



**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**

**AUTORES: ORBEA SAMANIEGO, EDISON GUSTAVO  
SILVA BRAVO, JORGE LUIS**

**TEMA: INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA  
OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR  
CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>**

**DIRECTOR: ING. GUASUMBA, JOSÉ  
CODIRECTOR: ING. PÁEZ, NICOLÁS**

**SANGOLQUÍ, 2014**

## **CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

El proyecto “INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>” fue realizado en su totalidad por Edison Gustavo Orbea Samaniego y Jorge Luis Silva Bravo, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

---

Ing. José Guasumba, MSc.

**DIRECTOR**

---

Ing. Nicolás Páez, MSc.

**CODIRECTOR**

Sangolquí, 2014

## AUTORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, EDISON GUSTAVO ORBEA SAMANIEGO y JORGE LUIS SILVA BRAVO

### DECLARAMOS QUE:

La tesis / proyecto de grado titulado “INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>”, ha sido desarrollado con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas y notas que constan en el desarrollo del proyecto, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía. Consecuentemente este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico de la tesis / proyecto en mención

---

Edison Gustavo Orbea Samaniego

---

Jorge Luis Silva Bravo

## AUTORIZACIÓN

Nosotros, EDISON GUSTAVO ORBEA SAMANIEGO y JORGE LUIS SILVA BRAVO

Autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE la publicación, en la biblioteca virtual de la Institución del proyecto de grado titulado “INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

---

Edison Gustavo Orbea Samaniego  
CI: 1722881958

---

Jorge Luis Silva Bravo  
CI: 1720963261

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a toda mi familia, en especial a mis padres, Rosa y Gustavo que siempre me han sabido brindar su apoyo y comprensión a lo largo de estos años de preparación. A mi hermano Santiago, espero que este logro alcanzado por mi persona sea una motivación más en sus estudios y se dé cuenta que con esfuerzo y perseverancia se logra cumplir nuestros sueños.

Edison G. Orbea S.

A mis padres, Elena y Luis, quienes con su cariño y comprensión me han sabido guiar de manera correcta en cada paso que he dado y también han sido un pilar fundamental para cumplir los objetivos que he planteado durante mi vida; a mi hermana Nathaly, por toda su ayuda brindada en el transcurso de este proyecto.

Jorge L. Silva B.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a Dios porque siempre supo guiar de la mejor manera a mi vida y permitirme conseguir uno de mis mayores propósitos en la vida.

Por supuesto a mis padres, porque estoy consciente del esfuerzo realizado incondicionalmente durante estos años buscando siempre lo mejor para mí y que me sirvieron de motivación para cultivar el hábito de superación.

A mis profesores que siempre compartieron sus conocimientos y experiencias con profesionalismo ético y con esto asentar las bases para responder de la mejor manera a los retos que se me presentarán en mi futura vida profesional.

Edison G. Orbea S.

Agradezco a todos los docentes de la Carrera de Ingeniería Mecánica, quienes con su conocimiento han aportado en el desarrollo de nuestra formación académica; a nuestro director y codirector de tesis por los aportes entregados para la culminación de este proyecto; a mi familia en general por su apoyo total durante toda mi vida universitaria.

Jorge L. Silva B.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO .....	ii
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN.....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	vii
TABLAS.....	xiii
FIGURAS.....	xiv
NOMENCLATURA.....	xviii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xxiv
RESUMEN .....	xxv
ABSTRACT.....	xxvi
INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m <sup>2</sup> .....	xxvii
CAPÍTULO 1 .....	1
GENERALIDADES .....	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	3
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.3.1 GENERAL.....	3

1.3.2	ESPECÍFICOS.....	3
1.4	JUSTIFICACION E IMPORTANCIA.....	4
1.5	ALCANCE .....	6
CAPÍTULO 2.....		7
MARCO TEÓRICO .....		7
2.1	RADIACIÓN SOLAR .....	7
2.1.1	SISTEMA SOL – TIERRA .....	7
2.1.2	POSICIÓN DEL SOL: COORDENADAS HORARIAS.....	12
2.1.3	POSICIÓN DEL SOL: COORDENADAS ANGULARES .....	17
2.1.4	RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE .....	21
2.1.5	RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE .....	25
2.1.6	MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL SUELO .....	28
2.1.7	ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR GLOBAL INCIDENTE SOBRE EL SUELO .....	32
2.1.8	CÁLCULO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA CUALQUIERA.....	33
2.2	COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS (CCP) .....	35
2.3	PROPIEDADES GENERALES DE LOS CCP .....	38
2.3.1	CARACTERÍSTICAS DE LOS CCP .....	38
2.3.2	DISTANCIA FOCAL .....	41
2.4	ANÁLISIS GEOMÉTRICO .....	43
2.5	TIPOS DE SEGUIMIENTO SOLAR .....	52



2.5.1	SEGUIDORES DE UN EJE .....	53
2.6	INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL .....	54
2.6.1	Tipos de señales y sistemas .....	55
2.6.2	Sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado .....	58
2.7	SISTEMAS DE MEDICION .....	60
2.7.1	Sensores.....	62
2.7.2	Tipos de Sensores .....	63
2.7.3	Terminología del funcionamiento .....	64
2.7.4	SENSORES DE TEMPERATURA .....	67
2.8	SISTEMA DE ACTUADORES .....	74
2.8.1	MOTORES DE CD.....	74
2.9	MICROPROCESADORES.....	79
2.9.1	ESTRUCTURA DE UNA MICROCOMPUTADORA .....	80
2.10	Microcontroladores.....	96
2.11	SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS .....	99
2.11.1	Proceso de adquisición de datos .....	99
CAPÍTULO 3.....		102
CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS Y OPERACIONALES DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO .....		102
3.1	BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR SOLAR DE TIPO CILÍNDRICO PARABÓLICO .....	102
3.1.1	Determinación de pérdidas .....	103
3.1.2	Balance de energía en el tubo del absorbedor. ....	106

3.1.3	Balance de energía en la cubierta del absorbedor.....	115
3.1.4	BALANCE DE ENERGÍA EN LA COCINA .....	120
3.1.5	BALANCE EN TANQUE CALENTADOR .....	136
3.2	CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL COLECTOR .....	138
3.3	PARÁMETROS FUNCIONALES .....	138
3.3.1	TEMPERATURAS.....	138
3.4	PARÁMETROS DIMENSIONALES .....	138
3.5	PARÁMETROS ENERGÉTICOS.....	140
CAPÍTULO 4.....		142
DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE GIRO.....		142
4.1	DISEÑO MECÁNICO .....	143
4.1.1	TRANSMISIÓN DE POTENCIA.....	143
4.2	DISEÑO ELECTRÓNICO .....	150
4.2.1	SELECCIÓN DE SENSORES .....	150
4.2.2	SELECCIÓN DE ACTUADORES.....	156
4.2.3	SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR.....	161
4.2.4	COMPILACIÓN DE DATOS.....	165
CAPÍTULO 5.....		171
MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y MONTAJE DE SENSORES .....		171
5.1	MANTENIMIENTO CORRECTIVO .....	171
5.1.1	ESTADO INICIAL DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO	171

5.1.2	ADQUISICIÓN DE LOS COMPONENTES A REEMPLAZAR Y MATERIALES .....	174
5.1.3	Procedimiento para el cambio de partes y piezas defectuosas .....	176
CAPÍTULO 6.....		191
OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		191
6.1	PROTOCOLO DE PRUEBAS.....	191
6.1.1	NIVEL DE ACEITE TÉRMICO EN EL TANQUE ALIMENTADOR .	191
6.1.2	APERTURA DE VÁLVULAS.....	191
6.1.3	SISTEMA ELÉCTRICO.....	192
6.1.4	TRANSFERENCIA DE DATOS ENTRE LOS SENSORES Y EL MICROCONTROLADOR. ....	193
6.1.5	CONECTIVIDAD BLUETOOTH.....	193
6.1.6	INTERFAZ GRÁFICA.....	194
6.2	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	197
CAPÍTULO 7.....		200
ANÁLISIS DE COSTOS.....		200
7.1	INTRODUCCIÓN.....	200
7.2	COSTOS DEL PROYECTO.....	200
7.2.1	COSTO DE MATERIALES DIRECTOS .....	201
7.2.2	COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA.....	203
7.2.3	COSTO DE MATERIALES INDIRECTOS.....	204
7.3	ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO.....	205

CAPITULO 8.....	206
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	206
REFERENCIAS .....	209

## TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Defectos en el Colector Cilíndrico Parabólico.....	2
<b>Tabla 2</b>	Valores medios de la declinación .....	12
<b>Tabla 3</b>	Valores medios de la ecuación del tiempo. ....	15
<b>Tabla 4</b>	Factor de albedo para algunas superficies .....	27
<b>Tabla 5</b>	Valores de las constantes a y b .....	32
<b>Tabla 6</b>	Validez de los valores a y b. ....	33
<b>Tabla 7</b>	Termopares .....	69
<b>Tabla 8</b>	Cuantificaciones de las variables .....	138
<b>Tabla 9</b>	Temperaturas Operacionales del CCP .....	138
<b>Tabla 10</b>	Dimensiones .....	138
<b>Tabla 11</b>	Constantes Térmicas.....	140
<b>Tabla 12</b>	Dimensiones Geométricas del CCP .....	141
<b>Tabla 13</b>	Factores de servicio para transmisiones por cadenas.....	146
<b>Tabla 14</b>	Interfaces de comunicación .....	163
<b>Tabla 15</b>	Materiales reemplazados.....	175
<b>Tabla 16</b>	Elementos electrónicos montados .....	176
<b>Tabla 17</b>	Costo de los materiales directos para el mantenimiento del equipo .....	201
<b>Tabla 18</b>	Costo de los materiales directos para la automatización del equipo .....	202
<b>Tabla 19</b>	Costo total de materiales directos.....	202
<b>Tabla 20</b>	Costo Personal Asesor .....	203
<b>Tabla 21</b>	Costo Personal Ejecutor .....	203
<b>Tabla 22</b>	Costo Personal Auxiliar .....	203
<b>Tabla 23</b>	Costo total de mano de obra directa.....	204
<b>Tabla 24</b>	Costo de materiales indirectos .....	204
<b>Tabla 25</b>	Costo total del proyecto .....	204

## FIGURAS

<b>Figura 1</b>	Plano conjunto del Colector Cilíndrico Parabólico .....	1
<b>Figura 2</b>	Movimiento de la Tierra respecto al Sol .....	9
<b>Figura 3</b>	Incidencia de los rayos solares sobre la Tierra en el solsticio de invierno (23 de diciembre) .....	10
<b>Figura 4</b>	Variación del ángulo de declinación a lo largo del año .....	11
<b>Figura 5</b>	Latitud ( $\phi$ ) y ángulo horario (h) para un punto P situado sobre la superficie de la Tierra .....	13
<b>Figura 6</b>	Posición del sol respecto de una superficie inclinada .....	19
<b>Figura 7</b>	Orientación ideal del Colector Cilíndrico Parabólico respecto al Sol.....	20
<b>Figura 8</b>	Orientación Norte – Sur del Colector Cilíndrico Parabólico a lo largo de su eje .....	20
<b>Figura 9</b>	Distribución espectral de la radiación solar.....	23
<b>Figura 10</b>	Trayectoria idealizada de un rayo solar al atravesar la atmósfera.....	24
<b>Figura 11</b>	Componentes de la radiación solar terrestre .....	27
<b>Figura 12</b>	Representación de un piranómetro de radiación total.....	28
<b>Figura 13</b>	Representación esquemática de un pirheliómetro .....	30
<b>Figura 14</b>	Representación esquemática de un heliógrafo .....	31
<b>Figura 15</b>	Trayectoria aparente del Sol respecto de un punto P de la superficie terrestre .....	34
<b>Figura 16</b>	Partes de un colector cilíndrico parabólico .....	35
<b>Figura 17</b>	Esquema del seguimiento solar a un eje de un CCP.....	37
<b>Figura 18</b>	Área Efectiva - Características Generales de los CCP .....	39
<b>Figura 19</b>	Colectores Parabólicos de distancia focal larga y corta .....	42
<b>Figura 20</b>	Elementos de la parábola .....	44
<b>Figura 21</b>	Geometría de la parábola .....	45
<b>Figura 22</b>	B: Boca de la parábola, F: Distancia focal, c: Profundidad de la parábola en el centro. ....	48

<b>Figura 23</b>	Factores que intervienen en la selección del diámetro de un absorbedor.....	49
<b>Figura 24</b>	Varios ángulos de borde para una apertura fija. ....	49
<b>Figura 25</b>	Parábola con distancia focal $F$ igual a la profundidad de la parábola $c$ . ....	50
<b>Figura 26</b>	Gráfico de la ecuación de la parábola.....	51
<b>Figura 27</b>	Distancia Tierra – Sol y Ángulo de aceptación.....	52
<b>Figura 29</b>	Diagrama de un proceso de control .....	55
<b>Figura 30</b>	Señal analógica .....	56
<b>Figura 31</b>	Señal discreta en el tiempo.....	56
<b>Figura 32</b>	Señal discreta en amplitud.....	57
<b>Figura 33</b>	Señal discreta en amplitud y tiempo .....	57
<b>Figura 34</b>	Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto .....	58
<b>Figura 35</b>	Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado.....	59
<b>Figura 36</b>	Elementos de un sistema de lazo cerrado .....	60
<b>Figura 37</b>	Ejemplo de un sistema de medición.....	61
<b>Figura 38</b>	Un sistema de medición y sus elementos.....	61
<b>Figura 39</b>	Histéresis .....	65
<b>Figura 40</b>	Gráfica fem termoeléctrica - temperatura.....	69
<b>Figura 41</b>	Ley de temperaturas intermedias.....	70
<b>Figura 42</b>	Potenciómetro giratorio .....	72
<b>Figura 43</b>	Medidor de flujo de turbina.....	73
<b>Figura 44</b>	Fuerza sobre un conductor por el que pasa una corriente.....	75
<b>Figura 45</b>	F.e.m. inducida.....	76
<b>Figura 46</b>	Elementos básicos de un motor de cd .....	76
<b>Figura 47</b>	Motor de cd.....	78
<b>Figura 48</b>	Circuito en H .....	79
<b>Figura 49</b>	Configuración general de una computadora .....	81
<b>Figura 50</b>	Dispositivos de una CPU .....	83
<b>Figura 51</b>	Celdas de memoria.....	85

<b>Figura 52</b>	Chip de una ROM .....	86
<b>Figura 53</b>	Chip de memoria RAM.....	88
<b>Figura 54</b>	Modo de operación maestro-esclavo .....	94
<b>Figura 55</b>	Diagrama de bloques de un microcontrolador .....	97
<b>Figura 56</b>	Proceso de adquisición de datos .....	99
<b>Figura 57</b>	Vista transversal del elemento absorbedor. ....	103
<b>Figura 58</b>	Factores que intervienen en el balance de energía del colector cilíndrico parabólico.....	104
<b>Figura 59</b>	Temperaturas en el elemento absorbedor. ....	105
<b>Figura 60</b>	Calores en el balance de energía en el tubo del absorbedor..	106
<b>Figura 61</b>	Elemento diferencial del fluido de trabajo en la zona de líquido .....	112
<b>Figura 62</b>	Calores que intervienen en el balance de energía en la cubierta del absorbedor .....	115
<b>Figura 63</b>	Vista transversal del colector. ....	117
<b>Figura 65</b>	Factores que intervienen en el balance del sistema a ser analizado. ....	121
<b>Figura 67</b>	Red eléctrica térmica equivalente de las resistencias térmicas de pérdida que intervienen en el análisis de la cocina.....	130
<b>Figura 68</b>	Red eléctrica térmica equivalente simplificada de la cocina. ..	132
<b>Figura 69</b>	Red eléctrica térmica equivalente simplificada final en la cocina. ....	133
<b>Figura 70</b>	Partes del tanque calentador .....	136
<b>Figura 71</b>	Serpentín .....	137
<b>Figura 72</b>	Sensor de temperatura DALLAS DS18B20 .....	152
<b>Figura 73</b>	Termocupla tipo K Waterproof .....	153
<b>Figura 74</b>	Circuito del Amplificador AD595.....	154
<b>Figura 75</b>	Potenciómetro Bourns 3590.....	155
<b>Figura 76</b>	Sensor de flujo .....	156
<b>Figura 77</b>	Proceso de rectificación de la señal eléctrica .....	157
<b>Figura 78</b>	Circuito de rectificación de señal eléctrica .....	158



<b>Figura 79</b>	Circuito H .....	159
<b>Figura 80</b>	Determinación de la Potencia eléctrica del sistema .....	159
<b>Figura 81</b>	Interfaces requeridas del microcontrolador .....	162
<b>Figura 82</b>	Microcontrolador Mega ADK .....	164
<b>Figura 83</b>	Diagrama de flujo para programación microcontrolador .....	166
<b>Figura 84</b>	Pantalla de inicio .....	168
<b>Figura 85</b>	Pantalla de monitoreo .....	169
<b>Figura 86</b>	Pantalla de resultados del tubo absorbedor .....	169
<b>Figura 87</b>	Pantalla de resultados de la cocina.....	170
<b>Figura 88</b>	Pantalla de resultados del tanque calentador .....	170
<b>Figura 89</b>	Tubo de vidrio defectuoso .....	172
<b>Figura 90</b>	Aislante deteriorado .....	173
<b>Figura 91</b>	Panel despintado .....	173
<b>Figura 92</b>	Chumaceras en mal estado .....	174
<b>Figura 93</b>	Procedimiento general de mantenimiento.....	177
<b>Figura 94</b>	Procedimiento general de mantenimiento (Adjunto 1) .....	178
<b>Figura 95</b>	Procedimiento general de mantenimiento (Adjunto 2) .....	179
<b>Figura 97</b>	Bomba nueva .....	181
<b>Figura 98</b>	Desmontaje de la tubería de cobre .....	181
<b>Figura 99</b>	Torneado de los acoples de duralón .....	182
<b>Figura 103</b>	Soldadura de la tubería.....	184
<b>Figura 104</b>	Inspección del tanque alimentador.....	185
<b>Figura 107</b>	Montaje de catarinas.....	187
<b>Figura 109</b>	Instalación de caja de control.....	188
<b>Figura 110</b>	Sensor de temperatura a la salida de la cocina .....	189
<b>Figura 111</b>	Sensor de caudal .....	189
<b>Figura 112</b>	Instalación del potenciómetro .....	190
<b>Figura 113</b>	Variación de la temperatura del fluido de trabajo en los concentradores .....	197
<b>Figura 114</b>	Radiación solar vs Eficiencia .....	198

## NOMENCLATURA

	Declinación (rad).....	11
<b>z</b>	Número del día del año.....	12
	Ángulo de latitud (°).....	13
<b>h</b>	Ángulo horario (°).....	13
<b>TSV</b>	Tiempo solar verdadero (h).....	14
<b>TSM</b>	Tiempo solar medio (h).....	15
<b>ET</b>	Ecuación del tiempo.....	15
<b>HO</b>	Hora oficial del país.....	17
<b>e</b>	Adelanto respecto de la hora oficial.....	17
<b>m</b>	Longitud del meridiano medio del huso horario adoptado.....	17
	Longitud del meridiano que pasa por el punto estudiado.....	17
	Ángulo de azimut (°).....	18
<b><math>\beta</math></b>	Ángulo de altitud (°).....	18
<b><math>\psi</math></b>	Ángulo cenital (°).....	18
<b>td</b>	Duración del día (horas).....	21
<b>I<sub>sc</sub></b>	Irradiancia solar (W/m <sup>2</sup> ).....	21
<b>H<sub>h,e</sub></b>	Irradiación horaria (W).....	24
<b><math>\sigma</math></b>	Coefficiente de insolación.....	31
<b>N</b>	Duración del día desde la salida hasta la puesta del sol.....	31
<b>H<sub>e</sub></b>	Irradiación solar diaria extraterrestre.....	32
<b>s</b>	Inclinación (°).....	33
<b>d</b>	Diámetro de la sección circular de la superficie absorbente.....	40
<b>Lo</b>	Longitud del colector cónico parabólico.....	40
<b>E<sub>ent</sub></b>	Energía que entra al absorbedor ( W/m )......	104
<b>E<sub>sal</sub></b>	Energía que sale del absorbedor ( W/m )......	104
<b>UE<sub>alm</sub></b>	Variación de la energía en el absorbedor ( W/m ).....	104
<b>q<sub>ut</sub></b>	Calor útil que absorbe el fluido de trabajo ( W/m )......	105
<b>q<sub>e</sub></b>	Calor radiante efectivo que llega al tubo absorbedor ( W/m )......	105

<b><math>q_r</math></b>	Calor perdido por radiación del absorbedor al medio ambiente ( W/m ). .....	105
<b><math>q_c</math></b>	Calor perdido por convección del absorbedor al medio ambiente ( W/m ). .....	105
<b><math>q_p</math></b>	Calor total de pérdidas que resulta de la suma de $q_r$ y $q_c$ (W/m).	105
<b>T</b>	Temperatura del fluido de trabajo ( °K ). .....	105
<b><math>T_t</math></b>	Temperatura del tubo del absorbedor ( °K ). .....	105
<b><math>T_c</math></b>	Temperatura de la cubierta ( °K ). .....	105
<b><math>q_{pr}</math></b>	Calor perdido por radiación entre el tubo del absorbedor y la cubierta ( W/m ). .....	107
<b><math>q_{pc}</math></b>	Calor perdido por convección entre el tubo del absorbedor y el aire atrapado entre el tubo y la cubierta ( W/m ). .....	107
<b><math>A_t</math></b>	Área por metro lineal del tubo del absorbedor ( $m^2$ ). .....	107
<b><math>D_t</math></b>	Diámetro exterior del tubo del absorbedor ( m ). .....	108
<b>L</b>	Longitud del colector ( m ). .....	108
<b>†</b>	Constante de Stefan Boltzman ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ). .....	109
<b><math>F_{12}</math></b>	Factor de orientación para dos cilindros concéntricos. ....	109
<b><math>v_t</math></b>	Emisividad del tubo del absorbedor. ....	109
<b><math>v_c</math></b>	Emisividad de la cubierta. ....	109
<b><math>D_{ci}</math></b>	Diámetro interno de la cubierta ( m ). .....	109
<b><math>K_3</math></b>	Conductividad térmica de la cubierta (W/m·°K). .....	104
<b><math>K_{ef}</math></b>	Conductividad térmica efectiva del aire (W/m·°K). .....	110
<b><math>K_a</math></b>	Conductividad térmica del aire en el absorbedor ( W/m·°K ). .....	110
<b><math>Pr_a</math></b>	Número de Prandtl para el aire en el absorbedor. ....	110
<b><math>Rac_a</math></b>	Número de Rayleigh modificado para el aire .....	110
<b><math>Ral_a</math></b>	Número de Rayleigh para el aire en el absorbedor.....	110
<b>es</b>	Espesor del aire atrapado entre la cubierta y el tubo absorbedor ( m ). .....	110
<b>g</b>	Aceleración gravitacional ( $m^2/s$ ). .....	111
<b><math>S_a</math></b>	Coficiente volumétrico de expansión térmica del aire en el absorbedor ( $^\circ K^{-1}$ ). .....	111

$\epsilon_a$	Viscosidad cinemática del aire en el absorbedor ( $m^2/s$ ).	111
$r_a$	Difusividad térmica del aire en el absorbedor ( $m^2/s$ ).	111
<b>h</b>	Coeficiente de transferencia de calor por convección entre el tubo del absorbedor y el fluido de trabajo	107
<b>B</b>	Apertura de boca de la parábola ( m ).	114
<b>D<sub>c</sub></b>	Diámetro exterior de la cubierta ( m ).	114
<b>G<sub>b</sub></b>	Radiación solar directa incidente sobre el colector ( $W/m^2$ ).	115
'	Reflejancia de la superficie del colector.	115
x	Factor de forma de la superficie del colector.	115
$r_{ab}$	Absortancia del tubo del absorbedor.	115
$\dagger_{cu}$	Transmitancia de la cubierta.	115
<b>q<sub>prna</sub></b>	Calor perdido por radiación entre cubierta y superficie reflectante (W/m).	116
<b>q<sub>pra</sub></b>	Calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente (W/m).	116
<b>q<sub>pca</sub></b>	Calor perdido por convección desde la cubierta al medio ambiente (W/m).	116
<b>A<sub>c</sub></b>	Área por metro lineal de la cubierta ( $m^2$ ).	117
<b>A<sub>s</sub></b>	Área de la superficie interna tipo espejo del colector ( $m^2$ ).	117
<b>S</b>	Longitud de la curvatura parabólica ( m ).	117
<b>T<sub>s</sub></b>	Temperatura de la superficie reflectante del colector ( $^{\circ}K$ ).	118
<b>A<sub>nco</sub></b>	Ancho interior de la cocina(m).	120
<b>L<sub>ac</sub></b>	Largo interior de la cocina ( m ).	120
<b>Q<sub>pi</sub></b>	Calor total de pérdidas ( W ).	121
<b>Q<sub>FT</sub></b>	Variación del calor en la bandeja de cocción y el arreglo de tubos de cobre, incluido el fluido de trabajo ( W ).	122
<b>Q<sub>u</sub></b>	Calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina ( W ).	122
<b>U<sub>p</sub></b>	Coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas en la cocina ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}K$ ).	122
<b>A<sub>coc</sub></b>	Área de cocción ( $m^2$ ).	122

$T_p$	Temperatura de la bandeja de cocción ( °K ).	122
$T_{amb}$	Temperatura del medio ambiente ( °K ).	122
$T_p$	Temperatura de la bandeja de cocción ( °K ).	123
$T_{ta1}$	Temperatura de la pared interior de la tapa ( °K ).	123
$T_{ta2}$	Temperatura de la pared exterior de la tapa ( °K ).	123
$Q_r$	Calor perdido por radiación entre la bandeja de cocción y la tapa ( W ).	123
$Q_c$	Calor perdido por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa ( W ).	123
$Q_{r1}$	Calor perdido por radiación entre la tapa y el medio ambiente ( W ).	123
$Q_{c1}$	Calor perdido por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente ( W ).	123
$Q_d$	Calor perdido por conducción entre las paredes inferior y superior de la tapa ( W ).	124
$Q_{d1}$	Calor perdido por conducción por el perímetro de la cocina.	124
$Q_{d2}$	Calor perdido por conducción por la parte inferior de la cocina ( W ).	124
$H_{ca}$	Altura de la cavidad rectangular de la cocina ( m ).	124
$v_p$	Emisividad de la bandeja de cocción.	125
$v_{ta}$	Emisividad de la tapa.	125
$R_7$	Resistencia térmica por radiación entre la bandeja de cocción y la tapa ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).	125
$R_8$	Resistencia térmica por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).	126
$h_c$	Coeficiente de transferencia de calor por convección libre.	126
$Nu$	Número de Nusselt.	126
$K_{a2}$	Conductividad térmica del aire en la cocina ( $W/m \cdot ^\circ K$ ).	126
$H_{ca}$	Altura de la cavidad rectangular de la cocina ( m ).	126
$Ra_{a2}$	Número de Rayleigh para el aire en la cocina	127
$Pr_{a2}$	Número de Prandtl para el aire en la cocina.	127

$S_{a2}$	Coeficiente volumétrico de expansión térmica en la cocina .....	127
$\epsilon_{a2}$	Viscosidad cinemática del aire en la cocina ( $m^2/s$ ).....	127
$r_{a2}$	Difusividad térmica del aire en la cocina ( $m^2/s$ ).....	127
$R_9$	Resistencia térmica por radiación entre la tapa y el medio ambiente ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	128
$R_{10}$	Resistencia térmica por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	128
$h_v$	Coeficiente de transferencia de calor por viento ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ).....	129
$R_{11}$	Resistencia térmica de conducción entre las paredes de la tapa ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	129
$e_{ac}$	Espesor de la pared de la tapa ( m ).....	129
$K_{ac}$	Conductividad térmica del material de la tapa ( $W/m \cdot ^\circ K$ ).....	129
$e_{ai}$	Espesor del aislante al interior de la tapa ( m ).....	129
$K_{ai}$	Conductividad térmica del aislante ( $W/m \cdot ^\circ K$ ).....	129
$q'_u$	Calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina ( $W/m^2$ ).....	130
$q'_{pis}$	Calor de pérdidas superiores ( $W/m^2$ ).....	130
$q'_{pil}$	Calor de pérdidas inferiores ( $W/m^2$ ).....	130
$R_{12}$	Resistencia térmica de conducción por el perímetro de la cocina ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	131
$P_{coc}$	Perímetro interior de la cocina ( m ).....	131
$H_{coc}$	Altura de la cocina ( m ).....	131
$e_{la}$	Espesor del aislante lateral de la cocina ( m ).....	131
$R_{13}$	Resistencia térmica de conducción por la parte inferior de la cocina ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	131
$e_{po}$	Espesor del aislante inferior de la cocina ( m ).....	131
$R_{ps}$	Resistencia térmica de pérdidas superiores ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	132
$R_{pi}$	Resistencia térmica de pérdidas inferiores ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).....	132
$T_{mf}$	Temperatura media del fluido de trabajo ( $^\circ K$ ).....	134
$T_{mp}$	Temperatura media de la bandeja de cocción ( $^\circ K$ ).....	134

<b>R<sub>fp</sub></b>	Resistencia térmica desde el fluido de trabajo hasta la bandeja de cocción ( °K/W ). .....	134
<b>UE<sub>int</sub></b>	Variación de la energía interna del aire y los alimentos al interior de la cocina ( J )......	134
<b>t<sub>coc</sub></b>	Tiempo requerido para la cocción ( s ). .....	134
<b>UE<sub>al</sub></b>	Variación de la energía interna de los alimentos ( J )......	134
<b>UE<sub>aire</sub></b>	Variación de la energía interna del aire al interior de la cocina. ..	134
<b>m<sub>al</sub></b>	Masa de los alimentos ( Kg ). .....	135
<b>m<sub>aire</sub></b>	Masa del aire al interior de la cocina ( Kg ). .....	135
<b>Cp<sub>al</sub></b>	Calor específico de los alimentos ( J/Kg.°K ). .....	135
<b>Cp<sub>aire</sub></b>	Calor específico del aire ( J/Kg.°K ). .....	135
<b>T<sub>coc</sub></b>	Temperatura de cocción ( °K )......	135
<b>ρ<sub>a</sub></b>	Densidad del aire ( Kg/m <sup>3</sup> ).....	135
<b>T<sub>es</sub></b>	Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del serpentín ( °K )......	137
<b>T<sub>ss</sub></b>	Temperatura del fluido de trabajo a la salida del serpentín ( °K )......	137

## **ANEXOS**

<b>ANEXO 1</b>	Cálculos para la selección de cadenas y catarinas
<b>ANEXO 2</b>	Catálogo de reductores
<b>ANEXO 3</b>	Datasheet Arduino Mega ADK
<b>ANEXO 4</b>	Datasheet Sensores de Temperatura DALLAS DS18B20
<b>ANEXO 5</b>	Datasheet del Amplificador AD 595
<b>ANEXO 6</b>	Datasheet Potenciómetro Bourns
<b>ANEXO 7</b>	Características Sensor de Flujo
<b>ANEXO 8</b>	Codificación del programa para el Microcontrolador
<b>ANEXO 9</b>	Mapa de la Radiación Solar en el Ecuador
<b>ANEXO 10</b>	Catálogo Bomba Periférica Pedrollo PK
<b>ANEXO 11</b>	Datos obtenidos del Equipo
<b>ANEXO 12</b>	Guía de Práctica del Equipo
<b>ANEXO 13</b>	Manual de Usuario del Equipo
<b>ANEXO 14</b>	Planos de conjunto
<b>ANEXO 15</b>	Plano eléctrico de conexión
<b>ANEXO 16</b>	Video Introductorio
<b>ANEXO 17</b>	Programa Ejecutable para el Microcontrolador
<b>ANEXO 18</b>	Programa Ejecutable para la Interfaz Gráfica
<b>ANEXO 19</b>	Manual de usuario de la Tablet Energy Sistem s10



## RESUMEN

El presente proyecto pretende realizar la automatización de la Cocina Solar Experimental, de tipo Cilíndrico Parabólica de  $7.2 \text{ m}^2$  de área de apertura presentada como un prototipo de generación térmica que aprovecha la energía solar para transformarla en energía térmica. Básicamente se lo ha dotado al equipo de un sistema de seguimiento solar que permitió el giro automático de los concentradores en 15 grados por cada hora del día, siendo esto la condición de acuerdo a nuestra situación geográfica para aprovechar al máximo la radiación solar directa. Se logró alcanzar una temperatura en el aceite térmico de alrededor de  $80^\circ \text{ C}$  a la salida de los concentradores y una eficiencia del 62% con una irradiancia de  $900 \text{ W/m}^2$ . Un sistema de adquisición de datos formado por un microcontrolador, sensores y una Tablet permiten el manejo de las variables características del equipo en tiempo real, permitiendo llegar a conclusiones con el objetivo buscar sus posibles aplicaciones en la industria.

**Palabras clave:** Automatización, seguimiento solar, radiación solar directa, aceite térmico, cocina solar, línea focal.

## ABSTRACT

This project aims to make the automation of Experimental Solar Cooking , Cylindrical Parabolic type 7.2 m<sup>2</sup> aperture area presented as a prototype thermal generation fail to transform solar energy into thermal energy. Basically it has given the team a solar tracking system allowing the automatic rotation of the hubs in 15 degrees for each hour of the day , this being the condition according to our location to maximize direct solar radiation. It was possible to reach a thermal oil temperature of about 80 ° C at the exit of the concentrators and an efficiency of 62 % at an irradiance of 900 W/m<sup>2</sup>. A data acquisition system consists of a microcontroller, sensors and a Tablet allow handling equipment variables in real time, allowing conclusions in order find their potential applications in industry.

**Keywords:** Automation, solar tracking, solar radiation, thermal oil, solar cooking, focal line.

## INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILINDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>

Es momento de tomar conciencia en los impactos ambientales que se está viviendo en nuestro planeta muchos de estos debido a la indiscriminada utilización y dependencia de los combustibles fósiles además los mismos que son limitados y tarde o temprano se agotarán. Una alternativa para remediar lo anterior es la utilización de otro tipo de energía más amigable con el planeta, pura, abundante, cumpliendo con estas características la energía solar.

La energía solar se la puede considerar como una fuente inagotable de energía razón por la cual vale la pena incentivar el estudio y la investigación en este recurso que se convertiría en una opción sustentable para el desarrollo de procesos productivos. Se han desarrollado prototipos de equipos que aprovechan la radiación solar entre los que se encuentran los colectores solares.

Un colector solar es una clase especial de intercambiador de calor que transforma la energía radiante en energía calorífica. Estos difieren en la forma de cómo intercambian calor. En el convencional, el intercambio de

energía se da entre fluido-fluido. En el colector solar, la energía transferida, de naturaleza radiante, es desde una fuente distante a un fluido.

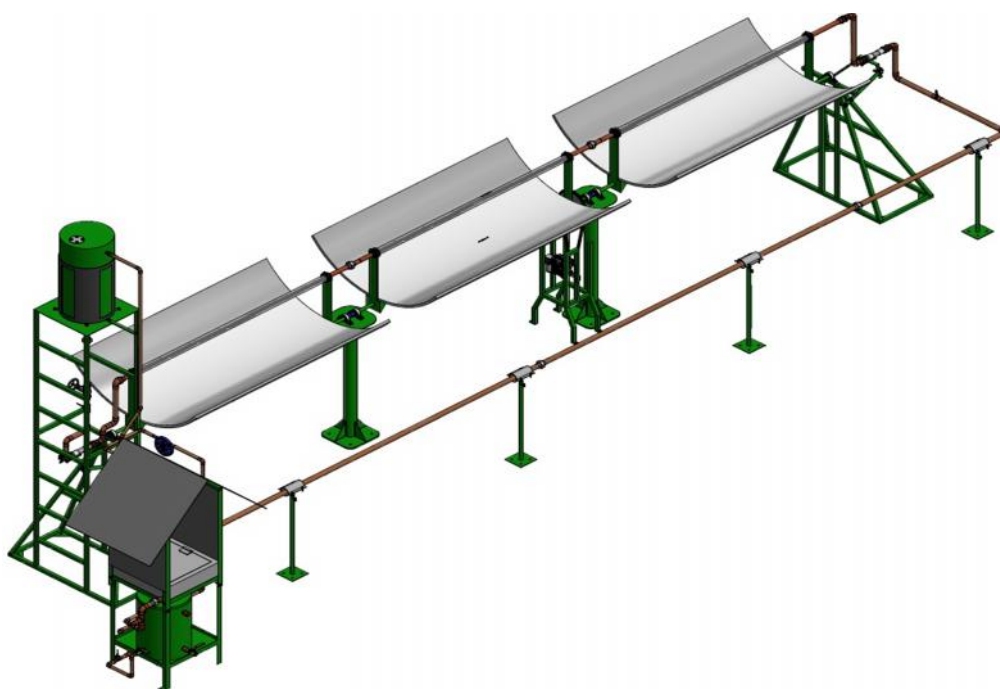
Los concentradores son un tipo específico de colector solar que aumentan la intensidad solar sobre una superficie absorbente. La funcionalidad de los concentradores se maximiza mientras mejor sea la capacidad de captar la radiación solar, esto se lo puede lograr manteniendo una constante posición normal a los rayos solares de los concentradores. A este tipo de colectores solares es necesario el montaje de un sistema de seguimiento que permita la concentración de los rayos solares sobre una línea en todo momento.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 ANTECEDENTES

En el año 2006 se presentó el proyecto de tesis “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA SOLAR EXPERIMENTAL, DE TIPO CILÍNDRICO PARABÓLICO CON APLICACIÓN AL SECTOR RURAL MARGINAL”, como un prototipo que permite el aprovechamiento de la energía solar y con esto enfrentar un gran reto: cambiar el modelo energético, pasando del consumo basado en combustibles fósiles, a las energías renovables.







**Figura 1** Plano conjunto del Colector Cilíndrico Parabólico

La cocina solar experimental, de tipo cilíndrico parabólico se encuentra ubicada en el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica para realizar pruebas de generación térmica y experimentación objetivos que nunca fueron alcanzados.

El equipo no se encontraba operable y debido al transcurso de los años ha sufrido ciertos deterioros citados en la siguiente tabla:

**Tabla 1 Defectos en el Colector Cilíndrico Parabólico**

No.	Componente	Estado	Cantidad	Foto
1	Tubos de concentración	Rotos	3 [u]	
2	Aislante térmico	Desgastado	15 [m]	
3	Rodamientos	Oxidados	8 [u]	
4	Estructura	Despintada	10 [m <sup>2</sup> ]	

**Fuente:** Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

## **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

La cocina solar al ser de tipo experimental necesita de elementos eléctricos y electrónicos que indiquen el comportamiento de la misma durante el día, desafortunadamente esta cocina no fue dotada con estos elementos, además con el transcurso de los años, ciertos componentes de esta cocina han tenido desperfectos, los mismos que deben ser reparados para que el estudio sea más preciso.

Los colectores cilíndricos parabólicos que componen esta cocina solar, necesitan también de un sistema de seguimiento solar para aprovechar al máximo el recurso solar, tomando en cuenta que nos encontramos en una zona donde la radiación solar es alta.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 GENERAL**

Modernizar el colector solar del laboratorio de Energías Renovables con el fin doble de que haga seguimiento solar y que tenga un sistema de manejo de variables.

### **1.3.2 ESPECÍFICOS**

- Realizar el análisis técnico de la situación inicial del colector cilíndrico parabólico.

- Dimensionar e implementar el sistema de seguimiento solar automático en un eje.
- Diseñar el sistema eléctrico y electrónico de la adquisición de datos.
- Realizar las pruebas del equipo.

## **1.4 JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

La Escuela Politécnica del Ejército, en su afán de promover la investigación cuenta con el Centro de Investigación Científica y Tecnológica del Ejército (CICTE), el cual realizó las gestiones necesarias para la aplicación del proyecto “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA COCINA SOLAR EXPERIMENTAL, DE TIPO CILÍNDRICO PARABÓLICO CON APLICACIÓN AL SECTOR RURAL MARGINAL”, que sirva para realizar pruebas de materiales reflectantes, fluidos de trabajo y de generación térmica, para homologar el diseño de sistemas térmicos que utilicen energía solar, que sean fáciles de construir con materiales económicos y durables para cumplir con las exigencias del Ecuador.

El costo del proyecto alcanzó la cantidad de treinta mil dólares (Benavides & Guasumba, 2006), pero lamentablemente no se le dio el seguimiento adecuado para darle la utilidad por la cual fue diseñado y construido y en la actualidad se encuentra en un estado inoperable.



La adquisición de un equipo nuevo, que posea características de alta tecnología, e indique el comportamiento del colector cilíndrico parabólico, representaría un gasto elevado para la Escuela Politécnica del Ejército, ya que dicho valor superaría los sesenta mil dólares más los costos de importación, debido a que los mencionados equipos no se los fabrica en el país, teniendo en cuenta estos detalles, se considera que el proyecto debe retomar valor ya que no puede pasar desapercibido por la importancia que representa para el estudio de las Energías Renovables, las mismas que están tomando fuerza en la actualidad como medio necesario para ayudar a la conservación del planeta.

Con la realización de este proyecto, “INGENIERÍA INVERSA Y REPOTENCIACIÓN PARA LA OPTIMIZACIÓN, TOMA DE DATOS Y CONTROL DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO DE 7.2 m<sup>2</sup>” se pretende reparar todos los componentes defectuosos del colector cilíndrico parabólico con la finalidad de ponerlo a punto para llevarlo a un estado operable y de esta forma el Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica podrá disponer del primer equipo de experimentación de Energías Renovables óptimo con mejoras en su diseño aplicando conocimientos de Automatización, Mecanismos y Transferencia de Calor, enfocados a una mejor comprensión de la teoría de los colectores cilíndricos parabólicos en miras de proteger al ambiente.

## **1.5 ALCANCE**

Con la ejecución de este proyecto se busca aplicar los conceptos de Ingeniería Inversa y Repotenciación para aportar con el mejoramiento de proyectos de investigación realizados en la Escuela Politécnica del Ejército.

Se diseñará, construirá e implementará un conjunto mecánico, que brinde un movimiento automático a los colectores parabólicos durante todo el día, así como un sistema de adquisición de datos junto con la programación de un software con lo que se tendrá un estudio más sensible del comportamiento del colector cilíndrico parabólico y con ello un equipo experimental de Energías Renovables único en el país, que servirá de apoyo para realizar estudio de aplicaciones de la maestría de Energías Renovables dictada en la ESPE postgrados, junto a materias relacionadas de ingeniería dictadas por el DECEM.

## **CAPÍTULO 2**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 RADIACIÓN SOLAR**

El aprovechamiento de la energía solar, como fuente de energía útil tiene un doble objetivo: por un lado ahorrar en energías no renovables, sobre todo energía fósil y energía nuclear y por otro amortiguar el impacto ambiental generado por ellas.

Si intentamos aprovechar esta energía, de la mejor manera posible, deberemos conocer bien algunas de sus características más importantes, tales como: horas de sol para una situación geográfica determinada, trayectoria aparente del sol respecto a un punto situado sobre la superficie de la tierra, cantidad de energía recibida por metro cuadrado y unidad de tiempo, energía recibida a lo largo de un día, mes, año, etc.

##### **2.1.1 SISTEMA SOL – TIERRA**

El sol es una estrella, formada casi toda por hidrógeno y una pequeña proporción de helio, en la que se desarrolla una gran cantidad de energía, debido a una reacción nuclear de fusión, reacción que tiene lugar gracias a las grandes temperaturas y presiones que se alcanzan en su interior.

El sol no es sólido y su superficie no es estable en modo alguno; sin embargo, y para la finalidad que nos interesa, podemos imaginarlo como una

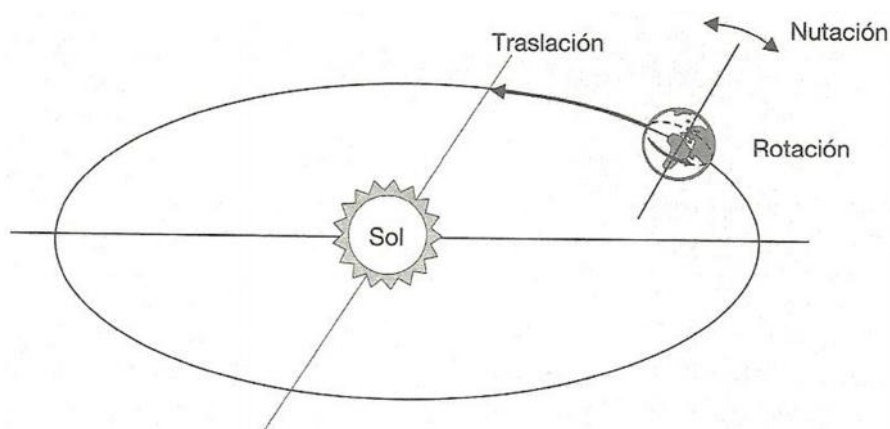
esfera de radio de 695000 Km., con una masa de  $2 \times 10^{30}$  Kg, lo cual nos da una densidad media de  $1,41 \text{ Kg/m}^3$  y situado a  $1,495 \times 10^8$  Km de la Tierra. Para determinados cálculos, sistemas concentradores por ejemplo, deberá tenerse en cuenta que el sol no es un foco rigurosamente puntual. Desde la Tierra se ve el diámetro aparente del sol de  $0,53^\circ$ .

Para hacernos una idea simplificada del Sol, podemos imaginarlo formado por un núcleo y unas capas superpuestas llamadas, de dentro hacia fuera, fotosfera, capa de inversión, cromosfera y corona. La zona interior del sol, comprendida entre su centro y una cuarta parte de su radio, tiene una densidad del orden de  $1 \times 10^5 \text{ Kg/m}^3$ , puesto que contiene prácticamente un 40% de su masa total en aproximadamente solo un 15% del volumen total. A medida que nos alejamos del núcleo, la densidad disminuye rápidamente llegando a ser del orden de tan solo  $1 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^3$  en la fotosfera. La temperatura del sol tampoco es uniforme, estimándose que en interior se alcanzan temperaturas del orden de 8 a 40 millones de grados Kelvin, mientras que en la fotosfera se acepta una temperatura de unos 6000 °K.

La energía generada en el interior se transmite a la fotosfera mediante mecanismos de convección, llega a la zona llamada de inversión y finalmente a la cromosfera y la corona. Estas últimas capas no son completamente transparentes, lo cual hace que el sol no se comporte exactamente como un cuerpo negro y que, para la mayoría de las aplicaciones prácticas de la energía solar, se considere que su temperatura

aparente es de 5800 °K; que es la temperatura que debería tener un cuerpo negro ideal para que radiara una energía equivalente a la radiada por el sol.

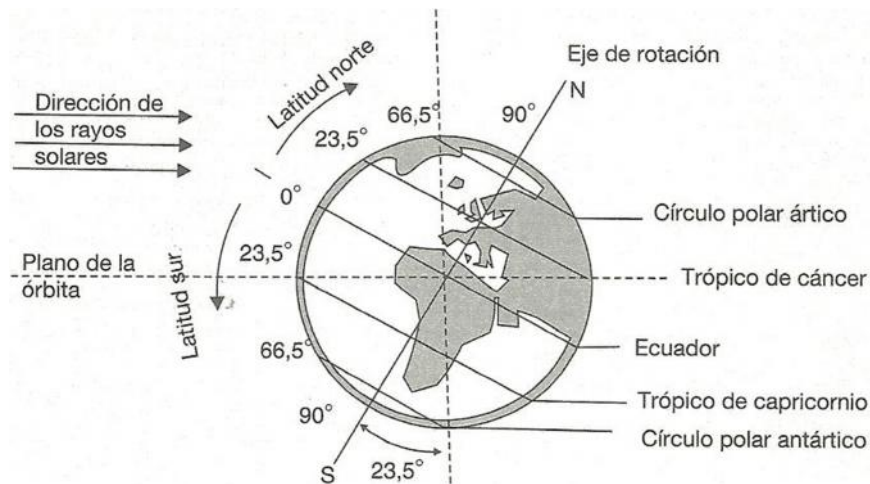
El movimiento de la Tierra respecto del sol puede descomponerse en tres movimientos elementales: traslación, rotación y nutación.



**Figura 2** Movimiento de la Tierra respecto al Sol

- *Traslación.* La tierra se traslada alrededor del sol siguiendo una trayectoria elíptica de pequeña excentricidad, de tal manera que la distancia máxima es solo 1,017 veces la media y la mínima, 0,983 veces la media. El plano que contiene la trayectoria de traslación de la tierra se conoce como plano de la eclíptica.
- *Rotación.* Además del movimiento de traslación, la tierra gira sobre sí misma, alrededor de un eje imaginario que pasa por los polos y que forma un ángulo medio de 23°-27' con la normal al plano de la eclíptica. Debido a esta inclinación (ver Figura 2), el ángulo de incidencia de los

rayos solares sobre la superficie terrestre varía a lo largo del año: en verano es mayor que en invierno. Para el hemisferio norte, el mayor ángulo de incidencia coincide con la posición de la Tierra más alejada del Sol, es cuando se produce el solsticio de verano (22 junio); en el solsticio de invierno (23 de diciembre) coincide con la distancia mínima, y las estaciones intermedias tenemos los equinoccios de verano (21 de marzo) y de otoño (23 de septiembre).



**Figura 3** Incidencia de los rayos solares sobre la Tierra en el solsticio de invierno (23 de diciembre)

- *Nutación.* A lo largo del año la posición del eje de giro oscila ligeramente alrededor de su posición media.

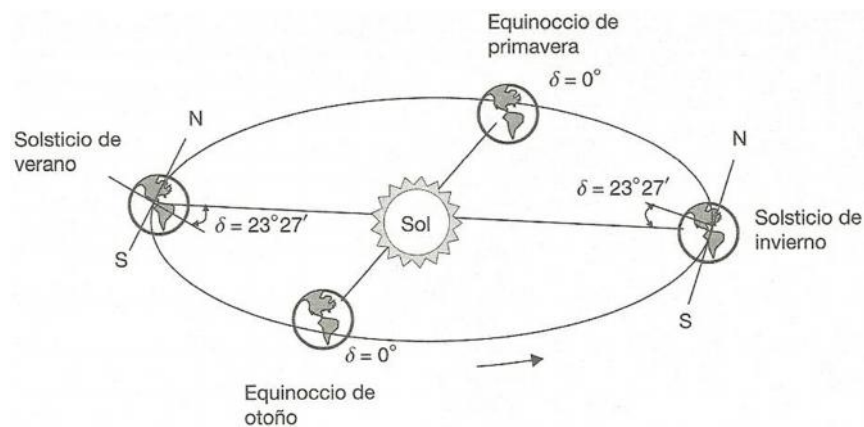
El ángulo que forma el plano del ecuador terrestre con la dirección en que se encuentra el sol se llama declinación y varía a lo largo del año (ver Figura 3), siendo nulo en los equinoccios, máximo en el solsticio de verano y

mínimo en el solsticio de invierno; su valor para un día cualquiera del año puede calcularse mediante ecuaciones ajustadas a los datos experimentales una ecuación muy aproximada es la dada por Lokmanhekim.

$$\begin{aligned} &= 0,302 - 22,93 \cos x - 0,229 \cos 2x - 0,243 \cos 3x \\ &+ 3,851 \sin x + 0,002 \sin 2x - 0,055 \sin 3x \end{aligned} \quad (2.1)$$

donde  $\delta$  es la declinación en radianes y

$$x = \frac{2\pi z}{365} \quad (2.2)$$



**Figura 4** Variación del ángulo de declinación a lo largo del año

Otra ecuación no tan aproximada pero mucho más sencilla es la propuesta por Cooper

$$\delta = 23,45 \sin \left( 360 \frac{284 + z}{365} \right) \quad (2.3)$$

donde

$\delta$  es la declinación en grados sexagesimales y

$z$  es el número del día del año (para el 1 de enero  $z = 1$  y para el 31 de diciembre,  $z = 365$ )

A menudo y con la finalidad de simplificar razonablemente los cálculos, se utiliza un día tipo para cada mes. Este día tipo se define como el día teórico que presentaría un comportamiento medio representativo del mes. Respecto a la declinación se admite, como día tipo, aquel que presenta una radiación diaria extraterrestre más próxima a la media mensual. En la Tabla 2 se indican los días tipo de cada mes y el valor de la declinación:

**Tabla 2 Valores medios de la declinación**

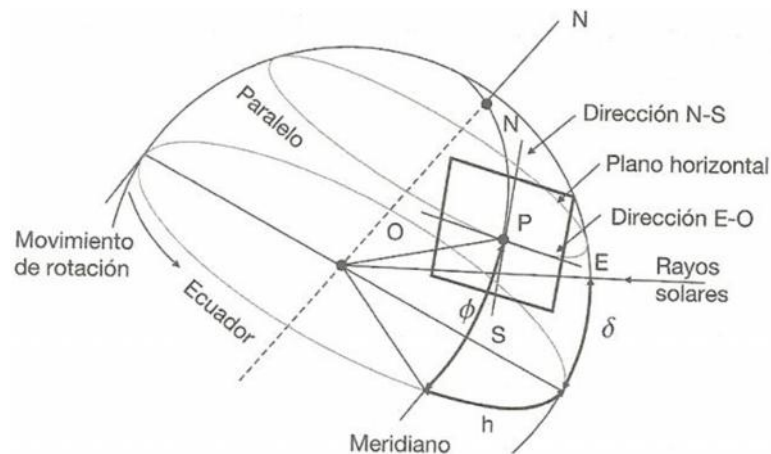
MES	DÍA TIPO	DECLINACIÓN
Enero	17	-20,7
Febrero	15	-12,6
Marzo	16	-1,7
Abril	15	18,9
Mayo	15	9,8
Junio	10	23,0
Julio	17	21,2
Agosto	17	13,4
Septiembre	16	2,6
Octubre	16	-8,9
Noviembre	15	-18,5
Diciembre	11	-23,0

**Fuente:** Coronas, Ll. y Villarubia, M. Universitat de Barcelona, 1982

### 2.1.2 POSICIÓN DEL SOL: COORDENADAS HORARIAS

Un método para indicar la posición del sol, respecto de un punto situado sobre la superficie terrestre, se basa en utilizar las coordenadas horarias (ver Figura 5).





**Figura 5** Latitud ( $\phi$ ) y ángulo horario ( $h$ ) para un punto P situado sobre la superficie de la Tierra

La posición del sol se determina mediante tres ángulos:

- *Declinación* ( $\delta$ ). Es el ángulo que forma el plano del ecuador terrestre con la dirección en que se encuentra el sol se llama declinación y varía a lo largo del año.
- *Latitud* ( $\phi$ ). Es el ángulo comprendido entre el paralelo del lugar y el ecuador, tomándose como positivo para el hemisferio norte y negativo para el hemisferio sur.
- *Ángulo horario* ( $h$ ). Es el ángulo comprendido entre el plano meridiano que pasa por el punto considerado y el plano meridiano que pasa por el sol. Recibe el nombre de horario, precisamente porque su valor depende de la hora del día; cuando el sol pasa por el punto más alto de su trayectoria (medio día solar), el ángulo horario es nulo, antes

será negativo y después, positivo. Teniendo en cuenta que una circunferencia completa tiene  $360^\circ$  y que un día completo tiene 24 horas, a cada hora le corresponderá un ángulo de  $15^\circ$  y el ángulo horario vendrá dado por

$$h = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (2.4)$$

donde  $h$  es el ángulo horario expresado en grados y

TSV es el tiempo solar verdadero expresado en horas

La duración del día solar es el tiempo que tarda el sol en pasar, dos veces consecutivas, por el mismo meridiano terrestre, y el tiempo solar verdadero es la hora que indicaría un reloj hipotético que repartiera la duración del día solar en veinticuatro horas. La duración de estas horas solares variaría a lo largo del año, ya que la duración del día también lo hace.

Si la velocidad de rotación de la Tierra fuera uniforme a lo largo del año, todos los días del año durarían 24 horas de reloj convencional de marcha uniforme, pero como esto no es cierto, no puede utilizarse un reloj normal para conocer el TSV.

Para solventar esta dificultad, se ha definido un tiempo solar medio TSM, que es un tiempo ficticio, que deriva de suponer la Tierra como una esfera que se mueve con una velocidad de rotación constante a lo largo de todo el

año. La diferencia entre ambos tiempos se conoce como ecuación del tiempo.

$$ET = TSV - TSM \quad (2.5)$$

El valor de la ecuación de tiempo, para un día determinado, se calcula utilizando expresiones aproximadas, como la debida a Whillier

$$ET = 9,87 \sin 2B - 7,53 \cos B - 1,5 \sin B \quad (2.6)$$

donde ET es la ecuación de tiempo en minutos y

$$B = \frac{360}{364} (z - 81) \text{ en grados sexagesimales} \quad (2.7)$$

Con la finalidad de ahorrar cálculos innecesarios, en la Tabla 3 se dan valores medios de la ecuación del tiempo, en función del mes y del período deseado.

**Tabla 3 Valores medios de la ecuación del tiempo.**

<b>Valor Medio</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1a decena	-5	-14	-12	-3	3	2	-4	-6	1	11	16	10
2a decena	-9	-14	-9	0	4	0	-6	-4	5	14	15	5
3a decena	-12	-13	-6	2	3	-2	-6	-2	8	16	13	0
Mensual	-10	-14	-9	-1	3	0	-5	-4	5	14	15	5

**Fuente:** Coronas, LI. y Villarubia, M. Universitat de Barcelona, 1982

El tiempo solar medio, que se conoce como tiempo civil TC, viene asociado al meridiano que pasa por el punto considerado. El tiempo civil para el meridiano de Greenwich se conoce como tiempo universal TU.

Como la utilización el tiempo civil, en la vida corriente, no es operativo (cada longitud tiene su propio tiempo civil), se ha adoptado la solución de dividir al globo terráqueo en zonas llamadas husos horarios y se conviene en que el tiempo civil sea el mismo para todos los puntos situados dentro de una de estas zonas.

Como la tierra emplea 24 horas diarias en realizar un giro completo de  $360^\circ$ , el globo terráqueo se ha dividido en 24 husos horarios, siguiendo los meridianos; cada huso horario tiene una amplitud de  $15^\circ$  ( $15 \times 24 = 360$ ) y un meridiano central; así por ejemplo, el huso horario correspondiente al meridiano 0 abarca desde la longitud  $7,5^\circ$  Este hasta la longitud  $7,5^\circ$  Oeste.

Aproximadamente a las 12 del TC, el sol pasa por el meridiano central del uso horario.

Por razones prácticas, cada país se acoge al uso horario que mejor se acomoda a su posición geográfica y si el país es muy extenso, como por ejemplo Rusia, se escogen distintos husos horarios.

Debido a que el TSV depende de la longitud concreta y que el TC se adapta al uso horario, debe tenerse en cuenta la diferencia de longitud entre el meridiano de referencia y el que pasa por el punto considerado.

También deberá tenerse en cuenta que, en muchos países, la hora oficial HO no coincide con la civil correspondiente al huso elegido, puesto que el reloj se adelanta o atrasa en función de la época del año, por motivos de ahorro energético.

En definitiva, el tiempo solar verdadero se calculará según la expresión:

$$TSV = HO - e + ET + \frac{1}{15}(\lambda_m - \lambda) \quad (2.8)$$

donde TSV es el tiempo solar verdadero,

HO es la hora oficial del país,

e es el adelanto respecto de la hora civil,

$\lambda_m$  es la longitud del meridiano medio del huso horario adoptado y

$\lambda$  es la longitud del meridiano que pasa por punto estudiado.

### 2.1.3 POSICIÓN DEL SOL: COORDENADAS ANGULARES

En el subcapítulo anterior, se ha expuesto una forma de situar la posición del sol, basada en las coordenadas horarias; también existe otro sistema más útil para indicar su posición, que se conoce como coordenadas angulares. En este sistema (ver Figura 6) se toma como referencia el plano del horizonte, que es el plano tangente a la superficie de la tierra en el punto considerado, en lugar del plano ecuatorial, y se sitúa el sol mediante dos ángulos:

- Azimut ( $A$ ). Es el ángulo comprendido entre la dirección sur y la dirección de la proyección del sol sobre el plano horizontal. El origen de ángulos, se sitúa en la dirección sur y se consideran positivos los medidos hacia el oeste y negativos los medidos hacia el este.
- *Altitud* ( $h$ ). Es el ángulo comprendido entre la posición del sol y su proyección sobre el plano horizontal. El origen está en el horizonte y se consideran positivos los medidos en sentido ascendente.

Algunas veces se utiliza el ángulo cenital, que es el comprendido entre la posición del Sol y la perpendicular al plano horizontal en el punto considerado.

$$Z = 90 - h \quad (2.9)$$

donde  $Z$  es el ángulo cenital.

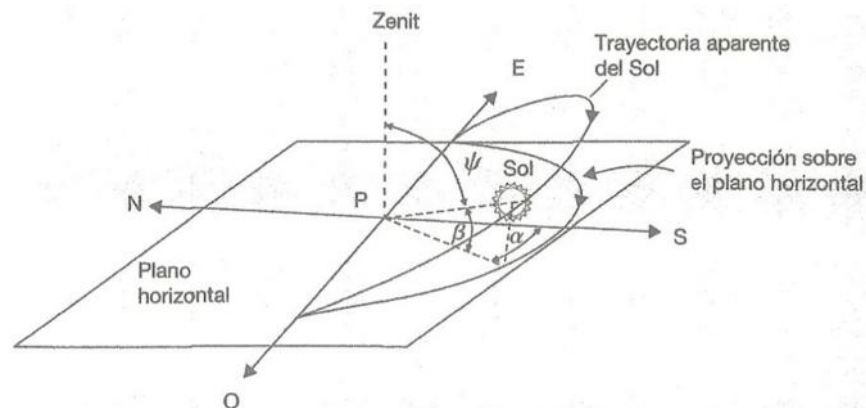
Las coordenadas angulares, para latitudes superiores a la del trópico se relacionan con las horarias mediante las expresiones siguientes:

$$\cos \beta = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos h \quad (2.10)$$

$$\cos \alpha = \frac{1}{\cos \beta} (\sin \phi \cos \delta \cos h - \cos \phi \sin \delta) \quad (2.11)$$

o bien

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \beta} \quad (2.12)$$



**Figura 6** Posición del sol respecto de una superficie inclinada

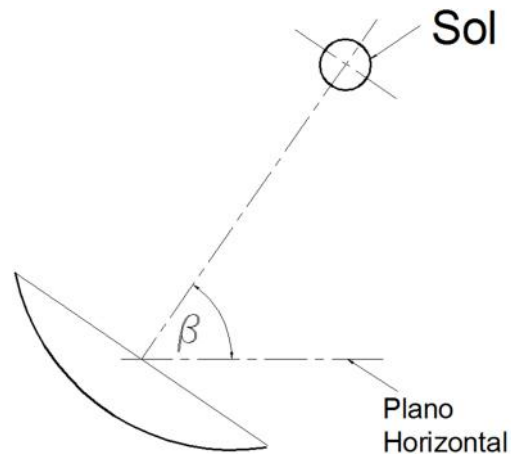
Para el caso de Quito el ángulo de latitud ( ) es cero y la ecuación 2.10 se transforma en:

$$\sin \theta = \cos \delta \cos h \quad (2.13)$$

Lo cual indica que para esta latitud el seguimiento de la trayectoria del sol debe tomar en consideración el ángulo de declinación ( ) y el ángulo horario ( $h$ ).

Para el aprovechamiento de la energía solar por el colector cilíndrico parabólico es importante mantener al colector encarado permanentemente al sol como se indica en la Figura 7.

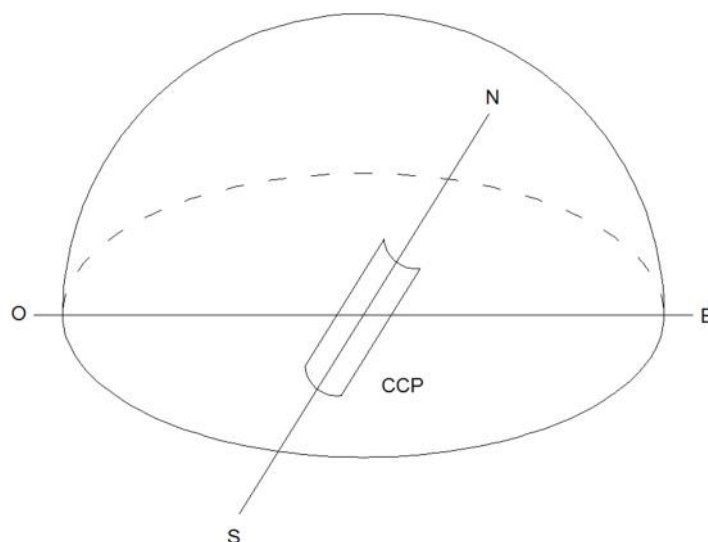
En forma práctica, para esta latitud es conveniente orientar al Colector Cilíndrico Parabólico en un plano horizontal con el eje axial orientado en la dirección Norte – Sur. Esta orientación permite seguir la trayectoria del Sol en forma horaria en el transcurso del día con un mecanismo que gire al Colector Cilíndrico Parabólico alrededor de su foco.



**Figura 7** Orientación ideal del Colector Cilíndrico Parabólico respecto al Sol

Sin embargo se puede considerar también la variación del ángulo de declinación en el transcurso del año, variación que puede conseguirse con un mecanismo de giro alrededor del eje Este – Oeste, según la Figura 8

Desde el punto de vista práctico la orientación Este – Oeste del foco representaría mecanismos más complejos para seguir la trayectoria del Sol, por lo cual en el presente trabajo se optará por la orientación anterior.



**Figura 8** Orientación Norte – Sur del Colector Cilíndrico Parabólico a lo largo de su eje



Para un punto determinado y para un día concreto (se conoce su latitud y declinación ) podrá calcularse la hora de puesta de sol, ya que en este instante su altitud es nula ( $=0^\circ$ ). A partir de las fórmulas anteriores podemos calcular el ángulo horario de puesta de sol y el azimut correspondiente

$$\cos h_s = - \tan \phi \tan \delta \quad (2.14)$$

$$\sin \alpha_s = \cos \phi \sin h_s \quad (2.15)$$

En consecuencia, la duración del día, horas de Sol si no hay nubes, podrá calcularse mediante la expresión

$$t_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(- \tan \phi \tan \delta) \quad (2.16)$$

#### 2.1.4 RADIACIÓN SOLAR EXTRATERRESTRE

La energía radiante por unidad de tiempo que incide sobre una superficie unidad en un momento dado se conoce como Irradiancia.

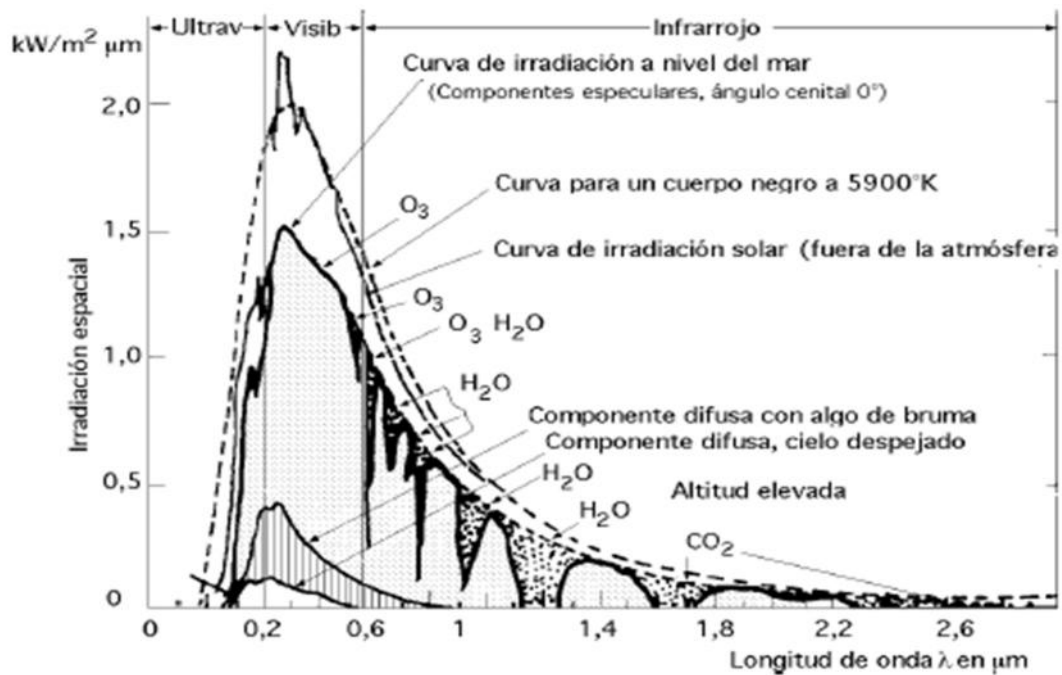
La irradiancia recibida por una superficie situada a la distancia media Sol – Tierra y fuera de la atmósfera se conoce como constante solar ( $I_{sc}$ ). Su valor se ha determinado a partir de datos experimentales, obtenidos de satélites artificiales y se acepta que es

$$\begin{aligned} I_{sc} &= 1353 \text{ W/m}^2 \\ &= 1.94 \text{ cal}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min}) \\ &= 428 \text{ Btu}/(\text{h} \cdot \text{pie}^2) \end{aligned}$$

En la Figura 9 se ha representado el espectro de la radiación solar extraterrestre, propuesta por la NASA, superpuesto al teórico (línea punteada) correspondiente a un cuerpo negro a la temperatura de 5900 °K y el espectro medio de la radiación a nivel del mar bajo la atmósfera. De su observación cabe destacar los siguientes hechos:

- Prácticamente toda la energía recibida, un 97,8% del total, está comprendida entre los 0,2 y 3  $\mu\text{m}$  de longitud de onda.
- Su distribución espectral es aproximadamente la siguiente: ultravioleta, 9%; región de luz visible, 40% e infrarrojo, 51%.
- Cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, una fracción considerable es absorbida y partículas de la misma, de tal manera, que la radiación que llega a nivel del mar es francamente menor que la extraterrestre. Cada molécula tiene un espectro de absorción característico y la cantidad de radiación recibida depende de la cantidad de moléculas que dicha radiación encuentra a su paso. Si las bandas de absorción se sitúan dentro del campo de la radiación térmica, este comportamiento origina el llamado efecto invernadero.

Precisamente en este sentido interviene en gran medida el vapor de agua y el anhídrido carbónico, tanto por la posición de sus bandas de absorción como por su abundancia en la atmósfera.



**Figura 9** Distribución espectral de la radiación solar

La irradiancia extraterrestre, calculada como se indica más arriba, solo es válida para una superficie normal a la radiación; en cualquier otra posición deberá tenerse en cuenta el ángulo de incidencia. Para una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera, la irradiancia horizontal extraterrestre viene dada por (ver Figura 10)

$$I_e = I_{sc} r^2 \cos \theta \quad (2.17)$$

La radiación que incide sobre una superficie unidad a lo largo de un intervalo de tiempo determinado, que se conoce como irradiación, vendrá dada por la integral

$$H = \int_t^{t + \Delta t} I dt \quad (2.18)$$

La irradiación horaria es la radiación recibida durante una hora por unidad de superficie, que para una superficie horizontal extraterrestre, una vez efectuadas las operaciones pertinentes, viene dada por

$$H_{h,e} = r^2 I_{sc} (\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos h_m) \quad (2.19)$$

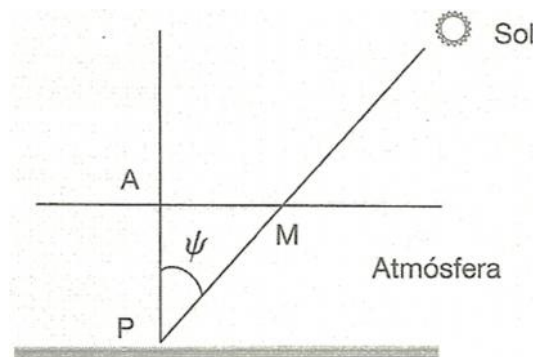
donde  $h_m$  es el ángulo horario del punto central del intervalo horario considerado.

De forma análoga, extendiendo el campo de integración entre la salida y la puesta de Sol, se calcula la irradiación diaria extraterrestre sobre una superficie horizontal.

$$H_e = \frac{24 r^2}{\pi} I_{sc} (h_s \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \sin h_s) \quad (2.20)$$

donde  $h_s$  es el ángulo de la salida del sol, en radianes y en valor absoluto.

Es interesante destacar que estos puntos pueden calcularse para un punto cualquiera, conociendo su posición geográfica, el día y la hora.



**Figura 10** Trayectoria idealizada de un rayo solar al atravesar la atmósfera

### 2.1.5 RADIACIÓN SOLAR TERRESTRE

Cuando la radiación solar penetra en la atmósfera, tiene a lugar un fenómeno de absorción y dispersión, que depende de la masa, el espesor y la densidad de la capa de aire atravesada, y de su composición.

Cada molécula presenta unas bandas de absorción, siendo las del agua y del anhídrido carbónico (ver Figura 9) las que causan un mayor efecto cuantitativo; el ozono actúa en la zona del ultravioleta y cuantitativamente no tiene gran importancia, pero sí la tiene cualitativamente, puesto que el ozono estratosférico crea una barrera frente a esta radiación, que es altamente cancerígena.

Como la cantidad de energía absorbida depende de la masa de aire atravesada por el rayo solar, cuanto más largo sea el camino óptico, mayor será la absorción. Así, la absorción será mínima cuando el sol esté situado en el punto más alto de su trayectoria y máxima a la salida o a la puesta.

Para ángulos no muy alejados de la vertical, la relación entre la altura de la atmósfera y el camino óptico (ver figura 10) puede calcularse en función del ángulo cenital.

$$PM = \frac{PA}{\cos \psi} \quad (2.21)$$

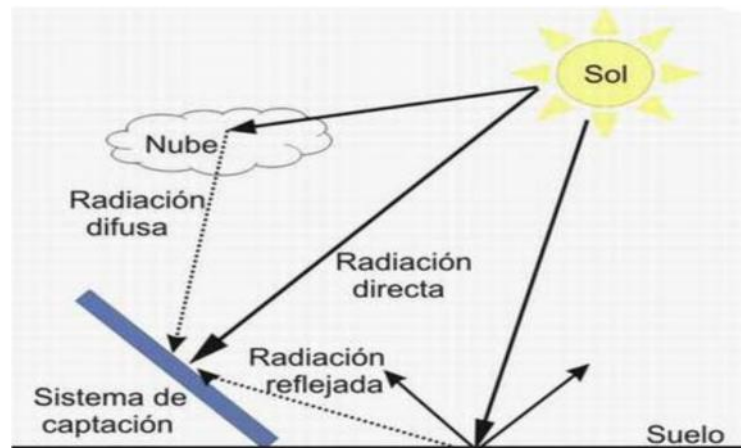
Si el ángulo es menor que 70°, deben tenerse en cuenta la curvatura de la tierra y la refracción del aire.

Para calcular la absorción, debe tenerse presente que la masa del aire que ocupa un volumen determinado depende de su densidad y esta de la presión; en consecuencia, deberá corregirse la masa de aire estándar en función de la presión y además, tener en cuenta tanto la presencia de aerosoles como la turbidez atmosférica.

Sobre una superficie cualquiera, situada en la superficie terrestre, incidirán distintos tipos de energía radiante:

- *Radiación directa.* Aquella que procede del sol e incide sobre la superficie sin cambiar de dirección, excepto la debida a la refracción atmosférica. Es una radiación que proviene de una dirección claramente definida.
- *Radiación difusa.* Aquella parte de radiación solar que, por choques sucesivos con moléculas y partículas contenidas en el aire, se ha difundido al atravesar la atmósfera. Es una radiación que procede de toda la bóveda de cielo visible desde la superficie, no es direccional y puede considerarse que su distribución es casi uniforme para todo el hemisferio celeste.
- *Albedo.* Radiación que llega a la superficie considerada, después de haberse reflejado en las superficies del entorno. Dado que el entorno no es especular, esta radiación, que procede de las dos anteriores, tampoco es claramente direccional.

- *Radiación global.* Es la suma de la directa y de la difusa.
- *Radiación total.* Es la suma de la directa, de la difusa y el albedo.



**Figura 11** Componentes de la radiación solar terrestre

En determinadas circunstancias, el albedo puede ser considerable y deberá tenerse en cuenta en el cálculo la radiación total incidente. En la Tabla 4 se muestran algunos valores del factor de albedo, entendido como la relación entre la energía reflejada y la incidente.

**Tabla 4** Factor de albedo para algunas superficies

Tipo de Superficie	Factor de albedo en %
Nieve nueva	81
Suelo cultivable desnudo	entre 10 y 15
Hierba	entre 19 y 26
Bosque verde	12
Pavimento de cemento	28
Asfalto	14
Arena clara	entre 25 y 40
Agua encalmada	5 en invierno y 18 en verano

**Fuente:** Williams, J. R. Passive solar heating, 1983

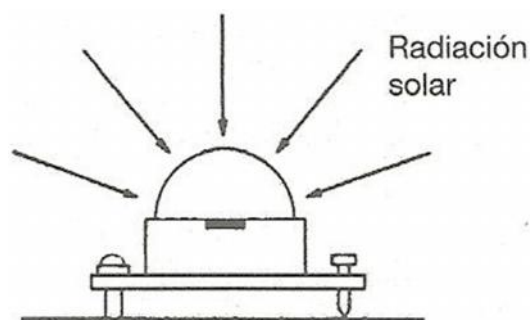
### 2.1.6 MEDICIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR INCIDENTE SOBRE EL SUELO

A continuación se describirán los instrumentos más utilizados en la medición de la radiación solar, su funcionamiento y aplicación.

#### Piranómetro (Solarímetro)

En esencia es un medidor de radiación solar; un sistema de medición muy utilizado que se basa en la idea siguiente: se expone a la radiación solar una lámina metálica con una superficie reflectante y junto a ella otra cuya superficie es absorbente; la lámina absorbente estará más caliente que la reflectante y admitiendo que la diferencia de temperaturas es proporcional a la radiación recibida, midiendo este salto térmico sabremos la radiación. Para medir esta diferencia de temperaturas se utiliza un termopar.

Un piranómetro consta de un sensor análogo y colocado bajo una cubierta semiesférica, normalmente de cristal de cuarzo, que debe ser transparente para cualquier longitud de onda (ver Figura 12).



**Figura 12** Representación esquemática de un piranómetro de radiación total



Si el piranómetro se instala sobre la superficie considerada, su lectura nos proporciona la radiación total incidente. Si se sitúa sobre una superficie horizontal y se tiene la precaución de eliminar las reflexiones del entorno, medirá la radiación global. Si se cubre con un pequeño disco opaco de tal manera que elimine la radiación directa medirá solamente la radiación difusa.

Existen algunos equipos formados por dos piranómetros, acoplados de tal manera que uno está orientado hacia arriba, en dirección al sol, y el otro, en sentido opuesto. El orientado hacia arriba mide la radiación total, el orientado hacia abajo, el albedo y la diferencia entre ambos, la radiación global.

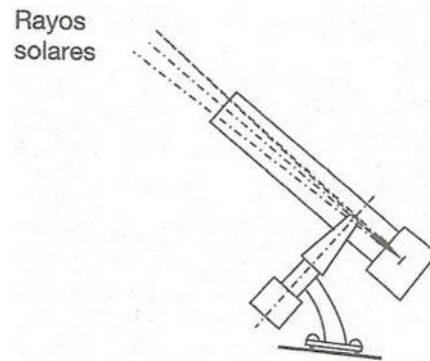
Este tipo de piranómetro, basado en la medición por diferencia de temperatura y termopar, se conoce como piranómetro tipo Eply o Moll-Goroczynski.

También existen otros tipos, unos basados en la dilatación diferencial de una lámina bimetálica y otros basados en la señal proporcionada por una célula fotoeléctrica expuesta a la luz.

### **Pirheliómetro (Actinómetro)**

Es un instrumento destinado a medir solamente la radiación solar directa; en esencia es un piranómetro que se ha situado en el fondo de un tubo (ver Figura 13). Este tubo está recubierto interiormente con una pintura absorbente, a fin de reducir al mínimo cualquier reflexión y es lo

suficientemente estrecho y largo como para que, desde el fondo, se vea el sol y la menor porción posible de cielo.



**Figura 13** Representación esquemática de un pirheliómetro

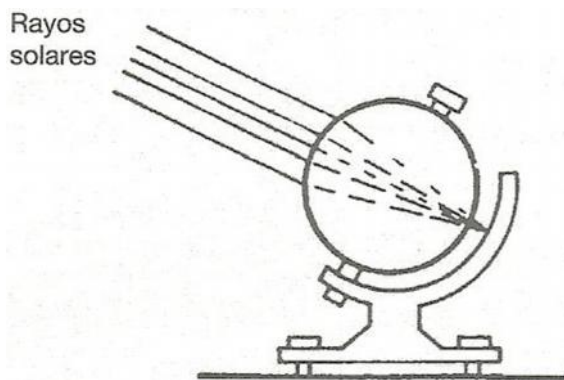
Un instrumento de este tipo solo proporciona medidas correctas cuando está enfocado directamente al sol; en consecuencia, cuando se desea disponer de una lectura continua a lo largo del día, el equipo consta del instrumento medidor más un sistema del seguimiento del sol.

### Heliógrafo

Este instrumento se utiliza para medir la insolación, que es el número de horas de sol brillante que se produce a lo largo del día.

Existen distintos modelos, pero el más utilizado es el de Campbell-Stokes o de bola que, en esencia (ver Figura 14), consiste en una bola de cristal transparente interpuesta entre el sol y una banda semicircular de papel sensible a la luz. Si la bola esférica concentra la luz sobre la banda de papel y deja una marca, cuya intensidad, es cualitativamente proporcional a la intensidad de la radiación solar. Esta marca se mueve sobre el papel a

medida que el sol recorre su camino de este a oeste; cuando el sol se oculta tras las nubes, la intensidad de la radiación que llega al papel es débil y no deja señal alguna. Sobre estas tiras de papel se marcan las horas, y midiendo la longitud de la huella dejada por el sol se calcula la insolación.



**Figura 14** Representación esquemática de un heliógrafo de Campbell-Stockes

Normalmente se acepta como insolación aquel tiempo durante el cual la irradiancia solar directa es igual o mayor que  $100 \text{ W/m}^2$ .

El cociente entre las horas de insolación y la duración del día, calculada como se calculaba anteriormente se conoce como coeficiente de insolación.

$$\sigma' = \frac{n}{N} \quad ( 2.22 )$$

donde  $n$  son las horas de insolación y

$N$  es la duración del día desde la salida hasta la puesta del sol.

### 2.1.7 ESTIMACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR GLOBAL INCIDENTE SOBRE EL SUELO

Según Page, puede establecerse una relación sencilla entre la insolación y la radiación solar, válida para una superficie horizontal, que es del tipo

$$H_o = H_e (a + b \quad ') \quad (2.23)$$

donde

$H_o$  es la irradiación global diaria, media mensual, sobre una superficie situada bajo la atmósfera,

$H_e$  es la irradiación solar diaria, media mensual, extraterrestre y

$a$  y  $b$  dependen del tipo de clima (ver Tabla 5)

La determinación de los coeficientes  $a$  y  $b$  se lo realiza en base a experimentación, los valores determinados para el territorio ecuatoriano constan en la Tabla 5.

**Tabla 5 Valores de las constantes  $a$  y  $b$**

Región	$a$	$b$
Sierra	0.25	0.45
Costa	0.28	0.54

Fuente: INAMHI

Según los estudios realizados a esta relación, la misma presenta cierta validez:

**Tabla 6 Validez de los valores a y b.**

Validez (%)	Latitud (°)
95	$-2 < L < 2$
90	$-4 < L < 4$

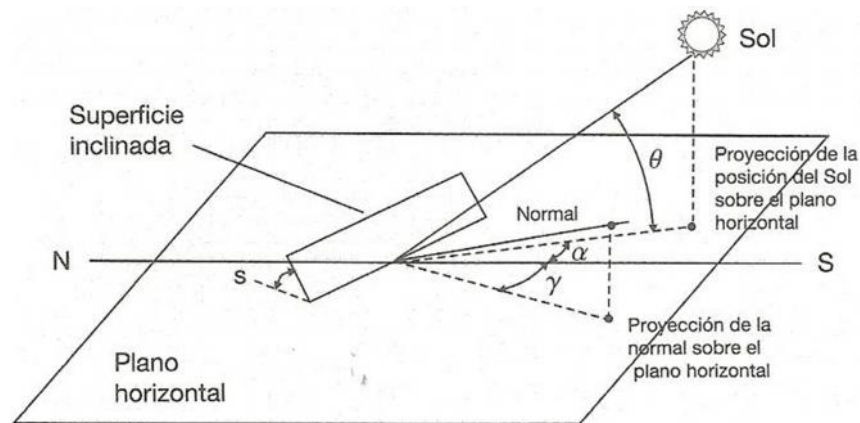
**Fuente:** Apuntes de clase de energías no convencionales

### 2.1.8 CÁLCULO DEL ÁNGULO DE INCIDENCIA SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA CUALQUIERA

La radiación incidente sobre una superficie depende del ángulo de incidencia, por lo tanto, es necesario conocer las ecuaciones que permitan calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre una superficie cualquiera y situada en un punto cualquiera de la superficie terrestre.

La posición de una superficie inclinada se identifica mediante dos ángulos (ver Figura 15)

- *Azimut ( $\gamma$ )*. Define la orientación de la superficie y se define como el ángulo comprendido entre la proyección de la normal sobre el plano horizontal y la dirección sur. Para una superficie orientada hacia el sur, su azimut será 0, el valor del ángulo se considera negativo hacia el este y positivo hacia el oeste.
- *Inclinación ( $s$ )*. Es el ángulo formado por la superficie considerada y el plano horizontal.



**Figura 15** Trayectoria aparente del Sol respecto de un punto P de la superficie terrestre

El ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre la superficie considerada viene definido por la normal a la superficie y la posición del sol y se calcula como:

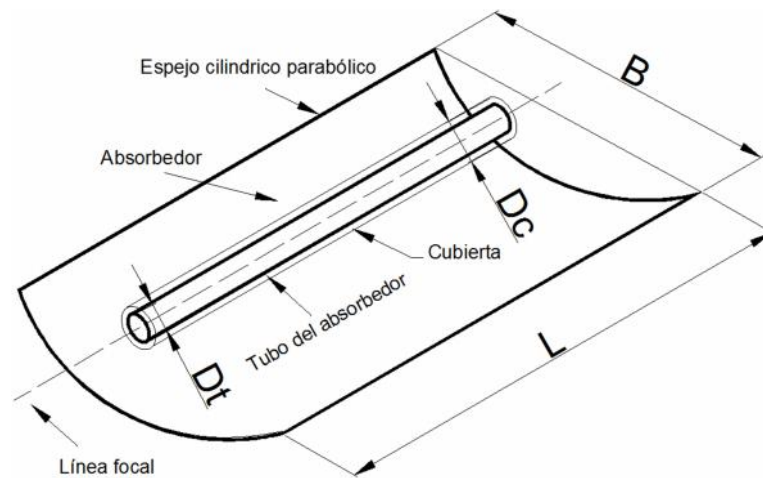
$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi \cos \alpha - \sin \delta \cos \phi \sin \alpha \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \alpha \sin \gamma \sin h + \cos \delta \sin \phi \sin \alpha \cos \gamma \cos h + \cos \delta \sin \phi \sin \alpha \sin \gamma \sin h \quad (2.24)$$

Para una superficie cierta situada en el hemisferio norte, respecto a la captación de la radiación solar, la orientación sur es la más favorable y es la que suele adoptarse para los colectores solares fijos. Evidentemente, si la superficie está ubicada en el hemisferio sur, la orientación más favorable será la norte.

## 2.2 COLECTORES CILÍNDRICO PARABÓLICOS (CCP)

Uno de los temas más desarrollados en la actualidad es el colector cilíndrico parabólico (CCP), éste está compuesto básicamente por un espejo cilindro parabólico que refleja la radiación solar directa concentrándola sobre un tubo receptor colocado en la línea focal de la parábola.

La radiación solar concentrada produce el calentamiento del fluido que circula por el interior del tubo receptor. Los CCP son, pues, colectores solares de concentración con foco lineal, que pueden operar eficientemente hasta temperaturas del orden de 450 °C.



**Figura 16** Partes de un colector cilíndrico parabólico.

Las partes principales de un CCP generalizado son:

- Espejo reflectante con un perfil transversal parabólico
- Elemento receptor formado por la cubierta transparente y superficie absorbente
- El Seguimiento Solar

**El Espejo Reflectante:** Su misión es la de reflejar y concentrar sobre el Receptor la radiación solar directa incidente sobre la superficie. A grandes rasgos es un espejo curvo que forma en una de sus dimensiones una parábola, de forma que concentra sobre su línea focal toda la radiación reflejada. Entre los materiales usados para la reflexión, encontramos plásticos recubiertos con películas de plata o aluminio, chapas metálicas, o el más usado: vidrios sobre los que se depositan una capa de plata junto con un protector de base de cobre y pintura epoxi.

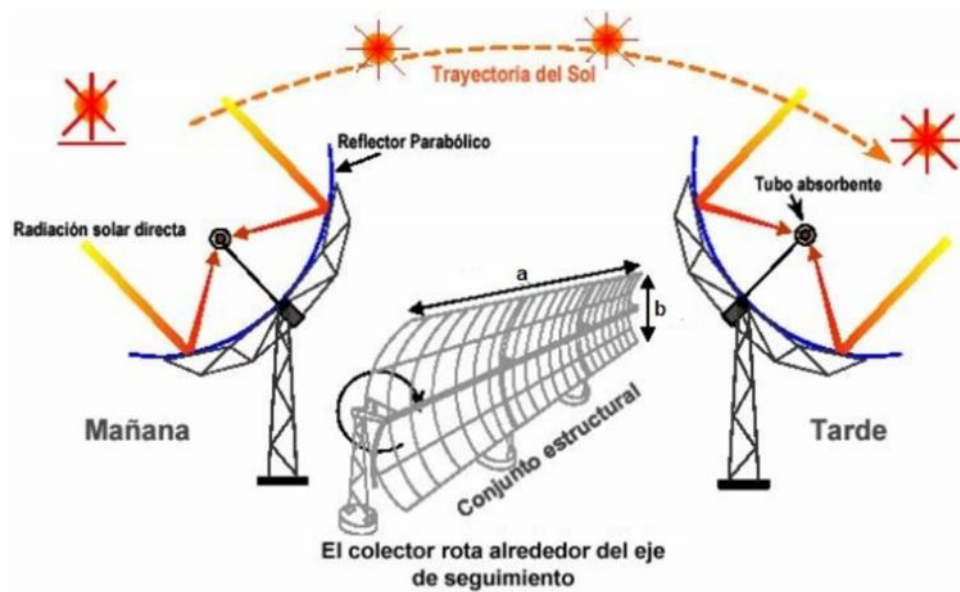
**El Elemento Receptor:** Es un elemento fundamental en un CCP, pues el rendimiento global del colector depende en gran parte de la calidad termodinámica del absorbente. Puede constar de un solo tubo o de dos tubos concéntricos. En este último caso, el tubo interior es metálico de elevada absorvidad ( $>90\%$ ) y de baja emisividad ( $<30\%$ ) en el espectro infrarrojo, lo que se traduce en un elevado rendimiento térmico. Por otro lado, el tubo exterior es de cristal y tiene el objetivo de reducir las pérdidas térmicas por convección del tubo metálico, así como de protegerlo frente a las condiciones meteorológicas adversas.

Ambos tubos suelen llevar un tratamiento para aumentar la transmisividad de la radiación solar, lo que causa un aumento del rendimiento óptico del colector.



**El Sistema de Seguimiento Solar:** El seguimiento del Sol se hace con el objetivo de aprovechar la mayor parte de horas posibles de luz, de forma que la radiación solar llegue lo más perpendicularmente posible al colector y se mantengan en el foco lineal continuamente. Los CCP s pueden tener seguimiento a dos ejes o a un único eje.

Normalmente el seguimiento se realiza a un eje pues mecánicamente es más sencillo, esto implica menos costos y menores pérdidas térmicas por no haber tuberías pasivas. La orientación puede ser Norte-Sur o Este-Oeste. Los mecanismos de accionamiento que mueven al colector pueden ser eléctricos (apropiado para equipos pequeños), hidráulicos (para lazos de colectores) y mecánicos (reloj de pesas...)



**Figura 17** Esquema del seguimiento solar a un eje de un CCP

Este tipo de colectores tienen una eficiencia termodinámica muy buena en comparación con otros, y es por ello por lo que se usan en algunos

procesos industriales como en la producción de acetona, el procesado de residuos, en la industria láctea, así como en la producción de electricidad, donde existe gran madurez en investigación.

Aun así, una de las mayores desventajas de este diseño de colector es que sólo hace uso de la radiación directa, siendo incapaz de captar la radiación difusa. Por culpa de ello los costes se incrementan, pues es necesario un instalar un sistema de seguimiento solar que necesita un aporte secundario de energía.

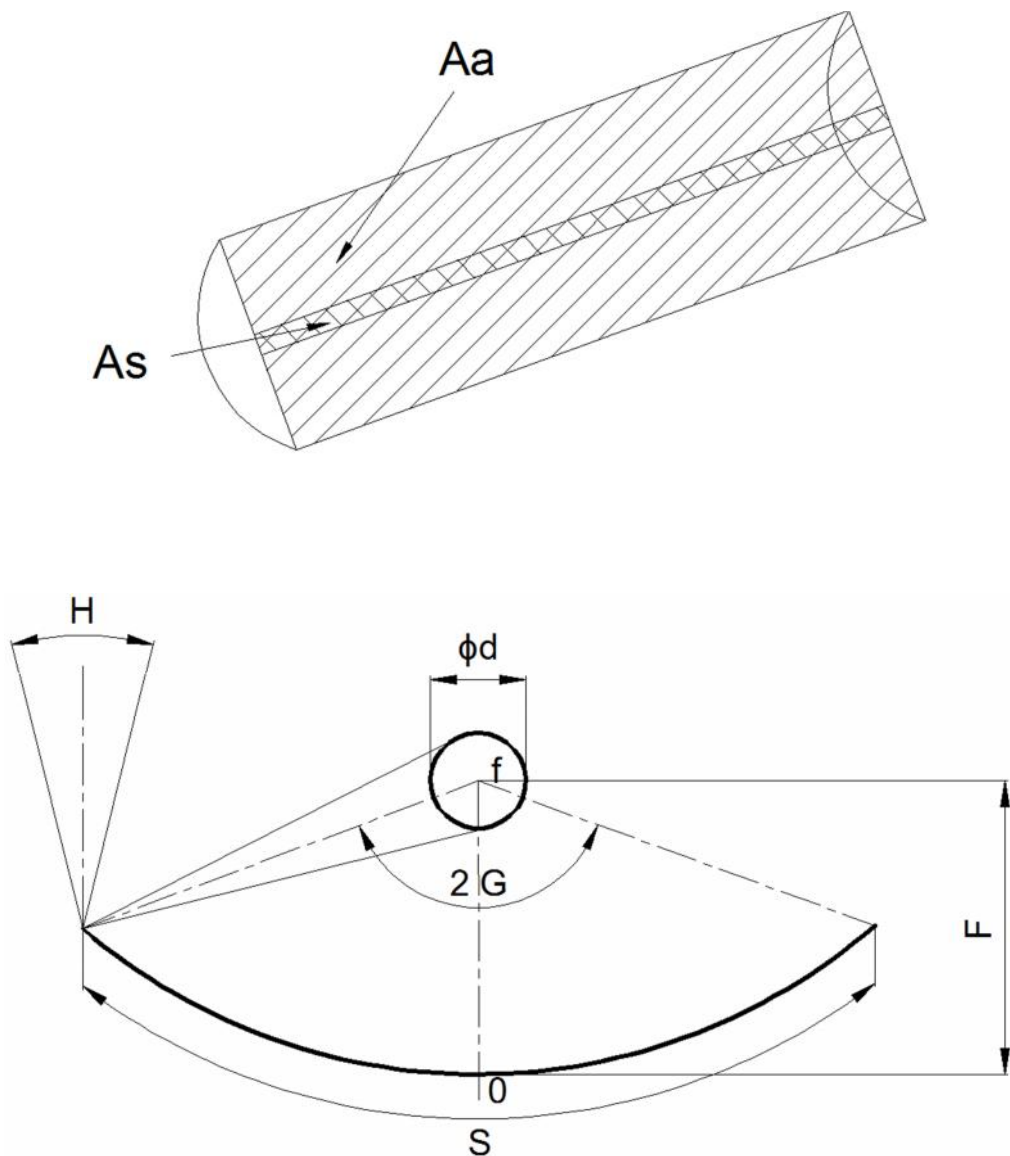
## **2.3 PROPIEDADES GENERALES DE LOS CCP**

### **2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS CCP**

Los colectores cilíndricos parabólicos son sistemas ópticos que concentran la intensidad de radiación sobre una superficie absorbente. Este tipo de sistemas son usualmente utilizados para la obtención de temperaturas relativamente altas (alrededor de 200 °C), en forma económica. Los CCP aprovechan principalmente la radiación del sol, por lo que exigen una orientación permanente y precisa respecto al sol durante el día y el transcurso del año.

La eficiencia de los CCP está relacionada directamente con la precisión de construcción de perfil parabólico, localización exacta del foco, propiedades de radiación de la superficie reflectante y del elemento receptor.

Diferentes configuraciones geométricas de colectores parabólicos han sido desarrolladas para obtener temperaturas alrededor de 200 °C a partir de la concentración de la energía solar, de acuerdo a esto, el CCP es el más simple y económico; de ahí que el estudio será orientado hacia este tipo de colector.



**Figura 18** Área Efectiva - Características Generales de los CCP

El comportamiento del CCP está relacionado con diversos parámetros que permiten hacer un dimensionamiento adecuado de sus partes constitutivas, para esto es necesario notar algunas definiciones fundamentales:

### **Área efectiva, $A_e$**

Es el área de apertura  $A_a$  menos el área de sombra  $A_s$  ocasionada por el elemento receptor, véase la Figura 18 a).

### **Área de la superficie absorbente, $A_b$**

Es el área sobre la cual incide la radiación solar concentrada; en forma ideal y considerándose una superficie absorbente de sección circular puede expresarse:

$$A_b = dL_o \quad ( 2.25 )$$

donde:

$d$  = diámetro de la sección circular de la superficie absorbente

$L_o$  = longitud del CCP

### **Relación de concentración, $c$**

Está definida como la relación del área efectiva  $A_e$  del colector al área de la superficie absorbente  $A_b$ .

**Ángulo central,  $2G$** 

Es el ángulo que subtiende el arco del perfil parabólico y con vértice  $f$ .

**Ángulo de aceptación,  $H$** 

Es el máximo ángulo que pueden formar dos rayos en un plano transversal a la apertura del colector, de forma que ambos rayos reflejados intercepten al tubo receptor en su reflexión.

**Distancia focal,  $F$** 

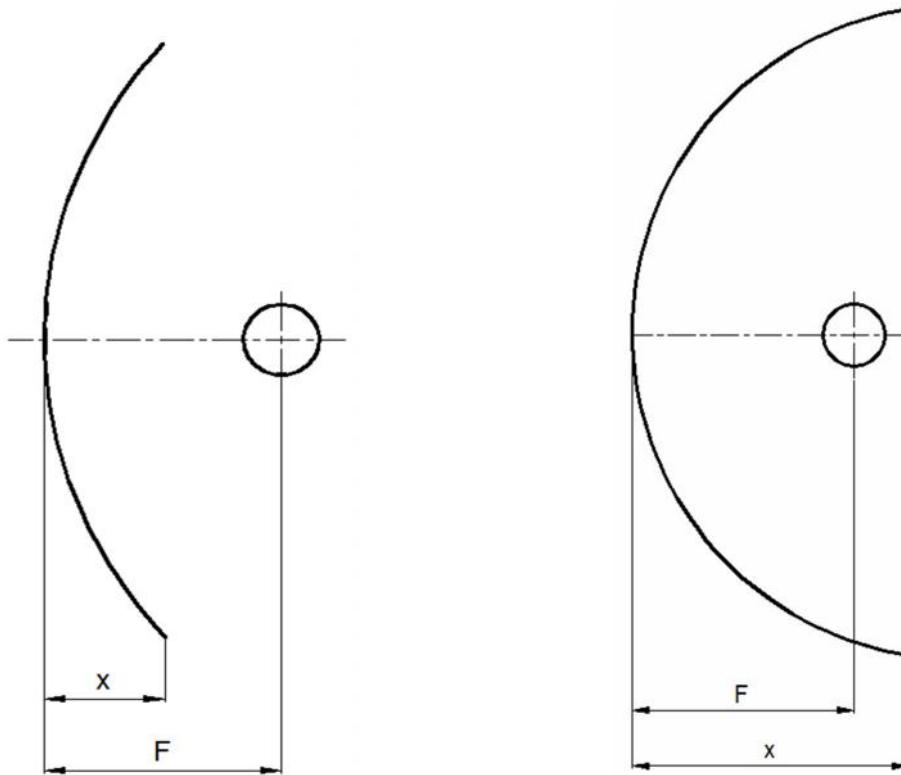
Es la distancia entre el foco  $f$  y el vértice  $0$  de la parábola.

**Tiempo de alineamiento,  $T_a$** 

Es el intervalo de tiempo en el cual el CCP puede estar estático sin que los rayos reflejados se desvíen sustancialmente de la superficie absorbente.

**2.3.2 DISTANCIA FOCAL**

Según la distancia focal los CCP pueden ser de distancia focal corta o de distancia focal larga. Los colectores parabólicos de distancia focal larga son aquellos en que la relación  $x/F < 1$ , mientras en los de distancia focal corta la relación es  $x/F \geq 1$ .



**Figura 19** Colectores Parabólicos de distancia focal larga y corta

Los colectores parabólicos de distancia focal larga exigen mayor precisión en la construcción y en el seguimiento de los colectores de distancia focal corta.

Suponiendo que el foco sea circular y refiriéndose a la Figura 19, nótese que:

$$R/F = \text{sen}(H/2) \quad ( 2.26 )$$

Para pequeños valores de  $H$ ,  $\text{sen}(H/2) \approx H/2$ , entonces:

$$R/F \approx \text{sen}(H/2) \quad ( 2.27 )$$

donde:

$$H = 2R/F \quad ( 2.28 )$$

La ecuación 2.28 indica que al aumentar la distancia focal F el ángulo de aceptación disminuye, consecuentemente el CCP exige mayor precisión en el seguimiento al sol.

Es necesario recalcar que si bien los colectores parabólicos y de distancia focal corta requieren menor precisión en la construcción y en el seguimiento necesitan mayor área de la superficie reflectante, lo que incide en mayor costo de la unidad.

La distancia focal en función de la longitud de la curvatura parabólica de la superficie reflectante y del ángulo central 2G está dado por:

$$F = 2S / (\sec G/2 \tan G/2 + \ln (\sec G/2 + \tan G/2)) \quad ( 2.29 )$$

## 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.

Según la definición para cualquier punto M de la parábola se tiene:

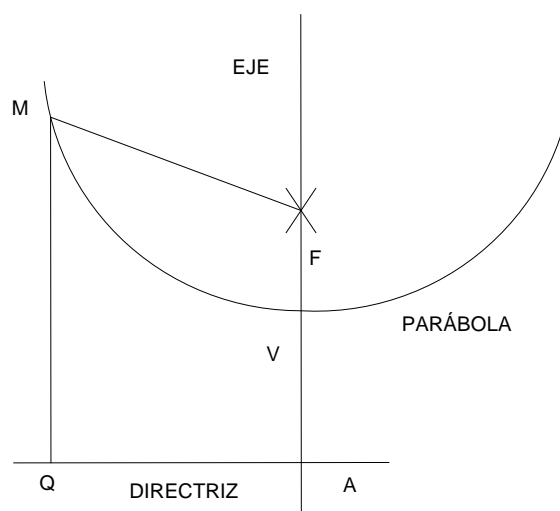
$$\overline{FM} = \overline{MQ} \quad (2.30)$$

En particular, para el vértice V resulta:

$$\overline{AV} = \overline{VF} \quad (2.31)$$

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 figura 20



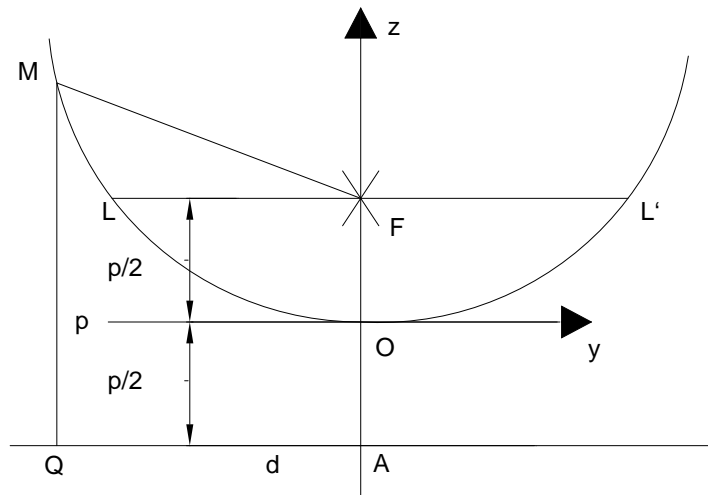
**Figura 20** Elementos de la parábola



### Ecuación de la parábola

Para llegar a la ecuación, se anexa a la figura 20 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 figura 21.



**Figura 21** Geometría de la parábola

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  $\overline{FA}$ .

$\overline{OA} = \overline{OF} = \frac{p}{2}$ ; 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.

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

La distancia entre los puntos F y M es:

$$\sqrt{y^2 + \left(z - \frac{p}{2}\right)^2} \quad (2.32)$$

$$\overline{MQ} = z + \frac{p}{2} \quad (2.33)$$

Igualando, se tiene:

$$\sqrt{y^2 + \left(z - \frac{p}{2}\right)^2} = z + \frac{p}{2} \quad (2.34)$$

Elevando al cuadrado ambos miembros:

$$y^2 + \left(z - \frac{p}{2}\right)^2 = \left(z + \frac{p}{2}\right)^2$$

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

$$y^2 = 2pz \quad (2.35)$$

La ecuación 2.35 es la ecuación de la parábola referida a su eje de simetría como eje z y a la tangente en el vértice como eje de las abscisas.

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

También:  $p = 2F$  ( 2.36 )

Entonces:

$$y^2 = 4Fz \quad ( 2.37 )$$

Dada una parábola de boca B y distancia focal F véase figura 22. Se tiene las siguientes ecuaciones:

$$y^2 = 4Fz \quad ( 2.38 )$$

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

Como:

$$z = \frac{y^2}{4F} \quad \text{En la boca de la parábola es:} \quad y = \frac{B}{2}$$

$$\therefore c = \frac{B^2}{16F} \quad \text{o, también} \quad c = \frac{B}{16 \left( \frac{F}{B} \right)} \quad ( 2.39 )$$

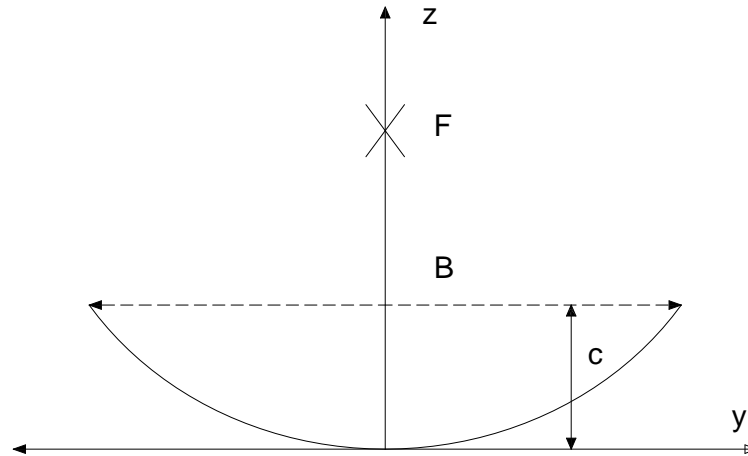
En donde:

B = Boca de la parábola

F = Distancia focal

c = Profundidad de la parábola en el centro

Véase figura 22



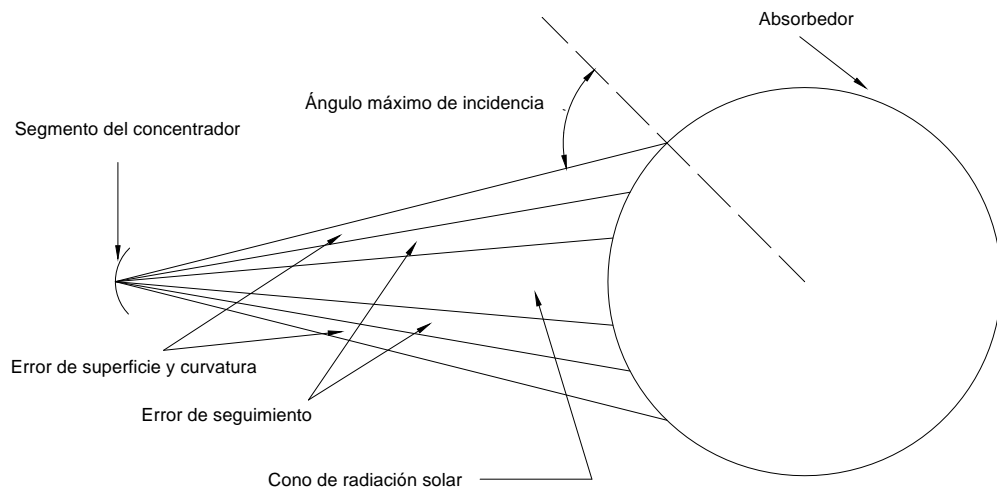
**Figura 22 B:** Boca de la parábola, F: Distancia focal, c: Profundidad de la parábola en el centro.

Debe advertirse que en las ecuaciones (2.38) y (2.39), 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.

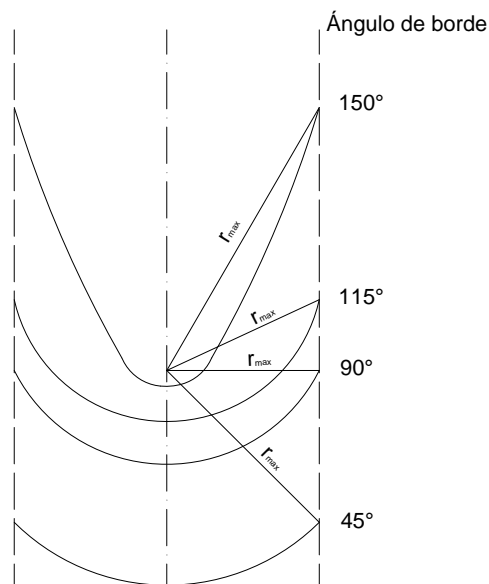
### **Geometría del colector cilíndrico parabólico**

Las pérdidas térmicas son directamente proporcionales al diámetro del tubo receptor ( Treadwell, 1976 ); 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- absorbedor, véase figura 23, ya que está aumentando al irse alejando del foco; es por esto que se requiere minimizar la distancia reflector-absorbedor. Un ángulo de borde de  $90^\circ$  minimiza dicha distancia. Véase figura 24 (Almanza & Muñoz, 1993).

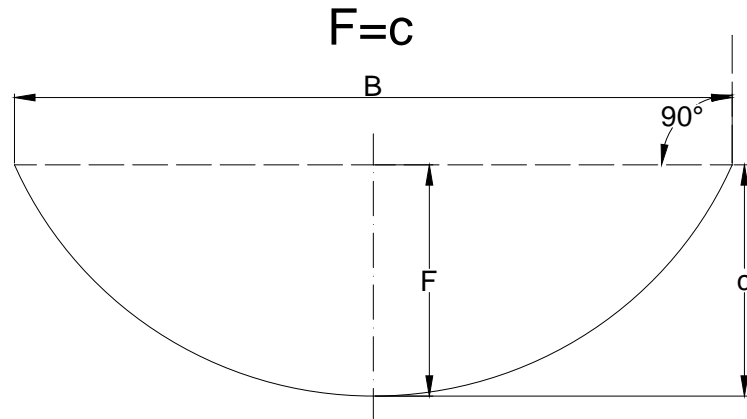


**Figura 23** Factores que intervienen en la selección del diámetro de un absorbedor



**Figura 24** Varios ángulos de borde para una apertura fija.

Para que el ángulo de borde sea igual a  $90^\circ$ , véase figura 25, la distancia focal  $F$  tiene que ser igual a la profundidad de la parábola  $c$ .



**Figura 25** Parábola con distancia focal  $F$  igual a la profundidad de la parábola  $c$ .

Reemplazando  $F$  en la ecuación 2.40 se puede calcular la profundidad de la parábola.

$$c = \frac{B}{16 \left( \frac{F}{B} \right)} \quad (2.40)$$

Si

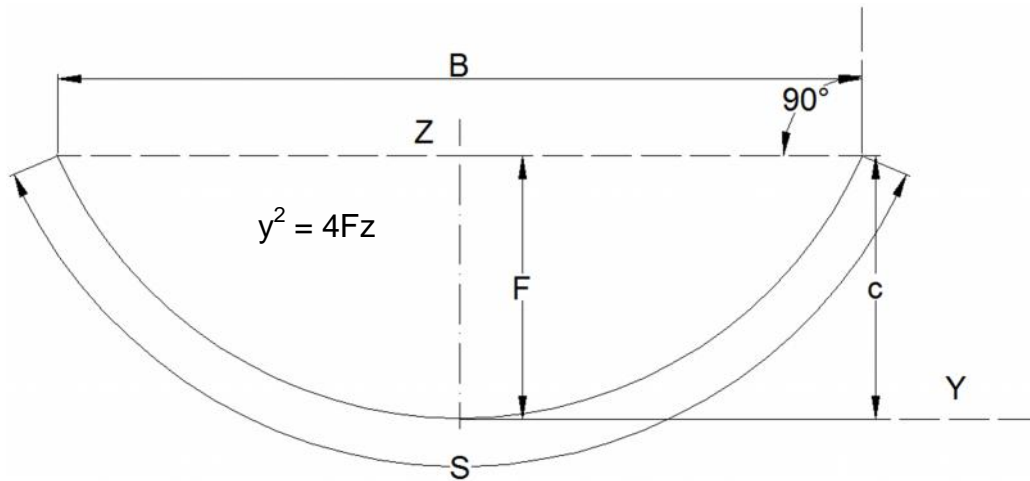
$$F = C \quad (2.41)$$

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

Entonces

$$c = \frac{B}{4} \quad (2.42)$$

Encontrado el valor de “c” se puede encontrar el valor de “F” y este se reemplaza en la ecuación 2.38 para la ecuación de la parábola con su eje de simetría en el eje z y tangente en el vértice de las ordenadas. Véase figura 26.

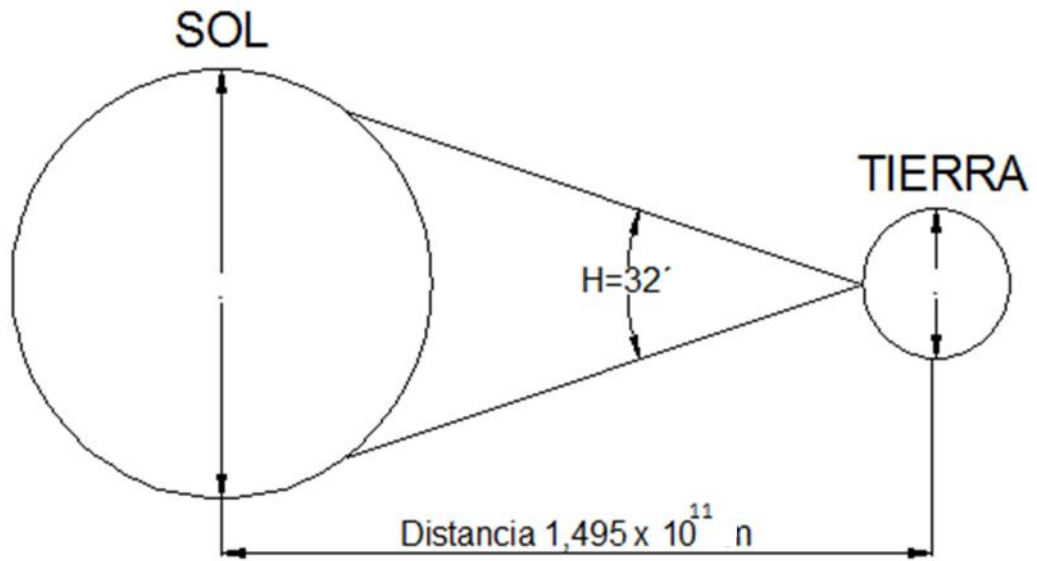


**Figura 26** Gráfico de la ecuación de la parábola.

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).

$$dS = \sqrt{1 + z'^2} \cdot dy \quad (2.43)$$

El Sol es asumido como una fuente de luz puntual pero esto no es cierto, los rayos del Sol no son paralelos, convergen en un punto de la superficie de la tierra formando un ángulo de 32' o 0.00931 rad. Véase figura 27.



**Figura 27** Distancia Tierra – Sol y Ángulo de aceptación

H Ángulo de aceptación 32' o 0.00931 rad (Duffie & Beckman, 1974)

## 2.5 TIPOS DE SEGUIMIENTO SOLAR

Un seguidor solar es un dispositivo mecánico capaz de orientar los colectores solares de forma que éstos permanezcan perpendiculares a los rayos solares. Siendo este el primer requisito que se exige para el aprovechamiento de la energía solar.

Se clasifican de la siguiente manera:



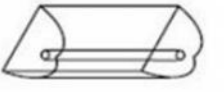



- Seguidores de un eje
- Seguidores de dos ejes



En la Figura 28 muestran los diferentes colectores en función de la razón de concentración, se añaden además, el rango de temperaturas a las que se puede llegar:

### 2.5.1 SEGUIDORES DE UN EJE

Se denomina de esta forma a seguidores que solo tiene un grado de libertad en su movimiento. Sus ventajas son: menor costo, simplicidad y fácil instalación; las desventajas son: seguimiento solar impreciso y menor energía captada.

		Nombre	Croquis	Razón de concentración "C"	Rango Temperatura alcanzada [C°]	
Estacionario	Absorbedor plano	Capatador plano de agua/aire		$C \leq 1$	$30 < T^{\#} < 250$	
		Tubos de vacío		$C \leq 1$	$50 < T^{\#} < 200$	
Seguidores	Seguimiento a un eje	Absorbedores tubulares	Colector Parabólico Compuesto CPC		$1 < C < 15$	$70 < T^{\#} < 300$
		Colector Cilíndrico Parabólico CCP		$15 < C < 40$	$70 < T^{\#} < 350$	
	Seguimiento a dos ejes	Absorbedores puntuales	Disco Parabólico		$100 < C < 1000$	$70 < T^{\#} < 1500$
			Torre Central		$100 < C < 1500$	$150 < T^{\#} < 1500$

**Figura 28** Tipos de seguimiento de acuerdo al factor de concentración

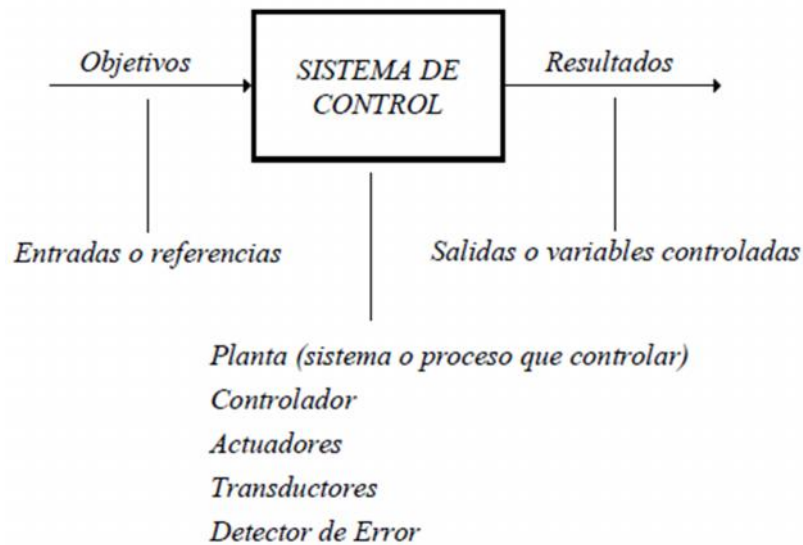
## 2.6 INTRODUCCIÓN A LOS SISTEMAS DE CONTROL

Desde el punto de vista de la teoría de control, un sistema o proceso está formado por un conjunto de elementos relacionados entre sí que ofrecen señales de salida en función de señales o datos de entrada.

Es importante resaltar el hecho de que no es necesario conocer el funcionamiento interno, o cómo actúan entre sí los diversos elementos, para caracterizar el sistema. Para ello, sólo se precisa conocer la relación que existe entre la entrada y la salida del proceso que realiza el mismo (principio de caja negra).

El aspecto más importante de un sistema es el conocimiento de su dinámica, es decir, cómo se comporta la señal de salida frente a una variación de la señal de entrada. Un conocimiento preciso de la relación entrada/salida permite predecir la respuesta del sistema y seleccionar la acción de control adecuada para mejorarla. De esta manera, el diseñador, conociendo cuál es la dinámica deseada, ajustará la acción de control para conseguir el objetivo final.

En vista de todo lo expuesto, se puede definir un sistema de control como el conjunto de elementos que interactúan para conseguir que la salida de un proceso se comporte tal y como se desea, mediante una acción de control.

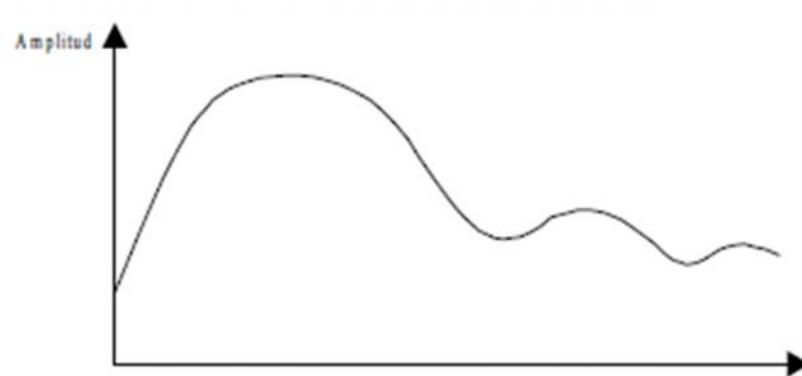


**Figura 29** Diagrama de un proceso de control

### 2.6.1 TIPOS DE SEÑALES Y SISTEMAS

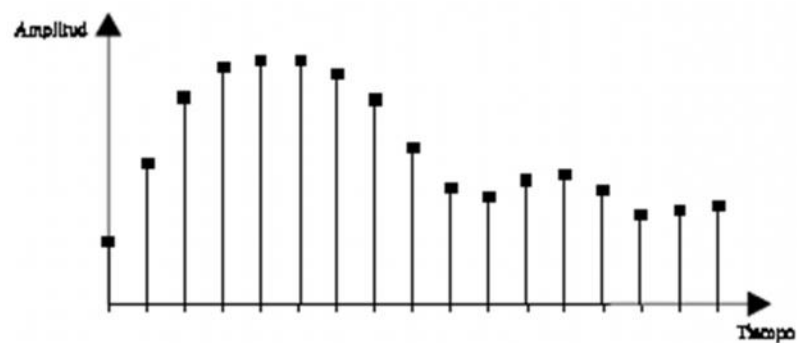
Consideraremos como señales las variaciones a lo largo del tiempo de las entradas o salidas de un sistema. Obviamente, estas señales pueden ser de distinta naturaleza, y por tanto sus unidades físicas pueden ser diversas. Según cómo sea la variación de estas señales, podemos clasificarlas dentro de dos grandes grupos: señales analógicas y señales discretas.

- Señales analógicas: Son aquellas cuya variación, tanto en amplitud como a lo largo del tiempo, es continua. Es decir, pueden tomar cualquier valor real, en cualquier instante de tiempo.



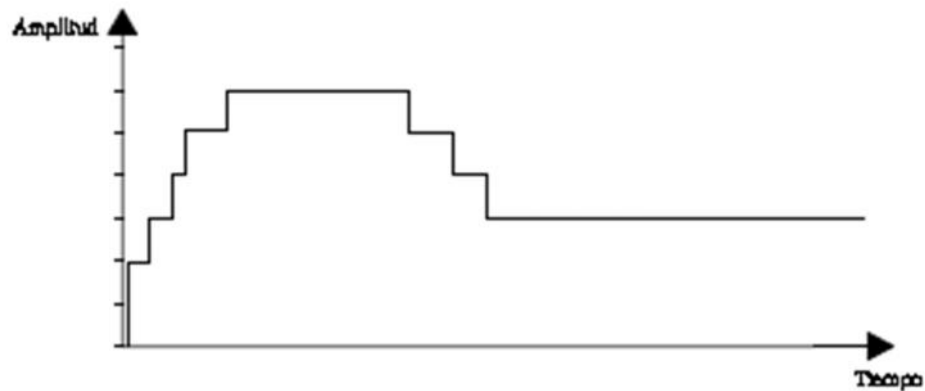
**Figura 30** Señal analógica

- Señales discretas: Este tipo de señales no tiene una variación continua como las anteriores, sino que su evolución se rige por un determinado conjunto finito de valores posibles. Según dónde tome este conjunto de valores, podremos distinguir entre señales discretas en amplitud o discretas en tiempo.
- Señales discretas en tiempo: Sólo tienen valor en instantes de tiempo predeterminados. Y aunque su amplitud puede ser cualquier valor dentro del rango de los reales, el valor de la señal entre dos instantes de tiempo consecutivos no está definido.



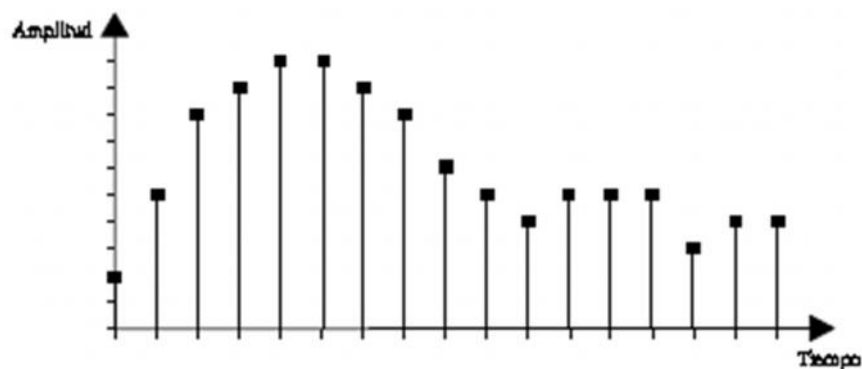
**Figura 31** Señal discreta en el tiempo

Señales discretas en amplitud: En este caso, la señal toma valor en cualquier instante de tiempo, pero estos valores de amplitud pueden encontrarse entre los definidos en el conjunto predeterminado.



**Figura 32** Señal discreta en amplitud

- Señales discretas en amplitud y tiempo: Son una mezcla de los dos tipos anteriores, es decir, la señal sólo podrá tomar valores predeterminados en instantes de tiempo predeterminados.



**Figura 33** Señal discreta en amplitud y tiempo

## 2.6.2 SISTEMAS EN LAZO ABIERTO Y SISTEMAS EN LAZO CERRADO

Dependiendo del tratamiento que el sistema de control realiza con la señal de salida, pueden distinguirse dos topologías de control generales: sistemas en lazo abierto y sistemas en lazo cerrado.

### Sistemas en lazo abierto

En este tipo de sistemas, la salida no tiene efecto alguno sobre la acción de control.

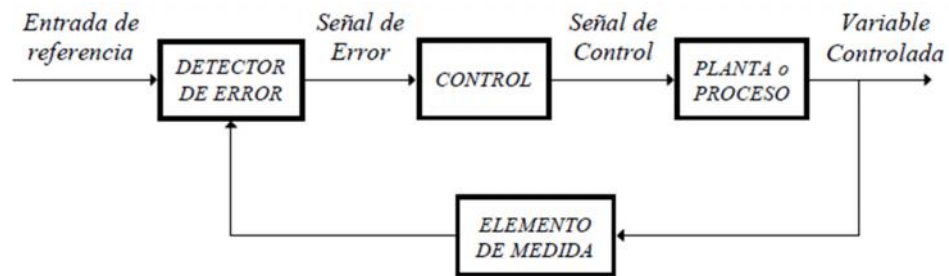


**Figura 34** Diagrama de bloques de un sistema en lazo abierto

En un sistema en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia, por ello cada entrada corresponderá a una operación prefijada sobre la señal de salida. Se puede asegurar entonces que la exactitud del sistema depende en gran manera de la calibración del mismo y, por tanto, la presencia de perturbaciones en la cadena (señales indeseadas) provocará que éste no cumpla la función asignada.

### Sistemas en lazo cerrado

En los sistemas de control en lazo cerrado, la señal de salida tiene efecto sobre la acción de control. A este efecto se le denomina *realimentación*.



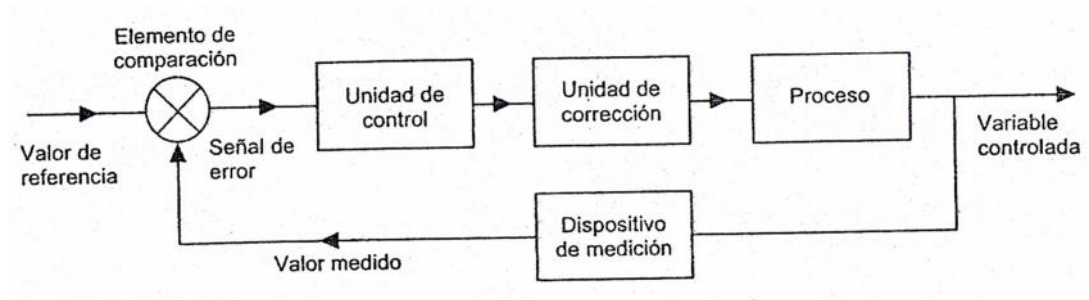
**Figura 35** Diagrama de bloques de un sistema de control en lazo cerrado

La señal controlada debe realimentarse y compararse con la entrada de referencia, tras lo cual se envía a través del sistema una señal de control, que será proporcional a la diferencia encontrada entre la señal de entrada y la señal medida a la salida, con el objetivo de corregir el error o desviación que pudiera existir.

La principal ventaja de los sistemas de control en lazo cerrado es que el uso de la realimentación hace al conjunto menos sensible a las perturbaciones externas y a las variaciones de los parámetros internos que los sistemas en lazo abierto.

### **Elementos básicos de un sistema en lazo cerrado**

En la figura 36 se muestra la configuración general de un sistema básico en lazo cerrado. Consta de los siguientes elementos:



**Figura 36** Elementos de un sistema de lazo cerrado

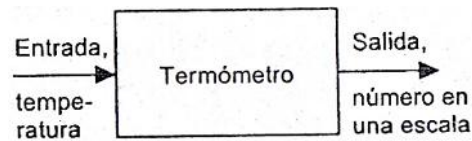
- Elemento de comparación
- Elemento de control
- Elemento de corrección
- Elemento de proceso
- Elemento de medición

## 2.7 SISTEMAS DE MEDICION

Un sistema de medición se podría considerar como una caja negra que se utiliza para medir. Su entrada es la magnitud que se desea medir y su salida es el valor correspondiente a dicha magnitud.

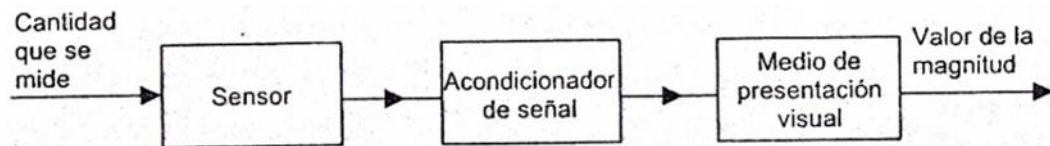
En el caso de un sistema de medición de temperatura, como, un termómetro, la entrada es la temperatura y la salida es un número que aparece en una escala. En la figura 37 se muestra la representación del sistema anterior





**Figura 37** Ejemplo de un sistema de medición

En general, puede decirse que los sistemas de medición están formados por tres elementos (como se muestra en la figura 38)



**Figura 38** Un sistema de medición y sus elementos

- Un sensor, el cual responde a la cantidad que se mide, dado como salida una señal relacionada con dicha cantidad. Un termopar es un ejemplo de sensor de temperatura. Su entrada es una temperatura y su salida es un f.e.m. (fuerza electromotriz), la cual se relaciona con el valor de la temperatura respectiva.
- Un acondicionador de señal, el cual toma la señal del sensor y la manipula para convertirla a una forma adecuada para su representación visual o, como en el caso de un sistema de control, para que ejerza una acción de control. Por ejemplo, la salida que produce un termopar es una f.e.m. tan pequeña, que se debe

alimentarse a través de un amplificador para obtener una señal mayor. El amplificador es el acondicionador de la señal.

- Un sistema de presentación visual (pantalla o display), es donde se despliega la salida producida por el acondicionador de señal. Por ejemplo una aguja que se mueve a través de una escala, o bien una lectura digital.

### 2.7.1 SENSORES

El término sensor se refiere a un elemento que produce una señal relacionada con la cantidad que se está midiendo. Por ejemplo, en el caso de un elemento para medir temperatura mediante resistencia eléctrica, la cantidad que se mide es la temperatura y el sensor transforma una entrada de temperatura en un cambio en la resistencia.

Con frecuencia se utiliza el término transductor en vez de sensor. Los transductores se definen como el elemento que al someterlo a un cambio físico experimenta un cambio relacionado. Es decir, los sensores son transductores, además de sensores, en otras partes del sistema para convertir señales de una forma dada en otra distinta.

Además los sensores pueden ser *activos* o *pasivos*.

- *Sensor activo*: Es un sensor que requiere una fuente externa de excitación como las RTD o células de carga.

- *Sensor pasivo*: Es un sensor que no requiere una fuente externa de excitación como los termopares o fotodiodos.

### **Sensores Electrónicos**

Los sensores electrónicos han ayudado no solo a medir con mayor exactitud las magnitudes, sino a poder operar con dichas medidas. Pero no se puede hablar de los sensores sin sus acondicionadores de señal, ya normalmente los sensores ofrecen una variación de señal muy pequeña y es muy importante equilibrar las características del sensor con las del circuito que le permite medir, acondicionar, procesar y actuar con dichas medidas.

#### **2.7.2 TIPOS DE SENSORES**

Existe una gran cantidad de sensores en el mercado, para poder medir magnitudes físicas, de los que se pueden enumerar los siguientes:

- Temperatura
- Humedad
- Presión
- Posición
- Movimiento
- Caudal
- Luz
- Imagen

- Corriente
- Conductividad

### 2.7.3 TERMINOLOGÍA DEL FUNCIONAMIENTO

Los siguientes términos se emplean para definir el funcionamiento de los transductores y con frecuencia el de los sistemas de medición como un todo.

**a) Rango.** Conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos entre los valores superior e inferior de la capacidad de medida, de recepción o de transmisión del instrumento.

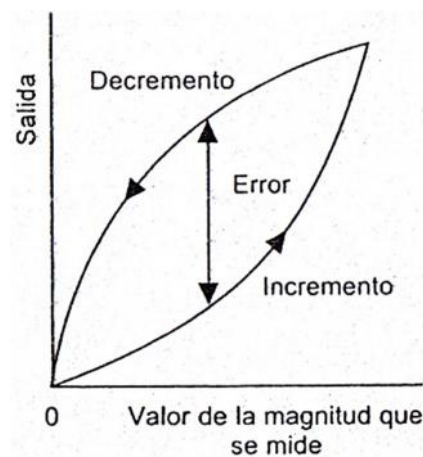
**b) Error.** El error se presenta con respecto a un patrón de medida. Hay principalmente dos tipos de errores importantes en los instrumentos: sistemáticos y aleatorio.

En el sistemático es conocido e incluso fácil de cuantificar y contrarrestar, en muchos casos este error. En los aleatorios su origen es muchas veces desconocido, difícil de compensar y se lo trata estadísticamente. Los errores llevan a expresar la salida en función de bandas de error.

**c) Alcance.** Es la diferencia algebraica entre los valores superior e inferior del campo de medida del instrumento.

**d) Histéresis.** La histéresis es la tendencia de un material a conservar una de sus propiedades, en ausencia del estímulo que la ha generado.

Los transductores pueden producir distintas salidas de la misma magnitud que se mide, si dicha magnitud se obtuvo mediante un incremento o una reducción de los mismos. La figura 39 muestra una salida de este tipo, donde la histéresis es la diferencia máxima en la salida obtenida a partir de valores de incremento y de decremento.



**Figura 39** Histéresis

**e) Sensibilidad.** Es la relación entre la salida y respecto de la entrada, que indica qué tanta salida se obtiene por unidad de entrada, es decir, salida/entrada.

**f) No linealidad.** Para muchos transductores se supone que en su rango de funcionamiento la relación entre la entrada y la salida es lineal, es decir,

la gráfica de la salida respecto a la entrada produce una línea recta. Sin embargo, son pocos los transductores en los que la relación anterior es realmente una línea recta; por ello, al suponer la existencia de esta linealidad se producen errores. Este error se define como la desviación máxima respecto a la línea recta correspondiente.

**g) Resolución.** Cuando la entrada varía continuamente en todo el rango, las señales de salida de algunos sensores pueden cambiar a pequeños intervalos. Un ejemplo es el potenciómetro con devanado de alambre: la salida aumenta escalonada conforme el deslizador del potenciómetro pasa de una vuelta del devanado a otra. La resolución es el cambio observable en la salida. Por ejemplo, la resolución de un potenciómetro con devanado de alambre podría ser  $0.5^\circ$ , o quizás un porcentaje de la desviación a escala total.

**h) Exactitud.** La exactitud es el grado hasta el cual un valor producido por un sistema de medición podría estar equivocado. Es por lo tanto, igual a la suma de todos los errores posibles más el error en la exactitud de la calibración del transductor. Por ejemplo, si la exactitud de un instrumento para medir temperatura se especifica como un valor de  $\pm 2^\circ\text{C}$ , la lectura en el instrumento estará entre  $+2$  y  $-2^\circ\text{C}$  del valor real. Es común expresar la exactitud como un porcentaje de la salida a rango total, o como una desviación a escala total.

## 2.7.4 SENSORES DE TEMPERATURA

Probablemente sea la temperatura el parámetro físico más común que se mide en una aplicación electrónica, incluso en muchos casos en que el parámetro de interés no es la temperatura, ésta se ha de medir para incluir indirectamente su efecto en la medida deseada.

La diversidad de sus aplicaciones ha condicionado igualmente una gran proliferación de dispositivos sensores y transductores, desde la sencilla unión bimetálica de los termostatos, hasta los dispositivos semiconductores más complejos.

### Tipos de Sensores de Temperatura

**Termopares:** Los termopares utilizan la tensión generada en la unión de dos metales en contacto térmico, debido a sus distintos comportamientos eléctricos.

**Resistivos:** Lo constituyen las RTD (Resistance Temperature Detector) o PT100 basadas en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura, están caracterizadas por un coeficiente de resistividad positivo PTC (Positive Thermal Coefficient). También lo son las NTC (Negative Thermal Coefficient), que se llaman termistores y están caracterizadas por un coeficiente de temperatura negativo.

**Semiconductores:** Se basan en la variación de la conducción de una unión p-n polarizada directamente.

### Termopares

Cuando dos metales se unen, en el sitio de unión se produce una diferencia de potencial. Ésta depende de los metales utilizados y de la temperatura de unión. Los termopares constituyen circuitos completos en los que hay este tipo de uniones. Si ambas uniones están a la misma temperatura, no existe f.e.m. neta. En cambio, si la temperatura es diferente, sí se produce una f.e.m. el valor  $E$  de ésta dependerá de los dos metales utilizados y de las temperaturas  $t$  de ambas uniones. Por lo general una de ellas se mantiene a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , cumpliendo en grado razonable la siguiente relación:

$$E = at + bt^2 \quad (2.44)$$

Donde  $a$  y  $b$  son las constantes de los metales utilizados. En la Tabla 8 se muestran los termopares de uso más común, los rangos de temperatura en los que generalmente se usan y sus sensibilidades características. A estos termopares de uso común se les asignan letras de referencia. Por ejemplo, al hierro-constantán se le conoce como termopar tipo J. La figura 40 muestra cómo la f.e.m. varía con la temperatura en pares de metales de uso común.



Tabla 7 Termopares

Ref.	Materiales	Rango °C	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
B	Rodio(6%)/platino(30%)	0 - 1800	3
E	Cromo/constantán	-200 a 1000	63
J	Hierro/constantán	-200 a 900	53
K	Cromo/aluminio	-200 a 1300	41
N	Nirosil/nisil	-200 a 1300	28
R	Platino/platino-rodio(13%)	0 a 1400	6
S	Platino/platino-rodio(10%)	0 a 1400	6
T	Cobre/constantán	-200 a 400	43

Fuente: BOLTON, W. Ingeniería de Control

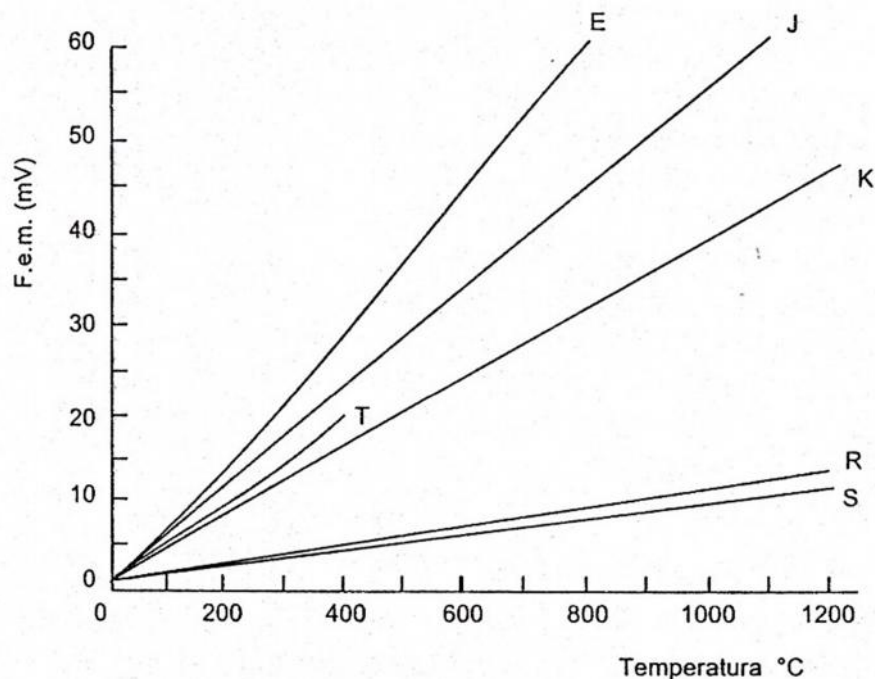


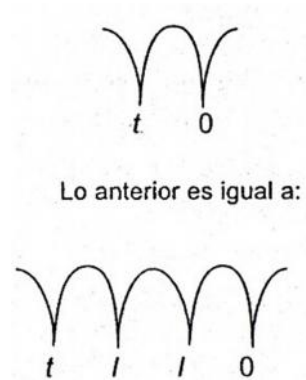
Figura 40 Gráfica fem termoeléctrica - temperatura

Aunque en un circuito de termopar haya otros metales, éstos no tienen el efecto en la f.e.m. termoeléctrica, siempre y cuando todas sus uniones estén a la misma temperatura. Es posible que la temperatura de la unión de referencia de un termopar no sea de 0 °C. Sin embargo, en las tablas estándar se supone que dicha unión está a 0 °C, por lo que para usar dichas

tablas antes habrá que hacer la corrección respectiva, que se hace utilizando lo que se conoce como ley de las temperaturas intermedias, es decir:

$$E_{t,0} = E_{t,l} + E_{l,0} \quad (2.45)$$

La f.e.m.  $E_{t,0}$  a la temperatura  $t$  cuando la unión fría está a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  es igual a la f.e.m.  $E_{t,l}$  a la temperatura intermedia  $l$ , más la f.e.m.  $E_{l,0}$  a la temperatura  $l$  cuando la unión fría está a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figura 41). La f.e.m. de compensación se puede obtener con la caída de voltaje del termómetro de resistencia.



**Figura 41** Ley de temperaturas intermedias

Los termopares de base-metal E, J, K y T son más o menos baratos, pero se deterioran con el tiempo. Su exactitud característica es alrededor de  $\pm 1$  a  $3\%$ . Los termopares de metales nobles, por ejemplo R, son más caros, pero también más estables y de mayor duración. Su exactitud es del orden de  $\pm 1\%$ , o aún mejor.

Por lo general los termopares están montados dentro de una cubierta que les da protección mecánica y química. El tipo de cubierta depende de las temperaturas para las que se utilizará el termopar. En algunos casos la cubierta se rellena de un mineral que sea buen conductor del calor, así como un buen aislante eléctrico.

El tiempo de respuesta de los termopares sin cubierta es muy rápido. Cuando se emplea una cubierta grande este tiempo puede aumentar en varios segundos.

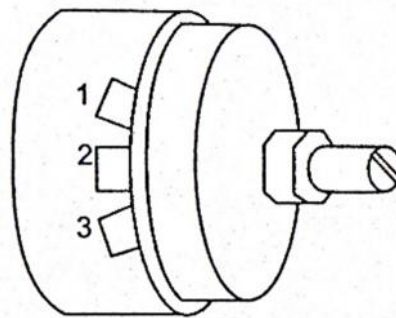
En algunos casos un grupo de termopares se conecta en serie, de manera que hay diez o más uniones calientes que detectan una temperatura; las f.e.m.s de todos los termopares se suman. A este conjunto se le conoce como termopila.

### **Sensores de desplazamiento, posición y proximidad**

Los sensores de desplazamiento miden la magnitud que se desplaza un objeto; los sensores de posición determinan la posición de un objeto en relación con un punto de referencia. Los sensores de proximidad son una modalidad de sensor de posición y determinan en qué momento un objeto se mueve dentro de una distancia crítica del sensor.

## Sensor potenciómetro

Un potenciómetro es un elemento resistivo que tiene un contacto deslizante que puede desplazarse a lo largo de dicho elemento. Éste se puede utilizar tanto en desplazamientos lineales como rotacionales; dicho desplazamiento se convierte en una diferencia de potencial. El potenciómetro rotacional está formado por una pista o canal circular con devanado de alambre o por una capa de plástico conductor; sobre la pista rota un contacto deslizante giratorio (Figura 42) y ésta puede ser una sola circunferencia o helicoidal.



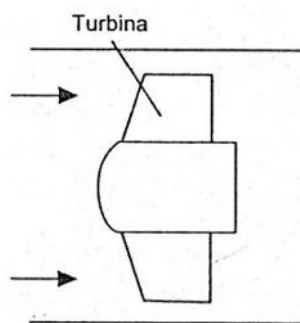
**Figura 42** Potenciómetro giratorio

En una pista con devanado de alambre, al pasar de una vuelta a la otra, la parte deslizante cambia la salida de voltaje en pasos, cada uno de los cuales corresponde al avance de una vuelta. Si el potenciómetro tiene  $N$  vueltas, la resolución expresada en porcentaje es de  $100/N$ . Por lo tanto, la resolución de una pista de alambre está limitada por el diámetro del alambre utilizado y su valor suele variar entre 1.5 mm en pistas con devanado burdo

y hasta 0.5 mm para pistas con devanado fino. Los errores por la no linealidad de la pista varían de menos de 0.1% hasta casi 1%. La resistencia de la pista varía entre 20 y 200 K . El plástico conductor idealmente tiene una resolución infinita y los errores por la no linealidad de la pista son del orden del 0.05% y valores de resistencia entre 500 y 80 K . El coeficiente por temperatura de la resistencia del plástico conductor es mayor que el del alambre, por lo que los cambios de temperatura tienen mayor influencia en la exactitud.

### MEDIDOR DE TURBINA

El medidor de flujo de turbina (ver figura 43) consta de un rotor con varios álabes y se coloca en medio de la tubería del flujo que interesa. Al fluir, el líquido hace que gire el rotor y la velocidad angular es casi proporcional al gasto. El rango de velocidad del rotor se determina mediante un captador magnético. Los pulsos se cuentan para determinar el número de revoluciones del rotor. Su exactitud en general es  $\pm 0.3\%$ .



**Figura 43** Medidor de flujo de turbina

## 2.8 SISTEMA DE ACTUADORES

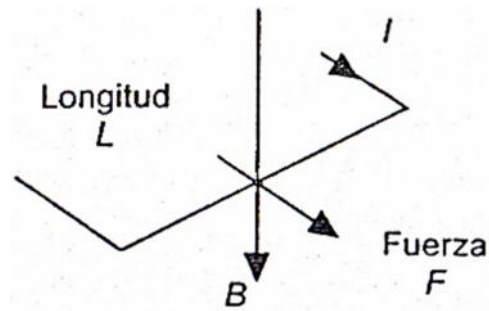
Los sistemas de actuadores son los elementos de los sistemas de control que transforman la salida de un microprocesador o un sistema de control en una acción de control para una máquina o dispositivo.

### 2.8.1 MOTORES DE CD

Los motores eléctricos con frecuencia se emplean como elemento de control final en los sistemas de control por posición o de velocidad.

Los motores se pueden clasificar en dos categorías principales: motores de cd y motores de ca. La mayoría de los motores que se emplea en los sistemas de control modernos son motores de cd. Los principios básicos del funcionamiento de un motor son los siguientes:

- Cuando en un campo magnético, una corriente pasa por un conductor, se ejerce una fuerza sobre el conductor (ver figura 44). Para un conductor de longitud  $l$  que lleva una corriente  $I$  en un campo magnético que tiene una densidad de flujo  $B$  y es perpendicular al conductor, la fuerza ejercida  $F$  es igual a  $BIL$ .

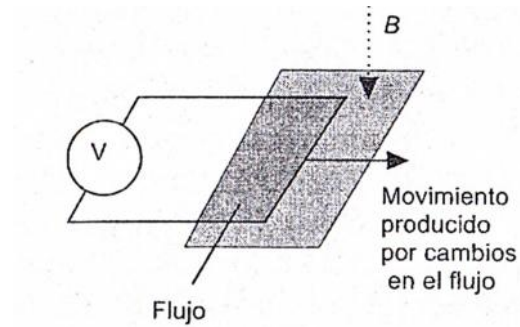


**Figura 44** Fuerza sobre un conductor por el que pasa una corriente

- Cuando un conductor se desplaza dentro de un campo magnético, sobre él se introduce una f.e.m. (ver figura 45). La f.e.m. inducida,  $e$  es igual a la velocidad con la que cambia el flujo magnético (el flujo magnético es igual al producto de la densidad de flujo por el área) que cubre el conductor (Ley de Faraday), es decir

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.46)$$

El signo menos indica que la dirección de la f.e.m. es en sentido opuesto al cambio que la produce (Ley de Lenz); es decir, la dirección de la f.e.m. inducida es tal que produce una corriente que crea campos magnéticos que tienden a neutralizar el cambio en el flujo magnético asociado al devanado que produjo la f.e.m. Por ellos, la frecuencia se le conoce como fuerza contraelectromotriz.

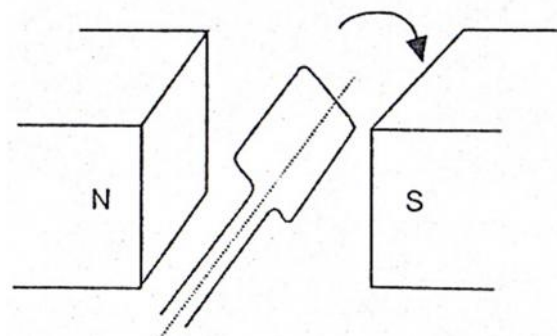


**Figura 45** F.e.m. inducida

### Principios Básicos

La figura 46 muestra el principio básico de un motor de cd: una espiral de alambre que gira de manera libre en medio del campo de un imán permanente.

Cuando por el devanado pasa una corriente, las fuerzas resultantes ejercidas en sus lados y en el ángulo recto al campo provocan fuerzas que actúan a cada lado produciendo una rotación.



**Figura 46** Elementos básicos de un motor de cd



Sin embargo, para que ésta continúe, cuando el devanado pasa por la posición vertical se debe invertir la dirección de la corriente.

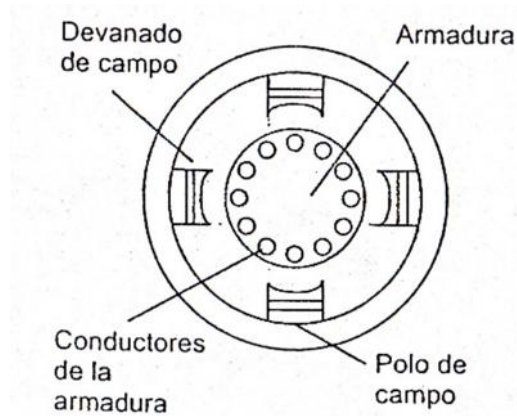
En un motor de cd convencional, los devanados de alambre se montan en las ranuras de un cilindro de material magnético conocido como armadura.

La armadura está montada en cojinetes y puede girar. Ésta se monta en el campo magnético producido por los polos de campo que pueden ser, en pequeños motores, por ejemplo, imanes permanentes o electroimanes, cuyo magnetismo se obtiene mediante una corriente que circula por los devanados de campo. La figura 47 muestra el principio básico de funcionamiento de un motor de cd de cuatro polos, cuyo campo magnético se produce por devanados que transportan la corriente.

Los extremos de los devanados de la armadura se conectan con los segmentos adyacentes de un anillo segmentado conocido como conmutador y el contacto electrónico con los segmentos que se logran mediante contactos de carbón conocidos como escobillas.

Conforme la armadura gira, el conmutador invierte la corriente de cada uno de los devanados al desplazarse por los polos de campo. Esto es necesario a fin de que las fuerzas que actúan en el devanado sigan actuando en la misma dirección y la rotación continúe.

La dirección de rotación del motor de cd se invierte al invertir la corriente de armadura o la corriente de campo.



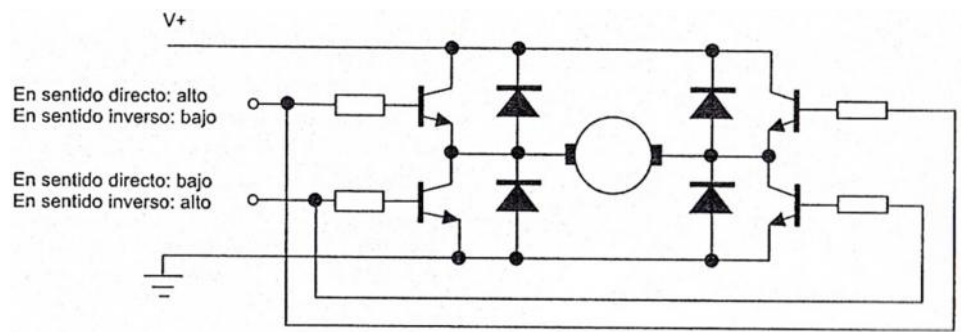
**Figura 47** Motor de cd

### **Control de giro en motores de cd.**

La velocidad que alcanza un motor de imán permanente depende de la magnitud de la corriente que pasa por el devanado de la armadura. En un motor con devanado de campo, la velocidad se modifica variando la corriente de armadura, o la de campo. En general, es la primera la que se modifica. Por lo tanto, para controlar la velocidad se puede utilizar el control del voltaje que se aplica a la armadura. Sin embargo, dado el empleo de fuentes del voltaje del valor fijo es frecuente, el voltaje variable se logra mediante un circuito electrónico.

Para utilizar el motor en dirección directa e inversa se utiliza un circuito de cuatro transistores, conocido como circuito H. Este circuito se puede

modificar mediante compuertas lógicas, de manera que una entrada controle la conmutación y la otra, la dirección de rotación (figura 48).



**Figura 48** Circuito en H

## 2.9 MICROPROCESADORES

Si consideramos un problema de control sencillo, como la secuencia de las luces roja, amarilla y verde del semáforo de un cruce, basta recurrir a un sistema de control electrónico que contenga circuitos integrados, de lógica combinatoria y de lógica secuencial.

Sin embargo, en situaciones más complejas se deben controlar muchas más variables pues la secuencia de control es más complicada. La solución más sencilla en este caso no es construir un sistema basado en la interconexión de circuitos integrados de lógica combinatoria y secuencial, sino en el uso de un microprocesador para que el software realice las funciones correspondientes.

### **2.9.1 ESTRUCTURA DE UNA MICROCOMPUTADORA**

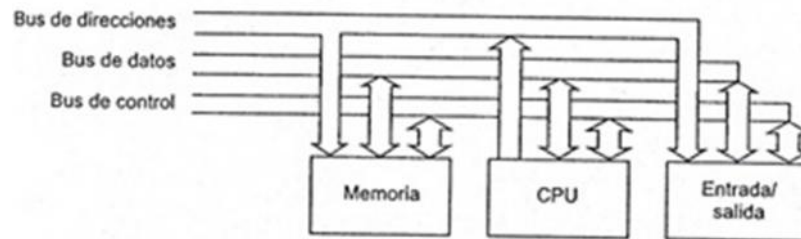
Las computadoras constan de tres secciones: la unidad central de proceso (CPU, por sus siglas en inglés), la cual reconoce y ejecuta las instrucciones de un programa; los circuitos de interfase de entrada y salida, los cuales controlan las comunicaciones entre la computadora y el mundo exterior, y la memoria, donde se almacenan las instrucciones y los datos de un programa. Las señales digitales se desplazan de una sección a otra a través de vías llamadas buses.

En sentido físico, el bus consta de varios conductores a través de los cuales se transportan diversas señales eléctricas. Éstos pueden ser las pistas de una tarjeta de circuito impreso, o los alambres de un cable plano.

Los datos necesarios para las instrucciones de procesamiento de la CPU se transportan a través del bus de datos, la dirección de una localidad de memoria específica para acceder a los datos almacenados se transporta por el bus de dirección y las señales de las acciones de control viajan por el bus de control.

La figura 49 ilustra la configuración general. En ocasiones el chip del microprocesador sólo contiene la CPU, mientras que en otros casos en un chip están todos los componentes necesarios de una computadora.

A los microprocesadores que tienen memoria y diversas configuraciones de entrada/salida en un mismo chip se llaman microcontroladores. En efecto, se trata de verdaderas microcomputadoras en un solo chip.



**Figura 49** Configuración general de una computadora

## Buses

El bus de datos se utiliza para transportar palabras a o desde la CPU, la memoria o las interfaces de entrada/salida. La longitud de las palabras pueden ser de 4, 8, 16, 32 o 64 bits. En cada línea del bus viaja una señal binaria, es decir, un 0 o un 1. Así, en un bus de cuatro líneas se podría transportar la palabra 1010; en cada cable se transporta un bit, es decir:

Palabra	Línea del bus
0 (bit menos significativo)	Primer línea del bus de datos
1	Segunda línea del bus de datos
0	Tercer línea del bus de datos
1 (bit más significativo)	Cuarta línea del bus de datos

Entre más líneas tenga el bus de datos, más larga podrá ser la palabra que se utilice. El rango de valores que puede adoptar un elemento de datos está restringido al espacio correspondiente a una determinada longitud de palabra. Así, para una palabra con longitud de cuatro bits, la cantidad de valores es  $2^4 = 16$ . Supongamos que mediante estos datos se quiere representar una temperatura, entonces el rango de posibles temperaturas se divide en 16 segmentos suponiendo que el rango se representa mediante una palabra de 4 bits. Los primeros microprocesadores eran dispositivos de 4 bits (longitud de palabra), los cuales todavía se emplean mucho en dispositivos como juguetes, lavadoras y controladores de calefacción central doméstica. Después aparecieron los microprocesadores de 8 bits. En la actualidad existen microprocesadores de 16, 32 y 64 bits, sin embargo, los microprocesadores de 8 bits aún se utilizan mucho en los controladores.

El bus de dirección transporta señales que indican dónde se pueden encontrar los datos mediante la selección de alguna localidad de memoria o los puertos de entrada y salida. Cuando una determinada dirección es seleccionada, colocándola en el bus de dirección, dicha ubicación será la única que estará abierta a la comunicación que se envía desde la CPU. Es decir, la CPU sólo puede comunicarse con una localidad a la vez. Una computadora con un bus de datos de 8 bits tiene un bus de direcciones de 16 bits, es decir, 16 líneas. La magnitud del bus de direcciones permite  $2^{16}$  localidades direccionadas. La cantidad de  $2^{16}$  corresponde a 65536 localidades y en general se expresa como 64 K, donde K es igual a 1024.

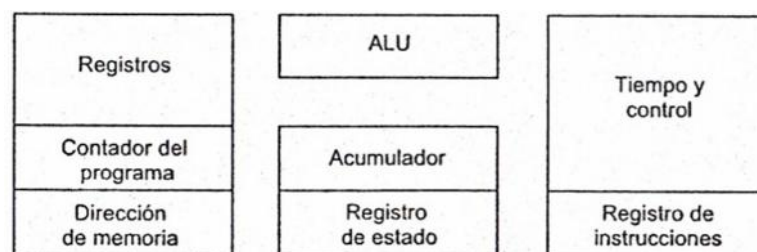
Entre más memoria direccionable haya, mayor es la cantidad de datos que es posible guardar, así como mayor y más complejo el programa que se puede utilizar.

El bus de control es el medio a través del cual se envían las señales que sincronizan cada uno de los elementos. Las señales del reloj del sistema se transportan en el bus de control. Estas señales generan intervalos durante los cuales se realizan las operaciones del sistema.

La CPU envía señales de control a otros elementos para indicar qué tipo de operación se va a realizar, por ejemplo, si es necesario leer una señal (READ) o escribirla (WRITE)

## CPU

La CPU es la sección del procesador en la que se procesan los datos, se traen instrucciones de la memoria que se decodifican y se ejecutan. Se puede decir que consta de una unidad de control, una unidad lógica y aritmética (ALU, por sus siglas en inglés) y de registros, (figura 50). Es la parte que constituye el microprocesador.



**Figura 50** Dispositivos de una CPU

La unidad de control define la duración y secuencia de las operaciones. Produce las señales de reloj utilizadas para traer de la memoria una instrucción del programa y ejecutarla.

Las operaciones pertenecientes al microprocesador se reconocen por la cantidad de ciclos que requiere su ejecución. La unidad aritmética y lógica se ocupa de las operaciones con los datos.

Los datos internos que en un momento dado utiliza la CPU se guardan en forma temporal en un grupo de registros mientras se ejecutan las instrucciones.

## **Memoria**

En la unidad de memoria se guardan datos de tipo binario; físicamente está formada por uno o varios circuitos integrados. Los datos pueden ser códigos de instrucciones de un programa, o números con los que se realizan las operaciones. El tamaño de la memoria dependerá de la cantidad de líneas del bus de dirección. Los elementos de la memoria están formados en esencia por grandes cantidades de celdas de memoria, cada una de las cuales guarda un bit 0 o 1.

Las celdas de memoria se agrupan por localidades y cada una de ellas tiene capacidad para guardar una palabra.



Para acceder la palabra almacenada, se identifica cada localidad mediante una dirección específica.

De esta manera, en un bus de dirección de 4 bits se pueden identificar 16 direcciones diferentes, cada una de las cuales pueden guardar un byte, es decir, un grupo de ocho bits.

Dirección	Contenido de los datos
0000	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
0001	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
0010	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
0011	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
0100	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
0101	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>
etc	
1111	<input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>

**Figura 51** Celdas de memoria

La capacidad de la unidad de memoria se especifica por la cantidad de localidades de memoria disponibles; 1 K es  $2^{10} = 1024$  localidades; una memoria de 4 K tiene 4096 localidades.

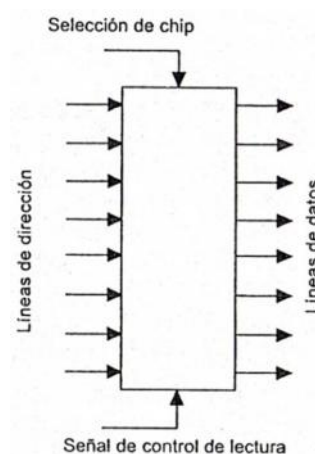
Existen varios tipos de unidad de memoria:

## ROM

Cuando se guardan datos en forma permanente, se utiliza un dispositivo de memoria conocido como memoria de sólo lectura (ROM por sus siglas en inglés).

Las memorias ROM se programan con el contenido que se requiere durante la fabricación del circuito integrado. Mientras el chip de memoria esté en la computadora no es posible escribirle ningún dato, sólo se permite la lectura y se utiliza para programas que no se van a modificar, como el sistema de arranque o “boot” de una computadora y programas para aplicaciones específicas en las que se utilizan microprocesadores, aun cuando se suspenda la alimentación eléctrica, esta memoria no pierde su contenido.

En la figura 52 se muestran las conexiones de un chip ROM típico capaz de guardar 1 K x 8 bits.



**Figura 52** Chip de una ROM

**PROM**

El término ROM programable (PROM por sus siglas en inglés) se refiere a las memorias ROM que puede programar el usuario. En un principio, las celdas de memoria tienen un fusible como eslabón que mantiene su memoria en 0. Al hacer pasar una corriente a través del fusible, éste se abre de manera permanente y así el valor cambia de 0 a 1. Una vez que el eslabón ha quedado abierto, los datos se guardan en forma permanente en la memoria y ya no es posible modificarlos.

**EPROM**

El término ROM borrable y programable (EPROM por sus siglas en inglés) se refiere a las memorias ROM que es posible programar y modificar. Un chip de EPROM típico contiene una serie de pequeños circuitos electrónicos, celdas, donde se almacena una carga.

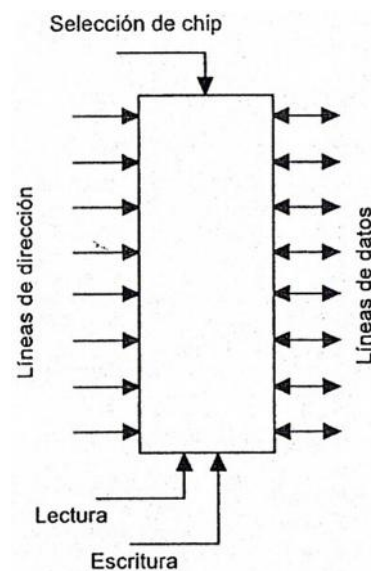
Para almacenar el programa se aplican voltajes a las terminales del circuito integrado y se produce una configuración de celdas cargadas y no cargadas. Esta configuración queda guardada de manera permanente en el chip hasta que la borra un haz de luz ultravioleta que pasa por una ventana de cuarzo ubicada en la parte superior del dispositivo. Esto provoca la descarga de todas las celdas. Por lo tanto, es posible volver a programar el chip.

## EEPROM

La PROM eléctricamente borrable (EEPROM por sus siglas en inglés) es similar a las EPROM, pero para el borrado se utiliza un voltaje relativamente alto, en vez de la luz ultravioleta.

## RAM

Los datos temporales, es decir, aquellos con los que en un momento dado se realizan operaciones, se guardan en una memoria de lectura/escritura conocida como memoria de acceso aleatorio (RAM por sus siglas en inglés), es la que se puede leer y escribir. La figura 53 muestra las conexiones típicas del chip de una RAM de 1 K x 8 bits.



**Figura 53** Chip de memoria RAM

## **ENTRADA/SALIDA**

En cualquier ordenador existe una parte muy importante llamada subsistema de Entrada/Salida, que es la que hace posible la comunicación con el mundo exterior.

Este sistema está formado por varios dispositivos periféricos que proporcionan un medio para intercambiar datos con el exterior y que se comunican con el procesador a través de una serie de módulos llamados de E/S. Cualquiera de estos módulos contiene una serie de controladores que se encargan de manejar el funcionamiento de uno o varios periféricos.

Los módulos de E/S no deben conectar directamente el periférico con el bus del sistema, sino que deben tener un controlador para poder realizar la comunicación entre el periférico y el procesador de forma eficiente.

Existe una gran diversidad de periféricos que utilizan métodos de operación diferentes. No sería lógico que la CPU tuviera que incorporar toda la lógica necesaria para controlar este rango de dispositivos.

La velocidad de transferencia de los datos de los periféricos es a menudo mucho más lenta que la que tiene el procesador con el sistema de memoria, por lo tanto resulta poco práctico usar el bus del sistema de alta velocidad para comunicarse directamente con los periféricos.

A menudo los periféricos utilizan formatos y longitudes de palabra de datos diferentes a los que utiliza el procesador. Debe haber por tanto algún mecanismo para adecuar las señales de ambos dispositivos.

Los módulos de E/S establecen una serie de reglas (llamadas interfaces) que les permiten por un lado conectarse con la CPU y la memoria a través del bus del sistema o al de expansión y, por otro lado, conectarse con los dispositivos periféricos a través de enlaces dedicados para datos. Estos enlaces se caracterizan porque son más lentos, tienen una menor longitud de palabra y menores velocidades de transferencia de datos. Su diseño se basa en un estándar para permitir la interconexión de dispositivos de diferentes fabricantes.

A continuación se describirán algunos de los estándares más importantes utilizados en la interconexión del ordenador y los periféricos, haciendo para ello una distinción entre interfaces serie e interfaces paralelas:

### **Interfaces serie**

La conexión a través de esta interfaz es muy importante debido a su gran flexibilidad.

En los ordenadores personales la interfaz serie se utiliza para conectar múltiples dispositivos como plotters, módems, ratones y también impresoras.

En la transmisión serie se van transfiriendo los bits de información de uno en uno a través de una línea de datos, pudiendo ser las transferencias síncronas o asíncronas.

Si se utilizan señales adicionales (reloj o señales de petición y reconocimiento) para indicar cuándo el bit siguiente es válido, entonces se dice que la transmisión se realiza de forma síncrona. La principal ventaja de este tipo de transferencias es que el receptor puede funcionar a varias frecuencias de reloj (siempre que no sobrepase su frecuencia máxima de funcionamiento). Simplemente bastará con retrasar el envío de la señal de reconocimiento para ralentizar el protocolo.

En las transferencias asíncronas, por el contrario, tanto el receptor como el transmisor deben funcionar a la misma frecuencia. En este caso se envía también información de sincronización a través de la línea de datos, que se corresponde con un bit de comienzo (bit de start), que indica el comienzo de una unidad de datos, un bit de fin (bit de stop) indicando su finalización y, opcionalmente, un bit de paridad para controlar los posibles errores.

El bit de paridad lo generan los controladores serie de forma automática, pudiendo configurarse entre las opciones de: sin paridad, paridad par (odd), paridad impar (even), siempre un nivel alto (mark) o siempre un nivel bajo (space).

La tasa de transferencia de datos se mide en baudios. Los baudios indican el número de veces que puede cambiar una señal en la línea de transmisión por segundo.

### **La interface RS-232**

Este estándar lo incorporan todos los ordenadores personales y está definido por la EIA (Electronic Industries Association) aunque en Europa se le conoce como el estándar V.24 definido por la CCITT (Consultative Committee for International Telephone and Telegraph). En él se definen todas las características mecánicas, eléctricas y los protocolos necesarios para conectar un equipo terminal de datos (DTE- Data Terminal Equipment) con un equipo transmisor de datos (DCE – Data Carrier Equipment). Inicialmente se definió para realizar la comunicación entre un ordenador personal y un módem, aunque actualmente se utiliza con muchos otros propósitos para enviar datos de forma serial.

El estándar define voltajes que oscilan entre + [3-15] V para el nivel alto y – [3- 15] V para el nivel bajo. Debido a la gran diferencia de voltaje que existe entre los niveles altos y bajos, se permiten tasas de transferencia de hasta 115.200 baudios si la longitud del cable es de unas pocas decenas de metros.



Si se utiliza este estándar para conectar otros periféricos diferentes de los módems, éstos se comportan como dispositivos DTE y, por lo tanto, las señales cambian de significado.

## **Bluetooth**

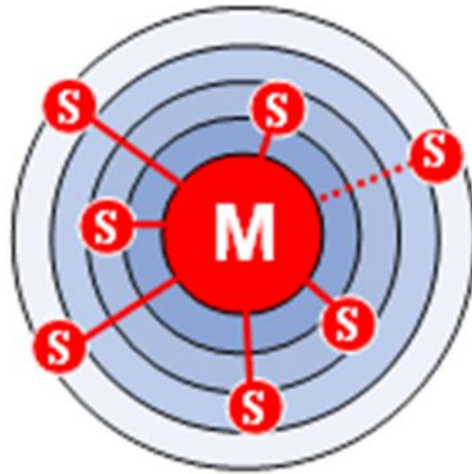
El estándar Bluetooth, del mismo modo que WiFi, utiliza la técnica FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum, en español Espectro ensanchado por saltos de frecuencia), que consiste en dividir la banda de frecuencia de 2.402 - 2.480 GHz en 79 canales (denominados saltos) de 1 MHz de ancho cada uno y, después, transmitir la señal utilizando una secuencia de canales que sea conocida tanto para la estación emisora como para la receptora.

Por lo tanto, al cambiar de canales con una frecuencia de 1600 veces por segundo, el estándar Bluetooth puede evitar la interferencia con otras señales de radio.

El estándar Bluetooth se basa en el modo de operación maestro/esclavo. El término "piconet" se utiliza para hacer referencia a la red formada por un dispositivo y todos los dispositivos que se encuentran dentro de su rango. Pueden coexistir hasta 10 piconets dentro de una sola área de cobertura.

Un dispositivo maestro se puede conectar simultáneamente con hasta 7 dispositivos esclavos activos (255 cuando se encuentran en modo en espera). Los dispositivos en una piconet poseen una dirección lógica de 3

bits, para un máximo de 8 dispositivos. Los dispositivos que se encuentran en el modo en espera se sincronizan, pero no tienen su propia dirección física en la piconet.



**Figura 54** Modo de operación maestro-esclavo

En realidad, en un momento determinado, el dispositivo maestro sólo puede conectarse con un solo esclavo al mismo tiempo. Por lo tanto, rápidamente cambia de esclavos para que parezca que se está conectando simultáneamente con todos los dispositivos esclavos.

Durante el uso normal, un dispositivo funciona en "modo pasivo", es decir, que está escuchando la red.

El establecimiento de una conexión comienza con una fase denominada "solicitud", durante la cual el dispositivo maestro envía una solicitud a todos los dispositivos que encuentra dentro de su rango, denominados puntos de

acceso. Todos los dispositivos que reciben la solicitud responden con su dirección.

El dispositivo maestro elige una dirección y se sincroniza con el punto de acceso mediante una técnica denominada paginación, que principalmente consiste en la sincronización de su reloj y frecuencia con el punto de acceso.

De esta manera se establece un enlace con el punto de acceso que le permite al dispositivo maestro ingresar a una fase de descubrimiento del servicio del punto de acceso, mediante un protocolo denominado SDP (Service Discovery Protocol, en español Protocolo de descubrimiento de servicios).

Cuando esta fase de descubrimiento del servicio finaliza, el dispositivo maestro está preparado para crear un canal de comunicación con el punto de acceso, mediante el protocolo L2CAP.

Según cuáles sean las necesidades del servicio, se puede establecer un canal adicional, denominado RFCOMM que funciona por el canal L2CAP, para proporcionar un puerto serial virtual. De hecho, algunas aplicaciones se han diseñado para que puedan conectarse a un puerto estándar, independientemente del hardware utilizado.

Por ejemplo, se han diseñado ciertos programas de navegación en carretera para la conexión con cualquier dispositivo GPS Bluetooth (GPS significa Global Positioning System [Sistema de posicionamiento global], un

sistema de localización geográfica por satélite para encontrar las coordenadas geográficas de un dispositivo móvil o de un vehículo).

El punto de acceso puede incluir un mecanismo de seguridad denominado emparejamiento, que restringe el acceso sólo a los usuarios autorizados para brindarle a la piconet cierto grado de protección.

El emparejamiento se realiza con una clave cifrada comúnmente conocida como "PIN" (PIN significa Personal Information Number [Número de identificación personal]). Para esto, el punto de acceso le envía una solicitud de emparejamiento al dispositivo maestro. La mayoría de las veces se le solicitará al usuario que ingrese el PIN del punto de acceso. Si el PIN recibido es correcto, se lleva a cabo la conexión.

En el modo seguro, el PIN se enviará cifrado con una segunda clave para evitar poner en riesgo la señal.

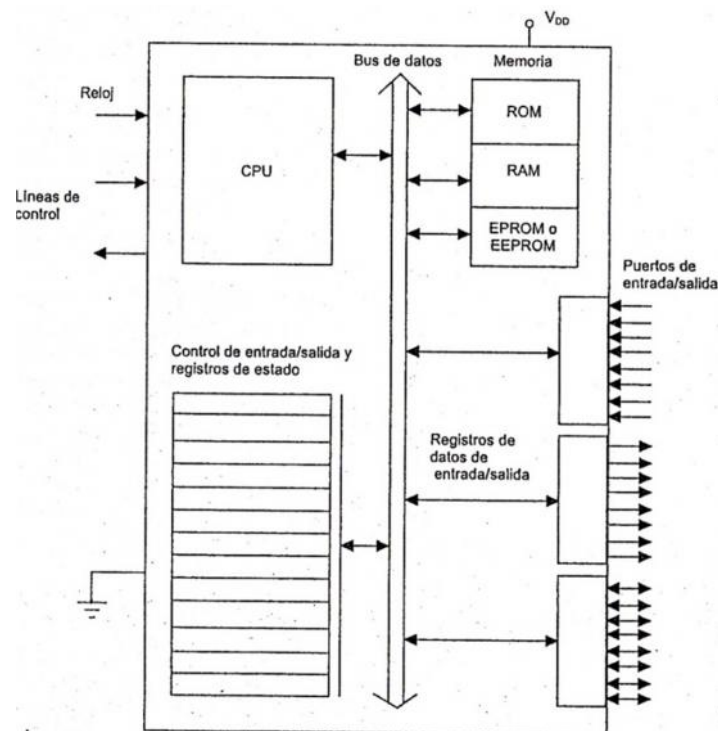
Cuando el emparejamiento se activa, el dispositivo maestro puede utilizar libremente el canal de comunicación establecido.

## **2.10 MICROCONTROLADORES.**

Un microcontrolador es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador (ver figura 55).

Se utiliza para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducida medida, suele ir incorporado en el propio dispositivo que gobierna. Esta última característica es la que le confiere la denominación de controlador incrustado (embedded controller).

En la memoria de un microcontrolador reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan la conexión de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.



**Figura 55** Diagrama de bloques de un microcontrolador

Un microcontrolador posee todos los componentes de un computador pero con unas características fijas que no pueden alterarse. Todos disponen de los bloques esenciales: procesador, memoria de datos y de instrucciones, módulos de E/S, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Además de estos elementos, existen una serie de recursos especiales que los fabricantes pueden ofertar, algunos amplían las capacidades de las memorias, otros incorporan nuevo recursos y hay quienes reducen las prestaciones al mínimo para aplicaciones muy simples.

Depende del programador el encontrar el modelo mínimo que se ajuste a sus requerimientos y así minimizar el coste.

Algunos de los principales recursos específicos que incorporan los microcontroladores son:

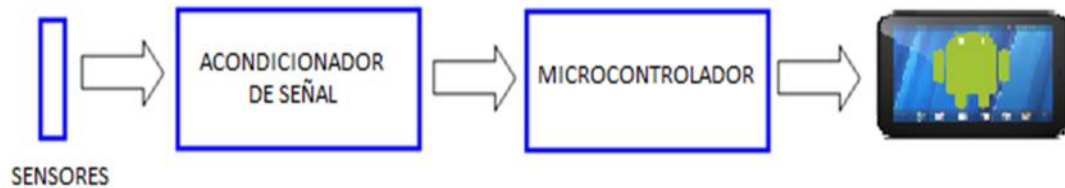
- Temporizadores (Timers).
- Protección frente a fallo de alimentación (Brown-out).
- Estado de bajo consumo.
- Conversores AD y DA.
- Modulador de anchura de pulsos PWM.
- Comparadores analógicos.
- Puertos de E/S digital.
- Puertos de comunicación: serie, CAN, USB, I2C.

## 2.11 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

### 2.11.1 PROCESO DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El proceso a seguir con las señales desde la adquisición de estas, por medio del sensor adecuado, hasta la digitalización consta de tres etapas:

1. *Conversión* de la magnitud a una señal eléctrica
2. *Adaptación* de la señal eléctrica para su lectura digital
3. Sistema hardware de *adquisición* de datos, generalmente a través de un computador.



**Figura 56** Proceso de adquisición de datos

#### **Acondicionador de señal**

El objetivo del acondicionador de señal es generar, a partir de lo obtenido por los sensores, una señal que sea aceptable por el microcontrolador. Los microcontroladores suelen admitir niveles de tensión que van entre unos márgenes determinados: -10V a 10V, 0 a 10V, 0 a 5V.

Las funciones principales que va a tener que realizar el acondicionador de señal son las siguientes:

- Transformación
- Amplificación
- Filtrado
- Excitación
- Linealización

**Transformación:** Los sensores pueden proporcionar una diferencia de potencial, o una variable de intensidad. Normalmente los microcontroladores admiten diferencias de potencial, por lo que si el sensor proporciona una variación de intensidad, esta debe ser convertida en una diferencia de potencial proporcional.

**Amplificación:** La señal proporcionada por los sensores suele ser de un valor muy pequeño, por lo que debe ser amplificada con el fin de que pueda ser detectada correctamente por el microcontrolador.

La amplificación debe ser tal que las variaciones de la señal recorran todo el margen del microcontrolador. La amplificación de las señales, en su origen, reduce el ruido que les puede afectar en su transmisión hasta el computador.



**Filtrado:** Con el filtrado se pretende eliminar ruidos de alta frecuencia que pueden hacer perder exactitud al microcontrolador. Lo ideal es transportar la señal del sensor lo más limpia posible al microcontrolador.

**Excitación:** Hay muchos sensores que necesitan de una excitación, bien en corriente, bien en tensión, para producir la variación proporcional a la magnitud a medir.

**Linealización:** No todos los sensores tienen una variación lineal con respecto a las variaciones de la magnitud que se miden; a veces es necesario realizar unos cálculos para convertir la respuesta del sensor en lineal.

## **CAPÍTULO 3**

### **CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS Y OPERACIONALES DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO**

#### **3.1 BALANCE ENERGÉTICO DEL COLECTOR SOLAR DE TIPO CILÍNDRICO PARABÓLICO (BENAVIDES & GUASUMBA, 2006)**

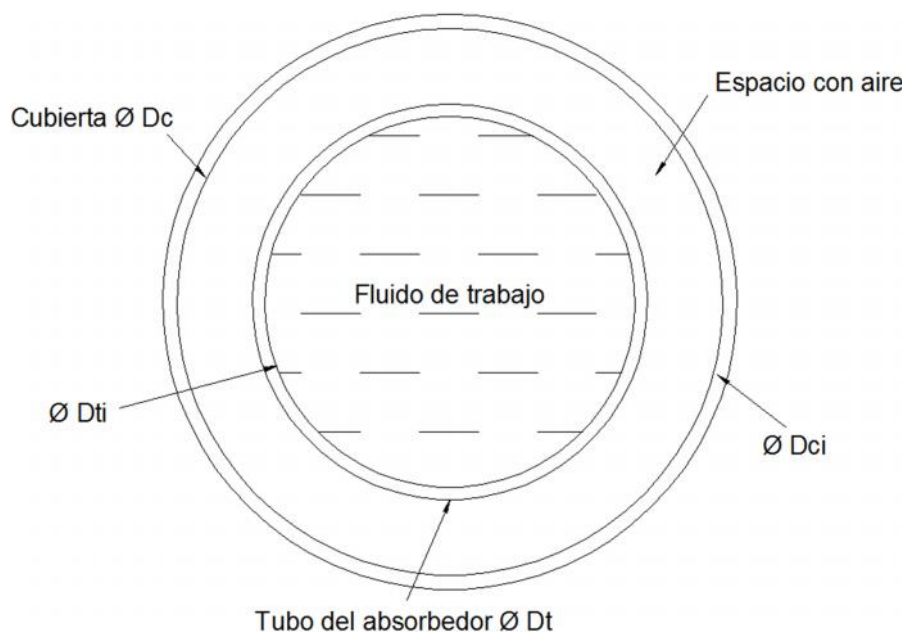
Para realizar el balance energético se requiere que se hagan las siguientes suposiciones.

1. El absorbedor está en equilibrio térmico (estado estable).
2. Los rayos del Sol se consideran paralelos y uniformes.
3. La reflejancia del espejo y la transmitancia de la cubierta son constantes sobre el espectro solar.
4. Las propiedades de absorptancia, emitancia, transmitancia y reflejancia no dependen de la temperatura.
5. Circunferencialmente el tubo del absorbedor tiene la misma temperatura debido a la alta conductividad térmica del tubo y al flujo del fluido dentro del mismo.
6. La radiación directa incidente sobre el absorbedor proviene solo de la superficie reflectante.
7. No existen áreas sombreadas en el absorbedor.

### 3.1.1 DETERMINACIÓN DE PÉRDIDAS (BENAVIDES & GUASUMBA, 2006)

Lo que fundamentalmente interesa conocer en un estudio de esta naturaleza son las pérdidas de energía. El objetivo de un colector solar es transferir energía radiante proveniente del Sol a un fluido, llamado fluido de trabajo, con el mínimo de pérdidas. Así al determinar el origen y magnitud de las pérdidas se describe la forma en que el colector funciona desde el punto de vista térmico.

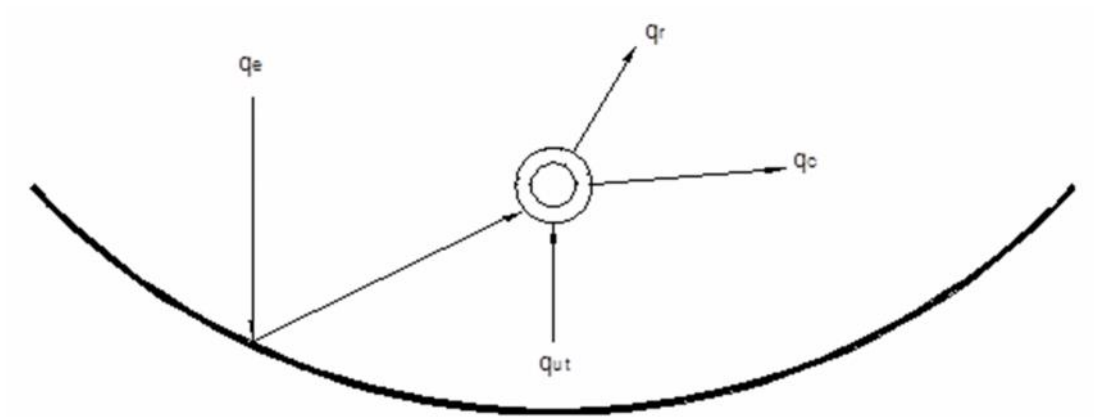
En la figura 57 se puede apreciar la vista del área transversal del absorbedor y observar las partes que lo conforman.



**Figura 57** Vista transversal del elemento absorbedor.

Para describir el comportamiento térmico del colector cilíndrico parabólico se plantea un balance de energía en el absorbedor. Véase figura 58.

Los calores que intervienen en el balance de energía se los expresa en (W/m).



**Figura 58** Factores que intervienen en el balance de energía del colector cilíndrico parabólico.

Aplicando la ley de la conservación de la energía en el absorbedor se tiene:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{alm}$$

$$q_e - q_r - q_c = q_{ut} \quad (3.1)$$

$$q_e - q_p = q_{ut} \quad (3.2)$$

donde:

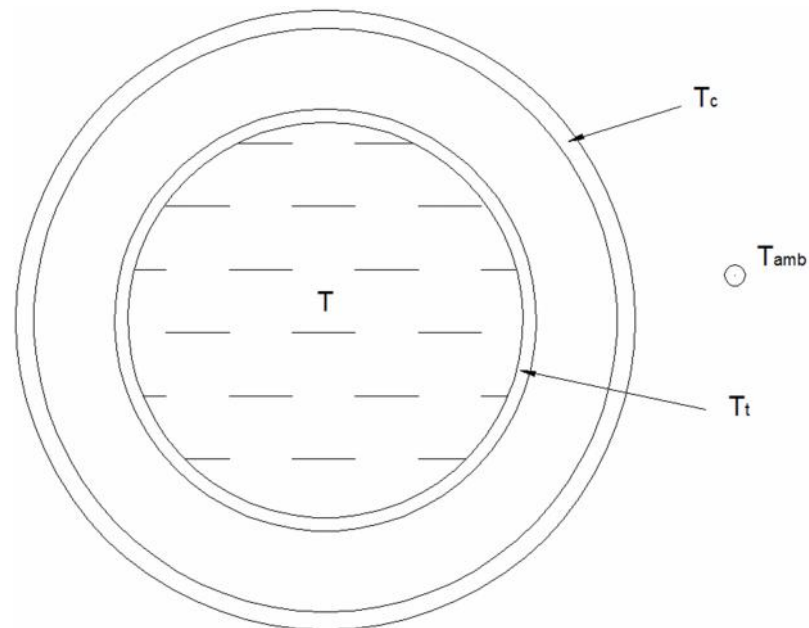
$E_{ent}$  Energía que entra al absorbedor ( W/m ).

$E_{sal}$  Energía que sale del absorbedor ( W/m ).

$\Delta E_{alm}$  Variación de la energía en el absorbedor ( W/m ).

- $q_{ut}$  Calor útil que absorbe el fluido de trabajo (W/m).
- $q_e$  Calor radiante efectivo que llega al tubo absorbedor ( W/m ).
- $q_r$  Calor perdido por radiación del absorbedor al medio ambiente (W/m).
- $q_c$  Calor perdido por convección del absorbedor al medio ambiente (W/m).
- $q_p$  Calor total de pérdidas que resulta de la suma de  $q_r$  y  $q_c$  ( W/m ).

En la figura 59 se puede observar la distribución de temperaturas que intervienen en el análisis térmico del absorbedor.

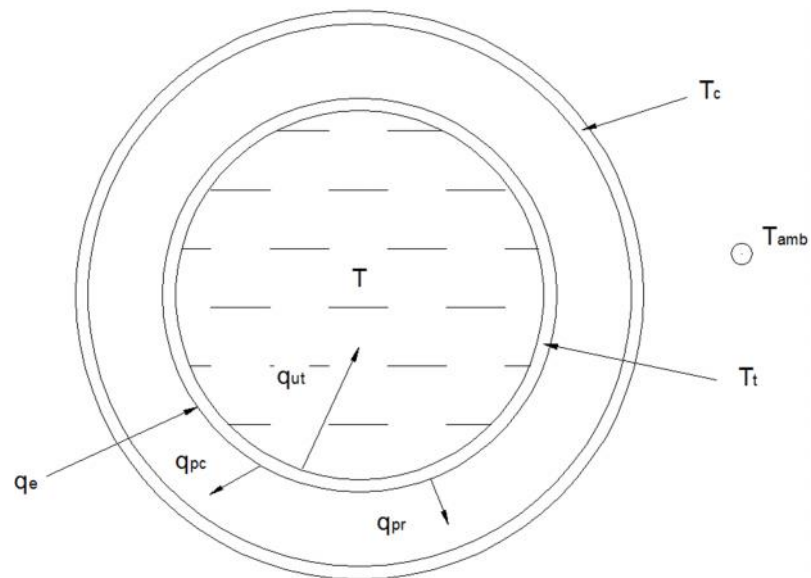


**Figura 59** Temperaturas en el elemento absorbedor.

- $T$  Temperatura del fluido de trabajo ( °K ).
- $T_t$  Temperatura del tubo del absorbedor ( °K ).
- $T_c$  Temperatura de la cubierta ( °K ).

### 3.1.2 BALANCE DE ENERGÍA EN EL TUBO DEL ABSORBEDOR.

A continuación se plantea un balance de energía en el tubo del absorbedor que se encuentra al interior de la cubierta. Véase figura 60.



**Figura 60** Calores que intervienen en el balance de energía en el tubo del absorbedor

Aplicando la ley de la conservación de la energía se tiene:

$$E_{ent} - E_{sal} = \Delta E_{alm}$$

La variación de la energía en el tubo del absorbedor se considera igual a cero porque toda la energía que entra al tubo se la cede al fluido de trabajo.

Por lo tanto:

$$E_{ent} = E_{sal}$$

$$q_e = q_{pc} + q_{pr} + q_{ut} \quad (3.3)$$

donde:

$q_{pr}$  Calor perdido por radiación entre el tubo del absorbedor y la cubierta ( W/m ).

$q_{pc}$  Calor perdido por convección entre el tubo del absorbedor y el aire atrapado entre el tubo y la cubierta ( W/m ).

Los calores de la ecuación 3.3 se los puede expresar con las siguientes fórmulas.

El calor perdido por radiación entre el tubo del absorbedor y la cubierta en ( W ) puede ser expresado con la fórmula de transferencia de calor por radiación entre dos superficies (Incropera & DeWitt, 1999).

$$Q_{pr} = A_t \cdot \tau \cdot F_{12} \cdot (T_t^4 - T_c^4) \quad (3.4)$$

donde:

$A_t$  Área por metro lineal del tubo del absorbedor ( m<sup>2</sup> ).

$$A_t = \pi \cdot D_t \cdot L \quad (3.5)$$

Debido a que la diferencia de temperaturas entre la superficie interior y exterior de la cubierta es muy baja, ya que el espesor de la cubierta es muy pequeño la transferencia de calor por conducción en la cubierta es despreciable, por esta razón se toma la temperatura del interior de la cubierta y exterior como similares, en la ecuación 3.4 se utiliza la temperatura exterior y no la interior por facilidades de cálculo en lo posterior para el análisis del colector.

En la figura 16 se muestran los términos  $D_t$  y  $L$ .

$D_t$  Diámetro exterior del tubo del absorbedor ( m ).

$L$  Longitud del colector ( m ).

Reemplazando la ecuación 5.5 en 5.4:

$$Q_{pr} = f \cdot D_t \cdot L \cdot \dagger \cdot F_{12} \cdot (T_t^4 - T_c^4)$$

Dividiendo  $Q_{pr}$  para  $L$ :

$$\frac{Q_{pr}}{L} = f \cdot D_t \cdot \dagger \cdot F_{12} \cdot (T_t^4 - T_c^4)$$

El calor  $q_{pr}$  expresado en ( W/m ) es:

$$q_{pr} = f \cdot D_t \cdot \dagger \cdot F_{12} \cdot (T_t^4 - T_c^4) \quad (3.6)$$



donde:

$\sigma$  Constante de Stefan Boltzman (  $W/m^2 \cdot ^\circ K$  ).

$F_{12}$  Factor de orientación para dos cilindros concéntricos (Incropera & DeWitt, 1999)

$$F_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_c} \left( \frac{D_t}{D_{ci}} \right)} \quad (3.7)$$

donde:

$\varepsilon_t$  Emisividad del tubo del absorbedor.

$\varepsilon_c$  Emisividad de la cubierta.

$D_{ci}$  Diámetro interno de la cubierta ( m ).

Reemplazando la ecuación 3.7 en 3.6 se tiene:

$$q_{pr} = \pi \cdot D_t \cdot \sigma \cdot \left[ \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_t} + \frac{1 - \varepsilon_t}{\varepsilon_c} \left( \frac{D_t}{D_{ci}} \right)} \right] \cdot (T_t^4 - T_{c1}^4) \quad (3.8)$$

Siguiendo con el análisis, el calor perdido por convección entre el tubo del absorbedor y el aire atrapado entre el tubo y la cubierta puede ser expresado con la fórmula de transferencia de calor por convección libre en el espacio anular entre dos tubos concéntricos horizontales largos (Incropera & DeWitt, 1999)

$$q_{pc} = \frac{2 \cdot f \cdot k_{ef} \cdot (T_t - T_c)}{\ln\left(\frac{D_{ci}}{D_t}\right)} \quad (3.9)$$

donde:

$K_{ef}$  Conductividad térmica efectiva del aire (W/m·°K) (Incropera & DeWitt, 1999)

$$\frac{k_{ef}}{k_a} = 0.386 \cdot \left(\frac{Pr_a}{0.861 + Pr_a}\right)^{1/4} \cdot (Rac_a)^{1/4} \quad (3.10)$$

donde:

$K_a$  Conductividad térmica del aire en el absorbedor (W/m·°K).

$Pr_a$  Número de Prandtl para el aire en el absorbedor.

$Rac_a$  Número de Rayleigh modificado para el aire (Incropera & DeWitt, 1999)

$$Rac_a = \frac{\ln\left(\frac{D_{ci}}{D_t}\right)^4}{es^3 \cdot (D_t^{-3/5} + D_{ci}^{-3/5})^5} \cdot Ral_{a1} \quad (3.11)$$

donde:

$Ral_a$  Número de Rayleigh para el aire en el absorbedor (Incropera & DeWitt, 1999)

$es$  Espesor del aire atrapado entre la cubierta y el tubo absorbedor (m).

$$Ra_{a1} = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_t - T_{c1}) \cdot e s^3}{\nu_a \cdot \alpha_a} \quad (3.12)$$

donde:

$g$  Aceleración gravitacional (  $m^2/s$  ).

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

$\nu_a$  Viscosidad cinemática del aire en el absorbedor (  $m^2/s$  ).

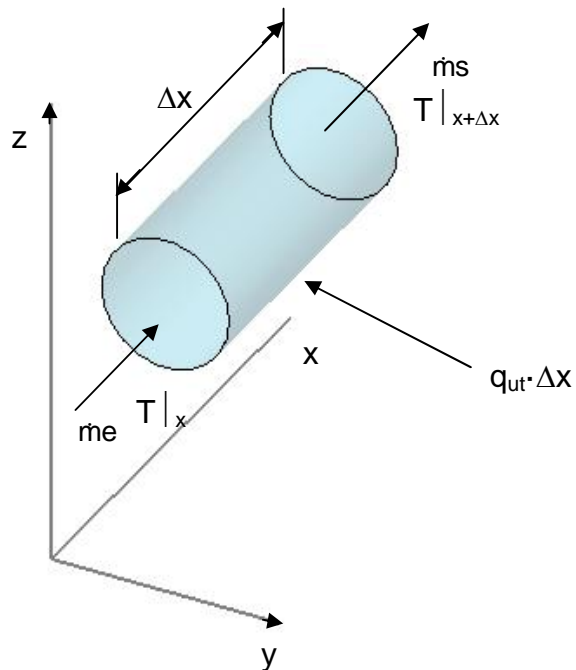
$\alpha_a$  Difusividad térmica del aire en el absorbedor (  $m^2/s$  ).

Las propiedades térmicas del aire deben ser evaluadas a la temperatura  $T_{faire}$ .

$$\beta_a = \frac{1}{T_{faire}} \quad (3.13)$$

$$T_{faire} = \frac{T_t + T_c}{2} \quad (3.14)$$

El calor útil  $q_{ut}$  está en función de la temperatura del fluido de trabajo, esta temperatura varía conforme el fluido pasa a través del tubo del absorbedor, es decir la temperatura  $T$  para esta zona varía en función de la longitud del absorbedor. Para encontrar una expresión de la temperatura del fluido de trabajo en función de la longitud  $L$  del absorbedor se hace un balance de energía sobre un pequeño elemento diferencial del fluido de trabajo. Véase figura 61



**Figura 61** Elemento diferencial del fluido de trabajo en la zona de líquido

Aplicando la ley de conservación de la energía en el elemento diferencial se tiene que:

$$q_{ut} \cdot \Delta x = \dot{m}_s \cdot h_s - \dot{m}_e \cdot h_e \quad (3.15)$$

$\Delta x$  Longitud del elemento diferencial del fluido de trabajo ( m ).

$\dot{m}_e$  Caudal másico del fluido de trabajo a la entrada ( Kg/s ).

$\dot{m}_s$  Caudal másico del fluido de trabajo a la salida ( Kg/s ).

$h_e$  Entalpía del fluido de trabajo a la entrada ( J/Kg ).

$h_s$  Entalpía del fluido de trabajo a la salida ( J/Kg ).

Como se tiene el mismo caudal másico a la salida y a la entrada, entonces:

$$\dot{m} = \dot{m}_s = \dot{m}_e \quad (3.16)$$

$$q_{ut} \cdot \Delta x = \dot{m} \cdot (h_s - h_e) \quad (3.17)$$

La diferencia de entalpías por termodinámica se puede expresar como (Cengel & Boles, 2000):

$$h_s - h_e = C_p \cdot (T|_{x+\Delta x} - T|_x) \quad (3.18)$$

Reemplazando la ecuación 3.18 en la ecuación 3.17:

$$q_{ut} \cdot \Delta x = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T|_{x+\Delta x} - T|_x)$$

$$q_{ut} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T|_{x+\Delta x} - T|_x)}{\Delta x} \quad (3.19)$$

$C_p$  Calor específico a presión constante del fluido de trabajo ( J/Kg·°K ).

$T|_x$  Temperatura del fluido de trabajo en el punto x ( °K ).

$T|_{x+\Delta x}$  Temperatura del fluido de trabajo en el punto x+Δx ( °K ).

El calor radiante efectivo que llega al tubo absorbedor en ( W ) es (Almanza & Muñoz, 1993):

$$Q_e = G_b \cdot A_a \cdot \zeta \cdot \gamma \cdot \tau_{cu} \cdot \alpha_{ab} \quad (3.20)$$

donde:

$A_a$  Área de apertura del colector (  $m^2$  ).

$$A_a = (B - D_c) L \quad (3.21)$$

En la figura 16 se muestran los términos B,  $D_c$  y L.

B Apertura de boca de la parábola ( m ).

$D_c$  Diámetro exterior de la cubierta ( m ).

Reemplazando 3.21 en 3.20:

$$Q_e = G_b \cdot (B - D_c) \cdot L \cdot \zeta \cdot \gamma \cdot \tau_{cu} \cdot \alpha_{ab}$$

Dividiendo  $Q_e$  para L:

$$\frac{Q_e}{L} = G_b \cdot (B - D_c) \cdot \zeta \cdot \gamma \cdot \tau_{cu} \cdot \alpha_{ab}$$

El calor radiante efectivo que llega al tubo del absorbedor en ( W/m ) es:

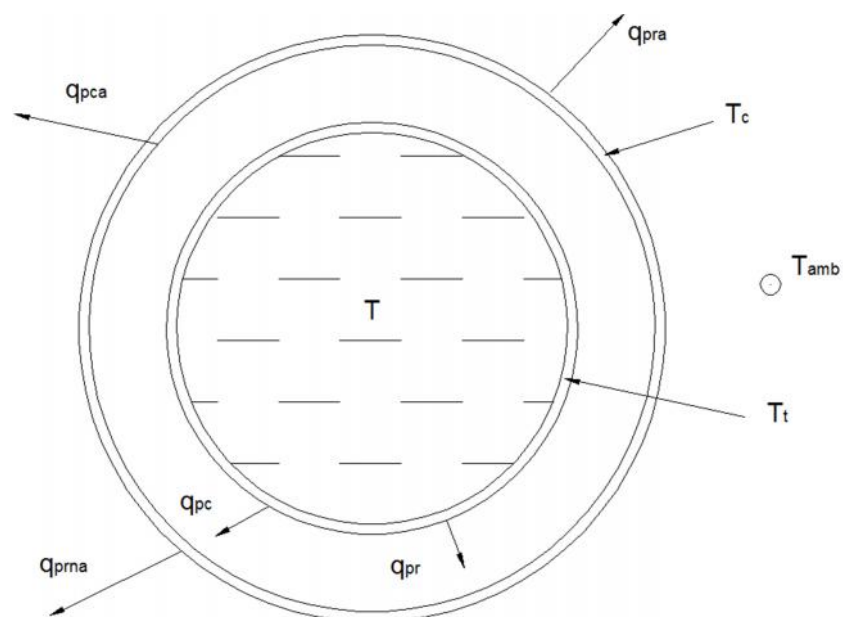
$$q_e = G_b \cdot (B - D_c) \cdot \zeta \cdot \gamma \cdot \tau_{cu} \cdot \alpha_{ab} \quad (3.22)$$

donde:

- $G_b$  Radiación solar directa incidente sobre el colector (  $W/m^2$  ).
- $\zeta$  Reflejanza de la superficie del colector.
- $\gamma$  Factor de forma de la superficie del colector.
- $\alpha_{ab}$  Absortancia del tubo del absorbedor.
- $\tau_{cu}$  Transmitancia de la cubierta.

### 3.1.3 BALANCE DE ENERGÍA EN LA CUBIERTA DEL ABSORBEDOR.

En esta parte se realiza un balance de energía en la cubierta del absorbedor. Véase figura 62.



**Figura 62** Calores que intervienen en el balance de energía en la cubierta del absorbedor

Aplicando la ley de la conservación de la energía se tiene:

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta E_{\text{alm}} \quad (3.23)$$

Toda la energía que entra a la cubierta la cede por esta razón la variación de energía es igual a cero.

Por lo tanto:

$$E_{\text{ent}} = E_{\text{sal}}$$

$$q_{\text{pc}} + q_{\text{pr}} = q_{\text{prna}} + q_{\text{pra}} + q_{\text{pca}}$$

donde:

$q_{\text{prna}}$  Calor perdido por radiación entre la cubierta y la superficie reflectante (W/m).

$q_{\text{pra}}$  Calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente (W/m).

$q_{\text{pca}}$  Calor perdido por convección desde la cubierta al medio ambiente (W/m).

El calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente, en ( W ) es (Incropera & DeWitt, 1999):



$$Q_{pma} = \frac{\tau \cdot (T_c^4 - T_s^4)}{\frac{1 - \nu_c}{\nu_c \cdot A_c} + \frac{1}{A_c} + \frac{1 - \nu_s}{\nu_s \cdot A_s}} \quad (3.24)$$

$$A_c = f \cdot D_c \cdot L \quad (3.25)$$

$$A_s = S \cdot L \quad (3.26)$$

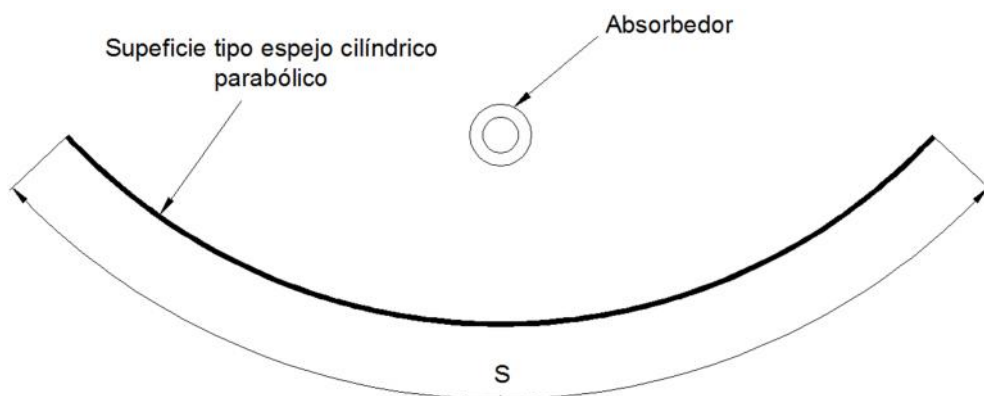
donde:

$A_c$  Área por metro lineal de la cubierta (  $m^2$  ).

$A_s$  Área de la superficie interna tipo espejo del colector (  $m^2$  ).

$S$  Longitud de la curvatura parabólica (  $m$  ).

En la figura 16 se muestran los términos  $D_c$ ,  $L$  y en la figura 63 el término  $S$ .



**Figura 63** Vista transversal del colector.

Reemplazando las ecuaciones 3.25 y 3.26 en la ecuación 3.24 se tiene:

$$Q_{prna} = \frac{\dagger \cdot (T_c^4 - T_s^4)}{\frac{1-v_c}{v_c \cdot f \cdot D_c \cdot L} + \frac{1}{f \cdot D_c \cdot L} + \frac{1-v_s}{v_s \cdot S \cdot L}} \quad (3.27)$$

Ordenando los términos de la ecuación 3.27:

$$\frac{Q_{prna}}{L} = \frac{f \cdot D_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_s^4)}{\frac{1-v_c}{v_c} + 1 + \frac{(1-v_s) \cdot f \cdot D_c}{v_s \cdot S}} \quad (3.28)$$

$$q_{prna} = \frac{f \cdot D_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_s^4)}{\frac{1-v_c}{v_c} + 1 + \frac{(1-v_s) \cdot f \cdot D_c}{v_s \cdot S}} \quad (3.29)$$

donde:

$T_s$  Temperatura de la superficie reflectante del colector ( °K ).

El calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente, en ( W ) es (Incropera & DeWitt, 1999) :

$$Q_{pra} = A_c \cdot v_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad (3.30)$$

Reemplazando 3.25 en 3.30:

$$Q_{pra} = f \cdot D_c \cdot L \cdot v_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4)$$

Dividiendo  $Q_{pra}$  para L:

$$\frac{Q_{pra}}{L} = f \cdot D_c \cdot v_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4)$$

El calor perdido por radiación entre la cubierta y el medio ambiente, en ( W/m ) es:

$$q_{pra} = f \cdot D_c \cdot v_c \cdot \dagger \cdot (T_c^4 - T_{sky}^4) \quad ( 3.31 )$$

$$T_{sky} = 0.0522 \cdot T_{amb}^{1.5} \quad ( 3.32 )$$

El calor perdido por convección desde la cubierta al medio ambiente, en (W/m) es:

$$Q_{pca} = A_c \cdot h_v \cdot (T_c - T_{amb}) \quad ( 3.33 )$$

donde:

$$h_v = 5.7 + 3.8 \cdot V_v \quad ( 3.34 )$$

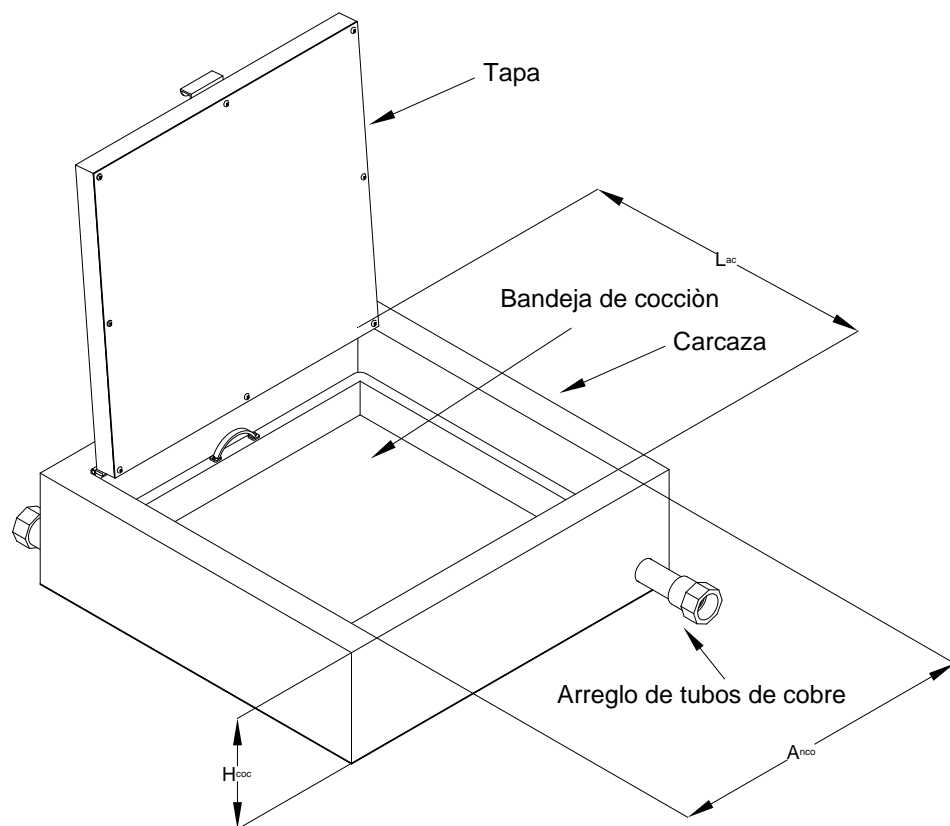
$V_v$  Velocidad del viento local. ( m/s )

El calor perdido por convección desde la cubierta al medio ambiente, en ( W/m ) es:

$$q_{pca} = f \cdot D_c \cdot h_v \cdot (T_c - T_{amb}) \quad ( 3.35 )$$

### 3.1.4 BALANCE DE ENERGÍA EN LA COCINA

La cocina está formada por: una carcasa, tapa, bandeja de cocción y un arreglo de tubos de cobre. el arreglo de tubos de cobre, es el encargado de transferir el calor hacia el interior de la cocina y calentar la bandeja de cocción junto con los alimentos. Véase figura 64.

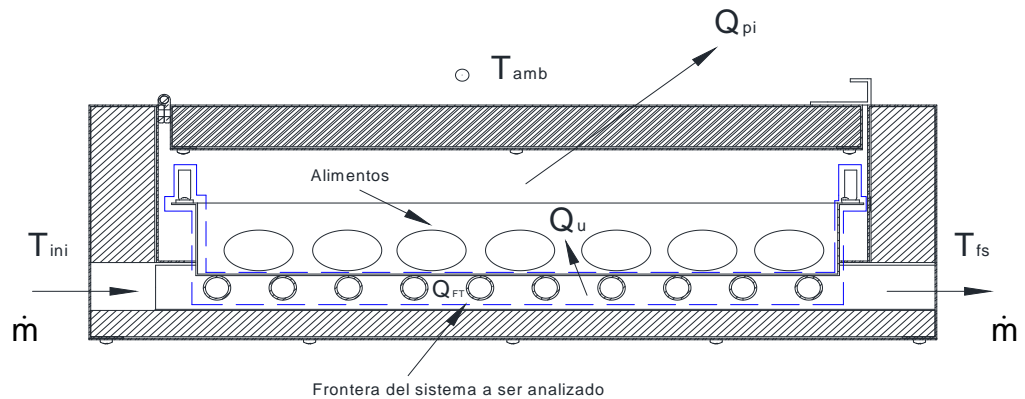


**Figura 64** Partes de la cocina

$A_{nco}$  Ancho interior de la cocina ( m ).

$L_{ac}$  Largo interior de la cocina ( m ).

Para predecir el comportamiento de la cocina se plantea un balance de energía en el arreglo de tubos de cobre, la bandeja de cocción y el fluido de trabajo tomándolos como sistema térmico.



**Figura 65** Factores que intervienen en el balance del sistema a ser analizado: arreglo de tubos de cobre, bandeja de cocción y fluido de trabajo.

Aplicando la ley de conservación de la energía.

$$E_{\text{ent}} - E_{\text{sal}} = \Delta E_{\text{alm}}$$

$$E_{\text{ent}} = 0$$

$$-Q_u - Q_{\text{pi}} = Q_{\text{FT}} \quad ( 3.36 )$$

donde:

$E_{\text{ent}}$  Energía que entra al sistema ( W ).

$E_{\text{sal}}$  Energía que sale del sistema ( W ).

$\Delta E_{\text{alm}}$  Variación de la energía interna del sistema ( W ).

$Q_{\text{pi}}$  Calor total de pérdidas ( W ).

- $Q_{FT}$  Variación del calor en la bandeja de cocción y el arreglo de tubos de cobre, incluido el fluido de trabajo ( W ).
- $Q_u$  Calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina ( W ).

### Determinación de pérdidas

Fundamentalmente interesa conocer las pérdidas de energía de la cocina. Así al determinar el origen y magnitud de las pérdidas se describe la forma en que la cocina funciona desde el punto de vista térmico.

El calor total de pérdidas puede ser expresado mediante la siguiente fórmula (Incropera & DeWitt, 1999).

$$Q_{pi} = U_p \cdot A_{coc} \cdot (T_p - T_{amb}) \quad (3.37)$$

donde:

$U_p$  Coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas en la cocina ( W/m<sup>2</sup>·°K ).

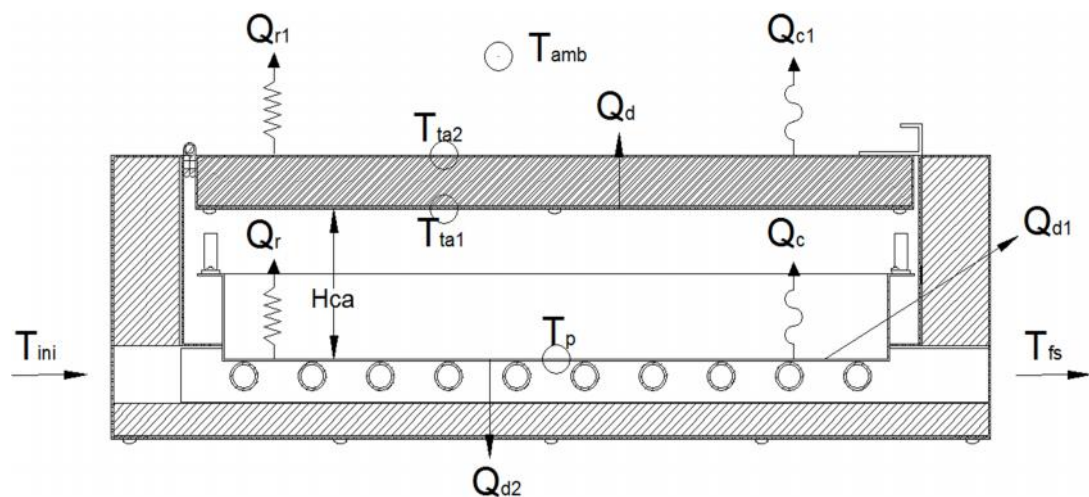
$A_{coc}$  Área de cocción ( m<sup>2</sup> ).

$T_p$  Temperatura de la bandeja de cocción ( °K ).

$T_{amb}$  Temperatura del medio ambiente ( °K ).

El coeficiente de transferencia de calor global de pérdidas se puede calcular realizando una analogía eléctrica de las resistencias térmicas y calores que intervienen en el análisis térmico.

Antes de realizar la analogía eléctrica es necesario reconocer todos los calores de pérdida y su origen. Véase figura 66



**Figura 66** Calores de pérdida en la cocina.

$T_p$  Temperatura de la bandeja de cocción ( °K ).

$T_{ta1}$  Temperatura de la pared interior de la tapa ( °K ).

$T_{ta2}$  Temperatura de la pared exterior de la tapa ( °K ).

$Q_r$  Calor perdido por radiación entre la bandeja de cocción y la tapa ( W ).

$Q_c$  Calor perdido por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa ( W ).

$Q_{r1}$  Calor perdido por radiación entre la tapa y el medio ambiente ( W ).

$Q_{c1}$  Calor perdido por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente ( W ).

$Q_d$  Calor perdido por conducción entre las paredes inferior y superior de la tapa ( W ).

$Q_{d1}$  Calor perdido por conducción por el perímetro de la cocina ( W ).

$Q_{d2}$  Calor perdido por conducción por la parte inferior de la cocina ( W ).

$H_{ca}$  Altura de la cavidad rectangular de la cocina ( m ).

El calor perdido entre la bandeja de cocción y la tapa se expresa con la ecuación de transferencia de calor entre dos planos paralelos (Incropera & DeWitt, 1999):

$$Q_r = \frac{A_{coc} \cdot \sigma \cdot (T_p^4 - T_{ta1}^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{ta}} - 1} \quad ( 3.38 )$$

Es aconsejable expresar los calores de pérdida en función de una diferencia de temperaturas y una resistencia térmica, además los calores de pérdida deben estar en unidades de ( W/m<sup>2</sup> ), todo esto por facilidades de cálculo.

$$\frac{Q_r}{A_{coc}} = \frac{\sigma \cdot (T_p^4 - T_{ta1}^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_{ta}} - 1}$$

El calor perdido por radiación entre la bandeja de cocción y la tapa expresado en ( W/m<sup>2</sup> ) es:



$$q'_r = \frac{\sigma \cdot (T_p^4 - T_{ta1}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{ta}} - 1} \quad (3.39)$$

donde:

$\varepsilon_p$  Emisividad de la bandeja de cocción.

$\varepsilon_{ta}$  Emisividad de la tapa.

Ordenando los términos de la ecuación 3.39, para expresarla en función de una diferencia de temperaturas y una resistencia térmica,  $q'_r$  queda así:

$$q'_r = \frac{T_p - T_{ta1}}{R_7} \quad (3.40)$$

donde:

$R_7$  Resistencia térmica por radiación entre la bandeja de cocción y la tapa (  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ).

$$R_7 = \frac{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{ta}} - 1}{\sigma \cdot (T_p^2 + T_{ta1}^2) \cdot (T_p + T_{ta1})} \quad (3.41)$$

El calor perdido por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa se expresa con la ecuación (Incropera & DeWitt, 1999):

$$Q_c = A_{coc} \cdot h_c \cdot (T_p - T_{ta1}) \quad (3.42)$$

El calor perdido por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa en ( $W/m^2$ ) es:

$$q'_c = \frac{T_p - T_{ta1}}{R_8} \quad (3.43)$$

donde:

$R_8$  Resistencia térmica por convección libre entre la bandeja de cocción y la tapa ( $m^2 \cdot ^\circ K/W$ ).

$$R_8 = \frac{1}{h_c} \quad (3.44)$$

donde:

$h_c$  Coeficiente de transferencia de calor por convección libre en ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ) (Incropera & DeWitt, 1999) es:

$$h_c = \frac{Nu \cdot k_a}{H_{ca}} \quad (3.45)$$

donde:

$Nu$  Número de Nusselt.

$k_{a2}$  Conductividad térmica del aire en la cocina ( $W/m \cdot ^\circ K$ ).

$H_{ca}$  Altura de la cavidad rectangular de la cocina ( m ).

$$Nu = 0.069 \cdot Ra_{a2}^{\frac{1}{3}} \cdot Pr_{a2}^{0.074} \quad \text{para } 3 \times 10^5 < Ra_{a2} < 7 \times 10^9 \quad (3.46)$$

donde:

$Ra_{a2}$  Número de Rayleigh para el aire en la cocina (Incropera & DeWitt, 1999).

$Pr_{a2}$  Número de Prandtl para el aire en la cocina.

$$Ra_{a2} = \frac{g \cdot \beta_a \cdot (T_p - T_{ta1}) \cdot H_{ca}^3}{\alpha_a \cdot \nu_a} \quad (3.47)$$

donde:

$g$  Aceleración gravitacional ( $m^2/s$ )

$\beta_{a2}$  Coeficiente volumétrico de expansión térmica en la cocina ( $^{\circ}K^{-1}$ ).

$\nu_{a2}$  Viscosidad cinemática del aire en la cocina ( $m^2/s$ ).

$\alpha_{a2}$  Difusividad térmica del aire en la cocina ( $m^2/s$ ).

Las propiedades térmicas del aire deben ser evaluadas a la temperatura

$T_{faire2}$ .

$$T_{faire2} = \frac{T_{mp} + T_{ta1}}{2} \quad (3.48)$$

$$\beta_{a2} = \frac{1}{T_{faire2}} \quad (3.49)$$

El calor perdido por radiación entre la tapa y el medio ambiente se expresa como (Incropera & DeWitt, 1999):

$$Q_{r1} = A_{coc} \cdot \varepsilon_{ta} \cdot \sigma \cdot (T_{ta2}^4 - T_{sky}^4) \quad (3.50)$$

El calor perdido por radiación entre la tapa y el medio ambiente expresado en ( W/m<sup>2</sup> ) es:

$$q'_{r1} = \frac{T_{ta2} - T_{sky}}{R_g} \quad (3.51)$$

donde:

$R_g$  Resistencia térmica por radiación entre la tapa y el medio ambiente ( m<sup>2</sup>·°K/W ).

$$R_g = \frac{1}{\sigma \cdot \epsilon_{ta} \cdot (T_{ta2}^2 + T_{sky}^2) \cdot (T_{ta2} + T_{sky})} \quad (3.52)$$

El calor perdido por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente se expresa como:

$$Q_{c1} = A_{coc} \cdot h_v \cdot (T_{ta2} - T_{amb}) \quad (3.53)$$

El calor perdido por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente expresado en ( W/m<sup>2</sup> ) es:

$$q'_{c1} = \frac{T_{ta2} - T_{amb}}{R_{10}} \quad (3.54)$$

donde:

$R_{10}$  Resistencia térmica por convección forzada entre la tapa y el medio ambiente ( m<sup>2</sup>·°K/W ).

$$R_{10} = \frac{1}{h_v} \quad (3.55)$$

donde:

$h_v$  Coeficiente de transferencia de calor por viento (  $W/m^2 \cdot ^\circ K$  ).

El calor perdido por conducción entre las paredes inferior y superior de la tapa se expresa como:

$$Q_d = \frac{A_{coc} \cdot (T_{ta1} - T_{ta2})}{R_{11}} \quad (3.56)$$

El calor perdido por conducción entre las paredes inferior y superior de la tapa expresado en (  $W/m^2$  ) es:

$$q'_d = \frac{T_{ta1} - T_{ta2}}{R_{11}} \quad (3.57)$$

donde:

$R_{11}$  Resistencia térmica de conducción entre las paredes de la tapa  
(  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ) (Incropera & DeWitt, 1999).

$$R_{11} = 2 \cdot \frac{e_{ac}}{k_{ac}} + \frac{e_{ai}}{k_{ai}} \quad (3.58)$$

donde:

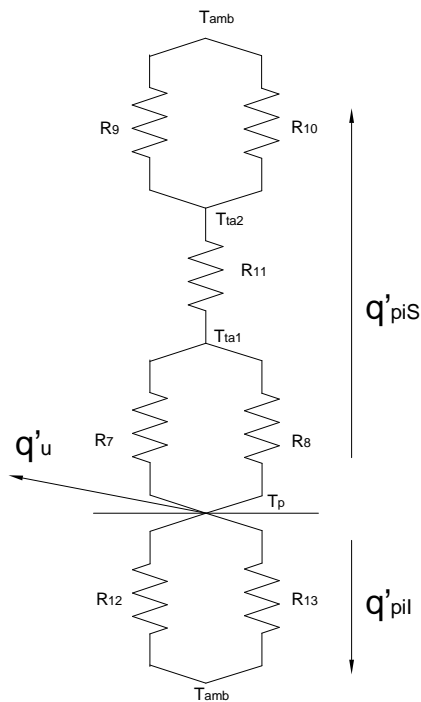
$e_{ac}$  Espesor de la pared de la tapa ( m ).

$K_{ac}$  Conductividad térmica del material de la tapa (  $W/m \cdot ^\circ K$  ).

$e_{ai}$  Espesor del aislante al interior de la tapa ( m ).

$K_{ai}$  Conductividad térmica del aislante (  $W/m \cdot ^\circ K$  ).

Expresadas las fórmulas de los calores de pérdida, se hace una analogía eléctrica de las resistencias de pérdida que intervienen en el análisis térmico. Véase figura 67.



**Figura 67** Red eléctrica térmica equivalente de las resistencias térmicas de pérdida que intervienen en el análisis térmico de la cocina.

Los términos  $q'_u$ ,  $q'_{piS}$ ,  $q'_{pil}$ ,  $R_{12}$  y  $R_{13}$  que se observan en la figura 65 representan:

$q'_u$  Calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina ( $W/m^2$ ).

$q'_{piS}$  Calor de pérdidas superiores ( $W/m^2$ ).

$q'_{pil}$  Calor de pérdidas inferiores ( $W/m^2$ ).

$R_{12}$  Resistencia térmica de conducción por el perímetro de la cocina  
(  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ).

$$R_{12} = \frac{A_{coc}}{\frac{k_{ai}}{e_{la}} \cdot P_{coc} \cdot H_{coc}} \quad (3.59)$$

$P_{coc}$  Perímetro interior de la cocina ( m ).

$H_{coc}$  Altura de la cocina ( m ).

$e_{la}$  Espesor del aislante lateral de la cocina ( m ).

$$P_{coc} = 2 \cdot A_{nco} + 2 \cdot L_{ac} \quad (3.60)$$

Los términos  $A_{nco}$  y  $L_{ac}$  se pueden observar en la figura 62

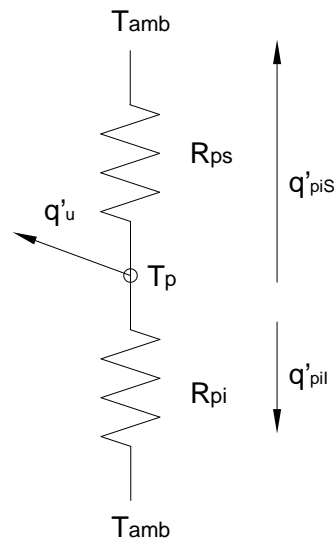
$R_{13}$  Resistencia térmica de conducción por la parte inferior de la cocina  
(  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ).

$$R_{13} = \frac{e_{po}}{k_{ai}} \quad (3.61)$$

$e_{po}$  Espesor del aislante inferior de la cocina ( m ).

La red eléctrica térmica equivalente de la figura 65 se la puede representar por una red simplificada.

Véase figura 68.



**Figura 68** Red eléctrica térmica equivalente simplificada de la cocina.

Los términos  $R_{ps}$  y  $R_{pi}$  que se observan en la figura 66 representan:

$R_{ps}$  Resistencia térmica de pérdidas superiores (  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ).

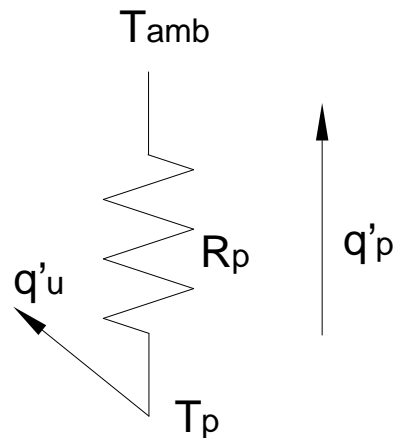
$$R_{ps} = \frac{R_7 \cdot R_8}{R_7 + R_8} + \frac{R_9 \cdot R_{10}}{R_9 + R_{10}} + R_{11} \quad (3.62)$$

$R_{pi}$  Resistencia térmica de pérdidas inferiores (  $m^2 \cdot ^\circ K/W$  ).

$$R_{pi} = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13}} \quad (3.63)$$

La red eléctrica térmica equivalente de la figura 66 se la puede expresar mediante una red más simplificada final. Véase figura 69.





**Figura 69** Red eléctrica térmica equivalente simplificada final en la cocina.

El término  $R_p$  que se observa en la figura 69 representa la resistencia térmica global de pérdidas.

$$R_p = \frac{R_{ps} \cdot R_{pi}}{R_{ps} + R_{pi}} \quad (3.64)$$

Finalmente para calcular el coeficiente global de transferencia de calor de pérdidas en la cocina se utiliza la siguiente fórmula:

$$U_p = \frac{1}{R_p} \quad (3.65)$$

El calor  $Q_{FT}$  también puede ser calculado con la siguiente fórmula:

$$Q_{FT} = \frac{T_{mf} - T_{mp}}{R_{fp}} \quad (3.66)$$

donde:

$T_{mf}$  Temperatura media del fluido de trabajo ( °K ).

$T_{mp}$  Temperatura media de la bandeja de cocción ( °K ).

$R_{fp}$  Resistencia térmica desde el fluido de trabajo hasta la bandeja de cocción ( °K/W ) (Duffie & Beckman, 1974).

$$R_{fp} = \frac{1}{h_f \cdot \pi \cdot D_i \cdot N^{\circ}_{\text{tubos}} \cdot L_{ba}} \quad (3.67)$$

El calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina se puede expresar como (Cengel & Boles, 2000):

$$Q_U = \frac{\Delta E_{\text{int}}}{t_{\text{coc}}} \quad (3.68)$$

donde:

$\Delta E_{\text{int}}$  Variación de la energía interna del aire y los alimentos al interior de la cocina ( J ).

$t_{\text{coc}}$  Tiempo requerido para la cocción ( s ).

$$\Delta E_{\text{int}} = \Delta E_{\text{al}} + \Delta E_{\text{aire}} \quad (3.69)$$

donde:

$\Delta E_{\text{al}}$  Variación de la energía interna de los alimentos ( J ).

$\Delta E_{\text{aire}}$  Variación de la energía interna del aire al interior de la cocina ( J ).

$$\Delta E_{al} = m_{al} \cdot Cp_{al} \cdot (T_{coc} - T_{amb}) \quad (3.70)$$

$$\Delta E_{aire} = m_{aire} \cdot Cp_{aire} \cdot (T_{coc} - T_{amb}) \quad (3.71)$$

donde:

$m_{al}$  Masa de los alimentos ( Kg ).

$m_{aire}$  Masa del aire al interior de la cocina ( Kg ).

$Cp_{al}$  Calor específico de los alimentos ( J/Kg.°K ).

$Cp_{aire}$  Calor específico del aire ( J/Kg.°K ).

$T_{coc}$  Temperatura de cocción ( °K ).

$$m_{aire} = A_{coc} \cdot H_{ca} \cdot \rho_a \quad (3.72)$$

donde:

$\rho_a$  Densidad del aire ( Kg/m<sup>3</sup> ).

Las propiedades térmicas del aire  $Cp_{aire}$  y  $\rho_a$  deben ser evaluadas a la temperatura  $T_{as}$ .

$$T_{as} = \frac{T_{coc} + T_{amb}}{2} \quad (3.73)$$

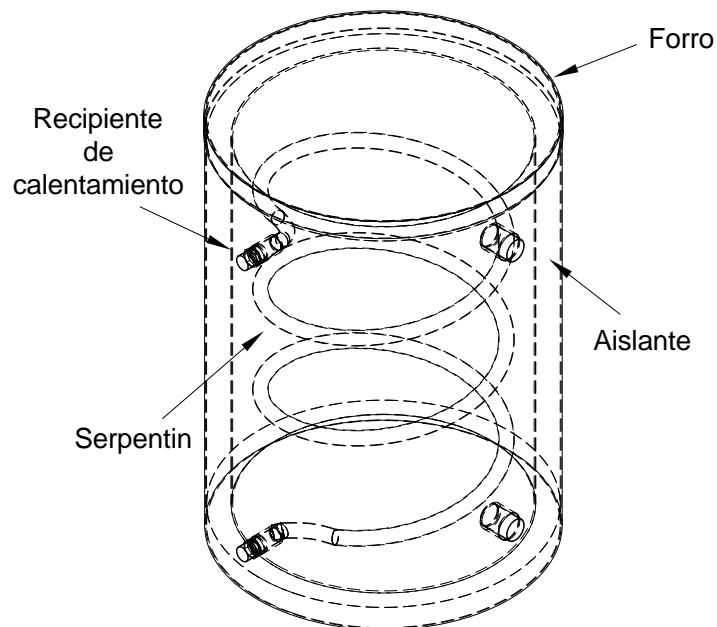
El calor útil que absorbe los alimentos y el aire al interior de la cocina expresado en ( W/m<sup>2</sup> ) se puede expresar como:

$$q'_U = \frac{Q_U}{A_{coc}} \quad (3.74)$$

### 3.1.5 BALANCE EN TANQUE CALENTADOR

El tanque calentador consiste de: recipiente de calentamiento, serpentín, aislante y forro.

El serpentín transporta el fluido de trabajo que sale de la cocina y cede calor al agua almacenada en el recipiente de calentamiento. Véase figura 70.



**Figura 70** Partes del tanque calentador

El tanque calentador tiene una capacidad para agua de 23 lt, fabricado en acero inoxidable. El serpentín es de tubo de cobre flexible de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro nominal.

### Variación de energía en el fluido de trabajo

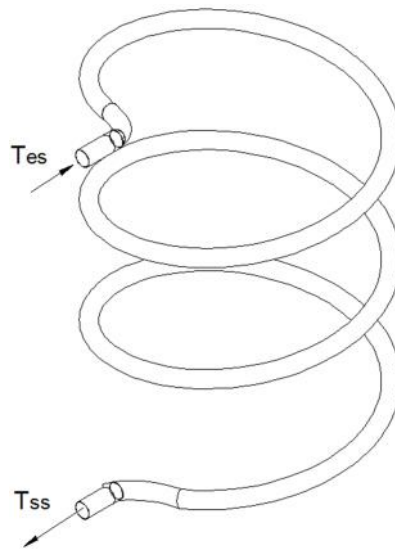
El calor transferido del fluido de trabajo al pasar por el serpentín del tanque calentador lo podemos calcular mediante:

$$Q_A = \dot{m} \cdot C_P \cdot (T_{sS} - T_{eS}) \quad (3.75)$$

donde:

$T_{eS}$  Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del serpentín ( °K ).

$T_{sS}$  Temperatura del fluido de trabajo a la salida del serpentín ( °K ).



**Figura 71** Serpentín

## 3.2 CARACTERÍSTICAS OPERACIONALES DEL COLECTOR

**Tabla 8 Cuantificaciones de las variables**

Fluido de Trabajo	Aceite Térmico
Caudal Másico	0.08 Kg/s
Volumen de Agua a calentar	23 lts.

**Fuente:** Benavides, S., Guasumba, J.: Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE, 2006

## 3.3 PARÁMETROS FUNCIONALES

### 3.3.1 TEMPERATURAS

**Tabla 9 Temperaturas Operacionales del CCP**

DESCRIPCIÓN	Parámetro	Valor °C	Valor °K
Temperatura Ambiente Promedio Sangolquí	$T_{amb}$	22	295,15
Temperatura de bandeja de cocción	$T_b$	42	315,15
Temperatura a la entrada concentradores	$T_i$	57	330,15
Temperatura a la salida concentradores	$T_f$	82	355,15

**Fuente:** Benavides, S., Guasumba, J.: Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE, 2006

## 3.4 PARÁMETROS DIMENSIONALES

**Tabla 10 Dimensiones**

DESCRIPCIÓN	Parámetro	Valor	Unidad
Ancho útil de la bandeja de Cocción	$A_{ba}$	0,372	m
Capacidad del tanque alimentador	$V_{talimentador}$	15	gal
Espesor del aislante al interior de la tapa	$e_{ai}$	0,026	m
Espesor de la pared de la tapa	$e_{ac}$	0,001	m

Continua 

DESCRIPCIÓN	Parámetro	Valor	Unidad
Espesor del aislante lateral de la cocina	$e_{la}$	0,037	m
Espesor del aislante inferior de la cocina	$e_{po}$	0,024	m
Altura de la cavidad rectangular de la cocina	$H_{ca}$	0,08045	m
Altura de la cocina	$H_{coc}$	0,151	m
Diámetro interior del tubo de cobre de la cocina	$D_i$	0,0138	m
Diámetro exterior del tubo de cobre de la cocina	$D_e$	0,1585	m
Distancia entre tubos de cobre	$W$	0,038	m
Espesor de la bandeja de cocción		0,001	m
Espesor del aislante en la bandeja de conexión	$E_{at}$	0,0508	m
Diámetro exterior del recipiente de calentamiento	$D_{eT}$	0,31	m
Diámetro interno del recipiente de calentamiento	$D_{iT}$	0,306	m
Altura del recipiente de calentamiento	$H_t$	0,45	m
Diámetro exterior del forro	$D_{eF}$	0,364	m
Diámetro interior del forro	$D_{iF}$	0,362	m
Altura del forro	$H_F$	0,501	m
Diámetro interior del serpentín	$D_{iS}$	0,010922	m
Diámetro exterior del serpentín	$D_{eS}$	0,0127	m
Altura del tanque	$H_{ta}$	0,65	m
Diámetro exterior del tanque de alimentación	$D_{ta}$	0,31	m
Diámetro interior del tanque de alimentación	$D_{ta}$	0,307	m
Espesor del material del tanque calentador	$E_{tac}$	0,0015	m
Diámetro de tubería a la entrada de la cocina	$n_1$	1	in
Diámetro de tubería a la salida de la cocina	$n_2$	1/2	in

**Fuente:** Benavides, S., Guasumba, J.: Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE,

### 3.5 PARÁMETROS ENERGÉTICOS

Tabla 11 Constantes Térmicas

DESCRIPCIÓN	Parámetro	Valor	Unidad
Conductividad Térmica de la tapa de la cocina	$K_{ac}$	15,1	W/m °K
Conductividad Térmica del aislante de la cocina	$K_{ai}$	0,032	W/m °K
Conductividad Térmica de la bandeja de cocción	$K_{ba}$	15,1	W/m °K
Conductividad Térmica del fluido de Trabajo	$K_w$	0,11596	W/m °K
Conductividad Térmica del aislante	$K_2$	0,032	W/m °K
Conductividad Térmica de la cubierta	$K_3$	1,4	W/m °K
Conductividad Térmica del Tubo del Absorbedor	$K_4$	372,1	W/m °K
Conductividad Térmica del Material del arreglo de tubos de cobre	$K_5$	372,1	W/m °K
Conductividad Térmica del Serpentin	$K_s$	372,1	W/m °K
Conductividad Térmica del Material de Recipiente de Calentamiento	$K_T$	15,1	W/m °K
Calor específico a presión constante del fluido de trabajo	$C_p$	2746,5	J/Kg °K
Constante de Stefan Boltzman		$5,67 \times 10^{-8}$	W/m <sup>2</sup> °K <sup>4</sup>
Densidad del material del tanque de alimentación	$m$	8000	Kg/m <sup>3</sup>
Densidad del Fluido de Trabajo	$w$	873,45	Kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad cinemática del fluido de trabajo		$4,018 \times 10^{-2}$	N s/m <sup>2</sup>
Absortividad del tubo del absorbedor	$a_b$	0,9	
Emisividad de la bandeja de cocción	$P$	0,9	
Emisividad de la tapa	$t_a$	0,9	
Emisividad del tubo del absorbedor	$t$	0,9	
Emisividad de la cubierta	$c$	0,9	
Emisividad de la película reflectiva	$s$	0,9	
Transmitancia de la cubierta	$c_u$	0,9	
Reflejancia de la película reflectiva		0,95	
Factor de forma de la superficie del colector		0,85	

Fuente: Benavides, S., Guasumba, J.: Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE,



### 3.6 PARÁMETROS GEOMÉTRICOS

Tabla 12 Dimensiones Geométricas del CCP

DESCRIPCIÓN	Parámetro	Valor	Unidad
Apertura de boca de la parábola	B	1,2	m
Profundidad de la parábola	C	0,3	m
Distancia Focal	F	0,3	m
Longitud de la curvatura de la parábola	S	1,37735	m
Diámetro exterior del tubo del absorbedor	$D_t$	0,028575	m
Diámetro interior del tubo del absorbedor	$D_{ti}$	0,026035	m
Diámetro exterior de la cubierta	$D_c$	0,047	m
Diámetro interior de la cubierta	$D_{ci}$	0,044	m
Relación de concentración	$Co$	13	
Longitud de la tubería de conexión	$X_t$	6,612	m
Ecuación de la Parábola		$y^2 = 1,2 z$	

**Fuente:** Benavides, S., Guasumba, J.: Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico, ESPE,

2006

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE GIRO

El propósito del diseño de un sistema de automático de giro para los concentradores es que estos siempre estén orientados hacia el sol y así tener una mayor eficiencia del colector ya que se podrá tener una mayor concentración de radiación solar.

Los componentes mecánicos que formaran parte del equipo del sistema y que por ende tendrán que ser implementados en el equipo son: un motor eléctrico con la potencia necesaria para mover los concentrados y de un sistema de transmisión de potencia.

Los componentes electrónicos que tendrán que ser implementados en el equipo son: un sensor de posición (potenciómetro) y de un microcontrolador que llevará el control de posición y giro de los concentradores

Los componentes mencionados deben cumplir con los siguientes parámetros de diseño.

- Los concentradores deben girar alrededor de su eje  $15^{\circ}$  por cada hora del día

- El giro de los concentradores se lo realizará en ambos sentidos.
- La amplitud de giro de los concentradores debe ser de  $180^{\circ}$
- El posicionamiento inicial de los concentradores dependerá de la hora del día en que se encienda el equipo
- La velocidad en la que regresaran los concentrados a su posición inicial será mayor con relación a la velocidad de seguimiento.

## **4.1 DISEÑO MECÁNICO**

### **4.1.1 TRANSMISIÓN DE POTENCIA**

Se denomina transmisión mecánica a un mecanismo encargado de transmitir potencia entre dos o más elementos dentro de una máquina.

Los motores eléctricos por lo general proporcionan velocidades demasiado grandes y entregan un par torsional muy pequeño para que se adapten a la aplicación final de accionamiento. Por esto, y debido a que el movimiento del giro del colector tiene que ser relativamente lento, es necesario el diseño de un mecanismo de transmisión que permita obtener una velocidad baja en el motor empleado y además de esto obtener un torque necesario para vencer las inercias de los componentes del colector.

Los impulsores de cadena se emplean casi siempre a velocidades más bajas, con los consecuentes torques de mayor magnitud.

Los eslabones de cadenas de acero tienen una alta resistencia a los esfuerzos de tracción para que sean capaces de soportar las considerables fuerzas que resultan de un torque de gran magnitud, es por ello que se emplea este tipo de impulsor para satisfacer el requerimiento.

### **Impulsores de cadena**

Una cadena es un elemento de transmisión de potencia que se fabrica como una serie de eslabones que se unen mediante pernos. El diseño proporciona flexibilidad mientras permite que la cadena transmita fuerzas de tracción cuya magnitud es considerable.

Cuando transmite potencia entre flechas o ejes que giran, la cadena activa ruedas dentadas que se enlazan, se conocen como ruedas dentadas.

El tipo más común de cadena es la cadena de rodamientos, en la que el rodamiento de cada perno proporciona una fricción excepcionalmente baja entre la cadena y las ruedas dentadas. Otros tipos incluyen una variedad de diseños extendidos de eslabones que casi siempre se emplean en transportadores.

La cadena de rodamientos se clasifica con base en su paso, la distancia entre partes correspondientes de eslabones adyacentes. El paso se ejemplifica, por lo regular, como la distancia entre pernos adyacentes

### **Diseño de la transmisión de cadenas**

Para realizar el diseño de la transmisión de cadenas se procedió tomando en cuenta el valor del torque necesario para girar los concentradores parabólicos del colector, dicho valor fue de 320 Nm. (Benavides & Guasumba, 2006) con una aceleración angular de  $0.5 \text{ rad/s}^2$ .

Con el valor del torque y sabiendo que los concentradores deberán girar a una velocidad angular de 1 RPM por diseño (Mott, 2006), la potencia a transmitir deberá ser igual a 0.04 hp.

### **Factor de servicio**

Se especifica un factor de servicio que dependerá de la aplicación donde funcionará la transmisión y nos permitirá calcular la potencia de diseño. De la tabla 13 para choques moderados y un impulsor de motor eléctrico tenemos que el factor de servicio;  $FS = 1.3$

$$\text{Potencia de diseño} = 1.3 (0.04) \quad ( 4.1 )$$

$$\text{Potencia de diseño} = 0.052 \text{ hp}$$

**Tabla 13 Factores de servicio para transmisiones por cadenas**

TIPO DE CARGA	TIPO DE IMPULSOR		
	Impulsor hidráulico	Motor eléctrico o turbina	Motor de combustión interna con transmisión mecánica
Uniforme (agitadores, ventiladores, transportadores con carga ligera y uniforme)	1.0	1.0	1.2
Choque moderado (máquinas herramientas, grúas, transportadores pesados, mezcladoras de alimento y molinos)	1.2	1.3	1.4
Choque pesado (prensas de troquelado, molinos de martillos, transportadores alternos, accionamientos de molino de rodillos)	1.4	1.5	1.7

**Fuente:** MOTT, R. Diseño de Elementos de Máquinas 4ta. Edición

### Relación de transmisión

Se calcula la relación deseada, teniendo en cuenta que la relación de velocidad máxima debe ser 7 (Mott, 2006).

Con la velocidad de salida deseada, se tiene

$$\text{Relación} = (5.36 \text{ rpm}) / (1 \text{ rpm}) \quad (4.2)$$

$$\text{Relación} = 5.36$$

### Selección de cadenas y catarinas

Para la correcta selección tanto de las cadenas y catarinas nos ayudamos de catálogos en donde se encuentran diferentes tipos según la capacidad de potencia.

De acuerdo a las tablas correspondientes a la capacidad de potencia para seleccionar el paso de la cadena, para una sola hilera, la cadena número 40, con paso  $p = \frac{1}{2}$  pulg es la más adecuada. Con una Catarina de 12 dientes, la capacidad es 0.06 hp a 5 RPM. A esta velocidad se requiere lubricación tipo A (lubricación manual o por goteo).

Se calcula la cantidad necesaria de dientes de la rueda grande.

$$N_2 = N_1 \times \text{relación} \quad (4.3)$$

$$N_2 = 12 \times 5.36 = 64.32$$

Utilizamos 60 dientes

La velocidad de salida es:

$$n_2 = n_1 \left( \frac{N_1}{N_2} \right) \quad (4.4)$$

$$n_2 = 5.36 \left( \frac{12}{60} \right)$$

$$n_2 = 1.07 \text{ rpm}$$

A continuación se calcula los diámetros de paso que para rueda dentada con  $N$  dientes y cadena con paso  $p$  es:

$$D_1 = \frac{p}{\sin(180^\circ/N_1)} \quad (4.5)$$

$$D_1 = \frac{0.5}{\sin(180^\circ/12)} = \mathbf{1.93 \text{ pulg}}$$

$$D_2 = \frac{p}{\sin(180^\circ/N_2)}$$

$$D_2 = \frac{0.5}{\sin(180^\circ/60)} = \mathbf{9.55 \text{ pulg}}$$

El diámetro mínimo de rueda dentada y por tanto el número mínimo de dientes en una rueda dentada está, con frecuencia, limitado por el tamaño de la flecha en la que se monta.

La longitud de la cadena debe ser un múltiplo completo del paso, y se recomienda un número par de pasos. La distancia central entre los ejes de la rueda dentada debe ser de entre 30 y 50 pasos aproximadamente (30 a 50 veces el paso de la cadena).

La distancia central debe hacerse ajustable para adaptar la longitud de la cadena y compensar tolerancias y desgaste. Un juego excesivo en el lado flojo debe evitarse, sobre todo en impulsores no horizontales.



Una relación conveniente entre la distancia central (C), la longitud de la cadena (L), número de dientes en la rueda dentada pequeña ( $N_1$ ) y número de dientes en la rueda dentada grande ( $N_2$ ), expresada en pasos, es:

$$L = 2C + \frac{N_2 + N_1}{2} + \frac{(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2 C} \quad (4.6)$$

$$L = 2(40) + \frac{60 + 12}{2} + \frac{(60 - 12)^2}{4\pi^2(40)}$$

$$\mathbf{L = 117.46 \text{ pasos} \approx 118 \text{ pasos}}$$

La distancia central teóricamente exacta para una longitud particular de cadena, en pasos es

$$C = \frac{1}{4} \left[ L - \frac{N_2 + N_1}{2} + \sqrt{\left[ L - \frac{N_2 + N_1}{2} \right]^2 - \frac{8(N_2 - N_1)^2}{4\pi^2}} \right] \quad (4.7)$$

$$C = \frac{1}{4} \left[ 118 - \frac{60 + 12}{2} + \sqrt{\left[ 118 - \frac{60 + 12}{2} \right]^2 - \frac{8(60 - 12)^2}{4\pi^2}} \right]$$

$$\mathbf{C = 43.27 \text{ pasos}}$$

La distancia central teórica no supone juego ni en el lado tensado ni en el lado flojo de la cadena y por consiguiente es un máximo. Se deben prever tolerancias o ajustes negativos.

Por lo tanto tenemos:

$$L = 118 (0.5) = 59 \text{ pulg } (1498.6 \text{ mm})$$

$$C = 43.27 (0.5) = \mathbf{21.63 \text{ pulg } (549.53 \text{ mm})}$$

## 4.2 DISEÑO ELECTRÓNICO

### 4.2.1 SELECCIÓN DE SENSORES

Para el diseño del sistema de instrumentación, como primer paso consistió en el análisis de los sensores a utilizar para la medición de las variables a ser medidas durante el proceso de funcionamiento del colector solar siendo éstas: temperatura, posición angular del eje del motor y caudal del aceite térmico, para cual necesitamos montar sensores que permitan este propósito.

Al momento de seleccionar los sensores hay que tener en cuenta que determinados tipos resultan mucho más adecuados que otros. Dentro de la selección de un sensor, se deben considerar diferentes factores tales como: entorno dónde funcionará el sensor, la forma de la carcasa, distancia operativa, datos eléctricos y conexiones.

### **Sensores de Temperatura**

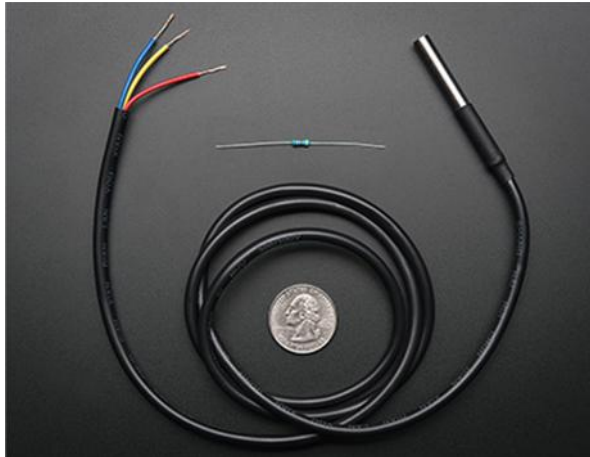
Para facilitar la selección de los sensores de temperatura, podemos dividir al equipo en dos zonas, la una donde las temperaturas se pronostican no llegarán a más de los 100° C y la zona donde superarán este Rango.

Para la zona de menor temperatura se utiliza sensores digitales de temperatura DALLAS DS18B20, estos son una versión pre-cableado e impermeabilizada, útil para medir a distancias considerables o en condiciones de humedad, el cable está cubierto en PVC, por lo que se sugiere mantenerlos por debajo de 100° C. Debido a que son digitales, no recibe ningún tipo de degradación de la señal incluso a largas distancias.

Estos sensores digitales de temperatura son bastante precisos ( $\pm 0.5$  C) y pueden dar hasta 12 bits de precisión del convertidor de digital a analógico a bordo. Ellos trabajan muy bien con cualquier microcontrolador utilizando un único pin digital, e incluso se pueden conectar múltiples en un mismo pin, ya

que están equipados con un código de serie de 64 bits para diferenciarlos.

Se pueden utilizar con sistemas de 3 - 5 V.



**Figura 72** Sensor de temperatura DALLAS DS18B20

El otro tipo de sensores utilizados son las termocuplas tipo K que al igual que los anteriores son impermeabilizados, y permiten la medición de temperaturas mayores a los 200 C.

Estas termocuplas tienen las siguientes características:

- Rango de medición: -200 C a 1200 C
- Sensibilidad:  $\pm 0.8$  C
- Buena resistencia a la oxidación
- Necesitan acondicionamiento (Amplificación)
- Salida analógica (Voltaje)



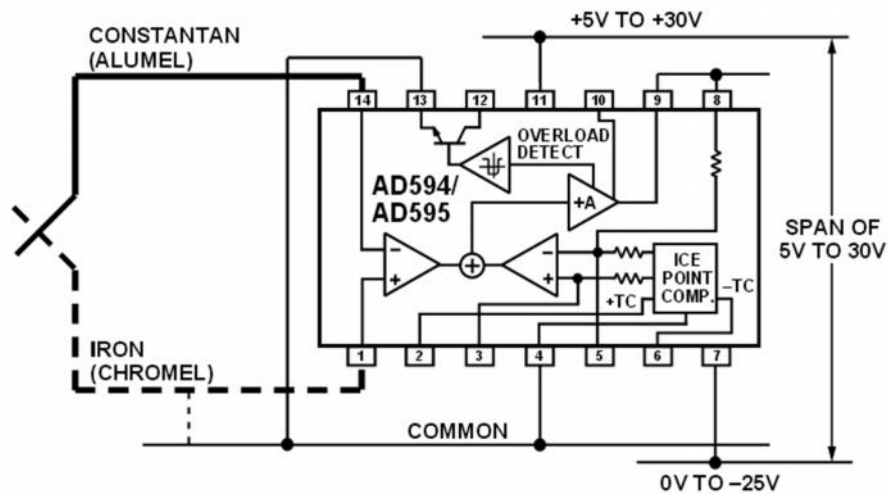
**Figura 73** Termocupla tipo K Waterproof

### **Amplificador AD595**

La fuerza electromotriz (FEM) producida en las termocuplas y que es el resultado de la diferencia de temperatura entre la junta caliente y la junta fría necesita ser amplificada para ser detectada por el microcontrolador.

El amplificador AD595 es un circuito de acondicionamiento especial para termopares tipo K, las especificaciones marcadas en la hoja de datos son:

- Tensión de salida de baja impedancia: 10 mV/°C
- Incluye compensación de junta fría.
- Fuente de alimentación: +5 V a  $\pm 30$  V
- Alarma de falla en el termopar.
- Punto de ajuste del modo de funcionamiento.
- Funciona como un termómetro en grados Celsius.



**Figura 74** Circuito del Amplificador AD595

El AD595 es un amplificador de instrumentación el cual combina un punto de referencia de hielo con un amplificador para producir un nivel alto (10 mV / ° C) en la adquisición directa de una señal de termopar.

Según el tipo de conexión permiten ser utilizado como un amplificador lineal compensador o como un punto de control de salida.

Puede ser utilizado para amplificar la tensión de compensación directa, lo que lo convierte en un transductor independiente a grados centígrados con una baja impedancia de salida de voltaje, puede recibir energía de una fuente única de composición (incluida la de +5 V) y la inclusión de una provisión negativa para medir temperaturas inferiores a 0 ° C.

### **Sensor de desplazamiento angular**

La opción más apropiada para realizar la medición de la posición angular del eje de salida del motor es un potenciómetro rotacional.

El potenciómetro es un Bourns 3590, que entre las principales características: su señal de salida es lineal, posee una resistencia de 10K, y tiene una capacidad de rotación de 10 vueltas.

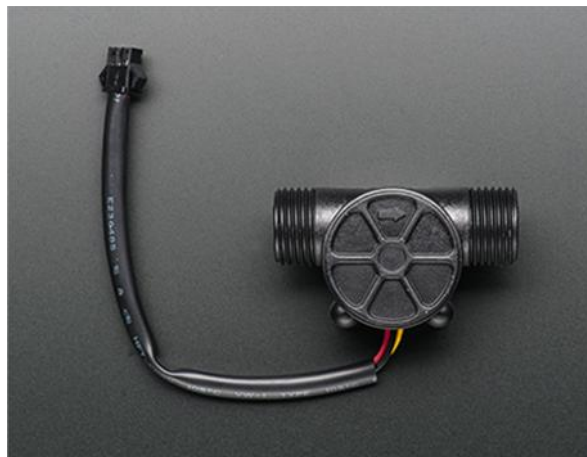


**Figura 75** Potenciómetro Bourns 3590

### **Sensor de flujo**

La medición de flujo de aceite en el colector solar será realizada con un medidor de flujo que utiliza un sensor tipo turbina para medir la cantidad de fluido que se ha movido a través de él. La turbina tiene un pequeño imán y además hay un sensor magnético de efecto Hall en el otro lado del tubo de plástico que puede medir la cantidad de vueltas de la turbina ha hecho a través de la pared de plástico.

Este método permite que el sensor permanezca seguro y seco. El sensor tiene tres cables: rojo (potencia 5 – 24 VDC ) , negro (a tierra) y amarillo ( salida de impulsos de efecto Hall ) . Al contar los pulsos de la salida del sensor, puede seguir fácilmente el movimiento del fluido, cada pulso es de aproximadamente 2,25 mililitros.



**Figura 76** Sensor de flujo

#### **4.2.2 SELECCIÓN DE ACTUADORES**

Los elementos eléctricos encargados de transformar las señales de salida del microcontrolador en una acción de control en el funcionamiento del colector solar serán: un motor eléctrico y una bomba

##### **Selección del motor.**

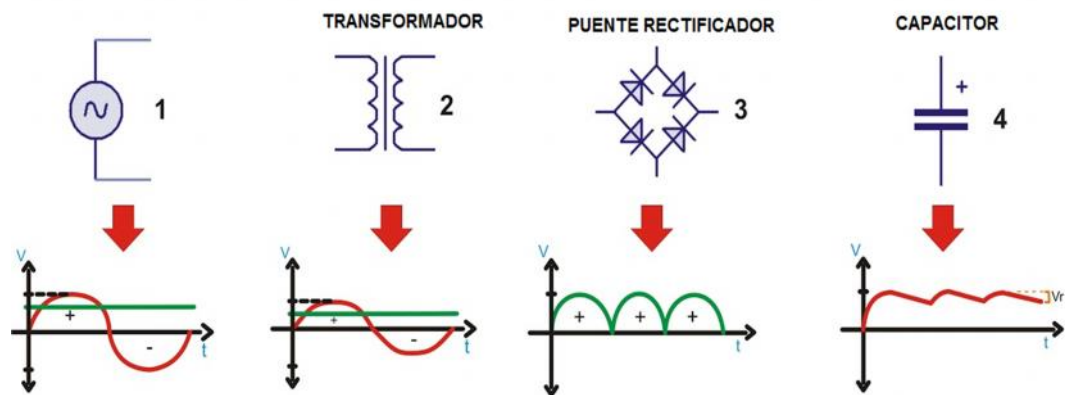
De los cálculos mecánicos se obtuvo que es necesario de un motor de 0.04 hp de potencia, para poder hacer girar los concentradores durante el día.



Para el funcionamiento del motor es necesario tomar en cuenta ciertos dispositivos electrónicos tales como: fuente, circuito H y fines de carrera, estos últimos como dispositivos de seguridad

### Rectificación de la señal eléctrica

La corriente alterna (AC) es la forma más eficiente de suministrar energía eléctrica. Sin embargo los componentes eléctricos como es el caso del motor utilizado en el presente proyecto necesita corriente (DC) para funcionar. Se tuvo que implementar un convertidor de AC a DC.



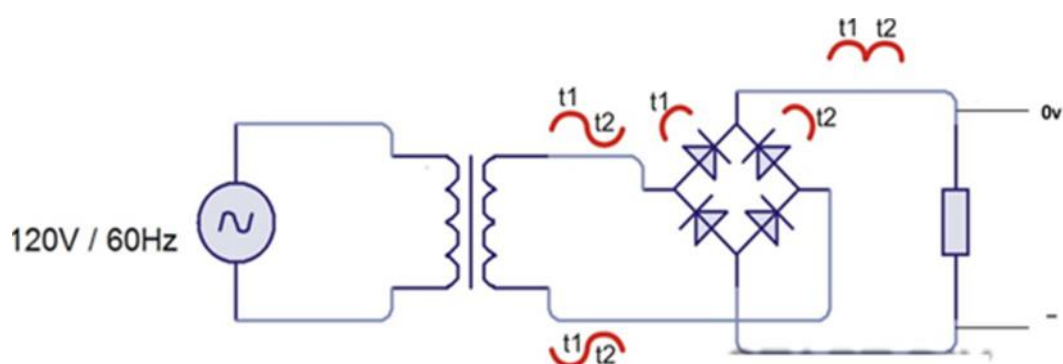
**Figura 77** Proceso de rectificación de la señal eléctrica

Como primer lugar se necesita aclarar que en Ecuador y en todo el continente americano el voltaje AC es 110 a 120 voltios a 60 hertzios.

Un transformador será el encargado de reducir la tensión de la red eléctrica de los 110 voltios a la tensión baja de 12 voltios, requeridos por el motor. Su selección está de acuerdo a los valores de corriente que circulará hacia el motor y que ya fueron calculados.

Un rectificador usualmente consiste en un arreglo de 4 diodos llamado “Puente rectificador”, que puede llevar la tensión alterna a una señal con polaridad definida, pero sin eliminar la frecuencia por lo que la señal queda con pulsaciones. La salida es una corriente que sube desde 0 voltios al voltaje positivo máximo.

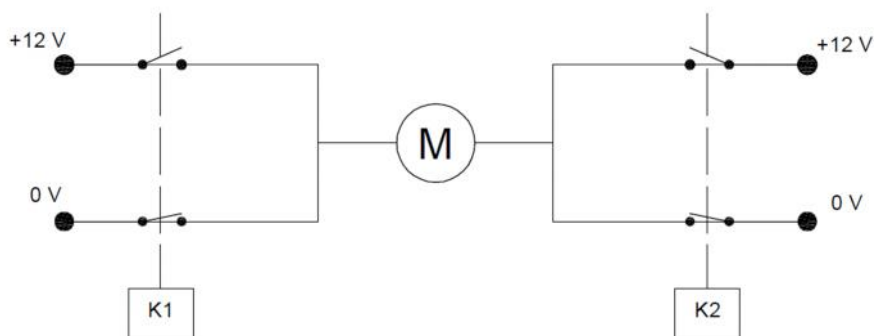
Finalmente necesitamos incorporar un capacitor que se encargará de eliminar a un nivel aceptable las pulsaciones de forma que se obtenga una señal muy parecida a la correspondiente dc.



**Figura 78** Circuito de rectificación de señal eléctrica

### Circuito H.

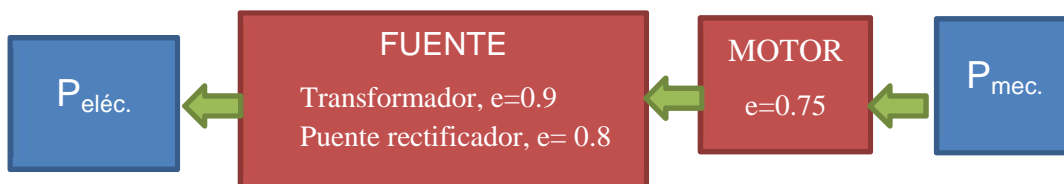
El circuito H, permitirá al motor DC girar en ambos sentidos, avance y retroceso. El circuito tiene que ser construido con dos relés (K1 y K2) cada uno con: un contacto normalmente abierto y otro normalmente cerrado. En el siguiente gráfico se puede apreciar la configuración y el funcionamiento del mismo basado en la posibilidad de cambiar la polaridad de corriente en el motor.



**Figura 79** Circuito H

### Dimensionamiento del cableado

El factor clave, para determinar las diferentes características de los componentes del sistema electrónico como el tipo de cable utilizado que permitirá el funcionamiento el motor, es la potencia requerida para esto.



**Figura 80** Determinación de la Potencia eléctrica del sistema

La potencia mecánica necesaria para mover a los concentradores calculada anteriormente es de 0.04 hp (29.84 watts).

Para determinar la potencia eléctrica tanto a la salida como a la entrada de la fuente y considerando los factores de eficiencia: para el motor 0.75 y para la fuente los correspondientes a el transformador 0.9 y el puente rectificador 0.8; tenemos:

$$e = \frac{POTENCIA\ SALIDA}{POTENCIA\ ENTRADA} = \frac{P_{mecánica}}{P_{eléctrica}} \quad (4.8)$$

$$P_{eléctrica(12Vdc)} = \frac{29.84}{0.75}$$

$$P_{eléctrica(12Vdc)} = 40 \text{ watt}$$

Para determinar la corriente que va a ser transmitida por el cable que va de la fuente al motor, utilizamos la siguiente ecuación:

$$P_{eléctrica} = V \cdot I \quad (4.9)$$

$$I_{12Vdc} = \frac{40}{12}$$

$$I_{12Vdc} = 3.33 \text{ A}$$

Así mismo la corriente que circulará a la entrada de la fuente será:

$$P_{el\acute{e}ctrica(110Vac)} = \frac{40}{(0.9 \times 0.8)}$$

$$P_{el\acute{e}ctrica(110Vac)} = 55.55 \text{ watt}$$

De la ecuación 4.9

$$I_{(110Vac)} = \frac{55.55}{110}$$

$$I_{(110Vac)} = 0.5A$$

De acuerdo a las corrientes calculadas se utiliza:

A la entrada de la fuente: Cable AWG 18

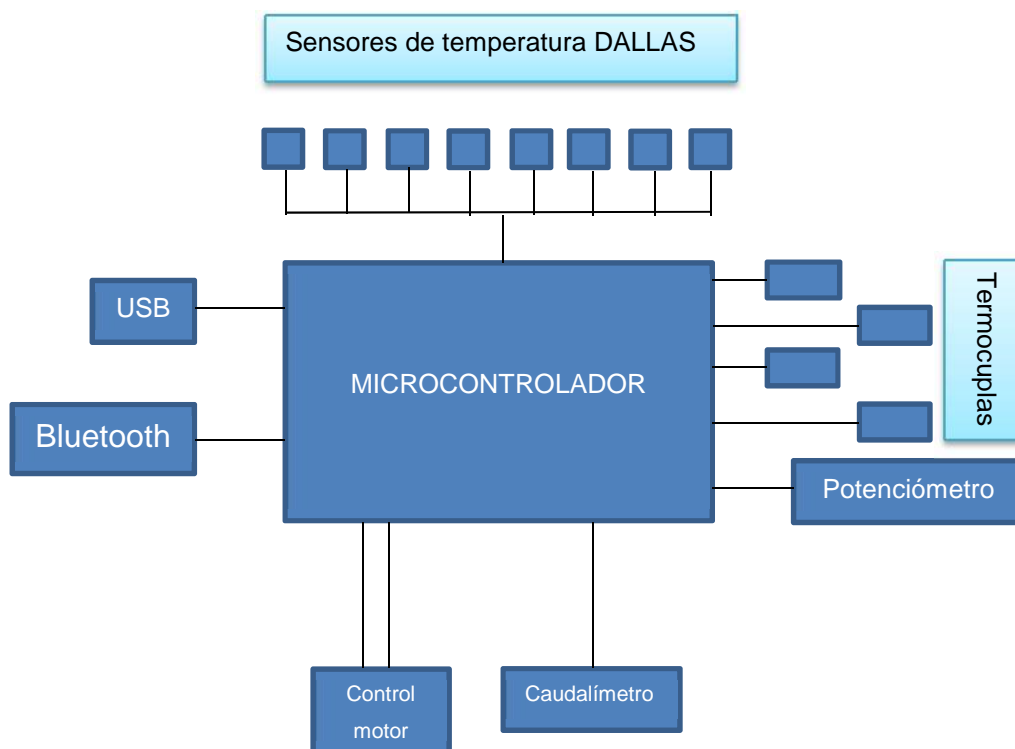
A la salida de la fuente: Cable AWG 16.

#### 4.2.3 SELECCIÓN DEL MICROCONTROLADOR

Una de las decisiones y críticas es seleccionar un controlador adecuado para el diseño del sistema de control. A la hora de escoger el microcontrolador a emplear hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (memoria, interfaces, velocidad de procesamiento)

### Interfaces de hardware requeridas.

Mediante un diagrama genérico de bloques de hardware (Figura 81) se crea una lista de todas las interfaces externas que el microcontrolador tendrá que soportar.



**Figura 81** Interfaces requeridas del microcontrolador

Hay dos tipos importantes de interfaces de comunicación. Las primeras son las interfaces de comunicación y todos aquellos sistemas de comunicación que habitualmente llamados “bus de datos”. Las otras corresponden al de entradas y salidas digitales, este tipo de interfaz

determinará el número de pines que serán requeridos por el microcontrolador.

De acuerdo a los sensores utilizados, las interfaces de comunicación necesarias se las puede observar en la siguiente tabla:

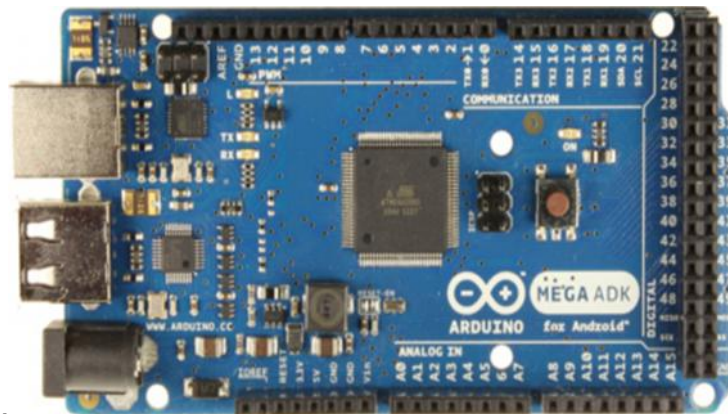
**Tabla 14 Interfaces de comunicación**

INTERFAZ		CANTIDAD	UTILIDAD
ENTRADAS	Analógicas	4	Termocuplas
		1	Potenciómetro
	Rápidas (digitales)	1	Caudalímetro
SALIDAS	Digitales	2	Giro del motor

**Fuente:** Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

A lo anterior sumamos los siguientes requerimientos:

- Conectividad USB para la programación del sistema en una computadora
- Tres pines con posibilidad de conexión a red ONE WIRE
- Conectividad Bluetooth, para la comunicación del microcontrolador y la Tablet.
- Interfaz RS-232 para el Bluetooth.



**Figura 82** Microcontrolador Mega ADK

El microcontrolador escogido para la realización del presente proyecto es un Arduino Mega ADK

El microcontrolador **Arduino Mega ADK** está basada en la tarjeta Mega2560 pero integra adicionalmente un Host USB para conectarla a celulares, o sistemas basados en Android, esta tarjeta tiene 54 I/O digital, de los cuales podemos usar 14 PWMs, 16 canales de entradas análogas, 4 UARTs (hardware serial ports), a 16 MHz. Integra una conexión a USB para programación, entrada de alimentación tipo Jack y conector ICSP. Su uso es muy sencillo, solo se requiere conectarla al computador por medio del cable USB y ya está.

Su principal uso es la creación o diseño de aplicaciones que requieran interfazar a Arduino con Android, esto implica que desde una tablet o celular se podría controlar servomotores, luces, leds, adquirir datos, enviar datos, entre otros.

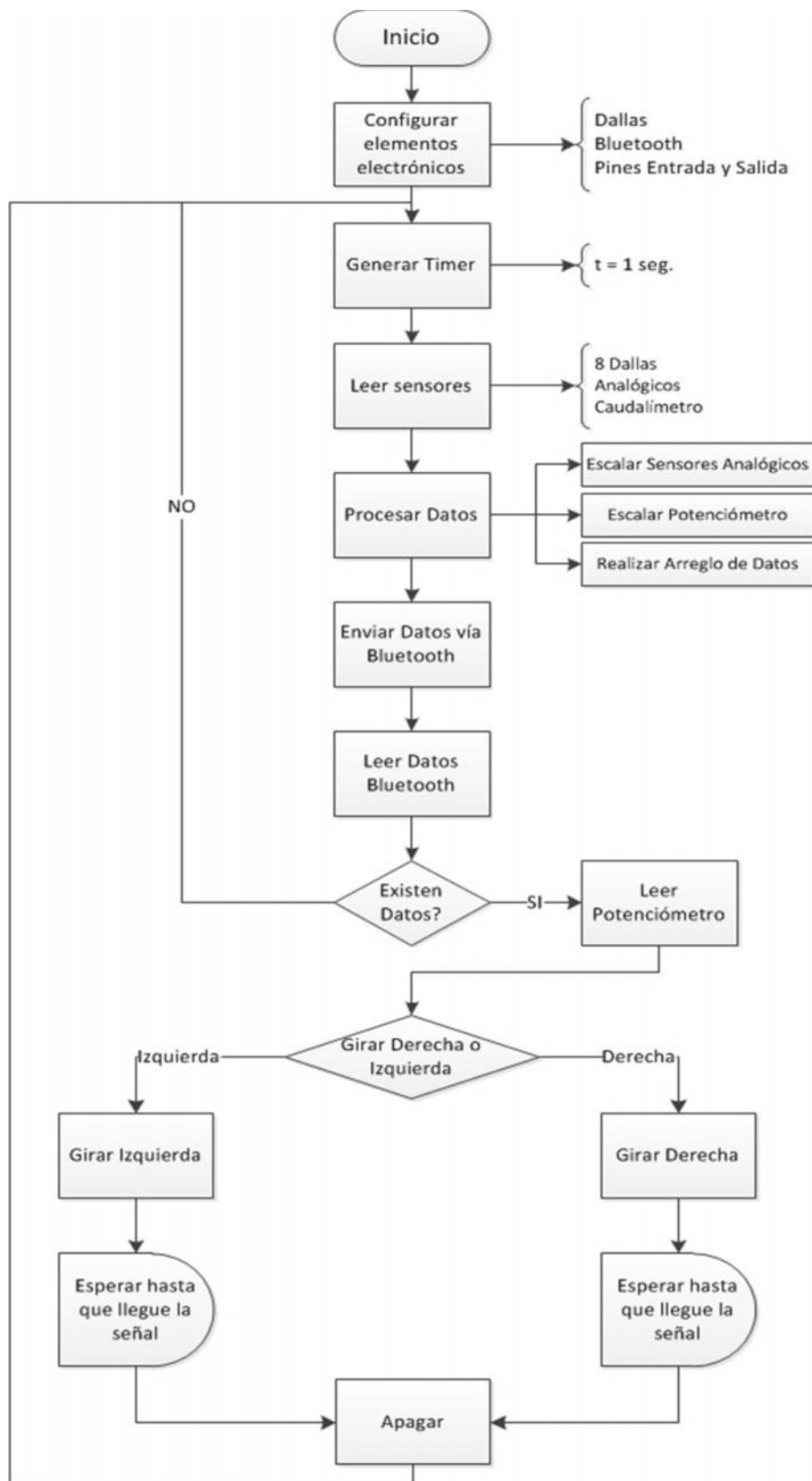


#### 4.2.4 COMPILACIÓN DE DATOS

Este proceso consiste en designar todas las instrucciones con las que se indica al microcontrolador qué es lo que debe hacer.

Las líneas de código para la programación del microcontrolador se encuentra en el ANEXO 8, el cual permite:

- Al momento de encender al sistema electrónico, establecer la comunicación con los sensores, Bluetooth, la Tablet, así como la conexión con la red One Wire que permite conectar algunos sensores sobre un mismo pin.
- Entrar a un bucle de repetición, que corre una vez por segundo y que permite la lectura de los datos enviados por los sensores DALLAS, las termocuplas y el sensor de flujo.
- Procesar los datos, realiza una escala de los datos enviados por las termocuplas y el potenciómetro. También crea un arreglo de datos que serán enviados a la Tablet.
- Enviar el arreglo de datos por conexión Bluetooth.
- Leer los datos enviados por el potenciómetro y escalarlos, lo que permitirá controlar el giro del motor.



**Figura 83** Diagrama de flujo para la programación del microcontrolador

#### **4.2.5 DISEÑO INTERFAZ GRÁFICA.**

El diseño del HMI (Interfaz Hombre Máquina), permitirá la interacción didáctica entre los estudiantes que estén realizando las prácticas en el equipo y la Tablet. El HMI permitirá monitorear el comportamiento de equipo, así como visualizar gráficas, cálculos, en tiempo real.

La aplicación utilizada para la creación de la interfaz gráfica es Eclipse que es una plataforma de software de Código abierto independiente de una plataforma para desarrollar aplicaciones.

La interfaz gráfica necesitará cumplir con las siguientes tareas:

- Permitir la comunicación con el microcontrolador
- Visualizar las variables de funcionamiento del equipo mediante pantallas.
- Obtener el resultado de algunos cálculos propios del equipo
- Actualizar una base de datos con las variables del equipo.

Para el presente proyecto se diseñó las siguientes pantallas.

##### **Pantalla de inicio**

En esta pantalla tenemos la posibilidad de elegir, entre observar un video introductorio del colector solar o acceder al monitoreo del mismo (Botón “BUSCAR DISPOSITIVO”), que permite la vinculación con el Bluetooth del microcontrolador.



**Figura 84** Pantalla de inicio

### **Pantallas de monitoreo.**

La interfaz dispone también de pantallas que permite visualizar la variación de temperatura en diferentes puntos de los componentes del colector: concentradores, cocina y tanque calentador, así como realizar posicionamientos de los concentradores.

Los botones “DATOS DE PANELES”, “DATOS COCINA” y “DATOS TANQUE”, permiten desplegar nuevas pantallas donde se pueden visualizar las temperaturas proporcionadas por los sensores.



Figura 85 Pantalla de monitoreo

### Pantallas con resultados de cálculos.

Cada pantalla de monitoreo tiene un botón que permitirá acceder a otra ventana donde se visualizará el resultado de los cálculos correspondientes a las pérdidas de calor producidas en las partes del colector.



Figura 86 Pantalla de resultados del tubo absorbedor

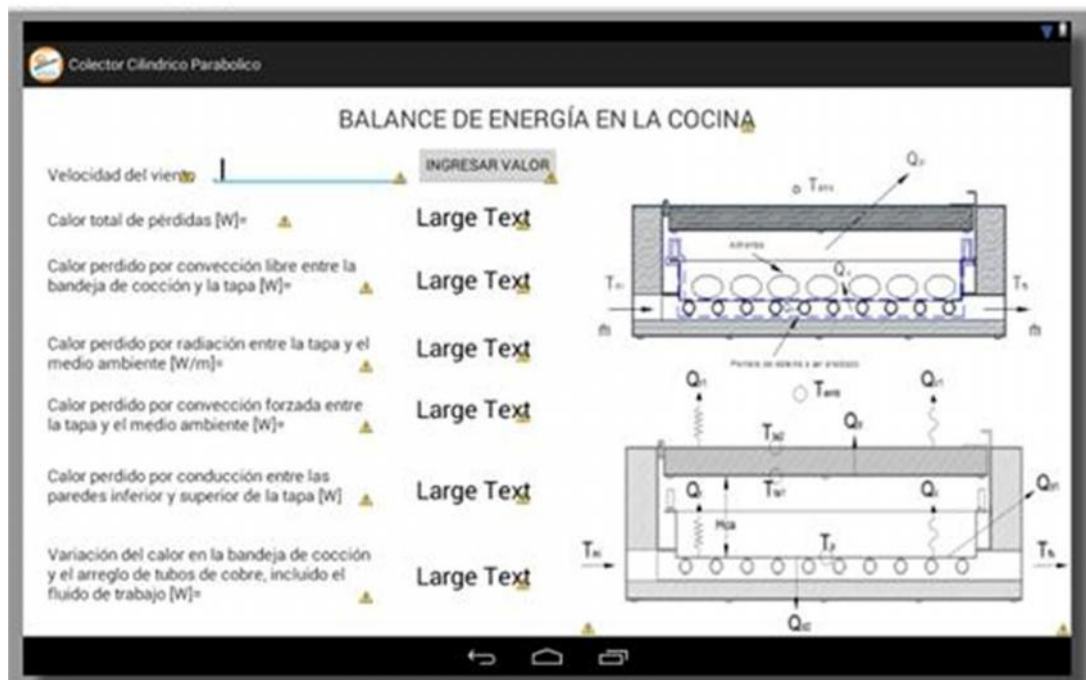


Figura 87 Pantalla de resultados de la cocina



Figura 88 Pantalla de resultados del tanque calentador

## **CAPÍTULO 5**

### **MANTENIMIENTO CORRECTIVO DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO Y MONTAJE DE SENSORES**

#### **5.1 MANTENIMIENTO CORRECTIVO**

El mantenimiento correctivo es una técnica de la ingeniería, que consiste en realizar una serie de trabajos de restauración, que son necesarios cuando la maquinaria, aparatos o instalaciones se estropean, y es necesario recuperarlos. Su reparación es lo que llamamos mantenimiento correctivo

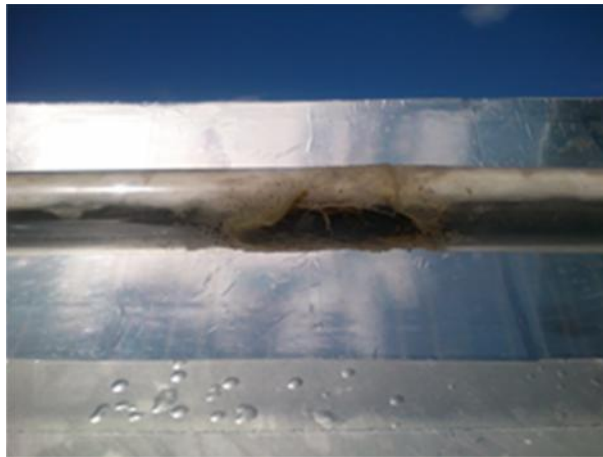
El mantenimiento correctivo, comprende la compensación de los daños sufridos por fallas incipientes, a una maquinaria o un equipo, y todos los trabajos que resulten pertinentes para su reparación; su aplicación se da cuando el equipo ha dejado de funcionar y es necesario repararlo.

##### **5.1.1 ESTADO INICIAL DEL COLECTOR CILÍNDRICO PARABÓLICO**

Con el transcurso de los años, el equipo no ha tenido un debido mantenimiento preventivo por lo que en la actualidad no se encuentra operable y presenta múltiples daños en sus principales componentes, entre los que podemos citar:

### **Tubos de concentración**

Los tubos de vidrio actuales se encuentran rotos debido al poco mantenimiento que se ha dado al colector, estos tubos son necesarios para que ayuden a captar la mayor cantidad de calor, de esta manera las pérdidas sean pequeñas. Dos tubos se encuentran totalmente deteriorados por lo que su cambio debe ser necesario.



**Figura 89** Tubo de vidrio defectuoso

### **Aislamiento térmico**

El aislante colocado no fue el adecuado para las temperaturas que se manejan dentro de la cocina solar, razón por la cual se debe proceder a colocar un nuevo aislamiento, que sea capaz de resistir las altas temperaturas que se van a manejar, especialmente en las zonas donde se necesita aprovechar más el calor generado por la radiación solar.





**Figura 90** Aislante deteriorado

### **Estructura despintada**

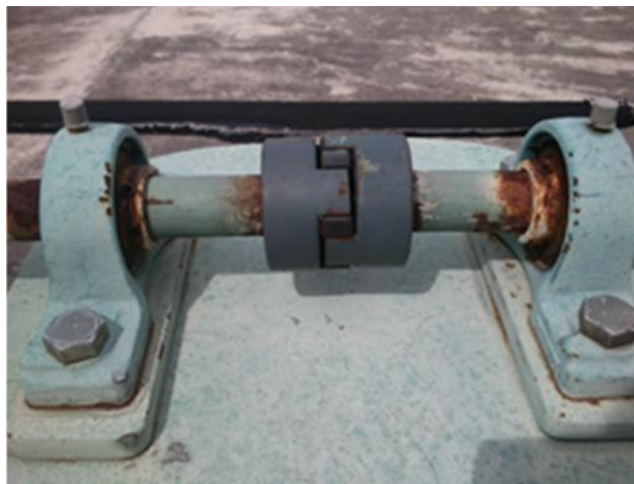
Toda la estructura en sí, tiene desperfectos debido al tiempo que no ha sido mantenido adecuadamente, existen ciertas partes que se encuentran oxidadas, motivo por el cual se procederá a lijar y pintar la estructura en su totalidad.



**Figura 91** Panel despintado

## Chumaceras

Debido al poco uso del colector cilíndrico parabólico, las chumaceras no han sufrido un gran desgaste ya que no han estado trabajando a grandes revoluciones, es por este motivo que es necesario hacer un mantenimiento adecuado de las mismas, es decir, darles lubricación adecuada para que su funcionamiento siga siendo el mismo.



**Figura 92** Chumaceras en mal estado

### 5.1.2 ADQUISICIÓN DE LOS COMPONENTES A REEMPLAZAR Y MATERIALES

En el subcapítulo anterior se detalló el mal estado de los componentes del colector cilíndrico parabólico, por lo cual es necesario su reemplazo. Los componentes así como materiales necesarios para realizar el mantenimiento correctivo del colector cilíndrico parabólico se los detallan en las siguientes tablas:

**Tabla 15 Materiales reemplazados**

<b>COMPONENTES/MATERIALES</b>	<b>PROVEEDOR</b>
Tubos de concentración	INDUPAK S.A.
Aislantes térmicos	DISMACON COBRE
Tubería de Cobre	DISMACON COBRE
Accesorios de Cobre	DISMACON COBRE
Duralón	Aceros & Bronces
Motor eléctrico 12 Vdc	Importaciones Abedrabo
Varillas de aporte de plata	Megafrío
Aceite térmico	PETROVAL
Bomba	INDUCOM
Mangueras flexibles	Kiwi
Accesorios de PVC	Kiwi
Valvula de globo	Kiwi
Válvula Check	Kiwi
Pintura sintética, diluyente, lijas, waipe	Pinturas Unidas
Pernos, tuercas, tornillos, arandelas, pernos de anclaje	La Casa del Perno
Película Reflectiva	Importadora Jacquita
Caja metálica	Electrovalle
Catarinas y cadena	Maquinarias Henriques

**Fuente:** Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

### **Instrumentación a colocarse**

Para la automatización del colector cilíndrico parabólico es necesario el montaje de los siguientes elementos electrónicos

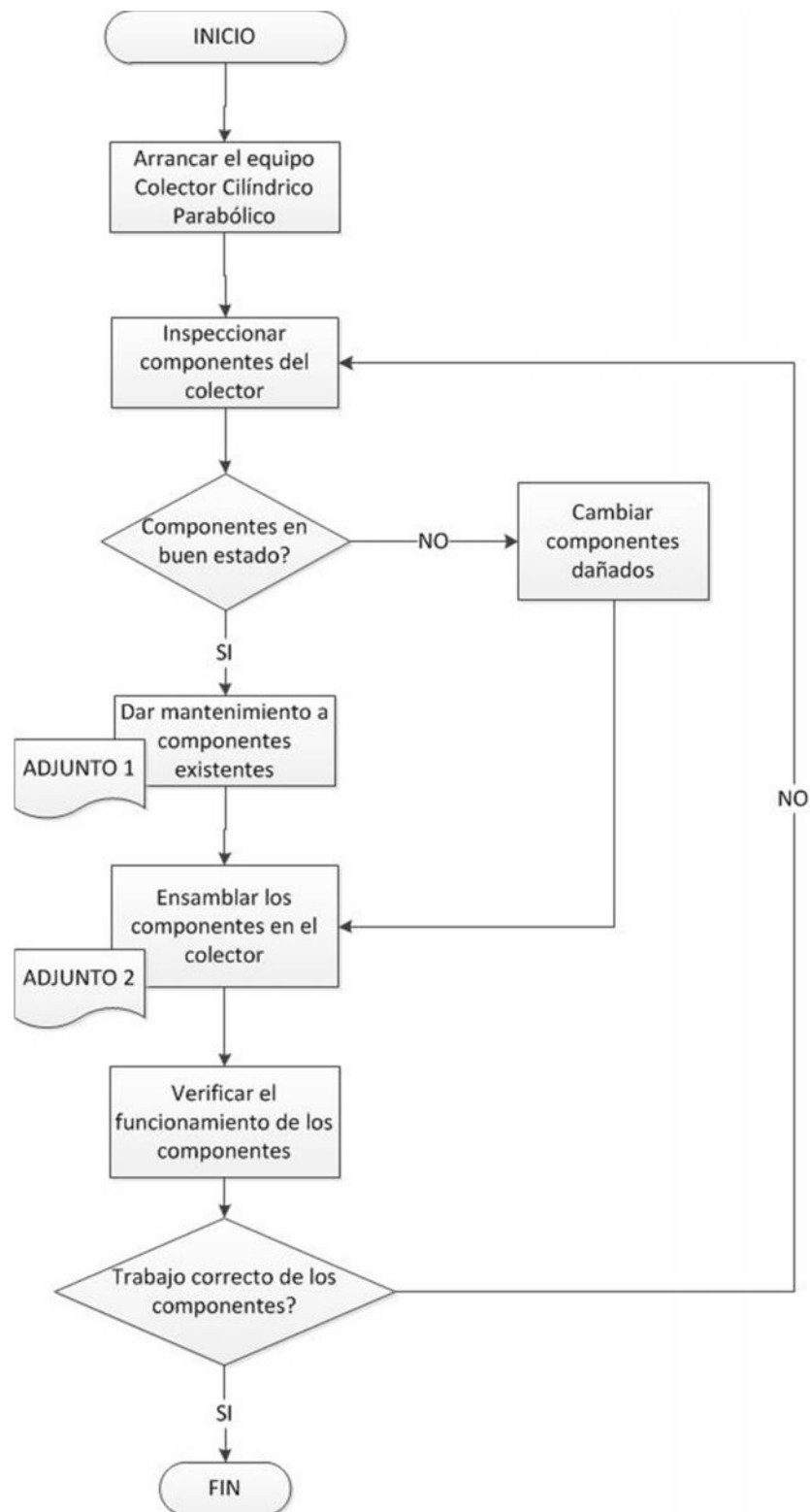
**Tabla 16 Elementos electrónicos montados**

<b>INSTRUMENTO</b>	<b>MARCA</b>
Microcontrolador	Arduino
Termocuplas tipo K	Arduino
Sensores de temperatura digitales	Arduino
Sensor de caudal	Arduino
Potenciómetro rotacional	Bourns
Fuente 5 V	Arduino
Transformador de 110-12 V	Electrovalle
Tablet	Energy System
Cables, borneras	Cablec
Interruptor ON/OFF	Camsco
Relés	Camsco
Fines de carrera	Camsco

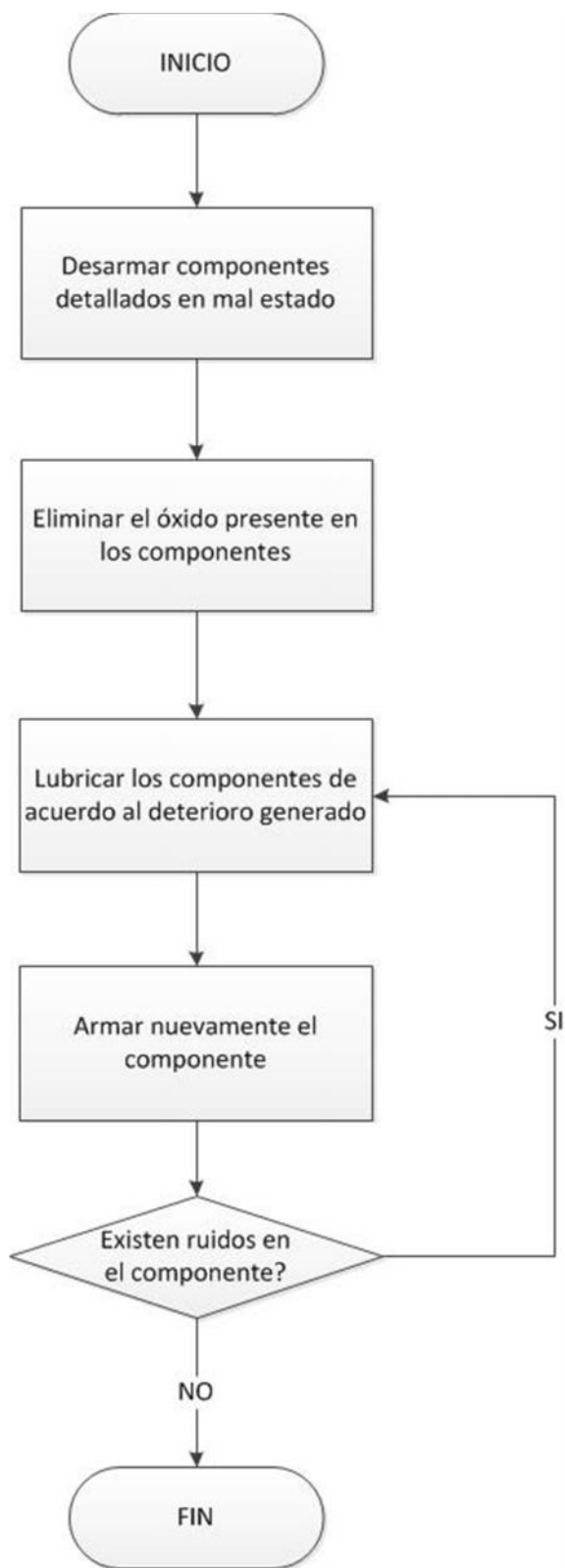
**Fuente:** Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

### **5.1.3 PROCEDIMIENTO PARA EL CAMBIO DE PARTES Y PIEZAS DEFECTUOSAS**

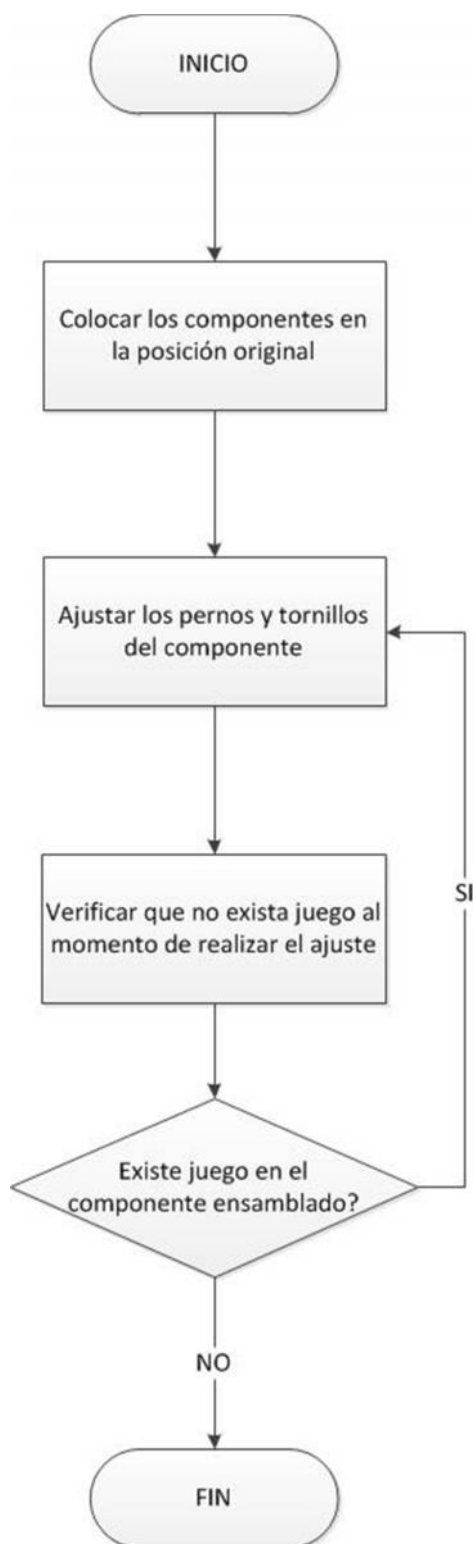
El procedimiento seguido para el cambio de partes y piezas defectuosas está basado en los siguientes diagramas de flujo.



**Figura 93** Procedimiento general de mantenimiento



**Figura 94** Procedimiento general de mantenimiento (Adjunto 1)

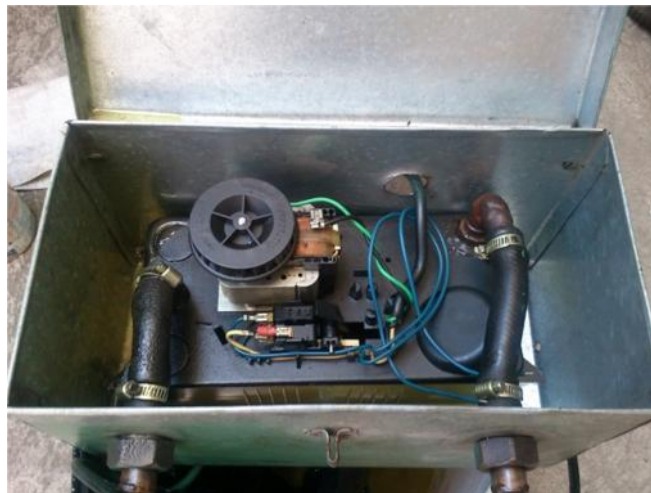


**Figura 95** Procedimiento general de mantenimiento (Adjunto 2)

Basado en el diagrama de flujo anterior, las acciones de mantenimiento realizadas al colector parabólico fueron:

### **Inspección de las bombas**

Las bombas no cuentan con una placa de información de sus parámetros funcionales. Se realizó la conexión de las bombas a una fuente de corriente eléctrica alterna de 110V, para verificar el arranque y posterior funcionamiento de las mismas.



**Figura 96** Bombas utilizadas anteriormente

Se pudo evidenciar el buen funcionamiento de las bombas, pero no poseían la suficiente potencia para bombear el aceite térmico hacia el tanque almacenador del aceite, por lo cual fue necesario su reemplazo por una con mayor capacidad.





**Figura 97** Bomba nueva

### **Desmontaje de las tuberías de cobre y cubiertas de vidrio**

Como se mencionó anteriormente los tubos de vidrio que sirven de cubierta para minimizar las pérdidas de calor con convección presentan rupturas, por lo cual es necesario su reemplazo. También se pudo observar fugas del aceite alrededor de la tubería de cobre, lo cual nos indica fallas en los acoples de cobre



**Figura 98** Desmontaje de la tubería de cobre

Se procedió a desmontar los tubos absorbedores del equipo, para poder quitar los tubos de vidrios dañados. Para esto necesariamente tenemos que realizar cortes en los extremos de los tubos de cobre

### **Torneado de los acoples en duralón**

Las medidas en los diámetros de los nuevos tubos de vidrio, varían a los anteriores por lo cual es necesario realizar el torneado de los acoples de duralón que sirven de soporte y ajuste de los mismos



**Figura 99** Torneado de los acoples de duralón

### **Unión de los tubos de vidrio**

La longitud necesaria para los tubos absorbedores es de dos metros, en el mercado no existen tubos de vidrio con esa longitud razón por la cual se optó por comprar tubos de un metro con veinte centímetros para unirlos con otros tubos de ochenta centímetros de largo.

La unión se la realizó con silicón que tiene la capacidad de soportar condiciones ambientales críticas de calor y humedad.



**Figura 100** Unión de los tubos de vidrio

### **Engrasado de rodamientos**

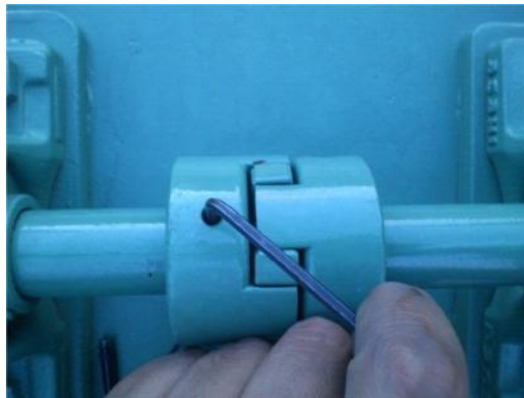
Como otra acción de mantenimiento tenemos el engrasado de los rodamientos de las chumaceras.



**Figura 101** Chumaceras restauradas

### **Ajuste de matrimonios**

Los matrimonios han quedado sin sus prisioneros, por lo cual procedemos a colocar unos nuevos.



**Figura 102** Colocación de prisioneros

### **Montaje de la tubería de cobre con sus respectivas cubiertas de vidrio y accesorios**

Procedemos a soldar la tubería de cobre con los accesorios necesarios, dejando esta vez unos acoples tipo "T" para el posterior montaje de los sensores de temperatura



**Figura 103** Soldadura de la tubería

### **Inspección del tanque alimentador**

Verificamos el estado del tanque alimentador del aceite térmico para descartar cualquier daño en su estructura



**Figura 104** Inspección del tanque alimentador

### **Inspección del tanque calentador**

Así como en el tanque alimentador, realizamos una verificación en cada una de las partes que componen el tanque calentador: recipiente de calentamiento, serpentín y forro. Seguidamente colocamos los acoples tipo “T” que nos servirán para el montaje de los sensores de temperatura



**Figura 105** Colocación de acoples tipo “T”

### **Construcción de la base para el motor**

Se realiza la construcción de una base metálica para el soporte del motor eléctrico que permitirá girar a los concentrados. Esta base estará dotada de un mecanismo que permita la regulación de su posición para realizar el ajuste de las cadenas de transmisión.



**Figura 106** Base para el motor eléctrico

### **Montaje de cadenas y catarinas**

Para realizar el montaje de las catarinas, se procede a desarmar el eje principal del colector, a continuación colocamos la catarina seleccionada, debido al poco espacio que tenemos, debemos tomar en cuenta que no exista desplazamiento lateral, ya que un pequeño roce puede generar daños en el colector y no se podrá realizar el movimiento de acuerdo a los requerimientos.

Es importante también realizar la lubricación frecuentemente para que el sistema trabaje de manera adecuada y no existan daños en lo posterior

debido a que la falta de lubricación y que esto no represente un inconveniente al momento de transmitir el movimiento desde el motor hacia el colector cilíndrico parabólico.



**Figura 107** Montaje de catarinas

### Proceso de pintura del equipo



**Figura 108** Pintado del equipo



Una vez terminada la inspección de cada uno de los componentes del colector cilíndrico parabólico y ver realizado las acciones de mantenimiento respectivas, como paso final tenemos el recubrimiento con pintura anticorrosiva de toda la estructura del equipo.

## 5.2 MONTAJE DE SENSORES

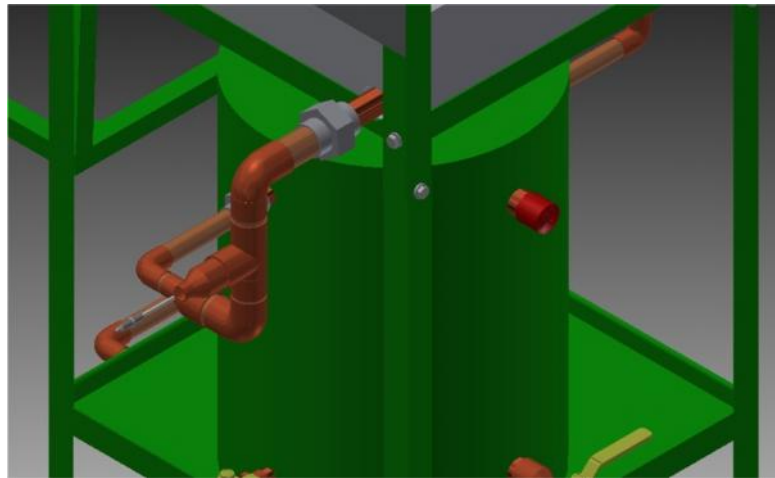
En primer lugar se procedió al montaje de la caja de control, en su interior se encuentran los elementos electrónicos: fuente de 12V, el microcontrolador, los relés entre otros.



**Figura 109** Instalación de caja de control

Para la instalación de los sensores de temperatura fue necesaria la adaptación de unas tes de cobre en las cuales serán introducidos los sensores en los diferentes puntos de análisis.





**Figura 110** Sensor de temperatura a la salida de la cocina

El flujo de aceite térmico en todo el equipo es prácticamente el mismo, por lo cual es indistinto el lugar donde se le ubique la sensor de caudal. El sensor de flujo fue colocado a continuación de la tubería de salida de la bomba.



**Figura 111** Sensor de caudal

Para poder realizar un el control de giro del motor y por ende de los concentradores es necesario la instalación de un potenciómetro, el mismo que fue adaptado al eje de salida del motor.



**Figura 112** Instalación del potenciómetro

## **CAPÍTULO 6**

### **OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

#### **6.1 PROTOCOLO DE PRUEBAS**

Una vez terminada la automatización de equipo, se procede a la verificación del correcto funcionamiento del mismo y verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos en el presente proyecto. Se planifica acciones con objeto de ensayo que permitan evaluar el desempeño en la repotenciación del equipo.

##### **6.1.1 NIVEL DE ACEITE TÉRMICO EN EL TANQUE ALIMENTADOR**

Como primera acción para poner en marcha el equipo es la verificación del nivel de aceite térmico en el tanque alimentador que permita la circulación por acción de la gravedad por todo el equipo. Este nivel no debe superar la mitad de la capacidad del tanque.

##### **6.1.2 APERTURA DE VÁLVULAS**

Se comprueba que tanto la válvula de globo ubicada a continuación del tanque alimentador como la válvula de bola ubicada a la entrada de la bomba estén abiertas y que permitan el paso libre del aceite térmico.

### **6.1.3 SISTEMA ELÉCTRICO**

#### **Encendido principal del equipo**

Se verifica el funcionamiento del interruptor ON/OFF, que permite la alimentación eléctrica a todo el sistema electrónico del equipo incluido la bomba y el motor que permite el giro de los concentradores.

#### **Funcionamiento del tablero de control**

Se comprueba que cada componente del tablero cumpla con su función, como son:

- La luz verde intermitente del microcontrolador este encendida, con lo cual comprobamos que el mismo está encendido y funcionando.
- La luz roja intermitente correspondiente al Bluetooth este encendida, lo cual indica que está existiendo la transmisión de datos entre el microcontrolador y la Tablet.
- El circuito de potencia para el giro del motor que principalmente está formado por dos relés, cada uno con un pulsador que permite girar de manera manual a los concentradores. A su vez comprobamos el funcionamiento de los fines de carrera, que están encargados de detener al motor cuando los concentradores giran hasta sus límites.

#### **6.1.4 TRANSFERENCIA DE DATOS ENTRE LOS SENSORES Y EL MICROCONTROLADOR.**

Para verificar el correcto funcionamiento de los sensores así como la correcta transferencia de los datos obtenidos por los mismos hacia el microcontrolador se procede a conectar la computadora al microcontrolador mediante un cable USB.

La computadora debe poseer el Software (Arduino), descargable en la página web [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc), el cual permite compilar la programación necesaria para la comunicación de los sensores y cuyo código fuente se encuentra en el Anexo 8. Este software a su vez permite monitorear con la opción "Monitor Serial" los datos enviados por cada uno de los sensores.

#### **6.1.5 CONECTIVIDAD BLUETOOTH**

La transferencia de datos entre el microcontrolador y la Tablet es por medio de Bluetooth, por lo tanto la Tablet tendrá que estar activada la opción del Bluetooth, para esto:

- En el menú principal de la Tablet nos dirigimos al icono correspondiente a "Configuración"

- En la sección de “CONEXIONES INALÁMBRICAS Y REDES”, verificamos que el Bluetooth este activado

Una vez que ingresemos a la aplicación “Colector Cilíndrico Parabólico”, instalado en la Tablet, al elegir la opción “BUSCAR DISPOSITIVO”, y a continuación en “OnmiTeck” con lo que se realizará la vinculación de la Tablet con el microntrolador o en otras palabras permitirá la comunicación entre ellos.

#### **6.1.6 INTERFAZ GRÁFICA**

El diseño de la Interfaz Gráfica detallado en el Capítulo 4.2.5 permite obtener un entorno amigable para poder visualizar todos los datos generados en los diferentes componentes del equipo en tiempo real y realizar un control manual en el giro de los concentradores para acciones de mantenimiento.

La pantalla principal cuenta con las siguientes opciones:

**POSICIONAR CONCENTRADOR.-** Nos permite girar a los concentradores en tres posiciones angulares diferentes ( $0^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$ ,  $180^{\circ}$ ), o en su defecto está programado para que cada minuto se posicione automáticamente de acuerdo a la hora del día.

DATOS DE PANELES.- Aquí podemos observar el comportamiento térmico en los elementos constitutivos de los concentradores y del aceite térmico que circula a través de ellos, tanto de una manera numérica como gráfica para una mejor visualización.

A su vez esta ventana nos permite direccionarnos hacia otras ventanas donde se puede visualizar los cálculos correspondientes al balance térmico (determinación de pérdidas de energía), ingresando previamente datos necesarios como son: Radiación Solar y Velocidad de Viento para ese instante de tiempo, estos valores deberán ser obtenidos con otros equipos del Laboratorio de Energías Renovables.

DATOS COCINA – DATOS TANQUE.- Poseen las mismas características que la ventana anterior, esta vez se visualizará datos y cálculos de la cocina y del tanque calentador.

GUARDAR.- Al momento de iniciar con la aplicación de la Tablet, automáticamente se irán guardando los datos obtenidos en los tres componentes del equipo. Los datos se almacenarán en un archivo con extensión “.xls”. Este botón sirve para generar dicho archivo, que para poderlo visualizar lo que tenemos que hacer es:

- En menú principal de la Tablet nos dirigimos al ícono “Ficheros”
- A continuación “Memoria interna”

- Y finalmente abrimos el archivo con el nombre "datos.xls"
- Nos aparece un arreglo de datos que corresponde al siguiente formato

"T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10 T11 T12 S1 S2",

donde:

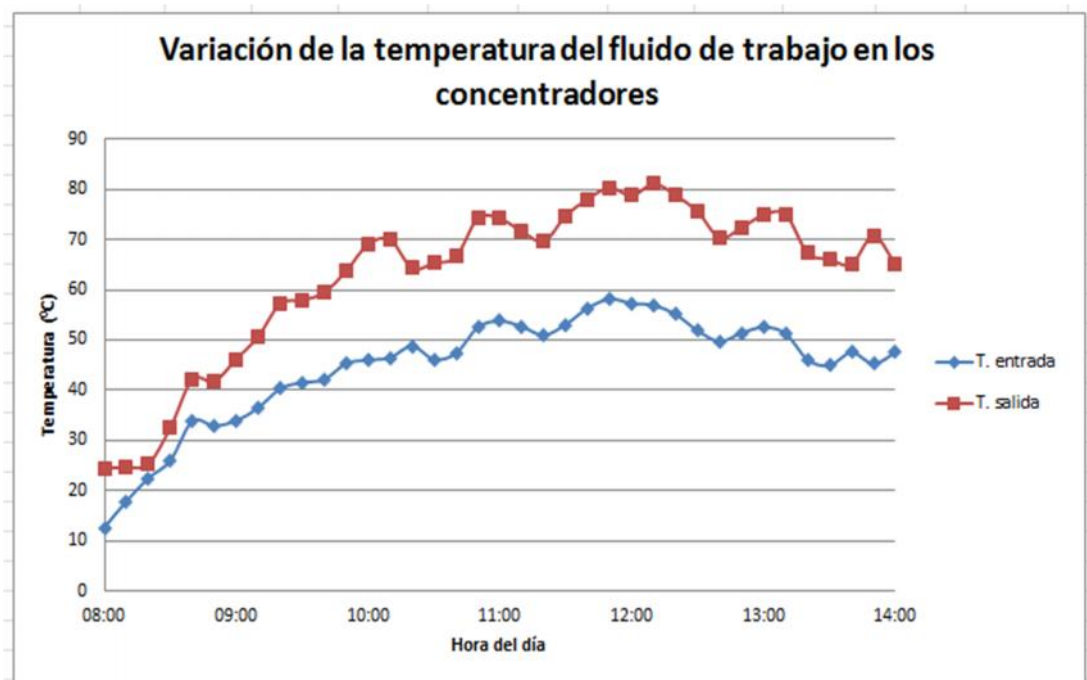
- T1 Temperatura del aceite térmico a la entrada del concentrador (°C)
- T2 Temperatura de la cubierta de vidrio (°C)
- T3 Temperatura del panel concentrador (°C)
- T4 Temperatura del tubo de cobre (°C)
- T5 Temperatura del aceite térmico a la salida del concentrador (°C)
- T6 Temperatura del aceite térmico a la entrada de la cocina (°C)
- T7 Temperatura de la bandeja de la cocina (°C)
- T8 Temperatura al interior de la tapa de la cocina (°C)
- T9 Temperatura al exterior de la tapa de la cocina (°C)
- T10 Temperatura del aceite térmico a la salida de la cocina, que también corresponde a la temperatura del aceite térmico a la entrada del tanque calentador (°C)
- T11 Temperatura del aceite térmico a la salida del tanque calentador (°C)
- T12 Temperatura ambiente (°C)
- S1 Caudal másico del aceite térmico (Kg/s)
- S2 Posición angular de los concentradores (°)



## 6.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

En el Anexo 11 se pueden observar los datos obtenidos del equipo durante algunos días. Se escogió un día al azar (5 de febrero del 2014), para el análisis de los resultados obtenidos.

La siguiente figura muestra los datos correspondientes a las temperaturas del fluido de trabajo tanto a la entrada como a la salida de los concentradores.



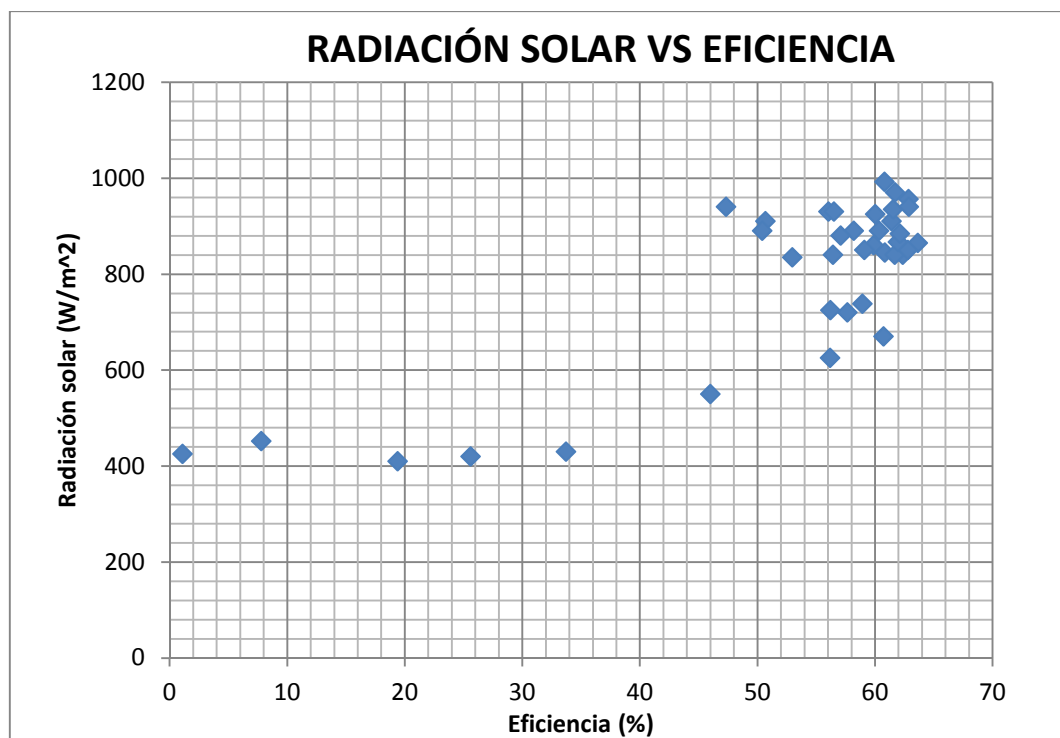
**Figura 113** Variación de la temperatura del fluido de trabajo en los concentradores

La figura 113 nos permite evidenciar que al equipo le toma un tiempo aproximado de una hora para alcanzar un equilibrio térmico, durante esta primera hora la razón de calentamiento del fluido de trabajo es relativamente

baja debido a que la energía absorbida del Sol durante este tiempo ha permitido el calentamiento de los elementos del equipo.

Una vez estable el equipo es capaz de incrementar la temperatura del fluido de trabajo de unos 18 °C durante su paso por los concentradores llegando a un valor de temperatura máximo de alrededor de los 80 °C.

La Figura 114 nos permite comprobar que la automatización del colector cilíndrico parabólico mejoró su capacidad, observando un aumento en su eficiencia con relación al prototipo inicial que llegaba a una eficiencia máxima de alrededor del 25%.



**Figura 114** Radiación solar vs Eficiencia

El seguimiento automático permitió aprovechar de mejor manera la componente directa de la radiación solar y permitió al equipo alcanzar una eficiencia máxima del 60%.

Los principales factores que afectan a la eficiencia podemos mencionar: pérdidas por absorptividad del tubo absorbedor y transmitancia del tubo envolvente de vidrio, pérdidas por reflexión y pérdidas por factor de forma que principalmente reducen la energía absorbida.

Además se puede observar como era de esperarse que la máxima eficiencia alcanzada está en dependencia a la radiación solar, siendo esta por generar más alta entre las 11:00 y 13:00 del día.

Vale la pena mencionar que el posicionamiento de los concentradores solares se lo lleva a cabo cada minuto de funcionamiento, evitando un movimiento brusco de los mismos y un seguimiento más preciso del Sol.

Con los resultados obtenidos, podemos concluir que el calor solar absorbido por el equipo puede emplearse en numerosos procesos residenciales, comerciales, industriales y agrícolas que requieren un grado de calor bajo, como por ejemplo en la calefacción ambiental de edificios residenciales, servicios de agua caliente, el secado de granos.

Aunque la inversión para la instalación de un equipo de estas características parezca costoso, el ahorro a un mediano plazo recompensa dicha inversión por el ahorro en el costo de los combustibles normalmente utilizados.

## **CAPÍTULO 7**

### **ANÁLISIS DE COSTOS**

#### **7.1 INTRODUCCIÓN**

En el presente subcapítulo se presentará un detallado análisis de los costos que incurrirán en la puesta a punto del colector cilíndrico parabólico, todo con la idea de cumplir los objetivos planteados y llegar a la culminación de este proyecto.

La repotenciación del equipo principalmente requirió de una inversión tanto para su mantenimiento correctivo por los múltiples daños que presentaba, así como para su mejoramiento y automatización.

#### **7.2 COSTOS DEL PROYECTO**

Son todos aquellos egresos de dinero que se deben realizar en el proyecto en el momento de su ejecución. Se debe diferenciar entre gastos y costos. Los costos son los que de manera directa o indirecta se encuentran ligados a la realización del proyecto en sí, en cambio los gastos son egresos en actividades de apoyo a la elaboración del proyecto.

El costo total del proyecto se lo obtendrá sumando los costos directos más los costos indirectos

### 7.2.1 COSTO DE MATERIALES DIRECTOS

Son todos los costos de materiales incurridos en la repotenciación del equipo y que son rápidamente identificables una vez que se encuentran montados. En las siguientes tablas se presentan los costos incurridos en materiales tanto en el mantenimiento del equipo como para su automatización.

**Tabla 17** Costo de los materiales directos para el mantenimiento del equipo

DESCRIPCIÓN	MATERIAL	CANT.	UN.	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
Tubo Ø480 x 2 x 1200 mm	Cuarzo	2	u	96,00	192,00
Tubo Ø480 x 2 x 800 mm	Cuarzo	2	u	65,00	130,00
Bomba	Varios	1	u	35,00	35,00
Neplo 1/2"x10	PVC	2	u	0,80	1,60
Reducción 1"x1/2"	PVC	2	u	0,65	1,30
Codo cachimba 1"	PVC	1	u	1,00	1,00
Manguera flexible	Caucho	2	m	10,00	20,00
Abrazaderas	Acero	15	u	0,50	7,50
Válvula Check 1/2"	Bronce	1	u	6,00	6,00
Válvula de globo 1/2"	Bronce	1	u	5,50	5,50
Tees 1"	Cobre	2	u	4,50	9,00
Terminal macho 1"	Cobre	2	u	4,00	8,00
Terminal hembra 1"	Cobre	1	u	4,50	4,50
Reducción 1"x1/2"	Cobre	4	u	2,50	10,00
Cañuelas L= 1m	Lana vidrio	8	u	10,00	80,00
Acoples	Duralón	3	u	35,00	105,00
Alumband	Aluminio	1,5	m	2,00	3,00
Pintura sintética		1	galón	35,00	35,00
Diluyente	Thinner	1	litro	2,50	2,50
Varillas para soldar	Plata	0,5	lb	8,00	4,00
Láminas reflectantes	Aluminio	12	m	1,00	12,00
<b>TOTAL</b>					<b>787,85</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 18** Costo de los materiales directos para la automatización del equipo

DESCRIPCIÓN	CANT.	PRECIO UNITARIO (USD)	PRECIO TOTAL (USD)
<b>MATERIAL ELÉCTRICO - ELECTRÓNICO</b>			
Motor eléctrico (12 Vdc)	1	80,00	80,00
Tablet 10"	1	300,00	300,00
Microcontrolador Arduino Mega ADK	1	80,00	80,00
Termocupla tipo K	4	38,00	152,00
Convertor termocupla tipo K	1	98,00	98,00
Sensor temperatura 120 digital	7	23,00	161,00
Sensor de flujo	1	45,00	45,00
Potenciómetro	1	50,00	50,00
Fuente 12V	1	50,00	50,00
Fuente 5V	1	48,00	48,00
Relés	2	10,00	20,00
Módulo 4 reles	1	25,00	25,00
Borneras arduino Mega	1	18,00	18,00
Interruptores ON/OFF	1	6,00	6,00
Cable AWG. 18	80	0,75	60,00
Fin de carrera	2	15,00	30,00
<b>SUBTOTAL 1</b>			<b>1223,00</b>
<b>OTROS</b>			
Caja reductora angular i=28	1	175,00	175,00
Piñón 40B x 60T	1	6,00	6,00
Piñón 40B x 12T	1	43,00	43,00
Cadena de transmisión	1	32,00	32,00
<b>SUBTOTAL 2</b>			<b>256,00</b>
<b>TOTAL</b>			<b>1479,00</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 19** Costo total de materiales directos

<b>COSTOS MANTENIMIENTO (USD)</b>	<b>787,85</b>
<b>COSTOS AUTOMATIZACIÓN (USD)</b>	<b>1479,00</b>
<b>COSTO TOTAL (USD):</b>	<b>2266,85</b>

## 7.2.2 COSTO DE MANO DE OBRA DIRECTA

Es el costo de la mano de obra que tiene una relación directa con la ejecución del proyecto y para este caso particular se lo divide para:

- Personal Asesor
- Ejecutores
- Personal Auxiliar

**Tabla 20 Costo Personal Asesor**

Posición	Horas - H	Valor H - H	Valor Total (USD)
Director	15	15	225.00
Codirector	10	15	150.00
<b>TOTAL</b>			<b>375.00</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 21v Costo Personal Ejecutor**

Posición	Horas - H	Valor H - H	Valor Total (USD)
Ejecutor 1	720	5	3600.00
Ejecutor 2	720	5	3600.00
<b>TOTAL</b>			<b>7200.00</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 22 Costo Personal Auxiliar**

Descripción	Valor Total (USD)
Tornería	200.00
Cerrajería	80.00
Soldadura Tuberías	100.00
Pintura	100.00
<b>TOTAL</b>	<b>480.00</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 23 Costo total de mano de obra directa**

PERSONAL ASESOR (USD)	375.00
PERSONAL EJECUTOR (USD)	7200.00
PERSONAL AUXILIAR (USD)	480.00
<b>TOTAL (USD)</b>	<b>8055.00</b>

### 7.2.3 COSTO DE MATERIALES INDIRECTOS

También se denominan costos generales y son costos que no se relacionan directamente con la ejecución del proyecto.

**Tabla 24 Costo de materiales indirectos**

Descripción	Costo (USD)
Útiles de Oficina	20.00
Transporte	80.00
Servicios Básicos	70.00
Impresiones	90.00
Copiado de textos	60.00
Varios	50.00
<b>Total</b>	<b>370.00</b>

Fuente: Orbea, E., Silva, J.; Ingeniería Inversa del CCP, 2014

**Tabla 25 Costo total del proyecto**

COSTOS DIRECTOS (USD)	8055.00
COSTOS INDIRECTOS (USD)	370.00
<b>COSTO TOTAL (USD)</b>	<b>8425.00</b>



### **7.3 ANÁLISIS COSTO - BENEFICIO**

El presente proyecto no está desarrollado con el fin de generar ingreso alguno, razón por la cual no aplica un análisis financiero propiamente dicho, ya que no presentará utilidad hablando en términos económicos y financieros.

La realización de este proyecto es para incentivar el estudio de las energías alternativas o renovables como una nueva fuente de generación de energía, quedando sobrentendido el gran beneficio que esto acarrea.

Es tiempo de seguir el ejemplo de otros países que se han preocupado en desarrollar equipos que utilizan el recurso solar para cumplir con muchas aplicaciones útiles y ya no ser tan dependientes de los derivados del petróleo.

El proyecto antecesor a este y con el cual se llegó a obtener un prototipo de un equipo solar fue un gran logro, al cual se le va a inyectar un costo adicional, dotándolo de mejoras en su funcionalidad, con miras a obtener un equipo único en el país con el cual se va a poder realizar ensayos obteniendo datos precisos en tiempo real y tener un conocimiento más profundo y práctico de su funcionamiento. Se espera que este sea el primero de muchos proyectos más sobre estudios de las energías renovables, buscando cada vez mejorar y con esto sacar el mayor provecho posible al recurso solar que lo tendremos por mucho tiempo más y evitando destruir al planeta.

## CAPITULO 8

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### CONCLUSIONES:

1. Con la culminación del presente proyecto se logró dotar al Laboratorio de Energía Renovables de la ESPE, de un equipo experimental con características únicas para el estudio más exacto de una nueva forma de generar energía aprovechando el recurso solar.
2. Mediante la utilización de este equipo se logró obtener una potencia máxima de 541,170 W, con una irradiancia promedio de 801 W/m<sup>2</sup>; con éstas variables se llegó a tener una eficiencia máxima de 62%, es importante indicar que estos valores fueron tomados en invierno.
3. Este equipo será destinado para operar en el laboratorio de Energías Renovables, ya que su costo de comercialización sería muy alto debido a los materiales utilizados, sin embargo queda abierta la posibilidad de un nuevo estudio para crear un nuevo prototipo que resulte menos costoso.

4. Para realizar un seguimiento preciso se optó por un mecanismo que se comporte de tal manera que la velocidad de giro sea lenta y logre vencer las inercias generadas por los concentradores.
5. La implementación del sistema electrónico en el colector, permitió un monitoreo constante y detallado de cada una de las variables de funcionamiento del colector en tiempo real.
6. Al realizar estudios de estos nuevos métodos de generación de energía, se incentiva a realizar nuevas investigaciones y mejoras en los equipos actuales, con esto podemos conservar los recursos naturales.

**RECOMENDACIONES:**

1. El colector solar requerirá de un mantenimiento periódico, debido a su ubicación en campo abierto, de esta manera se podrá obtener un funcionamiento óptimo y preciso tal como fue diseñado.
2. Tener cuidado con las partes frágiles del equipo, ya que son las más difíciles de conseguir en el mercado, por lo que se recomienda tener repuestos que permitan su rápida sustitución.
3. Tomar las debidas precauciones al momento de realizar prácticas ya que en algunas partes del equipo se genera altas temperaturas que podrían afectar la seguridad humana.
4. Una vez encendido el sistema electrónico del equipo verificar la hora actual de la Tablet, ya que de esto dependerá el posicionamiento exacto de los concentradores.
5. Analizar los datos obtenidos y llegar a conclusiones que permitan realizar mejoras en el estudio de este tipo de equipos para su posterior utilización en la industria.
6. Permitir la utilización del equipo a estudiantes de otras universidades con el fin de incentivar el estudio de las nuevas tecnologías de generación de energía más amigables con el planeta.

## REFERENCIAS

- Almanza, R., & Muñoz, F. (1993). *Ingeniería de la Energía Solar*. México: El Colegio Nacional.
- Benavides, S., & Guasumba, J. (2006). *Cocina Solar de Tipo Cilíndrico Parabólico*. Sangolquí.
- Bolton, W. (1990). *Sistemas de Control Electrónico en la Ingeniería Mecánica y Eléctrica*. México: Alfaomega.
- 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., & DeWitt, D. (1999). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. México: Prentice Hall.
- Jutglar, L. (2004). *Energía Solar*. Barcelona: Ceac.
- Mott, R. (2006). *Diseño de Elementos de Máquinas*. México: Pears.
- Rohner, P. (1990). *Control for Industrial Automation*. New York: Wiley.
- Sánchez, F. (2004). *Energía Solar*. España: Cencer.
- Shigley, J. (1989). *Manual de Diseño Mecánico*. México: McGraw Hill.