímetros.



**Figura 90. Encofrado de madera para rellenarlo con lastre.**

5. Se rellena el lastre hasta el nivel requerido, sobre éste se coloca malla electrosoldada de 4 milímetros de diámetro.



**Figura 91. Refuerzo de la cimentación con la malla electrosoldada.**

6. Sobre la malla electrosoldada se coloca la siguiente mezcla de hormigón: agua, cemento, ripio y polvo de piedra. Con la ayuda de un codal de aluminio se ubica uniformemente la mezcla de hormigón de tal manera que quede alineado con la altura de la piola.



**Figura 92. Mezcla de materiales para la fundición del hormigón.**

7. Se cierne arena con una malla fina, ésta se esparce sobre el hormigón y con la ayuda de una paleta de madera se realizan movimientos circulares para obtener una superficie plana. (Para las siguientes dos filas de hormigón, se repite el mismo procedimiento).



**Figura 93. Alisamiento de los bordillos donde se ubicaran los colectores.**

8. Durante 7 días se deja secar, al término de este tiempo se procede a retirar el encofrado de madera.



**Figura 94. Secado del hormigón de los bordillos.**

### **5.1.2 Implementación de los concentradores cilíndrico parabólicos.**

Finalizada la construcción de las bases se procede a realizar la implementación de los CCP, los cuales corresponden a los siguientes pasos:

1. Se ubican las estructuras soportes sobre las bases de concreto.



**Figura 95. Ubicación de las estructuras bases de los concentradores.**

**Fuente:** (MER, Guasumba, Quintana, & Yépez, 2014)

2. Sobre las estructuras soportes se colocó la parábola, la cual se ajusta por medio de las chumaceras con dos pernos en cada una de 2" x 3/8", con rodela plana, de presión y tuercas de 3/8". Tomando en cuenta que la chumacera debe quedar centrada, aproximadamente 8 centímetros a cada lado. (Éste procedimiento se realiza para los 18 CCP).



**Figura 96. Centrado se la chumacera con respecto a la estructura base.**

3. Se extiende una piola a lo largo de la cimentación con una distancia desde el borde hasta las patas de la estructura de 360 mm, para ambos lados; de tal forma que todos los seis concentradores queden alineados.

Ya alineadas las estructuras se procede a realizar las perforaciones en sus respectivas patas.



**Figura 97. Alineado y perforación de las estructuras base.**

4. Colocar los tacos fischer número 10 en las perforaciones realizadas.



**Figura 98. Colocación de los tacos fischer sobre las perforaciones.**

5. Ubicar los CCP nuevamente en su posición alineada con la cuerda, para colocar los tirafondos de 2" x 1/4" con la ayuda de una racha con copa de 11 milímetros.



**Figura 99. Colocación de los tirafondos sobre los tacos fischer.**

6. Introducir el matrimonio en el eje una distancia de 5 centímetros y soldar alrededor del eje. Ya soldado el matrimonio con el eje, se junta con el siguiente CCP y se introduce el eje de éste en el matrimonio antes mencionado; se colocan los tirafondos en el nuevo CCP instalado. (Éste procedimiento se realizó en cada pata de todos los CCP).



**Figura 100. Soldado de los matrimonios para unir los ejes de los CCP.**

7. Juntos los seis CCP, se procede a rematar del otro lado los matrimonios con soldadura SMAW.



**Figura 101. Soldado de la parte trasera del matrimonio.**

8. Cortar los perfiles tipo L de 25 x 25 x 4 milímetros, en una de las alas 5 centímetros, quedando una muesca para poder soldar dos perfiles consecutivos.



**Figura 102. Soldado y cortado de los perfiles tipo L de 25 x 25 x 4 mm.**

9. Colocar los perfiles en el inicio y final de la parábola, con la ayuda de un taladro se realizan seis perforaciones en cada CCP,



**Figura 103. Perforación de los perfiles tipo L.**

10. Insertar los pernos tropicalizados de 1" x 1/4", con sus respectivas rodela plana y de presión. Con la ayuda de una racha y una copa de 11 milímetros se procede al ajustaje.



**Figura 104. Ubicación de los pernos en los agujeros del perfil tipo L.**

11. Insertar el tubo de cobre por el acople de grilón y por el tubo de vidrio.



**Figura 105. Montaje del tubo de cobre sobre el bocón y el tubo de vidrio.**



**Figura 106. Ingreso del tubo de cobre sobre al tubo de vidrio.**

12. Colocar el acople del final y el del inicio del siguiente CCP para continuar pasando el tubo de cobre.



**Figura 107. Colocación del acople de grilón en los concentradores.**

13. Insertar los tornillos en los acoples de grilón; de tal manera que los acoples no se muevan mientras se inserta el tubo de cobre.



**Figura 108. Sujetación de los acoples de grilón por medio de tornillos.**

13. En el centro de los seis CCP se coloca una unión de cobre de 1", que será soldada con oxigas y varillas de suelda de plata. (Se repite este procedimiento para las siguientes dos generaciones).



**Figura 109. Unión de los tubos de cobre por medio de acoples.**

14. Recortar la riel en piezas de 20 centímetros de largo con la ayuda de un arco de sierra.



**Figura 110. Cortado de las rieles de longitud 20 centímetros.**

15. Sujetar la riel al tubo de la estructura soporte mediante pernos auto perforantes de 1" con la ayuda de un taladro y una copa. Pieza que servirá para sujetar las abrazaderas.



**Figura 111. Ubicación de la riel sobre un tubo de la estructura base.**

16. Doblamos las platinas que servirán como abrazaderas para colocar los tubos de acero galvanizado de 2”.



**Figura 112. Doblado de platinas.**

17. Colocar los tubos de acero galvanizado de 1 ½ y 1 pulgada, en el medio de las abrazaderas y sujetar con los pernos de 1” con su respectiva tuerca en el extremo de la abrazadera.



**Figura 113. Sujetación de la tubería de acero galvanizado.**

18. En los accesorios colocar teflón en las roscas en sentido antihorario y silicón permatrix antes de insertarlos en los tubos galvanizados.



**Figura 114. Sellado de los accesorios de la tubería galvanizada.**

19. Insertar los accesorios como codos, tees, bushings, neoplos, uniones en los tubos galvanizados previamente colocados con la ayuda de una llave de tubo.



**Figura 115. Colocación de accesorios en la tubería galvanizada.**

20. Colocar las seis válvulas esféricas de 1 pulgada en los neoplos de 8 centímetros a la entrada y salida de cada fila de concentradores con la ayuda de una llave de tubo como se indica en la figura 116.



**Figura 116. Instalación de las válvulas esféricas sobre los CCP.**

21. Insertar las mangueras para aceite térmico en las válvulas esféricas por un lado y del otro lado al tubo de cobre con la ayuda de una llave para tubo.



**Figura 117. Instalación de las mangueras hidráulicas.**

22. Roscar la tubería de 1 ½ " o 1" de ser necesario en el caso que no cuadren las distancias de los trozos de tubo galvanizado, con la ayuda de una roscadora eléctrica y un par de llaves para tubo.



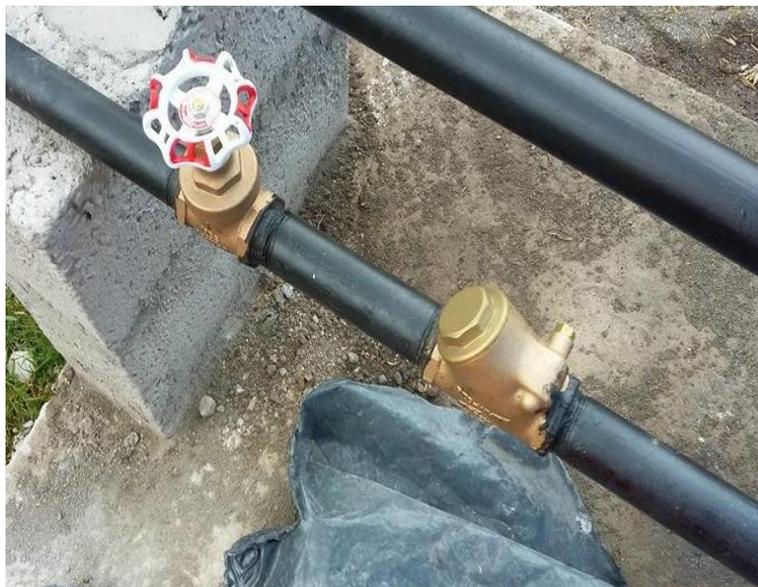
**Figura 118. Roscado de la tubería de acero galvanizado.**

23. Instalar la bomba de aceite a la salida del tanque reservorio, anclándolo a la base metálica y colocar los neoplos en los puertos de la bomba para sus posteriores conexiones.



**Figura 119. Instalación de la bomba centrífuga para aceite térmico.**

24. Añadir una válvula de compuerta de una pulgada antes y después de la bomba de aceite. Además una válvula check antiretorno para posibles mantenimientos de la bomba.



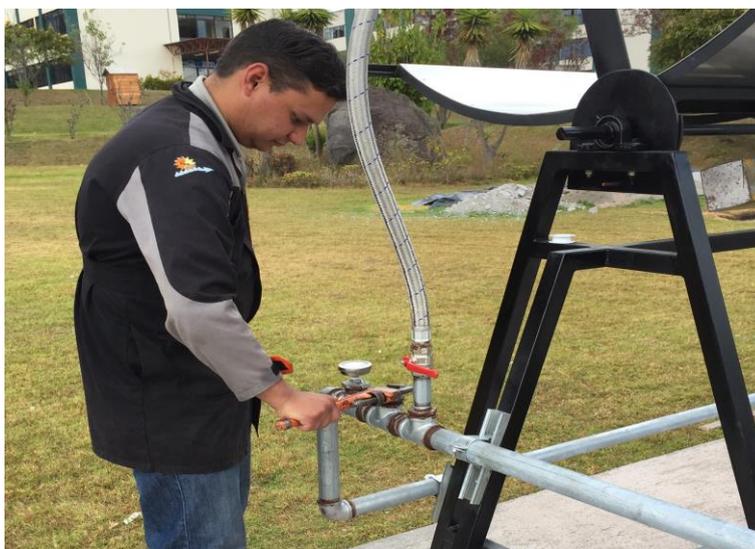
**Figura 120. Montaje de las válvulas de compuerta y la check.**

25. Colocar teflón en sentido antihorario y silicón permatrix a las conexiones de los instrumentos.



**Figura 121. Sellado de los instrumentos de medición.**

26. Insertar los instrumentos de medición como termómetros y manómetros con la ayuda de una llave para tubo.



**Figura 122. Instalación de los instrumentos de medición.**

## 5.2 Pruebas de Operación

### Protocolo de pruebas

Para proceder a la puesta en funcionamiento del sistema de concentración es conveniente aprobar o desaprobar el protocolo de pruebas, quiere decir que si alguno de los puntos del protocolo de pruebas no está aprobado, no se podrá avanzar con la puesta en funcionamiento del sistema.

En el protocolo de pruebas deberán constar Datos del Proyecto como el nombre del cliente, nombre del instalador y nombre de la persona encargada de revisar el protocolo de pruebas.

A continuación se detallara todo lo que se deba verificar, por secciones es decir componentes del sistema, instalaciones eléctricas, prueba de rotación, prueba de hermeticidad y de cada una de estas detallar que subcomponentes se pueden verificar. Al frente de estas celdas se colocará si está aprobado o desaprobado y de ser necesario en observaciones se deberá poner las acciones a tomar, las tolerancias y los instrumentos. (Ver Anexo 15).

### 5.3 Levantamiento de Información

El levantamiento de información se lo realiza para comprobar los datos asumidos al momento que se realizó el diseño térmico.

Los datos que se deben comprobar con la ayuda de algunos instrumentos son los siguientes:

- Radiación ( $W/m^2$ )
- Temperatura ambiente ( $^{\circ}C$ )
- Velocidad del viento (m/s)
- Temperatura del panel colector ( $^{\circ}C$ )
- Temperatura del tubo de vidrio ( $^{\circ}C$ )
- Temperatura del tubo de cobre ( $^{\circ}C$ )

- Temperatura del alma del recipiente del aceite (°C)
- Temperatura de entrada del aceite (°C)
- Temperatura de salida del aceite (°C)

Todos los datos obtenidos del sistema de concentración de media temperatura se los puede ver en el (Anexo 16).

A continuación se muestra una tabla donde están los instrumentos que se utilizaron para la toma de datos. (Ver Anexo 17 y 18).

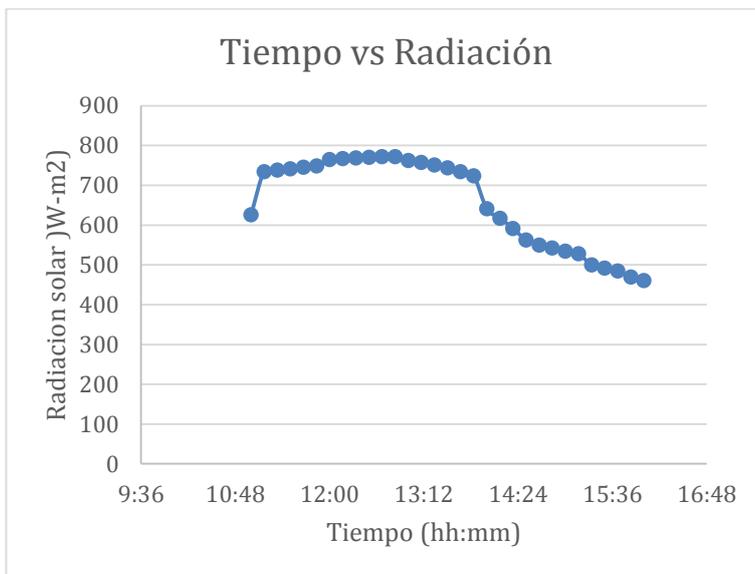
**Tabla 48**

**Instrumentos de medición para la toma de datos del sistema.**

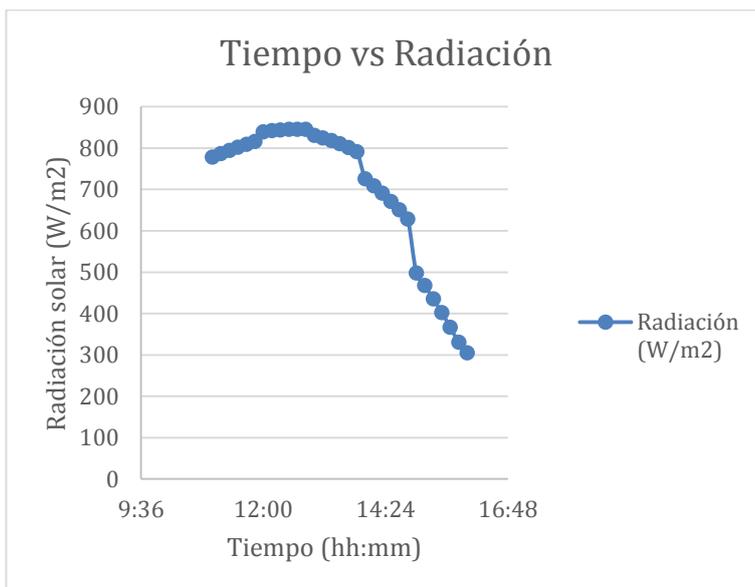
Equipo	Características
 <p data-bbox="360 1117 786 1151"><b>Anemómetro de Película Caliente</b></p>	<p data-bbox="820 949 1268 1072">Permite medir la velocidad del viento horizontal, temperatura, así como su dirección.</p>
 <p data-bbox="461 1375 687 1408"><b>Termohigrometro</b></p>	<p data-bbox="820 1182 1268 1261">Este equipo combina un sensor de temperatura y humedad.</p>
 <p data-bbox="528 1574 622 1608"><b>Brujula</b></p>	<p data-bbox="820 1424 1268 1547">Instrumento que sirve de orientación, por medio de la aguja imantada señala el norte magnético.</p>
 <p data-bbox="397 1783 751 1816"><b>Medidor de Radiación Solar</b></p>	<p data-bbox="820 1621 1268 1744">Este equipo mide y graba la radiación solar a través de un piranómetro externo.</p>
 <p data-bbox="432 1991 716 2024"><b>Termómetro Infrarrojo</b></p>	<p data-bbox="820 1827 1268 1951">Permite medir sin contacto, haciendo referencia a la capacidad del dispositivo a medir la temperatura.</p>

**5.4 Análisis de Resultados**

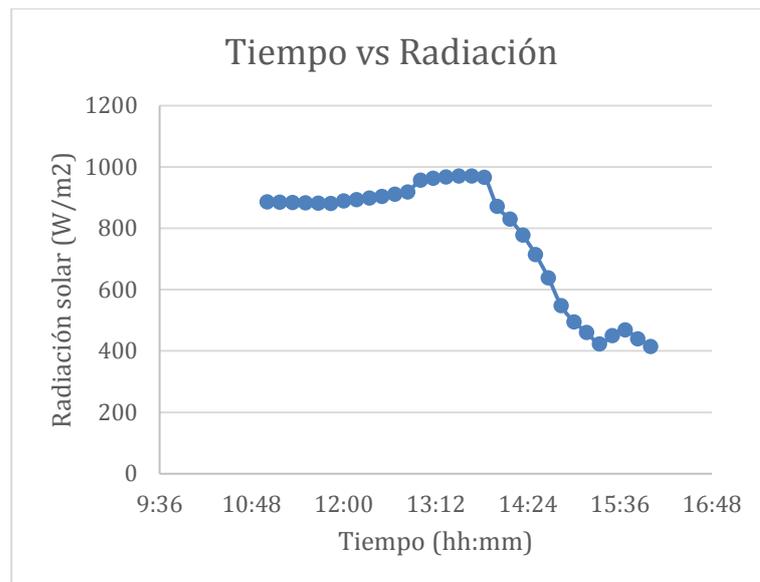
- 1. El comportamiento de la radiación solar es muy variable, ya que este depende de muchas condiciones ambientales, a continuación se detalla el comportamiento a lo largo de 3 días al azar.**



**Figura 123. Variación de la Radiación vs Tiempo del día 1.**

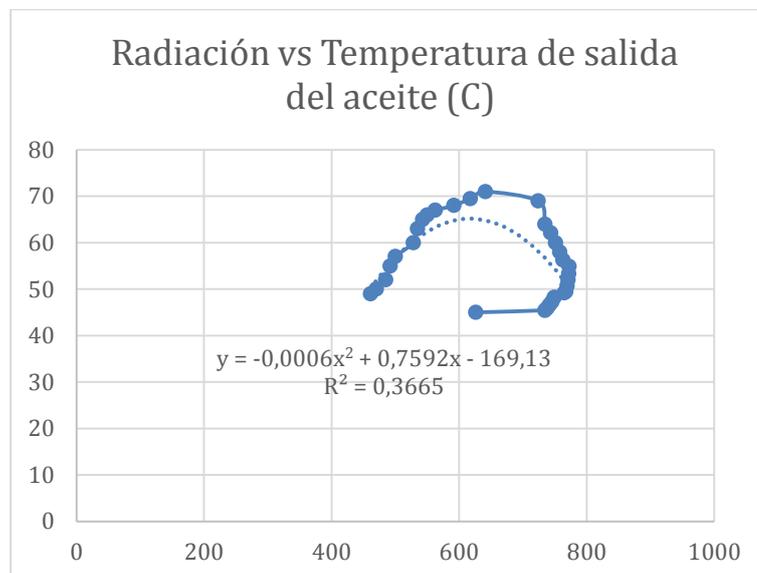


**Figura 124. Variación de la Radiación vs Tiempo del día 2.**



**Figura 125. Variación de la Radiación vs Tiempo del día 3.**

El valor medio para la radiación que genera mejores condiciones para la transferencia de calor es aquella superior a  $700 \text{ W/m}^2$ .



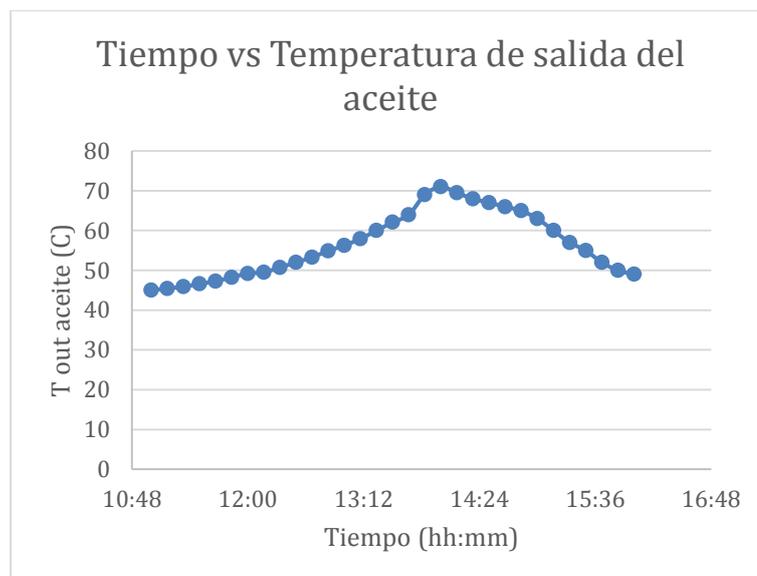
**Figura 126. Variación de la Temperatura del Aceite vs Radiación.**

La temperatura del aceite obtenido es directamente proporcional a la radiación incidente, siempre y cuando la velocidad del aire (característico del día en que se realice las pruebas) sea inferior a los  $10 \text{ m/s}$ , caso contrario la temperatura se ve afectada por pérdida de calor por convección, convirtiéndose en una pendiente negativa.

## 2. Comparación entre cálculos teóricos y experimentales de la temperatura final del aceite.

Teóricamente se obtiene el equilibrio del sistema a una temperatura de salida del aceite de 73 °C, para esta consideración se tomó en cuenta condiciones óptimas medio ambientales (radiación incidente, viento, etc). En contraposición, el valor real de la temperatura de salida del aceite oscila entre los 71 y 72 °C, experimentando una diferencia entre el valor calculado y el valor real del 1.4 %. Error causado por la variabilidad de parámetros que influyen en el comportamiento real del sistema.

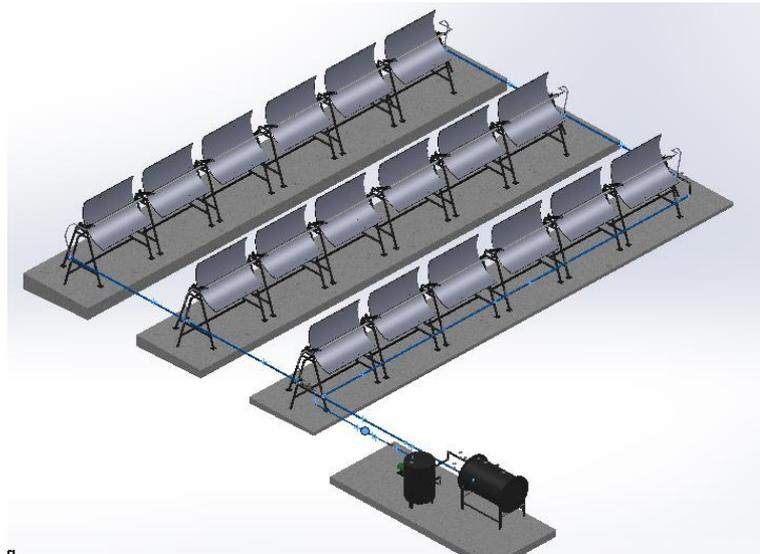
A continuación se muestra una curva suavizada de los datos obtenidos de salida para un período.



**Figura 127. Variación de la Temperatura del Aceite vs Tiempo.**

## 3. Ubicación de pérdidas de calor e identificar razones.

- Tubería galvanizada, alimentación bomba y entrada de colectores, convección aire-superficie tubería.



**Figura 128. Identificación de pérdidas en el sistema colector.**

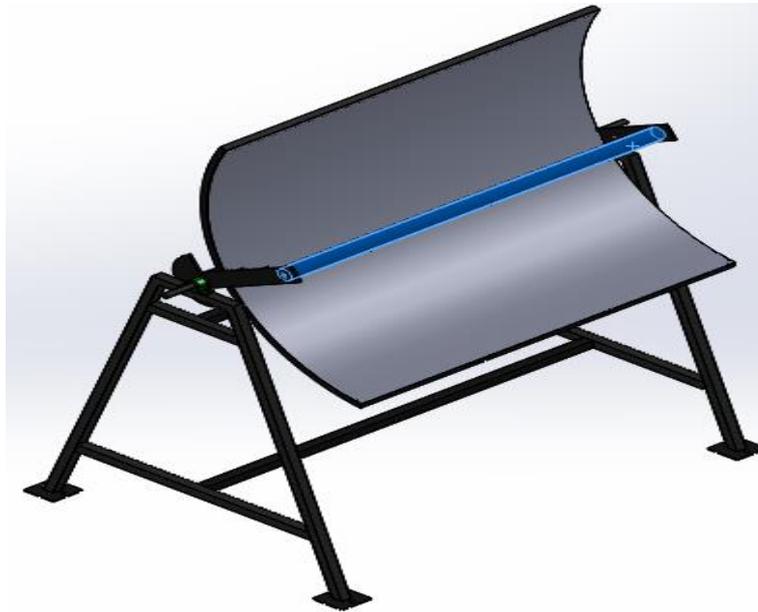
**Fuente:** (MER, Guasumba, Quintana, & Yépez, 2014)

- Parábola de aluminio. Geometría, diferencia distancia focal real y calculada. Aspecto superficial, irregularidad en superficies expuesta. Material, bajo índice de reflectividad, el material absorbe más calor del que refleja. Sistema de seguimiento, pérdidas por seguimiento inapropiado, manual.



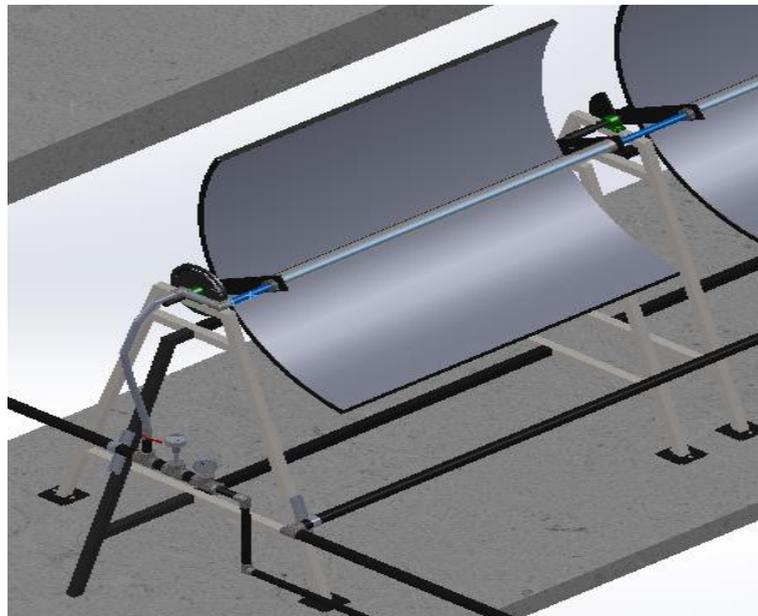
**Figura 129. Geometría de la Parábola de aluminio.**

- Sistema colector: Perdidas de calor por convección debido al aire que se encuentra retenido en el espacio que hay entre el tubo de cobre y el tubo de vidrio denominada región anular.



**Figura 130. Tubo de vidrio del sistema colector.**

- Tubería de cobre, índice de conductividad comercial.



**Figura 131. Tubería de Cobre.**

- Tuberías varias, longitudes considerables de tuberías sin aislamiento térmico.

#### 4. Indicación de ventajas del aislamiento a la tubería de cobre.

La tubería de vidrio que envuelve a la tubería de cobre mediante un espacio de aire en reposo garantiza lo siguiente.

- El calor captado por el sistema se emite en menor cantidad debido al vidrio, siendo las propiedades del mismo limitante crucial a la hora de definir dicho ahorro térmico.

**Tabla 49**

#### Propiedades del tubo de vidrio.

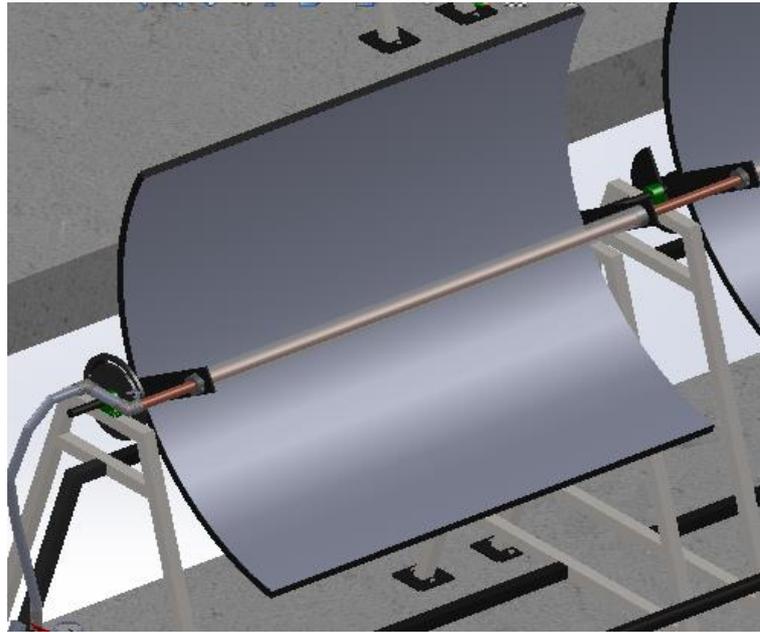
Propiedad	Valor	Unidades
Modulo elástico	$6.8935 \times 10^{-10}$	N/m <sup>2</sup>
Coeficiente de Poisson	0.23	N/D
Modulo cortante	$2.8022 \times 10^{-10}$	N/m <sup>2</sup>
Densidad de masa	2457.6	Kg/m <sup>3</sup>
Coeficiente de expansión térmica	$9 \times 10^{-006}$	°K <sup>-1</sup>
Conductividad térmica	0.74976	W/(m.K)
Calor específico	834.61	J/(Kg.K)

- El aire en reposo, estructuradamente bien constituido, garantiza un alto índice de hermeticidad térmica, eliminando casi en su totalidad el nivel de transferencia por convección desde la tubería de cobre, velocidad 0 m/s.

**Tabla 50**

#### Propiedades del aire.

Propiedad	Valor	Unidades
Densidad de masa	1.1	Kg/m <sup>3</sup>
Conductividad térmica	0.027	W/(m.K)
Calor específico	1000	J/(Kg.K)



**Figura 132. Aire en reposo en el tubo de vidrio.**

**5. Estudiar el calor ganado a lo largo del paso de cada uno de los CCP y defender el número de CCP totales.**

El recorrido del aceite por el sistema experimenta dos comportamientos:

- El que el calor ganado por el aceite es mayor, esto ocurre durante el inicio del ciclo, experimentando gradientes de temperatura mayores.
- Estado estable, luego de absorber calor del sistema, el aceite llega a un punto donde las temperaturas de los componentes inmiscuidos, aceite y cobre, presentan un  $\Delta T$  mínimo o tendiente a cero, por lo que el aceite experimenta un aumento de temperatura del aceite no perceptible con los instrumentos del sistema.

El comportamiento del aceite en cuanto a su caracterización térmica es justificable en base al número de colectores ensamblados de forma lineal,

donde la longitud y el diámetro de la tubería de cobre corresponde a la requerida para la absorción de calor en un intervalo de tiempo.

En tanto que las tres hileras de los colectores corresponden a la respuesta de la necesidad propia de la potencia del caldero que es de 16000 Kcal/hr, correspondiendo esto a una configuración en paralelo de dichos elementos.

#### **6. Determinar el Rendimiento Global experimental en porcentaje.**

**El calor absorbido experimental viene dado por:**

$$Q_{abs} = \eta_o A_a G_d$$

$$Q_{abs} = (0.66)(1.8)(658)$$

$$Q_{abs} = 781.7 \text{ W}$$

Para determinar el calor absorbido experimental se ha utilizado el promedio de los datos de la radiación solar medido que es de  $658 \left(\frac{W}{m^2}\right)$ .

**El calor útil experimental viene dado por:**

$$Q_{util} = Q_{abs} - U_c [T_c - T_o] A_r$$

$$Q_{util} = 781.7 - 1.89[72 - 15](0.13)$$

$$Q_{util} = 767.7 \text{ W}$$

Para determinar el calor absorbido experimental se ha utilizado el valor de la temperatura medida que es de 72 °C.

**Rendimiento Global:**

$$\eta_c = \frac{Q_{ut}}{G_b \cdot A_a}$$

$$\eta_c = \frac{767.7}{(658) \cdot (1.8)}$$

$$\eta_c = 0.65 \approx 65\%$$

El rendimiento global obtenido por el sistema es de 65% por lo tanto el sistema de concentración de la radiación solar si es eficiente debido a que se genera más energía que la que se utiliza para impulsar el fluido por la bomba de 1 hp.

**Al haber realizado el análisis de resultados se puede decir que:**

La funcionalidad del equipo diseñado está afectado directamente por las condiciones ambientales.

La radiación incidente sobre los colectores solares es menguada por la velocidad del aire circundante, la transferencia de calor emitida por radiación por el sol al incidir sobre la superficie de la parábola, misma que sufre pérdidas por la vía de convección por la acción del viento, determina la temperatura a la cual podrá llegar el aceite a la salida del sistema.

La temperatura máxima a la que podrá llegar el aceite tiene como límite una potencia experimentada de 17,5 kW, misma que se consigue bajo un flujo másico de 0,42 kg/s.

La pendiente de aumento de temperatura es inferior a la pendiente de disminución de la misma, esto equivale a decir que al sistema le toma mayor tiempo para poder acumular energía y entregarla al fluido, en tanto que el descenso ese experimenta en menor tiempo y esto también se debe a la disminución de radiación así como al aumento de pérdidas.

El sistema de concentradores puede alcanzar una temperatura alrededor de 70 °C luego de un funcionamiento de entre 3 h y 4 h. Este tiempo es proporcional a la radiación incidente, la hora del día, la hora de inicio, la velocidad del viento y el correcto posicionamiento del sistema en relación a la trayectoria solar.

El flujo másico relacionado con la velocidad de alimentación del fluido al sistema y determina el grado transferencia de calor.

## CAPITULO VI

### ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 6.1 Introducción

Con el fin de prever el futuro en cuanto al proyecto invertido se hará un estudio de ingeniería económica, por consiguiente, los números utilizados son las mejores estimaciones de lo que se espera que ocurra.

Generalmente sobre cualquier inversión acerca de un proyecto, la empresa o persona financiadora espera conocer el retorno real sobre la inversión que podrá experimentar dicho proyecto, por lo que el análisis de los mismos resultados corresponde al campo de ingeniería económica.

Toda la información a continuación detallada del proyecto corresponde a información tal como: costo inicial (incluidos precios de compra y costos de construcción, instalación y puesta en marcha), valor de salvamento proyectado (valor de reventa o canje), inversión inicial para el desarrollo del proyecto.

#### 6.1.1 Parámetros y herramientas

Las técnicas generan valores numéricos denominadas medidas de valor, que consideran inherentemente el valor del dinero en el tiempo. Las medidas a ser consideradas en este estudio son: (Blank & Tarquin, 2012, pág. 26)

##### 6.1.1.1 Valor de reventa

Solo se consideran los materiales que por su característica pueden ser vendidos al final del ciclo de vida del proyecto, como: perfiles de acero, accesorios de acero/cobre, tubería de cobre y otros complementos:

Ejemplo de cálculos para los ángulos tipo L 25 x 4 mm.

$$\text{Valor de reventa} = 0.7 \times \text{cantdad} \times \text{costo}$$

$$\text{Valor de reventa} = 0.7 \times 12 \times 10.77416$$

$$\text{Valor de reventa} = 90.503 \$$$

**Tabla 51****Valor de reventa de los materiales del proyecto.**

<b>MATERIAL</b>	<b>REVENTA</b>
Angulo 25 x 4 mm	90,503
Manómetro 0 -200 PSI 1/4 NPT C/G INOX	36,092
BUSHING 1 1/2 " a 1 " Galv	11,291
Ángulos de 25 x 3 mm	225,162
Platina de 75 x 6 mm	206,633
Placa 25 x 25 x 5 mm	77,896
Angulo de 25 x 2 mm	30,8336
Tool Aluminio Liso 2 4 x 8	792,806
T. Cuadrado 1 1/2 x 3 mm	529,767
Tol Lam. Caliente 2,0 mm	26,019
Espiga Prensable Macho NPT 1"x 1" R12	85,61
Ferrula Inox 1"	191,548
Tubería de Cobre 1" TIPO L	599,004
unión de 1 1/2" Galv	11,76
Tee 1 1/2 " Galv	19,901
Codo 1 1/2" 90 Galv	15,68
Válvula Bola C/Rap 1 1/2' Plegar Inglesa	165,844
Tee so-so 1"	49,014
Terminal SO-HI 1"	44,17
Neplo 1 ½ x 4 Galv (10 cm)	24,836
Bomba 1 HP	564,753
P Hierro Galvanizado Hexag 1/4 x 1	5,782
R/Pres PG Galvanizado 1/4	1,946
R/Plana PG Galvanizado 1/4	2,17
P Hierro Galvanizado Hexag 3/8 x 2	10,22
R/ Plana PG Galvanizado 3/8	1,974
R/ Pres PG Galvanizado 3/8	1,778
Tubo Redondo Galvanizado 1 1/2 x 2	76,818
UCP 205-16	195,874
Kilo Eje de Acero 1 c/u 26,20 KL	227,71
Tubos de Vidrio 2 " x 1,5 mts	705,6
<b>TOTAL</b>	<b>5028,99</b>

Las salidas de efectivo o desembolsos, estarán conformados de los siguientes:

### 6.1.1.2 Fabricación

Materia prima construcción concentradores.

**Tabla 52**

#### **Materiales para la fabricación de los concentradores.**

<b>CANT</b>	<b>MATERIAL</b>	<b>PRECIO UNIT</b>	<b>TOTAL CON IVA</b>
12	Angulo 25 x 4 mm	9,62	129,29
2	Manómetro 0 -200 PSI 1/4 NPT C/G INOX	23,02	51,56
10	BUSHING 1 1/2 " a 1 " Galv	1,44	16,13
40	Ángulos de 25 x 3 mm	7,18	321,66
11	Platina de 75 x 6 mm	23,96	295,19
24	Placa 25 x 25 x 5 mm	4,14	111,28
10	Disco Sierra 4,5 x 1/8	1,98	22,18
38	Angulo de 25 x 2 mm	5,4	44,048
20	Sierra Sanflex	1,18	26,43
18	Tool Aluminio Liso 2 4 x 8	56,18	1132,58
1	Caja AGA 1/8 6011 C-13	79,35	88,87
10	Galón Antiox Negro Mate	15,9	178,08
20	Cinta Teflón 12 mm x 10 mts	0,26	5,824
10	Lija Hierro 2 No. 60	0,42	4,7
36	T. Cuadrado 1 1/2 x 3 mm	18,77	756,81
7	Remache 1/8 x 1/2 Cien	0,5	3,92
1	Tol Lam. Caliente 2,0 mm	33,19	37,17
144	Tirafondo 2 1/2 "	0,04	6,45
12	Espiga Prensable Macho NPT 1" x 1" R12	9,1	122,3
12	Ferrula Inox 1"	20,36	273,64
6	Manguera Aceite térmico 1"	54,62	367,05
24	Suelda Inoxidable	25	672
1	Soldadura (rollo 1 lb) 95/5	34,18	38,28
1	Pasta para soldar 100 grs	1,99	2,23
6	Terminal Macho SO-HE 1	2,79	18,75
24	Universal 1" HN	6,79	182,52
6	Tubería de Cobre 1" TIPO L	127,34	855,72
6	unión de 1 1/2" Galv	2,5	16,8
9	Tee 1 1/2 " Galv	2,82	28,43
10	Codo 1 1/2" 90 Galv	2	22,4
7	Válvula Bola C/Rap 1 1/2' Plegar Inglesa	30,22	236,92

**CONTINÚA** 

12	Tee so-so 1"	5,21	70,02
6	Terminal SO-HI 1"	9,39	63,1
2	Suelda Estaño 95/5	48,97	109,69
2	Pomada para soldar	2	4,48
12	Neplo 1 1/2*4 Galv (10 cm)	2,64	35,48
1	Bomba 2 HP	720,35	806,79
2	Sellador 100 cm PLMX	12,15	27,22
144	Tirafondo Madera 1/4 x 2	0,0655	10,56
144	Taco Ficher Reforzado 10	0,04882	7,87
108	P Hierro Galvanizado Hexag 1/4 x 1	0,06828	8,26
108	R/Pres PG Galvaniz 1/4	0,02295	2,78
108	R/Plana PG Galvaniz 1/4	0,0256	3,1
72	P Hierro Galvanizado Hexag 3/8 x 2	0,181	14,6
72	R/ Plana PG Galvaniz 3/8	0,035	2,82
72	R/ Pres PG Galvaniz 3/8	0,0315	2,54
6	Tubo Redondo Galvanizado 1 1/2 x 2	16,33	109,74
36	UCP205-16	6,94	279,82
157	Kilo Eje de Acero 1 c/u 26,20 KL	1,85	325,3
2	Termocuplas Tipo Reloj	70	156,8
18	Tubos de Vidrio 2 " x 1,5 mts	50	1008
<b>TOTAL</b>			<b>9118,18</b>

Materia prima para cimentación:

### Tabla 53

#### Costos de Materiales para la cimentación.

CANT	MATERIAL	PRECIO UNIT	TOTAL CON IVA
30	Cemento Holcim Rocafuerte Sacos 50 Kg - LT	7,0179	235,8
1	Plascrete 161 HE 2 1/2 Caneca IF	11,6071	13
25	Tabla Encofrado Oriente Roja	3	75
5	Clavo libra 2 1/2" con/cabeza	0,7143	4
9	Armex R 84 6,25 x 2,40 m x 4 mm 15 x 15 DI	24,1071	243
2	Libra alambre galvanizado No 18 IF	0,8929	2
10	Pingo Eucalipto 2,50 mts IF	0,9	9
1	Volqueta Ripio Azul 9 mts JF	120	120
1	Volqueta de Polvo 9 mts	120	120
2	Volqueta lastre 9 mts AA	120	240
10	Listón 5 x 4 Eucalipto	2	20
1	Volqueta lastre fino 4 mts	75	75
1	Volqueta ripio 8 mts	117,04	117,04
<b>TOTAL</b>			<b>1273,84</b>

### 6.1.1.3 Instalación

Transporte:

**Tabla 54**

#### Costos de transporte.

CANT	MATERIAL	PRECIO \$
1	Movilidad y Estibaje	200
	<b>TOTAL</b>	<b>200</b>

Mano de obra fabricación concentradores:

**Tabla 55**

#### Costos de mano de obra para la fabricación de los colectores.

CANT	DESCRIPCIÓN	Valor Unitario	Valor Total con IVA
1	Media Luna en Plancha de 2 mm Aluminio	4,5	5,04
4	Media Lunas en Angulo de 1" x 1/8	0,8	3,584
20	Corte de Tubo negro cuadrado de 40 x 40 x 1,5 mm	0,4	8,96
20	Puntos de Suelta MIG	0,1	2,24
20	Rematado de Suelta MIG	1	22,4
1	Corte de Plasma en placa 25 x 25 x 5 mm	7	7,84
1	Corte de Plasma en platina 75 x 6 mm	1,4	1,568
1	Suelda de Matrimonios con Electrodo 6011	0,4	0,448
	<b>TOTAL</b>		<b>52,08</b>
	<b>Construcción total de los 18 concentradores cilíndricos parabólicos</b>		<b>937,44</b>

Mano de obra fabricación tanque:

**Tabla 56**

**Costo de mano de obra para la fabricación del reservorio.**

<b>CANT</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>Valor Unitario</b>	<b>Valor Total con IVA</b>
1	Barolado de Plancha de 1,5 mm	20	22,4
2	Cortes de Tapas en Plancha de 1,5 mm	22	49,28
1	Suelda de Acoples	20	22,4
<b>TOTAL</b>			<b>94,08</b>

Mano de obra instalación:

**Tabla 57**

**Costos de mano de obra de instalación.**

<b>CANT</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>VALOR \$</b>
1	Mano de obra ensamble concentradores	1000
1	Mano de obra cimentación	800

## 6.2 Costos de operación y mantenimiento

**Tabla 58**

**Costos del aceite térmico Shell Transfer Oil S<sub>2</sub>.**

<b>COSTO DE ACEITE ARRANQUE</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT</b>	<b>UNID</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Aceite térmico Shell S <sub>2</sub>	1411,2	\$	Llenado tanque

Tabla 59

**Costos de Operación y Mantenimiento de la Bomba.**

<b>COSTO DE OPERACIÓN BOMBA</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT</b>	<b>UNID</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Potencia	1	hp	
Potencia	0,746	kW	
Eficiencia	1,15	-	
Potencia real	0,8579	kW	
Tiempo de encendido día	3	h/día	10am-3pm
Días al mes	30	días	
Horas al mes	90	h	
Costo kWh	0,08	\$	
<b>COSTO CONSUMO MES</b>	<b>6,18</b>	<b>\$</b>	
<b>COSTO CONSUMO AÑO</b>	<b>74,12</b>	<b>\$</b>	
<b>MANTENIMIENTO + OPERACIÓN</b>	<b>474,12</b>	<b>\$</b>	<b>AL AÑO</b>

Tabla 60

**Costos de Mantenimiento del aceite térmico.**

<b>COSTO DE MANTENIMIENTO</b>			
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT</b>	<b>UNID</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
Reposición aceite	60	\$	al año
Mantenimiento componentes	100	\$	4 veces al año
Mano de obra mantenimiento	240	\$	4 veces al año
	<b>400</b>	<b>\$</b>	<b>AL AÑO</b>

Con la finalidad de agrupar todos los costos y poder diagramar el flujo de caja se procede a determinar:

$$Inversion = Costos directos + Costos indirectos$$

$$Inversion = 14834.74 + 2300$$

$$Inversion = 17134.71 \$$$

### 6.2.1 Costos Directos

Aquellos identificables de forma directa, sin necesidad de ningún tipo de análisis, generalmente son derivables de la existencia del proyecto físico, por ejemplo: materiales directos, mano de obra implícita, etc.

**Tabla 61**

#### Costos directos de fabricación.

ITEM	CANT	UNI
Materia prima concentradores	9118,18	\$
Materia prima cimentación	1273,84	\$
Aceite arranque	1411,2	\$
Transporte	200	\$
Mano de obra concentradores	937,44	\$
Mano de obra tanque	94,08	\$
Mano de obra ensamble	1000	\$
Mano de obra cimentación	800	\$
	14834,74	\$

### 6.2.2 Costos Indirectos

Aquellos cuya identificación en comparación con el proyecto es difícil.

**Tabla 62**

#### Costos indirectos de fabricación.

COSTOS INDIRECTOS			
ITEM	Tiempo (h)	Costo (\$/h)	Costo total (\$)
Ingeniería y desarrollo	160	10	1600
Dibujos y planos	60	5	300
Supervisión	100	4	400
			2300

## CAPITULO VII

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 Conclusiones

- La temperatura teórica que se llegó a obtener en el modelo matemático del diseño térmico del sistema es de 73 °C comparando esta con las pruebas realizadas el error es del 1.4 % ya que la temperatura real es de aproximadamente 72 °C con esta temperatura la energía obtenida por el sistema de concentración de radiación solar es de 17.5 kw.
- El diseño y construcción de estos concentradores cilíndricos parabólicos se la realizo con el objetivo de calentar un aceite térmico y aprovechar la temperatura de este fluido en el calentamiento de agua o generar calefacción para una casa pequeña.
- El flujo másico del sistema es 0.42 kg/s, y su caudal 8 gal/min, estos parámetros son directamente proporcionales a la variación de la temperatura del aceite térmico.
- El funcionamiento de este sistema está condicionado directamente a la radiación solar ya que si no hay sol no se puede realizar el calentamiento del aceite térmico, el seguimiento al sol que deben hacer estos concentradores es el de 15° cada hora debido a que la radiación es susceptible a cambios cada segundo.
- El tanque de almacenamiento del aceite fue construido con acero A 36 y pintado de negro mate para contener el calor del aceite en su interior también está forrado de una lana de vidrio que sirve como aislante.

- El aceite utilizado posee una conductividad térmica de  $k = 0.13 \text{ W/m}^\circ\text{k}$  esto permite calentar más rápido al fluido utilizando menos energía.
- El sistema cumple con todas las pruebas de funcionamiento realizadas esto quiere decir que los diferentes elementos mecánicos fueron bien diseñados, contruidos e instalados.
- Las pérdidas en el sistema de transferencia de calor son de 16.5 W realmente mínimas en comparación al calor absorbido del sistema esto se debe a que el tubo de vidrio actúa como aislante ya que genera un efecto invernadero.
- El diseño y construcción de la estructura base de los concentradores cilíndricos parabólicos si cumple debido al análisis realizado en el diseño de elementos de máquinas ya que nos indica que el material seleccionado es el correcto y su factor de seguridad es de 6.59.
- A las 6 horas de puesta en funcionamiento del sistema se llega a obtener la potencia del diseño requerida de 16000 kcal/hr.

## **7.2 Recomendaciones**

- La parábola debe estar bien construida ya que de las dimensiones y el material de esta depende el reflejo de los rayos solares hacia el tubo absorvedor.
- La geometría de la parábola y la distancia focal al ser construidas deben ser las correctas porque si esto no ocurre hay desborde en los rayos del sol que les debe llegar a los tubos y el calentamiento que se obtiene no es el requerido.
- La bomba utilizada para las pruebas no es la adecuada ya que no cubre la presión requerida por el caldero y su aplicación es para

succión de agua, la que se debería utilizar es una bomba para aceite térmico con capacidad de 70 m y un caudal de 8 gal/min.

- Para seleccionar el fluido de trabajo en el sistema se debe tener en cuenta los costos, temperatura de operación, aplicación, y conductividad térmica.
- Antes de poner en funcionamiento el sistema se debe realizar obligatoriamente el protocolo de pruebas donde se encuentran los pasos que se deben seguir para evitar cualquier daño a los elementos de la central solar térmica.
- Para una mejor comprobación de nivel de aceite se recomienda instalar un medidor de aceite que permita ver el nivel superior e inferior del mismo.
- Se recomienda el automatismo de la bomba teniendo en cuenta que debe estar encendida cuando el nivel de aceite esté sobre la línea de aspiración y apagarse cuando esté por debajo de la misma.
- La reflectividad del material de la parábola ayuda a obtener una mejor eficiencia del sistema por lo que se recomienda poner elementos reflectantes como por ejemplo aluminio de alta reflectividad(verde) con un valor de 0.839 que ayude a reflejar mucho mejor los rayos del sol hacia los tubos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

### Libros:

- Almanza, R., & Muñoz, F. (1993). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.
- Barbieri, A., & Sodre, U. (2001). *La Función Cuadrática (parábola)*. Project Matweb.
- Blank, T., & Tarquín, A. (2012). *Ingeniería Económica*. Mc Graw-Hill.
- Bolton, W. (1990). *Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. México: Alfaomega.
- Budynas, R. G., & J. Keith Nisbett. (2008). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley* (Octava ed.). México: Mc Graw Hill.
- Cengel, Y., & Boles, M. (2000). *Termodinámica*. México: McGraw-Hill.
- Chapman, J. S. (1976). *Máquinas Eléctricas*. México: Mc. Graw Hill.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (1974). *Solar Energy Thermal Processes*. Nueva York: John Wiley and Sons.
- Gieck, K. (1975). *Manual de Fórmulas Técnicas*. México: Representaciones y servicios de Ingeniería.
- Horta, J. (1998). *Técnicas de Automatización Industrial*. México: Limusa.
- Incropera, F. P., & De Witt, D. P. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- IJETAE. (2012). *Comparative Anlysis of Wind Loss Coefficient (Wind Heat Transfer Coefficient) For Solar Flat Plate Collector* (Vol. 2).
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona: Ceac.
- Kalogirou. (2009). *Solar Energy Engineering*. California: Elsevier Inc.
- Kothandaraman, C. (2006). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Third ed.). New Delhi: New Age International.

- Kreith, F. (2012). *Principios de Transferencia de Calor*. México: Cengage Learning.
- Larburu, N. (2001). *Máquinas Prontuario*. S.A Ediciones Paraninfo.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pears.
- Pitts, D., & Sissom, L. (1980). *Transferencia de Calor*. Bogota: McGraw-Hill.
- Rohner, P. (1990). *Control for Industrial Automation*. New York: Wiley.
- Ruiz Hernández, V., Silva Pérez, M., & Bravo, I. (2009). *Guías técnicas de energía y medio ambiente*. Barcelona: Gas Natural Fundación.
- Sánchez, F. (2004). *Energía Solar*. España: Cencer.
- Shashi Menon, E. (2005). *Piping Calculations Manual*. New York: McGraw-Hill.
- Shigley, J. E., & Mitchell, L. D. (1985). *Diseño en Ingeniería Mecánica* (Cuarta ed.). México: Mc Graw Hill.
- VYCMEX . (s.f.). *Manual de Hidráulica Industrial*. México.
- White, F. M. (2004). *Fluid Mechanics*. Boston: McGraw-Hill.

#### **Normas:**

- American Petroleum Institute. (1998). *API 2000: Venting Atmospheric and Low - Pressure Storage Tanks*. Washington.
- American Petroleum Institute. (2007). *API 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage*. Washington.
- American Welding Society. (2010). *Código de Soldadura Estructural de Acero* (Veintidos ed.).
- Consejo Internacional de la Construcción. (1997). *Código de la Construcción Uniforme* (Vol. 2). California, Estados Unidos.
- The American Society of Mechanical Engineers. (2004). *2004 Asme Boiler y Pressure Vessel Code*. New York.

**Catálogos:**

- FAG. *Catálogo de Rodamientos* . España.
- Grundfos. *Catálogo de Bombas centrifugas horizontales y multietapa 50/60 Hz*.
- Shell Lubricants. (2011). *Catálogo de Lubricantes*. Quito, Ecuador.
- SUMITEC. *ACERO GRADO MAQUINARIA*.
- Tubacero, S.A. *Catálogo General* .

**Atlas:**

- CONELEC. (2008). *Consejo Nacional de Electricidad*. Quito.
- NASA. *Surface meteorology and Solar Energy*.
- OLADE. (1987). *Atlas de Climatología Solar*.

**Tesis:**

- Benavides, E. (2006). *Diseño y Construcción de una cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico con aplicación al sector rural marginal*. Sangolquí.
- Benavides, S., & Guasumba, J. (2006). *Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico*. Sangolquí.
- Constante Segura, J., & Palacios Chacón, E. (2014). *El Recurso Solar para Generación de Energía Térmica*. Quito: Universitaria Abya - Yala.
- Mena Coba, M. (2013). *Análisis del Recurso Solar y Caracterización del comportamiento energético entre un calentador solar de agua importado marca heliocol y un nacional de 2 m<sup>2</sup> en la ESPE*. Sangolquí.
- Velasco, C. P. (2012). *Diseño de Captador Solar Cilíndrico Parabólico para aplicaciones rurales en Paraguay*.

**Citas de Internet:**

- Caudillo, R. (2005). *Ricardi*. Obtenido de Webcincario: <http://ricardi.webcincario.com/fisica/prefue.htm>

- The Engineering ToolBox. (s.f.). *The Engineering ToolBox*.  
Obtenido de The Engineering ToolBox: [www.EngineeringToolBox.com](http://www.EngineeringToolBox.com)

**Laboratorio:**

- Laboratorio de Energías Renovables.

**Programas:**

- *ISOCAD*.
- Autodesk AutoCAD.
- Solidworks.
- Solid Edge.